

Capítulo

4

Das Redes Vestíveis aos Sistemas Ciber-Humanos: Uma Perspectiva na Comunicação e Privacidade dos Dados

Michele Nogueira, Ligia F. Borges, Fernando Nakayama

Abstract

Cyber-physical and cyber-human systems have different characteristics from existing networks, including security properties and vulnerabilities from those found in traditional systems and networks. These systems require a high level of interoperability between devices and subsystems, predictability to allow control and they are subject to a broader range of attack models. With the evolution and popularization of cyber-physical and cyber-human systems, new security threats are emerging or increasing all the time. Data privacy and the guarantee of the availability of services need to be systematically investigated in this context. This short course contributes in this direction, attracting, at first, attention to the rapid evolution that has been taking place from the beginnings of wearable networks to cutting-edge research in nanonetworks. This rapid evolution underlies the construction of cyber-physical and cyber-human systems that have applications in several areas that will be explored in this short course.

Resumo

Os sistemas ciberfísicos e ciber-humanos possuem características diferentes das redes existentes, incluindo propriedades e vulnerabilidades de segurança diversas daquelas encontradas nos sistemas e redes tradicionais. Esses sistemas requerem um alto nível de interoperabilidade entre dispositivos e subsistemas, maior previsibilidade para permitir seu controle e estão sujeitos a um maior grupo de modelos de ataques. Com a evolução e a popularização dos sistemas ciberfísicos e ciber-humanos, novas ameaças de segurança emergem ou são potencializadas a todo momento. A privacidade dos dados e a garantia de disponibilidade dos serviços são questões que precisam ser investigadas de forma sistemática nesse contexto. Este minicurso contribui nesta direção atraindo, em um primeiro momento, a atenção para a rápida evolução que vem ocorrendo desde os primórdios das redes vestíveis até a pesquisa de ponta em nanorredes. Essa evolução rápida fundamenta a construção dos sistemas ciberfísicos e ciber-humanos que possuem aplicações em diversas áreas, exploradas neste minicurso.

4.1. Introdução

Diante da crise gerada pelo novo coronavírus, o relatório de Agosto de 2020 da empresa californiana *Global Industry Analysts, Inc.*, especializada em prover pesquisa de mercado, revisou as estimativas para o mercado global de sensores vestíveis, trazendo uma projeção de US\$ 2,5 bilhões de dólares americanos para o período de 2020 a 2027, ou seja, um crescimento de 25,2% [Analysts 2020]. As projeções de mercado refletem tendências de uso de dispositivos que integram tais sensores. A medida que a popularidade e a confiança do usuário em dispositivos dotados desses sensores aumentam, ocorrerão novos e variados vetores de ataques direcionados a invasões de privacidade, roubos de dados e negação de serviços [Ashibani and Mahmoud 2017, Yaacoub et al. 2020]. Esses sensores, posicionados dentro e fora do corpo, coletam dados de atividades dos usuários e do ambiente, permitindo a identificação de informações sensíveis por técnicas de inferência [Dong et al. 2019, Trimananda et al. 2020, Al-Shawabka et al. 2020].

Em todos esses casos, é de extrema importância garantir a disponibilidade, a privacidade e a transmissão confidencial dos dados do usuário, do ambiente e das aplicações a um repositório centralizado de dados/nuvem de processamento [Datta et al. 2018, Hafeez et al. 2020, Nakayama et al. 2019, Nogueira et al. 2009]. Por exemplo, diferentes tipos de sensores geram tráfego de dados característico, que pode ser detectado no meio de outras transmissões e usado para estimar o tipo específico de monitoramento realizado em um determinado indivíduo e outras informações importantes [Dong et al. 2019, Trimananda et al. 2020, Al-Shawabka et al. 2020, Prates et al. 2020, Tahaei et al. 2020]. Esse tipo de vazamento de privacidade do usuário ocorre por meio da análise do tráfego de dados gerado pelos sensores. Esses vazamentos de informação e a disponibilidade dos serviços precisam ser abordados de forma sistemática e com profundidade, diferente do que ocorre em geral, em que essas questões são exploradas de forma *ad hoc* por técnicas clássicas para a Internet e sem a preocupação de construir um embasamento científico para entender as ameaças contra a privacidade dos dados e a negação de serviços.

Os sistemas ciber-físicos (*Cyber-Physical Systems* – CPS) e ciber-humanos (*Cyber-Human Systems* – CHS) evoluem rapidamente, dando suporte à conexão de dispositivos heterogêneos, vestíveis, implantáveis no corpo humano (na escala nano, por exemplo) ou no ambiente. Os sistemas ciber-físicos e ciber-humanos tendem a transformar a maneira como interagimos com o mundo físico ao nosso redor em diferentes setores, como transporte, manufatura, agricultura, saúde, energia, defesa, aeroespço e construções [Rajkumar et al. 2010, Song et al. 2016]. O projeto, a implementação e a verificação de sistemas ciber-físicos e ciber-humanos apresentam uma infinidade de desafios técnicos que devem ser tratados por uma comunidade multidisciplinar de pesquisadores e educadores [Song et al. 2016]. Esses sistemas expandem o conceito de Internet das Coisas (IoT), pois são projetados considerando como parte nata a integração e a comunicação do ambiente físico ou humano com o ciberespaço [Yaacoub et al. 2020, Sharma et al. 2020].

Os sistemas CPS e CHS possuem características diferentes das redes existentes, incluindo propriedades e vulnerabilidades de segurança diversas daquelas encontradas nos sistemas e redes tradicionais [Ashibani and Mahmoud 2017, Ding et al. 2018]. Esses sistemas requerem um alto nível de interoperabilidade entre dispositivos e subsistemas, maior previsibilidade para permitir seu controle e estão sujeitos a um maior grupo de

modelos de ataques. Com a evolução e a popularização dos CFS e CHS, novas ameaças de segurança emergem ou são potencializadas a todo momento. A privacidade dos dados e a garantia de disponibilidade dos serviços são questões que precisam ser investigadas de forma sistemática nesse contexto, considerando a reprodução dos experimentos e a identificação de seus limites fundamentais.

Este capítulo de livro contribui nesta direção atraindo, em um primeiro momento, a atenção para a rápida evolução que vem ocorrendo desde os primórdios das redes vestíveis até a pesquisa de ponta em nanoredes. Essa evolução rápida fundamenta a construção dos sistemas ciber-físicos e ciber-humanos que possuem aplicações em diversas áreas que serão exploradas neste minicurso. A forte aplicabilidade dessas redes, em conjunto com regulações mundiais relacionadas à proteção dos dados, nos remetem à necessidade de explorar as vulnerabilidades e desafios que essas redes possuem em relação à privacidade dos dados e resiliência de seus serviços. Assim, trazemos uma discussão neste sentido, demonstrando através de exemplos práticos essas fragilidades e também um levantamento do estado da arte de propostas acadêmicas para a proteção da privacidade e resiliência de seus serviços. Por fim, serão ressaltadas as perspectivas futuras associadas aos desafios e questões de pesquisa em aberto.

4.2. Fundamentação

Esta seção apresenta uma síntese do contexto histórico e evolutivo das redes vestíveis rumo aos sistemas ciber-físicos e ciber-humanos, a motivação para esses sistemas e uma visão geral. Esta seção se organiza nas seguintes subseções: (i) contexto histórico, (ii) conceitos importantes e (iii) formas de comunicação e tecnologias. Esta estrutura foi concebida a fim de prover um entendimento amplo do tema e suportar ideias em prol a evoluções no tema.

4.2.1. Contexto histórico

Resgatando o contexto histórico, consideramos justo mencionar que a proposição de equipamentos vestíveis iniciou-se no século XIII com a invenção dos óculos de grau com o objetivo claro de melhorar a visão dos usuários. A maioria dos dispositivos atuais são considerados inteligentes por terem a capacidade de processar dados e acessar a Internet. Entretanto, dispositivos que trazem uma melhor experiência aos usuários também podem ser considerados inteligentes. Sendo assim, os óculos de grau podem ser considerados um caso precoce de dispositivo vestível inteligente [Ometov et al. 2021]. A linha evolutiva até a aparição dos dispositivos computacionais vestíveis compreende uma série de pequenos avanços em conceitos e equipamentos, dentre os quais podemos citar os relógios de bolso, ábacos portáteis, rádios de comunicação, câmeras portáteis, relógios de pulso, entre outros. A Figura 4.1 ilustra os marcos históricos que contribuíram para o desenvolvimento das redes vestíveis e das nanoredes.

O primeiro exemplo de dispositivo vestível com poder computacional foi concebido por Edward Thorp em 1955. O dispositivo era um pouco maior que uma caixa de fósforos e podia ser furtivamente posicionado na sola de um sapato com o objetivo de prever os resultados da roleta de um casino [Thorp 1998]. Nos anos seguintes, surgiram os relógios com calculadora e os sistemas de áudio portáteis. Aos poucos, a evolução

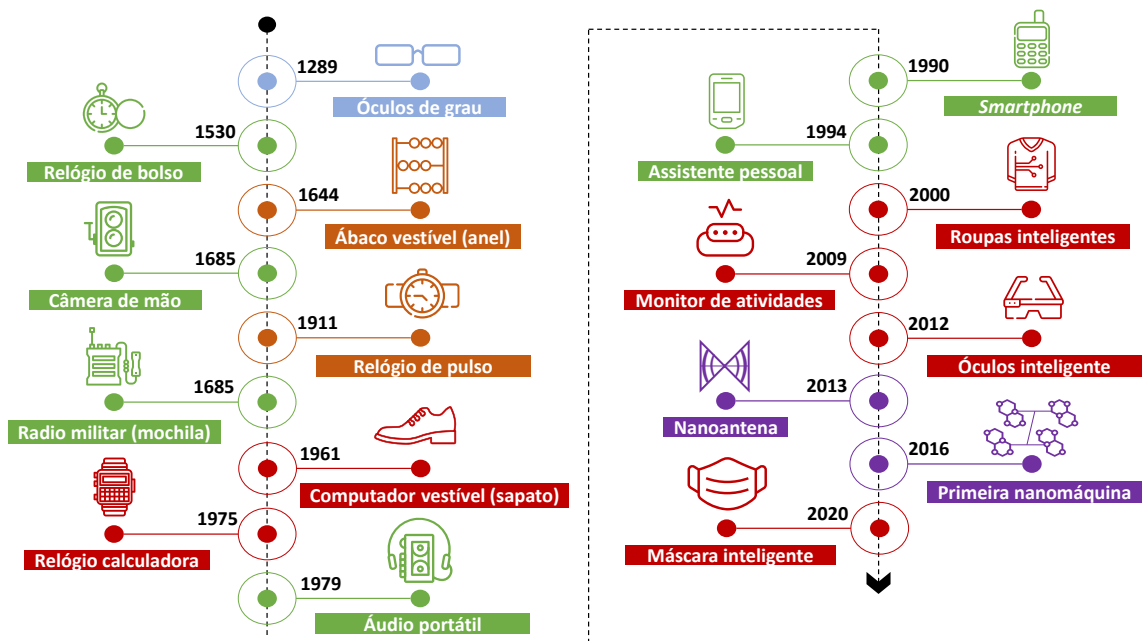


Figura 4.1: Marcos históricos na evolução das redes vestíveis e nanorredes

tecnológica e os avanços nos processos de engenharia permitiram que novos dispositivos fossem criados e se tornassem parte do nosso cotidiano. Hoje, a utilização dos dispositivos portáteis e vestíveis existentes no mercado se tornou tão corriqueira que quase não se nota a importância dos seus predecessores no contexto histórico da evolução dos vestíveis.

Os dispositivos computacionais portáteis, como assistentes pessoais digitais, sistemas de localização e sistemas de pagamento móveis, pavimentaram o caminho para o surgimento de novos conceitos. Seguindo a linha evolutiva dos dispositivos computacionais portáteis e vestíveis podemos citar os *smartphones*, relógios inteligentes, monitores de atividades físicas e roupas inteligentes. Esses novos equipamentos e tecnologias apoiados nos novos patamares de portabilidade e usabilidade oferecem suporte aos sistemas ciber-físicos e ciber-humanos.

A evolução dos dispositivos computacionais segue uma clara tendência rumo a dispositivos mais compactos e portáteis. A Figura 4.2 representa essa evolução histórica considerando os principais marcos na evolução dos dispositivos computacionais comerciais. Os primeiros computadores disponíveis eram grandes em tamanho, ocupavam um grande volume de espaço e tinham alto custo de aquisição e operacional. Sendo assim, seu uso era restrito às grandes empresas e corporações. Com o advento de tecnologias como o circuito integrado o processo de miniaturização dos dispositivos ganhou força e os computadores se tornaram menores, mais baratos, e mais disponíveis [Moore 1998]. As redes vestíveis e em escala nano representam o presente e futuro dessa evolução.

Os sistemas ciber-físicos representam a integração de processos computacionais, processos relacionados às redes de comunicação e processos físicos. Embora grande parte dos sistemas computacionais tenha o foco em pessoas utilizando os sistemas, muitos sistemas complexos são uma combinação de computadores e pessoas em busca de um objetivo comum. As pessoas são uma parte primordial desses sistemas, uma vez que elas intera-

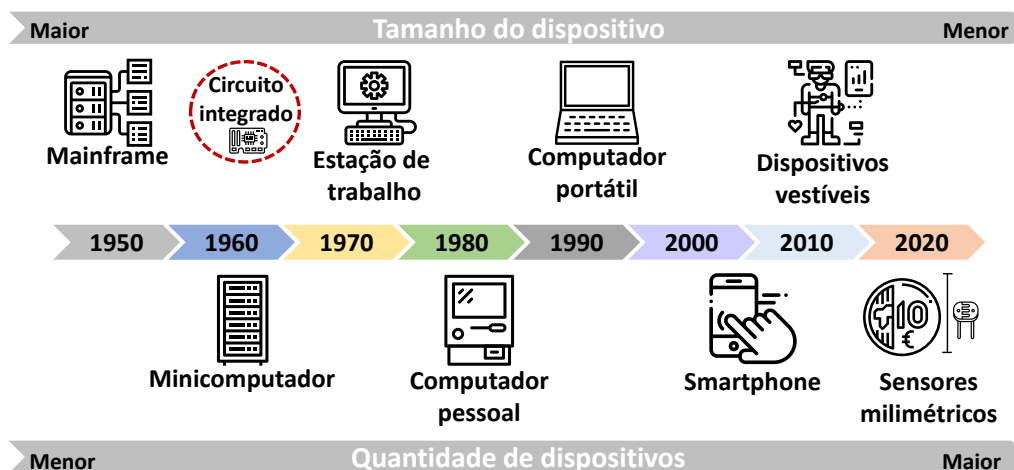


Figura 4.2: Linha do tempo da miniaturização dos computadores

gem ativamente e também fazem parte dos mesmos. Sendo assim, os componentes dos sistemas ciber-humanos trabalham em conjunto para atingir os objetivos estipulados para o sistema, que na maioria dos casos estão alinhados com os objetivos humanos. Nesse contexto, os dispositivos vestíveis (ou apenas “vestíveis”) desempenham um papel fundamental e atuam como facilitadores na construção do ambiente ciber-humano. Através dos dispositivos e das redes vestíveis, os usuários interagem de forma fácil, rápida e fluida com os outros componentes do sistema e com o sistema ciber-humano como um todo.

Os dispositivos vestíveis têm atraído a atenção da comunidade acadêmica e da indústria, aumentando sua popularidade por diferentes aplicações. Em Janeiro de 2021, a empresa Gartner publicou as principais tendências tecnológicas para o próximo ciclo de ápice [IDTechEX 2021]. Dentre elas, estão as associadas com os ambientes inteligentes com uma maior integração entre os dispositivos, os usuários e os negócios através de dispositivos vestíveis capazes de coletar e fornecer informações, de modo transparente, sobre os usuários e criar condições para maior qualidade de vida. Por dispositivos vestíveis, entendem-se aqueles usados, acoplados ou implantados no corpo humano para monitorar continuamente as atividades de um indivíduo, sem interromper ou limitar os movimentos [Gao et al. 2016].

Os dispositivos vestíveis disponíveis atualmente são um notável avanço em relação às gerações anteriores, mesmo assim ainda estão em uma fase embrionária de desenvolvimento. Muitos usuários sentem a necessidade de combinar dispositivos, um rastreador de atividades físicas e um *smartphone* por exemplo, pois nenhum deles oferece todas as características desejadas como a coleta constante de sinais vitais, bateria de longa duração, alto poder de processamento, entre outras. De fato, o ecossistema dos equipamentos vestíveis compreende uma grande variedade de dispositivos que isoladamente ou de forma integrada podem oferecer uma qualidade de experiência sem precedentes. Sendo assim, os dispositivos vestíveis, mesmo com algumas restrições, têm o potencial de mudar a vida dos usuários da mesma forma que os *smartphones* fizeram nos últimos anos. Isso também se refletirá nos sistemas sem fio de telemetria médica, que serão compostos por diversos sensores e dispositivos em micro e nanoescala que serão implantados no corpo humano para fornecer um monitoramento mais sensível da saúde, detecção e tratamento de doenças em tempo real.

Os principais fatores que moldaram a atual geração de dispositivos vestíveis foram a miniaturização dos componentes que permitiu avanços na portabilidade, o avanço das redes de comunicação sem fio, os avanços na computação baseada em eficiência energética, e os avanços nos sensores e telas empregados nos vestíveis. Mesmo com melhorias notáveis nas tecnologias envolvidas na construção dos dispositivos, alguns temas continuam sendo foco de pesquisa da indústria e da comunidade acadêmica. Os dispositivos vestíveis dependem de baterias e/ou processadores de baixa capacidade que requerem ajustes e otimizações tanto em nível de hardware quanto em nível de software. É importante observar que as pesquisas relacionadas aos dispositivos vestíveis podem impactar beneficemente algumas áreas relacionadas, como o desenvolvimento de novos protocolos de comunicação sem fio e melhorias nos protocolos existentes, além de avanços relacionados à eficiência energética.

4.2.2. Conceitos

Ao observar a evolução e miniaturização dos dispositivos computacionais, nota-se que os atuais dispositivos de pequeno porte dotados apenas de sensores e sistemas embarcados desempenham funções equivalentes a dispositivos de grande porte das gerações anteriores. Aliados a outros equipamentos de comunicação e sensoriamento esses dispositivos têm a capacidade de monitorar as condições de uma pessoa ou de um ambiente, e interagir com o mundo físico através de sinais visuais, atuadores, ou robôs, por exemplo. Entretanto, as ações que acontecem no mundo virtual carecem de uma maior integração com as possíveis respostas apresentadas no mundo físico. O termo ciber-físico foi cunhado por Raj Rajkumar, professor da Universidade *Carnegie Mellon* nos Estados Unidos da América, enquanto ele realizava uma apresentação. A definição apresentada e consolidada desde então é de um sistema que combine os aspectos computacionais, de comunicação e de armazenamento de dados, com o objetivo de monitorar e, eventualmente, controlar as entidades que existem no mundo físico [Rajkumar et al. 2010].

O sistemas ciber-humanos possuem as mesmas bases fundamentais dos sistemas compostos de dispositivos ciber-físicos (sensores, atuadores, dispositivos, tecnologias de comunicação, armazenamento de dados, etc). Entretanto, nos sistemas ciber-humanos as pessoas também desempenham funções primordiais. Algumas vezes o papel das pessoas é ativo e exige interação direta com os outros componentes do sistema. Em outras, o papel é passivo como por exemplo quando se analisa o comportamento humano. Em ambas situações as pessoas são peça chave para o correto funcionamento do sistema, seja atuando como operadores ou como parte passiva do sistema. Um dos conceitos que ilustra os sistemas ciber-humanos é o de “pessoas como sensores”, onde as observações de um sistema são feitas não somente por sensores e dispositivos mas também pelas observações subjetivas dos seres humanos [Resch 2013].

É possível diferenciar uma pessoa participante do sistema ciber-humano de um sistema ciber-físico tradicional através de três características: (i) cognição, (ii) previsibilidade e (iii) motivação [Sowe et al. 2016]. A cognição humana é extremamente diferente dos dispositivos ciber-físicos que empregam sensores e processadores. Seres humanos utilizam a função cerebral, a visão e a audição como forma de cognição. Essas diferenças na forma de interpretar o ambiente que nos cerca representam os desafios e as oportunidades na integração homem-máquina. As pessoas são mais imprevisíveis que os dispositivos

computacionais, mesmo ao realizar uma mesma tarefa de forma repetitiva. Entretanto, as pessoas têm mais facilidade de se adaptar a situações de mudança constante e podem oferecer soluções inovadoras. Finalmente, as pessoas necessitam de algum tipo de motivação ou compensação para executar uma função.

A atual geração de dispositivos computacionais portáteis incorpora uma categoria específica de equipamentos que beneficiam intensamente os sistemas ciber-humanos, os dispositivos computacionais vestíveis. Os vestíveis são dispositivos computacionais posicionados sobre uma parte do corpo humano ou implantados no mesmo. Geralmente, eles combinam tecnologias permitindo a visualização de informações através de telas, a entrada de dados através de toque ou voz, a transferência de dados através de tecnologias de comunicação, baterias internas, e o processamento e armazenamento de dados. Os vestíveis buscam atender a dois objetivos principais: (i) a mobilidade, (ii) e a sensibilidade ao contexto. Por serem extremamente portáteis, eles estão sempre com o usuário e acompanham-o em qualquer situação, integrando diversos sensores (ex. sistema de posicionamento global, giroscópio, monitores de sinais vitais) e capazes de interagir com o ambiente e com o usuário.

As funcionalidades dos dispositivos vestíveis dependem dos sensores integrados a eles e do posicionamento do mesmo no corpo humano. A Figura 4.3 ilustra as possibilidades de posicionamento dos vestíveis no corpo humano. Os dispositivos vestíveis podem ser posicionados na cabeça, região do tronco, mãos, braços e pernas, além de poderem ser implantados em diferentes partes do corpo. As principais funcionalidades são auxiliar a localização através do sistema de posicionamento global, a medição de sinais vitais (variação cardíaca, oxigenação do sangue, etc), auxílios visuais (realidade aumentada), e a troca de informações através de tecnologias de comunicação. Os dispositivos vestíveis têm a capacidade de se comunicar entre si e/ou com *gateways* utilizando tecnologias de comunicação sem fio. Os dispositivos vestíveis conectados entre si e com os demais componentes de uma rede ciber-humana formam uma rede vestível. As redes vestíveis são usualmente compostas de múltiplos dispositivos, gerando um grande volume de dados.

Particularmente no domínio da saúde, as redes IoT e vestíveis impulsionaram o conceito da Internet das coisas da saúde, do inglês *Internet of Health Things* (IoHT). IoHT refere-se a uma infraestrutura composta de dispositivos relacionados à saúde conectados entre si e/ou à Internet. A IoHT revolucionou a medicina e a saúde, fornecendo acesso fácil a dados relacionados à saúde para usuários e profissionais da área e abrindo um mundo de possibilidades. Ela oferece a comunicação entre dispositivos de saúde e a *Internet*, a coleta contínua de características pessoais e do ambiente, a possibilidade de atendimento remoto e orientações de sintomas e tratamentos, proporcionando aos pacientes um maior controle sobre suas vidas. Existe um grande número de aplicações IoHT voltadas para a medicina inteligente, como a supervisão contínua do tratamento do câncer e monitoramento de glicose, a automação da administração de insulina, o controle dos sintomas da asma entre outros. A IoHT ganha gradualmente a atenção da academia e da indústria que, motivada pelo envelhecimento da população, muda a prestação de cuidados ao paciente de dentro das instituições tradicionais para um atendimento contínuo em qualquer lugar e a qualquer hora.

Os dados transmitidos através de uma rede vestível são de extrema importância



Figura 4.3: Posicionamento dos dispositivos vestíveis no corpo humano

pois representam características pessoais de um usuário como: quem ele é, sua localização, e seu estado de saúde. Sendo assim, é essencial que se adote medidas de segurança para assegurar a privacidade dessas informações. Entretanto, os vestíveis possuem particularidades que dificultam a implementação de mecanismos de segurança tradicionais como criptografia complexa e assinaturas e chaves digitais. Dentre os fatores limitantes os mais evidentes são o poder de processamento moderado, a baixa largura de banda nos canais de comunicação, e restrições no armazenamento das informações. Adicionalmente, as redes vestíveis utilizam tecnologias de comunicação sem fio, tornando-as mais expostas a ameaças. Sendo assim, adotar mecanismos de segurança em ambientes ciber-humanos é uma tarefa complexa e um problema a ser confrontado.

Os mecanismos de segurança computacional visam fornecer simultaneamente a disponibilidade no uso dos dispositivos para usuários autorizados, a confidencialidade e a integridade dos dados disseminados na rede vestível [Laprie et al. 2004]. O vazamento de dados pessoais é uma das principais preocupações no tocante à segurança nas redes vestíveis. Estudos apontam que grande parte dos consumidores não se sentem à vontade ao compartilhar dados pessoais nem em receber informações privadas de colegas ou parentes [Perez and Zeadally 2017]. As principais preocupações associadas à quebra da privacidade em redes vestíveis estão relacionadas ao uso indevido dos dados e suas implicações, como a divulgação de informações em redes sociais, o uso das informações para extorsão ou ameaças, e a divulgação de dados não autorizada por parte de prestadores de serviço. Outro aspecto de segurança relevante é a resiliência na coleta e na transmissão das informações. As redes vestíveis fornecem suporte a aplicações que envolvem rico de vida, como o monitoramento de pacientes em tempo real, tornando-se essencial um ambiente capaz de lidar com eventuais problemas de sensoriamento e comunicação.

Os dispositivos intracorporais são compostos por componentes biológicos e eletrônicos com dimensões de milímetros a escala micrométrica/nanométrica. São denominados de nanomáquinas, ou seja, pequenos componentes (0.1-10 micrômetros) consistindo

em um conjunto de moléculas organizadas capazes de realizar tarefas de computação, detecção e/ou atuação muito simples. As nanomáquinas naturais são amplamente encontradas na natureza e são responsáveis pela contração muscular, pela locomoção das bactérias e dos espermatozoides, pela divisão celular, pela replicação de DNA e outros. As nanomáquinas sintéticas são produzidas pelo homem e já são uma realidade. Recentemente, Sir Fraser Stoddart (vencedor do prêmio Nobel de química, 2016) apresentou uma nanomáquina com quatro motores moleculares que desempenham o papel de rodas e são capazes de realizar movimentos unidirecionais quando expostas à luz ultravioleta [Richard Van Noorden 2016].

A biologia sintética é o campo de pesquisa interdisciplinar da engenharia abrindo um caminho viável para a realização prática de sistemas ciber-físicos com capacidade de comunicação molecular através da programação do código genético das células [Akyildiz et al. 2019]. Por meio da biologia sintética, os engenheiros têm projetado bio-dispositivos em micro e nanoescala baseados em células que são semelhantes aos dispositivos eletrônicos convencionais [Koucheryavy et al. 2021]. Uma rede/nanorede surge da comunicação entre esses dispositivos em micro/nanoescala baseados em células por meio de sistemas de comunicação molecular, i.e., sistemas que utilizam moléculas para codificar a informação. A comunicação intencional e controlada de dados entre as nanomáquinas e bio-dispositivos é essencial para viabilizar o trabalho coordenado e a realização de tarefas mais complexas, pois os dispositivos miniaturizados possuem restrições computacionais de processamento, armazenamento de dados e energia.

4.2.3. Formas de comunicação e tecnologias

Os sistemas ciber-humanos abrangem três tipos fundamentais de comunicação e suas tecnologias: (i) intracorporal, (ii) curta distância, (iii) longa distância. A Figura 4.4 ilustra os tipos de comunicação existentes. Os sistemas de comunicação intracorporais compreendem um conjunto de dispositivos e sensores que atuam em áreas específicas do corpo humano. Para se comunicar com redes externas, incluindo a Internet, esses sistemas utilizarão um dispositivo tradutor (ou seja, interface bio-cibernética) que converterá qualquer sinal biológico em sinal elétrico aplicado para redes de computadores de nível macro. O dispositivo tradutor pode se comunicar com os vestíveis a partir de tecnologias de comunicação de curta distância (Bluetooth, NFC, Wi-Fi). Essas tecnologias são empregadas na comunicação entre os vestíveis e também para acessar dispositivos coordenadores ou *gateways* de acesso à Internet. As tecnologias de acesso de longa distância (banda larga fixa, rede celular) permitem que as informações obtidas a partir dos dispositivos nanoescala ou vestíveis cheguem até a Internet.

De forma geral, os sistemas de comunicação (em nano, micro e macro escalas) seguem os passos de codificação dos dados no sinal, transmissão, propagação do sinal, recepção do sinal e decodificação dos dados (mensagem). Na comunicação intracorporal a codificação e a transmissão são realizadas pelo nó transmissor (nanomáquina, bio-dispositivo ou nanorrobô) e a recepção e decodificação realizadas pelo nó receptor (nanomáquina, bio-dispositivo ou nanorrobô). A propagação do sinal ocorre no canal de comunicação. O canal de comunicação das redes internas é o corpo humano (sangue, células, órgãos, entre outros) que faz o papel de caminho físico em que o sinal se propaga entre os nós transmissores e receptores. Na literatura existem três principais paradigmas

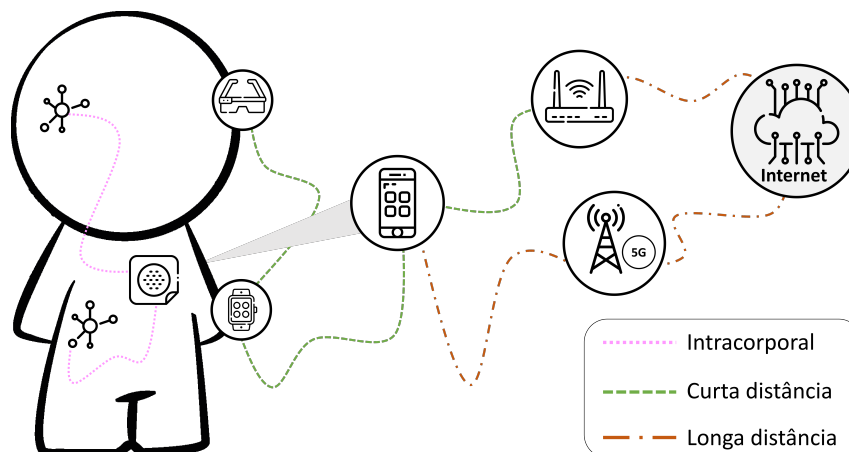


Figura 4.4: Tipos de comunicação em sistemas ciber-humanos

de comunicação em micro e nanoescala que foram consideradas para fornecer a interconexão entre dispositivos em uma rede intracorporal: comunicação acústica, comunicação eletromagnética, e comunicação molecular.

Na comunicação acústica, utiliza-se a variação de pressão para transmitir informações. As ondas acústicas são caracterizadas pela propagação em diferentes tipos de ambientes com bom desempenho, principalmente em comparação com as ondas eletromagnéticas. O atrativo para o uso intracorporal desse tipo de comunicação é a alta eficiência dessas ondas ao penetrarem tecidos e organismos biológicos [Hogg and Freitas Jr 2012]. A literatura atual das nanorredes baseadas em ondas acústicas focam principalmente no desenvolvimento de dispositivos acústicos como sensores, geradores e detectores de som habilitados para serem construídos com nanomateriais leves [Ding et al. 2019, Tao et al. 2020]. Embora muitos instrumentos de diagnóstico sejam baseados em microondas, que são consideradas não perigosas para os seres humanos [Loscri and Vegni 2015], o aquecimento causado pelas ondas ultrassônicas no tecido deve ser profundamente investigado para a viabilidade da comunicação acústica interna. As variações de pressão da onda de ultrassom causam bolhas no meio de propagação que podem atingir valores elevados e causar efeitos biológicos indesejáveis. Como o efeito é um fenômeno dependente da frequência de oscilações e pressão, o ciclo de trabalho e frequência devem ser investigados para definir valores seguros [Santagati and Melodia 2014].

As nanorredes baseadas em ondas eletromagnéticas estão fundamentadas na transmissão e recepção de radiação eletromagnética a partir de nanodispositivos (*i.e.*, nanoantenas, nanorrádio, nanotransceptor eletromecânico) compostos por novos nanomateriais como nanotubos de carbono e nanofitas de grafeno [Pfeiffer et al. 2018]. Estudos já provaram que antenas de grafeno podem funcionar na banda Terahertz (THz) [Da Costa et al. 2009]. Dessa forma, acredita-se que os nanodispositivos se comunicarão potencialmente entre 0,1-10 THz. Entretanto, os efeitos da radiação eletromagnética no tecido vivo pode ser considerado um problema na implementação dessa comunicação em sistemas ciber-físicos. Mesmo sob o atual limite de segurança de 1 mW/cm^2 os efeitos sobre a radiação THz dentro do corpo humano ainda é uma

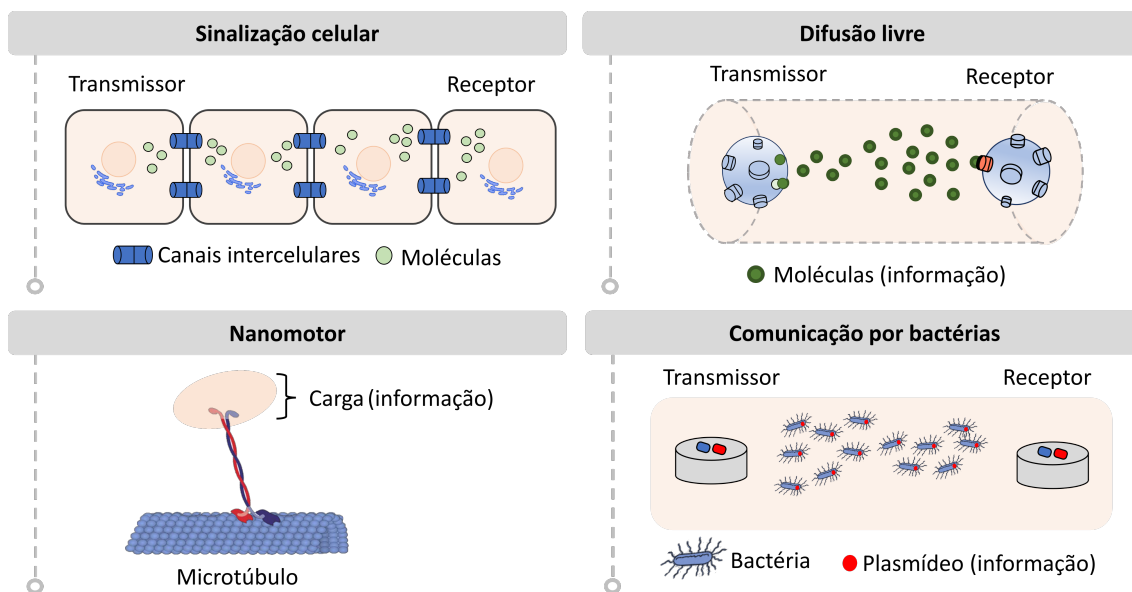


Figura 4.5: Representação das comunicações moleculares

questão em aberto [Mcguiness et al. 2019]. Existem análises experimentais em outras espécies que mostram danos no DNA sob a influência de curto prazo da radiação THz [Titova et al. 2013, De Amicis et al. 2015]. Contudo, sabe-se atualmente que o corpo humano tem adaptações contra a radiação eletromagnética se a fonte de radiação estiver fora do corpo [Jablonski and Chaplin 2010].

As redes baseadas em comunicação molecular (CM) são diretamente inspiradas por sistemas de comunicação entre entidades presentes na natureza e seus sistemas biológicos. Para projetar sistemas de CM sintética a comunidade de pesquisa adotou elementos distintos de processos bioquímicos e os resumiu em modelos matemáticos. Duas classes principais de esquemas de codificação de informação são considerados. Um depende do tipo de partícula empregada (por exemplo, neurotransmissores, mensageiros intracelulares, moléculas, bactérias) e o outro depende da maneira como as partículas são propagadas no meio (por exemplo, difusão livre e sinalização célula-célula). Entre os vários mecanismos diferentes que foram considerados para a comunicação molecular estão: (i) comunicações por difusão molecular como a sinalização celular e a difusão livre que codificam a informação em moléculas; (ii) nanorredes baseadas em bactérias (a informação é codificada no plasmídeo da bactéria); (iii) nanorredes por motores moleculares que transportam nanopartículas de informação (Figura 4.5).

A difusão é uma das principais formas de transporte de materiais que as células usam para receber componentes que darão suporte a sua funcionalidade e sobrevivência. O modelo de canal de comunicação mais estudado em CM são os baseado em difusão. Nessa comunicação os bio-dispositivos que fazem o papel de nós transmissores e receptores são células híbridas, ou seja, que possuem partes orgânicas e circuitos eletrônicos. A difusão por sinalização celular (sinalização por íons de cálcio, potássio entre outros) reside em uma comunicação célula-célula geralmente mediada por junções comunicantes (canais que ligam células adjacentes). Após uma reação química (isto é, reação-difusão)

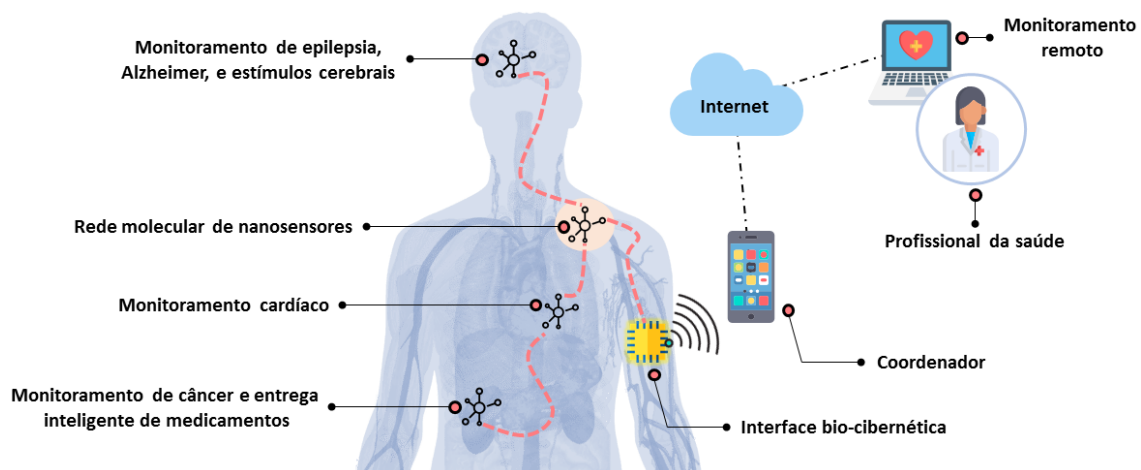


Figura 4.6: Representação das comunicações moleculares

que regula a amplificação de moléculas, os sinais são transmitidos ao longo das membranas celulares e geram uma determinada reação (*e.g.*, duplicação celular, liberação de hormônios, entre outros) na célula emissora ou as células imediatamente adjacentes.

Na difusão livre as moléculas se propagam livremente pelo espaço entre as nanomáquinas transmissora e receptora executando o movimento Browniano (aleatório). A informação é codificada na concentração e/ou tipo de molécula. O canal de comunicação dentro do corpo é por exemplo a corrente sanguínea e os neurônios. Nas comunicações moleculares baseadas em bactérias a informação é codificada no plasmídeo da bactéria. A nanomáquina receptora libera no canal um componente para atrair as bactérias que se locomovem no fluido em movimento aleatório entre o transmissor e receptor. Nas comunicações moleculares baseadas em nanomotores um nanomotor carrega uma grande partícula por um filamentos de microtúbulos até o seu receptor. Um nanomotor é uma classe de máquina molecular capaz de converter uma fonte de energia aplicada sobre ele (por exemplo moléculas de trifosfato de adenosina - ATP) em energia mecânica para realizar um trabalho específico como andar e girar.

A Figura 4.6 representa a variedade de sistemas de comunicação que podem ser implementadas dentro do corpo humano e interconectadas por meio de interfaces bio-cibernéticas. A interface bio-cibernética troca dados com o coordenador que possui maior capacidade computacional que por suas vez interage com a Internet para permitir o monitoramento e controle remoto dos dispositivos intracorporais. As comunicações moleculares baseadas em sinalização celular sintética ao se conectarem com tecidos celulares naturais através de suas junções comunicantes podem monitorar e tratar patologias que ocorrem em tecidos e órgãos. As comunicações baseadas em difusão livre são uma opção para transportar as informações das redes de sinalização celular até a interface bio-cibernética através da corrente sanguínea. As ondas acústicas podem ser utilizadas para ativar dispositivos de estimulação cerebral ou uma população de bactérias a produzirem sinais de detecção de quorum que podem afetar as populações bacterianas naturais (como por exemplo as bactérias das paredes do intestino) ou geneticamente modificadas.

Além da evolução computacional que impacta no tamanho e no poder de proces-

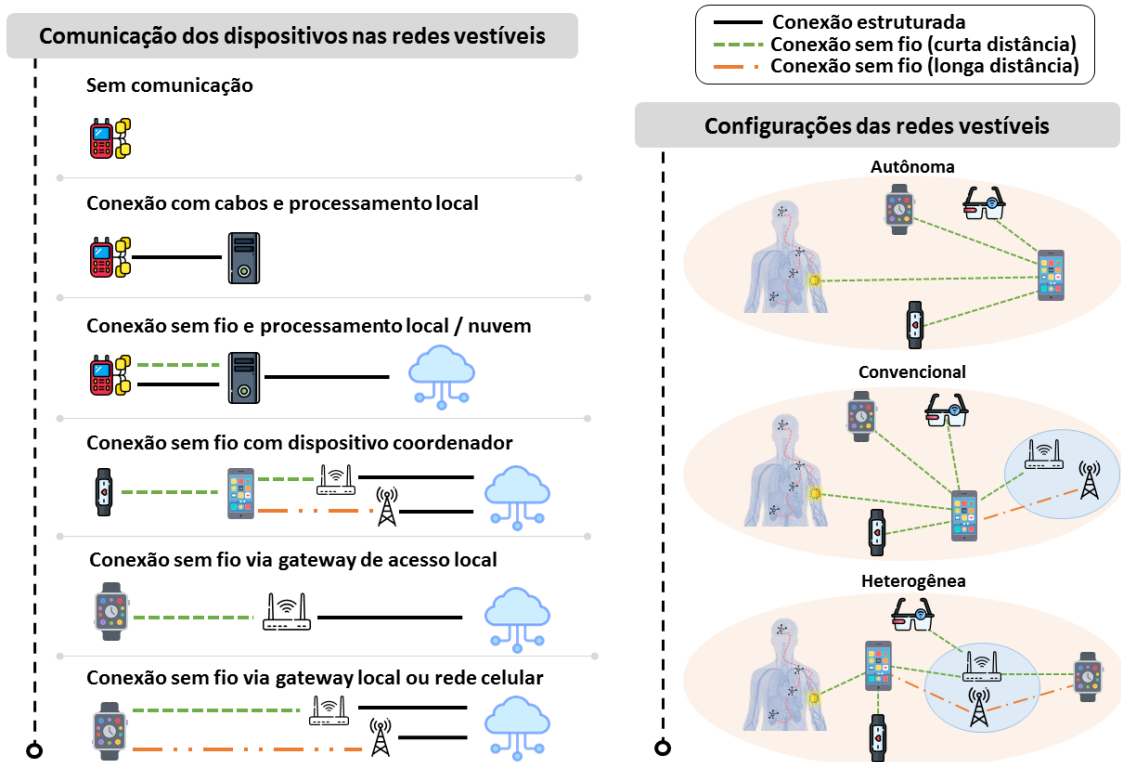


Figura 4.7: Comunicação dos dispositivos e evolução das redes vestíveis

samento dos dispositivos, a evolução nas tecnologias de comunicação sem fio também proporciona novas perspectivas para as redes vestíveis. Essa evolução beneficia a mobilidade das pessoas, trazendo maior praticidade e qualidade de vida ao usuário e permitindo o uso dos dispositivos em diversos cenários. As novas gerações de dispositivos vestíveis incorporam as tecnologias de comunicação emergentes, mas ao mesmo tempo precisam ser compatíveis com dispositivos e equipamentos de comunicação existentes. A variedade de dispositivos e tecnologias de comunicação proporcionam diversas formas comunicação entre os vestíveis e configurações para as redes. A Figura 4.7 apresenta os principais tipos de comunicação existentes para os vestíveis e as configurações para as redes vestíveis.

Os primeiros dispositivos vestíveis eram desprovidos de comunicação externa, cabendo ao próprio dispositivo coletar os dados, realizar o processamento, e exibir as informações. Em uma segunda etapa da evolução, os dispositivos eram conectados a computadores com maior capacidade de processamento. Entretanto, a comunicação era realizada através de cabos o que limitava a movimentação dos usuários. Com o avanço nas tecnologias de comunicação sem fio os vestíveis se libertaram do uso dos cabos para comunicação, ao mesmo tempo, o conceito de processamento em nuvem começava a se estabelecer. O processamento distribuído é importante para os sistemas ciber-humanos devido às limitações no poder de processamento de alguns vestíveis. Novas tecnologias de comunicação sem fio de curta distância como Bluetooth e NFC gradualmente foram incorporadas aos vestíveis, trazendo novas possibilidades de comunicação e uma grande diversidade de configurações para as redes vestíveis.

Considerando a diversidade de dispositivos e tecnologias de comunicação existem três tipos principais de configurações para as redes vestíveis: (i) autônoma, (ii) convenci-

onal e (iii) heterogênea. As redes vestíveis autônomas concentram todas as funcionalidades de sensoriamento, processamento e exibição das informações nos próprios vestíveis participantes da rede. Essa configuração descarta o processamento e o armazenamento em nuvem. Eventualmente, emprega-se um dispositivo com maior poder de processamento como coordenador da rede vestível, um *smartphone*, por exemplo. O coordenador executa as funções complexas que exigem maior poder computacional e pode transferir dados a partir de múltiplas tecnologias de comunicação e com diversos dispositivos simultaneamente. Nas redes vestíveis convencionais, os dispositivos se comunicam entre si e com o coordenador, com a possibilidade de acesso à Internet a partir do coordenador através de um *gateway* sem fio local ou uma rede celular. Essa configuração é a mais comum atualmente e representa uma evolução sobre as redes vestíveis autônomas impulsionada pela popularização das tecnologias de comunicação sem fio.

A próxima geração de dispositivos vestíveis fortalecerá ainda mais o conceito de computação ubíqua aplicada aos sistemas ciber-humanos. Beneficiando-se novamente dos avanços tecnológicos, os novos dispositivos terão a capacidade de se comunicar através de múltiplas tecnologias de comunicação, sem a necessidade de um dispositivo coordenador. De fato, alguns vestíveis já possuem essas características. Podemos citar como exemplo alguns relógios inteligentes que tem a capacidade de se comunicar com outros dispositivos usando *bluetooth*, realizar pagamentos através de comunicação NFC, se conectar à Internet através de um *gateway* Wi-Fi estático ou em qualquer lugar através de redes celulares. A tendência é que os novos dispositivos vestíveis sejam capazes de enviar e receber dados através de tecnologias de comunicação variadas, fortalecendo a mobilidade, o processamento distribuído, e a diversidade de aplicações rumo a sistemas ciber-humanos ainda mais integrados.

A vasta gama de vestíveis e tecnologias de comunicação existentes oferecem suporte a diferentes soluções de conectividade. A tecnologia de comunicação deve se ajustar aos requisitos do vestível levando em consideração os aspectos desejados como: alcance, largura de banda, eficiência energética, possibilidades de configurações, entre outros. A definição da tecnologia de comunicação também estabelece outros atributos importantes, entre eles os tipos de criptografia aceitos, os esquemas de codificação e transmissão de dados, e os esquemas de correção de erros. Muitas aplicações das redes vestíveis dependem dessa variedade de tecnologias de comunicação para funcionar corretamente, entretanto, o maior alcance das redes e problemas de compatibilidade entre as tecnologias podem tornar árdua a efetivação de mecanismos de segurança e resiliência. Atualmente, as tecnologias mais utilizadas em redes vestíveis incluem a *Near Field Communication* (NFC), *Radio Frequency Identification* (RFID), *Bluetooth Low Energy* (BLE), *Wireless Fidelity* (Wi-Fi), redes de longo alcance e baixo custo energético, do inglês *Low Power Wide Area Networks* (LPWAN), e outras tecnologias de transmissão de dados.

A grande parte dos dispositivos de uma rede vestível e, principalmente, os vestíveis menores em tamanho e capacidade computacional, se comunicam entre si de maneira ponto-a-ponto, do inglês *peer-to-peer* (P2P). O Bluetooth é uma tecnologia de comunicação sem fio para redes pessoais, do inglês *Personal Area Networks* (PAN). Em sua versão atual que visa o baixo consumo de energia (BLE), essa tecnologia atinge uma distância de transmissão de até 100 metros em campo aberto e uma taxa de transmissão de dados de até 1Mbps. Para isso, ela utiliza a frequência de 2.4 GHz não licenciada da banda

industrial, científica e médica (ISM). O padrão de conexão mais usual em redes Bluetooth é chamado Piconet e compreende até oito dispositivos conectados em topologia estrela, sendo um mestre e os demais escravos [Ferro and Potorti 2005]. Dentro dessa topologia o dispositivo mestre representa o coordenador da rede vestível que se conecta a um *gateway*, via Wi-Fi por exemplo, e oferece acesso à nuvem aos vestíveis conectados a ele.

O conjunto de padrões IEEE 802.11 desempenha um papel fundamental nas redes vestíveis, pois provê a conexão entre os dispositivos vestíveis capacitados e um *gateway* local sem fio, comercialmente esse padrão é conhecido como Wi-Fi. Através dos padrões 802.11, os dispositivos acessam a Internet com velocidades que podem chegar a 9.6 Gbps no Wi-Fi versão 6. Os dispositivos podem se conectar a um ponto de acesso, do inglês *Access Point* (AP), ou em modo ad hoc, e a distância de transmissão chega a 250 metros, dependendo da versão em uso. Uma das principais vantagens do Wi-Fi é estar presente nativamente nos principais dispositivos que podem ser aplicados como coordenadores de uma rede vestível. Entretanto, o alto consumo de energia é um fator impactante [Losilla et al. 2011].

A tecnologia Zigbee é uma das tecnologias de comunicação sem fio que oferece suporte a dispositivos com baterias de baixa capacidade. Em modo de repouso, os dispositivos que utilizam Zigbee podem se manter operacionais por longos períodos de tempo. A tecnologia Zigbee cobre distâncias de até 100 metros e utiliza a frequência de 2.4 Ghz, podendo sofrer interferência da tecnologia Bluetooth e algumas versões do Wi-Fi. A principal limitação da Zigbee é a baixa taxa de transferência de dados, apenas 250Kbps, o que pode limitar seu uso em aplicações de tempo real e baixa latência [Negra et al. 2016]. Por esse motivo, emprega-se a tecnologia Zigbee em poucos dispositivos de uma rede vestível e geralmente para funções que não requerem largura de banda elevada.

As tecnologias de comunicação aplicadas em redes vestíveis que possuem o menor alcance são a RFID/NFC. As etiquetas RFID possuem uma microantena e um microchip de memória que ao serem energizadas por um leitor disponibilizam um conjunto de informações armazenadas. A tecnologia NFC é uma versão mais recente e aprimorada da RFID com a capacidade de comunicação unilateral ou bidirecional. Um vestível equipado com NFC tem a capacidade de ler informações e também enviar informações para outros dispositivos conectados. A comunicação NFC é ponto-a-ponto e compreende uma distância de apenas 20 centímetros, sendo eficiente e segura para troca de informações por aproximação, pagamentos por exemplo. A taxa de transferência para tecnologia NFC corresponde a até 424 Kbps [Poongodi et al. 2020].

As tecnologias de comunicação de curta distância promovem um uso mais eficiente das baterias e são empregadas em dispositivos mais baratos e simples. Entretanto, as tecnologias de comunicação de longa distância habilitam os dispositivos vestíveis a um número maior de oportunidades e aumentam o leque de possíveis aplicações. Através dessas tecnologias, os vestíveis se comunicam com um ponto de acesso remoto. Alguns vestíveis disponíveis no mercado estão equipados com módulos de identificação de assinante, do inglês *subscriber identification module* (SIM). Utilizando um cartão SIM de uma operadora de serviços de telecomunicação o usuário tem a possibilidade de conectar o vestível diretamente à Internet, dispensando a obrigatoriedade de um coordenador.

O aumento na quantidade de dispositivos aptos a utilizarem as redes de longa dis-

tância faz com que novas soluções de comunicação sejam propostas. Entre elas está a comunicação tipo máquina, do inglês *Machine Type Communication* (MTC) e sua variação para quantidade massiva de dispositivos mMTC. O objetivo da mMTC é oferecer comunicação de longa distância e baixo custo energético para dispositivos de baixa complexidade. Essa tecnologia impulsiona as redes IoT de banda estreita, do inglês *Narrowband Internet of Things* (NB-IoT) e as redes de evolução de longo prazo, do inglês *Long Term Evolution* (LTE)-M. As especificações para essas redes preveem a transmissão de uma pequena quantidade de dados enviados e baixa periodicidade no envio, com mínimo uso de energia e grandes áreas de cobertura. Tecnologias mais antigas e com motivações iniciais que não previam os vestíveis também são alvo de avaliação e adaptações para possibilitar sua integração às redes vestíveis.

As redes de baixo consumo energético e longa distância, do inglês *Low-Power Wide Area* (LPWA), são uma realidade em cidades inteligentes. Inicialmente, elas visavam integrar dispositivos IoT de baixa complexidade como sensores de monitoramento e automação. Entretanto, as soluções oferecidas pela tecnologia LPWA atraíram a atenção para outras aplicações. Um exemplo de tecnologia LPWA não licenciada é o protocolo de longo alcance LoRa. É uma tecnologia sem fio de longo alcance que opera na banda isenta de licença da ISM e utiliza a frequência de 868MHz, cobrindo distâncias de até 25 km. Essa tecnologia está presente fundamentalmente em aplicações da saúde, como monitoramento de temperatura e variação cardíaca através de vestíveis [Ometov et al. 2021]. Outra tecnologia LPWA alternativa é utilizada pela empresa Sigfox em seus dispositivos vestíveis proprietários. A Sigfox opera na frequência sub-GHz da ISM e oferece longo alcance dentro da área de cobertura contratada e mantida pela própria empresa.

A Tabela 4.1 detalha as tecnologias de comunicação de curta e longa distância que são empregadas em redes sem fio para oferecer suporte às aplicações vestíveis. A configuração mais utilizada nas redes vestíveis ainda emprega um coordenador para atuar como retransmissor das informações coletadas nos vestíveis, apoiando-se nas tecnologias de comunicação de curta distância. Entretanto, a próxima geração de redes sem fio promete oferecer aos vestíveis a possibilidade de estabelecer comunicação direta com a nuvem. Outras formas de oferecer acesso à nuvem para os dispositivos vestíveis também são alvo de estudo, ainda que dependam de tecnologias que não estão amplamente disponíveis comercialmente. Dentre as formas de comunicação estão as redes IoT com comunicação satelital e comunicação dispositivo-a-dispositivo, do inglês *device-to-device* (D2D).

A comunicação D2D é alvo de pesquisas em redes vestíveis principalmente com o objetivo de aumentar a capacidade das redes sem fio em termos de número de dispositivos e área de cobertura. Na comunicação D2D os dispositivos se comunicam entre si, respeitando as métricas de segurança previamente estipuladas. Uma das formas de integrar os vestíveis através da comunicação D2D é utilizar a comunicação social. Apoiada na comunicação D2D, a sinergia entre as redes sociais e a IoT tornou possível o conceito de redes das coisas sociais, do inglês *Social Internet of Things* (SIoT). Na SIoT os dispositivos podem socializar, colaborar, e estabelecer níveis de comunicação de acordo com as relações sociais do usuário. O aumento da área de cobertura proporcionado pela comunicação D2D e a integração dos dispositivos através da SIoT cria novas possibilidades, como por exemplo o gerenciamento do processamento e armazenamento das informações de forma distribuída entre os dispositivos participantes da rede.

| | Tecnologia | Bandas de frequência | Alcance | Taxa de transmissão | Uso de energia |
|------------------------|-----------------------|--|----------|-----------------------|----------------|
| Curta distância | RFID | 125 - 134 kHz, 13.56 MHz, 860 - 960 MHz | Até 100m | Depende da frequência | Muito baixo |
| | NFC | 13.56 MHz | <0.2 m | Até 424 kbps | Muito baixo |
| | BLE (802.15.1) | 2.4 - 2.48 GHz | Até 100m | Até 24 Mbps | Baixo |
| | Zigbee (802.15.4) | 868 - 868.6 MHz, 902 - 928 MHz, 2.4 - 2.49 GHz | Até 100m | Depende da frequência | Muito baixo |
| | Wi-Fi (802.11a/b/g/n) | 2.4 - 2.48 GHz, 4.9 - 5.8 GHz | 20-250 m | 2-600 Mbps | Médio |
| | Wi-Fi 5 (802.11ac) | 4.9 - 5.8 GHz | Até 70m | Até 3.5 Gbps | Alto |
| | Wi-Fi 6 (802.11ax) | 1 - 6 GHz | Até 120m | Até 9.6 Gbps | Alto |
| Longa distância | NB-IoT | Frequências da LTE | Até 15Km | Até 250 kbps | Baixo |
| | LTE-M | Frequências da LTE | Até 10Km | Até 1 Mbps | Baixo |
| | LoRa | 867 - 869 MHz | Até 25Km | 50 kbps | Muito baixo |
| | Sigfox | 868-878.6 MHz | Até 40Km | 100 bps | Muito baixo |

Tabela 4.1: Tecnologias de comunicação sem fio empregadas em redes vestíveis

A comunicação via satélite auxiliando os serviços IoT também é alvo de pesquisas tanto da comunidade acadêmica quanto da indústria. Dentro do contexto das redes vestíveis, a comunicação via satélite poderia desempenhar o papel de rede de acesso. Isso significa que atualmente os dispositivos vestíveis não acessam diretamente as redes satelitais. Entretanto, em muitos casos esse é o único tipo de comunicação disponível em regiões muito distantes ou de difícil acesso. Nesse cenário, as redes de comunicação por satélite podem oferecer acesso à nuvem para uma rede vestível através de gateways de comunicação específicos. Recentemente, a empresa Starlink iniciou a comercialização de kits portáteis de acesso à Internet via satélite, com uma cobertura que abrange quase todo o território dos Estados Unidos da América.

4.3. Aplicações

Esta seção apresenta as propostas recentes de aplicações para os seguintes setores da sociedade: tecnologia da informação, medicina, e neurociência. Os sistemas ciber-físicos oferecem suporte a uma vasta gama de aplicações em múltiplas áreas do conhecimento. As aplicações são usualmente centradas no usuário, utilizando dados relacionados à saúde, atividades realizadas, localização e segurança [Dhanvijay and Patil 2019]. A Tabela 4.2 ilustra as principais aplicações para os sistemas ciber-humanos.

| Sistemas Ciber-humanos | |
|-------------------------------------|-------------------------------|
| Aplicações médicas | Aplicações não médicas |
| Monitoramento de sinais vitais | Ambientes inteligentes |
| Monitoramento de atividades | Indústria 4.0 |
| Deteção / Controle de doenças | Entretenimento |
| Telemedicina | Segurança |
| Sistemas de suporte à vida | |
| Monitoramento do sono | |
| Entrega inteligente de medicamentos | |

Tabela 4.2: Aplicações para os sistemas ciber-humanos

Os sistemas ciber-humanos oferecem suporte a uma variedade de aplicações. Entretanto, as características dos dispositivos utilizados nesses sistemas (portabilidade, proximidade com o corpo, comunicação com outros dispositivos e com a Internet), favorecem vigorosamente as aplicações médicas. A Tabela 4.2 especifica as principais aplicações para os sistemas ciber-humanos considerando as aplicações médicas e não médicas. Em geral, as aplicações médicas dos sistemas ciber-humanos envolvem o monitoramento de funções vitais de uma pessoa e o uso das informações para uma tomada de decisão por parte do próprio usuário, de um profissional da saúde local ou remotamente, ou ainda de um agente ciber-físico que interaja com o usuário. Existem ainda aplicações não médicas para os sistemas ciber-humanos que visam melhorar a qualidade de vida, aumentar a segurança, e promover a integração social e humano-computador utilizando o usuário como parte passiva do sistema ou como operador do mesmo.

Os sistemas ciber-físicos baseados em comunicações moleculares prometem ser uma área que reúne tanto a engenharia eletromecânica, como também a nanotecnologia, biotecnologia e biologia sintética para uma reformulação das práticas médicas. Com o objetivo de trazer a personalização e a integração de diversas formas de monitoramento da saúde, diagnose e tratamento de doenças, essa tecnologia de comunicação permite a implementação de redes de sensores orientadas para a saúde em tempo real. Os dados provenientes das redes internas podem ser remotamente observados por médicos por meio dos sistemas ciber-humanos apoiando o tratamento de doenças crônicas, bem como a detecção precoce de câncer e novos vírus. Uma das aplicações que chama muita atenção para a comunicação molecular (CM) em medicina é a entrega inteligente de medicamentos, do inglês *Intelligent Drug Delivery*), que consiste em controlar adaptativamente a taxa e frequência de medicamento a entrar no corpo humano, dependendo de que local deseja-se obter uma maior concentração do medicamento [Chahibi et al. 2013].

Pesquisadores investigaram os sistemas ciber-físicos para a entrega de medicamentos. Os trabalhos analisaram, por exemplo, como as nanomáquinas podem ser removidas do corpo humano após concluída a etapa de medicação [Chude-Okonkwo et al. 2017] e o desenvolvimento de nanopropulsores para realizar a quimioterapia segura ao liberar o medicamento somente no local do tumor [Jia et al. 2019]. Em [Ye et al. 2007], um experimento com dispositivos implantáveis para a entrega remota de medicamentos às células foi conduzido. Os dispositivos são controlados remotamente por radiofrequência para manipular o microambiente químico e biológico. Em [Mcguinness et al. 2019], um protocolo de comunicação para sistema ciber-humano que utiliza o sistema circulatório (sanguíneo) como uma topologia em anel foi apresentado. Três nanorrobôs são projetados para essa topologia, sendo um para carregar o medicamento, outro nanorrobô estático com papel de nó transmissor e receptor com funções de recupera/injeta o medicamento e trocar moléculas de informação e, por fim, o terceiro nanorrobô *gateway* para monitoramento interno (*i.e.*, verificação de status do nó e contagem de nanorrobôs que transportam o medicamento no sistema circulatório) e envia as informação utilizando ondas eletromagnéticas para dispositivos externos nas proximidades, por exemplo, alertando quando a quantidade de medicamento é insuficiente.

Recentemente, a comunidade de pesquisa foca também em trabalhos que apliquem conceitos e sistemas ciber-humanos para novas tecnologias que ajudem nas doenças cerebrais como neurodegeneração. Unidades de controle que são capazes de tradu-

zir os sinais naturais do cérebro em comandos de máquina, ou seja, interfaces cérebro-máquina foram desenvolvidas e propostas como um novo método de tratamento ou terapia para doenças neurais e problemas de habilidades cognitivas [Koucheryavy et al. 2021]. Em [Wirdatmadja et al. 2017], um método de estimulação cerebral profunda foi proposto. O dispositivo externo se comunica por meio de ondas eletromagnéticas com o dispositivo subdural que, por sua vez, se comunica com os dispositivos *neural dusts i.e.*, nanodispositivo que possui um LED, um circuito retificador e um conjunto de nanofios para ativar o LED pela conversão eletromecânica do balanço dos nanofios (ultrassom). Esse sistema ciber-humano permite um controle externo das estimulações cerebrais, o que torna essa técnica mais atrativa pelo fato de ser menos invasiva e não exige cirurgia quando é implantada. As técnicas de neuroestimulação usando interfaces cérebro-máquina são uma opção de tratamento para pacientes que sofrem de graves déficits no controle motor ou enfrentam dificuldades para manipular objetos usando próteses.

As interfaces cérebro-máquina também são aplicadas a diagnósticos médicos e terapêuticas. Por exemplo, um microsistema baseado em eletrocorticografia, uma técnica para o registro gráfico das ondas elétricas cerebrais com eletrodos aplicados sobre o córtex cerebral foi apresentada em [Muller et al. 2014]. O sistema consiste em um arranjo de eletrodos de 64 canais e uma antena flexível. Este sistema é adequado para o monitoramento de longo prazo devido ao uso de materiais biocompatíveis e pelo fato do implante ser minimamente invasivo não havendo a necessidade de perfuração. Em [Kim et al. 2016], um sistema semelhante de sonda neural sem fio capaz de realizar a leitura das atividades neurais e também a estimulação cerebral foi apresentado. Esse sistema possui duas antenas que permitem a transferência de dados (*i.e.*, entre o dispositivo implantado com o dispositivo externo) e a alimentação sem fio. Os sistemas de eletroencefalografia implantáveis podem ser aplicados principalmente em pacientes epiléticos, eles são promissores para monitorar e controlar quando ocorre episódios de atividade neuronal elétrica incontrolável e desorganizada que resultam em crise epilética.

A interação humano-máquina mudará com os serviços que habilitem mais eficiência tanto nas experiências dos usuários de sistemas de informação, quanto na aquisição de informações desses usuários. Por exemplo, os sistemas de nanoredes baseados em interface entre cérebro-máquina mudam o sistema de entrada de comandos em sistemas digitais por fazer uma ponte direta entre a consciência humana e os dispositivos elétricos. Essa integração humano-máquina já começou a ser desenvolvida de uma maneira mais próxima da realidade. Um exemplo é a pesquisa apresentada em [Hochberg et al. 2006]. Neste estudo, um participante de 25 anos que é incapaz de mover seus membros devido à tetraplegia pode manipular diferentes dispositivos externos por meio de uma interface cérebro-máquina implantada no córtex pré-motor (arranjo de 96 microeletrodos). Utilizando o controle neural, o participante foi capaz de abrir e fechar uma mão protética, realizar ações rudimentares com um braço robótico multiarticulado e mover o cursor do computador por meio de seu cérebro.

As comunicações moleculares dentro do corpo humano são diretamente ligadas à saúde do organismo e, também, às práticas medicinais que permitem o diagnóstico, o tratamento e a cura de doenças. As comunicações moleculares como parte dos sistemas ciber-humanos tem potencial para permitir o monitoramento, detecção e controle da informações à medida que se propagam *in vivo* através das reações bioquímicas. As co-

municações entre células, órgãos e sistemas no corpo humano envolvem a transmissão, propagação e recepção de inúmeras moléculas e proteínas que transmitem informações necessárias para as reações energéticas, ajudando no metabolismo das partes envolvidas. Quando células, órgãos ou até sistemas falham na transmissão e recepção de informações moleculares, doenças naturalmente surgem. Acredita-se que o desenvolvimento e a progressão do câncer são decorrentes da anormalidade na propagação da informação molecular subjacente à diferenciação e proliferação celular, entre outras [Sakkaff et al. 2018]. Da mesma forma, a doença de Alzheimer foi associada com células gliais que tem sua comunicação molecular e equilíbrio iônico perturbado pelo acúmulo de transmissores no ambiente [Mattson 2004].

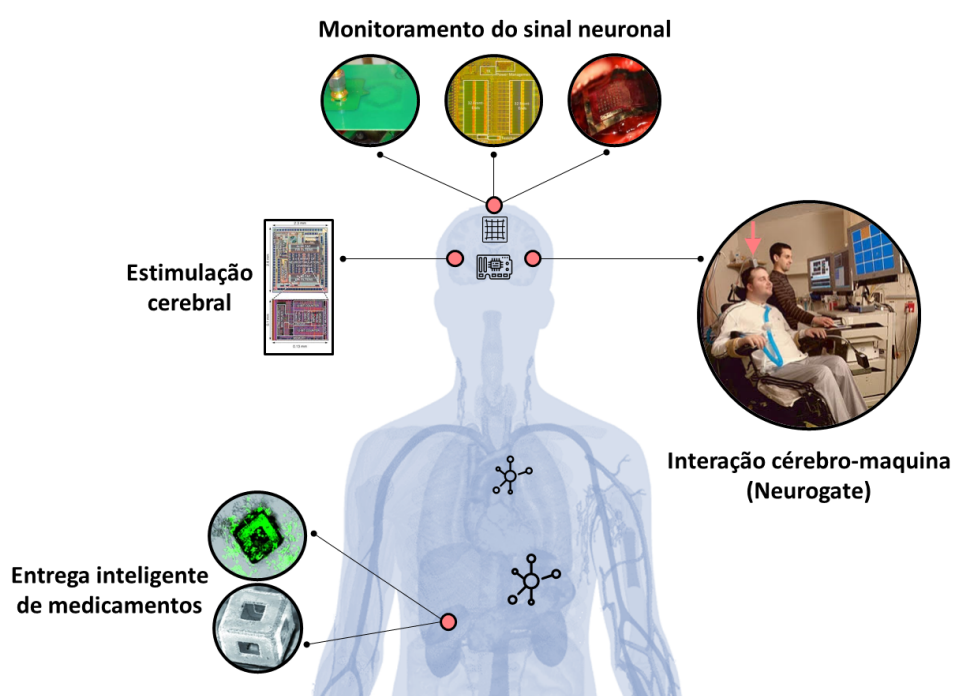


Figura 4.8: Exemplos reais de dispositivos intracorporais utilizados em sistemas ciberfísicos: Sistema de entrega de medicamentos com controle remoto. O nanocubo que transporta o medicamento apresenta os estados ativo e inativo [Ye et al. 2007]; Gravador de sinal neuronal para o córtex cerebral [Muller et al. 2014]; Sistema e sonda neural sem fio para realizar a estimulação cerebral e leitura das atividades neurais simultaneamente [Kim et al. 2016]; Sensor BrainGate implantado no cérebro do participante para a interação cérebro-máquina. O participante do estudo está sentado em uma cadeira de rodas, ventilado mecanicamente por meio de uma traqueostomia [Hochberg et al. 2006].

A medicina, de certo modo, vem aplicando práticas de correção das doenças causadas por falhas nas comunicações moleculares, por exemplo a radioterapia. Entretanto, só recentemente, práticas médicas vêm sendo redesenhadas com os avanços de outras áreas do conhecimento, como a engenharia eletromecânica, a nanotecnologia e biotecnologia. A nanomedicina é oficialmente uma área que promete materiais e sistemas minimamente invasivos ao corpo humano para acessar níveis de detalhes sobre o seu funcionamento e também repensar novas práticas medicinais. Abordagem que fazem o uso

das comunicações moleculares para a detecção de tumores são um exemplo. Um sensor com receptores sintéticos de CM para moléculas de glicoproteína (moléculas diferenciadas por suas cadeias de carboidratos) foi proposto em [Stephenson-Brown et al. 2015]. O sensor melhora a eficiência e a precisão da detecção do câncer de próstata ao identificar a presença da molécula associada ao tumor. Soluções inovadoras para tratamento de potenciais condições de saúde prejudiciais ao nível celular, podem vir de décadas de conhecimento sobre o processamento de informações coletadas dos sistemas intracorporais. Essa compreensão, combinada com a comunicação em sistemas elétricos e sua tradução em sistemas bioquímicos e vice-versa através dos sistemas ciber-humanos, proporcionam novas práticas medicinais com resultados inimagináveis [Akyildiz et al. 2019].

As aplicações para os sistemas ciber-humanos não se restringem exclusivamente à escala nano e à comunicação intracorporal. Apoiados pelos dispositivos e redes vestíveis os sistemas ciber-humanos oferecem uma infinidade de aplicações médicas e não médicas em escala macro. A Figura 4.9 ilustra as etapas essenciais para que uma rede vestível ofereça suporte às aplicações médicas: (i) a coleta dos dados, (ii) a transmissão dos dados através das tecnologias de comunicação, e (iii) a observação dos dados. A detecção precoce de doenças, o monitoramento de sinais vitais, e os sistemas de suporte à vida são as principais aplicações médicas. No contexto não-médico a detecção de gestos a partir de sensores corporais, a integração com ambientes inteligentes, aplicações de segurança para indústria e para o usuário, e a integração social são os principais destaques. Para todas as aplicações suportadas pelos sistemas ciber-humanos utilizando redes vestíveis as pessoas são fundamentais e estão direta ou indiretamente envolvidas nos processos, o objetivo final é melhorar a qualidade de vida.

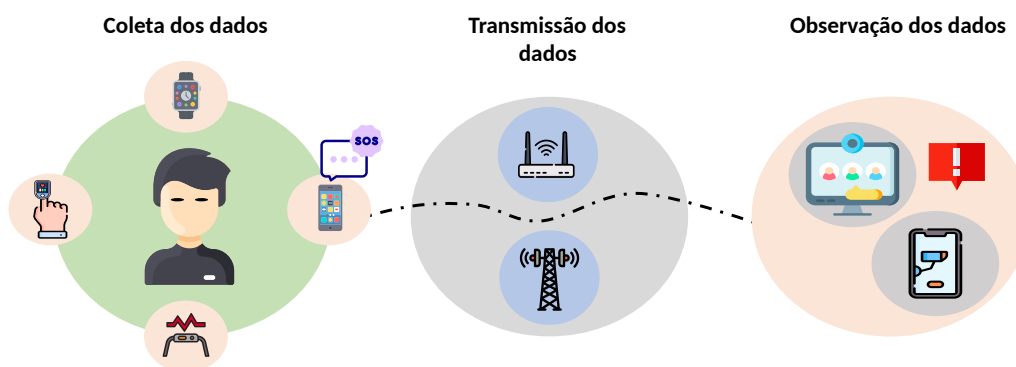


Figura 4.9: Redes vestíveis e aplicações médicas

Os sistemas ciber-humanos apoiados pelas redes vestíveis têm o potencial de transformar os sistemas tradicionais de saúde uma vez que oferecem ao usuário uma forma sofisticada porém simples de monitorar os sinais vitais e detectar doenças. Doenças como câncer, Parkinson, e asma podem ser fatais, entretanto, a detecção precoce dessas doenças tem um impacto positivo sobre o tratamento e a qualidade de vida do usuário [Movassaghi et al. 2014]. As aplicações médicas baseadas em redes vestíveis buscam melhorar os sistemas de saúde para que através dos vestíveis seja possível monitorar os sinais vitais de um paciente e tornar mais eficiente a detecção e o controle de doenças. As informações obtidas e disseminadas a partir da rede vestível tem reflexo no mundo físico com ações que partem de um profissional da saúde ou eventualmente do próprio usuá-

rio. Em algumas situações específicas, dispositivos ciber-físicos podem interagir com um usuário para administração de medicamentos, é o caso de pacientes em leito hospitalar ou com dificuldades motoras.

Uma das aplicações de maior importância proporcionadas pelas redes vestíveis é o monitoramento contínuo dos sinais vitais de um usuário. Geralmente, as aplicações identificam as condições de saúde de um usuário e oferecem algum tipo de resposta em tempo real, com informações que possam colaborar na recuperação do paciente. A principal diferença entre o monitoramento de pacientes conduzido em ambiente hospitalar e a partir das redes vestíveis é a comodidade proporcionada ao usuário. A partir das redes vestíveis o paciente pode ser observado remotamente por um profissional da saúde considerando os seus estados fisiológicos e ações naturais, sem restringir as suas atividades regulares e reduzindo o impacto dos altos custos de uma internação hospitalar. Esse tipo de aplicação ganha cada vez mais relevância na medida em que a evolução tecnológica permita o desenvolvimento de sistemas mais precisos, seguros, convenientes e baratos.

As aplicações que monitoram as atividades de um usuário também utilizam as características fisiológicas. Adicionalmente, essas aplicações consideram outras informações oferecidas pelos vestíveis como localização e movimentação do usuário. Ao contrário do monitoramento de pacientes (leito hospitalar, cuidado domiciliar), essas aplicações visam propiciar ao usuário convencional a possibilidade de acompanhar suas atividades cotidianas e oferecer informações e alertas para o próprio usuário ou para terceiros. Além da capacidade de identificar padrões fisiológicos como a oxigenação do sangue e variação da frequência cardíaca, os vestíveis também são dotados de sensores de posicionamento global e giroscópios. Isso permite que além de monitorar as condições de saúde do usuário seja possível identificar aonde ele está e variações bruscas de movimentação, uma queda por exemplo. Sendo assim, através das redes vestíveis é possível monitorar a frequência cardíaca de um atleta durante o treino, ou identificar o trajeto de um idoso e sua condição respiratória. Dentro de uma rede vestível convencional, ainda é possível gerar avisos para o próprio usuário (visual, sonoro), ou usar as tecnologias de comunicação disponíveis para alertar remotamente um profissional da saúde ou um contato pessoal.

Os dados fisiológicos coletados continuamente a partir dos dispositivos vestíveis impulsionam outras aplicações como a detecção precoce e o controle de doenças. Para cada nível de evolução, os sensores disponíveis nos dispositivos vestíveis oferecem dados mais precisos e confiáveis. As informações coletadas podem ser processadas e através de técnicas de aprendizagem de máquina é possível identificar padrões escondidos nas estruturas de informação [Al-Turjman and Baali 2019]. Esses padrões podem indicar a presença de condições pré-existentes, como uma propensão a doenças cardiovasculares [Oresko et al. 2010]. Da mesma forma, o processamento das informações relacionadas à oxigenação do sangue pode identificar problemas respiratórios, como a asma. As aplicações responsáveis pelo controle de doenças também utilizam os dados dos vestíveis para identificar possíveis mudanças nos padrões fisiológicos dos usuários perante um tratamento específico. Ao analisar os dados após a introdução de um tratamento, é possível identificar o impacto positivo ou negativo da terapia, como a responsividade do paciente a um medicamento por exemplo [Kubota et al. 2016].

As aplicações da telemedicina são consolidadas no mercado e seus benefícios são

reconhecidos pela comunidade médica e científica. Entretanto, as redes vestíveis proporcionam novas funcionalidades e aplicações adicionais para a telemedicina tradicional. A telemedicina possibilita o acesso remoto aos cuidados médicos através da integração dos sistemas de saúde e das tecnologias de telecomunicação. Nesse contexto, os dispositivos vestíveis agregam novas informações que complementam e diversificam as aplicações na telemedicina. Uma consulta remota em que um paciente é assistido por um profissional da saúde, por exemplo, pode ganhar novos contornos com a utilização dos vestíveis. Além das características multimídia de uma consulta convencional, o profissional da saúde pode observar as informações coletadas a partir dos dispositivos na rede vestível, propiciando um diagnóstico mais completo e correto. A partir das informações dos vestíveis e com o suporte da telemedicina, novas aplicações podem emergir incluindo aplicações voltadas para diagnósticos em tempo real, auxiliares na manutenção de doenças crônicas, e para assistência remota na recuperação de procedimentos médicos.

Os sistemas ambientais de suporte à vida, do inglês *Ambient Assisted Living Systems (AAL)*, são conjuntos de aplicações que também se beneficiam com a introdução dos dispositivos e redes vestíveis. Os avanços tecnológicos e na medicina permitem que a expectativa de vida aumente gradualmente, fazendo com a população de pessoas idosas seja cada vez maior. As aplicações AAL monitoram aspectos relacionados ao bem-estar dos idosos através de sensores, atuadores, e dispositivos posicionados no ambiente (casas, apartamentos). O objetivo é migrar o local de observação dos idosos dos hospitais e clínicas de repouso para as residências, melhorando a qualidade de vida do paciente e reduzindo os custos operacionais. As redes vestíveis se integram perfeitamente aos sistemas AAL, incorporando os dados coletados a partir dos vestíveis aos dados do ambiente e possibilitando realizar a correlação dessas informações. Além das redes vestíveis as aplicações AAL se apoiam em diferentes conceitos como as residências inteligentes e a própria IoT. As aplicações AAL visam trazer independência aos usuários para realizar suas atividades cotidianas em um ambiente familiar e assistidos por mecanismos de suporte à saúde sejam locais ou remotos.

O sono é uma necessidade básica e fundamental para o ser humano. Dormir de forma saudável é fundamental para o equilíbrio físico e mental. As consequências da privação do sono incluem diversos transtornos como a narcolepsia e doenças cardiovasculares [Khan and Pathan 2018]. Alguns dispositivos vestíveis tem a capacidade de monitorar a qualidade do sono utilizando dados como a variação cardíaca e o movimento corporal. Esse monitoramento só é possível pois os fabricantes dos dispositivos utilizam grandes bases de dados, aprendizagem de máquina, e alto investimento financeiro para reconhecer padrões de sono através das bases de dados. A forma mais comum de monitorar as atividades de um paciente durante o sono é através de uma polissonografia, um exame que deve ser conduzido em ambiente controlado. Recentemente, pesquisadores identificaram que os dados obtidos a partir dos vestíveis são tão eficientes quanto os exames em ambiente controlado para medir e contribuir em melhorias na qualidade do sono [Baron et al. 2018]. A partir dos vestíveis o próprio usuário consegue mensurar a qualidade do seu sono e criar um histórico de eventos, sendo possível avaliar a necessidade de exames mais complexos.

As redes vestíveis suportam aplicações não-médicas nos setores de ambientes inteligentes, indústria, segurança e entretenimento, a Figura 4.10 ilustra algumas das apli-

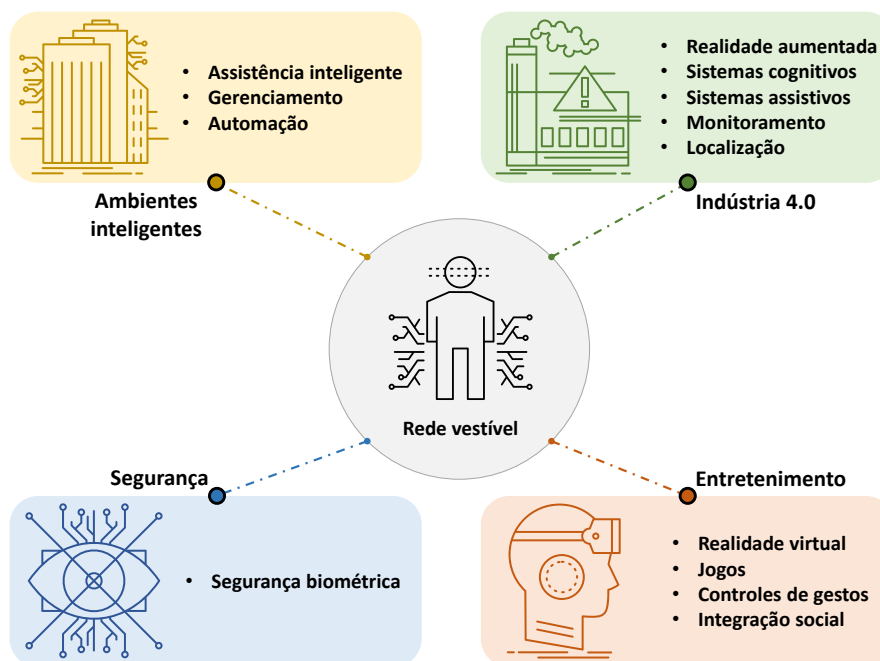


Figura 4.10: Redes vestíveis e aplicações não médicas

cações não médicas para as redes vestíveis. Ambientes inteligentes oferecem aos usuários diversos serviços de assistência e de gerenciamento de recursos que podem ser potencializados através dos vestíveis. Os serviços auxiliares utilizam os dados dos dispositivos vestíveis para construir um ambiente de acordo com as preferências do usuário. Um exemplo de integração entre os vestíveis e o ambiente inteligente é o controle automático da temperatura do ambiente de acordo com a intensidade de movimentação do usuário capturada a partir de um vestível. Outras aplicações incluem o controle de iluminação e o acionamento automático de equipamentos conectados (televisão, aparelho de som) de acordo com o comportamento e posicionamento do usuário. Os serviços de gerenciamento também se beneficiam dos vestíveis pois gerenciam aspectos de segurança e automação do ambiente. Alertas de risco (invasão, vazamento de gás, sobrecarga elétrica) podem ser enviados diretamente para um vestível, otimizando a resposta do usuário.

Nos últimos anos, a materialização dos conceitos de Internet das coisas, computação em nuvem e computação ubíqua, propiciaram mudanças drásticas na indústria. Essas mudanças, aliadas aos sistemas e aplicações cada vez mais voltados à Internet, alavancaram o conceito da Indústria 4.0. Os sistemas ciber-humanos terão papel importante no desenvolvimento da indústria inteligente, uma vez que além de máquinas e dispositivos, esses sistemas inteligentes também visam a integração do ser humano. A sustentabilidade é um dos principais aspectos na Indústria 4.0 [Roda-Sanchez et al. 2018]. Nos próximos anos, os sistemas industriais serão constituídos de dispositivos de baixa complexidade (IoT, vestíveis) e de redes de comunicação heterogêneas, tornando-se obrigatória a utilização racional de energia para a longevidade desses sistemas. A inserção das pessoas nesse ambiente conectado promove a evolução de um sistema ciber-físico para um sistema centrado no usuário, capaz de fortalecer aspectos de segurança, conforto, e bem-estar dos trabalhadores em direção a melhores condições de trabalho e aumentos nos níveis de produção. As principais tecnologias suportadas pelas redes vestíveis e empregadas na In-

dústria 4.0 são a realidade aumentada, os sistemas computacionais cognitivos e assistivos, e a possibilidade de monitoramento e localização de um trabalhador.

A realidade aumentada é uma tecnologia que permite sobrepor elementos virtuais à nossa visão da realidade através de telas ou projeções em capacetes ou óculos inteligentes. A realidade aumentada pode ser aplicada na indústria para integração humano-computador, melhoria nos processos de decisão e treinamentos personalizados [Posada et al. 2015]. Através dos dados coletados a partir dos vestíveis (movimentação, gestos) e da aplicação de técnicas de auto-aprendizagem os sistemas cognitivos podem detectar fadiga em um operário, ou ajustar automaticamente parâmetros que contribuam para produtividade, como melhoria na iluminação, ajustes ergonômicos, entre outros. Sistemas de monitoramento podem identificar as atividades do trabalhador e gerar alertas no tocante a sua saúde e segurança. Pessoas que trabalham em posição sentada por longos períodos precisam fazer pausas periódicas para evitar problemas circulatórios e lesões na região lombar, os vestíveis podem monitorar e alertar automaticamente tanto o trabalhador quanto a equipe de prevenção de acidentes [Kong et al. 2019]. A localização do usuário também é importante pois pode ser utilizada para fornecer alertas sonoros e visuais sobre áreas de maior periculosidade (piso escorregadio, necessidade de equipamentos de proteção individual).

Os setores de esporte e entretenimento também são atrativos para as aplicações baseadas em redes vestíveis. As aplicações para esses setores se apoiam em tecnologias habilitadas pelos dispositivos vestíveis, dentre elas a realidade aumentada e virtual, a captura de movimentos, e a integração social. Já há algum tempo, a indústria de jogos aplica sensores de movimentos e realidade virtual em seus produtos mas a popularização dos vestíveis impulsiona novas possibilidades. Durante os processos de confinamento causados pela COVID-19 a empresa Nintendo lançou o jogo de interpretação de personagens, do inglês *Role-playing Game* (RPG), Ring Fit Adventure para incentivar a prática de exercícios físicos em ambientes fechados. O jogo utiliza um anel de Pilates com sensores (giroscópio, medidor de frequência cardíaca por infravermelho, acelerômetro) e um vestível (faixa coxal) para movimentar um personagem e realizar ações de ataque e defesa dentro do mundo virtual. O conjunto emite alertas de sedentarismo através dos vestíveis e possui integração direta com redes sociais, sendo uma boa mostra da capacidade dos vestíveis para aplicações de entretenimento. Mais de 10 milhões de cópias foram comercializadas, demonstrando tanto a aplicabilidade quanto o interesse despertado pelos vestíveis.

As características fisiológicas, físicas e comportamentais dos usuários coletadas a partir dos vestíveis colaboram com o desenvolvimento de aplicações de segurança, sendo as principais a autenticação baseada em sinais biológicos. Sinais biológicos dinâmicos são identificados a partir de sensores óticos, elétricos e mecânicos disponíveis nos vestíveis. Os sinais biológicos possuem diferentes origens, sendo as mais comuns o coração (variação cardíaca), o cérebro (atividade cerebral), pulmões (frequência respiratória), os músculos (contração muscular), e a pele (atividade eletrodérmica). Em geral, esses sinais são únicos e exclusivos para cada pessoa, tornando-os elegíveis para utilização como chave em sistemas de autenticação [Nakayama et al. 2019]. Dessa forma, ações não intrusivas para o usuário como caminhar, respirar, ou realizar gestos podem se tornar um padrão para iniciar ou manter continuamente a autenticação em um sistema. Mecanismos de autenticação baseados em biometria estática (digitais, face) também se beneficiam dos

vestíveis valendo-se do posicionamento dos dispositivos, geralmente instalados próximos aos rosto e mãos, facilitando a coleta dos dados.

4.4. Desafios e soluções existentes para os sistemas ciber-humanos

Os principais desafios para o desenvolvimento dos sistemas ciber-físicos e ciber-humanos, incluindo das redes vestíveis, nanorredes, são o foco desta seção. Além disso, serão apontadas soluções para os desafios identificados.

4.4.1. Redes vestíveis e a Internet das coisas médicas

O futuro para as redes vestíveis e para Internet das coisas médicas é muito promissor. Entretanto, para qualquer nova tecnologia, a transição do conceito para aplicação prática é repleta de desafios. Na verdade, ainda existem desafios notáveis para as redes vestíveis transporem tanto atualmente quanto no futuro. As soluções existentes podem confrontar alguns desafios e minimiza o impacto negativo, entretanto, muitos problemas ainda não têm solução ou em alguns casos as soluções são específicas para um contexto. A Tabela 4.3 apresenta os principais desafios e possíveis soluções considerando as características das redes vestíveis. É importante salientar que em várias situações a possível solução para um problema pode trazer novos conflitos. Por exemplo, aplicar técnicas de aprendizagem de máquina para aprimorar a precisão dos dados coletados pode aumentar a necessidade de processamento e conseqüentemente reduzir a duração das baterias.

Grande parte dos desafios associados à aquisição dos dados está concentrada no primeiro componente da cadeia de processamento dos dados, ou seja, no dispositivo vestível. Parâmetros importantes como a quantidade e qualidade dos dados são definidos nessa primeira etapa. Os dados disponíveis nas redes vestíveis são obtidos a partir de uma infinidade de dispositivos, com características e qualidades de construção distintas. Eventualmente, os sensores de baixo custo ou simplesmente mal calibrados podem produzir dados de baixa qualidade ou inconsistentes. Obter dados de maior qualidade respeitando a diversidade dos dispositivos é um desafio para as redes vestíveis. Dados inconsistentes podem gerar informações incorretas ao serem processados e causar alertas impróprios, como um falso alerta de aumento na frequência cardíaca, por exemplo. Possíveis soluções para o problema incluem aumentar a frequência de coleta e a quantidade dos dados coletados para melhorar a amostragem, entretanto, isso pode afetar a eficiência energética e a capacidade de armazenamento do dispositivo.

O desafio de processar os dados coletados está relacionado à utilização dos dados depois da etapa de aquisição. Conforme citado acima, os vestíveis têm características e sensores com qualidades diferentes, dependendo do tipo, preço e marca dispositivo. Converter os dados brutos coletados a partir dos dispositivos em informações úteis é o objetivo do processamento dos dados. O principal desafio é gerar as informações de forma eficiente, considerando o limitado poder de processamento e armazenamento dos dispositivos. A filtragem dos dados inclui identificar possíveis erros de captura e valores discrepantes através de métodos estatísticos, para obter um conjunto de dados mais homogêneo. A quantidade de informações aproveitáveis obtidas a partir dos dados do usuário dependerá da eficiência na filtragem e no processamento dos dados. Atualmente, aplica-se cada vez mais a aprendizagem de máquina no processamento dos dados obtidos através de dis-

| Características | Desafios | Possíveis soluções |
|---|---|--|
| Aquisição dos dados | | |
| -Baixa qualidade dos sensores -Inconsistência na coleta dos dados | -Obter dados de maior qualidade | -Aumentar a quantidade de dados coletados -Aumentar a frequência de coleta |
| Processamento dos dados | | |
| -Baixa capacidade computacional -Baixa capacidade de coleta e armazenamento dos dados | -Gerar informações de forma eficiente | -Otimizar a análise de dados -Distribuição do processamento -Aplicar aprendizagem de máquina |
| Transmissão dos dados | | |
| -Baixas taxas de transmissão -Possibilidade de alta latência -Possibilidade de sobrecarga na rede | -Atender aos requisitos exigidos pelas aplicações | -Computação de borda (reduzir latência) -Redes vestíveis heterogêneas -Empregar protocolos multicaminhos |
| Eficiência energética | | |
| -Baterias de pequena capacidade -Dispositivos pequenos | -Ampliar o tempo de funcionamento | -Uso racional da energia -Sistemas auto-alimentados -Colheita de energia |
| Interoperabilidade | | |
| -Falta de padronização na construção dos dispositivos -Falta de compatibilidade (comunicação, serviços, aplicações) | -Integrar os componentes da rede vestível | -Cumprimento das normas estabelecidas -Dispositivos compatíveis com múltiplos padrões |
| Escalabilidade | | |
| -Infraestruturas inadequadas para o possível crescimento | -Lidar com o aumento exponencial dos dispositivos e dados | -Gerenciamento da infraestrutura |
| Aceitação do usuário | | |
| -Tecnologias consideradas intrusivas -Desconfiança do usuário -Aversão à tecnologia | -Popularizar as redes vestíveis | -Detalhar o uso dos dispositivos -Simplificar as explicações de uso -Detalhar as medidas de segurança aplicadas |
| Segurança e Privacidade | | |
| -Múltiplas tecnologias de comunicação -Informações privadas / pessoais -Dados sensíveis (saúde) -Difícil aplicar mecanismos eficientes | -Manter a segurança do usuário e a privacidade dos dados | -Aplicar mecanismos de autenticação e autorização para usuários e dispositivos -Aplicar criptografia dos dados -Corrigir problemas de software através de atualizações |

Tabela 4.3: Características, desafios e possíveis soluções para as redes vestíveis

positivos vestíveis. Outra possibilidade é distribuir o processamento dos dados entre os componentes da rede vestível ou uma estrutura na nuvem. Entretanto, essa alternativa pode sobrecarregar os canais de transmissão de dados de curta e longa distância.

Na medida em que caminhamos para sistemas mais interconectados, a produção, o processamento e a transmissão de dados vão continuar crescendo. Tecnologias como o 5G apoiam essa expansão ao oferecer taxas de transmissão cada vez maiores, possibilitando o envio massivo de dados. Contudo, as redes vestíveis abrangem diversas tecnologias de comunicação de curta e longa distância com taxas de transmissão diferentes. A variedade nas tecnologias de comunicação promove a diversidade de dispositivos, porém é limitante para algumas aplicações com requisitos restritos (baixa latência, baixo atraso). Estruturas centralizadas na nuvem, por exemplo, são comumente utilizadas para gerenciamento, processamento e armazenamento dos dados. No entanto, elas possuem dois problemas principais (*i*) a latência para enviar e processar os dados, e (*ii*) a sobrecarga na rede vestível devido ao envio contínuo e simultâneo dos dados de múltiplos dispositivos. Soluções para problemas relacionados à latência incluem aplicar a computação de borda e empregar protocolos que utilizem múltiplos caminhos simultâneos [Nakayama et al. 2021] quando possível. As redes vestíveis heterogêneas reduzem os problemas de sobrecarga, uma vez

que diferentes dispositivos empregam a comunicação de longa distância, dispensando o uso de um coordenador e aliviando o tráfego na rede vestível.

A energia é um dos recursos mais importantes em uma rede vestível, especialmente com a crescente demanda dos usuários por novas funcionalidades. Tarefas complexas implicam, na maioria dos casos, em consumo adicional de energia e reduzem sensivelmente a duração das pequenas baterias presentes nos vestíveis. Para a maioria dos usuários não é conveniente recarregar frequentemente os dispositivos pois isso significa conectá-los a uma fonte de energia externa e limitar ou interromper o seu uso. Em geral, a eficiência energética pode ser alcançada de duas formas: (i) avanços nas tecnologias das baterias (materiais, componentes) e (ii) minimizando o consumo de energia. As pesquisas em relação às baterias compreendem tanto os dispositivos vestíveis quanto uma infinidade de dispositivos portáteis (*tablets*, fones de ouvido sem fio, *smartphones*), atraindo mais atenção da indústria e da academia e obtendo resultados mais lineares. Os estudos que visam obter um uso mais racional da energia geralmente contemplam melhorias nos protocolos de comunicação e variações nos padrões de aquisição dos dados (reduzir tempo por coleta, reduzir quantidade de dados). Recentemente, pesquisadores da área estudam a viabilidade e aplicar técnicas como o carregamento sem fio e sistemas auto-alimentados através da colheita de energia do ambiente, às redes vestíveis [Seneviratne et al. 2017].

Os primeiros dispositivos comerciais com a capacidade de carregamento sem fio foram os *smartphones*. Atualmente, essa tecnologia atende aos computadores portáteis, veículos elétricos, e vestíveis, porém ela não dispensa a necessidade de carregar os dispositivos, simplesmente oferece uma alternativa prática. A principal limitação é o tempo elevado para carregamento das baterias em comparação às tecnologias tradicionais com fios. Técnicas de colheita de energia permitem que o vestível se mantenha operacional por tempo indefinido ao coletar a energia do ambiente que cerca o usuário. A colheita de energia do ambiente pode ocorrer através de movimento, variações de temperatura, luz, radiação eletromagnética, entre outras. Esses métodos incluem a coleta da energia cinética gerada através do movimento humano e a captura da energia solar para reabastecer os dispositivos [Ometov et al. 2021]. Todavia, os vestíveis tem limitações de tamanho que dificultam a instalação dos componentes adicionais necessários para aplicação desses métodos. Adicionalmente, a disponibilidade de energia no ambiente é limitada e pode não ser suficiente para alimentar um dispositivo. Sendo assim, embora promissores, esses métodos carecem de maiores pesquisas considerando os dispositivos vestíveis.

Embora existam avanços notáveis por parte da academia, indústria, e órgãos de padronização para desenvolver soluções para as redes vestíveis, alguns aspectos necessitam atenção especial. Entre eles estão a interoperabilidade entre os dispositivos, a escalabilidade e os aspectos de segurança. As redes vestíveis são constituídas por uma grande diversidade de sensores, dispositivos, tecnologias de comunicação, serviços, e aplicações que devem interagir e cooperar de forma transparente para atingir todo o potencial concebível em um sistema ciber-humano. Dispositivos vestíveis ainda sofrem de problemas de compatibilidade entre si e com outros componentes da rede, muitas vezes causados pela falta de padronização na construção e pela utilização de tecnologias proprietárias. A falta de compatibilidade entre os dispositivos e tecnologias de comunicação se propaga para os serviços e aplicações, obrigando muitas vezes que o usuário utilize exclusivamente a plataforma de um fabricante específico, prejudicando a disseminação das redes vesti-

veis e reduzindo a aceitação do usuário. A falta de compatibilidade promove ainda uma escalada desordenada no número de vestíveis. Para realizar todas as ações desejadas, o usuário necessita de mais dispositivos, que por sua vez empregam tecnologias de comunicação distintas e apoiam aplicações exclusivas, podendo sobrecarregar a rede vestível e as estruturas de suporte (redes de acesso, estruturas centralizadas na nuvem).

A popularização das redes vestíveis favorece um cenário onde uma grande quantidade de dispositivos conectados à Internet ocupa grande parte do espaço que nos cerca. Individualmente, esses dispositivos produzem uma quantidade limitada de dados, mas considerando o conjunto de dispositivos a quantidade de dados é incalculável. Na medida em que aspectos de segurança e interoperabilidade são aprimorados e a aceitação do usuário em favor da tecnologia aumenta, espera-se que a quantidade de informações partindo das redes vestíveis seja ainda maior. A atual infraestrutura que suporta a comunicação e as aplicações das redes vestíveis deve comportar o aumento exponencial dos dispositivos e dados. Uma das dificuldades para o gerenciamento pró-ativo rumo às melhorias nas infraestruturas de comunicação reside na dificuldade em mensurar a quantidade e capacidade dos dispositivos móveis em uma área específica. Isso torna difícil aplicar soluções que reduzam a carga sobre a infraestrutura centralizada, como o compartilhamento de recursos (processamento, comunicação), e a integração dos dispositivos e usuários através da Internet das coisas sociais (SIoT), por exemplo.

Para que qualquer tecnologia evolua de forma satisfatória é necessário que além de trazer benefícios ela consiga se disseminar e construir uma base sólida de utilizadores. A popularização das redes vestíveis permite a continuidade nas pesquisas e no desenvolvimento das tecnologias, que impulsionam por sua vez o surgimento de novas e melhores aplicações. No entanto, algumas características próprias dos dispositivos vestíveis podem reduzir o interesse ou até afastar os usuários. A disposição dos vestíveis sobre o corpo pode trazer desconforto físico e psicológico para alguns usuários que podem considerar o seu uso intrusivo. Muitos usuários se sentem intimidados pois não sabem exatamente como os dados coletados serão utilizados e qual o nível de segurança efetivo. Na maioria dos casos a desconfiança não está na tecnologia em si mas no fabricante do dispositivo e também nas plataformas de armazenamento de dados. Na situação dos vestíveis aplicados ao setor industrial, os trabalhadores podem não compreender a necessidade de monitoramento ou a funcionalidade dos vestíveis, sentindo-se vigiados e promovendo a insegurança. Finalmente, alguns usuários são avessos à tecnologia em geral, tornando difícil a inserção dos vestíveis em uma rotina diária.

A possibilidade de detectar e capturar dados continuamente é um dos destaques da tecnologia vestível. Entretanto, os dados coletados muitas vezes representam características e informações pessoais do usuário, sendo necessário uma preocupação ainda maior com a segurança e privacidade dos dados. Além da apreensão em razão das ameaças às tecnologias de comunicação sem fio (ataques, espionagem), os usuários também se preocupam com a segurança das plataformas de armazenamento de dados na nuvem e dos serviços baseados em localização. Países ao redor do mundo possuem leis específicas que lidam com a privacidade dos dados, incluindo as informações obtidas a partir dos vestíveis. No Brasil, desde setembro de 2020 a Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD) visa estabelecer um controle mais rigoroso ao acesso à informações de usuários captadas através de ferramentas tecnológicas [Pinheiro 2020]. Isso deve impactar a maneira como os

dados coletados através do vestíveis são armazenados e compartilhados. As preocupações com a segurança e a privacidade dos dados são ainda maiores quando os dados relacionados à saúde estão envolvidos.

Um terço de todos os dispositivos da IoT está relacionado à área da saúde e estima-se que 87% das organizações de saúde já adotam a Internet das Coisas Médicas, do inglês Internet of Health Things (IoHT). Entre as preocupações da IoHT estão a segurança, a resiliência e o desempenho da comunicação, uma vez que as aplicações em saúde requerem um alto nível de segurança e proteção [Wolf and Serpanos 2017]. Nessa aplicação dos vestíveis a vida das pessoas depende dos novos dispositivos e serviços médicos, exigindo atenção especial à resiliência (ou seja, disponibilidade de conexão contínua - 99,99999% de confiabilidade, latência ultrabaixa e suporte à mobilidade), mesmo no advento de falhas e ameaças, que podem ser imprevisíveis durante o desenvolvimento ou podem surgir durante a utilização [Laprie 2008]. No entanto, as vulnerabilidades da IoT em termos de segurança, privacidade e confiabilidade são amplamente conhecidas a partir de resultados acadêmicos [Coelho et al. 2019]. Essas vulnerabilidades não são diferentes para o contexto das redes vestíveis e requerem mais cuidados dadas as circunstâncias da IoHT.

4.4.2. Desafios das nanorredes

A comunicação intracorporal é uma tecnologia em fase de amadurecimento e muitos desafios existem. Diferentes adversidades são geradas pelo fato de que os dispositivos em micro e nanoescala têm capacidades computacionais reduzidas. A alimentação energética é um exemplo de limitação que dificulta a comunicação em nanorredes que utilizam dispositivos exclusivamente eletrônicos. Como os dispositivos alimentados por bateria têm vida útil limitada, métodos de captação e transferência de energia sem fio para alimentar os dispositivos foram investigados. Essas técnicas são promissoras para o desenvolvimento de implantáveis neutros em termos de energia, i.e., todas as operações do dispositivo são alimentadas por energia coletada do ambiente (mecânica, vibracional e química) [Kuscu et al. 2019]. No entanto, experimentos indicam que essas soluções fornecem energia de forma limitada aos dispositivos [Koucheryavy et al. 2021]. Como resultado, isso torna o desenvolvimento de até mesmo protocolos mais básicos como endereçamento e roteamento altamente desafiador. Esquemas de captação de energia ocorrem naturalmente nas CM e são propostas como soluções para os sistemas bioinspirados. O desafio para essas redes é então elaborar formas de mensurar a energia necessária para alcançar a codificação utilizando métricas como energia necessária por bit.

A baixa taxa de transmissão de dados é uma característica dos sistemas intracorporais e é causada por diversos fatores incluindo o atraso de propagação da informação, bem como o excesso de ruído no ambiente. Para a comunicação eletromagnética vários fenômenos quânticos afetam a propagação de ondas eletromagnéticas no grafeno. A frequência de ressonância dessas estruturas em escala nano pode ter magnitude duas vezes menor que as antenas não carbonadas e a eficiência de radiação também pode ser prejudicada por causa desse fenômeno [Akyildiz 2012]. Ademais, espera-se que os transceptores baseados em grafeno sejam limitados em termos de complexidade devido as restrições de espaço e limites de integração [Akyildiz and Jornet 2010]. Nas comunicações internas, a absorção de moléculas presentes no ambiente atenua o sinal transmitido e introduz ruído [Akyildiz and Jornet 2010]. Nas comunicações moleculares, os ruídos es-

tão relacionados ao tipo de canal e técnica de propagação empregada [Borges et al. 2021]. Portanto, o gerenciamento do ruído na CM sintética deve ser feito com base na caracterização da dinâmica do ambiente. Embora essas características desafiem as aplicações intracorporais, uma grande oportunidade surge para o desenvolvimento de esquemas de comunicação confiáveis ou técnicas adaptativas para lidar com essas adversidades.

Uma das questões de pesquisa mais desafiadora a ser abordada na comunicação intracorporal é a segurança para a saúde com os dispositivos implantáveis e a biocompatibilidade desses itens. A composição dos dispositivos intracorporais é importante para garantir biocompatibilidade. Atualmente, os dispositivos intracorporais que possuem milímetros ou micrômetros de tamanho têm sido desenvolvidos com materiais como piezoelétricos, platina, ouro, titânio, cobre, silício, prata e alumínio [Koucheryavy et al. 2021]. Entre os problemas da não compatibilidade levantados na literatura estão a toxicidade que os materiais em nanoescala podem apresentar, a corrosão de implantes dentro do corpo e a rejeição do tecido na área do transplante que impede o funcionamento dos biossensores, assim como a transmissão dos dados [Kuscu et al. 2019, Barbone et al. 2019]. Como os problemas levantados se aplicam especificamente aos dispositivos desenvolvidos a partir de nanomateriais, autores defendem que esses problemas podem ser evitados pela escolha da arquiteturas biológicas para o desenvolvimento dos componentes (tecidos e organismos geneticamente modificados) [Kuscu et al. 2019, Akyildiz et al. 2015].

Com o objetivo de trazer soluções para o desenvolvimento de novos dispositivos com aplicações médicas, uma extensa gama de estudos sobre materiais biocompatíveis como polímeros, dendrímeros, eletrônica orgânica e hidrogéis foram realizados na última década [Kuscu et al. 2019]. Além desses, o grafeno tem sido investigado por permitir o desenvolvimento de componentes em nanoescala resistentes e possuir boa condutividade elétrica e térmica. Com o surgimento de novos materiais, as questões de biocompatibilidade tanto dos dispositivos fabricados a partir de componentes sintéticos como biológicos ou híbridos deverão ser investigadas por meio de testes in-vivo e ensaios clínicos apropriados tal como ocorre para qualquer outro dispositivo médico. Uma vez que as aplicações intracorporais de saúde prometem explorar a propagação de informações dentro do corpo, a segurança dos sistemas de comunicação desenvolvidos também deve ser uma preocupação primária [Akyildiz et al. 2019].

Para se comunicar com redes externas, incluindo a Internet, os sistemas intracorporais exigirão uma interface tradutora para realizar um link de dados entre o dispositivo implantado e o dispositivo externo. Um dos principais desafios para a realização das interfaces bio-cibernéticas está na engenharia de processos químicos e físicos capaz de identificar com precisão as características da molécula onde a informação está codificada, e traduzi-las em sinais elétricos [Akyildiz et al. 2015]. Uma possível solução neste sentido pode vir de novos nanosensores que possuem capacidade de detecção de sinais químicos e biológicos. Como as moléculas e organismos vivos (bactérias, fungos, entre outros) podem apresentar bioluminescência quando uma parcela de energia das ligações químicas é liberada na forma de luz visível, este fenômeno pode ser uma opção para realizar a transdução do sinal bioquímico para sinais elétricos [Fouad et al. 2020], assim como a resposta térmica e bioluminescência de moléculas para a transdução de um sinal elétrico para um sinal bioquímico [Chude-Okonkwo et al. 2016]. Esse processo pode ocorrer através das propriedades do sensor que ao ser ativado pela presença de moléculas

modula a corrente em um circuito elétrico [Akyildiz et al. 2015].

A possibilidade de interagir do ambiente externo com as comunicações intracorporais e as informação do corpo através de interfaces bio-cibernéticas adiciona outra dimensão à segurança. Um ataque ao sistema ciber-humano pode ser usado para acessar a rede intracorporal e obter informações pessoais relacionadas à saúde ou até mesmo criar situações que coloque em risco a saúde do paciente [Akyildiz et al. 2015]. Os dispositivos intracorporais utilizados atualmente não possuem comunicações criptografadas uma vez que as contramedidas resultam no consumo de recursos computacionais adicionais ou até mesmo sendo necessário um módulo de segurança externo resultando em dispositivos maiores [Koucheryavy et al. 2021]. A segurança da informação é um assunto importante no desenvolvimento de aplicações voltadas a saúde e interação homem-máquina. Portanto, o progresso desses sistemas depende dos avanços de pesquisa relacionados à cibersegurança para prover a implementação de uma infraestrutura que possa garantir a integridade dos dados. Entretanto, as soluções devem atender aos requisitos computacionais dos dispositivos intracorporais.

Recentes avanços de pesquisa na biologia sintética permitiram através da manipulação artificial criar células que produzissem moléculas modificadas que podem ser utilizadas em redes baseadas em sinalização celular [Akyildiz et al. 2019]. Embora já existam técnicas de comunicação baseadas em nanomateriais e em células sintéticas com circuitos genéticos (*i.e.*, uma rede de reações químicas envolvendo genes e espécies moleculares trabalhando juntos) para codificar e modular símbolos, a implementação desses sistemas artificiais in-vivo deve validar suas capacidades de comunicação confiável. Da mesma forma, a implementação de esquemas de controle de erro para a sinalização celular que consideram as limitações das nanomáquinas biológicas e as diferentes fontes de ruídos dos tecidos permanece uma questão em aberto e deve levar em consideração dados experimentais do ambiente de aplicação e dos componentes biológicos utilizados.

4.4.3. Considerações sobre segurança, privacidade e resiliência

Os dispositivos empregados nas redes vestíveis comumente possuem falhas de segurança relacionadas à mecanismos de autenticação ineficientes, implementação deficiente das tecnologias de comunicação, e soluções defasadas [IBM 2020]. O resultado de ataques e exploração de falhas inclui a perda de informações resultante do sequestro de dispositivos, o tratamento impreciso de falhas, a negação de serviços, entre outros [FBI 2020]. Além disso, dados os recursos computacionais restritos como por exemplo, o processamento, a memória, a largura de banda, e o armazenamento em dispositivos vestíveis, frequentemente emprega-se versões simplificadas de mecanismos de segurança tradicionais. Isso pode levar à exposição parcial ou total de informações restritas [Blasco et al. 2019]. Adicionalmente, os canais de comunicação nas redes vestíveis estão sujeitos a ataques tanto durante o emparelhamento quanto na transmissão de dados, resultando em falhas no processo de autenticação do usuário [Classen et al. 2018], e criptografia fraca ou nenhuma criptografia [Wood et al. 2017].

As redes vestíveis tem um modelo de rede e comunicação segmentado e interdependente. Seu ecossistema abrange um grande número de dispositivos heterogêneos, protocolos de comunicação e mecanismos de processamento. Portanto, analisar a informação

correspondente a uma situação adversa torna-se uma tarefa complexa. Considerando as características dinâmicas dos dispositivos móveis, o ambiente vestível está em constante e drástica mudança. Portanto, devido a natureza intrincada das redes vestíveis, os mecanismos convencionais de segurança tornam-se inadequados para proteção contra as ameaças que estão se tornando cada vez mais sofisticadas [Hassija et al. 2019]. Os mecanismos de segurança atuais dependem principalmente de informações estáticas ou de uma parte específica das informações contextuais coletadas em uma infraestrutura específica, sendo inadequadas para fornecer segurança em uma arquitetura dinâmica.

Para oferecer suporte a uma ampla gama de aplicações, as redes vestíveis empregam várias tecnologias de comunicação sem fio com alcances distintos. Nas redes vestíveis convencionais, o vestível utiliza uma tecnologia de comunicação sem fio de curta distância para se comunicar com o coordenador. Apesar da pequena distância propiciada pela tecnologia, é possível que um atacante dentro do alcance capture os dados transmitidos, ou utilize o canal de comunicação para atacar diretamente o vestível ou o coordenador. Os ataques em que um invasor monitora os canais de comunicação e captura os dados da rede representam uma ameaça à confidencialidade enquanto ataques que visam desabilitar serviços nos dispositivos representam uma ameaça à disponibilidade. Ataques que modificam os dados em trânsito ou armazenados representam uma ameaça à integridade dos dados. Estruturas na nuvem representa uma parte fundamental das redes vestíveis e também pode ser alvo de ataques que ameaçam à confidencialidade, a disponibilidade e a integridade dos dados. A Figura 4.11 ilustra as principais ameaças de segurança nas redes vestíveis.

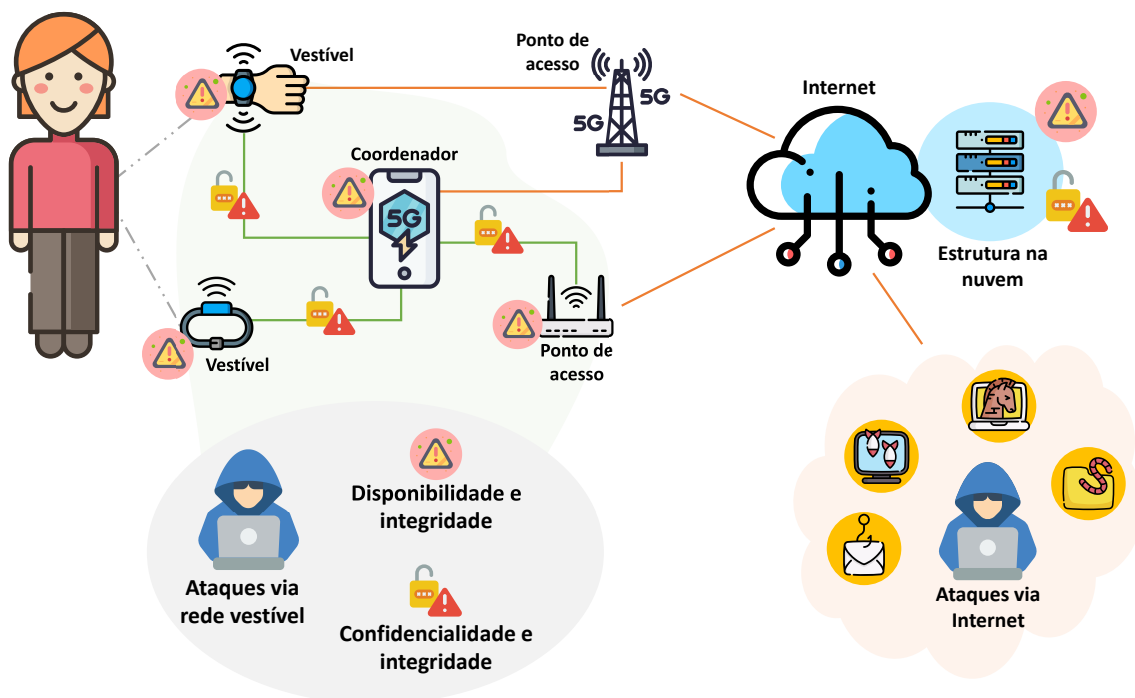


Figura 4.11: Ameaças de segurança nas redes vestíveis

A grande maioria dos ataques contra a disponibilidade é de negação de serviço, do inglês *Denial of Service* (DoS). Esses ataques visam inundar a rede vestível com uma grande quantidade de informação supérflua e podem causar interrupções na comunicação

e sobrecarga no armazenamento de dados dos vestíveis. As tecnologias de comunicação empregadas nas redes vestíveis possuem mecanismos de prevenção aos ataques DoS como sistemas de autorização e autenticação na fase de emparelhamento dos dispositivos. Todavia, nem sempre os fabricantes aplicam esses sistemas ou fazem de maneira ineficiente, deixando os dispositivos suscetíveis aos ataques DoS [Seneviratne et al. 2017]. As estruturas na nuvem podem ser alvo de um ataque ainda mais elaborado, a negação de serviço distribuída (DDoS). Nessa modalidade um atacante infecta uma série de dispositivos (computadores, roteadores de banda larga) através de técnicas de engenharia social como o *Phishing*, e usando códigos maliciosos como *Trojans* e *Worms*. Os dispositivos infectados formam uma rede estruturada sob domínio do atacante chamada *BotNet*, que pode ser usada de forma orquestrada para realizar ataques às estruturas na nuvem. Embora os ataques às estruturas de apoio não impossibilitem o funcionamento da rede vestível, eles podem afetar diretamente o funcionamento pleno do sistema.

Os ataques que ameaçam a confidencialidade envolvem a coleta de informações do usuário ou do dispositivo e o uso não autorizado dessas informações. Eventualmente, esses ataques visam os dados armazenados nos vestíveis ou na nuvem, mas em geral envolvem o monitoramento e interceptação dos dados transmitidos através dos canais de comunicação [Nakayama et al. 2019]. Devido às características das redes sem fio (comunicação pervasiva, curta distância) o principal ataque é o de espionagem, do inglês *Eavesdropping*. Esse ataque consiste na interceptação em tempo real de uma comunicação privada e representa um problema notável de segurança pois coloca em risco as informações pessoais de um usuário. Adicionalmente, ao revelarem informações do usuário e do dispositivo (senhas, números de identificação pessoais), esses ataques podem servir como porta de entrada para ataques mais elaborados. Outro ataque que segue o mesmo padrão é o ataque de análise de tráfego. Nesse tipo de ataque o invasor utiliza o modo promíscuo de uma interface sem fio para monitorar todo o tráfego ao seu alcance. Posteriormente, o invasor analisa o tráfego da rede e consegue identificar padrões que permitem relacionar um usuário a um dispositivo. Ataques de espionagem e análise de tráfego são considerados passivos pois somente monitoram a rede vestível.

As informações coletadas através de ataques de espionagem e análise de tráfego são empregadas para ataques de obtenção de informações, do inglês *Information Gathering Attacks*, que visam identificar as chaves empregadas no emparelhamento dos dispositivos. A partir da chave obtida e utilizando um equipamento imitando o dispositivo original, os atacantes ganham acesso a dispositivos vestíveis e subtraem informações confidenciais. Ataques de informações colaterais, do inglês *Side-channel Attacks*, empregam a coleta de informações para obter dados indiretamente relacionados ao ataque desejado, por exemplo capturar os movimentos do pulso do usuário a partir de um *smartwatch* para inferir a digitação de uma senha em um teclado numérico [Maiti et al. 2015]. Além dos ataques convencionais direcionados aos canais de comunicação, os softwares maliciosos para vestíveis também estão se proliferando. A incidência de softwares maliciosos é menor nos dispositivos com sistemas operacionais embarcados devido à complexidade de elaboração. Entretanto, com a popularização de sistemas operacionais específicos para vestíveis como o watchOS da Apple e o Google Wear, a tendência é de crescimento na quantidade de softwares maliciosos explorando falhas nos sistemas.

Um dos principais problemas de segurança nas redes vestíveis é a falta de cripto-

grafia dos dados enviados pela rede sem fio e também no armazenamento das informações. Vários dispositivos comerciais armazenam os dados coletados em uma base local, desprotegida, e em formato de texto simples [Seneviratne et al. 2017], incentivando e facilitando os ataques. A falta de criptografia se torna um problema ainda mais grave pois os fabricantes dos dispositivos enviam os dados para múltiplas estruturas de processamento e armazenamento na nuvem, aumentando os pontos de interceptação para um atacante. Outro problema que afeta os dispositivos vestíveis é a falta de autenticação. Alguns vestíveis são desprovidos de telas para exibição de informações ou toque, tornando complexa a tarefa de implantar mecanismos para inserção de senhas. Ressalta-se que essas falhas de segurança estão mais relacionadas ao desenvolvimento inadequado por parte dos fabricantes do que limitações nas tecnologias de comunicação. Mesmo considerando as dificuldades de aplicar mecanismos de segurança aos vestíveis por conta de seus recursos limitados, é papel do fabricante oferecer um uso descomplicado e seguro dos dispositivos.

É importante assegurar que os dados armazenados ou em trânsito não sejam alterados e sejam recebidos somente por entidades autorizadas. Os principais ataques que ferem a integridade dos dados são os de modificação, *replay* e de mascaramento. Nos ataques de modificação o atacante intercepta a transmissão de dados entre os vestíveis e altera o conteúdo dos pacotes ou os valores de data/hora. Dessa forma o atacante pode forjar um problema físico (arritmia, queda na oxigenação do sangue) e também a hora e data do suposto problema. Nos ataques de *replay* um atacante intercepta uma quantidade de dados para reutilizar em uma situação posterior, uma mensagem requisitando o uso de um sensor, por exemplo. Se aceita, a mensagem falsa pode acionar um sensor ou atuador e causar a aplicação incorreta de um medicamento, ou causar exaustão da bateria pelo funcionamento contínuo. Nos ataques de mascaramento, o atacante personifica ou clona o dispositivo autenticado para atuar como legítimo. O objetivo é subtrair os dados ou injetar informações falsas no sistema. Dispositivos intracorporais controlados remotamente também pode ser alvo de ataques. Existem exemplos na literatura onde atacantes remotos conseguem acesso às bombas de insulina, marcapassos, e implantes médicos [Zheng et al. 2017].

Quando empregadas na área de saúde, as redes vestíveis suportam o conceito da internet das coisas médicas (IoHT). Para as aplicações da IoHT, além das práticas de segurança citadas, é indispensável aplicar mecanismos para aumentar a resiliência da comunicação. As aplicações na IoHT lidam com dados que exigem urgência em sua transmissão pois o atraso ou falta de informações representam risco à vida do usuário. Isso torna os requisitos de comunicação extremamente restritos (baixa latência, baixa variação no atraso) e difíceis de serem cumpridos. Ao observar a estrutura da IoHT três serviços essenciais se destacam: (i) os serviços de coleta de dados, (ii) os serviços de conectividade e (iii) os serviços de comunicação fim-a-fim. A Figura 4.12 ilustra os serviços essenciais da IoHT. Os serviços de coleta atuam sobre os dispositivos; os serviços de conectividade atuam na comunicação entre dispositivos, coordenadores, e pontos de acesso; e os serviços de comunicação fim-a-fim oferecem comunicação multisaltos entre a rede vestível e as estruturas de suporte na nuvem.

Os requisitos de comunicação rigorosos, as dificuldades em estabelecer mecanismos de segurança, e as tecnologias de comunicação heterogêneas, tornam árdua a aplicação de mecanismos de resiliência na IoHT. Para cada serviço essencial, uma série de condições devem ser cumpridas para atingir a resiliência da comunicação. No serviços de

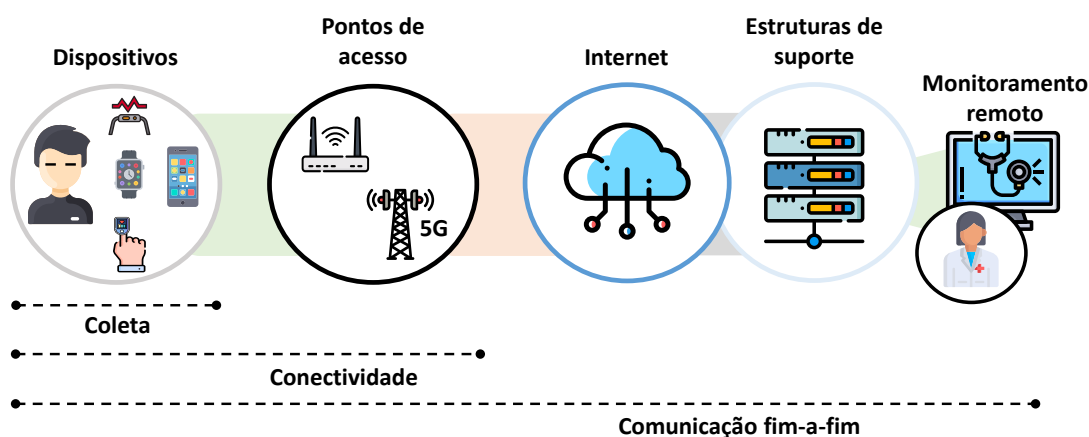


Figura 4.12: Internet das coisas médicas (IoHT)

coleta de dados, analisa-se a necessidade de redundância nos dados coletado (múltiplos sensores, múltiplos dispositivos) e quais as ações para armazenar esses dados no caso de falhas de comunicação. No serviço de conectividade, observa-se a interferência entre as tecnologias de comunicação sem fio para promover a coexistência e analisar a possibilidade de redundância nas tecnologias de comunicação. No serviço de comunicação fim-a-fim, lida-se com os possíveis atrasos ao transferir dados para a nuvem e a aplicação de mecanismos de segurança que assegurem a integridade e confidencialidade dos dados.

4.5. Integração das redes em direção aos sistemas ciber-humanos

O objetivo dos sistemas ciber-humanos é criar um ambiente integrado para que dispositivos computacionais e seres humanos possam cooperar e convergir para um mesmo propósito. Para alcançar esse objetivo, torna-se necessário gerenciar a operação entre as tecnologias de comunicação existentes e vislumbrar os possíveis cenários de crescimento, incluindo novas tecnologias e aplicações. A habilidade de um sistema trabalhar em conjunto ou usar componentes de outros sistemas é chamada interoperabilidade. Atualmente o ecossistema ciber-humano é construído de forma granular e com baixa adaptação entre as diversas tecnologias de comunicação e os dispositivos participantes, dificultando a interoperabilidade. A geração atual dos sistemas ciber-humanos foi construída sobre os fundamentos da IoT e herdou muitos dos seus problemas conceituais. Os principais problemas incluem a pobre interoperabilidade considerando as tecnologias de comunicação e protocolos, a formatação dos dados, e a adaptação entre serviços em níveis operacionais distintos (coleta de dados, conectividade e comunicação fim-a-fim).

Atualmente as tecnologias de comunicação em sistemas ciber-físicos operam verticalmente dentro dos serviços. A integração compreende somente a comunicação dentro de um serviço específico, dificultando a interoperabilidade. Entretanto, novas tecnologias podem alterar esse panorama estabelecido, e as redes vestíveis podem ser um ponto de partida. Uma das possibilidades para promover a integração das comunicações nos sistemas ciber-humanos é a tecnologia de comunicação dispositivo a dispositivo (D2D), já empregada nas redes vestíveis. A comunicação D2D não necessita de uma infraestrutura complexa de comunicação uma vez que os dispositivos se comunicam diretamente entre si. Atualmente, as redes vestíveis aplicam a comunicação D2D verticalmente e sem con-

siderar a conexão com a Internet, na comunicação entre vestível e coordenador, por exemplo. Todavia, com a introdução de dispositivos vestíveis que se conectam diretamente à Internet, a comunicação nos sistemas ciber-humanos pode alcançar novos patamares.

A comunicação D2D apoiada por tecnologias de comunicação celular como a LTE, permitirá a conexão direta dos dispositivos vestíveis com a Internet. Essa configuração reduz sensivelmente os problemas de comunicação causados pela falta de compatibilidade entre os dispositivos na rede vestível. No entanto, antes da inclusão em massa das novas tecnologia às redes vestíveis, alguns pontos devem ser considerados. A incorporação de novas tecnologias de comunicação eleva o preço dos dispositivos, reduzindo a velocidade de aceitação. Novos protocolos de comunicação devem ser aplicados aos vestíveis para comportar as novas tecnologias, porém, deve-se respeitar às características dos dispositivos que serão mantidas como baixo poder de processamento, baixa quantidade de memória e baterias de pequeno porte, entre outras. Finalmente, as novas tecnologias de comunicação atenderão à próxima geração de dispositivos, não sendo uma solução para enorme gama de dispositivos disponíveis atualmente.

No presente, a falta de interoperabilidade é o principal problema no tocante à comunicação nos sistemas ciber-físicos. Novas tecnologias de comunicação podem minimizar os problemas no futuro mas não representam uma solução para a atual geração de sistemas ciber-humanos. As principais propostas para os sistemas atuais envolvem o gerenciamento dos serviços de forma isolada e sem integração. Embora essas propostas sejam suficientes para manter o funcionamento das aplicações atuais, novas propostas como a Indústria 5.0, Sociedade 5.0, e Internet Sem Coisas [Maier et al. 2020], vão exigir maiores níveis de integração e operabilidade para funcionarem perfeitamente.

4.6. Ferramentas, simuladores e ambientes de experimentação

Esta seção apresenta as principais ferramentas empregadas pela comunidade científica em pesquisas relacionadas às redes vestíveis, sistemas ciber-físicos e ciber-humanos e nanoredes. Essas ferramentas incluem simuladores e emuladores de redes, plataformas de software e hardware abertos, entre outros. O estudo experimental de sistemas de comunicação molecular é uma tarefa difícil pois a experimentação em laboratório apresenta alto custo e a realização destes consomem muito tempo. Portanto, os avanços neste campo de pesquisa ocorrem principalmente através de simulações que são utilizadas para identificar e avaliar novas soluções de comunicação. Devido ao número considerável de propostas de canais para os sistemas ciber-físicos baseados em sistemas biológicos ou não, inúmeras ferramentas de simulações vêm sendo propostas nos últimos anos. A Tabela 4.4 apresenta os simuladores propostos e as informações associadas ao tipo de comunicação utilizada, à forma de propagação (*i.e.*, a forma de disseminação da portadora de informação), a linguagem de programação e se dispõe a opção *open source* (*i.e.*, "código aberto", o código fonte pode ser adaptado para diferentes fins). As principais características dos simuladores são apresentadas a seguir.

A ferramenta BINS para nanoredes biológicas foi desenvolvida para simular a troca de informações em canais baseados em difusão livre. BiNS apresenta uma abordagem "*plug-in-play*" para diferentes tipos de transmissores, canais, receptores, e é adaptável a qualquer tipo de partícula de informação [Felicetti et al. 2012]. Como forma de valida-

ção da metodologia de simulação, o sistema imunológico do corpo humano foi implementado no nBiNS e apresentado pelos autores. No sistema, os vasos sanguíneos fazem o papel do canal de comunicação para a propagação de moléculas do tipo IL-4 cytokines, as quais realizam o movimento aleatório entre o transmissor e o receptor. O nó transmissor é uma célula do tipo linfócito T e a célula linfócito B, o nó receptor. Os resultados obtidos no ambiente de simulação foram validados com dados experimentais.

O BNSIM (do inglês, Bacteria Network Simulator) é um simulador Java com paralelização de tarefas para simular redes de comunicação molecular baseadas em bactérias [Wei et al. 2013]. BNSim apresenta várias propriedades de redes bacterianas sintéticas e naturais. A plataforma de modelagem integra circuitos genéticos, modelos de comunicações químicas em um ambiente molecular 3D, e diferentes algoritmos de simulação (*i.e.*, algoritmo de Gillespie, equações diferenciais estocásticas, e um algoritmo híbrido que integra os dois métodos). Além disso, a ferramenta fornece orientações para a implementação do sistema de comunicação bacteriana em ambiente real.

| Simulador | Comunicação | Propagação | Linguagem / Ferramenta | Open Source |
|------------------|-----------------|---------------------|------------------------|-------------|
| BiNS | CM | Difusão livre | Java | Não |
| BNSIM | CM | Bactérias | Java | Sim |
| CalComSim | CM | Sinalização Celular | Python | Sim |
| dMCS | CM | Difusão livre | Java | Não |
| MUCIN | CM | Difusão livre | MATLAB | Sim |
| NanoNS | CM | Difusão livre | NS-2, Tcl, Java | Não |
| Nano-Sim | Eletromagnética | Banda Terahertz | NS-3 | Sim |
| NCSim | CM | Bactérias | C++ | Sim |
| Neuron Simulator | CM | Neurônios | Python | Sim |
| N3Sim | CM | Difusão livre | Java | Sim |

Tabela 4.4: Simuladores para nanorredes

O simulador de comunicação molecular baseada em sinalização de cálcio CalComSim (do inglês, Calcium Signalling-Based Molecular Communication System Simulator) foi projetado para simular tanto as comunicações sintéticas quanto as naturais encontradas no tecido humano [Barros et al. 2015]. O simulador integra diferentes modelos do processo de sinalização celular e o fechamento e abertura estocásticos das junções comunicantes entre as células. O algoritmo estocástico de Gillespie é aplicado para simular as reações múltiplas e paralelas em cada célula. Todos os modelos biológicos que são incorporados no simulador são baseados em dados experimentais e consideram um cenário 3D. O simulador pode ser usado não apenas por engenheiros de telecomunicações, mas também por farmacêuticos para projetar novos medicamentos e tratamentos para doenças que prejudicam a sinalização de cálcio.

O dMCS é uma arquitetura de simulação de alto nível para comunicação molecular com foco na escalabilidade [Akkaya et al. 2014]. A arquitetura visa simular o canal de comunicação baseado em difusão livre, e não considerara os efeitos dos ruídos e da interferência no sistema. Os resultados da validação do dMCS mostram que diferentes opções de escalabilidade podem ser usadas para se beneficiar do poder de processamento e encurtar o tempo de execução das simulações. O simulador MolecUlar Communication (MUCIN) também foi proposto para sistemas de CM baseados em difusão livre.

Este simulador suporta o ambiente molecular 1D e 3D, o envio de símbolos consecutivos, a recepção imperfeita de moléculas, a modulação/demodulação e uma opção para filtragem da interferência intersimbólica. O simulador está disponível na central de troca de arquivos do MATLAB. O código-fonte está disponível sob licença *Berkeley Software Distribution* BSD para pesquisadores.

A estrutura do NanoNS é construída sobre os principais componentes do simulador NS-2 e escrita em C++ e Tcl [Gul et al. 2010]. Ele incorpora os módulos de simulação para a comunicação em nanoescala com base em um canal de comunicação molecular difusivo. Os autores focaram principalmente nas propriedades do canal e no número de moléculas recebidas em função do tempo. O algoritmo divide o meio de propagação em malha. Assim, a posição exata da partícula não foi avaliada. No NanoNS, o processo de reação que descreve a interação molecular entre os nós e moléculas foi modelado de três maneiras diferentes, sendo uma delas sem reação. A validação do simulador foi realizada através da análise comparativa dos resultados experimentais e numéricos obtidos.

O NCSim simula nanorredes biológicas de bactérias flageladas [Balasubramaniam and Lio 2013]. As informações são codificadas em diferentes formatos pelo DNA dessas bactérias. Após a codificação, as bactérias transmitem as informações para nós *relays*, ou receptores que são outras bactérias do mesmo tipo. O NCSim consiste nos diferentes módulos: (i) camada física de rede bacteriana, que integra a mobilidade de bactérias, conjugação, técnicas de codificação e decodificação, (ii) módulo para gerar cenários e monitorar as simulações e (iii) módulo destinado ao pós-processamento de dados e plotagem de gráficos. O módulo da camada física, como o mais intensivo computacional, é implementado em C++. Os demais módulos são escritos em Python para simplicidade de manutenção e extensão. Scripts em Python são necessários para a definição de cenários por parte dos usuários.

NEURON é um ambiente utilizado para implementar modelos de neurônios individuais e pequenas redes neuronais [Hines and Carnevale 2001]. A ferramenta possui uma extensão para a linguagem de programação Python e foi desenvolvida pela Universidade de Yale. Devido a sua precisão em implementar modelos bio-físicos (processo de propagação de impulsos neuronais e a propagação das sinapses), o simulador é bastante popular na disciplina da neurociência. Os modelos bio-físicos podem ser adaptados para simular experimentos *in-vitro*, onde a partir de uma imagem da célula, a configuração morfológica dela pode ser obtida para compor um novo modelo. O simulador é utilizado pelo *Blue Brain Project*, uma iniciativa Europeia de digitalização do córtex cerebral, os dados desse projeto podem ser acessados virtualmente e seus modelos podem utilizados por pesquisadores.

N3Sim é um pacote Java para simular a comunicação baseada em difusão livre. Diferente dos demais simuladores, o processo de comunicação considera receptores não absorventes (*i.e.*, os nós transmissores podem ter um determinado volume e mensurar as moléculas emitidas pela sua reflexão, mas não possui a capacidade de absorver as moléculas)[Llatser et al. 2014]. O receptor realiza a contagem das partículas localizadas dentro de uma determinada área próxima a ele durante intervalos de tempo predefinidos. N3Sim simula a difusão de partículas em um ambiente 2-D, com uma expansão contínua para modelos de processo de difusão 3-D. O simulador considera fontes de ruídos e erros

gerados por forças eletrostáticas e colisões de moléculas.

Nano-sim é uma ferramenta de código aberto para modelar nanorredes baseadas em ondas eletromagnéticas [Piro et al. 2013]. O módulo foi desenvolvido dentro do simulador NS-3 e constitui a base para o design e a avaliação de arquiteturas de rede e algoritmos mais complexos. A ferramenta fornece uma pilha de protocolos de controle de acesso ao meio, um módulo de roteamento baseado na estratégia de *broadcasting* e uma unidade genérica para geração e processamento de mensagens. Também é possível avaliar cenários estáticos e móveis (posição constante, aceleração constante, velocidade constante, caminhada aleatória, direção aleatória e pontos de passagem aleatórios). O processo para gerar mensagens pode ser ajustado com base nos requisitos necessários.

Visando à convergência dos diversos simuladores propostos pela comunidade de pesquisa, um modelo de Markup-Language para nanorredes e comunicações moleculares (MolComML) inspirado pelo projeto *Synthetic Biology Markup Language* ou *CellML* foi proposto em [Felicetti et al. 2018]. A arquitetura de interpretação de definição de cenários por arquivos XML permite usuários com outros sistemas usar a ferramenta de simulação. Essa metodologia permite também o uso de vários outros simuladores que apresentem heterogeneidade em termos de linguagem de programação e desempenho, para a criação de complexos cenários de simulação. O MolComML possibilita a validação de resultados de simulação com experimentos disponíveis pela ferramenta.

As redes vestíveis são amplamente fundamentadas na comunicação sem fio. Sendo assim, não é uma surpresa que a maioria dos ambientes experimentais sejam atrelados às ferramentas que suportem esse tipo de comunicação. As ferramentas mais utilizadas incluem os simuladores de rede NS-2, NS-3, OMNeT++, além de programas de cálculo numérico e estatística alicerçados por códigos específicos desenvolvidos para simulação de redes, como o Matlab e o R Project. O principal parâmetro avaliada nos trabalhos que avaliam as redes vestíveis é o desempenho da rede (vazão, atraso). Embora as ferramentas de simulação de redes suportem a maioria das tecnologias de comunicação sem fio, algumas características das redes vestíveis não são suportadas pelos simuladores, tornando-se necessário usar múltiplas ferramentas ou ainda a construção de ferramentas específicas. As principais dificuldade dizem respeito às múltiplas tecnologias de comunicação sem fio utilizadas simultaneamente, às relações entre elas (alcance, interferência, coexistência) e a dificuldade em caracterizar a mobilidade dos dispositivos vestíveis. A Tabela 4.5 lista os principais simuladores, programas, e ferramentas utilizados para avaliar aspectos importantes das redes vestíveis.

A maioria dos estudos sobre redes vestíveis consideram apenas um segmento da rede e focaliza um objetivo principal, por exemplo a comunicação entre vestíveis e coordenadores para avaliar as características de um protocolo de comunicação. Entretanto, mesmo em cenários mais simples, seria benéfico avaliar a mobilidade, a distância entre vestível e coordenador, o nível de bateria dos dispositivos, entre outros. Alguns experimentos envolvem a integração de ferramentas de análise baseadas em simulação para obter resultados mais completos [Neema et al. 2019]. Fora do escopo da comunicação, estudos sobre as redes vestíveis avaliam diferentes aspectos dos protocolos de comunicação sendo os mais abordados a eficiência energética e a segurança. Considerando a segurança, as análises são feitas em duas etapas: a avaliação do protocolo de segurança

| Ambientes experimentais para redes vestíveis | | |
|---|--|-------------|
| Simuladores | | |
| Nome | Descrição | Open Source |
| NS2 | Simulador de rede | Sim |
| NS-3 | Simulador de rede | Sim |
| OMNeT++ | Biblioteca C++ para construção de simulações | Sim |
| OPNET | Simulador de rede com ambiente visual para modelagem | Não |
| Programas | | |
| Nome | Característica | Open Source |
| Matlab | Plataforma de programação e cálculo numérico que pode simular o comportamento de aspectos da rede vestível (mobilidade, segurança) | Não |
| R Project | Ambiente para computação estatística e produção de gráficos que pode ser utilizada para simular o comportamento de aspectos da rede vestível | Sim |
| AVISPA | Programa para análise de segurança de aplicações e protocolos da Internet | Não |
| Scyther | Programa para verificação de protocolos de segurança | Sim |
| Alloy | Programa para modelagem e avaliação de segurança (entre outros parâmetros) dos modelos construídos | Sim |
| Tamarin | Programa para verificação de segurança de protocolos de modelos simbólicos | Sim |
| Ferramentas adicionais | | |
| Tipo | Funcionalidades | |
| Microcontroladores | Simular a capacidade de processamento de um dispositivo vestível comercial | |
| Baterias | Permitir a avaliação da eficiência energética nos ambientes de teste | |
| Conjunto de dados | Testar os ambientes em situações de mundo real através de dados previamente armazenados | |
| Sensores | Coletar dados que complementem o ambiente experimental (sinais biológicos, movimento, som, imagem, etc) | |

Tabela 4.5: Ferramentas para avaliação das redes vestíveis

através de programas específicos, e a avaliação de desempenho do protocolo conduzida em ambiente experimental físico ou virtual. Outro aspecto da segurança que também é alvo de experimentação é a autenticação através de senhas, características biométricas e proximidade dos dispositivos, entre outros.

Avaliações de segurança que incluem a autenticação de usuários geralmente são conduzidas em ambiente de experimentação real pois consideram a carga e o tempo de processamento do dispositivo avaliado. Nos casos em que as características biométricas (variação cardíaca, impressão digital) são utilizadas para autenticação, geralmente emprega-se um conjunto de dados para avaliar o mecanismo construído, por exemplo uma base de sinais contendo padrões de frequência cardíaca para validar um mecanismo de autenticação baseado na variação cardíaca do usuário. Eventualmente, a construção dos conjuntos de dados pode fazer parte do experimento. Nesses casos, através de sensores específicos (sinais biológicos, movimento, som) acoplados a microcontroladores, cria-se uma base de dados para experimentação. A complexidade e diversidade de tecnologias de comunicação e parâmetros de segurança nas redes vestíveis torna praticamente inviável o uso de uma ferramenta exclusiva para simulações.

4.7. Considerações finais

A evolução dos dispositivos computacionais rumo à miniaturização pavimentou o caminho para novas tecnologias como as redes vestíveis e as nanorredes. Essas novas tecnologias por sua vez apoiam o surgimento de novos conceitos, como os sistemas ciber-humanos, por exemplo. De fato, os pilares fundamentais para a integração dos dispositivos vestíveis e das nanorredes aos sistemas ciber-físicos e ciber-humanos serão a pesquisa

e o desenvolvimento tecnológico em pontos chave como comunicação, energia sustentável e progressos na miniaturização dos componentes, entre outros.

Neste capítulo de livro, apresentamos um contexto histórico para evolução das tecnologias que constituem as redes vestíveis e as nanorredes e que culminaram na disseminação de dispositivos vestíveis e em nanoescala para uma variedade de aplicações. A introdução dos conceitos fundamentais, considerando os sistemas ciber-humanos, ciber-físicos, dispositivos e redes vestíveis e nanorredes, abre caminho para uma melhor percepção sobre as funcionalidades e dificuldades de integração das tecnologias. A grande variedade de tecnologias de comunicação presente nos sistemas ciber-humanos e a diversidade de configurações propiciadas por essas tecnologias alancam uma infinidade de aplicações médicas e não médica. Entretanto, a multiplicidade de tecnologias e a sua integração representam um dos desafios a serem transpostos.

Grande parte das informações coletadas por nanodispositivos e vestíveis representam características pessoais, tornando-se necessário aplicar medidas que assegurem a segurança do usuário e dos dispositivos, a privacidade das informações e a resiliência na comunicação. A variedade de dispositivos, protocolos e tecnologias de comunicação e mecanismos de segurança dificulta a integração das redes em direção aos sistemas ciber-humanos. A dificuldade ao construir ambientes de experimentação virtuais ou práticos reflete a falta de integração nos sistemas ciber-humanos. Da mesma forma que os sistemas ciber-humanos carecem de maior integração das ferramentas de simulação, estas ainda não contemplam toda a complexidade desses sistemas, sendo necessária a aplicação de diversas ferramentas para criar um ambiente experimental.

As redes vestíveis e nanorredes, assim como os sistemas ciber-humanos, estão em sua infância e têm um grande potencial de desenvolvimento. Grande parte da evolução acontecerá em consonância com o avanço tecnológico, mas para que os sistemas ciber-físicos se tornem uma realidade mais rapidamente, serão necessárias ações que contribuam para uma maior integração entre as tecnologias existentes. A inclusão de novas tecnologias de comunicação nas nanorredes e nas redes vestíveis permitirá novas possibilidades de integração para os sistemas ciber-humanos e sua utilização em novas aplicações. No entanto, a forte conexão entre os componentes dos sistemas proprietários é um dos principais desafios, pois desconsidera os padrões existentes e inibe a interoperabilidade no ecossistema ciber-humano.

No decorrer dos próximos anos observaremos um grande avanço nas tecnologias que impulsionam as nanorredes e redes vestíveis. Vários desafios ainda devem ser confrontados como melhorias no processo de aquisição de dados e processamento, aprimoramentos na comunicação, segurança, privacidade e resiliência. Somente ao superar esses desafios poderemos idealizar um ambiente de cooperação entre máquinas, computadores e seres humanos que seja ao mesmo tempo funcional, integrado e seguro.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da UFPR e da UFMG e o auxílio financeiro do CNPq processos, #313844/2020-8, #426701/2018-6 e da CAPES, processos #88882.382196/2019-01 e #88882.382204/2019-01.

Referências

- [Akkaya et al. 2014] Akkaya, A., Genc, G., and Tugcu, T. (2014). Hla based architecture for molecular communication simulation. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 42:163–177.
- [Akyildiz 2012] Akyildiz, I. F. (2012). Nanonetworks: A new frontier in communications. In *Proceedings of the 18th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 1–2. ACM.
- [Akyildiz and Jornet 2010] Akyildiz, I. F. and Jornet, J. M. (2010). Electromagnetic wireless nanosensor networks. *Nano Communication Networks*, 1(1):3–19.
- [Akyildiz et al. 2019] Akyildiz, I. F., Pierobon, M., and Balasubramaniam, S. (2019). Moving forward with molecular communication: From theory to human health applications [point of view]. *Proceedings of the IEEE*, 107(5):858–865.
- [Akyildiz et al. 2015] Akyildiz, I. F., Pierobon, M., Balasubramaniam, S., and Koucheryavy, Y. (2015). The internet of bio-nano things. *IEEE Communications Magazine*, 53(3):32–40.
- [Al-Shawabka et al. 2020] Al-Shawabka, A., Restuccia, F., D’Oro, S., Jian, T., Costa Rendon, B., Soltani, N., Dy, J., Ioannidis, S., Chowdhury, K., and Melodia, T. (2020). Exposing the fingerprint: Dissecting the impact of the wireless channel on radio fingerprinting. In *IEEE INFOCOM 2020*, pages 646–655.
- [Al-Turjman and Baali 2019] Al-Turjman, F. and Baali, I. (2019). Machine learning for wearable iot-based applications: A survey. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, page e3635.
- [Analysts 2020] Analysts, G. I. (2020). Wearable sensors - global market trajectory and analytics. Technical report, Global Industry Analysts, Inc.
- [Ashibani and Mahmoud 2017] Ashibani, Y. and Mahmoud, Q. H. (2017). Cyber physical systems security: Analysis, challenges and solutions. *Computers & Security*, 68:81–97.
- [Balasubramaniam and Lio 2013] Balasubramaniam, S. and Lio, P. (2013). Multi-hop conjugation based bacteria nanonetworks. *IEEE Transactions on NanoBioscience*, 12(1):47–59.
- [Barbone et al. 2019] Barbone, A. S., Meftah, M., Markiewicz, K., and Dellimore, K. (2019). Beyond wearables and implantables: a scoping review of insertable medical devices. *Biomedical Physics & Engineering Express*, 5(6):062002.
- [Baron et al. 2018] Baron, K. G., Duffecy, J., Berendsen, M. A., Mason, I. C., Lattie, E. G., and Manalo, N. C. (2018). Feeling validated yet? a scoping review of the use of consumer-targeted wearable and mobile technology to measure and improve sleep. *Sleep medicine reviews*, 40:151–159.
- [Barros et al. 2015] Barros, M. T., Balasubramaniam, S., and Jennings, B. (2015). Comparative end-to-end analysis of ca 2+-signaling-based molecular communication in biological tissues. *IEEE Transactions on Communications*, 63(12):5128–5142.

- [Blasco et al. 2019] Blasco, J., Chen, T. M., Patil, H. K., and Wolff, D. (2019). Wearables security and privacy. In *Mission-Oriented Sensor Networks and Systems: Art and Science*, pages 351–380. Springer.
- [Borges et al. 2021] Borges, L. F., Barros, M. T., and Nogueira, M. (2021). Toward reliable intra-body molecular communication: An error control perspective. *IEEE Communications Magazine*, 59(5):114–120.
- [Chahibi et al. 2013] Chahibi, Y., Pierobon, M., Sang, O. S., and Akyildiz, I. F. (2013). A molecular communication system model for particulate drug delivery systems. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 60(12):3468–3483.
- [Chude-Okonkwo et al. 2016] Chude-Okonkwo, U. A., Malekian, R., and Maharaj, B. T. (2016). Biologically inspired bio-cyber interface architecture and model for internet of bio-nanotechnology applications. *IEEE Trans. on Communications*, 64(8):3444–3455.
- [Chude-Okonkwo et al. 2017] Chude-Okonkwo, U. A., Malekian, R., Maharaj, B. T., and Vasilakos, A. V. (2017). Molecular communication and nanonetwork for targeted drug delivery: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(4):3046–3096.
- [Classen et al. 2018] Classen, J., Wegemer, D., Patras, P., Spink, T., and Hollick, M. (2018). Anatomy of a vulnerable fitness tracking system: Dissecting the fitbit cloud, app, and firmware. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, 2(1):5.
- [Coelho et al. 2019] Coelho, K., Damião, D., Noubir, G., Borges, A., Nogueira, M., and Nacif, J. (2019). Cryptographic algorithms in wearable communications: An empirical analysis. *IEEE Communications Letters*, 23(11):1931–1934.
- [Da Costa et al. 2009] Da Costa, M. R., Kibis, O., and Portnoi, M. (2009). Carbon nanotubes as a basis for terahertz emitters and detectors. *Microelectronics Journal*, 40(4-5):776–778.
- [Datta et al. 2018] Datta, T., Apthorpe, N., and Feamster, N. (2018). A developer-friendly library for smart home IoT privacy-preserving traffic obfuscation. In *Proceedings of the Workshop on IoT Security and Privacy*.
- [De Amicis et al. 2015] De Amicis, A., De Sanctis, S., Di Cristofaro, S., Franchini, V., Lista, F., Regalbuto, E., Giovenale, E., Gallerano, G. P., Nenzi, P., Bei, R., et al. (2015). Biological effects of in vitro thz radiation exposure in human foetal fibroblasts. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 793:150–160.
- [Dhanvijay and Patil 2019] Dhanvijay, M. M. and Patil, S. C. (2019). Internet of things: A survey of enabling technologies in healthcare and its applications. *Computer Networks*, 153:113–131.
- [Ding et al. 2018] Ding, D., Han, Q.-L., Xiang, Y., Ge, X., and Zhang, X.-M. (2018). A survey on security control and attack detection for industrial cyber-physical systems. *Neurocomputing*, 275:1674 – 1683.
- [Ding et al. 2019] Ding, H., Shu, X., Jin, Y., Fan, T., and Zhang, H. (2019). Recent advances in nanomaterial-enabled acoustic devices for audible sound generation and detection. *Nanoscale*, 11(13):5839–5860.

- [Dong et al. 2019] Dong, S., Li, Z., Tang, D., Chen, J., Sun, M., and Zhang, K. (2019). Your smart home can't keep a secret: Towards automated fingerprinting of iot traffic with neural networks. *ArXiv*, abs/1909.00104.
- [FBI 2020] FBI (2015 (Accessed January 10, 2020)). *Internet of Things Poses Opportunities for Cyber Crime*.
- [Felicetti et al. 2018] Felicetti, L., Assaf, S. S., Femminella, M., Reali, G., Alarcon, E., and Sole-Pareta, J. (2018). The molecular communications markup language (mol-comm). *Nano communication networks*, 16:12–25.
- [Felicetti et al. 2012] Felicetti, L., Femminella, M., and Reali, G. (2012). A simulation tool for nanoscale biological networks. *Nano Communication Networks*, 3(1):2–18.
- [Ferro and Potorti 2005] Ferro, E. and Potorti, F. (2005). Bluetooth and wi-fi wireless protocols: a survey and a comparison. *IEEE Wireless Communications*, 12(1):12–26.
- [Fouad et al. 2020] Fouad, H., Hashem, M., and Youssef, A. E. (2020). A nanobiosensors model with optimized bio-cyber communication system based on internet of bio-nano things for thrombosis prediction. *Journal of Nanoparticle Resc.*, 22:1–17.
- [Gao et al. 2016] Gao, W., Emaminejad, S., Nyein, H. Y. Y., Challa, S., Chen, K., Peck, A., Fahad, H. M., Ota, H., Shiraki, H., and Kiriya, D. (2016). Fully integrated wearable sensor arrays for multiplexed in situ perspiration analysis. *Nature*, 529:509–527.
- [Gul et al. 2010] Gul, E., Atakan, B., and Akan, O. B. (2010). Nanons: A nanoscale network simulator framework for molecular communications. *Nano Communication Networks*, 1(2):138–156.
- [Hafeez et al. 2020] Hafeez, I., Antikainen, M., Ding, A., and Tarkoma, S. (2020). Iot-keeper: Detecting malicious IoT network activity using online traffic analysis at the edge. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 17:45–59.
- [Hassija et al. 2019] Hassija, V., Chamola, V., Saxena, V., Jain, D., Goyal, P., and Sikdar, B. (2019). A survey on iot security: application areas, security threats, and solution architectures. *IEEE Access*, 7:82721–82743.
- [Hines and Carnevale 2001] Hines, M. L. and Carnevale, N. T. (2001). Neuron: a tool for neuroscientists. *The neuroscientist*, 7(2):123–135.
- [Hochberg et al. 2006] Hochberg, L. R., Serruya, M. D., Friebs, G. M., Mukand, J. A., Saleh, M., Caplan, A. H., Branner, A., Chen, D., Penn, R. D., and Donoghue, J. P. (2006). Neuronal ensemble control of prosthetic devices by a human with tetraplegia. *Nature*, 442(7099):164–171.
- [Hogg and Freitas Jr 2012] Hogg, T. and Freitas Jr, R. A. (2012). Acoustic communication for medical nanorobots. *Nano Communication Networks*, 3(2):83–102.
- [IBM 2020] IBM (2019 (Accessed January 18, 2020)). *Cost of a Data Breach Report*.
- [IDTechEX 2021] IDTechEX (2021). Wearable technology market by 2028. <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2021-01-11-gartner-forecasts-global-spending-on-wearable-devices-to-total-81-5-billion-in-2021>. Accessed: 2021-26-05.

- [Jablonski and Chaplin 2010] Jablonski, N. G. and Chaplin, G. (2010). Human skin pigmentation as an adaptation to uv radiation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(Supplement 2):8962–8968.
- [Jia et al. 2019] Jia, X., He, J., Shen, L., Chen, J., Wei, Z., Qin, X., Niu, D., Li, Y., and Shi, J. (2019). Gradient redox-responsive and two-stage rocket-mimetic drug delivery system for improved tumor accumulation and safe chemotherapy. *Nano letters*, 19(12):8690–8700.
- [Khan and Pathan 2018] Khan, R. A. and Pathan, A.-S. K. (2018). The state-of-the-art wireless body area sensor networks: A survey. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 14(4):1550147718768994.
- [Kim et al. 2016] Kim, H., Yves, P., and Lee, K. (2016). Development of chip-less and wireless neural probe functioning stimulation and reading in a single device. *Microelectronic Engineering*, 158:118–125.
- [Kong et al. 2019] Kong, X. T., Luo, H., Huang, G. Q., and Yang, X. (2019). Industrial wearable system: the human-centric empowering technology in industry 4.0. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30(8):2853–2869.
- [Koucheryavy et al. 2021] Koucheryavy, Y., Yastrebova, A., Martins, D. P., and Balasubramaniam, S. (2021). A review on bio-cyber interfaces for intrabody molecular communications systems. *arXiv preprint arXiv:2104.14944*.
- [Kubota et al. 2016] Kubota, K. J., Chen, J. A., and Little, M. A. (2016). Machine learning for large-scale wearable sensor data in parkinson’s disease: Concepts, promises, pitfalls, and futures. *Movement disorders*, 31(9):1314–1326.
- [Kuscu et al. 2019] Kuscu, M., Dinc, E., Bilgin, B. A., Ramezani, H., and Akan, O. B. (2019). Transmitter and receiver architectures for molecular communications: A survey on physical design with modulation, coding, and detection techniques. *Proceedings of the IEEE*, 107(7):1302–1341.
- [Laprie 2008] Laprie, J.-C. (2008). From dependability to resilience. In *IEEE/IFIP Int. Conf. On Dependable Systems and Networks*, pages 1–2.
- [Laprie et al. 2004] Laprie, J.-C., Randell, B., and Landwehr, C. (2004). Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing. *IEEE Transaction Dependable Security Computer*, 1(1):11–33.
- [Llatser et al. 2014] Llatser, I., Demiray, D., Cabellos-Aparicio, A., Altılar, D. T., and Alarcón, E. (2014). N3sim: Simulation framework for diffusion-based molecular communication nanonetworks. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 42:210–222.
- [Loscri and Vegni 2015] Loscri, V. and Vegni, A. M. (2015). An acoustic communication technique of nanorobot swarms for nanomedicine applications. *IEEE transactions on nanobioscience*, 14(6):598–607.
- [Losilla et al. 2011] Losilla, F., Garcia-Sanchez, A.-J., Garcia-Sanchez, F., Garcia-Haro, J., and Haas, Z. J. (2011). A comprehensive approach to wsn-based its applications: A survey. *Sensors*, 11(11):10220–10265.

- [Maier et al. 2020] Maier, M., Ebrahimzadeh, A., Rostami, S., and Beniiche, A. (2020). The internet of no things: Making the internet disappear and "see the invisible". *IEEE Communications Magazine*, 58(11):76–82.
- [Maiti et al. 2015] Maiti, A., Jadliwala, M., He, J., and Bilogrevic, I. (2015). (smart) watch your taps: Side-channel keystroke inference attacks using smartwatches. In *Proceedings of the 2015 ACM Int. Symposium on Wearable Computers*, pages 27–30.
- [Mattson 2004] Mattson, M. P. (2004). Pathways towards and away from alzheimer’s disease. *Nature*, 430(7000):631–639.
- [Mcguinness et al. 2019] McGuinness, D. T., Selis, V., and Marshall, A. (2019). Molecular-based nano-communication network: A ring topology nano-bots for in-vivo drug delivery systems. *IEEE Access*, 7:12901–12913.
- [Moore 1998] Moore, G. E. (1998). Cramming more components onto integrated circuits. *Proceedings of the IEEE*, 86(1):82–85.
- [Movassaghi et al. 2014] Movassaghi, S., Abolhasan, M., Lipman, J., Smith, D., and Jamalipour, A. (2014). Wireless body area networks: A survey. *IEEE Communications surveys & tutorials*, 16(3):1658–1686.
- [Muller et al. 2014] Muller, R., Le, H.-P., Li, W., Ledochowitsch, P., Gambini, S., Bjorninen, T., Koralek, A., Carmena, J. M., Maharbiz, M. M., Alon, E., et al. (2014). A minimally invasive 64-channel wireless μ ecog implant. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 50(1):344–359.
- [Nakayama et al. 2019] Nakayama, F., Lenz, P., Banou, S., Nogueira, M., Santos, A., and Chowdhury, K. R. (2019). A continuous user authentication system based on galvanic coupling communication for s-health. *Wireless Commun. and Mobile Computing*, 2019(1):1–11.
- [Nakayama et al. 2021] Nakayama, F., Lenz, P., LeFloch, A., Beylot, A.-L., Santos, A., and Nogueira, M. (2021). Performance management on multiple communication paths for portable assisted living. *IFIP Int. Symposium on Integrated Network Management*.
- [Neema et al. 2019] Neema, H., Sztipanovits, J., Steinbrink, C., Raub, T., Cornelsen, B., and Lehnhoff, S. (2019). Simulation integration platforms for cyber-physical systems. In *Proceedings of the Workshop on Design Automation for CPS and IoT*, pages 10–19.
- [Negra et al. 2016] Negra, R., Jemili, I., and Belghith, A. (2016). Wireless body area networks: Applications and technologies. *Procedia Computer Science*, 83:1274–1281.
- [Nogueira et al. 2009] Nogueira, M., dos Santos, A. L., and Pujolle, G. (2009). A survey of survivability in mobile ad hoc networks. *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, 11:66–77.
- [Ometov et al. 2021] Ometov, A., Shubina, V., Klus, L., Skibińska, J., Saafi, S., Pascacio, P., Flueratoru, L., Gaibor, D. Q., Chukhno, N., Chukhno, O., et al. (2021). A survey on wearable technology: History, state-of-the-art and current challenges. *Computer Networks*, 193.
- [Oresko et al. 2010] Oresko, J. J., Jin, Z., Cheng, J., Huang, S., Sun, Y., Duschl, H., and Cheng, A. C. (2010). A wearable smartphone-based platform for real-time cardiovascular disease detection via electrocardiogram processing. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 14(3):734–740.

- [Perez and Zeadally 2017] Perez, A. J. and Zeadally, S. (2017). Privacy issues and solutions for consumer wearables. *It Professional*, 20(4):46–56.
- [Pfeiffer et al. 2018] Pfeiffer, M., Senkovskiy, B. V., Haberer, D., Fischer, F. R., Yang, F., Meerholz, K., Ando, Y., Grüneis, A., and Lindfors, K. (2018). Enhanced light-matter interaction of aligned armchair graphene nanoribbons using arrays of plasmonic nanoantennas. *2D Materials*, 5(4):045006.
- [Pinheiro 2020] Pinheiro, P. P. (2020). *Proteção de Dados Pessoais: Comentários à Lei n. 13.709/2018-LGPD*. Saraiva Educação SA.
- [Piro et al. 2013] Piro, G., Grieco, L. A., Boggia, G., and Camarda, P. (2013). Simulating wireless nano sensor networks in the ns-3 platform. In *2013 27th Int. Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops*, pages 67–74. IEEE.
- [Poongodi et al. 2020] Poongodi, T., Rathee, A., Indrakumari, R., and Suresh, P. (2020). Iot sensing capabilities: sensor deployment and node discovery, wearable sensors, wireless body area network (wban), data acquisition. In *Principles of Internet of Things (IoT) Ecosystem: Insight Paradigm*, pages 127–151. Springer.
- [Posada et al. 2015] Posada, J., Toro, C., Barandiaran, I., Oyarzun, D., Stricker, D., De Amicis, R., Pinto, E. B., Eisert, P., Döllner, J., and Vallarino, I. (2015). Visual computing as a key enabling technology for industrie 4.0 and industrial internet. *IEEE computer graphics and applications*, 35(2):26–40.
- [Prates et al. 2020] Prates, N., Vergutz, A., Macedo, R., Santos, A., and Nogueira, M. (2020). A defense mechanism for timing-based side-channel attacks on IoT traffic (to appear). In *IEEE GLOBECOM*.
- [Rajkumar et al. 2010] Rajkumar, R., Lee, I., Sha, L., and Stankovic, J. (2010). Cyber-physical systems: The next computing revolution. In *Design Automation Conference*, pages 731–736.
- [Resch 2013] Resch, B. (2013). People as sensors and collective sensing-contextual observations complementing geo-sensor network measurements. In *Progress in location-based services*, pages 391–406. Springer.
- [Richard Van Noorden 2016] Richard Van Noorden, D. C. (2016). World’s tiniest machines win chemistry nobel. *Nature*, 538(7624):152–153.
- [Roda-Sanchez et al. 2018] Roda-Sanchez, L., Garrido-Hidalgo, C., Hortelano, D., Olivares, T., and Ruiz, M. C. (2018). Operable: an iot-based wearable to improve efficiency and smart worker care services in industry 4.0. *Journal of Sensors*, 2018.
- [Sakkaff et al. 2018] Sakkaff, Z., Immaneni, A., and Pierobon, M. (2018). Applying molecular communication theory to estimate information loss in cell signal transduction: An approach based on cancer transcriptomics. In *Proceedings of the 5th ACM International Conference on Nanoscale Computing and Communication*, pages 1–7.
- [Santagati and Melodia 2014] Santagati, G. E. and Melodia, T. (2014). Opto-ultrasonic communications for wireless intra-body nanonetworks. *Nano Communication Networks*, 5(1):3 – 14.

- [Seneviratne et al. 2017] Seneviratne, S., Hu, Y., Nguyen, T., Lan, G., Khalifa, S., Thilakarathna, K., Hassan, M., and Seneviratne, A. (2017). A survey of wearable devices and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(4):2573–2620.
- [Sharma et al. 2020] Sharma, M., Elmiligi, H., and Gebali, F. (2020). *Network Security and Privacy Evaluation Scheme for Cyber Physical Systems (CPS)*, pages 191–217. Springer International Publishing, Cham.
- [Song et al. 2016] Song, H., Rawat, D. B., Jeschke, S., and Brecher, C. (2016). *Cyber-Physical Systems: Foundations, Principles and Applications*. Academic Press, Inc., USA, 1st edition.
- [Sowe et al. 2016] Sowe, S. K., Simmon, E., Zettsu, K., de Vault, F., and Bojanova, I. (2016). Cyber-physical-human systems: Putting people in the loop. *IT professional*, 18(1):10–13.
- [Stephenson-Brown et al. 2015] Stephenson-Brown, A., Acton, A. L., Preece, J. A., Fossey, J. S., and Mendes, P. M. (2015). Selective glycoprotein detection through covalent templating and allosteric click-imprinting. *Chemical science*, 6(9):5114–5119.
- [Tahaei et al. 2020] Tahaei, H., Afifi, F., Asemi, A., Zaki, F., and Anuar, N. B. (2020). The rise of traffic classification in IoT networks: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, 154:102538.
- [Tao et al. 2020] Tao, X., Jin, H., Mintken, M., Wolff, N., Wang, Y., Tao, R., Li, Y., Torun, H., Xie, J., Luo, J., et al. (2020). Three-dimensional tetrapodal zno microstructured network based flexible surface acoustic wave device for ultraviolet and respiration monitoring applications. *ACS Applied Nano Materials*, 3(2):1468–1478.
- [Thorp 1998] Thorp, E. O. (1998). The invention of the first wearable computer. In *Digest of Papers. Second Int. Symposium on Wearable Computers*, pages 4–8. IEEE.
- [Titova et al. 2013] Titova, L. V., Ayesheshim, A. K., Golubov, A., Fogen, D., Rodriguez-Juarez, R., Hegmann, F. A., and Kovalchuk, O. (2013). Intense thz pulses cause h2ax phosphorylation and activate dna damage response in human skin tissue. *Biomedical optics express*, 4(4):559–568.
- [Trimananda et al. 2020] Trimananda, R., Varmarken, J., Markopoulou, A., and Demsky, B. (2020). Packet-level signatures for smart home devices. In *Network and Distributed System Security Symposium (NDSS)*.
- [Wei et al. 2013] Wei, G., Bogdan, P., and Marculescu, R. (2013). Efficient modeling and simulation of bacteria-based nanonetworks with bnsim. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 31(12):868–878.
- [Wirdatmadja et al. 2017] Wirdatmadja, S. A., Barros, M. T., Koucheryavy, Y., Jornet, J. M., and Balasubramaniam, S. (2017). Wireless optogenetic nanonetworks for brain stimulation: Device model and charging protocols. *IEEE Trans. on NanoBioscience*.
- [Wolf and Serpanos 2017] Wolf, M. and Serpanos, D. (2017). Safety and security in cyber-physical systems and internet-of-things systems. *Proceedings of the IEEE*, 106(1):9–20.

- [Wood et al. 2017] Wood, D., Apthorpe, N., and Feamster, N. (2017). Cleartext data transmissions in consumer iot medical devices. In *Proceedings of the 2017 Workshop on Internet of Things Security and Privacy*, pages 7–12. ACM.
- [Yaacoub et al. 2020] Yaacoub, J.-P. A., Salman, O., Noura, H. N., Kaaniche, N., Chehab, A., and Malli, M. (2020). Cyber-physical systems security: Limitations, issues and future trends. *Microprocessors and Microsystems*, 77:103–201.
- [Ye et al. 2007] Ye, H., Randall, C. L., Leong, T. G., Slanac, D. A., Call, E. K., and Gracias, D. H. (2007). Remote radio-frequency controlled nanoliter chemistry and chemical delivery on substrates. *Angewandte Chemie Int. Edition*, 46(26):4991–4994.
- [Zheng et al. 2017] Zheng, G., Zhang, G., Yang, W., Valli, C., Shankaran, R., and Orgun, M. A. (2017). From wannacry to wannadie: Security trade-offs and design for implantable medical devices. In *2017 17th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT)*, pages 1–5. IEEE.