

AVALIAÇÃO DA TECNOLOGIA LORA COMO SOLUÇÃO DE IOT PARA COBERTURA DE COMUNICAÇÃO EM REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

AFONSO J. P. SOARES, ALAN P. PINHEIRO, DIEGO B. PIAU, JULIO C. COELHO, WILLIAN D. CAIXETA

*Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Redes Inteligentes - CeP&DRI, Faculdade de Engenharia Elétrica,
Universidade Federal de Uberlândia - UFU*

Rua Major Jerônimo 566, Centro, Patos de Minas, Minas Gerais, 38700-002

*E-mails: afonso.pujoni@ufu.br, alanpetronio@ufu.br, dbpiaou@ufu.br,
juliocoelho@ufu.br, douglas81988@hotmail.com*

Abstract—Connectivity is the basis of the functioning of the so-called "Internet of Things" and smart grids. In this context LoRa technology appears as a promising alternative for this function. In this work, a preliminary analysis is made of the real potential of this technology to cover urban (and suburban) areas with the objective of evaluating its service as communication technology for some smart grid applications. Experimental evaluations and field tests are done in different scenarios and some QoS data and propagation of communication signals are determined. Preliminary results show that even when operating in open bands subject to many interferences and with limited emission power, the technology is promising because it can cover areas up to 2.6 km in diameter with average transmission success rates of 93,3% for relatively dense urban environments. However, given the latency of the technology, only applications that are tolerant to high latency and low transmission rates, such as AMI, telemetry and telemonitoring, could be potential beneficiaries of this new communication model.

Keywords— Internet of things, advanced metering infrastructure, radio propagation, LoRa, smart grids.

Resumo— Conectividade é a base do funcionamento da chamada "Internet das coisas" e das *smart grids*. Nesse contexto a tecnologia LoRa surge como uma alternativa promissora para essa função. Neste trabalho é feita uma análise preliminar sobre a real potencialidade desta tecnologia para cobertura de áreas urbanas (e suburbanas) com o objetivo de avaliar seu atendimento como tecnologia de comunicação para algumas aplicações de *smart grids*. Avaliações experimentais e testes de campo são feitos em diferentes cenários e alguns dados de QoS e propagação de sinais de comunicação são determinados. Os resultados preliminares obtidos mostram que mesmo operando em bandas abertas sujeitas a muitas interferências e com limitada potência de emissão, a tecnologia se mostra promissora por ser capaz de cobrir áreas de até 2,6 km de diâmetro com taxas de sucesso de transmissão média de 93,3% para ambientes urbanos relativamente densos. Contudo, dada a instabilidade da latência da tecnologia, somente aplicações tolerantes à alta latência e a baixa taxa de transmissão, como AMI, telemedicação e telemonitoramento poderiam ser potenciais beneficiárias deste novo modelo de comunicação.

Palavras-chave— Internet das coisas, estrutura avançada de medição, propagação de sinais, LoRa, smart grids.

1 - Introdução

Segundo Ducrot (2016), a "Internet das coisas" (IoT) é uma coleção de objetos, sensores, atuadores, software, eletrônica embarcada e protocolos de rede que permitem que esses objetos se conectem à internet. Essa estrutura permite que esses objetos se comuniquem trocando informações que são remotamente controladas por diferentes aplicações, o que possibilita uma integração e comunicação direta entre os mundos físico e digital. Nesse contexto, a IoT apresenta-se como uma opção interessante para desenvolver o conceito de "smart grids" (SG - redes elétricas inteligentes). Entre outras coisas, tal idealização vislumbra serviços mais sofisticados de telemedicação, telecontrole, microgeração distribuída, controle, isolamento e tratamento inteligente de falhas, entre outros importantes recursos. Todas estas aplicações têm algo em comum: a necessidade de tecnologias de comunicação que sejam viáveis, em diferentes cenários. Neste sentido, a implementação de SG ou de várias outras tecnologias depende, em grande medida, da disponibilização de tecnologias de comunicação efetivas.

O número de dispositivos conectados ao redor do mundo tende a crescer. Porém, o consumo de energia e a vida das baterias é hoje um grande problema para as tecnologias convencionais. Segundo Centenaro *et al* (2016), uma das questões mais relevantes do paradigma da IoT é a conectividade. Tradicionalmente, as duas principais abordagens empregadas para esta conectividade têm se baseado em (i) tecnologias de múltiplo salto utilizando comunicações de curto alcance, organizadas em uma topologia de rede *mesh*, ou (ii) nas redes de telefonia celular 2G/GSM/GPRS/LTE. Ainda de acordo com os mesmos autores, esses modelos tradicionais estão sendo desafiados pelo surgimento de novas tecnologias com outras características, tais como alto alcance, baixo consumo de energia, alta imunidade às interferências eletromagnéticas, baixa taxa de dados, e uso de faixas de frequências não licenciadas abaixo de 1 GHz. Tais tecnologias têm sido empregadas para criação de comunicações de amplo alcance (redes WAN – *Wide Area Network*) que, em virtude de alguns de seus aspectos característicos, foram referenciadas como tecnologias LPWANs (*Low Power WANs*) ou LR-LPWANs (*Long Range LPWANs*). Dentre essas tecnologias pode-se destacar três principais: Sigfox[®],

LoRa[®] e NB-IoT[®]. A Tabela 1 apresenta um comparativo entre elas.

Entre as três tecnologias IoT de comunicação, a única que possui um modelo de negócios aberto é a LoRa. Qualquer pessoa ou instituição pode criar uma rede pública ou privada com qualquer número de gateways e nós. Em função disto, importantes aplicações já têm sido propostas. Em Dieng (2017), por exemplo, foi implementada uma solução baseada em comunicação LoRa a fim de permitir o rastreamento de gado em ambientes desprovidos de acesso à internet. Tal sistema envia informação de localização dos animais através de colares transmissores, em forma de SMS para habitantes de localidades rurais na África subsaariana. Pham (2016) realizou um estudo da tecnologia LoRa, de forma a desenvolver um sistema de vigilância visual de baixo consumo, baixo custo e longo alcance, utilizando imagens monocromáticas de baixa resolução.

Tabela 1. Comparativo entre tecnologias LPWAN

	Sigfox	LoRa	NB-IoT
Empresa responsável	Sigfox	Semtech	3GPP
Espectro licenciado	Não	Não	Sim
Modulação	UNB/GFSK/BPSK	SS Chirp	OFDMA
Largura de banda do receptor	200 KHz	125/250/500 KHz	200 KHz
Número máximo de mensagens por dia	140	Ilimitado	Ilimitado
Duração da bateria (anos)	mais de 10	mais de 10	mais de 10
Taxa dados (Kbps)	0,1 – 1	0,29 – 5,5	250
Alcance	3-10 Km (urbano)	5 Km (urbano)	Menor que 35 Km (urbano)
	30-50 Km (rural)	15 Km (rural)	Depende da existência de ERBs (rural)
Capacidade (nós/GW)	10.000	1.000.000	200.000

Augustin *et al* (2016) apresentaram uma visão geral da tecnologia LoRa e uma análise aprofundada dos seus componentes funcionais. Realizaram ainda uma avaliação das camadas física e de enlace através de testes de campo e simulações, apresentando propostas de melhoramentos de desempenho. Centenaro *et al* (2016) apresentaram a tecnologia LoRa como uma nova abordagem para aplicações de IoT, discutindo suas vantagens sobre o paradigma estabelecido para a construção de LPWANs, comparando-a principalmente com redes 2G/GSM/GPRS, em termos de eficiência, eficácia e projeto de arquitetura. Foram realizados testes de implantação na cidade de Pádua, Itália, com análise da cobertura do sinal e um plano de cobertura para a cidade de aproximadamente duzentos mil habitantes, assim como a comparação com

o número de concentradores necessários para se obter a mesma cobertura de telefonia celular. A tecnologia LoRa precisaria de menor quantidade de gateways do que de estações rádio base (ERB) para cobrir toda esta cidade.

De toda forma, a grande parte dos trabalhos citados anteriormente apontou, ainda que para diferentes aplicações ou cenários, resultados encorajadores que estimulam ainda mais o estudo desta tecnologia voltada a um cenário de smart grids. Adicionalmente, são poucos os trabalhos que analisaram de maneira prática a propagação de sinais desta tecnologia em ambientes urbanos ou suburbanos em condições realísticas.

Neste contexto, este trabalho tem por objetivo estudar o comportamento da propagação de sinal e QoS (Quality of Service) da tecnologia LoRa em determinados cenários e caracterizar suas limitações e disponibilidade, dentro das condições de uso abordadas por este estudo. Tal caracterização deve ser pertinente para avaliar a viabilidade desta tecnologia como uma opção de comunicação para alguns serviços de smart grids.

2 - Arquitetura LoRa

As famílias de redes voltadas para IoT/LPWAN necessitam de alcances relativamente longos (ordem de quilômetros), tendo ainda a necessidade de apresentar baixo consumo de energia (meses ou até anos com a mesma bateria). Um dilema encontrado nesse tipo de rede é o alcance *versus* a taxa de dados. Para alcançar maior taxa de dados abre-se mão do alcance e vice-versa. A Tabela 2 apresenta algumas características destes aspectos para a tecnologia LoRa.

Tabela 2. Valores especificados para a tecnologia LoRa com canais de largura de banda de 125 kHz.

Fator de espalhamento (SF)	Limite de SNR	Sensibilidade (dBm)	Tempo no ar (ToA) (ms)	Taxa de bits (bps)
7	-7,5	-123	56	5469
8	-10	-126	103	3125
9	-12,5	-129	205	1758
10	-15	-132	371	977
11	-17,5	-135	741	537
12	-20	-137	1483	293

Segundo Bankov (2016), a tecnologia LoRa é baseada em um esquema de modulação adaptada da modulação CSS (CHIRP Spread Spectrum) que foi inicialmente projetada para uso em radares, nos anos 1940 e ainda hoje é largamente utilizada em comunicações militares e que exigem segurança, devido a sua relativa baixa exigência de potência e robustez à degradação do sinal. Segundo (Augustin *et al*, 2016), o desempenho da modulação LoRa é superior aos métodos tradicionais, como FSK, e torna o padrão adequado para transmissões de longo alcance.

Já LoRaWAN é a implementação de camada de protocolo MAC (*Medium Access Control*) da tecnologia LoRa, e vem ganhando muita atenção quanto às possibilidades de suportar aplicações e serviços de IoT.

Uma rede LoRaWAN típica é composta por (i) dispositivos finais (*end-devices* ou *end-nodes*) como sensores ou atuadores, também chamados de “nós”; (ii) concentradores (*gateways*) e (iii) um servidor que coleta e analisa as informações transmitidas pelos dispositivos finais. Esses dispositivos são organizados em uma arquitetura denominada “estrela de estrelas”, que significa que um grupo de *end-devices* esteja conectado a *gateways* através de enlaces de comunicação sem fio baseada em LoRa. Já os *gateways* se conectam a um servidor remoto geralmente empregando uma tecnologia IP (*Internet Protocol*), por meio de acesso (*backhaul*) que pode ser via satélite, telefonia celular, óptico, etc. (Bankov, 2016).

A Figura 1 ilustra esta arquitetura e a topologia “estrela de estrelas” da rede LoRa, onde os dispositivos finais estão conectados via uma comunicação de único salto a um ou mais concentradores que, por sua vez estão conectados a um servidor de rede através de uma conexão padrão de ethernet ou equivalente. Os *end-devices* enviam mensagens que podem ser recebidas por um *gateway* ou mais (Vangelista, 2015).

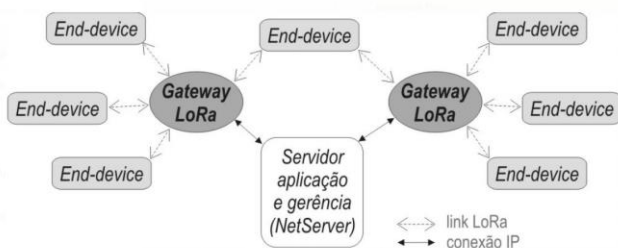


Figura 1. Rede “estrela de estrelas” LoRaWAN.

A fim de atender as diferentes aplicações requeridas em uma rede LoRaWAN, foram definidas diferentes classes de operação para os *end-devices* LoRa. São elas:

- Classe A: trata-se de dispositivos com comunicação bidirecional nos quais uma transmissão (*uplink*) é seguida por duas janelas de recepção (*downlink*).
- Classe B: são dispositivos com comunicação bidirecional que, além das janelas de recepção da classe A, abrem novas janelas de recepção em tempos programados;
- Classe C: formada por dispositivos com comunicação bidirecional com muitas janelas de recepção.

Um típico rádio (ou *transceiver*) LoRa possui cinco parâmetros configuráveis: (i) potência de

transmissão (**TP**), (ii) frequência da portadora (**CF**), (iii) fator de espalhamento (**SF**), (iv) Largura de banda (**BW**) e (v) taxa de codificação (**CR**). A combinação desses parâmetros é que determina o consumo de energia, o alcance da transmissão e a resistência ao ruído. Alguns destes parâmetros são tratados na sequência.

- Potência de transmissão (*Transmission Power*): ajustável de 2 dBm (1,5mW) até 14 dBm (25mW) ou 20 dBm (100mW), dependendo do modelo do rádio;
- Frequência da portadora (*Carrier Frequency*): frequência central que pode ser programada de 137 MHz a 1020 MHz ou de 860 MHz a 1020 MHz, também dependendo do modelo;
- Fator de espalhamento (*Spreading Factor*): é a razão entre a taxa de símbolos e a taxa de chips. Um aumento no SF produz um aumento na SNR (*Signal-to-Noise Ratio*), promovendo, assim, um aumento na sensibilidade e no alcance. Os valores para esse parâmetro são $SF \in \{7, \dots, 12\}$;
- Largura de banda (*Bandwidth*): é a largura de frequências da banda de transmissão. Uma maior BW produz uma maior taxa de dados, mas diminui a sensibilidade. LoRa utiliza três diferentes larguras de banda: 125 kHz, 250 kHz e 500 kHz;
- Taxa de codificação (*Coding Rate*): é a taxa de correção de erros do tipo FEC (*Forward Error Correction*). Quanto maior a CR, maior a proteção, porém com um aumento no ToA (*Time on Air*).

3 - Metodologia

3.1 - Materiais e métodos

Os experimentos com a comunicação LoRa foram realizados utilizando-se dois módulos de comunicação I-NUCLEO-LRWAN1 (STMicroelectronics® e US1®). Esses módulos são de baixo consumo de energia e trabalham em classe A ou C sendo programados via comandos AT. Para avaliar somente os sinais de camada física dos rádios LoRa, todos os experimentos basearam-se apenas nos parâmetros da camada física (PHY) LoRa. A configuração dos módulos foi realizada a partir de dois microcontroladores: um Arduino® Uno® e um nodeMCU®, que enviam comandos AT específicos da plataforma a fim de selecionar os parâmetros desejados para os experimentos, como por exemplo, potência de transmissão, frequência, número de pacotes, números de *bytes* (*payload*), além do SF, CR e BW. Todo o hardware foi acondicionado em caixas herméticas conforme ilustração da Figura 2.

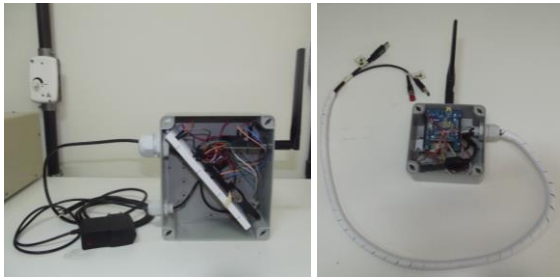


Figura 2. Esquerda: transmissor, direita: receptor.

Os testes foram conduzidos na cidade de Patos de Minas (MG) e compreenderam três diferentes métodos: (i) teste de propagação em ambiente urbano; (ii) suburbano e (iii) disponibilidade de enlace. Procurou-se aproximar ao máximo das recomendações da RFC 2544, sendo analisados os parâmetros: taxa de perda de pacotes (PLR), taxa de erros em pacotes (PER), taxa de *bits* com erro (BER), indicação de intensidade do sinal (RSSI) e relação sinal-ruído (SNR) médios. Foram utilizados parâmetros constantes para o *payload* (10 bytes), BW (125 kHz), CR (4/5), potência de transmissão (20 dBm) e conteúdo do pacote (0xFFFFFFFFFFFFFFFF), tendo sido alterado o SF durante os experimentos para 9 e 12 em alguns dos experimentos. Os itens seguintes descrevem resumidamente estas medidas e métricas de avaliação empregadas aqui.

- PLR (*Packet Lost Rate*): percentual de pacotes perdidos em relação ao total transmitido;
- PER (*Packet Error Rate*): percentual de pacotes recebidos com erro em relação ao número total de pacotes recebidos;
- SNR (*Signal-to-Noise Ratio*): calculado como a média aritmética de todas as leituras desse parâmetro realizadas;
- RSSI (*Received Signal Strength Indication*): calculado como a média aritmética de todas as leituras desse parâmetro realizadas;
- *Bits* errados: o arquivo .txt gerado com os dados coletados nos pontos é aberto pela aplicação desenvolvida e a *string* lida é analisada quanto à troca de *bits*;
- BER (*Bit Error Rate*): uma vez que são transmitidos 10 bytes de carga útil por pacote, tem-se 80 *bits* e, assim, o total de *bits* recebidos por pacote será o produto do número de pacotes recebidos por esse valor.

Os valores de RSSI, SNR e número de pacotes recebidos com sucesso foram obtidos com o comando AT+STAT que resgata estes valores estimados pelo próprio *transceiver* LoRa, armazenados em um registrador específico. Esses valores foram salvos, em formato de texto simples, pelo aplicativo, no cartão SD e posteriormente abertos em um PC e analisados. As coordenadas e distâncias geográficas foram avaliadas pelo aplicativo Google Earth®. A análise dos valores de RSSI, SNR e distância permite avaliar

a propagação do sinal, enquanto os parâmetros PLR, PER, BER e os testes de disponibilidade, permitem avaliar o QoS da tecnologia LoRa.

3.2 - Teste 1: propagação em ambiente urbano

Neste teste o transmissor foi instalado externamente no terceiro andar de um prédio, a seis metros de altura, sendo delimitado um círculo de 730 metros de raio, com centro no transmissor. Foram definidos oito pontos no perímetro desse círculo, denominados de A a H. O nó receptor foi levado até esses pontos e foram transmitidos 311 pacotes por ponto, sendo então analisada a propagação de uma forma radial, em uma distribuição geográfica urbana central, densamente urbanizada. Foi utilizado o SF 12 para este teste.

As Figuras 3 e 4 apresentam a posição dos pontos no perímetro do círculo. O transmissor está localizado a uma altitude similar aos pontos A e E.

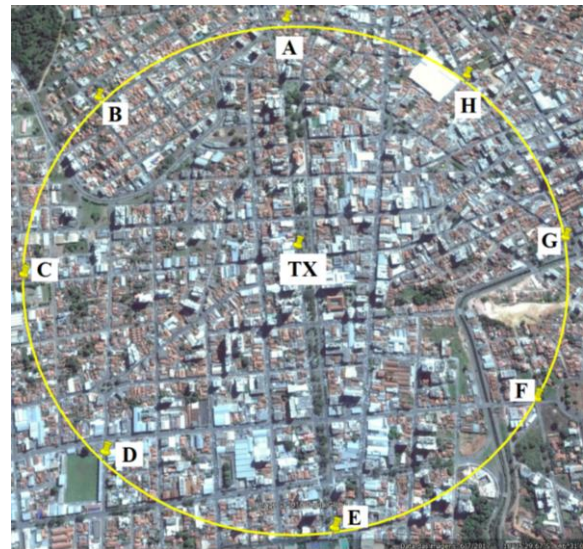


Figura 3. Pontos A a H para o teste de propagação radial.

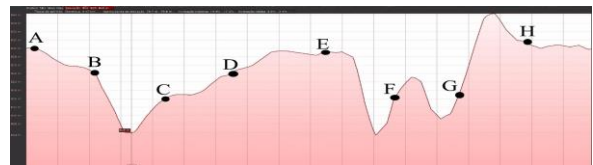


Figura 4. Perfil de elevação geográfica para os pontos analisados.

Ainda dentro deste teste 1, foi feito um segundo *setup* de teste cujo objetivo era refinar a análise da propagação. Para isto, foi escolhida uma avenida que representa, em alguma medida, o diâmetro vertical do círculo da Figura 3. A Figura 5 detalha este percurso de teste na avenida de 1.300 metros que foi dividido em 26 pontos espaçados igualmente de ambos os lados. Isto totaliza 52 pontos de medições. A posição do transmissor foi mantida a mesma da Figura 3. Para cada ponto da figura foi transmitida a mesma quantidade de pacotes do teste anterior utilizando-se SF 9 e SF 12.

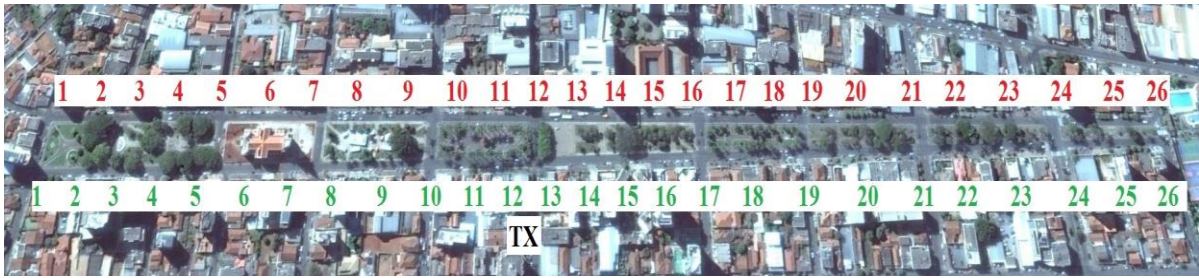


Figura 5. Os cinquenta e dois pontos de medições do diâmetro da área circular do teste 1. Porção inferior (verde) e superior (vermelho)

3.3 - Teste 2: propagação em ambiente suburbano

Para o teste em ambiente suburbano foram mantidos os mesmos parâmetros dos testes anteriores e utilizado apenas SF 12. O ponto de instalação do transmissor estava 3,2 Km do receptor e a 5 m de altura em relação ao solo. Não havia visada direta entre os o par receptor-transmissor. A Figura 6 apresenta uma visão de satélite dos locais escolhidos para o teste. Observe que a área suburbana é envolta por uma área rural por onde o sinal também propaga.

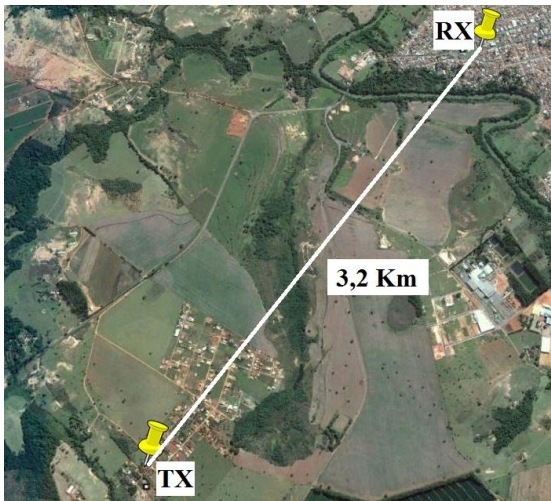


Figura 6. Teste de alcance rural/suburbano.

3.4 Teste 3: disponibilidade da comunicação

O terceiro teste diz respeito à disponibilidade do enlace de comunicação e, diferentemente dos testes anterior, tem por objetivo avaliar a robustez da comunicação tomando por base a disponibilidade de transmissão e/ou recepção em um período de tempo, em função das variações ambientais e outros fatores que poderiam inviabilizar a comunicação.

O transmissor foi instalado em um segundo prédio, localizado a 877 metros em linha reta do prédio utilizado nos testes anteriores, a 14 metros acima do solo. Ambos dispositivos (transmissor e receptor) estavam internos (havia pelo menos uma barreira interna maciça na edificação). Embora a distância entre os prédios seja relativamente curta, 877 metros, não existe visada direta, pois ambos os prédios estão localizados em uma região central com edifícios de

maior elevação, os quais inviabilizavam esta visada. Estes pontos são exibidos na Figura 7.



Figura 7. Posições do transmissor e receptor durante o teste de disponibilidade.

O teste teve duração de 36 horas, com as mesmas configurações dos testes anteriores e SF 12, com um pacote sendo enviado a cada segundo. Foi realizada a análise dos pacotes recebidos por hora e calculada a PLR.

Uma segunda configuração deste experimento de teste 3 para avaliar disponibilidade, envolveu um transmissor fixo no mesmo ponto da configuração anterior. A diferença está em um *end-device* móvel, instalado em um veículo. Foram realizadas medições em três pontos de uma mesma rua, em linha reta e em aclave em relação ao transmissor, localizada em um ambiente menos densamente urbanizado (apenas casas e construções térreas). A Figura 8 apresenta o perfil geográfico entre os pontos do TX e o ponto do receptor, mostrando que existe um desnível de 60 m. A Figura 9 apresenta uma visão de satélite dos pontos, com o percurso em linha reta para o ponto mais distante, denominado neste estudo de ponto MF3.



Figura 8. Perfil de elevação geográfico.

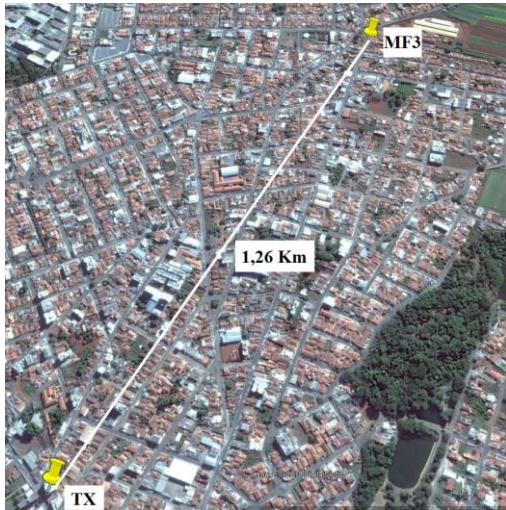


Figura 9. Distância entre o transmissor e o ponto mais distante no segundo teste de disponibilidade.

4 - Resultados

4.1 - Teste 1: propagação em ambiente urbano

Os resultados deste teste estão representados na Figura 10. Conforme descrito na seção 3.2 e ilustrado na Figura 3, os pontos que apresentaram o segundo pior resultado em relação ao recebimento de pacotes (pontos F e G) são os que têm menor altitude em relação ao transmissor. O ponto A, apesar de se encontrar praticamente no mesmo nível do transmissor e a apenas 200 metros do ponto 1 (verde), no qual ocorreram recepções com sucesso, apresentou o pior resultado.

Uma análise do local revelou a existência de um prédio de relevante porte entre esses pontos, o que pode explicar os valores obtidos.

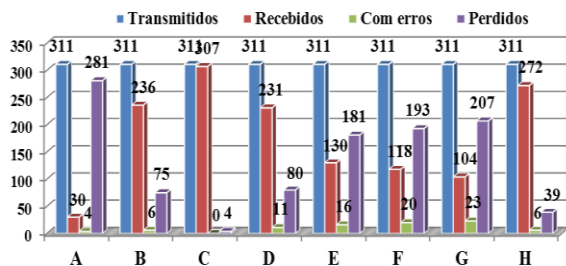


Figura 10. Resultados do teste de propagação em ambiente urbano.

A Figura 11 exibe os valores de RSSI e SNR médios para os pacotes recebidos. Observando-se os valores da Tabela 2, nota-se que, para o SF 12, os valores em alguns pontos estão próximos ao limite inferior das especificações da tecnologia, para a distância escolhida (730 m). Este fato pode estar relacionado à posição do transmissor em relação ao solo, que foi relativamente baixa, à densidade urbana e ao relevo do local dos testes.

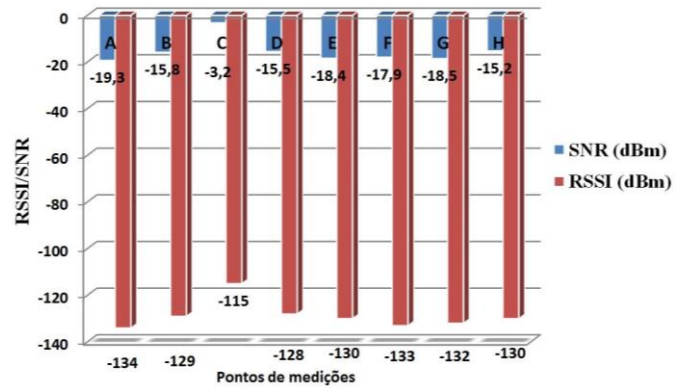
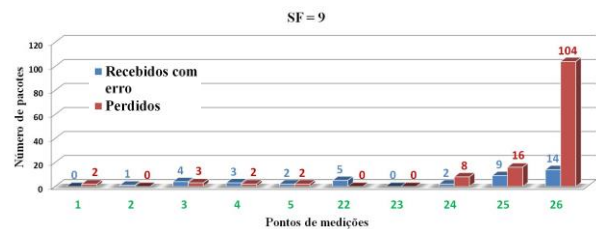
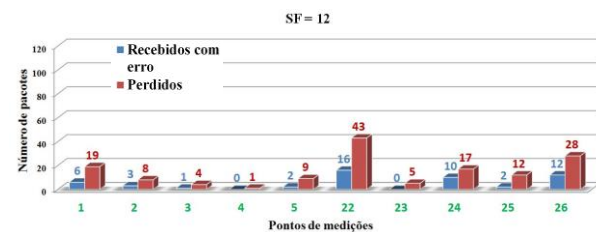


Figura 11. Valores de RSSI e SNR para os pontos A a H.

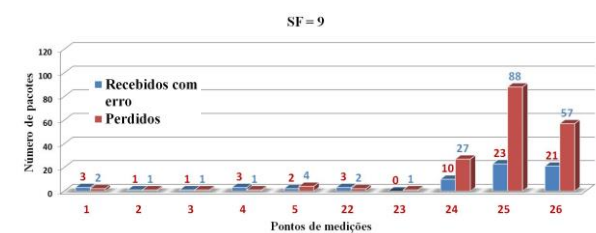
Para o teste realizado na Figura 5 foram elaborados os gráficos das figuras 12a-12d, que comparam o desempenho da tecnologia com a utilização de diferentes fatores de espalhamento, 9 e 12, para os pontos extremos da praça. Observa-se que a distância dos pontos 1 (verde e vermelho) até o transmissor é de 540 m, enquanto a distância para os pontos 26 (verde e vermelho), é de 730 m. Para os pontos 22 a 26, os mais distantes do transmissor, quando utilizado o fator de espalhamento 12, o número de pacotes recebidos com erro e de pacotes perdidos, diminui consideravelmente, tanto para o lado verde quanto vermelho.



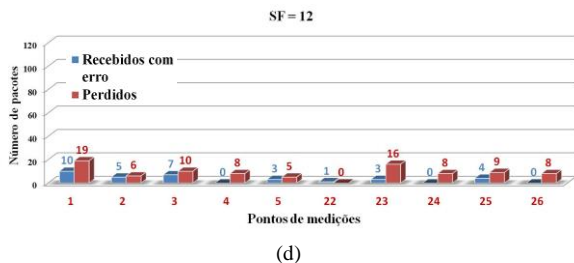
(a)



(b)



(c)



(d)
 Figura 12. Comparativo entre os SF 9 e 12 para os 10 pontos extremos do diâmetro da área circular. (a) e (b) Porção inferior e (c) e (d) porção superior.

Analisando-se a Figura 13, que apresenta a taxa de erros em *bits* (BER), para os 52 pontos, usando-se o mesmo SF 9, nota-se que a taxa de erros de bits apenas varia de modo perceptível para os pontos 3 a 5 e 22 a 25. Porém, em nenhum ponto ultrapassa o valor de 1,2%, o que pode ser considerado satisfatório para aplicações na área de telemetria e AMI (*Advanced Metering Infrastructure*) para *smart grids*. Vale destacar que os testes nestes experimentos (e suas repetições) foram conduzidos em diferentes dias e turnos e por isto avaliados em diferentes condições atmosféricas.

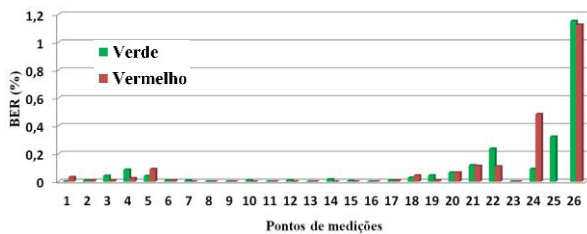


Figura 13. Comparativo entre a taxa de erros em *bits* (BER) para os 26 pontos da praça.

4.2 - Teste 2: ambiente suburbano

Foram transmitidos 311 pacotes e recebidos 301, dos quais apenas dois apresentaram troca de bits e 10 foram perdidos. A taxa de perdas de pacotes foi de 3,22 % e a taxa de erros de bits de 0,087 %, (cerca de 21 bits trocados dos 24.080 recebidos). A taxa de pacotes com erros foi de 0,72 %, como apresentado na Figura 14.

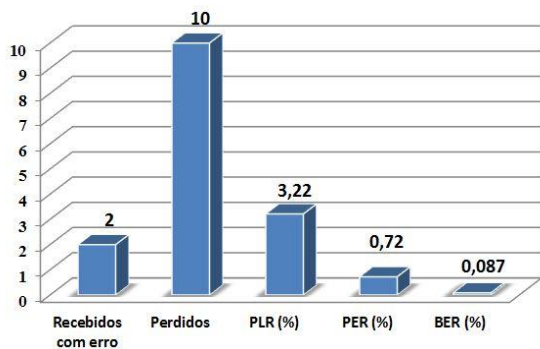


Figura 14. Resultados do teste em ambiente rural/suburbano.

Tal desempenho neste cenário suburbano (com algumas características de ambientes rurais) pode ser forte encorajador para aplicações relacionadas às

telemedições, especialmente em áreas mais afastadas como a aqui tratada. Se levar em conta também a dificuldade das concessionárias de energia elétrica em obter dados de qualidade de energia e fornecimento em áreas desta natureza, esta também pode ser uma importante aplicação (telemonitoramento) da tecnologia LoRa dentro deste contexto.

4.3 - Teste 3: disponibilidade da comunicação

Para o teste de disponibilidade, o melhor valor para a taxa de entrega de pacotes (*packet delivery ratio* - PDR) foi de 94,7%, e o pior valor foi de 91,9%. O valor médio foi de 93,3 %, como apresentado no gráfico da Figura 15.

Já para o outro teste de disponibilidade, ilustrado na Figura 8, no qual os pontos distam entre si 1,26 Km, dos 311 dados transmitidos foram recebidos 301. Assim, houve também uma perda de 10 pacotes. Destes 301, 2 pacotes foram recebidos com erros, resultando em uma taxa de erro de pacotes (PER) de 0,72 %. A SNR média foi de -15 e o RSSI médio igual a -127 dBm. Todos os pacotes recebidos apresentaram-se íntegros quanto à troca de *bits*, resultando em uma taxa de erros de *bits* (BER) nula.

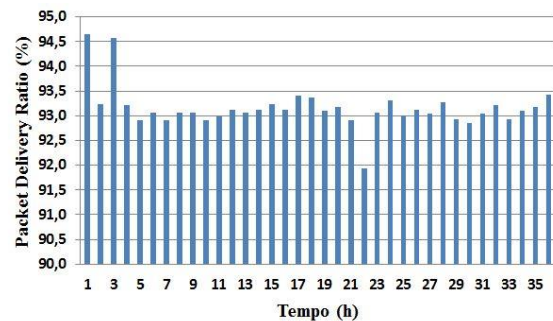


Figura 15. Teste de disponibilidade.

5 - Discussão

A diversidade de testes feitos e em condições variadas, em sua maior parte mostrou que a tecnologia LoRa é capaz de levar, em alguma medida, um sinal de comunicação usando uma baixa potência (20 dBm ou 100mW) em uma banda espectral aberta (e geralmente “suja”). Se considerarmos as classes de operação (A, B ou C) da tecnologia, nota-se que elas podem produzir uma latência alta no tráfego de dados. Esta latência pode ser maior ainda nos países onde as bandas abertas operam por ciclo de trabalho. Por estes motivos, este trabalho não buscou quantizar a latência por entender que se trata de uma variável sujeita a muitos fatores (e, conseqüentemente, a grandes alternâncias). Em virtude da dificuldade de se estabelecer procedimentos realísticos para definição de uma latência confiável em LoRa, sua aplicação para serviços de *smart grids* como teleproteção e telecontrole desde já são desencorajados se levarmos

em conta estas circunstâncias. Adicionalmente, há de se considerar as limitações de banda impostas pela própria tecnologia conforme revelou a Tabela 2.

Por outro lado, os resultados apresentaram boa disponibilidade e pouca variabilidade do enlace LoRa se considerarmos que a melhor e pior PDR (no teste 3, principalmente) variou menos de 2% (94,7 - 91,9) em um intervalo de 36 horas completos. Isto, mesmo com variações de condições atmosféricas e em área com média concentração urbanística (várias construções ao redor) e vários prédios entre os dois rádios. De igual maneira, o teste 1 apontou para resultados similares. Isto aponta para uma ótima taxa de disponibilidade para os serviços de telemedicação, telemonitoramento e AMI como um todo, que podem se sujeitar a uma tecnologia com alta latência.

Durantes os testes não houve preocupação em avaliar a taxa de transferência efetiva devido ao *setup* técnico que não contou com um equipamento dedicado a esta finalidade (como um *framescope*, por exemplo). Vale também destacar que a intenção deste estudo é quantizar algumas métricas de propagação e QoS para LoRa a fim de avaliar a possibilidade de emprego desta tecnologia em alguns serviços de *smart grids*. Não é foco comparar o desempenho da LoRa com outras tecnologias IoT por entender que cada uma delas tem um perfil e modelo de negócio diferente. Por fim, mesmo havendo uma especificação da tecnologia, testes em campo (como os aqui feitos) são fundamentais para verificação das condições de atendimento da tecnologia em relação as aplicações pretendidas.

6 - Conclusão

Os resultados apontam que a tecnologia LoRa, mesmo sem uso de protocolos de camada superior, como o LoRaWAN, tem grande potencial para provimento de conectividade em ambientes urbanos e suburbanos para aplicações como telemonitoramento, telemedicação e recursos de AMI, desde que estes sejam tolerantes à falha e a altas latências (ou serviços não críticos). Ainda, mesmo operando realisticamente em banda aberta de 915MHz (sujeita a várias interferências), é possível cobrir áreas urbanas densamente povoadas por centenas de metros (ou alguns quilômetros) empregando um rádio de apenas 100mW.

Agradecimentos

Os autores agradecem a STMicroelectronics por seu Programa Universitário. Esta pesquisa faz parte do programa de P&D ANEEL em parceria com a CEB.

Referências Bibliográficas

- Augustin, A., Yi, J., Clausen, T. and Townsley, W. M (2016). A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things, *Sensors*, 16,1466.
- Bankov, D., Khorov, E. and Lyakhov, A (2016). On the Limits of LoRaWAN Channel Access. Engineering and Telecommunication (EnT), 2016 International Conference on, 2016. IEEE, 10-14.
- Centenaro, M., Vangelista, L., Zanella, A. and Zorzi, M (2016). Long-Range Communication in Unlicensed Bands: The Rising Stars in the IoT and Smart Cities Scenarios. *IEEE Wireless Communications*, 23, 60-67.
- Dieng, O., Diop, B., Thiare, O. and Pham, C (2017). A Study on IoT Solutions for Preventing Cattle Rustling in African Context. . In Proceedings of the Second International Conference on Internet of things, Data and Cloud Computing (ICC '17). ACM, New York, NY, USA, Article 153, 11 pages. DOI: <https://doi.org/10.1145/3018896.3036396>
- Ducrot, N., Ray, D. and Saadani, A (2016). LoRa Device Developer Guide, Orange. Available from: <https://partner.orange.com/wp-content/uploads/2017/11/LoRa-Device-Developer-Guide-Orange.pdf> [30 March 2018].
- Pham, C. Low-cost, low-power and long-range image sensor for visual surveillance. In Proceedings of the 2nd Workshop on Experiences in the Design and Implementation of Smart Objects, 2016. ACM, 35-40.
- Vangelista, L. Zanella, A. and Zorzi, M. Long-Range IoT Technologies: The Dawn of LoRa. Future Access Enablers of Ubiquitous and Intelligent Infrastructures, 2015. Springer, 51-58.