



# IOT – INTERNET DAS COISAS

AULA 5



Prof. Gian Carlo Brustolin



## CONVERSA INICIAL

Nesta etapa, finalmente vamos estudar as soluções possíveis de conectividade para objetos IoT. Vamos evitar tratar das interfaces fiadas, uma vez que a sua utilização é bastante restrita, com foco maior em aplicações industriais. Dessa forma, nos resta o estudo das interfaces de radiocomunicação.

Como já comentamos, o estudo de radiopropagação é consideravelmente complexo, pois envolve conceitos físicos e matemáticos de engenharia de telecomunicações. Por esse motivo, nesta etapa não vamos nos aprofundar nas camadas físicas dos diversos padrões de interface em uso. Vamos fazer um estudo de revisão, apresentando as diversas soluções possíveis na atualidade e comparando-as em termos de aplicação e eficiência.

Inicialmente, vamos fornecer uma visão geral dos tipos de redes para o atendimento à tecnologia, para em seguida apresentar alguns conceitos rudimentares de telecomunicação, que complementam o que estudamos. Após os tópicos iniciais, estamos prontos a conhecer as soluções técnicas que apresentam, até o momento, bons resultados no atendimento à tecnologia IoT. Para este estudo, selecionamos alguns padrões de conectividade já consolidados para os sistemas de sensoriamento, avaliando ainda alguns protocolos em fase inicial de implementação.

## TEMA 1 – INTRODUÇÃO ÀS REDES PARA IOT

Considerando a vestibularidade do assunto de IoT como um todo, podemos esperar uma considerável dose de incertezas quanto às redes de interconexão dos dispositivos IoT à internet ou às intranets. Não existem ainda soluções definitivas para atendimento desses objetos. As respostas clássicas de atendimento são aquelas usadas em redes de sensoriamento, que acolhem satisfatoriamente os objetos com baixo consumo de dados, ainda que não sejam eficientes para dispositivos de vídeo ou para aplicações mais complexas em domótica, por exemplo. Assim, embora existam muitas alternativas, a escolha dependerá essencialmente da aplicação, inexistindo, ao menos por hora, uma solução abrangente para todas as demandas.

### 1.1 Um pouco de história



Já sabemos que as redes industriais são a origem tanto dos objetos quanto das redes de IoT. Nesses momentos iniciais da tecnologia, redes sem fio eram uma solução de última escolha, com foco principal em confiabilidade e resiliência. Inexistia a preocupação com demandas de dados mais elevadas, já que as aplicações industriais não apresentam essa exigência. As redes que não atendem humanos diretamente são chamadas, genericamente, de redes M2M (Machine to Machine), ou redes de interconexão entre máquinas. Redes LPWAN são um tipo de rede para M2M. Redes M2M para sensores ou atuadores industriais apresentam tipicamente a velocidade de algumas dezenas de Kbps.

Com a disseminação de objetos inteligentes para além do âmbito industrial, as exigências mudaram. Aplicações em áreas rurais, como agricultura de precisão, por exemplo, demandam, além de resiliência, baixo consumo de energia. Essa característica é essencial nessa aplicação, uma vez que os dispositivos costumam estar locados em pontos de difícil acesso.

Outro fato interessante é que os objetos inteligentes apresentam características de operação que invertem o sentido predominante de transmissão. As redes de objetos IoT normalmente operam com predominância de pacotes de uplink, ao passo que redes tradicionais esperam downlinks significativos como característica dominante do tráfego de rede.

Os padrões desse tipo de atendimento são chamados LPWAN (Low Power Wide Area Networks) ou WANs de baixo consumo de energia. Entre as tecnologias listadas nesta denominação, estão LoRa, Wi-SUN, RPMA, Weightless e SIGFOX (Prando *et al.*, 2019).

As aplicações em cidades inteligentes e domótica são mais recentes, exigindo maior demanda de dados, no caso de domótica, e de mobilidade, nas smart cities. Redes M2M LPWAN normalmente não são capazes de atender essas novas exigências. A mobilidade, por exemplo, está mais próxima a sistemas celulares, ao passo que downstreams elevados podem ser providos por sistemas WiFi.

Percebemos assim que tecnologias distintas estão sob o guarda-chuva genérico das redes M2M. Por esse motivo, é necessário categorizá-las de forma distinta, como faremos a seguir.

## **1.2 Redes públicas e privadas**



Serviços públicos precisam estar presentes em determinados locais. Cabe ao Estado garantir a sua existência e funcionamento. Exemplos de serviços públicos são a tríade clássica composta por serviços de saúde, segurança e educação. Além deles, existem outros, como serviços de saneamento, provimento de energia elétrica e telecomunicações. Assim, a disponibilidade de facilidades de telecomunicações acaba sendo um serviço de utilidade pública. Por essa razão, a área é regulamentada pelo poder estatal.

No Brasil, até a década de 1990, a maior parte do território apresentava serviços de telecomunicações providos por empresas estatais, o famoso sistema Telebras. As primeiras operações de telefonia celular foram implantadas por essas empresas, que pertenciam ao Estado. O processo de privatização, levado a cabo a partir de 1995, retirou das mãos estatais o serviço de telecomunicações. Porém, como na maioria das nações, o controle do serviço foi mantido por uma agência reguladora, a Anatel, que passou a estabelecer regras de **concessão** para as empresas que desejassem operar esses serviços.

Em telefonia celular, além das regras de concessão, a agência interfere na reserva de radiofrequências para a operação das concessionárias de serviço móvel, chamadas **frequências licenciadas**.

Assim, uma **rede pública** de telefonia é regulamentada pelo Estado, por meio de concessão para a operação. O exemplo que mais nos interessa é o das redes de telefonia móvel, ou seja, de telefonia celular que atendem também serviços de dados móveis. Como sabemos, esses serviços, tanto de voz quanto dados, são regulamentados por leis e dispositivos infralegais. Essa regulamentação engloba não apenas a qualidade da rede, como também a cobertura e a densidade mínima de atendimento. A Resolução Anatel n. 680 (Brasil, 2017) apresenta uma tabela de destinação de faixas com as bases de regulamentação dos serviços de telecomunicações no Brasil.

As demais redes sem fio operam em frequências não licenciadas, sendo conhecidas como **redes privadas**. Tais redes não podem ser dedicadas à prestação onerosa de serviço público de voz ou dados. Não há restrição, entretanto, à construção de uma rede privada que dê suporte à prestação de um serviço remunerado. A prestação de serviço remoto (de segurança predial, por exemplo) pode ser levada a cabo por uma estrutura privada de telecomunicações.



### 1.3 Padrões públicos e privados

É bastante comum que as pessoas confundam redes públicas com padrões públicos de redes. Redes públicas são controladas pelo Estado, enquanto um padrão público de rede é uma norma técnica que estabelece as especificações técnicas de operação de uma tecnologia, sempre disponível para consulta pública. O padrão WiFi, por exemplo, é um padrão público, cujas características de desenho das interfaces estão disponíveis para consulta no IEEE ou na associação internacional certificadora do padrão, a WiFi Alliance.

Uma rede pública opera preferencialmente em padrões públicos, dependendo de autorização especial para a utilização de padrões obscuros, ao passo que uma rede privada pode utilizar padrões públicos ou privados.

Um exemplo interessante, que vamos estudar ainda nesta etapa, é a rede Sigfox. Ela oferece comunicação de dados em frequências não licenciadas. Portanto, deveria ser uma rede privada. No entanto, por comercializar serviços de telecomunicações diretamente, depende de autorização do Estado – logo, seria uma rede pública. No fim, o padrão de operação da rede Sigfox é de propriedade de uma empresa homônima, sendo mantido de forma propositalmente restrita.

No estudo dessas e de outras soluções de rede para conectividade IoT, é importante conhecer um pouco melhor a base de telecomunicações das interfaces físicas.

## TEMA 2 – RUDIMENTOS DE TELECOMUNICAÇÕES PARA IoT

Uma vez que esta etapa não é voltada apenas para engenheiros de telecomunicações, não podemos presumir que todos tenham domínio de certos conceitos físicos e matemáticos dessa área de conhecimento. Também é importante destacar que um tema não é suficiente para trabalhar toda a base conceitual necessária. Assim, vamos propor algumas simplificações, sem perda de verdade científica, para que todos possam construir um entendimento elementar dessa ciência. Preste atenção às obras que nos serviram de base, pois elas podem ajudá-lo, caso deseje se aprofundar no tópico.

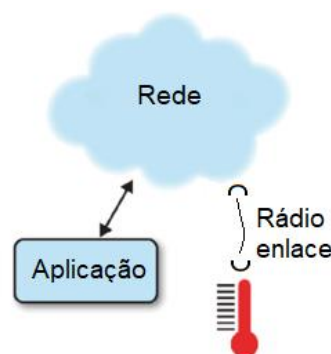
### 2.1 Introdução às técnicas de modulação



Não é o objetivo aqui, como já comentamos, detalhar as complexas equações relevantes para o estudo das tecnologias, como cálculos de radiopropagação. No entanto, devemos ter uma noção básica dos princípios físicos envolvidos, para que sejamos capazes de colaborar com o processo de tomada de decisão entre interfaces ao longo da nossa carreira.

Vamos começar pelo princípio do processo. Vamos supor que precisamos interconectar uma aplicação, residente em máquina computacional, com um coletor de dados IoT qualquer – um medidor de temperatura ambiente, por exemplo. O coletor será provido de inteligência nativa, ou ainda agregada por nós, como já exploramos em outra oportunidade. Além da eletrônica inteligente, o objeto IoT deverá apresentar uma interface (nativa ou agregada) de comunicação. Neste estudo, vamos considerar que ela é sem fio. A figura a seguir exemplifica essa arquitetura.

Figura 1 – Conectividade sem fio IoT



Os dados são coletados pelo sensor e convertidos pela eletrônica embarcada em binário. A camada MAC insere o handshake (endereços, controle de erro, controle de frames...) e entrega o trem de bits à camada física (PHY), para que sejam transmitidos à rede por rádio comunicação.

O equipamento radiotransmissor toma os dados binários para transformá-los em ondas eletromagnéticas (OEM), que podem ser propagadas pelo espaço livre. Essa transformação ocorre por alterações nas características de uma ou várias OEM **portadoras**. Esse processo é conhecido, em telecomunicações, como **modulação**.

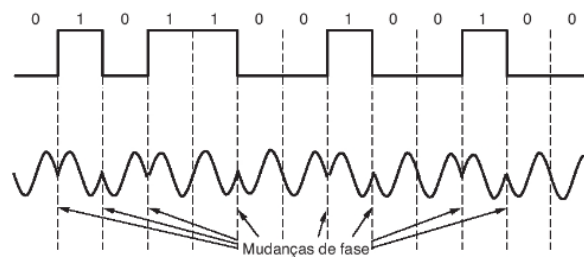
As técnicas de modulação da OEM portadora, que permitem a transmissão dos dados binários, são processos de descrição física com matemática complexa. Apenas para se ter uma ideia do seu funcionamento,



vamos considerar um método de modulação digital elementar extremamente eficiente: o BPSK (Binary Phase Shifting Keying).

Imagine a onda portadora como uma senoide cuja frequência de oscilação é a frequência da portadora. Podemos modular essa portadora pela alteração temporal de sua fase, se desejamos transmitir determinado bit. A figura a seguir ilustra esse conceito.

Figura 2 – Portadora modulada por BPSK



Fonte: Elaborado com base em Tanenbaun; Wetherall, 2011, p. 81.

O gráfico da Figura 2 representa o sinal binário de rede. O segundo representa a onda portadora já modulada. Observe que, a cada mudança de sinal binário, a fase da portadora se altera. O sinal modulado, depois de convenientemente amplificado, pode ser transmitido por uma antena para um ponto distante.

Os poderosos algoritmos de modulação QAM, que facultam transmissões de alta resiliência e velocidade, são baseados na técnica elementar de BPSK, com a utilização de múltiplos ângulos de defasamento, permitindo a codificação de n-uplas de bits simultaneamente.

No que se refere à frequência da portadora, respeitadas algumas limitações estabelecidas por Nyquist, qualquer frequência pode ser viável. A seleção da frequência da OEM portadora, entretanto, depende da aplicação do rádio.

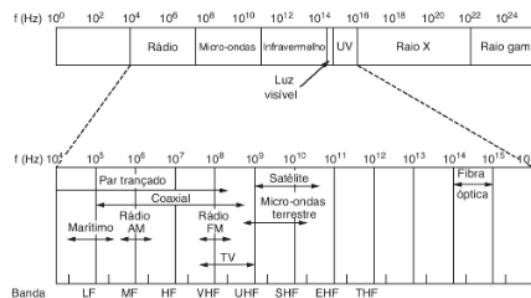
Baixas frequências apresentam boa transparência a objetos – ou seja, não são facilmente obstruídas por paredes ou montanhas. Porém, não se adequam bem à transmissão de taxas elevadas de dados. Altas frequências, por sua vez, viabilizam essas transmissões. Em caso de colisão com objetos, como



gotas de chuva, ocorrem atenuações significativas, dificultando transmissões de longa distância sem repetições (Tanenbaun; Wetherall, 2011, p. 67).

O posicionamento das frequências usadas em telecomunicações, espectro eletromagnético conhecido, está representado na figura a seguir.

Figura 3 – Espectro eletromagnético



Fonte: Elaborado com base em Tanenbaun; Wetherall, 2011, p. 66.

Soluções com o uso simultâneo de várias portadoras são capazes de contornar as desvantagens citadas. Existe ainda um outro aspecto a ser considerado na seleção da frequência da portadora: a antena. A antena é o transdutor de saída do radiotransmissor, ou seja, através dela o sinal modulado é liberado no espaço livre. As dimensões da antena, buscando viabilizar a liberação do sinal, devem ser compatíveis com o comprimento de onda da portadora. O comprimento de onda é inversamente proporcional à frequência, de modo que frequências baixas demandam antenas de grandes dimensões. Considerando uma relação de grandeza, transmissões de ondas longas, para a comunicação com submarinos (sinais abaixo das dezenas de Khz), são fisicamente complexas, pois demandam de antenas de centenas de metros dispostas no litoral.

## 2.2 Problemas de radiopropagação

Nem tudo é uma maravilha quando utilizamos de comunicação sem fio. Quando falamos de redes WiFi, sublinhamos que as frequências mais altas são menos permeáveis a objetos. Um objeto, quando alvejado por uma OEM, pode apresentar três comportamentos distintos, mas não excludentes – ou seja, pode apresentar todos os comportamentos em intensidades distintas.



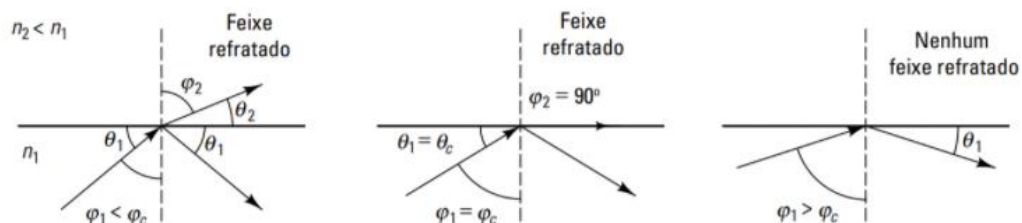


Maxwell estudou a propagação de OEMs e descreveu, de forma matemática, as reações da onda no espaço livre, frente a um objeto. Sem mergulhar na famosa complexidade das equações de Maxwell, vamos descrever tais reações de forma sucinta.

Um objeto pode refletir a OEM, absorvê-la ou refratá-la. Na realidade, se um objeto absorve parcialmente uma OEM, a energia não absorvida será propagada para fora do objeto por refração.

Como comentamos anteriormente, os três comportamentos podem acontecer de forma concomitante. Esse fenômeno é estudado nos níveis inferiores de educação, quando examinamos a propagação da luz, que é também uma OEM, mas de frequência alta em relação às ondas de rádio. O exemplo clássico que ilustra esse comportamento é a propagação da energia luminosa incidente em uma superfície de água. Ao penetrar no meio aquoso, parte da energia luminosa é refletida novamente para o meio gasoso, parte é absorvida e parte é refratada para o interior do corpo de água. O ângulo de incidência da OEM e a diferença de densidade entre os meios nos ajuda a definir as frações de cada comportamento.

Figura 4 – OEM e refração



Fonte: Keiser, 2014, p. 37.

Os mesmos fenômenos ocorrem com as ondas de radiocomunicação. Entretanto, considerando as conclusões de Maxwell, a frequência da portadora influencia no percentual de energia refletida, absorvida ou refratada, e não apenas o ângulo de incidência e na densidade.

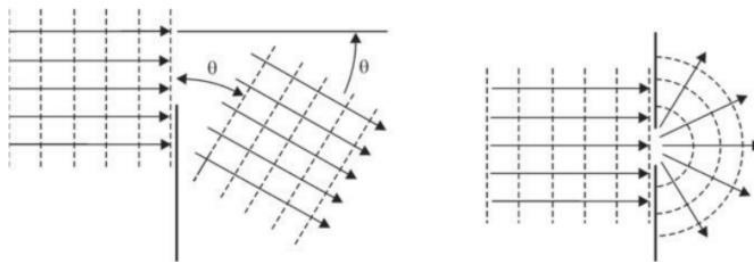
Dessa forma, a presença de objetos que obstruam o feixe de OEM, mesmo que parcialmente, é capaz de gerar perturbações na inteligibilidade de recepção. Como assim?



Sistemas robustos de comunicação por rádio utilizam várias portadoras simultaneamente, de frequências distintas. Como a reação da OEM à colisão com objetos depende da frequência, o sinal terá um comportamento anômalo ao enfrentar uma obstrução.

Um quarto fenômeno não está relacionado diretamente com o objeto, mas sim com a sua geometria: a difração. A OEM, ao encontrar uma aresta ou orifício, sofre uma alteração no ângulo de propagação. Essa alteração pode inclusive gerar dispersão em direções variáveis, conforme vemos na figura a seguir.

Figura 5 – Difração

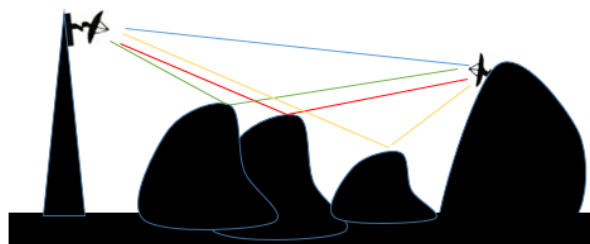


Fonte: Elaborado com base em Ribeiro, 2009, p. 94.

O ângulo de difração, contra anteparo anguloso, também depende da frequência da onda incidente. Esse é outro fator que gera distorções na rádio comunicação. Ainda assim, existem outros fenômenos a considerar.

Uma OEM pode chegar ao receptor por diferentes percursos, como ilustra a figura a seguir. Percursos diferentes significam retardos de chegada diferentes, com distorção do sinal recebido. A essa distorção chamamos de *multipercurso*.

Figura 6 – Multipercurso de OEM



A presença de gotículas de água na região entre as antenas de recepção e transmissão ocasiona pequenas variações de densidade do meio. Adivinhe –



também tem influência sobre a qualidade da recepção do sinal, fazendo com que a propagação seja irregular.

Em comunicações móveis, comuns em aplicações de smart cities, o efeito doppler sobre a frequência, gerado pelo deslocamento do transmissor em relação ao receptor, altera a frequência da portadora, prejudicando a recuperação do sinal.

Existem ainda outros problemas a considerar, como a presença de ruído ou a interferência de operações de rádio próximas. Neste momento, você deve estar pensando em desistir do uso de rádio para a conexão de objetos IoT. Não se desespere, pois existem soluções que contornam esses problemas.

## 2.3 Técnicas de modulação resilientes

Técnicas de modulação clássicas, como acabamos de estudar, enfrentam copiosos problemas de propagação, dificultando a comunicação por rádio. A solução a esses desafios dependia de cuidadosos cálculos topográficos e de altas potências de transmissão. Tais respostas tradicionais falham quando o projeto demanda flexibilidade, baixo custo e mobilidade, características importantes das redes para IoT.

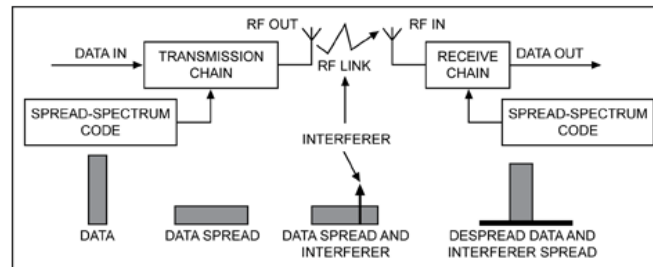
Aplicações militares de radiocomunicação enfrentavam, além de tudo que já comentamos, um problema suplementar: a necessidade de indetectabilidade. Engenheiros militares encontraram uma forma de solucionar essa demanda: dispersão da informação no espectro de frequência, ou seja, em múltiplas portadoras. Essa técnica, batizada de espalhamento espectral (SS – Spread Spectrum, em inglês), transmite a informação segmentada e modulada em várias portadoras, com baixa potência e redundância de transmissão. Com essa técnica, a eventual detecção de uma portadora pelo inimigo não permite a decodificação da mensagem. A redundância de transmissão (quando a mesma informação é transmitida em mais de uma portadora) permite a operação em potência baixíssima. O algoritmo de recepção extrai os segmentos de informação das portadoras de melhor qualidade em um determinado momento, remontando o sinal transmitido.

Essa técnica converte os problemas de radiopropagação em vantagens, por meio do espalhamento da informação. Com essa implementação, mesmo que algumas faixas de frequência pereçam, a informação estará preservada em



outra área do espectro. A presença eventual de ruído sintonizado (na mesma frequência de uma portadora) contaminará apenas parte da energia do sinal, não afetando a inteligibilidade.

Figura 7 – Transmissão de dados por espalhamento espectral



Fonte: Maxim Integrated, 2003.

Rádio enlaces SS, em função das baixas potências de transmissão, normalmente não superam os 30km. Suplantar esse limite com o uso de repetições é viável, mas distâncias acima de 150km implicam custos de equipamento e manutenção que, no fim, são inviáveis.

### TEMA 3 – REDES PRIVADAS PARA IoT

A principal solução para conectividade de objetos IoT, ao menos atualmente, passa pelas redes privadas. Tais redes, como estudamos, podem se basear em protocolos públicos ou privativos. Nesta seção, vamos estudar padrões de alta aderência às normalizações do IEEE, como o WiSum, até há pouco tempo bastante restritos – como o LoRa, que apesar de sua popularidade como solução LPWAN, ainda apresenta problemas de interoperabilidade.

#### 3.1 WiFi

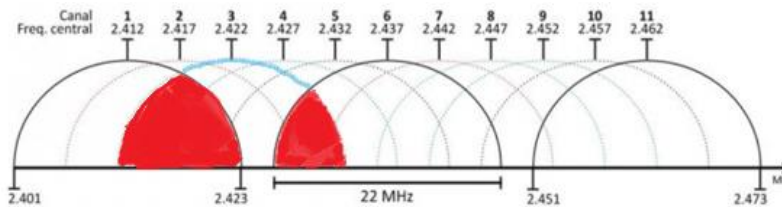
A norma IEEE 801.11 estabelece as bases dessa tecnologia. Nas versões atualmente em operação, duas faixas de rádio frequência estão padronizadas para uso e liberadas em todas as geografias pelas agências reguladoras, uma de 2,4GHz (em UHF) e outra de 5,7 GHz (em SHF).

Na faixa de 2,4GHz, estão disponíveis 11 canais de 5MHz. No entanto, a técnica de modulação utilizada pelo padrão (espalhamento espectral) faz com que apenas três canais possam ser usados simultaneamente sem que ocorra



interferência. A figura a seguir ilustra a interferência do canal 3 nos canais 1 e 4, bem como a ausência de interferência quando selecionados os canais 1, 6 e 11, classicamente indicados para essa aplicação.

Figura 8 – Interferência entre canais WiFi operando em 2,4GHz



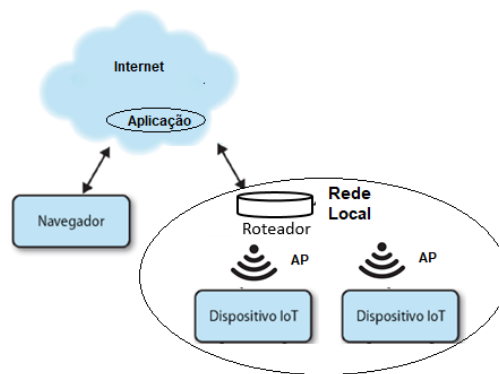
A faixa SHF (Super High Frequency), com até 165 canais disponíveis, é composta por frequências consideravelmente mais altas que o UHF (Ultra High Frequency). Sinais em frequências mais altas são menos permeáveis a objetos, dificultando o projeto físico da rede. Paredes, que são transparentes para o UHF, se tornam barreiras intransponíveis de reflexão para a operação em SHF. Esse fato, considerando ainda a menor presença de interfaces SHF nos dispositivos WiFi, faz com que a maioria das redes atuais operem em 2,4GHz, principalmente em aplicações de domótica. Além disso, como já comentamos, as redes para domótica normalmente se baseiam na versão WiFi 4 (IEEE 802.11 n).

Aqui, não é o nosso objetivo detalhar o protocolo, mas apenas fornecer algumas noções gerais de operação, o que nos ajuda a entender o correto funcionamento da interface.

Em uma descrição elementar, uma instalação WiFi permite a conexão de um dispositivo à rede através de um ponto de acesso AP (Access Point, em inglês). O AP é basicamente composto por rádio transmissor, antena (que pode ser única ou não), inteligência de controle de acesso e autenticação. O AP é conectado a um roteador, que por sua vez permite acesso à internet. Em uma residência, normalmente temos uma rede sem fio composta por um AP, integrado ao roteador, em um único equipamento. Essa é a solução mais simples. Existem instalações, em residências amplas, que contam com mais de um AP. O diagrama a seguir ilustra essa arquitetura.

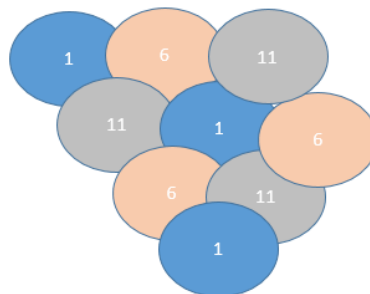


Figura 9 – Arquitetura elementar de WLAN



No caso de APs múltiplos, é necessário que eles sejam configurados para que ocupem canais não interferentes. Como vimos anteriormente, a operação em UHF disponibiliza apenas os canais 1, 6 e 11 para a comunicação não interferente. É comum que residências contíguas apresentem os próprios sistemas de WiFi em operação. Assim, é preciso levar em conta a presença desses sinais externos para a escolha da canalização. Devemos buscar intercalar os canais como ilustra a figura a seguir.

Figura 10 – Canalização ideal para WLAN



É preciso evitar o uso de canais aparentemente livres fora dessa tríade. Como a banda ocupada por cada canal invade os vizinhos, o uso dos canais intermediários reduz a velocidade máxima de transmissão, já que a modulação, utilizada pelo rádio 802.11n, cria dependência entre a banda disponível e o máximo trânsito de dados.

Quando implantamos uma WLAN WiFi, escolhemos uma identificação de rede (SSID) e uma senha de acesso, que será comum a todos os APs, conectados à rede. Todo dispositivo que deseja se conectar à rede deve ter essas duas informações. Uma boa descrição de protocolo, para aqueles que



desejam aprofundar a compreensão do tema, pode ser encontrada em Tanenbaun e Wetherall (2011).

### 3.2 LoRa

O surgimento de sensores e atuadores sem fio comerciais levou à criação das primeiras padronizações do conceito de Low Power Wide-Area Networks (LPWANs), redes de longo alcance e baixo consumo. Empresas de tecnologia, atentas ao emergente potencial de mercado, iniciaram o desenvolvimento de interfaces de rádio para atender a LPWANs. A Semtech foi uma delas. Sua solução, chamada de LoRa, que engloba hardware e software (LoRaWAN), obteve grande sucesso entre os projetistas de redes para IoT, por ser a primeira a atender a grandes áreas de cobertura, sem necessidade de estações ou nós repetidores, com consumo bastante baixo dos dispositivos.

A LoRa resolve o problema de extensão de cobertura pela otimização do algoritmo de espalhamento espectral clássico. A ideia dos engenheiros da Semtech foi codificar sequências de bits em rajadas multifrequenciais. Correndo o risco de simplismo em excesso, a técnica chamada de Chirp-spread-spectrum (CSS) transforma n-uplas de bits em uma sequência de frequências próximas. Dessa forma, se o receptor for capaz de identificar ao menos uma das frequências da sequência, mesmo que as demais sejam perdidas, ele será capaz de recompor a n-upla de bits original. Naturalmente, existem restrições de velocidade e de latência de pacotes para que a banda de transmissão seja aceitável.

A camada física LoRa, baseada na modulação CSS, como já adiantamos, é bastante resiliente, permitindo comunicação efetiva mesmo quando o nível do sinal transmitido está abaixo do ruído presente. Assim, baixíssimos níveis de transmissão (e consequentemente de consumo) são possíveis.

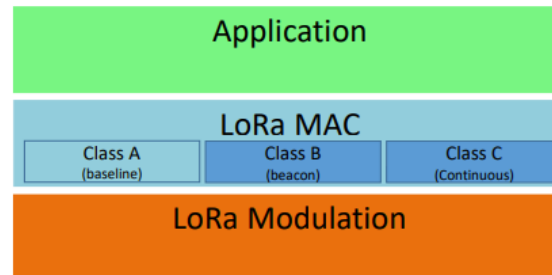
A LoRa utiliza frequências não licenciadas na faixa de 902 a 928 MHz, com banda de transmissão setável em 125 kHz ou 250 kHz. A distância típica entre terminais pode chegar, sem dificuldades, a 8km (Marais; Malekian; Abu-Mahfouz, 2017).

A camada de controle de acesso ao meio e o roteamento (LoRa MAC) controlam a cadência das trocas de mensagens, respeitando as regras de



handshake. A figura a seguir ilustra a disposição das camadas em equipamentos LoRa.

Figura 11 – Camadas LoRaWAN



Fonte: Lora Alliance, 2018.

Uma rede LoRa é estruturada segundo uma topologia “estrela de estrelas”. Nessa arquitetura, um dispositivo está conectado a um gateway enquanto os gateways se conectam a um servidor central de rede. O padrão só contempla a camada física e de controle de acesso. A conexão entre gateways é feita por uma rede TCP alheia ao padrão LoRa.

A padronização LoRa foi tornada pública recentemente, com a criação de uma associação internacional nos moldes do WiFi. Essa origem restrita gerou versões incompatíveis de rádios, produzidos antes da criação da LoRa Alliance, com os quais convivemos ainda hoje.

### 3.3 IEE 802.15.4g (ZigBee)

O ZigBee é normalmente usado em redes com topologia mesh. Nessa topologia, um dispositivo pode ter múltiplas funções. O objeto será configurado pela rede como cliente (apenas a função de sensor/atuador), coordenador ou roteador, conforme a necessidade, para manter a resiliência da operação.

Nas aplicações em domótica, entretanto, essa facilidade é pouco utilizada. Os objetos participam da rede como meros clientes, relegando a função de roteamento e coordenação para o gateway IoT, que opera em estrela. Vamos falar sobre o gateway na sequência desta etapa.

ZigBee tem foco totalmente diferente do seu primo, o WiFi. Para permitir baixo consumo e imunidade a ruídos e interferências, as taxas típicas de transmissão estão entre 20 e 250kbps. Baixas potências de transmissão, além





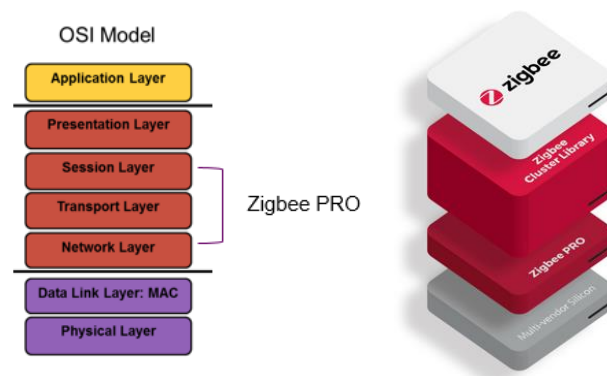
da facilidade configurável do modo “sleep”, que reduz drasticamente o consumo de energia em escuta, complementam as restrições para a manutenção das características de desenho.

Na camada PHY, os rádios ZigBee operam nas faixas de 2.400 a 2.4835 MHz, competindo com o espectro WiFi, porém com 16 canais de até 250Kbps efetivamente disponíveis, modulados por O-QPSK (Offset Quadrature Phase Shift Keying). A técnica de modulação distinta e as baixas potências de transmissão, entretanto, evitam a interferência desse padrão com o WiFi.

A camada MAC, proprietária do padrão, complementa o isolamento das tecnologias pelo uso de estratégias de prevenção de colisão que impedem a transmissão em momento de interferência. A camada de rede, também padronizada pela ZigBee Alliance, chamada PRO, apresenta algoritmos de descoberta de dispositivos, roteamento, gestão de rede e dispositivos.

Finalmente, há uma camada de aplicação que “traduz” as aplicações, fornecendo um ambiente de facilidades de uso do dispositivo. Nessa camada, o gateway IoT fará a interface do protocolo com a rede local ou a internet. A seguir, a figura relaciona as camadas ZigBee com o padrão OSI.

Figura 12 – Camadas ZigBee



Fonte: ZigBee Alliance, 2022.

O protocolo é um pouco complexo e seu estudo extrapola os objetivos desta etapa. Consulte a documentação referenciada em nossa bibliografia (ZigBee, 2022) para o aprofundamento desse padrão.

### 3.4 IEEE 802.15 (WiSUN)



O IEEE idealizou, inicialmente, o padrão 802.15 para atender a conectividade de sistemas inteligentes de medição e gerenciamento de energia elétrica residencial, com foco na otimização do consumo. O Japão foi escolhido para o primeiro teste de escala. Dezenas de milhões de unidades consumidoras foram monitoradas e otimizadas com sucesso. A partir dessa aplicação inicial, novos campos de aplicação, como agricultura de precisão e cidades inteligentes, passaram a ser o objetivo da evolução do padrão (Harada *et al.*, 2017).

A norma de base para a camada física do Wi-SUM é a IEEE 802.15.4g, enquanto a norma IEEE 802.15.4e estabelece os parâmetros para MAC. A implementação dessas normas resulta em uma rede de baixíssimo consumo de energia, mesmo com boa densidade de objetos (milhares) conectados por segmento de rede.

Considerando o foco inicial do padrão, a velocidade de troca de dados da rede não é alta (300Kbps) porém o alcance é elevado (4Km) e suporta repetição ou prolongamento por arquitetura mesh.

Quanto às frequências de operação, a Wi-SUM opera tanto em 2,4GHz, para conexões indoor e em baixo UHF, quanto próximo dos 900MHz, para conexão outdoor. A latência, em torno de 20ms, é baixa em relação a outros padrões LPWAN, o que torna o padrão viável para o controle de provimento de serviços públicos em tempo real.

A associação regulamentadora da tecnologia, a WiSUM Alliance, normalizou a operação de um dispositivo WiSUM em relação ao consumo de energia. O dispositivo deve ser capaz de operar ao menos 15 anos, sem exaurimento de baterias, o que faz com que a solução seja bastante interessante para aplicações IoT. O consumo de energia é baixo mesmo em termos de transmissão (14mA) e latência (2μA).

## **TEMA 4 – REDES PÚBLICAS PARA IoT**

Vamos agora sedimentar o conceito de redes públicas, por meio do estudo das principais soluções para o atendimento M2M (especialmente para IoT) por essas redes. Vamos apresentar ainda uma solução mista, operada como rede pública, ainda que não o seja propriamente: trata-se do Sigfox. Essa curiosa rede pode ser utilizada no atendimento a dispositivos IoT com características díspares, como veremos a seguir.

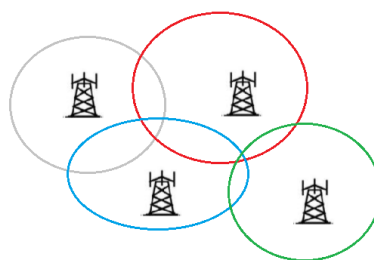


## 4.1 Introdução às redes públicas de telefonia móvel

Como você já estudou, nem todo provimento de telecomunicações sem fio é regulamentado. Um campus universitário pode prover conectividade a seus alunos e mesmo ao público visitante sem sofrer, diretamente, a regulamentação da Anatel, mas há restrições quanto às frequências e quanto à potência de operação

O serviço de telecomunicações móvel foi criado com foco exclusivo em voz. Pequenas mensagens de texto, os SMSs (do inglês Short Message Service), foram a versão inicial da comunicação digital entre assinantes, que atualmente domina a comunicação pública móvel. Essas primeiras gerações apresentavam interface física baseada em rádios analógicos por modulação de frequência. Nessa técnica, utilizada nas rádios FM comerciais, a voz (sinal de entrada) altera a frequência da portadora entre limites determinados. A modulação analógica FM, entretanto, não permite a criptografia das transmissões, o que torna a comunicação entre pessoas facilmente devassável. Embora as primeiras gerações tenham apresentado problemas, elas provaram a viabilidade do conceito de atendimento aos assinantes em células (como veremos a seguir), dando origem inclusive à nomenclatura usual de *telefonia celular*.

Figura 13 – Sistema celular (autoral)



A próxima geração de equipamentos de telefonia celular, chamada de 3G, abandonou a comunicação analógica. A voz passou a ser codificada, ou seja, transformada em dados, viabilizando o uso de técnicas de espalhamento espectral altamente resilientes. Mesmo com essa primeira convergência entre voz e dados, o foco permaneceu na voz. A geração seguinte distanciou-se desse



foco, mas ainda manteve a ótica de provimento de facilidades para usuários humanos.

Soluções de conectividade para M2M estão bastante distantes desses objetivos iniciais do serviço celular, mas a recente demanda por esse atendimento motivou a adaptação das redes celulares, principalmente com o surgimento das cidades inteligentes.

As operadoras celulares já estão presentes nos centros urbanos. Porém, o investimento para o atendimento aos objetos IoT é, proporcionalmente, pequeno. Surgiram, assim, os padrões NB IoT, CAT NB, LTE-M e EC GSM, considerados, por semelhança tecnológica, LPWANs licenciadas, uma vez que utilizam radiofrequências licenciadas pela agência reguladora.

Tais padrões diferem entre si pela “geração” em que operam: NB IoT e EC GSM, por exemplo, já estão presentes em estações 3G, mas LTE-M e CAT M demandam a presença da tecnologia 4G. Vamos analisar um pouco melhor essas diferenças.

## **4.2 Redes para IoT sobre GSM**

As redes GSM, também chamadas de geração 3 ou 3G, foram as primeiras a apresentar foco em comunicação digital e acesso à internet. Para essa geração, foram criados os padrões NB IoT (Narrow Band for IoT) e EC GSM (Extended Coverage GSM, ou GSM de cobertura estendida). Nesses padrões, a taxa de transmissão média está em torno de 20Kbps, enquanto o alcance não supera algumas dezenas de quilômetros.

O fato de um padrão atender às primeiras gerações celulares não o torna antiquado. O EC GSM, por exemplo, foi implantado em 2018, embora já estivessem disponíveis operações 4G. Isso acontece porque os equipamentos de 3G foram deslocados para áreas de menor densidade populacional, como pequenas cidades ou áreas rurais – justamente nos locais onde surgiram novas demandas por redes sem fio, para atender à agricultura de precisão, por exemplo.

A adequação da tecnologia celular para o atendimento de redes M2M nessa geração, entretanto, não tratou convenientemente o problema de demanda de energia nos dispositivos. Sabemos que as redes móveis atendem a equipamentos, como smartphones, que podem apresentar alto consumo de



energia, uma vez que sofrem recargas diárias. Essa característica, própria da tecnologia do rádio e do algoritmo de modulação das redes 3G, não se altera nos padrões NB IoT e EC GSM.

O consumo elevado restringe as aplicações a dispositivos que possam ser alimentados de forma contínua, fazendo com que a solução seja imprópria para boa parte da agricultura.

### **4.3 Redes para IoT sobre LTE**

As redes 4G (ou LTE, do inglês Long Term Evolution) buscam atender à comunicação multimídia, otimizando dinamicamente os recursos da rede, tanto do lado do assinante quanto da operadora. Em relação ao 3G, ele apresenta como novidade a total comutação por pacotes, voltando-se para o roteamento IP sem, entretanto, perder a compatibilidade com as gerações anteriores. As taxas de transmissão podem chegar a 100Mbps de download e 50Mbps de upload por usuário, em condições ideais.

Você deve estar se perguntando por que motivo, no 4G, seria necessário desenvolver um padrão para comunicação M2M, já que o LTE é uma rede convergente. A questão é que o número de objetos IoT (em uma smart city, por exemplo) pode facilmente suplantear o número de assinantes humanos, congestionando a rede. Também é fato que a demanda por dados desses objetos é de modo geral baixa, em relação aos downloads de internet solicitados pelos assinantes.

A tecnologia 4G permite flexibilidade de banda para os assinantes. O padrão LTE-M (também chamado de eMTC – enhanced Machine Type Communication), desenhado para atender objetos IoT, reparte a banda de um canal de assinante típico, mas herda a flexibilidade de expansão do 4G, facultando a conexão tanto de objetos de baixo consumo de dados (como no padrão anterior) quanto daqueles demandantes de alto tráfego, como realidade aumentada e vídeo de alta resolução.

O problema é que de fato o 4G não foi pensado para o atendimento a M2M, e sim para a convergência de redes de uso humano. O LTE-M é uma adaptação. Por conta disso, apresenta falhas quando a exigência se aproxima dos limites da tecnologia. Objetos que demandam bandas de transmissão altas, como os que já citamos, operam em baixa latência e alta mobilidade. Tais



facilidades também são cobertas pelo LTE-M, mas com certas lacunas tecnológicas.

A questão de área de atendimento foi igualmente enfrentada posteriormente à implantação do 4G. Porém, a “maldição das telecomunicações” permaneceu. Alcance elevado implica piores índices de qualidade de rede. O padrão LTE-M contorna esse problema com a normalização de dois modos de operação. O primeiro (dito Modo A ou Cat – M1) fornece alta qualidade de rede e mobilidade, com foco em atendimento urbano. O segundo, Modo B, está focado em áreas de baixa densidade populacional, com cobertura estendida.

O Modo B assemelha-se ao NB IoT, mas a taxa de transmissão pode superar os 300Kbps com até alguns segundos de latência. O alcance do LTE Cat-M2 é bastante diverso do seu primo mais velho, permitindo o uso de algumas dezenas de repetições.

#### **4.4 Promessa do 5G**

Já sabemos que o 4G comporta-se mal quando dele exigimos baixa latência, alta densidade de usuários (ou objetos) e altas taxas de conexão por usuário. Demandas de novas aplicações IoT, como realidade aumentada, utilização em sistemas de saúde, câmeras de vigilância de alta resolução e streaming de vídeo em alta densidade não são convenientemente suportadas pelo algoritmo de roteamento, tampouco pela camada física dos sistemas 4G (Oliveira; Alencar; Lopes, 2018). Esse novo tráfego só pode ser bem atendido se a disponibilidade de rede, para o uso original de smartphones, for limitada.

A observação das redes de pacotes roteadas, como as LANs TCP, quando exercitadas em alto tráfego e densidade, permitiram alterar os protocolos de roteamento do 4G, acrescentando arquiteturas dinâmicas aos algoritmos desse padrão. Outras associações poderosas foram: virtualização e técnicas de controle de cobertura por antenas inteligentes e o uso de espectros de frequência não licenciados como apoio à operação.

Tais implementações permitiram um salto tecnológico no atendimento sem fio móvel, o chamado 5G, que supre as deficiências que antes elencamos. A figura a seguir demonstra as aplicações, bem como a sua demanda por altas taxas, baixa latência e alta densidade de objetos.



Figura 14 – Triângulo de demandas de rede para novas aplicações IoT



Fonte: Elaborado com base em Oliveira; Alencar; Lopes, 2018.

Na camada MAC do 4G, o roteamento ligado às demandas do usuário era feito da mesma forma que o controle de rede (controle de login, tarifação, mobilidade entre estações...). No 5G, as duas demandas são segregadas, com a criação de um Plano de Usuário (PU) e de um de controle (PC), cada qual com a sua própria comutação e gateway. Como podemos imaginar, a independência de planos permite alterações de banda, para um dado usuário, sem que sejam necessárias alterações no PC.

As novas interfaces PHY permitem conexões, além das frequências licenciadas para telefonia pública, também nas frequências de WiFi (IEEE 802.11) e IEEE 802.16, e também em altas frequências, acima de 24GHz, sempre de forma transparente para o usuário. Essa flexibilidade no uso de frequências, associada ao roteamento bipartido, viabiliza altas taxas de transmissão, contornando restrições de cobertura inerentes a cada faixa.

Objetos IoT, principalmente em aplicações urbanas, apresentam demandas de rede profundamente diversas, como podemos ver no triângulo da figura. A estrutura dinâmica do 5G permite um atendimento flexível, mesmo para altas densidades de dispositivos conectados simultaneamente. Além disso, a possibilidade de uso de rádios de frequências não licenciadas nas estações de rádio base permite maior proximidade ao dispositivo, reduzindo a demanda de energia. Essa última propriedade transforma o 5G em uma alternativa real de conectividade para IoT.



## 4.4 0G Network

Existe uma rede privada que é operada como se fosse pública. A 0G (zero G) é uma rede internacional de operadores de um padrão de radiocomunicação privado, chamada Sigfox, que permite interoperabilidade mundial.

A Sigfox é focada em taxas de transferência de dados extremamente baixas (máxima de 600bps), mas com bom alcance (maior que algumas dezenas de km).

Os rádios Sigfox utilizam modulação BPSK diferencial ou D-BPSK de baixo custo e consumo. A rede 0G opera em sete frequências distintas, definidas pela região geográfica, dita RC (Radio Configuration Zone), onde se encontra a operação. Brasil, Canada, México, Porto Rico e EUA estão na RC2, com frequências de operação próximas a 900MHz.

A tarifação é calculada segundo o número de upstreams diários (normalmente menor do que uma dezena) e o tamanho do pacote transitado.

### Saiba mais

Para mais informações sobre a tecnologia e sobre casos de uso da tecnologia, acesse:

0G UNITED NATIONS. Disponível em: <<https://www.0gunitednations.com/>>. Acesso em: 6 out. 2022.

## TEMA 5 – COMPARAÇÃO ENTRE SOLUÇÕES

Neste tópico, vamos elencar as principais exigências das redes para IoT que as diferenciam das demais redes sem fio. Veremos ainda como cada solução estudada atenda tais exigências.

### 5.1 Exigências para redes de atendimento a IoT

Redes para IoT apresentam algumas características em relação às redes tradicionais. Vamos estudar apenas as três principais que definem, basicamente, as soluções aceitáveis e as mais eficientes.

- **Segurança:** quando apresentamos as redes de atendimento às REI, em cidades inteligentes, comentamos que tais redes são distintas de redes





TCP tradicionais, com LANs e WANs, principalmente no que se refere à segurança. Redes de objetos IoT podem congregam dispositivos pertencentes a concorrentes comerciais ou a proprietários que não guardam qualquer relação de confiança entre si. Assim, os protocolos devem ser seguros tanto do ponto de vista de resiliência (*safety*, em inglês), para evitar atuações indevidas de dispositivos, quanto em relação à inviolabilidade do conteúdo da comunicação (*security*).

- Baixo consumo de energia: comentamos sobre esse aspecto quando apresentamos as diversas tecnologias. É um fato que nem todos os dispositivos IoT exigem um consumo de energia baixo, mas a maioria das aplicações o prefere. Ao instalar um objeto inteligente, para qualquer finalidade, a ausência de preocupação com a alimentação certamente é uma vantagem comercial e econômica. Existem aplicações nas quais a durabilidade das baterias é essencial. Agricultura e pecuária de precisão, além de vigilância de perímetro e sensoriamento, em domótica, são alguns exemplos. Para que o consumo de um objeto, no bloco de conectividade, seja baixo, o rádio deve operar com baixa potência de transmissão, desligando o transmissor quando estiver fora de uso. Ou seja, deve existir um algoritmo de controle de adormecimento.
- Resiliência: nem todas as aplicações demandam resiliência. Ainda assim, aplicações em segurança (tanto *safety* quanto *security*) exigem dispositivos que não possam operar indevidamente. Além de segurança, o sensoriamento para a tomada de decisão também requer resiliência da comunicação. O algoritmo de controle da camada física deve ser capaz de tratar erros, seja por recuperação ou retransmissão. Sistemas com redundância de recepção, nas estações de rádio base, são uma solução interessante para perpetuar a resiliência, sem complexidade excessiva no algoritmo do lado dispositivo e sem a exigência de retransmissões, poupando energia no objeto.

## 5.2 Adequação das soluções de redes

Todas as tecnologias que estudamos nesta etapa atendem às redes IoT – ou seja, não descartaremos nenhuma delas em absoluto como possível solução para certos objetos. Quando apresentamos as principais aplicações

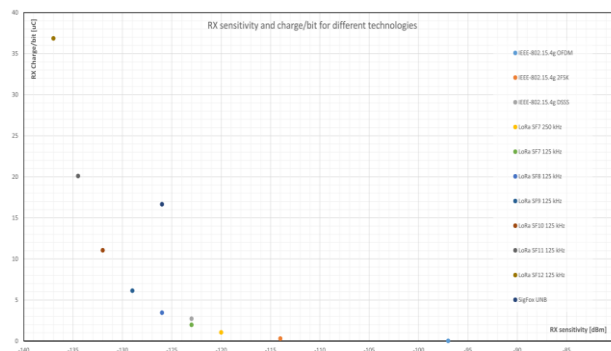


desses objetos, indicamos o padrão de uso mais frequente para atender a uma aplicação em particular. É fato que algumas soluções, por terem a sua origem em padrões de atendimento voltados a IoT, são mais genéricas do que outras. O exemplo marcante é o Wi-SUM, que foi desenvolvido especialmente para uso em redes para IoT. Ainda assim, apenas ele não é capaz de atender com vantagens as altas demandas por dados. De qualquer forma, vamos conhecer as debilidades de cada tecnologia apresentada no atendimento aos três requisitos citados anteriormente.

- **Segurança:** todas as tecnologias citadas apresentam algum nível de segurança nativo. Neste requisito, as soluções mais devassáveis serão ZigBee e WiFi. Principalmente no segundo padrão, a segurança não é elevada, uma vez que os seus protocolos de criptografia são voltados para o desempenho, com baixa eficiência na proteção dos dados. Há soluções que agregam níveis suplementares de segurança a esses padrões, de forma que, quando selecionadas, será preciso concentrar especial atenção no reforço de segurança.
- **Baixo consumo de energia:** como comentamos, ao apresentar as tecnologias das redes públicas, o grande problema no uso daquelas soluções é o consumo de energia exigido do dispositivo. Esse inconveniente é tão significativo que, nos gráficos de comparação entre redes para IoT, elas estão fora de escala. A implementação de estações 5G reduzirá esse problema, por conta do uso de frequências não licenciadas em proximidade ao objeto. Como ainda não existem dados experimentais sobre o assunto, será necessário esperar a consolidação do 5G para entender melhor a sua adequação ao IoT. A figura a seguir compara as diversas tecnologias em termos da energia necessária para que o objeto transmita um bit de informação.



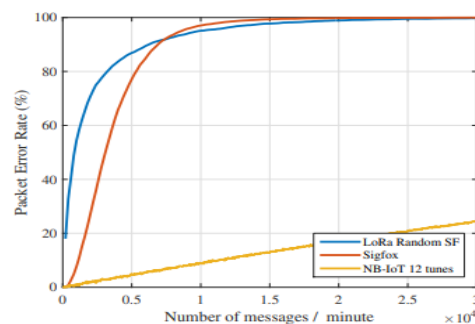
Figura 15 – Energia necessária para transmitir um bit



Fonte: Ruckebusch *et al.*, 2018, p. 108.

- Resiliência: a resiliência da rede parece estar do lado das soluções públicas, como vemos na figura a seguir. Naturalmente, quando utilizamos maior potência nos rádios (com consumo maior de energia dos dispositivos), a qualidade da transmissão aumenta, uma vez que podemos operar com o sinal acima do ruído e da interferência sintonizada. Essa comparação, como já percebemos, aponta as soluções de telefonia celular como ideais para o atendimento a objetos de grande demanda de banda de transmissão, com baixa restrição de fornecimento de energia.

Figura 16 – Comparação de taxa erro de pacotes



Fonte: Mroue *et al.*, 2008, p. 5.

## FINALIZANDO

Nesta etapa, estudamos as principais soluções de conectividade para IoT. Buscamos entender os requisitos mais importantes que tais redes devem apresentar, comparando as soluções pertinentes.



Podemos concluir que ainda não há uma solução definitiva para o atendimento às redes para IoT. Não se trata de uma conclusão assombrosa, uma vez que tanto as aplicações quanto os objetos estão em constante evolução, por vezes disruptiva, em relação ao que já está sedimentado. Já existem, entretanto, padrões criados especificamente para o atendimento a IoT, que evoluem em conjunto com a tecnologia IoT.

Trabalhamos nesta etapa a questão de segurança de forma genérica, voltada à estabilidade das conexões. Em outros momentos, vamos ampliar esse estudo, discutindo os riscos envolvidos no uso das tecnologias emergentes de IoT.



## REFERÊNCIAS

BRASIL. Resolução Anatel n. 680, de 27 de junho de 2017. **Diário Oficial da União**, Poder Legislativo, Brasília, DF, 29 jun. 2017.

HARADA, H. *et al.* IEEE 802.15: 4g based Wi-SUN communication systems. **IEICE Transactions on Communications**, v. 100, n. 7, p. 1032-1043, 2017.

KEISER, G. K. **Comunicações por Fibras Ópticas**. Porto Alegre: Grupo A, 2014. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580553987/>>. Acesso em: 6 out. 2022.

LORA ALLIANCE. **LoRaWAN Resource Hub Files**. 2018. Disponível em: <<https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-07/lorawan1.0.3.pdf>>. Acesso em: 6 out. 2022.

MARAIS, J. M.; MALEKIAN, R.; ABU-MAHFOUZ, A. M. LoRa and LoRaWAN testbeds: a review. **IEEE Africon**, p. 1496-1501, 2017.

MAXIM INTEGRATED. **An Introduction to Spread-Spectrum Systems**. 2003. Disponível em: <<https://www.maximintegrated.com/en/design/technical-documents/tutorials/1/1890.html>>. Acesso em: 6 out. 2022.

MROUE, H. *et al.* MAC layer-based evaluation of IoT technologies: LoRa, SigFox and NB-IoT. **IEEE Middle East and North Africa Communications**, p. 1-5, 2008.

OLIVEIRA, L. A. N.; ALENCAR, M. S.; LOPES, W. T. A. Evolução da Arquitetura de Redes Móveis Rumo ao 5G. **Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação**, v. 8, n. 2, p. 43-50, 2018.

PRANDO, L. R. *et al.* Experimental performance comparison of emerging low power wide area networking (LPWAN) technologies for IoT. In: WORLD FORUM ON INTERNET OF THINGS (WF-IoT), 5., 2019. **Proceedings...** IEEE, 2019.

RIBEIRO, J. R. J. A. **Comunicações ópticas**. São Paulo: Saraiva, 2009. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536521930/>>. Acesso em: 6 out. 2022.



RUCKEBUSCH, P. *et al.* Modelling the energy consumption for over-the-air software updates in LPWAN networks: SigFox, LoRa and IEEE 802.15. 4g. **Internet of Things**, v. 3, p. 104-119, 2018.

TANENBAUN, A.; WETHERALL, D. **Redes de computadores**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2011.

ZIGBEE ALLIANCE. **Developer Resources Papers**. Disponível em: <[https://zigbeealliance.org/developer\\_resources/?solution\\_type%5B%5D=zigbee](https://zigbeealliance.org/developer_resources/?solution_type%5B%5D=zigbee)>. Acesso em: 6 out. 2022.