

Avaliação de Tecnologias de Comunicação Sem-Fio para Monitoramento em Ambientes de Floresta

Ana Elisa Ferreira^{1,2}, Fernando M. Ortiz¹, Luís Henrique M. K. Costa¹

¹Grupo de Teleinformática e Automação (GTA/PEE/COPPE)

Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Avenida Athos da Silveira Ramos, 149 – Ilha do Fundão – CEP: 21945-970 – RJ – Brasil

²Engenharia de Computação

Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET)

Rua do Imperador, 971 – Petrópolis – CEP: 25620-003 – RJ – Brasil

{ferreira, fmolano, luish}@gta.ufrj.br

Resumo. *Serviços baseados em localização permitem o monitoramento de pessoas ou áreas específicas. Através do acompanhamento da sua localização, é possível auxiliar o resgate de pessoas perdidas ou acidentadas em ambientes naturais. No entanto, as redes sem-fio em áreas de densa vegetação, neste caso, a Mata Atlântica, implicam desafios relacionados com mobilidade e conectividade. Este trabalho compara o desempenho em termos de alcance, potência do sinal, taxa de perda e retardo em enlaces implementados usando as tecnologias LoRa, IEEE 802.11g e ZigBee no Parque Nacional da Serra dos Órgãos. A comparação destas métricas permite distinguir as limitações de cada tecnologia que podem influenciar na disseminação de alertas. Os resultados mostram que o alcance máximo da LoRa é 3 vezes maior do que o IEEE 802.11g e 6 vezes maior do que o ZigBee, operando com potência do sinal recebido menor que as duas tecnologias, em média 21,67% e 26,15%, respectivamente.*

Abstract. *Location-based services (LBS) allow the monitoring of people or specific areas. By tracking their location, it is possible to assist in the rescue of lost or injured people in natural environments. Nevertheless, wireless networks in areas of dense vegetation, in this case, the Mata Atlântica Forest, involve challenges with respect to mobility and connectivity. This work compares the performance in terms of range, signal power, loss rate and delay in links implemented using LoRa, IEEE 802.11g and ZigBee technologies at Serra dos Órgãos National Park, Brazil. The analysis of those metrics allows to assess the limitations of each technology that can influence the dissemination of alerts. The results show that the maximum range achieved with LoRa is 3 times higher than that of IEEE 802.11g and 6 times higher than ZigBee's, with received signal power lower than the two technologies, 21.67% and 26.15% on average, respectively.*

1. Introdução

A Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT) é uma realidade, com novas aplicações e tecnologias surgindo a cada dia. Entre as aplicações que podem ser providas ou aperfeiçoadas através da IoT, estão as que permitem monitorar pessoas e oferecer serviços baseados em sua localização (LBS - *Location-Based Services*). Emergências, cuidados

com a saúde, bem estar de pessoas em situação de vulnerabilidade, notícias e publicidade são exemplos de aplicações LBS que se beneficiam da IoT. Tecnologias de redes sem-fio de baixo consumo são frequentemente utilizadas nestas aplicações, favorecendo a miniaturização e autonomia dos dispositivos, especialmente em ambientes externos.

Este artigo propõe um serviço de monitoramento da localização de visitantes em parques florestais, e investiga o uso de novas tecnologias de rede sem-fio que possam viabilizá-lo. O ambiente florestal é muito desafiador devido às dificuldades de propagação da onda eletromagnética. Essa dificuldade se torna ainda mais pronunciada em florestas tropicais, como a Mata Atlântica, trazendo como consequência a impossibilidade de garantir conectividade contínua. Como forma de lidar com este desafio é proposta uma aplicação que utiliza técnicas de DTNs (*Delay and Disruption Tolerant Networks*), com comutação de mensagens e armazenamento persistente de dados de localização.

Através de uma abordagem de experimentação prática, avaliam-se neste trabalho as tecnologias LoRa [Augustin et al., 2016], IEEE 802.11g [Vassis et al., 2005] e ZigBee [Farahani, 2008] em ambiente de floresta. Para isso são usados transceptores de cada tecnologia, de baixo custo e compatíveis com o microcontrolador Arduino. Os experimentos são realizados na sede de Teresópolis do Parque Nacional da Serra dos Órgãos (PARNASO), dentro de uma série de estudos conduzidos pela equipe do GTA/PEE/COPPE que visam a melhoria da assistência ao visitante do Parque.

Os objetivos principais deste artigo são apresentar o sistema de monitoração e avaliar o funcionamento das tecnologias LoRa, IEEE 802.11g e ZigBee na floresta. Consideram-se as métricas de alcance, potência do sinal recebido, taxa de perda de pacotes, latência e jitter. Essas métricas foram escolhidas por permitirem analisar o impacto em cada tecnologia da dificuldade de propagação. Uma melhor comunicação dentro da floresta contribui para a segurança do turista, bem como a preservação do meio ambiente e alternativas de uso sustentável dos recursos naturais. A avaliação das tecnologias ajuda a identificar a sua aplicabilidade e seus limites para uso em projetos neste tipo de ambiente, tema sobre o qual foram encontrados poucos trabalhos relacionados.

Este trabalho está organizado da seguinte forma. A Seção 2 apresenta a aplicação e o sistema de monitoramento propostos. Trabalhos relacionados são abordados na Seção 3, enquanto a Seção 4 resume as características relevantes das tecnologias de redes sem-fio escolhidas. Na Seção 5 são apresentados os experimentos realizados e resultados obtidos. A Seção 6 conclui o trabalho e identifica desafios futuros.

2. Descrição do Sistema de Monitoramento

As atividades de ecoturismo estão atraindo cada vez mais participantes. Infelizmente, aumentam também os casos de visitantes de parques naturais que vivenciam situações de risco. Entre os riscos mais graves, e mais comuns, está o de se perder ou se acidentar em um ambiente desconhecido. O monitoramento da localização do visitante permite uma ação mais rápida e eficaz de equipes de resgate. Porém, para tanto, é necessária alguma forma de comunicação dentro da floresta.

O sistema de monitoramento proposto é composto de uma infraestrutura de pontos de acesso sem-fio, os totens, e terminais móveis *wearables*, portados pelos visitantes, bem como uma aplicação de localização e um protocolo que regula a troca de mensagens

entre os dispositivos. Os totens são capazes de anunciar suas coordenadas e prover comunicação de dados aos terminais, encaminhando seus dados para a nuvem. A comunicação entre totem e nuvem será feita por qualquer meio disponível: 2G, 3G, etc.. Esta infraestrutura deve ser reduzida, uma vez que devido aos custos não é factível dentro do parque uma cobertura completa. Os totens devem ser posicionados em locais que permitam otimizar a cobertura, considerando o sinal nas trilhas, a atenuação causada pela diferença de altura entre as antenas e os riscos de cada trecho [de Queiroz et al., 2018]. Os terminais móveis trocam dados de localização periodicamente com os totens e entre si, permitindo acompanhar a movimentação do visitante.

De acordo com a Federação de Esportes de Montanha do Estado do Rio de Janeiro (FEMERJ), uma trilha moderada, com até 12 km de comprimento e desnível de até 600 m para subidas e 800 m para descidas, pode ser percorrida a uma velocidade média de 6 km/h (100 m/min), por um praticante bem treinado [FEMERJ, 2015]. Consideramos este perfil para os visitantes do parque, pois será o caso em que teremos o menor tempo médio de contato entre os terminais. Dado que o alcance dos módulos LoRa utilizados é de cerca de 200 m, conforme descrito na Seção 5, dois visitantes têm um intervalo de contato de cerca de 2 minutos para descobrir a presença um do outro e trocar informações de localização.

A cada minuto o terminal emite um *beacon* que possibilita o início da comunicação com outro na sua área de cobertura, aproximadamente um círculo com diâmetro de 400 m. Este período, definido a partir da velocidade estimada de deslocamento dos visitantes e do alcance do sinal, mantém baixo o consumo da bateria, permitindo ainda que haja ao menos duas oportunidades de reconhecimento e troca de dados durante cada intervalo de contato. É importante que a oportunidade de comunicação não seja única, uma vez que a transmissão não é confiável e o *beacon* pode ser perdido. O *beacon* informa a identificação do terminal e se o visitante se encontra em situação de perigo (*help flag*). Essas informações são usadas para estimar a sua localização, dar encaminhamento prioritário ao pedido de socorro e retornar a notificação de resgate. Para minimizar o efeito de possíveis perdas de pacotes, a mensagem de pedido de socorro será enviada a cada 30 s até que o terminal receba a notificação em resposta, confirmando o envio da equipe de resgate.

A aplicação de localização, usada para prover o serviço de monitoramento e segurança de visitantes, é baseada em [Huang et al., 2005] e [Jiang et al., 2009], trabalhos que propõem estimar a localização do visitante através da troca de mensagens entre sensores de RF. É apresentado o conceito de sensor testemunha, que faz um registro de avistamento para armazenar e transmitir informações de localização, que retratam o movimento dos outros sensores. Quando se encontram ao longo do caminho, os sensores se tornam testemunhas entre si e trocam seus dados de localização, que serão enviados para um repositório central através de um ponto de acesso (AP - *Access Point*). Esses dados, que compõem o histórico de localizações anteriores de diversos sensores, podem ser usados para estimar as suas localizações. Para reduzir a complexidade de implementação ao mínimo e, portanto, a necessidade de processamento dos terminais móveis, não é implementada a pilha IP. A aplicação executa diretamente sobre a camada física.

O sistema proposto acrescenta a possibilidade de um pedido ativo de socorro por parte do usuário. Isso é feito com a criação de dois novos tipos de mensagem e a adição de um campo, o *help flag*. As mensagens são o pedido de socorro e a notificação de resgate, identificadas pelo *help flag*. Estas adequações permitem um atendimento mais rápido ao

visitante em situação de risco. Não é preciso aguardar por um longo tempo até que o problema seja percebido através da ausência de dados deste visitante específico nas mensagens dos outros visitantes. Também é feita uma adequação do registro de avistamento, reduzindo o seu tamanho. Essa redução visa facilitar a transmissão por tecnologias de baixa vazão tipicamente usadas em IoT. Na Figura 1, são mostradas as mensagens utilizadas no protocolo proposto. Cada uma delas pode possuir os seguintes campos:

- HF - *help flag* (2 bits) – informa se o visitante pediu socorro ou se há uma equipe de resgate a caminho. Em caso de pedido de socorro ambos os bits terão valor 0. Para a notificação de resgate ambos os bits terão valor 1. São usados 2 bits para prover redundância e permitir detecção de erro pela aplicação.
- ID (*mobile* ou *totem*) (10 bits) – identifica o totem ou o terminal móvel. Esse endereço deve permanecer único em toda a área durante o intervalo monitorado, definido como 24h. Caso o terminal não seja localizado nesse prazo máximo, será enviado resgate mesmo sem solicitação, pois o visitante pode estar desacordado.
- *record time* (16 bits) – registra o momento de contato com outro terminal móvel, com precisão de 1,5 segundos.
- *latitude e longitude* (24 bits cada, total 48 bits) – armazena a última coordenada obtida, com precisão de 2,4 m. As coordenadas geográficas podem ser obtidas obtidas pelo GPS a cada minuto, caso haja conexão com os satélites, ou recebida de um totem quando o terminal móvel estiver em sua área de cobertura. O receptor de GPS usado nos experimentos tem precisão de 2,5 m [AG, 2011].
- *location time* (16 bits) – armazena o momento em que as coordenadas foram obtidas, com precisão de 1,5 segundos.
- *hop count* (8 bits) – contém o número de vezes em que a mensagem foi repassada, incrementado a cada transmissão.

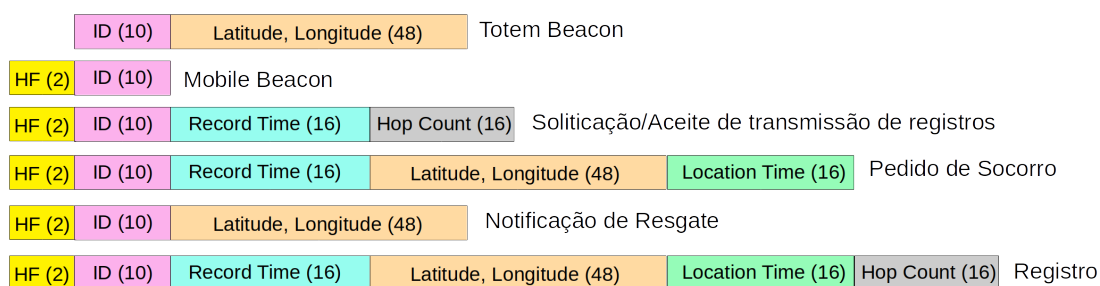


Figura 1. Formato das mensagens.

A comunicação entre terminais e totens é definida pelo protocolo de comunicação da aplicação. A comunicação entre terminais é assíncrona, como mostra a Figura 2(a). Ela se inicia com a recepção do *beacon*. O terminal registra a presença do outro, envia sua identificação e solicita permissão para transmitir seus registros armazenados, informando seus valores limites de *hop count* e *record time*. Caso tenha memória disponível, o terminal remoto, que originou o *beacon*, armazena os dados do contato atual, envia seus próprios limites de *hop count* e *record time* e aceita a transmissão. Em seguida envia os próprios registros armazenados. *Hop count* e *record time* permitem melhorar o gerenciamento da

memória do terminal, evitando receber registros muito antigos ou já retransmitidos muitas vezes. Os registros que tenham valores acima do informado não são enviados.

A comunicação totem x terminal (Figura 2(b)) também é assíncrona e iniciada pelo *beacon*. Entretanto, o totem divulga suas coordenadas a cada 5 s, uma vez que não possui limitações de alimentação ou armazenamento, como os terminais móveis. É importante aumentar a probabilidade de que os móveis que entrem na área de um totem consigam estabelecer comunicação. Os totens também registram a passagem dos móveis, informando em qual trilha se encontra o visitante. É feita então uma previsão do momento em que o visitante passará pelo próximo totem desta mesma trilha. Essa previsão é refinada com o acúmulo de registros sobre cada visitante, ao estimar a sua velocidade média de deslocamento. Idealmente, os totens devem ser localizados ao menos nas entradas e entroncamentos de trilhas, além de lugares com riscos específicos como cachoeiras e grutas.

Na Figura 2(b) o terminal A, que passa pela área de cobertura do totem, ouve o *beacon*. O terminal atualiza as suas coordenadas, informa a sua identificação e solicita a transmissão dos registros salvos em sua memória. Ao receber o aceite, encaminha então todos os registros da sua memória, esvaziando-a. Os totens enviam os registros recebidos para servidores que estimam a localização dos visitantes. Caso haja um pedido de socorro, a solicitação é encaminhada para uma equipe de resgate, que responde com uma notificação ao enviar ajuda. A notificação de resgate tem a função de encerrar o envio do pedido de socorro pelo terminal do visitante em perigo. O terminal volta a emitir apenas *beacons* periódicos, reduzindo o gasto de bateria.

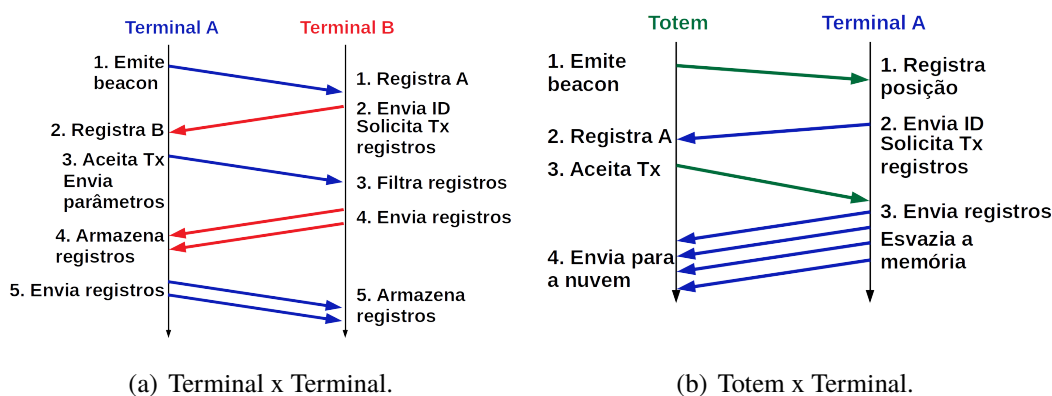


Figura 2. Comunicação em operação normal.

3. Trabalhos Relacionados

Os artigos de [Huang et al., 2005] e [Jiang et al., 2009] introduzem o conceito de registro de avistamento como forma de subsidiar a localização de um sensor numa rede com conexão intermitente e seu uso conjunto com o GPS. O CenWits [Huang et al., 2005] é um sistema de busca e salvamento em áreas selvagens, que utiliza sensores RF transportados pelos visitantes, operando na faixa de 900 MHz. Cada um dos sensores recebe suas coordenadas de pontos de localização, ou de um GPS se disponível, e as passa para outros nós durante encontros subsequentes. Esta informação é descarregada nos pontos de acesso distribuídos em vários locais. Esses dados, que consistem no histórico de localizações e

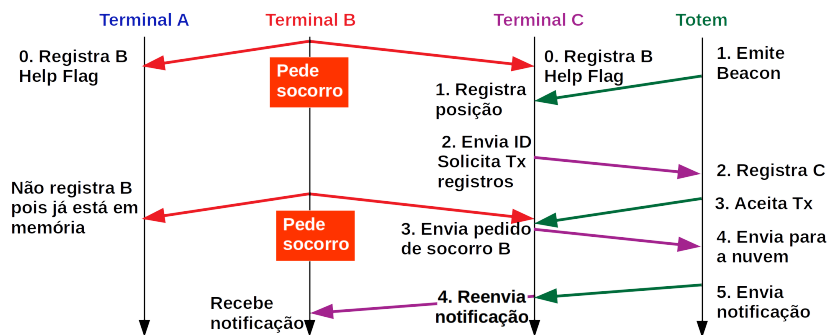


Figura 3. Comunicação em situação de emergência.

velocidade de deslocamento, podem ser usados para estimar a localização de um visitante perdido. O sistema é projetado para uma rede que fornece apenas conectividade ocasional. O projeto SenSearch [Jiang et al., 2009] é uma solução de rastreamento assistida por GPS baseado no CenWits [Huang et al., 2005]. Funciona praticamente da mesma forma, porém o uso intensivo do GPS melhora a estimativa de localização, aumentando a precisão do sistema. Também é feito um estudo do *duty cycle*, reduzindo os períodos de ativação do GPS e dos sensores RF para melhorar o uso da bateria.

O emprego de sistemas de posicionamento alternativos ao GNSS vem crescendo devido ao aumento de LBS em locais onde estes têm limitações. [Tahat et al., 2016] revisam vários algoritmos de última geração empregados na estimativa de posição sem-fio usando receptores móveis. A fim de encontrar a localização de um dispositivo de RF, diferentes medidas podem ser utilizadas: a potência do sinal medida pelo RSSI, o tempo de chegada (TOA - *Time Of Arrival*), a diferença de tempo de chegada (TDOA - *Time Difference Of Arrival*), a diferença de frequência de chegada (FDOA - *Frequency Difference Of Arrival*) e o ângulo de chegada (AOA - *Angle Of Arrival*), entre outras. Outra área relacionada consiste nos sistemas de navegação cega (*dead-reckoning*). [Jimenez et al., 2009] comparam algoritmos de *dead-reckoning* para pedestres. O estudo é restrito a sensores de medidas inerciais microeletromecânicos (MEM IMU- *Microelectromechanical Inertial Measuring Units*) de baixo custo e baixo peso, colocados numa bota. Os resultados mostraram soluções adequadas para estimar trajetórias com um desvio abaixo de 5% da distância percorrida. Entretanto, este tipo de sistema de navegação cega exige um equipamento adicional ao IMU capaz de fazer o processamento dos dados para gerar a localização. Este pode ser um *Raspberry Pi* ou um *tablet*, o que dificulta seu uso para o ambiente de floresta, além de exigir uma calibragem inicial.

O principal avanço em relação ao estado da arte deste trabalho está na investigação de características específicas da camada física de diferentes tecnologias para a implementação do sistema de rastreamento de visitantes em ambientes de floresta. Por outro lado, como descrito na seção anterior, o sistema proposto acrescenta o pedido ativo de resgate por parte do visitante, evitando que seja necessário esperar que a sua ausência em registros de diversos sensores seja percebida.

4. Tecnologias de Comunicação Avaliadas

Há diversas tecnologias de comunicação sem-fio para IoT. Em geral, este tipo de comunicação possui como requisitos baixo consumo de energia, baixo custo, banda estreita e dimensões reduzidas dos dispositivos. Incluem as redes LPWAN (*Low Power Wide Area Network*), WLAN (*Wireless Local Area Network*) e WPAN (*Wireless Personal Area Network*), NFC (*Near-Field Communication*) e comunicação celular para aplicações IoT, padronizada pelo 3GPP (*Third Generation Partnership Project*). As tecnologias LPWAN vêm se consolidando como alternativa para atender a uma grande quantidade de terminais, porém com baixas taxas de transmissão. A LoRa, desenvolvida pela Semtech, é uma das principais tecnologias usadas em redes de baixo consumo e longa distância, indicada, principalmente, para aplicações de IoT que requeiram cobertura de grandes áreas. Embora existam outras tecnologias LPWAN [Raza et al., 2017], este documento foca na tecnologia LoRa, por ser uma das mais difundidas atualmente.

Entre as tecnologias WPAN/WLAN, o ZigBee é amplamente usado na comunicação com sensores e atuadores, dispositivos típicos da IoT. Embora seja uma tecnologia de rede de área pessoal e, portanto, de curto alcance, o ZigBee apresenta características que trazem flexibilidade à comunicação, podendo operar desde topologias *mesh* até ponto-a-ponto, bem como a possibilidade de operar em múltiplos saltos. Já o IEEE 802.11, a tecnologia de rede WLAN mais difundida, é muito usado também para automação em ambientes *indoor* sendo uma opção a ser avaliada. O Wi-Fi é quase onipresente em terminais móveis, como *smartphones*, *tablets* e *notebooks*. Com alcance maior que o ZigBee, o IEEE 802.11 é empregado em redes ad-hoc, redes *mesh*, redes veiculares e projetos de cidade digital. Extensões das tecnologias de comunicação celular foram padronizadas pelo 3GPP para IoT. Entre as principais, estão as extensões do LTE (*Long Term Evolution*), o NB-IoT (*Narrowband IoT*) e o LTE-MTC (*LTE - Machine Type Communication*). Apesar de projetadas para atender à demanda de IoT, exigem o uso de um *SIMCard - Subscriber Identity Module Card* individual por equipamento que se conecte à rede. Como não há garantia de cobertura na região a ser monitorada, estas tecnologias não estão contempladas neste estudo. O protocolo NFC também não está incluído por operar apenas em distâncias extremamente curtas, da ordem de centímetros.

As tecnologias avaliadas neste trabalho estão entre as mais utilizadas em soluções de IoT, seja em ambientes *indoor* ou *outdoor*. Entretanto, não foram encontrados trabalhos anteriores que avaliassem seu desempenho no ambiente de floresta, objeto desta pesquisa.

4.1. LoRa

A LoRa define uma camada física (PHY) que procura atender aos requisitos de baixo consumo de energia dos objetos inteligentes e dá suporte ao protocolo LoRaWAN. A LoRa também se caracteriza pela redução na complexidade do *hardware*, a diminuição do tamanho dos cabeçalhos e da complexidade da rede em termos de saltos e endereçamento, proporcionando uma comunicação bidirecional simples, com o uso de uma infraestrutura mínima e com baixo consumo de energia. O LoRaWAN [Marais et al., 2017] define a arquitetura do sistema e o protocolo de controle acesso ao meio (*Medium Access Control - MAC*) que utiliza a camada física LoRa. O LoRaWAN define taxas de velocidade de dados, suporte à comunicação bidirecional e oferta de serviços de mobilidade e localização dos nós da rede. Diferente do LoRa PHY, a especificação do protocolo LoRaWAN é aberta

e divulgada desde 2015. Este trabalho utiliza apenas a camada PHY da LoRa para criar uma DTN entre terminais móveis utilizados na localização de visitantes do PARNASO.

A camada PHY usa correção antecipada de erros (*Forward Error Correction – FEC*) e modulação proprietária, que é uma variante do espalhamento espectral por *chirp* (*Chirp Spread Spectrum – CSS*). A LoRa PHY modula pulsos de *chirps* em frequência para codificar a informação [Bor et al., 2016, Reynders e Pollin, 2016], que varia a frequência sem mudar a fase entre símbolos adjacentes [Goursaud e Gorce, 2015]. Isto faz com que o sinal resultante seja resistente a interferências por ruído ou sinais com frequências próximas. No Brasil, os sinais são modulados em sub-bandas da faixa de 902 a 928 MHz, de acordo com a Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel). A comunicação na faixa de 433 MHz pode ser implementada para redes com poucos dispositivos e baixa potência, de forma a evitar interferências no serviço de radioamador pré-existente.

O consumo de energia, a faixa de transmissão e a resistência à interferência podem ser determinados a partir de quatro parâmetros de configuração da PHY da LoRa: a frequência da portadora, que define a frequência central para a banda de transmissão; a largura de banda (*Bandwidth – BW*), que define o tamanho da faixa de frequências utilizada; a taxa de código (*Code Rate – CR*), que define a taxa de FEC e o fator de espalhamento (*Spreading Factor – SF*), que define o espalhamento espectral [Bor et al., 2016].

A frequência da portadora é definida de acordo com a região de operação dos equipamentos. Esse parâmetro não é, em geral, ajustável de acordo com a aplicação. A largura de banda, por sua vez, possui três valores programáveis: 125 kHz, 250 kHz e 500 kHz. O SF define a razão entre a taxa de bits e a taxa de *chirps*. A especificação LoRa define seis valores diferentes para o parâmetro fator de espalhamento: SF7, SF8, SF9, SF10, SF11 e SF12 [Augustin et al., 2016], o que permite formar canais ortogonais, fazendo com que enlaces com fatores de espalhamento diferentes não tenham colisões entre si. Um maior SF aumenta a sensibilidade do limiar de recepção em termos de potência, porém, aumenta o tempo de duração de símbolos e diminui a taxa de transmissão do enlace [Raza et al., 2017]. A CR define quantos bits são utilizados para redundância na mensagem, a fim de realizar a recuperação de erros. Também é especificada uma taxa de transmissão R_b teórica, definida em função do fator de espalhamento e da taxa de código, representando a taxa de bits efetiva como:

$$R_b = SF \times \frac{T_c \times BW}{2^{SF}}, \quad \text{onde } SF \in \{7, 8, 9, 10, 11, 12\}. \quad (1)$$

4.2. ZigBee

O ZigBee é uma tecnologia de rede sem-fio de área pessoal (WPAN) para aplicações com baixa taxa de transmissão e baixo consumo de energia, baseada no padrão IEEE 802.15.4. Possui alcance de até 250 m com taxa de dados até 250 kbps. Pode operar nas faixas de 868 MHz, 902 MHz e 2,4 GHz. No Brasil, é usada a canalização na faixa 2,4 GHz, com 16 canais com 2 MHz de largura e modulação por deslocamento de fase em quadratura (QPSK – *Quadrature Phase Shift Keying*) e espalhamento espectral por sequência direta (DSSS – *Direct Sequence Spread Spectrum*). O ZigBee usa dois tipos de terminais diferentes, um com funções reduzidas (RFD - *Reduced Function Device*), e um de função completa (FFD - *Full Function Device*), que funciona como coordenador da rede [Farahani, 2008]. Com estes dispositivos, é possível criar diferentes topologias,

inclusive uma rede em malha. Neste trabalho, foi usada apenas a comunicação ponto-a-ponto, para caracterizar o desempenho de um enlace na floresta.

4.3. IEEE 802.11

O IEEE 802.11 é uma tecnologia de comunicação muito usada atualmente, tanto para WLANs como para conexão de uma miríade de dispositivos, incluindo aqueles usados para automação e IoT. Essa grande utilização traz tanto familiaridade para usuários e técnicos, como baixo preço dos equipamentos. O padrão IEEE 802.11 evoluiu através de técnicas de transmissão e codificação para comunicações sem-fio, sendo as mais comuns: FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*), DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*) e OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). A transmissão usando MIMO (*Multiple Input, Multiple Output*) OFDM é a mais recente e mais usada atualmente. Podendo operar a 2,4 GHz ou 5 GHz, com canais de 20 MHz a 160 MHz, os equipamentos IEEE 802.11 conseguem alcançar taxas de transmissão superiores a 1 Gbps. Neste trabalho será usado o padrão IEEE 802.11g por operar na faixa de 2,4GHz e haver módulos compatíveis com o Arduino disponíveis. O IEEE 802.11 pode ser usado em redes estruturadas (*Extended Service Set - ESS*) ou ad-hoc (*Independent Basic Service Set - IBSS*), esta última permite uma topologia muito flexível, comunicação em múltiplos saltos e a entrada e saída simplificada de nós que a constituem [Vassiss et al., 2005].

5. Experimentos

A propagação da onda eletromagnética é fortemente afetada no ambiente florestal pelos fenômenos de absorção e espalhamento, conforme descrito em [Figueiredo et al., 2009] e [Cavalcante, 2007]. Ambos os fenômenos contribuem para a degradação do sinal, reduzindo sua potência e o alcance obtido. Também é importante o fenômeno de múltiplos percursos ocasionado por várias reflexões da onda transmitida, o que contribui para o aumento da taxa de erro e também para a atenuação do sinal. Assim, os experimentos conduzidos neste trabalho visam a avaliação de desempenho das tecnologias abordadas na Seção 4, considerando o alcance, a potência do sinal recebido (representada pelo RSSI), a taxa de perda de pacotes, a latência e o jitter. Para a LoRa também é avaliada a variação do fator de espalhamento, parâmetro configurável nesta tecnologia. Os resultados destes testes serão usados para subsidiar a escolha da tecnologia de comunicação sem-fio usada na transmissão da DTN necessária para a aplicação de localização.

5.1. Metodologia

As medições são realizadas por meio da implementação de um protótipo em *hardware*, com um módulo transceptor para cada tecnologia. O cenário de medição é a sede de Teresópolis (RJ) do PARNASO, mais especificamente a trilha suspensa. Foram selecionados pontos para a localização das unidades transmissora e receptora de forma a obter enlaces com comprimento variando em passos de 50 m para a LoRa e de 10 m para o IEEE 802.11 e para o ZigBee, até que não seja mais possível a recepção de pacotes. A linha de visada esteve parcialmente obstruída, coberta pela vegetação até 50 m. A partir desta distância não havia mais linha de visada. As Figuras 4(a), 4(b), e 4(c) mostram o local dos experimentos e os protótipos usados.

A unidade transmissora possui um controlador que processa os dados de sensoriamento, localização e comunicação. O sensoriamento é executado pelo sensor de temperatura e umidade, a localização é provida pelo receptor GPS e a comunicação é realizada

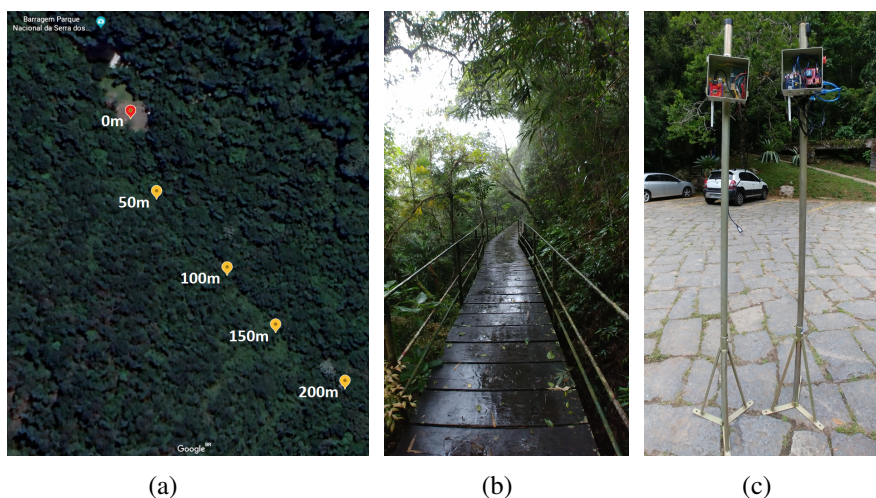


Figura 4. (a, b) Cenário dos experimentos. (c) Protótipos dos experimentos.

pela interface sem-fio. Já a unidade receptora possui um controlador que processa os dados que são recebidos pela interface sem-fio. Os protótipos experimentais utilizados nos testes são compostos por unidades controladoras Arduino UNO e rádios programáveis comumente disponíveis para cada uma das tecnologias. A precisão da localização do GPS é de 2,5 m [AG, 2011]. A Tabela 1 mostra os componentes de *hardware* utilizados para as unidades transmissora e receptora.

Tabela 1. Componentes utilizados na unidade transmissora e receptora.

	Módulo	LoRa	ZigBee	IEEE 802.11
Unidade Transmissora	Controlador	Arduino Uno R3		NodeMCU 1.0 ESP12E
	Interface sem-fio	Dragino LoRa <i>Shield</i> RF96	ZigBee Series 1	ESP8266MOD Ai-Thinker
	Antena	Antena 7dBi D-Link	Fio 1,5 dBi	Impressa 2 dBi
	Receptor GNSS	U-blox NEO-6M		
	Sensor	Sensor de Umidade e Temperatura DHT22		
Unidade Receptora	Controlador	Arduino Uno R3		NodeMCU 1.0 ESP12E
	Interface sem-fio	Dragino LoRa <i>Shield</i> RF96	ZigBee Series 1	ESP8266MOD Ai-Thinker
	Antena	Antena 7dBi D-Link	Fio 1,5 dBi	Impressa 2 dBi

Os parâmetros de configuração dos módulos são apresentados na Tabela 2. A comunicação consiste na transmissão de tuplas de dados pela unidade transmissora. No caso da tecnologia LoRa, também são feitos envios para diferentes valores de SF (7, 9, 11). Estes fatores de espalhamento foram selecionados pois descrevem o comportamento da tecnologia de forma resumida, sem a necessidade de testar todos os SF, uma vez que são os limites superior e inferior acrescidos de um SF intermediário. O SF12 não está disponível na biblioteca usada. Para cada transmissão, são enviados 10 conjuntos de pacotes, numerados de 1 a 200, que incluem o número de sequência, coordenadas geográficas (obtidas pelo receptor GPS), *timestamp*, altitude, temperatura e umidade (ambas medidas pelo sensor). Foram usados 64 bits de preâmbulo. O tamanho total do pacote enviado é de 47 bytes. A recepção de cada pacote é registrada junto com seus dados, *timestamp* de recepção e RSSI.

5.2. Resultados

Esta seção apresenta os resultados obtidos no envio de pacotes do transmissor para o receptor, a partir das configurações implementadas nos experimentos práticos. São ava-

Tabela 2. Parâmetros de configuração dos experimentos práticos.

	LoRa	Zigbee	IEEE 802.11g
Frequência	915 MHz	2,4 GHz	2,4 GHz
Potência de transmissão	14 dBm	14 dBm	14 dBm
Fator de espalhamento	SF (7, 9, 11)	—	—
Largura de banda	500 kHz	5 MHz	20 MHz
Taxa de código	4/5	—	4/8
Protocolo de Transporte	—	—	UDP

liadas a taxa de perda, a potência do sinal recebido, a latência e o jitter. Os resultados são apresentados com intervalo de confiança de 95%, representado por barras de erro verticais nos gráficos. Como descrito na Seção 5.1 as distâncias variam em passos de 50 m para a LoRa e de 10 m para o IEEE 802.11 e para o ZigBee.

A medição de potência foi obtida a partir da informação de RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) das bibliotecas implementadas nos módulos de cada tecnologia. A Figura 5(a) apresenta o comportamento da potência e da relação sinal ruído (SNR - *Signal to Noise Ratio*) no enlace. Observa-se o sinal fortemente atenuado, confirmando a degradação esperada causada pela vegetação: há uma queda abrupta nos primeiros 100 m. Todas as três tecnologias apresentam queda. Entretanto, a LoRa apresenta um decaimento exponencial a partir deste ponto, ainda havendo recepção do sinal com uma potência inferior a -120 dBm. Esse resultado é mais claro para o SF 11 e condiz com o fato de a LoRa ser uma tecnologia projetada para operar a baixa potência. Seu alcance é significativamente maior, alcançando 200 m com potência de -121,27 dBm. O IEEE 802.11g alcança 60 m com potência de -94,99 dBm e o ZigBee 35 m com potência de -80,56 dBm. Percebe-se assim que o alcance máximo da LoRa é 3 vezes maior do que o IEEE 802.11g e 6 vezes maior do que o ZigBee, com potência do sinal recebido menor que as duas tecnologias, em média 21,67% e 26,15%, respectivamente. A justificativa para estes resultados é a modulação CSS (*Chirp Spread Spectrum*), implementada pela LoRa, que permite a operação com potências mais baixas, ao fazer o espalhamento do sinal pelo espectro.

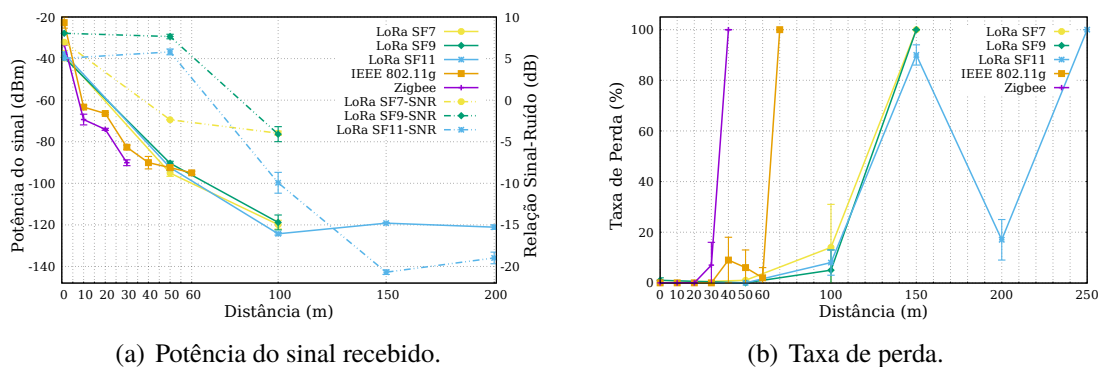


Figura 5. Taxa de perda e potência do sinal no receptor por distância testada.

Para a análise da taxa de perda, são usados os números de sequência que identificam cada pacote. A Figura 5(b) apresenta a taxa de perda no enlace cujo comportamento é o esperado, aumentando com a distância. Como pode-se observar, o SF11 teve uma perda anômala de mais de 80% em 150 m, que pode estar associada à variação por conta de fenômenos de multi-percurso e obstáculos próximos ao ponto. A medição foi refeita três vezes, em diferentes condições atmosféricas para tentar identificar possíveis causas

dessa variação. Entretanto, o padrão de perda severa se manteve em 150 m. Também foi observada uma degradação da SNR, como mostrado na Figura 5(a). A baixa SNR, de -20,69 dB, explica a aparente incongruência entre potência e perda neste ponto. A taxa de perda pode aumentar devido aos erros gerados pelo ruído excessivo.

A Figura 6(a) mostra as medidas de latência. Observa-se que esta é mais dependente da tecnologia que da distância. O fato da variação com a distância ser muito pouca se explica pelos enlaces de comunicação serem curtos. A forte atenuação, mostrada na Figura 5(a), faz com que o comprimento dos enlaces não ultrapasse 200 m. Como a onda se propaga em velocidade próxima à da luz, o atraso de propagação é pequeno, assim como sua variação em função da distância. A mesma observação se aplica ao jitter. Como os enlaces são ponto a ponto e os equipamentos estavam dedicados aos testes, não houve competição pelo uso de recursos, como *buffer* e processamento. Assim, a componente do atraso decorrente da tecnologia é estável e o jitter é baixo (Figura 6(b)).

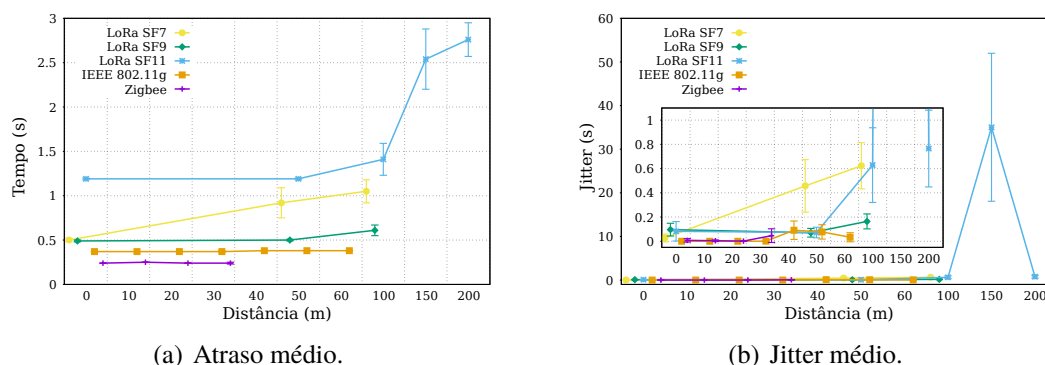


Figura 6. Atraso médio e jitter médio por distância testada.

Os resultados apontam a tecnologia LoRa como a mais indicada para o monitoramento da localização dos visitantes. Seu alcance é significativamente maior, com a obtenção de um sinal com potência ainda útil em distâncias acima do dobro das demais. A perda de pacotes mais baixa, mesmo em distâncias cobertas pelas três tecnologias, também é relevante. Uma vez que a comunicação é oportunística, iniciada pela recepção de *beacons*, alta taxa de perda pode levar à privação de contato dos terminais entre si, numa rede que tende a ser dispersa. A LoRa apresenta uma latência maior que o IEEE 802.11g e o ZigBee. As causas desse atraso são um maior tempo de transmissão gerado pelo espalhamento espectral do sinal CSS e o *duty cycle* mais longo da LoRa, que permite por outro lado a comunicação de um grande número de equipamentos. Neste trabalho não foi analisada a métrica vazão, pois a aplicação demanda baixa taxa de transmissão. Entretanto, vale notar as taxas de transmissão teóricas de cada tecnologia: LoRa 2,148 kbps para SF11; IEEE 802.11g 54 Mbps; e ZigBee 250 kbps. Deve-se também considerar o consumo de energia nominal de cada um dos módulos utilizados. No modo de transmissão, tem-se: LoRa, 120 mA [Dragino Inc.,]; IEEE 802.11g, 140 mA [Ai-Thinker Inc., 2017]; e ZigBee, 45 mA [Digi International Inc., 2009].

6. Conclusão e Trabalhos Futuros

Este trabalho apresentou um serviço baseado em localização para monitoramento da localização de visitantes em parques florestais e investigou o uso de novas tecnologias de

rede sem-fio que possam viabilizá-lo. Foram testadas as tecnologias LoRa, IEEE 802.11g e ZigBee na floresta. Nos experimentos práticos, foram usados transceptores de baixo custo compatíveis com o microcontrolador Arduino, comumente encontrados no mercado. Foram avaliadas as métricas de alcance, potência do sinal recebido, taxa de perda de pacotes, latência e jitter. Além de identificar quão longe a onda eletromagnética consegue se propagar na floresta e ainda ser detectada, este estudo buscou identificar a distância máxima na qual os dados podem ser extraídos corretamente a partir do sinal.

Comparada com as outras tecnologias, a LoRa foi apontada para viabilizar uma DTN *ad-hoc* entre os terminais móveis e totens para troca de dados de localização. Essa escolha se baseia no alcance significativamente maior em enlaces que apresentam perda de pacotes mais baixa, mesmo em distâncias cobertas pelas três tecnologias. Embora a latência seja maior, esse parâmetro não causa grande impacto na aplicação considerada.

Os trabalhos futuros contemplam o efeito das disrupções e da mobilidade. Será avaliada a comunicação em testes longa duração, compreendendo várias horas, para modelar as disrupções que ocorrem mesmo mantendo os transceptores parados. A mobilidade com transceptores que se desloquem até à velocidade de 6Km/h também será analisada. Ainda dentro de trabalhos futuros está a proposta de estudo da RSSI como *fingerprint*, considerando totens que emitam *beacons* com maior potência e maior alcance.

7. Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado pelas agências de fomento CAPES, CNPq, FAPERJ e pelos processos nº 15/24494-8 e nº 15/24490-2, da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP). Os autores estendem seus agradecimentos ao ICMBio, ao PARNASO, especialmente ao seu Coordenador de Pesquisa, Jorge “Julião” Nascimento.

Referências

- AG, U. H. (2011). NEO-6: U-blox 6 GPS modules data sheet. [https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_\(GPS.G6-HW-09005\).pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_(GPS.G6-HW-09005).pdf). Acessado em dezembro/2018.
- Ai-Thinker Inc. (2017). ESP-01/07/12 series modules user's manual version 1.1. https://wiki.ai-thinker.com/_media/esp8266/esp8266_series_modules_user_manual_v1.1.pdf. Acessado em dezembro/2018.
- Augustin, A., Yi, J., Clausen, T. e Townsley, W. M. (2016). A study of LoRa: Long range & low power networks for the Internet of things. *Sensors*, 16(9):1466.
- Bor, M., Vidler, J. e Roedig, U. (2016). LoRa for the Internet of Things. Em *Proceedings of the 2016 International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks, EWSN '16*, p. 361–366, USA. Junction Publishing.
- Cavalcante, A. M. (2007). *Estratégias Computacionais Aplicadas em Técnicas de Traçado de Raios 3D para o Aumento da Eficiência na Caracterização de Canais de Propagação de Redes Sem Fio*. Tese de D.Sc., UFPA/ITEC/PPGEE, Campus Universitário do Guamá, Belém-Pará-Brasil.

- de Queiroz, G. F. C., Ferreira, A. E., Ortiz, F. M., de Souza Couto, R. e Costa, L. H. M. K. (2018). Posicionamento de pontos de acesso sem-fio para segurança de visitantes em parques florestais. Em *XXXVI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)*.
- Digi International Inc. (2009). Product manual v1.xex - 802.15.4 protocol. <https://www.sparkfun.com/datasheets/Wireless/Zigbee/XBee-Datasheet.pdf>. Acessado em dezembro/2018.
- Dragino Inc. Lora shield manual. http://wiki.dragino.com/index.php?title=Lora_Shield. Acessado em dezembro/2018.
- Farahani, S. (2008). *ZigBee wireless networks and transceivers*. Newnes, 1 edição.
- FEMERJ (2015). Metodologia de classificação de trilhas. In: Report FEMERJ: N° STE-2015/01, Federação de Esportes de Montanha do Estado do Rio de Janeiro - FEMERJ.
- Figueiredo, C. M. S., Nakamura, E. F., Ribas, A. D., de Souza, T. R. B. e Barreto, R. S. (2009). Assessing the communication performance of wireless sensor networks in rainforests. Em *IFIP Wireless Days (WD)*, p. 1–6.
- Goursaud, C. e Gorce, J.-M. (2015). Dedicated networks for IoT: PHY/MAC state of the art and challenges. *EAI Endorsed Transactions on Internet of Things*, 1(1):1–11.
- Huang, J.-H., Amjad, S. e Mishra, S. (2005). Cenwits: a sensor-based loosely coupled search and rescue system using witnesses. Em *ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, p. 180–191. ACM.
- Jiang, L., Huang, J.-H., Kamthe, A., Liu, T., Freeman, I., Ledbetter, J., Mishra, S., Han, R. e Cerpa, A. (2009). SenSearch: GPS and witness assisted tracking for delay tolerant sensor networks. Em *International Conference on Ad-Hoc Networks and Wireless*, p. 255–269. Springer.
- Jimenez, A. R., Seco, F., Prieto, C. e Guevara, J. (2009). A comparison of pedestrian dead-reckoning algorithms using a low-cost MEMS IMU. Em *IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing (WISP)*, p. 37–42. IEEE.
- Marais, J. M., Malekian, R. e Abu-Mahfouz, A. M. (2017). LoRa and LoRaWAN testbeds: A review. Em *IEEE AFRICON*, p. 1496–1501. IEEE.
- Raza, U., Kulkarni, P. e Sooriyabandara, M. (2017). Low power wide area networks: An overview. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 19(2):855–873.
- Reynders, B. e Pollin, S. (2016). Chirp spread spectrum as a modulation technique for long range communication. Em *IEEE Symposium on Communications and Vehicular Technologies (SCVT)*, p. 1–5. IEEE.
- Tahat, A., Kaddoum, G., Yousefi, S., Valaee, S. e Gagnon, F. (2016). A look at the recent wireless positioning techniques with a focus on algorithms for moving receivers. *IEEE Access*, 4:6652–6680.
- Vassis, D., Kormentzas, G., Rouskas, A. e Maglogiannis, I. (2005). The IEEE 802.11g standard for high data rate WLANs. *IEEE Network*, 19(3):21–26.