

Mapas de Ambiente Rádio Aplicados às Redes de Sensores Sem Fio

Guilherme Lopes da Silva, Paulo Cardieri

Resumo—A importância das aplicações de IoT nas diversas atividades humanas tem exigido que as redes de sensores que suportam tais aplicações atendam a requisitos de QoS estritos e que tenham seu desempenho monitorado continuamente. Apresentamos aqui resultados preliminares do desenvolvimento de uma ferramenta para a monitoração da cobertura de RF de uma rede de sensores, por meio de um mapa de ambiente rádio. Esse mapa estima a potência recebida em uma região, com base em amostras coletadas em campo. Avaliações preliminares mostram a potencialidade do uso desses mapas na monitoração da qualidade de uma rede.

Palavras-Chave—Redes de sensores sem fio, Internet das Coisas, Geoestatística, LPWAN.

Abstract—The importance of IoT applications in various human activities has required that sensor networks that support such applications meet strict QoS requirements and have their performance monitored continuously. We present here preliminary results of the development of a tool for monitoring the RF coverage of a sensor network using a radio environment map. This map estimates the power received in a region, based on samples collected in the field. Preliminary assessments show the potential of using these maps in monitoring the quality of a network.

Keywords—Wireless Sensors Networks, Internet of Things, Geostatistics, LPWAN.

I. INTRODUÇÃO

No contexto de redes de sensores sem fio (RSSF) e de Internet das Coisas (*Internet of Things*, IoT), destacam-se as redes de longas distâncias e baixa potência de transmissão (*Low Power Wide Area Network*, LPWAN), focadas em aplicações de IoT que necessitam de baixas taxas de transmissão de dados e baixo consumo de energia [1]. Tais redes empregam tecnologias de transmissão de dados sem fio desenvolvidas para operar na faixa não licenciada ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), em 915 MHz. Para tanto, são utilizados microcontroladores de baixo custo acoplados a transceptores de Radiofrequência (RF). As informações de interesse são coletadas pelos dispositivos sensores e enviadas a uma estação rádio base (ERB) que, por sua vez, encaminha todos os dados a uma entidade agregadora de dados e de gerência. Estas entidades tratam os dados coletados de forma a transformá-los em informação útil ao usuário, que terá acesso ao conteúdo por meio de plataformas de IoT.

Vislumbra-se para um futuro próximo a existência de operadoras de redes de sensores sem fio que proverão o serviço

de acesso sem fio para a conexão de sensores ou atuadores [2] em aplicações de IoT, os chamados *Provedores de Serviços de IoT*. Nesse sentido, aparece a questão do controle de qualidade de serviço (*Quality of Service*, QoS) prestado ao cliente. Como já ocorre em outros tipos de serviços de telecomunicações, a contratação de um serviço de IoT envolverá o estabelecimento de Contratos de Nível de Serviço (ou *Service Level Agreement*, SLA), que definem os índices de qualidade do serviço contratados. Como consequência direta, os operadores deverão dispor de ferramentas que permitam a visualização em tempo real do estado de sua rede por meio de métricas de qualidade de serviços. Tais ferramentas orientarão o estabelecimento dos níveis de qualidade de serviço e também a tomada de ações visando a correção de eventuais problemas.

Em redes de comunicação sem fio, como as LPWAN, boa parte dos problemas que causam a deterioração da qualidade do serviço tem como origem a degradação da qualidade do sinal causada pelos mecanismos de propagação, como difração, reflexão e bloqueios de sinal. Tais mecanismos levam ao desvanecimento do sinal, reduzindo a potência de recepção abaixo de níveis mínimos aceitáveis. Além disso, outros fatores podem degradar a qualidade do sinal recebido, como variações climáticas [3], tipos de vegetação [4], mobilidade dos terminais [3], obstáculos entre transmissor e receptor, má qualidade das antenas e dos conectores dos dispositivos [3].

A qualidade de um enlace de comunicação pode ser quantificada pela **potência do sinal recebido** (ou *Received Signal Strength*, RSS) e pela sua caracterização estatística, que indicam a severidade do desvanecimento. A **taxa de sucesso na recepção de pacotes** (ou *Packet Success Rate*, PSR), que depende, dentre outros fatores, da potência de recepção, é outra métrica empregada na caracterização de um enlace. Deve-se notar que métricas afetadas por mecanismos de propagação são funções espaciais, ou seja, seus valores variam não apenas com a distância de separação entre as antenas transmissora e receptora, mas também em função do ambiente ao redor do enlace. A análise de tais métricas pode trazer informações úteis ao operador da rede visando o atendimento dos requisitos de qualidade de serviço estabelecidos pelo operador no contrato *SLA*.

Neste trabalho será apresentado um estudo preliminar sobre o uso de **mapas de ambientes rádio** (*Radio Environment Map*, REM) como uma ferramenta de auxílio ao operador de RSSF na monitoração do estado de sua rede e, conseqüentemente, no atendimento de requisitos de qualidade de serviço. Os mapas REM apresentam de forma gráfica, tipicamente em duas dimensões, os valores de alguma métrica de interesse em uma dada região, como, por exemplo, a potência do sinal recebido e a probabilidade de sucesso de recepção. Tais mapas podem

Faculdade de Engenharia Elétrica e da Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, Brasil, E-mails: gui.iot@decom.fee.unicamp.br, cardieri@decom.fee.unicamp.br. O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

ser construídos a partir de amostras da métrica de interesse tomadas em diferentes posições na área considerada. Com base na eventual correlação espacial presente nas amostras obtidas em pontos diferentes, ferramentas da geo-estatística podem ser utilizadas para estimar os valores da métrica em qualquer outro ponto da região. Note-se que a existência de correlação entre amostras separadas espacialmente é explicada pelo fato de os mecanismos de propagação serem fortemente correlacionados no domínio espacial.

Nesse trabalho serão considerados dois mapas de ambientes rádio, um para a potência de recepção, e outro para a probabilidade de sucesso de recepção de pacotes. Tais métricas, em particular a probabilidade de sucesso, são apropriadas uso em ferramentas de avaliação do desempenho de uma rede, pois sumarizam de forma inequívoca o comportamento da rede sob o ponto de vista do usuário. O restante do artigo está organizado da seguinte maneira: a Seção II discute trabalhos que tratam da medida da qualidade de enlaces e do uso do REM em redes sem fio; a Seção III apresenta brevemente o embasamento teórico deste trabalho; na Seção IV são apresentados alguns resultados numéricos preliminares do uso de mapas na avaliação da qualidade de uma rede; por fim, a Seção VI apresenta as conclusões desse trabalho.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

Diversas técnicas e estratégias de estimação da qualidade de um enlace rádio em uma rede sem fio podem ser encontradas na literatura, como discutido em [3], [5]. Tais estratégias geralmente são baseadas em métricas obtidas a partir de recursos de *hardware* encontrados nos transceptores de RF, como o Indicador de Intensidade de Sinal Recebido (*Received Signal Strength Indicator*, RSSI), o Indicador de Qualidade do Link (*Link Quality Indicator*, LQI), a Relação Sinal-Ruído (*Signal-to-Noise Ratio*, SNR), e a probabilidade de sucesso de recepção. Essas métricas podem alimentar técnicas que fornecem informações mais ricas a respeito do comportamento da rede, como, por exemplo, os mapas REM, alvo desse trabalho. Diversos artigos tratando do uso de REM gerados a partir de técnicas de geo-estatística podem ser encontrados na literatura. Dentre os mais relacionados ao presente trabalho, podemos citar as referências [6], [7], [8]. Em [6] os autores estudam o uso dos mapas REM na estimativa da qualidade de uma rede celular, com foco no problema da incerteza das posições de amostragem de potência recebida. Note-se que no presente trabalho assume-se que as posições onde as amostras de potência de recepção foram coletadas são conhecidas sem erros. Os autores de [7] avaliam a aplicação do modelo geo-estatístico conhecido como “Krigagem Ordinária” em redes de sensores sem fio para a geração de mapas REM e fazem uma revisão de trabalhos encontrados na literatura nessa área. Por fim, em [8], os autores discutem as ferramentas de geo-estatística usadas para geração de mapas REM em redes sem fio, analisando os efeitos dos diversos parâmetros envolvidos no processo de geração. Como já mencionado, o presente artigo apresenta os primeiros resultados de um trabalho em andamento visando o desenvolvimento de uma ferramenta de monitoração da qualidade de uma rede de sensores, usando,

entre outras técnicas, o mapa REM gerado a partir de técnicas *Kriging*.

III. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

Nessa seção será apresentada brevemente a fundamentação matemática utilizada na geração dos mapas REM. Antes, porém, são apresentados os modelos empregados para descrever os efeitos da propagação.

A. Modelo do canal de propagação

O modelo de canal de propagação considerado nesse trabalho inclui os efeitos da perda de percurso determinística e do desvanecimento de larga escala (*shadowing*). Adotamos aqui a formulação em que a potência de recepção $P_{rx}(d)$ medida a uma distância d do transmissor é descrita em função da potência medida a uma distância de referência d_0 [9], ou seja,

$$P_{rx}(d) = P_{rx}(d_0) - 10\beta \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma, \quad (1)$$

em que $P_{rx}(d_0)$ é a potência média medida à distância d_0 do transmissor, β é o expoente de perda de percurso e X_σ é uma variável aleatória de distribuição gaussiana de média nula e variância σ^2 que modela o desvanecimento de larga escala. Note-se que os ganhos das antenas, as eventuais perdas de cabos e conexões, e os efeitos da frequência de operação do sistema de comunicação estão embutidos na potência de referência $P_{rx}(d_0)$.

A partir da potência recebida, podemos estimar a probabilidade de sucesso de recepção PSR. Para um pacote de N bits e assumindo que (i) a recepção correta de um pacote ocorrerá apenas se todos os bits forem recebidos corretamente e (ii) os erros de bits são independentes entre si, então a probabilidade de sucesso de recepção de pacote é dada por $P_{suc} = (1 - P_b)^N$, em que P_b a probabilidade de erro de bit. Essa probabilidade P_b dependerá da modulação empregada na transmissão e da qualidade do sinal recebido. Em um caso mais geral de comunicação sem fio, a qualidade do sinal recebido pode ser degradada pelo ruído térmico e por sinais interferentes. Nesse presente trabalho, assumimos que as transmissões não sofrem interferência, de forma que a única fonte de degradação é o ruído térmico e o desvanecimento de larga escala. Para a apresentação de resultados numéricos, admitiremos aqui o uso de modulação FSK, cuja probabilidade de erro de bit P_b para a recepção não coerente é dada por [10]

$$P_b = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{E_b}{2N_0}\right), \quad (2)$$

em que E_b/N_0 é a relação entre a energia do bit e a densidade espectral de potência do ruído térmico. Adotaremos aqui $N_0 = 4 \times 10^{-21}$ W/Hz e a energia do bit será calculada como $E_b = P_{rx}/R_b$, em que R_b é a taxa de transmissão de bits.

B. Estimação do mapa REM

Alguns dos mecanismos envolvidos na propagação de um sinal de RF entre as antenas transmissora e receptora dependem fortemente do ambiente encontrado no entorno do caminho de propagação, fazendo com que os efeitos de propagação

encontrados em dois caminhos que estejam próximos entre si apresentem um certo grau de correlação. Esse é o caso, por exemplo, do desvanecimento devido ao bloqueio causado por grandes objetos. Essa correlação espacial dos mecanismos leva à correlação espacial entre os níveis de potência de recepção medidos em pontos próximos entre si. Tal correlação permite a estimação da potência de recepção em um ponto a partir de valores de potência de recepção medidos em pontos próximos. No campo da geo-estatística essa correlação espacial entre valores de uma grandeza medidos nas coordenadas \mathbf{s}_i e \mathbf{s}_j é quantificada pelas métricas **semi-variograma** $\gamma(\mathbf{s}_i, \mathbf{s}_j)$ e **co-variograma** $C(\mathbf{s}_i, \mathbf{s}_j)$. Seja $P(\mathbf{s}_i)$ uma grandeza espacial observada na coordenada \mathbf{s}_i . Uma vez que cada amostra espacial da grandeza deve ser entendida como uma variável aleatória associada a um processo estocástico espacial, então, o semi-variograma e o co-variograma são definidos, respectivamente, como [8]

$$\gamma(\mathbf{s}_i, \mathbf{s}_j) = \frac{1}{2} \mathbb{E} \{ [P(\mathbf{s}_i) - P(\mathbf{s}_j) - \mathbb{E}\{P(\mathbf{s}_i) - P(\mathbf{s}_j)\}]^2 \}, \quad (3)$$

e

$$C(\mathbf{s}_i, \mathbf{s}_j) = \mathbb{E} \{ [P(\mathbf{s}_i) - \mu(\mathbf{s}_i)][P(\mathbf{s}_j) - \mu(\mathbf{s}_j)] \}, \quad (4)$$

em que $\mu(\mathbf{s}_i)$ e $\mu(\mathbf{s}_j)$ representam as médias de $P(\mathbf{s}_i)$ e $P(\mathbf{s}_j)$, respectivamente. Assumindo estacionariedade de segunda ordem, duas propriedades a respeito das funções co-variograma e semi-variograma merecem ser destacadas: (i) o valor esperado do processo estocástico $P(\mathbf{s})$ existe e é constante e, portanto, $\mathbb{E}\{P(\mathbf{s})\} = \mu(\mathbf{s}) = \mu$; (ii) a variância e a covariância dependem apenas da distância de separação entre os pares de pontos amostrados, de forma que $C(\mathbf{s}_i, \mathbf{s}_i + h) = C(h)$ e $h = |\mathbf{s}_i - \mathbf{s}_j|$ [6]. Nesse sentido, o semi-variograma do processo $P(s)$ pode ser estimado pelo método dos momentos de Matheron, a partir de [11]

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N_a} \sum_{|\mathbf{s}_i - \mathbf{s}_j| = h} [P(\mathbf{s}_i) - P(\mathbf{s}_j)]^2, \quad (5)$$

em que N_a é o número de pares de pontos separados por uma distância h . Por sua vez, o co-variograma pode ser estimado usando $\hat{C}(h) = S - \hat{\gamma}(h)$, em que S é a variância Sill do semi-variograma, sendo igual ao seu máximo valor. Em um caso prático, o semi-variograma e o co-variograma são estimados a partir de amostras coletadas em um conjunto finito de pontos e, em seguida, funções analíticas são ajustadas. As funções mais utilizadas na literatura são a esférica, a gaussiana e a exponencial [12] [7]. A partir dessas funções analíticas que descrevem o semi-variograma e o co-variograma, é possível prever a magnitude da grandeza estudada ao longo de toda a região, ou seja, nos locais em que não foi feita a amostragem [11]. Essas estimativas podem ser obtidas tomando como base vários modelos matemáticos. Dentre eles, podemos citar as técnicas de interpolação usando o método dos Polígonos, Inverso da Distância (ID), Spline, “krigagem” Simples (KS), “Krigagem” Ordinária (KO), entre outros. Maiores detalhes sobre essas técnicas podem ser obtidas em [6], [7] e [12].

IV. RESULTADOS NUMÉRICOS

Nessa seção é apresentado um exemplo de aplicação dos mapas de ambiente rádio para RSSF. Como já mencionado,

em uma situação típica o mapa é construído a partir amostras da potência de recepção P_{rx} , medidas em diversos pontos da área de cobertura da rede. No entanto, nesse trabalho as amostras de potência de recepção foram obtidas por meio de simulação¹ do ambiente de propagação, seguindo o modelo apresentado em (1), com especial atenção à correlação espacial do desvanecimento de longo prazo, modelado pela variável X_σ . A partir das amostras espaciais da potência de recepção, o mapa REM foi então gerado, empregando-se o método KO citado na Seção III-B. Em seguida, com base no mapa de potência de recepção, gerou-se o mapa de probabilidade de sucesso de recepção. Alguns detalhes da construção desses mapas são apresentados a seguir.

A. Simulação do ambiente de propagação

Para a geração das amostras da potência recebida em um ambiente com desvanecimento de longo prazo correlacionado foi empregada a técnica apresentada em [13]. De acordo com essa técnica, supõem-se que os processos de desvanecimento observados em pontos separados por uma distância maior que a chamada distância de decorrelação d_{des} serão decorrelacionados. Assim, a técnica descrita em [13] começa com a criação de uma grade regular quadrada de largura d_{des} sobre a região servida pelo transmissor considerado. Em seguida, amostras decorrelacionadas de um processo gaussiano de média nula e variância σ^2 são atribuídas aos pontos dessa grade. Essas amostras representam o desvanecimento de longo prazo expresso em decibéis. O desvanecimento observado em qualquer ponto da região (representado pelo termo X_σ em (1)) é então calculado em função dos valores de desvanecimento dos quatro pontos da grade mais próximos do ponto em questão. Para essa análise numérica, consideramos uma área de serviço quadrada de dimensões 250×250 m, com a antena transmissora localizada no centro da área. A Figura 1 mostra a potência de recepção em função da posição na área, com valores gerados pela técnica descrita acima. Nessa figura estão mostrados também os pontos da grade regular (indicados por ●) empregados na técnica de geração de amostras correlacionadas de desvanecimento. Maiores detalhes sobre essa a técnica de geração de desvanecimento correlacionado usada aqui são apresentados em [13]. Os parâmetros da rede usados na geração dos resultados da Figura 1 e de outras mostradas nessa análise estão apresentados na Tabela I. Esses valores representam um cenário real de RSSF. Em trabalhos futuros, a geração dos mapas REM será realizada com tecnologias de RSSF reais, com os valores dos parâmetros aqui apresentados.

B. Construção do REM

Para a construção do mapa REM da potência recebida, foram selecionadas algumas posições na área de serviço e determinados os respectivos valores de P_{rx} , empregando a técnica de simulação discutida acima (o que equivaleria a fazer medidas de campo). A partir dessas amostras espaciais de

¹Para a continuação desse trabalho, estão previstas medições em campo da potência de recepção para a construção do mapa REM. O uso de valores simulados de potência de recepção nesse trabalho presta para uma avaliação preliminar.

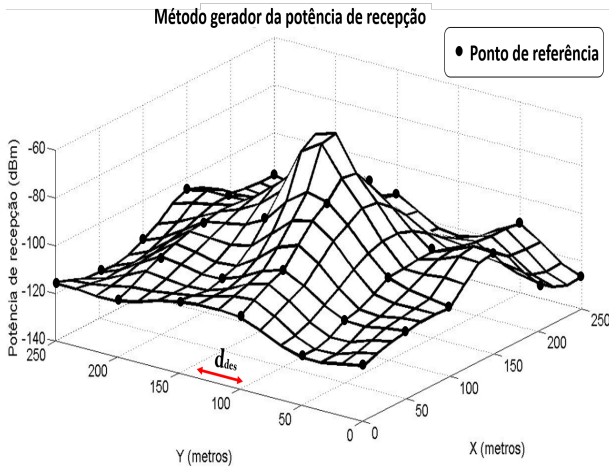


Fig. 1. Potência de recepção P_{rx} , com transmissor localizado no centro da área, e distância de descorrelação d_{des} . Os círculos (●) indicam os pontos da grade de desvanecimento descorrelacionado.

TABELA I
VALORES DOS PARÂMETROS

Parâmetro	Valor
Área considerada	250 m × 250 m
Número de amostras de pot. RX	$N = 50$
Pot. de transmissão	$P_{tx} = 0$ dBm
Ganhos de antenas TX e RX	2,2 dBi
Desvio padrão desvanecimento	$\sigma = 5$ dB
Expoente de perda de percurso	$\beta = 4$
Distância de descorrelação	$d_{des} = 50$ m
Tamanho do pacote	$N = 512$ bits
Largura do canal	$B = 162,5$ kHz
Modulação	2-FSK, não coerente
Taxa de transmissão	$R_b = 38,4$ kb/s
Figura de ruído do receptor	$F = 10$ dB

P_{rx} , o semi-variograma correspondente foi estimado, usando a expressão (5), cujo resultado levou ao ajuste de uma função exponencial como modelo analítico para o semi-variograma, como mostra a Figura 2. Por fim, usando a função de semi-variograma ajustada, foram geradas estimativas da potência de recepção em diversos pontos da região usando a técnica “Krigagem Ordinária”, resultando no mapa REM mostrado na Figura 3. Detalhes dos procedimentos de ajuste da função analítica do semi-variograma e da geração das estimativas de potência de recepção são apresentados em [8].

Usando as estimativas de potência de recepção fornecidas pelo mapa REM, gerou-se o mapa de probabilidade de sucesso de recepção de pacotes, empregando a expressão (2). O mapa resultante é mostrado na Figura 4. O mapa da potência recebida mostra, como esperado, a redução gradual da potência de recepção com o aumento da distância do enlace, sobreposta a uma variação aleatória suave, devido ao desvanecimento de longo prazo correlacionado espacialmente. Por outro lado, o mapa da probabilidade de recepção de pacotes com sucesso mostra variações mais abruptas, resultando em um mapa com contornos melhor definidos. Note-se que o mapa de P_{suc} usa escala linear, o que facilita a distinção de regiões com probabilidades de sucesso altas o suficiente, digamos, $P_{suc} >$

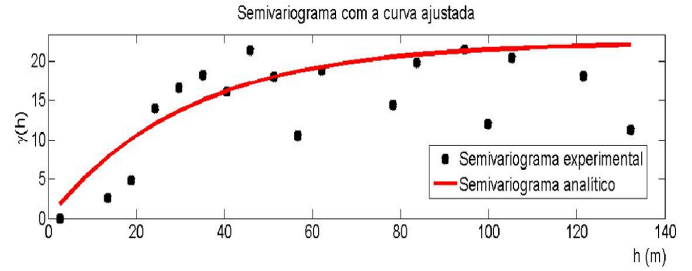


Fig. 2. Semivariograma da potência recebida P_{Rx} .

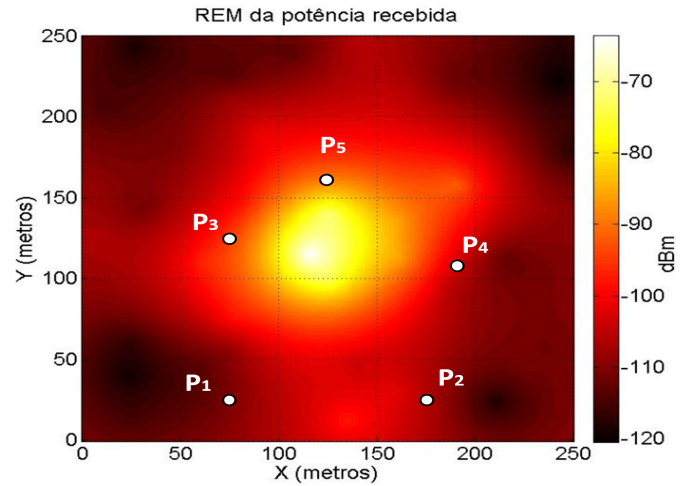


Fig. 3. Mapa de ambiente rádio da potência de recepção. Os pontos P_1, P_2, \dots, P_5 indicam as posições usadas para a validação.

90%, daquelas com probabilidades demasiadamente baixas, como $P_{suc} < 10\%$.

C. Validação

Em uma situação real de construção dos mapas de potência de recepção e de probabilidade de sucesso, o passo seguinte à construção do mapa seria a sua validação, ou seja, a comparação entre os valores fornecidos pelos mapas e seus respectivos valores reais. Nessa seção, mostramos os resultados de tal validação, lembrando que nesse trabalho os resultados “reais” foram obtidos por meio de simulação.

Para a validação foram selecionados cinco pontos, indicados por $P_i, i = 1, \dots, 5$ na Figura 3. Os valores considerados verdadeiros da potência de recepção, denotados aqui por $P_{rx,i}$, foram obtidos a partir da simulação apresentada na Seção IV-A, e comparados com os valores fornecidos pelo mapa REM, denotados por $\hat{P}_{rx,i}$. Esses dois conjuntos de valores são mostrados na Tabela II. Observa-se que os valores estimados pelo mapa REM estão bastante próximos daqueles reais, com um erro absoluto menor que 1,5 dB. Esse bom resultado na predição da potência de recepção fornecida pelo mapa gerado pela técnica de Kriging pode ser justificado parcialmente pelo fato de terem sido usadas $N = 50$ amostras espaciais na geração do mapa. De fato, se um número menor de amostras for usado para a geração do mapa, o erro de estimação da potência recebida tenderá a aumentar. Esse efeito do número de amostras na qualidade da estimação pode ser observado na

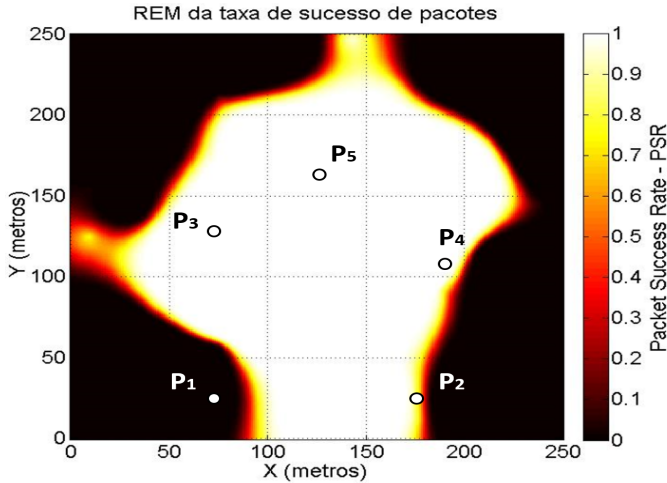


Fig. 4. Mapa da probabilidade de recepção com sucesso P_{suc} . Os pontos P_1, P_2, \dots, P_5 indicam as posições usadas para a validação.

TABELA II

VALIDAÇÃO DO MAPA DA POTÊNCIA RECEBIDA, COM MAPA GERADO A PARTIR DE $N = 50$ AMOSTRAS ESPACIAIS.

Ponto i	Distância até a base (m)	$P_{rx,i}$ (dBm) Real	$\hat{P}_{rx,i}$ (dBm) REM
1	108,8	-110,4	-111,7
2	108,8	-106,0	-106,2
3	50,0	-94,6	-93,4
4	68,0	-103,1	-104,2
5	35,0	-88,2	-88,5

Tabela III, que mostra o erro de estimação $E_i = P_{rx,i} - \hat{P}_{rx,i}$, em dB, e a raiz quadrada do erro médio quadrático R , para $N = 5, 25$ e 50 amostras espaciais. Apesar do número de pontos de validação considerados aqui ser pequeno, é possível observar claramente o efeito do número de amostras N na precisão do mapa rádio. Para as etapas seguintes desse trabalho, está prevista a uma investigação mais aprofundada a respeito dessa questão, agora em um ambiente real, em um cenário típico de uso de redes de sensores para aplicações de IoT.

V. DISCUSSÕES

Os mapas de ambiente rádio apresentados na seção anterior poderão fornecer aos operadores de redes de sensores para IoT informações essenciais a respeito da qualidade dos enlaces rádios da rede. A partir dessa informação, o operador poderá identificar a necessidade de ajustes dos níveis de potência de transmissão, ou mesmo a instalação de novos transmissores ou repetidores, visando melhorar o nível de qualidade de seu serviço prestado. Além disso, por meio de atualizações periódicas do mapa, será possível identificar regiões em que o nível de recepção apresenta variações temporais. A intensidade das variações do nível de potência de recepção também poderão ser usadas para caracterizar a qualidade do serviço oferecido.

VI. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentados resultados preliminares de um estudo sobre o uso de mapas de ambientes rádio para a

TABELA III

ERROS DE ESTIMAÇÃO E_i E RAIZ QUADRADA DO ERRO MÉDIO QUADRÁTICO R , EM dB, $N = 5, 25$ E 50 AMOSTRAS ESPACIAIS.

Ponto	$N = 5$	$N = 25$	$N = 50$
1	-4,5	-2,7	-1,3
2	0,8	-1,9	-0,2
3	13,8	5,2	1,2
4	3,0	-1,0	-1,1
5	14,7	-0,8	-0,4
R	3,6	2,8	1,0

monitoração da qualidade de serviço em redes de sensores sem fio que suportam aplicações de IoT. O sucesso de aplicações de IoT dependem de maneira significativa da qualidade do serviço provido por tais redes. Foram apresentadas aqui algumas das técnicas utilizadas na geração de mapas da potência recebida em uma área de serviço. Tais mapas são gerados a partir de amostras de potência de recepção, das quais é extraída essencialmente a informação a respeito da correlação espacial observada na potência de recepção. Na continuação desse trabalho pretende-se explorar o uso de tais mapas em estratégias e ferramentas de monitoração da qualidade de serviço de redes de sensores, que auxiliarão os operadores de redes na provisão do serviço.

REFERÊNCIAS

- [1] Y. Song, J. Lin, M. Tang, and S. Dong, "An internet of energy things based on wireless lpwan," *Engineering*, vol. 3, no. 4, pp. 460–466, 2017. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809917306057>
- [2] G. Gaillard, D. Barthel, F. Theoleyre, and F. Valois, "Service level agreements for wireless sensor networks: A wsn operator's point of view," in *2014 IEEE Network Operations and Management Symposium (NOMS)*, May 2014, pp. 1–8.
- [3] N. Baccour, A. Koubaa, L. Mottola, M. A. Zúñiga, H. Youssef, C. A. Boano, and M. Alves, "Radio link quality estimation in wireless sensor networks: A survey," *ACM Trans. Sen. Netw.*, vol. 8, no. 4, pp. 34:1–34:33, Sep. 2012. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/2240116.2240123>
- [4] A. Fanimokun and J. Frolik, "Effects of natural propagation environments on wireless sensor network coverage area," in *Proceedings of the 35th Southeastern Symposium on System Theory, 2003.*, March 2003, pp. 16–20.
- [5] K. Srinivasan, P. Dutta, A. Tavakoli, and P. Levis, "An empirical study of low-power wireless," *ACM Trans. Sen. Netw.*, vol. 6, no. 2, pp. 16:1–16:49, Mar. 2010. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/1689239.1689246>
- [6] R. Augusto and C. Panazio, "On geostatistical methods for radio environment maps generation under location uncertainty," *Journal of Communication and Information Systems*, vol. 33, no. 1, May 2018. [Online]. Available: <https://jcis.sbrc.org.br/jcis/article/view/477>
- [7] J. A. V. Poblete, "Wireless sensor network and kriging," Master's thesis, University of Valencia, 2010.
- [8] R. Augusto and C. Panazio, "Sobre a geração de mapas de ambiente de rádio com kriging ordinário," in *SBRT 2016 - XXXIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, Sept 2016, pp. 883–887.
- [9] M. D. Yacoub, *Foundations of Mobile Radio Engineering*, 1st ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Inc., 1993.
- [10] M. C. V. I. F. Akyildis, *Wireless Sensor Networks*, 2010.
- [11] R. A. S. Júnior, "Geração de mapas de ambiente de rádio em sistemas de comunicações sem fio com incerteza de localização," Ph.D. dissertation, Universidade de São Paulo, 2018.
- [12] J. K. Y. e P. M. B. Landim, *Geostatística conceitos e aplicações*. Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil, 2013.
- [13] J. C. Chuang, "Autonomous adaptive frequency assignment for tdma portable radio systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 40, no. 3, pp. 627–635, Aug 1991.