

Integração de Redes de Sensores sem Fio à Plataforma Lora[®] para Serviços de Monitoramento e Controle Inteligentes

Alberto C. P. Santos, Amarilton L. Magalhães, André L. F. de Almeida e Tarcisio F. Maciel

Resumo—Este artigo apresenta estudos sobre a implantação de uma rede de sensores sem fio, com a utilização da tecnologia Lora[®] na cidade de Fortaleza. Dessa forma são feitos estudos de análise de cobertura, como modelos de propagação em cenários urbanos e suburbanos. Com base no padrão LoRaWAN[™] é realizado um planejamento para rede LoRa[®] desenvolvendo orçamentos de enlace levando em consideração as especificações dos equipamentos e as perdas de percurso. E para finalizar o estudo na predição de cobertura são realizadas simulações com o software Radio Mobile para implantação dos equipamentos em locais estratégicos no mapa de Fortaleza.

Palavras-Chave—LoRaWAN, redes de sensores sem fio, orçamento de enlace.

Abstract—This article presents studies on the implantation of a wireless sensor network, using LoRa[®] technology in the city of Fortaleza. In this way, coverage analysis studies are carried out, such as propagation models in urban and suburban settings. Based on the LoRaWAN[™] standard, a planning for the LoRa[®] network is carried out, developing link budget taking into account the equipment specifications and the path loss. And to finish the study in the coverage prediction, simulations are carried out with the Radio Mobile software to deploy the equipment in strategic locations on the map of Fortaleza.

Keywords—LoRaWAN, wireless sensor networks, link budget

I. INTRODUÇÃO

O crescimento das cidades, o barateamento das tecnologias de comunicação, e a evolução da sociedade atual para uma sociedade digitalmente conectada têm estimulado a adoção de redes de sensores sem fio e geração de novos serviços nas cidades inteligentes. Diante disso, surge a necessidade de utilização de grandes quantidades de dispositivos com custos reduzidos, baixo consumo de energia e com capacidade de conexão para ser aplicado em grande escala [1], [2], [3]. De forma a atender os requisitos impostos a uma rede de sensores sem fio, pode-se ressaltar a tecnologia de LoRa[®] [4], que utiliza um espectro de frequência não licenciado e que permite uma comunicação de longo alcance utilizando uma baixa potência, possuindo uma conexão através da infraestrutura de redes IP (do inglês, Internet Protocol). Dessa forma se torna possível a sua utilização em diversos cenários e aplicações

Alberto C. P. Santos, André L. F. de Almeida e Tarcisio F. Maciel, Departamento de Engenharia de Teleinformática, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, Brasil. Amarilton L. Magalhães, Departamento de Engenharia de Teleinformática, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Tauá, Brasil. E-mails: albertochristyan@gmail.com, amariltonn@gmail.com, andre@gtel.ufc.br, maciel@gtel.ufc.br.

relacionados a internet das coisas (IoT), como sensores e dispositivos de monitoramento. Neste contexto, este trabalho traz alguns cenários de análise de cobertura para implantação de uma rede LoRa[®] na cidade de Fortaleza, no qual foi utilizado como parâmetros especificações de equipamentos atuais, modelos de propagação adequados ao cenário e localizações geográficas reais e condizentes com as limitações físicas de instalação de equipamentos.

Neste artigo, serão apresentadas considerações sobre pesquisas científicas realizadas pela equipe na literatura da área, pesquisas tecnológicas na documentação existente da tecnologia LoRa[®] e LoRaWAN[™], análises envolvendo alguns modelos de propagação implementados em código e executados no software de simulação numérica Octave, bem como estudos iniciais da análise de cobertura utilizando o software Radio Mobile, considerando as localizações das Secretarias Executivas Regionais de Fortaleza (SERs), como possíveis locais de implantação de equipamentos. Com base em cenários que compreendem uma grande quantidade de nós na rede de sensores sem fio utilizando a tecnologia LoRa[®], bem como a diversidade existente entre os vários cenários (tipo de ambiente, relevo, etc.) faz-se necessário, além da pesquisa científica e tecnológica, o estudo prévio de aspectos de rádio propagação, como análise das perdas de percursos e balanceamento de link. Tais estudos podem ser realizados utilizando modelos clássicos de propagação encontrados na literatura da área de comunicações sem fio.

O restante deste artigo está organizado como segue. A Seção II descreve modelos de predição de perda de percurso, mostrando as equações e seus respectivos requisitos. Na Seção III são apresentados as análises e os comportamentos de cada modelo através de simulações computacionais. A Seção IV descreve as principais especificações dos dispositivos para a implementação da rede LoRaWAN[™]. A Seção V mostra o planejamento da rede, indicando as abordagens de dimensionamento e estrutura de *link budget*. Na Seção VI traz os resultados do *link budget*. Na Seção VII são mostrados os resultados das simulações de alguns possíveis cenários com a utilização do software Radio Mobile. E por fim, na Seção VIII, uma breve conclusão do trabalho apresentado relatando a importância de uma rede LoRa[®] para o crescimento da cidade.

II. PESQUISA SOBRE PERDA DE PERCURSO

A fim de estudar a viabilidade da implantação de uma rede de sensores sem fio na cidade Fortaleza foi necessário uma

análise mais complexa da camada física da rede. Dessa forma buscou-se seguir as etapas típicas de planejamento de redes de rádio, que se iniciam pelo planejamento de cobertura através do cálculo de enlace envolvendo a região a ser implantada a rede, os tipos de dispositivos a serem utilizados e localizações geográficas para instalação dos equipamentos. A partir do cálculo de enlace é possível simular cenários com diferentes quantidades de nós na rede, considerando os custos de implantação, e obter resultados de forma a aumentar a cobertura e a confiabilidade da rede com a escolha de pontos estratégicos para a instalação dos equipamentos [5], [6], [7]. Em nosso trabalho, o estudo de viabilidade do sistema através da perda de percurso compreendeu a análise de propagação no espaço livre e de modelos de propagação em ambientes urbanos.

O estudo de perda de percurso através de propagação no espaço livre trata-se do cenário mais otimista de propagação, uma vez que a análise busca interpretar o meio em questão como o espaço livre, no qual não há obstáculos que interfiram na transmissão via rádio. A condição para que a propagação sem fio seja realizada em condições aproximadas à do espaço livre é a ausência de obstáculos na primeira zona de Fresnel. Respeitando-se esta condição, pode-se calcular a perda de percurso PL_{FS} através da Equação (1), [5], [8].

$$PL_{FS}[\text{dB}] = 32,44 + 20 \log f_c + 20 \log d \quad (1)$$

em que f_c é a frequência da portadora em MHz e d é a distância entre o transmissor e o receptor em quilômetros.

A propagação de sinais de comunicação sem fio em ambientes urbanos é afetada por inúmeros obstáculos. Logo, na prática, a condição para aplicação do modelo do espaço livre dificilmente ocorre devido à frequente ausência de linha de visada entre transmissor e receptor, principalmente em ambientes urbanos, como o da cidade de Fortaleza, onde é comum ocorrer linha de visada com obstrução de parte da zona de Fresnel ou devido ao movimento relativo entre transmissor e receptor. Além disso, vários fenômenos ocorrem na propagação de ondas eletromagnéticas em ambientes urbanos, tais como efeitos de multipercurso, zonas de sombra devido a edifícios e propagação guiada devido às ruas, avenidas, entre outros. Considerando as adversidades impostas pelas transmissões sem fio em ambientes urbanos, tais como cidades de médio e grande porte, bem como centros metropolitanos, vários estudiosos propuseram métodos de predição de perda de percurso para as dadas situações. Tais modelos são divididos em duas categorias: (i) empíricos, como os modelos Okumura-Hata e COST231-Hata [5], [8], [9], [10] e (ii) teóricos ou analíticos, como COST231-Walfish-Ikegami [8], [10] e o modelo para ambientes urbanos e suburbanos de Xia [8], [11].

Tendo em vista que o modelo de Okumura-Hata apresenta concordância com os parâmetros estudados na rede proposta, como frequência, alcance da transmissão sem fio, altura das antenas do gateway e do terminal móvel, o mesmo foi escolhido para análise da perda de percurso. Vale destacar que, dentro os modelos citados acima, o Okumura-Hata é atualmente o modelo padrão para cenários urbanos e suburbanos.

A. Modelo Okumura-Hata

O modelo de Okumura-Hata foi idealizado após uma série de medidas coletadas na cidade de Tóquio, no Japão, o que gerou uma extensa base de dados suficiente para Okumura traçar curvas para a perda de percurso. Posteriormente, Hata derivou fórmulas empíricas a partir das curvas de Okumura, as chamadas de equações de Hata, que compreendem cenários do tipo urbano, suburbano e rural [5], [8], [9]. Na presente pesquisa, foram considerados os dois primeiros cenários. Para o cenário urbano, a perda de percurso PL_{HataTU} é representada por

$$PL_{HataTU}[\text{dB}] = 69,55 + 26,16 \log f_c - 13,82 \log(h_{BS}) - a(h_{MS}) + (44,9 - 6,55 \log h_{BS}) \log d \quad (2)$$

em que h_{BS} é a altura da estação base, h_{MS} é a altura da estação móvel e $a(h_{MS})$ é um fator de correção que depende do terreno estudado, compreendendo cidades de pequeno e médio porte e cidades de grande porte. E para o cenário suburbano a perda de percurso PL_{HataTS} é representada por

$$PL_{HataTS}[\text{dB}] = PL_{HataTU} - 2(\log(f_c/28))^2 - 5,4. \quad (3)$$

As restrições consideradas para estudo com o modelo empírico de Okumura-Hata são f_c entre 150 e 1500 MHz, atendendo o requisito de frequências do LoRa® (433 e 915 MHz), h_{BS} entre 30 e 200 m, h_{MS} entre 1 e 10 m e d entre 1 e 20 km.

III. ANÁLISE DE PERDA DE PERCURSO

A Figura 1 mostra o gráfico das curvas de perda de percurso em dB como função da distância em quilômetros utilizando o modelo de Okumura-Hata. A análise utilizou a frequência de 915 MHz, a altura da estação base igual a 30 metros e a altura da estação móvel igual a 1,5 metros.

O cenário considerado foi o “típico urbano” e a cidade foi considerada como de grande porte. Para uma distância de 1 km, a perda de percurso corresponde a 126,61 dB. Para poucos quilômetros, a diferença de perda é mais significativa se comparada a distâncias maiores. Como exemplo, podemos citar a diferença de perda entre 1 e 2 km, que corresponde a 10,6 dB, enquanto que a diferença de perda entre 10 e 11 km corresponde a 1,46 dB.

IV. EQUIPAMENTOS TRANSCETORES DA REDE LORAWAN™

Realizou-se, para o início da análise da predição de cobertura, um levantamento dos tipos de equipamentos, como gateways e transceptores, de forma a obter informações como potência de transmissão, sensibilidades de recepção e ganhos das antenas.

A. Gateways

Os gateways utilizados para ambientes externos são compostos por um chip de banda base digital SX1301 [12], da SEMTECH, o qual possui um mecanismo de processamento de sinais digitais projetado especificamente para

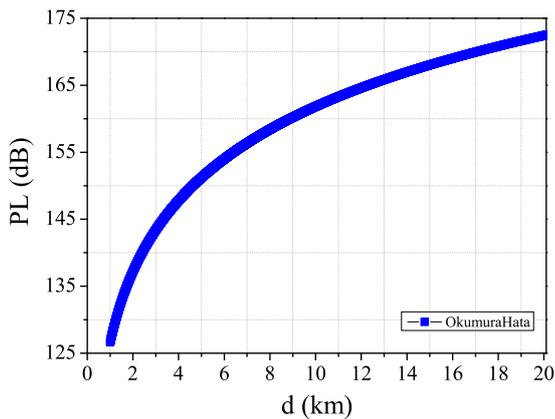


Fig. 1. Perda de percurso em função da distância segundo o modelo de Okumura-Hata.

oferecer recursos revolucionários nas bandas ISM em todo o mundo. O chip integra o concentrador LoRa® IP, que é um transmissor/receptor multicanal de alto desempenho, capaz de receber vários pacotes LoRa® simultaneamente usando fatores de espalhamento aleatórios em canais aleatórios. Dessa forma, é possível estabelecer uma conexão robusta entre um concentrador de dados sem fio e uma enorme quantidade de dispositivos finais sem fio espalhados por determinadas distâncias. Pode-se destacar alguns parâmetros principais desse equipamento, como sensibilidade de recepção de até -139,5 dBm, potência de transmissão de 30 dBm, conforme obtida através de modelos de alguns fabricantes [13] e [14].

B. Endpoints

Nos dispositivos finais que operam na faixa de frequência de 915 MHz, os transceptores SX1276 [15], também da SEMTECH, são utilizados em grande maioria possuindo o modem LoRa® de longo alcance, que oferece comunicação de espectro disperso de alcance ultralongo e alta imunidade a interferências. O LoRa® oferece vantagens significativas em ambos os bloqueios e seletividade sobre técnicas convencionais de modulação, melhorando a relação entre alcance, imunidade à interferência e consumo de energia. Esses dispositivos possuem potência de transmissão de até 20 dBm e sensibilidade de recepção de até -148 dBm.

V. PLANEJAMENTO DA REDE LORAWAN™

O processo de planejamento da rede LoRaWAN™, assim como nas outras redes via rádio, também requer dimensionamento, capacidade e planejamento de cobertura e qualidade de serviço da rede [6]. Nessa etapa, são estimados o número adequado de estações base, as suas configurações e os pontos estratégicos para a sua implantação, de forma a tornar a rede com uma máxima eficiência de acordo com os requisitos pretendidos, como a cobertura, capacidade e qualidade de serviço da rede.

A. Dimensionamento da rede

O processo de dimensionamento da rede, da qual as possíveis configurações e quantidades de equipamentos são estimadas, dependem da necessidade e dos requisitos pretendidos que estão relacionados a fatores de (i) cobertura: regiões de cobertura, informações do tipo da área, condições de propagação; (ii) capacidade: espectro disponível, previsão de crescimento da rede, densidade de tráfego e (iii) qualidade de serviço (QoS): probabilidade de cobertura, probabilidade de bloqueio e taxa de transferência.

O estudo iniciou-se no processo de dimensionamento da rede, no qual realizou-se um orçamento do link (*link budget*), em que se realiza um balanço dos ganhos e das perdas de potência que ocorrem em toda a comunicação entre os *gateways* e os terminais, juntamente com a análise de cobertura, a fim de obter informações sobre o número de estações base e as suas configurações de hardware mais adequadas.

VI. ANÁLISE DE *link budget*

O *link budget* de uma rede é realizado tanto para *uplink* quanto para *downlink*. Assim, são levados em consideração alguns parâmetros importantes como:

- Potência de Transmissão: Esse parâmetro é definido de acordo com o equipamento que estamos utilizando, no caso o transceptor SX1276 da SEMTECH, que possui uma potência de saída (RF) de 20 dBm.
- Ganho das antenas: Para o ganho de potência gerados pelas antenas dos *gateways* pode-se adotar o valor de 6 dBi, já para os *endpoints* o valor adotado será de 3 dBi, conforme fornecido por grande parte dos fabricantes [14].
- Perdas por cabeamento: Na montagem dos equipamentos, *gateways* e dispositivos finais, o sistema está sujeito a perdas de potência devido a estrutura física relacionada aos cabos, conectores, etc. Um valor prático para essa perda está em cerca de 2 dBi [6].
- Sensibilidade de recepção: Está relacionada com a taxa de dados, sendo função da largura de banda da modulação e do fator de espalhamento espectral [12] e [15]. Para o cálculo da sensibilidade do receptor, também são consideradas a potência mínima do sinal que pode ser modulado, e da figura de ruído do receptor.
- Margem de Interferência: É considerada a carga de tráfego, a qual irá afetar a cobertura da célula. Para casos em que se deseja uma maior área de cobertura considera-se, então, valores típicos para uma baixa margem de interferência em torno de 1 a 3 dB [6].
- Margem contra Sombreamento: O percurso percorrido pelo sinal do transmissor até o receptor está sujeito a vários tipos de obstruções, como prédios e árvores. Para o cálculo dessa margem, são levados em consideração o tipo de ambiente e a forma em que essa margem irá proporcionar a rede, podendo garantir uma maior confiabilidade de recepção do sinal ou uma maior cobertura de área. Um valor considerado para os cenários suburbanos e urbanos é em torno de 10 a 15 dB [6].

Com base nos parâmetros mencionados, foi realizada a análise de *link budget*, no qual o enlace de reverso foi o

TABELA I
CÁLCULO DE ENLACE: DIRETO E REVERSO.

<i>Enlace</i>	<i>Reverso</i>	<i>Direto</i>
Transmissor	<i>End devices</i>	<i>Gateway</i>
Máxima potência de transmissão	20 dBm	30 dBm
Ganho da antena	3 dBi	6 dBi
Perda do transmissor	2 dB	2 dB
Potência Efetivamente Irradiada (EIRP)	21 dBm	34 dBm
Receptor	<i>Gateway</i>	<i>End devices</i>
Margem de interferência	3 dB	3 dB
Sensibilidade do receptor	-139,5 dBm	-141 dBm
Ganho da antena	6 dBi	3 dBi
Perda dos cabos	2 dB	2 dB
Margem contra sombreamento	12,5 dB	12,5 dB
Margem de desvanecimento rápido	0 dB	0 dB
Ganho de handoff	0 dBi	0 dBi
Outros ganhos	0 dBi	0 dBi
Outras perdas	0 dB	0 dB
Máxima perda de percurso permitida	149,0 dB	160,5 dB

limitante para o alcance do raio de cobertura. Os resultados estão sintetizados na Tabela I.

VII. ANÁLISE DE COBERTURA

As predições de cobertura da rede foram realizadas utilizando o software Radio Mobile, o qual utiliza o modelo de propagação Longley-Rice [16], em que são definidos parâmetros que representam o perfil do relevo, de forma a simular as atenuações e possibilitar uma melhor previsão de cobertura, tanto para enlaces fixos como para os que necessitem de certa mobilidade.

No cálculo da perda de percurso utilizando o modelo de propagação Longley-Rice, são considerados, ainda, fatores do enlace, como linha de visada, difração, dispersão ou espalhamento, distância entre as estações, altura das antenas transmissora e receptora, assim como as suas alturas efetivas (altura da estrutura na qual as antenas foram instaladas somadas com a elevação do perfil). Este modelo pode ser aplicado para a faixa de frequência entre 20 a 20.000 MHz, e distâncias do enlace de 1 a 2000 km e as estruturas das antenas devem ser instaladas em alturas de 0,5 a 3000 m. Dessa forma, os parâmetros que utilizaremos na implantação da rede estão dentro do permitido pelo modelo, como também pode-se notar que as restrições encontradas são bem amplas e menos específicas se comparadas às dos outros modelos, como o de Okumura-Hata, o que também motiva a equipe a realizar predições com base em outros modelos de propagação que são mais adequados a cenários urbanos e suburbanos.

Na análise inicial de predição, foi criada uma rede utilizando uma faixa de frequências permitida no Brasil, correspondendo a 915 a 928 MHz, mantendo o restante dos parâmetros como padrão. Para realizar o mapeamento das estações, inicialmente foram definidos alguns pontos que pudessem receber a estrutura das torres. Assim, foram mapeadas as SERs dentro do mapa de Fortaleza e feitas simulações para definir, dentre as 7 secretarias, 4 que obtivessem uma melhor predição de cobertura.

Definidas as 7 coordenadas das secretarias, foram criados 2 sistemas, um que receberia as estações rádio bases (ERBs) e

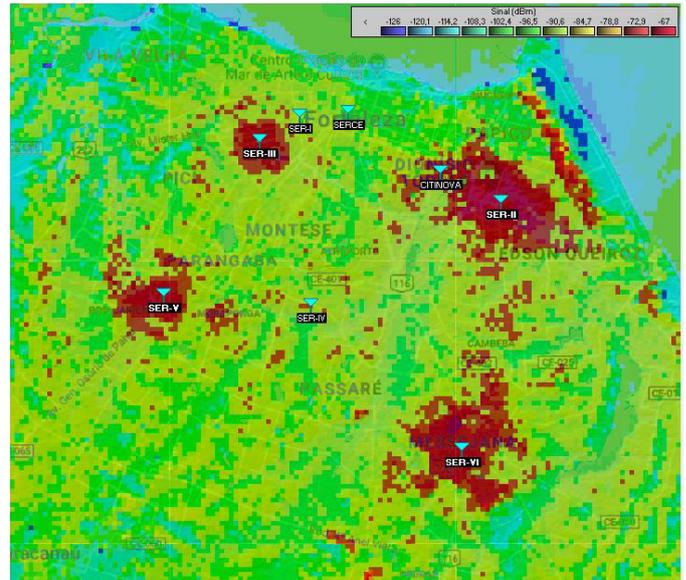


Fig. 2. Resultados da simulação com implementação de gateways nas SERs II, III, V e VI.

um outro que receberia os parâmetros de um dispositivo final, no qual este recebeu a localização da CITINOVA - Fundação de Ciência, Tecnologia e Inovação, apenas para efeitos de simulação. Nos parâmetros do sistema, foram inseridas as informações obtidas a partir dos equipamentos gateways e dos endpoints, bem como as alturas das estruturas, consideradas como 30 m para os gateways e 1,5 m para os endpoints.

Os resultados da primeira simulação com o Radio Mobile mostraram que a implantação dos gateways nas Secretarias Regionais II, III, V e VI tornou a rede mais eficiente e melhor distribuída na cidade de Fortaleza, portanto obtendo uma cobertura maior por toda a cidade, como pode ser observado na Figura 2.

A fim de obter resultados com maior confiabilidade, realizou-se uma simulação baseada no modelo de Okumura-Hata que, com base no resultado do link budget obtido, foi encontrado um raio de cobertura de aproximadamente 4,3 km para uma perda de 149 dB, valor limitante encontrado no enlace de uplink, utilizando esse modelo de propagação. Por motivos de simplificação, utilizou-se também o software Radio Mobile que, apesar de não operar com esse modelo, foi útil para limitar o alcance da estação ao que foi encontrado, inserindo esse raio como parâmetro de simulação. Para se obter uma predição mais próxima da esperada pelo modelo de Okumura-Hata, foram desconsideradas as perdas baseadas na cobertura terrestre, fornecidas pelo software, e acrescentado um parâmetro de perda nas propriedades da rede, correspondendo a uma perda adicional por cidade equivalente a 100%.

Os resultados obtidos com esses novos parâmetros mostram que a predição de cobertura se aproxima parcialmente do esperado pelo modelo de Okumura-Hata. Na Figura 3, pode-se notar que, à medida que um dispositivo se distancia do raio de cobertura encontrado pelo modelo, com raio de alcance de 4,3 km, a probabilidade de o mesmo receber sinais com potência no limite ou inferiores ao limiar do receptor aumenta

consideravelmente.

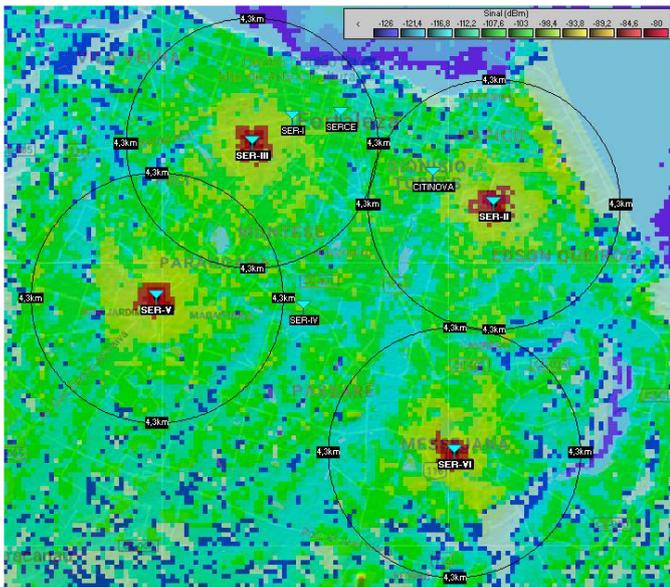


Fig. 3. Resultados de perda adicional por cidade de 100%.

A partir desse raio de cobertura de 4,3 km, é possível, ainda, realizar uma análise de forma a garantir uma maior disponibilidade de link em determinada região dentro da cidade, como, por exemplo, tomar uma região que cobrisse bairros vizinhos, de forma a diminuir a probabilidade de inoperância dentro dessa da região pretendida. Dessa forma, foram posicionadas estações em pontos a garantir essa análise, restringindo o alcance de cada estação ao raio encontrado. Os resultados desta análise podem ser visualizados na Figura 4.

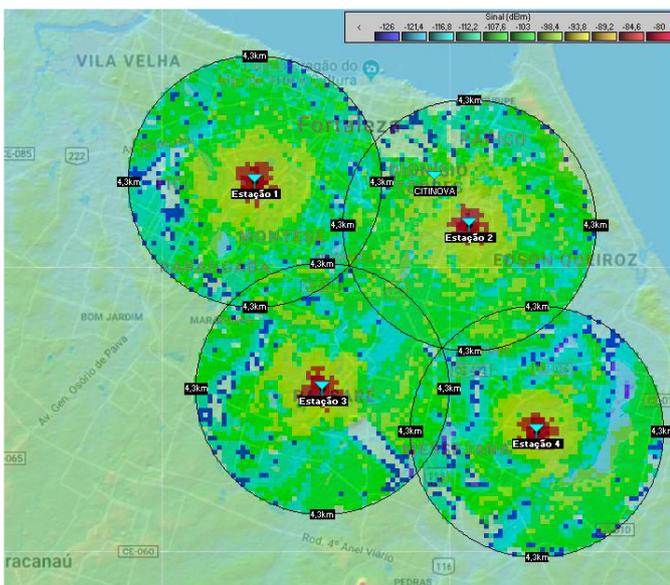


Fig. 4. Resultados de uma região com menor probabilidade de inoperância.

Através dessa análise, tem-se uma cobertura de cada estação em aproximadamente 58 km². No entanto, temos cinco regiões cuja cobertura das estações se intersectam, as quais possuem áreas de 3,4 km² cada, possibilitando um total de 232 km²

gerados pelas estações separadamente e uma intersecção total de 17 km². Dessa forma, foi obtida uma área efetiva de cobertura de 215 km². Sabendo que a área total da cidade de Fortaleza é de 313,8 km², a estimativa da predição de cobertura foi de 68,6% da cidade.

VIII. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta relevância para a cidade de Fortaleza, uma vez que agrega, de forma inicial, um primeiro estudo de planejamento de cobertura utilizando um cenário com implementação de rede LoRa®, que se trata de uma tecnologia aliada à Internet das Coisas. A futura implementação desta tecnologia colocará o município na rota do crescente desenvolvimento tecnológico com a inserção da cidade no modelo de cidades inteligentes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a toda a equipe da Fundação de Ciência, Tecnologia e Inovação de Fortaleza - CITINOVA e ao projeto da CITILAB pela colaboração, desenvolvimento e incentivo à pesquisa. O autor Amarilton L. M. também agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior CAPES - Brasil (Código de Financiamento 001) pelo apoio financeiro concedido.

REFERÊNCIAS

- [1] T. Tryfonas and I. Askoxylakis, "Future cities and smart technologies: A landscape of ambition and caution." *ERCIM News*, vol. 98, no. July, p. 8, 2014.
- [2] G. P. Hancke, G. P. Hancke Jr *et al.*, "The role of advanced sensing in smart cities," *Sensors*, vol. 13, no. 1, pp. 393–425, 2013.
- [3] Z. Dawy, W. Saad, A. Ghosh, J. G. Andrews, and E. Yaacoub, "Toward massive machine type cellular communications," *IEEE Wireless Communications*, vol. 24, no. 1, pp. 120–128, 2016.
- [4] LoRaWAN, "LoRaWAN™1.0.3 specification." 2018. [Online]. Available: <https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-07/lorawan1.0.3.pdf>
- [5] T. S. Rappaport *et al.*, *Wireless communications: principles and practice*. prentice hall PTR New Jersey, 1996, vol. 2.
- [6] H. Holma and A. Toskala, *WCDMA for UMTS: HSPA evolution and LTE*. John Wiley & Sons, 2007.
- [7] J. M. de Souza Sant'Ana, "Redes loRaWAN: implantação e desenvolvimento de aplicações," 2017.
- [8] G. L. Stüber and G. L. Stüber, *Principles of mobile communication*. Springer, 1996, vol. 2.
- [9] M. Hata, "Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services," *IEEE transactions on Vehicular Technology*, vol. 29, no. 3, pp. 317–325, 1980.
- [10] E. Damosso, L. M. Correia *et al.*, "Digital mobile radio towards future generation systems," *COST 231 final report*, vol. 13, 1999.
- [11] H. H. Xia, "A simplified analytical model for predicting path loss in urban and suburban environments," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 46, no. 4, pp. 1040–1046, 1997.
- [12] SEMTECH, "SX1301 - digital baseband chip for outdoor LoRaWAN macro gateways," 2017. [Online]. Available: <https://www.semtech.com/uploads/documents/sx1301.pdf>
- [13] KERLINK, "Datasheet - Wernet iBTS. Preliminary. LoRa gateway for IoT chain," 2016. [Online]. Available: https://www.the-iot-marketplace.com/media/documents/DataSheet_Wernet_iBTS.pdf
- [14] CISCO, "Wireless gateway for lorawan data sheet," 2019. [Online]. Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/se/internet-of-things/datasheet-c78-737307.pdf>
- [15] SEMTECH, "SX1276/77/78/79-137 MHz to 1020 MHz lowpower long range transceiver," 2019. [Online]. Available: https://www.semtech.com/uploads/documents/DS_SX1276-7-8-9_W_APP_V6.pdf
- [16] G. A. Hufford, A. G. Longley, W. A. Kissick *et al.*, *A guide to the use of the ITS irregular terrain model in the area prediction mode*. US Department of Commerce, National Telecommunications and Information, 1982.