# Projeto e Implantação de Rede de Internet das Coisas em Regiões Montanhosas

Leonardo Vidigal Meireles, Luis Guilherme Uzeda Garcia e Alan Kardek Rêgo Segundo

***Resumo*—Este artigo apresenta a validação de uma metodologia de desenvolvimento de projetos de radiofrequência para aplicação em um sistema de internet das coisas voltado ao monitoramento e alerta de emergência em áreas de risco. Os resultados medidos em campo comprovam que as novas tecnologias de longo alcance e baixo consumo de energia possuem grande potencial na solução de diversos problemas da indústria e das cidades, podendo incluir o gerenciamento de áreas de risco nesse portfólio.**

***Palavras-Chave—sistemas de alerta de emergência, IoT, LPWAN, propagação de RF, LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT, Ingenu.***

*Abstract*—**This article presents a validity of a radio project development methodology with application in an internet of things system focused on monitoring and emergency alert in hazardous areas. The results measured in the field, prove that the new long range and low power technologies have great potential in the solution of several problems of industry and cities, and may include the management of hazardous areas in this portfolio.**

***Keywords—emergency alert systems, IoT, LPWAN, RF propagation, LoRAWAN, Sigfox, NB-IoT, Ingenu.***

## I. INTRODUÇÃO

Atualmente existem milhões de pessoas em todo o mundo trabalhando ou vivendo em áreas de risco. Segundo a ONG International Rivers, 10% da população mundial é afetada por algum tipo de barragem [1]. Segundo o relatório Atlas Extreme, em 20011 ocorreram mais de 900 mortes devido a inundações no Brasil, além disso, as perdas econômicas durante o período de 1970 a 2012, causadas por catástrofes climáticas, chegaram a 31,4 bilhões de dólares [2]. Diversos são os tipos de áreas de risco, sendo originadas pelo próprio homem por ocupação desordenada ou atividades perigosas nas indústrias como mineração, metalurgia, petroquímica, construção civil entre outras, ou por fenômenos naturais como chuvas, tornados, furações, etc; que provocam enchentes, deslizamentos, alagamentos, entre outros [3].

Motivado pelos dados apresentados, este trabalho possui o objetivo de validar a utilização das novas tecnologias de internet das coisas (*Internet of Things* - IoT), para monitoramento e alerta de áreas de risco. Contudo, por meio do desenvolvimento de um projeto de uma rede sem fio de baixo consumo e longo alcance (*Low Power Wide Area Network* – LPWAN), pretende-se possibilitar a comunicação segura entre um sistema de gerenciamento central e dispositivos capazes de emitir e receber alertas, bem como de realizar medições de variáveis críticas dessas áreas. Para isso, é necessário um estudo das tecnologias disponíveis no mercado e a comparação entre elas por meio de requisitos definidos para a rede.

Um estudo de propagação de radiofrequência foi realizado na região urbana da cidade de Ouro Preto – MG, sendo o local escolhido para um projeto piloto, a fim de avaliar a implantação de uma rede LPWAN. A cidade foi escolhida, por possuir grande parte de seu território definido como de risco médio, alto ou muito alto, em relação a desmoronamento de encostas, além de estar em um vale à jusante da barragem Marzagão, utilizada para depósito de rejeitos do beneficiamento do minério bauxita [4][5].

## II. REDES LPWAN

As redes LPWAN possuem como principais características o longo alcance e o baixo consumo de energia, e foram criadas para atender às aplicações de comunicação máquina a máquina (*Machine-to-Machine* – M2M) e IoT. Atualmente, existem diversas iniciativas mundiais focadas no desenvolvimento e implantação dessas redes. Além disso, muito tem se falado que nos próximos anos os dispositivos conectados ultrapassarão os bilhões, seja em aplicações industriais ou do dia a dia das pessoas [6].

As novas tecnologias vêm para preencher uma lacuna deixada por aquelas de baixo alcance como o Wi-Fi e o Bluetooth, de médio alcance como o Zigbee, e de alto consumo de energia como as de telefonia celular. Mesmo que atualmente existam aplicações voltadas para IoT e M2M usando essas tecnologias, suas limitações impedem uma série de aplicações que, com a chegada das redes LPWAN, podem se tornar realidade [6], [7]. As tecnologias LPWAN mais comuns atualmente, principalmente na Europa e EUA, são: Sigfox, LoRaWAN (Long Range Wide Area Network), NB-IoT (Narrow Band IoT) e RPMA (*Random Phase Multiple Access)* [8], sendo elas detalhadas a seguir.

### *A. LoRaWAN*

O LoRaWAN é um protocolo de comunicação desenvolvido pela LoRa-Alliance. O protocolo foi criado em cima da camada física LoRa (Long Range), tecnologia baseada na técnica de espalhamento espectral (C*hirp Spread Spectrum* – CSS). A tecnologia está no mercado por meio do licenciamento de uma patente da empresa Semtech, uma das fundadoras da LoRa-Alliance [9], [10]. Ela possui as características principais de uma LPWAN com algumas especiais, sendo:

- frequências de operação de 433 MHz e 863 MHz na Europa e 915 MHz nos Estados Unidos [10];
- segurança com criptografia baseada no algoritmo AES-128 bits [9], [10];
- *bandwidth* configurável de 125 KHz, 250 KHz ou 500 KHz [9], [10];

Leonardo Vidigal Meireles, Luis Guilherme Uzeda Garcia, Alan Kardek Rêgo Segundo, PROFICAM, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e Instituto Tecnológico Vale (ITV), Ouro Preto – MG, Brasil, E-mails: leopiranga@hotmail.com, luis.uzeda@itv.org, alankardek@ufop.edu.br.

• uso de tecnologia de taxa de dados adaptativa (*Adaptative Data Rate* - ADR), que pode gerenciar a taxa de dados e a potência de saída de RF (Rádio Frequência) em cada *end-device* [9], [10].

A rede LoRaWAN foi desenvolvida para conexão de dispositivos, classificados em três classes: A, B e C, sendo:

• classe A – é um dispositivo de comunicação bidirecional, focado em economia de bateria. Após cada slot de *uplink* abrem-se janelas de *downlink*. Caso ocorra uma mensagem do servidor neste intervalo, ele aguardará a próxima janela para enviá-la. Os slots são definidos por um tempo fixo mais um aleatório definido por um protocolo de aleatoriedade Aloha [9], [10];

• classe B – é semelhantes à classe A, mas tem a capacidade de abrir janelas de comunicação em intervalos de tempo pré-determinados. Para isso, é necessária a sincronização entre o gateway e o dispositivo, que ocorre por meio de um *beacon*. [9], [10];

• classe C – também é bidirecional, apto a receber mensagens todo o tempo, com exceção de quando estiver transmitindo. Por consequência, consome mais energia [9], [10].

### *B. Sigfox*

A rede Sigfox possui uma arquitetura muito simples, o que reduz o consumo de energia, uma vez que as tarefas complexas são executadas na camada de rede. Esta característica é um trunfo importante da tecnologia Sigfox, pois possibilita que os dispositivos finais sejam extremamente simples, o que reduz muito o custo, além de possibilitar uma vida útil longa da bateria [11]. Suas principais características são:

• utilização de canais de banda estreita (*Ultra Narrow Band* – UNB), com largura de banda de 100 Hz nas frequências de 433 MHz e 868 MHz no padrão europeu; e de 600 Hz nas frequências de 915 MHz no padrão americano [11];

• tráfego de pequenas mensagens, ou seja, cada dispositivo pode enviar até 140 mensagens por dia, sendo que cada uma delas tem o tamanho de até 12 bytes, o que melhora muito a imunidade a interferências [11];

• utiliza a modulação D-BPSK (*Differential Binary Phase Shift Keying*), que possui fácil implementação, baixo custo de componentes de rádio e alta sensibilidade das estações rádio base [11];

• possui sensibilidade das ERB (Estações Rádio Base) de -142 dBm e -134 dBm, para as taxas de dados de 100 bps e 600 bps respectivamente, o que possibilita longo alcance aos dispositivos da rede [11];

• acesso aleatório ao canal, sendo que cada dispositivo envia uma mensagem em uma frequência aleatória seguida de duas réplicas. Isso aumenta a qualidade do serviço e a imunidade a interferências, uma vez que a mesma mensagem utiliza vários caminhos [11];

• recepção cooperativa, em que as mensagens enviadas são recebidas pelas ERB próximas, no geral pelo menos três, isso faz aumentar consideravelmente a qualidade do serviço [11].

### *C. NB-IoT*

O NB-IoT é uma tecnologia de IoT padronizada pelo *Release*-13 de 2016 do 3GPP, e pertence à categoria de redes UNB. Ele é compatível com as tecnologias GSM (Global System for Mobile Communications), GPRS (General Packet Radio Service) e LTE (Long Term Evolution), sendo esta suportada apenas com a atualização de software em cima da infraestrutura existente [12]. Ela utiliza as redes de telefonia móvel como meio físico, seja por meio das portadoras GSM, em modo *stand alone*; das portadoras não utilizadas de *guard band;* ou por meio das portadoras LTE, em modo *in-band* [13]–[15].

Essa característica do NB-IoT é uma de suas grandes vantagens, justamente por utilizar as "sobras" de espectro das portadoras de telefonia celular para modular o sinal, o que já lhe garante uma imensa infraestrutura construída [13]. Por outro lado, essa mesma característica lhe confere uma desvantagem, pois como o espectro de telefonia móvel é licenciado, já existe custo adicional embutido na solução.

O NB-IoT tem um orçamento de enlace (*link budget*) de 164 dB, podendo atender até 52.500 dispositivos por célula. Ele utiliza modulação FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) para *uplink* e OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) para *downlink*. A taxa de dados é limitada a 250 kbps para a comunicação de *downlink* de múltiplos tons e a 20 kbps para a comunicação *uplink* de tom único. Em relação à bateria, para uma perda de acoplamento de até 164 dB, um rádio baseado em NB-IoT pode atingir uma duração de até 10 anos, transmitindo em média 200 bytes de dados por dia, sendo projetado para enviar sinais de alarme em até 10s – recomendado para aplicações insensíveis à latência [13]–[15]. Outras características são:

• suporte a canais de banda estreita de 180 kHz [13]–[15];

• suporte a dois modos para *uplink* – um com transmissão de tons simples e espaçamento de 15 kHz e/ou 3,75 kHz, e outro com transmissões de tons múltiplos e espaçamento de 15 kHz [13]–[15];

• utiliza modulação BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) [13]–[15];

• os dispositivos são simples, apresentando redução do tamanho dos blocos de transporte, apenas uma redundância no *downlink* e transmissão *single-stream,* além de apenas uma antena e decodificador simplificado, baixa taxa de amostragem, e divisão de frequência FDD (*Frequency-Division Duplex*) [13]–[15].

### *D. RPMA (INGENU)*

O RPMA utiliza a banda ISM (*Industrial Sientific and Medical*) de 2,4 GHz que não possui limites de *duty cycle* nos EUA e na Europa [6]. Ele utiliza para *uplink* um esquema de acesso físico patenteado, o DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*). Trata-se de uma variação do CDMA (*Code Division Multiple Access*), diferenciando-se por permitir que múltiplos transmissores compartilhem um mesmo intervalo de tempo. Para isso, o RPMA aumenta a duração do intervalo de tempo do CDMA tradicional e, em seguida, libera o acesso ao canal dentro desse intervalo adicionando um atraso aleatório para cada transmissor. Essa técnica possibilita a redução da sobreposição de sinal entre os transmissores, uma vez que eles não acessam o canal ao mesmo tempo, além de aumentar o SIR (*Signal Interferncee Ratio*) para cada link [16].

No RPMA, as ERB utilizam múltiplos demultiplexadores para decodificar os sinais que chegam de diferentes fontes e em diferentes momentos dentro de um mesmo intervalo de tempo. A Ingenu fornece comunicação bidirecional, embora com ligeira assimetria. Para *downlink* as ERB espalham os sinais

usando o CDMA. Além disso, os dispositivos finais podem ajustar a potência de transmissão para alcançar a ERB mais próxima e limitar a interferência em dispositivos vizinhos. A Ingenu lidera os esforços para padronizar as especificações da camada física sob o padrão IEEE 802.15.4k, uma vez que a tecnologia é compatível com as especificações [6]. As principais características da tecnologia RPMA são detalhadas a seguir:

• cobertura – altos ganhos de antena e a sensibilidade dos receptores de até -142 dBm, contribuem para um *link budget* de 177 dB [16];

• capacidade de tráfego: o RPMA consegue receber até 19.000 bps / MHz [16];

• escalabilidade – o RPMA é capaz de escalar dezenas de bilhões de dispositivos usando o controle de potência de transmissão [16];

• imunidade a interferências – por meio da técnica DSSS e da rejeição de co-canal, o RPMA é capaz de descartar o sinal de interferência que geralmente possui mais potência [16];

• segurança criptográfica – o RPMA utiliza criptografia de 128 bits com autenticação bidirecional [16];

• espectro – o RPMA utiliza apenas 1 MHz de largura de canal dos 80 MHz disponíveis na banda ISM de 2,4 GHz. Além disso, com buffer de 1 MHz em cada lado de um canal, existem um total de 40 canais a escolher [16].

## III. COMPARAÇÃO ENTRE AS TECNOLOGIAS

Em resumo, o método utilizado consiste em: (i) definição dos requisitos do sistema; (ii) realização de estudo de possíveis tecnologias LPWAN compatíveis; (iii) comparação entre as tecnologias (com base nos requisitos definidos); (iv) seleção da tecnologia mais indicada; (v) simulação de propagação de RF na área de interesse; (vi) implantação do projeto piloto; e (vii) comparação dos resultados de cobertura de sinal em campo com as simulações realizadas.

Para comparação entre as tecnologias foram definidos os requisitos do projeto conforme a Tabela I.

TABELA I. REQUISITOS DO PROJETO

| Requisito | Justificativa |
|---|---|
| *Link Budget* | Quanto maior o *link budget*, melhor será o alcance. |
| Consumo de Energia | Quanto menor o consumo de energia, maior a autonomia das baterias dos dispositivos. |
| Frequência | Uso de frequência ISM diminuiu os custos. |
| Escalabilidade | Quanto maior o número de dispositivos por ERB, menor o custo de implantação. |
| Sensibilidade | Quanto maior sensibilidade dos receptores, maior o *link budget.* |
| Criptografia | Uso de criptografia para segurança dos dados. |
| Interface de Dados | Compatibilidade com as interfaces UART, SPI, I2C para integração com microcontroladores. |
| Modelo de Negócio | Possibilidade de construção de infraestrutura privada sem necessidade de contratação de serviço de rede. |

Baseado nos requisitos do sistema foi construída a Tabela II, que apresenta a comparação entre as tecnologias.

O requisito Modelo de Negócios definiu a utilização da tecnologia LoRaWAN para implantação do projeto piloto na cidade de Ouro Preto. Isso porque ela possibilita a criação de uma rede privada sem necessidade de contratação de serviços de terceiros (*Network as a Service* – NaaS). As demais tecnologias, além de exigirem a contratação de serviços, não possuem cobertura na cidade, o que impossibilita seu uso.

TABELA II. COMPARAÇÃO DE REQUISITOS

| Tecnologia / Requisitos | LoRaWAN | Sigfox | Ingenu | NB-IoT |
|---|---|---|---|---|
| Microchip | SX1272 | ATA8520E | NANO S100 | SARA-N280 |
| *Link Budget* | *Ul*: 157dB<br>*Dl*: 177dB | *Ul*: 149 dB<br>*Dl*: 164 dB | *Ul*: 180 dB<br>*Dl*: 185 dB | *Ul*: 155 dB<br>*Dl*: 164 dB |
| Consumo de Energia | TX: 125mA<br>RX:11,2mA<br>Sleep:0,1µA | TX:16,7mA<br>RX:10,5mA<br>Sleep: 5nA | TX:245mA<br>RX: 85 mA<br>Sleep:15mA | TX:220mA<br>RX: 46 mA<br>Sleep: 3 uA |
| Frequência | 900 MHz | 900 MHz | 2,4 GHz | Banda 28 |
| Sensibilidade | - 146 dBm | - 121,5 dBm | - 133 dBm | -135 dBm |
| Escalabilidade | Até 10000 dispositivos | Milhares de dispositivos | 535.117 msn/h | 52500 dispositivos |
| Criptografia | AES 128 bit | AES 128 bit | AES 128 bit | ND |
| Interface de Dados | UART | SPI | UART, SPI, | UART, I2C |
| Modelo de Negócio | Livre | NaaS. | NaaS | NaaS |

Os demais requisitos mostram que todas as tecnologias avaliadas estão aptas a serem solução do projeto, assim como para diversas outras aplicações de IoT em grandes áreas.

## IV. PLANEJAMENTO DE RF E SIMULAÇÃO DE PROPAGAÇÃO

A partir da seleção da tecnologia LoRaWAN foi desenvolvido um planejamento de RF de forma que todo o território urbano da cidade fosse coberto pela rede. Definiu-se a localização de duas ERB, sendo uma localizada na Escola de Minas da Praça Tiradentes e a segunda na Escola de Minas do Morro do Cruzeiro. Ambos os prédios possuem localização privilegiada, favorecendo a cobertura de todo o território conforme apresentado na Figura 1.

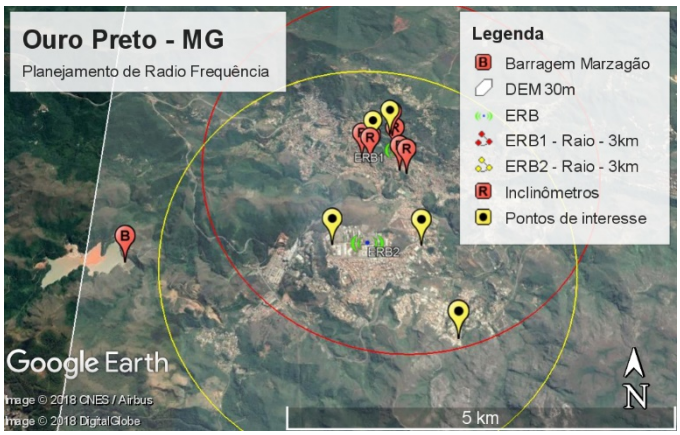


Fig. 1. Planejamento de RF para cobertura LoRaWAN em Ouro Preto.

Na Figura 1, os círculos vermelho e amarelo são raios de 3 km de cobertura pretendidos a partir das ERB. Vale ressaltar que os pontos de interesse estão localizados na interseção. A área sombreada em branco representa o DEM (*Digital Elevation Model*) de origem da USGS (United States Geological Survey) de resolução de 30 metros, utilizado nas simulações realizadas por meio do software Wireless Insite, versão 3.2.0.3 da Remcom – mais detalhes em [17], [18]. Os demais pontos marcados na Figura 1 são regiões de interesse onde se deseja a cobertura da rede.

No Wireless Insite foi criado um *grid* de receptores que cobriu toda a região do DEM, com espaçamento igual a 30 metros. Simulações de predição e propagação de RF foram realizadas utilizando o modelo X3D que utiliza algoritmos de *Ray Tracing* e ótica geométrica – mais detalhes sobre o modelo em [18]. As simulações foram realizadas com foco na determinação das perdas de propagação, o PL (*Path Loss*), logo, a potência utilizada do transmissor foi de 0 dBm, e os

ganhos de antenas foram de 0 dBi. Os demais parâmetros da simulação são apresentados na Tabela III.

TABELA III. CONFIGURAÇÃO DA SIMULAÇÃO

| Parâmetro | Configuração utilizada |
|---|---|
| Modelo | X3D Ray Tracing |
| Antena | Ommidirecional com polarização vertical |
| Forma de onda | Senoide de 915 MHz |
| Terreno | DEM USGS com resolução de 30 m |
| Receptores | Malha com espaçamento de 30 m |
| Transmissores | Pontual com potência de 0 dBm |
| Altura transmissor | 12 metros |
| Altura receptor | 1,6 metros |

Nas Figuras 2 e 3 é apresentado o mapa de calor criado a partir dos valores de PL calculados pelo modelo X3D. A escala é de -36 dB a -250 dB, na qual a cor azul representa a menor perda de espaço livre e o vermelho a maior.

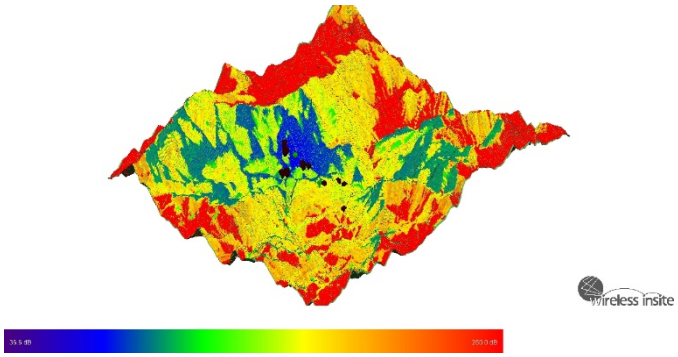


Fig. 2. Mapa de PL para a ERB da Escola de Minas do Centro, calculado pelo modelo X3D. Mínimo: - 36 dB; Máximo: - 250 dB.

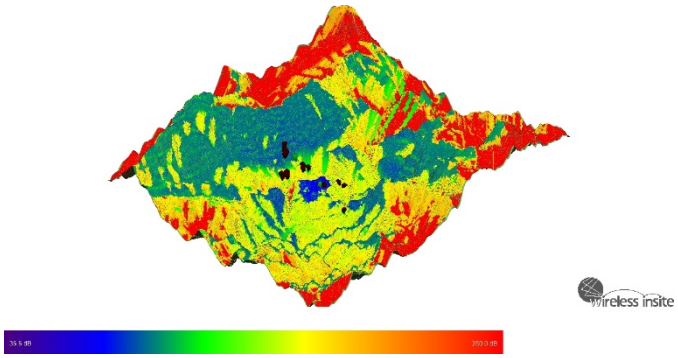


Fig. 3. Mapa de PL para a ERB da Escola de Minas do Morro do Cruzeiro, calculado pelo modelo X3D. Mínimo: - 36 dB; Máximo: - 250 dB.

A região de coloração azul mais forte encontra-se próxima às ERB, e indica que o PL nas proximidades é menor. Observa-se que, conforme se afasta das ERB, há coloração de tons verde, amarelo, laranja, até ficar vermelho, o que indica um aumento do PL com o aumento da distância. A grande variação de tonalidade nas cores indicam os desafios de cobertura em uma região cujo relevo é altamente acidentado. Reforçando assim, a importância de uma rede com *link budget* de até 157 dB de *uplink,* como é a LoRaWAN, o que favorece a cobertura de toda a região de interesse.

## V. VALIDAÇÃO

Para validação do trabalho, foi realizada a implantação da rede LoRaWAN na cidade de Ouro Preto, conforme o planejamento de RF apresentado na Figura 1. Assim, foram definidos dez pontos para medição da intensidade de sinal (*Received Signal Strength Indicator* – RSSI). Desses pontos, 4 eram com visada direta, LOS (*Line of Sigth*) e 4 sem visada direta, NLOS (*Non Line of Sigth*), todos eles em ambiente externo (*Outdoor*), além de outros 2 pontos em ambiente interno (*Indoor*) Para os testes foram especificados equipamentos e realizadas configurações conforme apresentado a seguir, respectivamente:

• (i) gateway Multitech Conduit mLinux, modelo MTCDTIP – H5 – 220L – 915, com potência de saída de 26 dBm, antena omnidirecional de 3 dBi e sensibilidade de recepção de -146 dBm; e (ii) dispositivo Dragino LoRa/GPS Shield com Arduino UNO, com potência de saída de 20 dBm, antena omnidirecional de 3,35 dBi e sensibilidade de recepção de -128 dBm;

• configurações de mensagens de *uplink* e *downlink* padronizadas, de forma que, em todos os pontos medidos, a configuração fosse exatamente a mesma, não interferindo nos resultados. Assim, a configuração padrão utilizada e o *link budget* são apresentados na Tabela IV.

Analisando os dados de hardware e o *link budget* calculado com a Equação 1, concluiu-se que o limitador é o enlace de *downlink* devido a menor EIRP (*Effective Isotropic Radiated Power*) do módulo Dragino.

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} - L_{TX} - PL + G_{RX} - L_{RX} \quad (1)$$

TABELA IV. COMPARAÇÃO DE REQUISITOS

| Link | Bandwidth (kHz) | Coding Rate | Spreading Factor | Payload (byte) | Link Budget (dB) |
|---|---|---|---|---|---|
| *Uplink* | 125 | 4/5 | 7 | 34 | 166 |
| *Downlink* | 500 | 4/5 | 9 | 17 | 148 |

Durante a realização das medidas de RSSI em campo, foram enviados 1422 pacotes pelo dispositivo, sendo que alguns não foram recebidos pelo gateway, conforme a taxa de pacotes recebidos (*Packet Reception Ratio* – PRR), calculada pela relação entre pacotes recebidos pelo gateway e os pacotes enviados pelos *devices*. Com os pacotes recebidos pelo gateway, foi calculada a média linear dos valores de RSSI, conforme apresentado na Tabela V.

TABELA V. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES

| Localização | RSSI (dBm) | Visada | Distância (m) | PRR (%) | Ambiente |
|---|---|---|---|---|---|
| Museu | -83,86 | LOS | 286 | 75,18 | Outdoor |
| São José | -85,88 | LOS | 450 | 78,41 | Outdoor |
| Lab. Química | -88,80 | LOS | 519 | 63,36 | Outdoor |
| S. F. Paula | -95,51 | LOS | 1638 | 53,94 | Outdoor |
| Getúlio Vargas | -101,98 | NLOS | 486 | 79,11 | Outdoor |
| Pocinho | -103,92 | NLOS | 2863 | 65,05 | Indoor |
| S. Francisco | -109,55 | NLOS | 387 | 72,5 | Outdoor |
| Santa Casa | -109,58 | NLOS | 320 | 61,32 | Outdoor |
| Ponte Seca | -117,63 | NLOS | 590 | 52,88 | Outdoor |
| ITV | -118,77 | NLOS | 1487 | 30,24 | Indoor |

Na Tabela V, observa-se que os pontos LOS apresentaram maior nível de RSSI, devido ao caminho direto, livre de obstruções, percorrido pelas ondas eletromagnéticas. Prova disso é que o ponto S. F. Paula, a uma distância de 1638 m, teve o RSSI maior do que todos os pontos NLOS, mesmo aqueles a distâncias muito menores. É importante frisar que esse ponto apresentou uma taxa de perda de pacotes PRR maior que os pontos NLOS mais próximos, indicando a influência de uma possível fonte de interferência.

Outra observação importante é em relação ao ponto Pocinho, com uma distância de 2863 m entre TX e RX em ambiente *indoor* mostrou uma grande capacidade de alcance da rede LoRaWAN em área urbana, com um RSSI médio de -103,92 dBm e um PRR de 65,05%. Ressalta-se que a altitude

entre TX e RX é muito semelhante, uma vez que a linha de visada é obstruída apenas por construções.

O ponto ITV está localizado no primeiro andar de um prédio com três andares e, por isso, apresenta grande atenuação de sinal. Assim, o resultado positivo do enlace mostrou a capacidade de penetração do sinal mesmo em ambiente *indoor*.

Mais uma observação foi feita no ponto Lab. Química, onde foi evidenciado um fenômeno da propagação de RF que é um desafio para os cenários de IoT. Durante a campanha de medição desse ponto, foi necessário realizar duas alterações em sua localização, em torno de 50 cm. Ao analisar os dados coletados, foi visto que, após as mudanças de localização, os valores de RSSI mudaram de patamar, como apresentado na Figura 4.

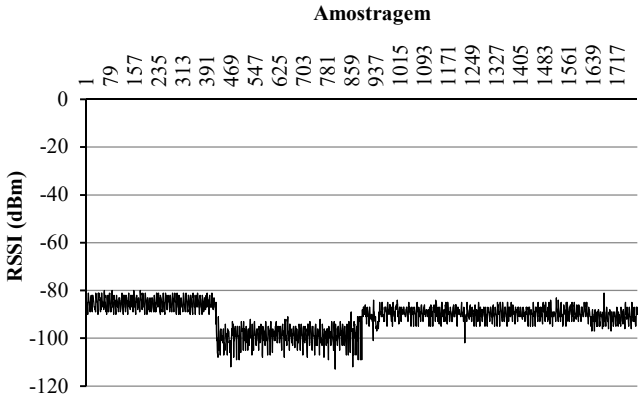


Fig. 4. Variação de RSSI medido no ponto Lab. Química.

Essas mudanças se devem a interferências construtivas e destrutivas das ondas eletromagnéticas, que ocorrem em movimentações acima de λ/2, que para a frequência utilizada é em torno de 33 cm. Nesse caso ouve variação de RSSI de -84 dBm para -97 dBm. Assim, para dispositivos IoT estáticos, pode ser um problema caso seja instalado em uma área de interferência destrutiva. Isso vai requerer um cuidado a mais na definição dos pontos por parte dos projetistas de redes IoT.

## VI. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As tecnologias LPWAN são uma boa opção para as aplicações de IoT cujo foco principal é o longo alcance e o baixo consumo de energia. Sua versatilidade permite a construção de aplicativos diversos, inclusive sistemas de monitoramento e alerta para áreas de risco. Como se tratam de redes criadas para atuadores e sensores, estes podem ser utilizados para medição de variáveis críticas nessas áreas, como por exemplo, inclinômetros, piezômetros, pluviômetros, sensores de nível, etc; além de possibilitar alarmes por meio de atuadores como buzzers, leds e vibracalls.

O método utilizado no projeto se mostrou eficiente, uma vez que a definição de requisitos críticos permitiu a eliminação de tecnologias menos aptas, o que reduziu os custos computacionais e de mão de obra para realização de simulações de propagação de RF. O uso de modelo baseado em *ray tracing* adequado a grandes áreas, mostrou que DEMs de baixa resolução podem impactar muito no resultado, mas foi eficiente como tendência, permitindo prever a necessidade de equipamentos para cobertura da região de interesse, reduzindo os custos.

O projeto piloto desenvolvido na cidade de Ouro Preto comprovou que mesmo em uma região de relevo montanhoso, com grande variação de altitude, a tecnologia LoRaWAN apresenta grande capacidade de cobertura, principalmente por possuir um *link budget* alto, devido, principalmente, à alta sensibilidade dos receptores. Além disso, o poder de penetração da frequência de 900 MHz associado à alta imunidade a interferência fazem da tecnologia uma boa opção para projetos similares.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à FAPEMIG e Fundação Gorceix pelo apoio financeiro, assim como à UFOP e ao ITV pelo apoio técnico, acadêmico e financeiro.

## REFERÊNCIAS

[1] L. Anantha and S. Wong, "World revieW rivers Why We Cannot Keep Silent Women Speak Out for Rivers," *Published by International Rivers*, vol. 26, no. 1, Mar-2011.

[2] WMO, "Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate and Water Extremes," Geneva, 2014.

[3] CEMADEN, "Histórico da criação do Cemaden – Cemaden," 2011. [Online]. Available: http://www.cemaden.gov.br/historico-da-criacao-do-cemaden/. [Accessed: 31-Oct-2017].

[4] M. M. M. Fontes, "Contribuição para o desenvolvimento da metodologia de análise, gestão e controle de riscos geotécnicos para a área urbana da cidade de Ouro Preto," Universidade Federal de Ouro Preto, 2011.

[5] DNPM, "Cadastro Nacional de Barragens de Mineração — Agência Nacional de Mineração," 2018. [Online]. Available: http://www.anm.gov.br/assuntos/barragens/cadastro-nacional-de-barragens-de-mineracao. [Accessed: 14-Feb-2018].

[6] U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, "Low Power Wide Area Networks: An Overview," *IEEE Commun. Surv. Tutorials 1*, p. 18, 2017.

[7] Link Labs, "Low Power, Wide Area Networks," 2016.

[8] N. Hunn, "LoRa vs LTE-M vs Sigfox," *Creat. Connect.*, no. 1, pp. 1–9, 2015.

[9] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, and J. Melia, "Understanding the limits of LoRaWAN," pp. 8–12, 2016.

[10] Lora Alliance, "LoRaWAN 101 A Technical Introduction," 2017.

[11] B. WND, "Uma visão técnica da Rede Sigfox," 2017. [Online]. Available: https://www.embarcados.com.br/uma-visao-tecnica-da-rede-sigfox/. [Accessed: 08-Dec-2017].

[12] Y. P. E. Wang *et al.*, "A primer on 3gpp narrowband internet of things (nb-iot). 2016," *arXiv Prepr. arXiv1606.04171*, 2016.

[13] T. C. L. Hauwei, "NB-IoT - Enabling New Business Opportunities," Shenzhen, 2015.

[14] J. Schlienz and D. Raddino, "Narrowband Internet of Things Whitepaper," 2016.

[15] J. H. Wu, "CAT-M & NB-IoT Design and Conformance Test," 2017.

[16] Ingenu, "HOW RPMA WORKS: The Making of RPMA," 2016.

[17] USGS, "EarthExplorer," 2017. [Online]. Available: https://earthexplorer.usgs.gov/. [Accessed: 08-Nov-2017].

[18] Remcom Inc, "Wireless Insite Rerence Manual," 3.10, 2017.