

Sistema Colaborativo para Medição e Análise de Redes Celulares Baseado em Aplicativo Móvel

Jorge Guilherme S. dos Santos, Letícia Moreira Valle, Eduardo Calandrini R. da Costa e Ugo Silva Dias

Resumo—Este artigo apresenta uma proposta de sistema colaborativo para medição e análise de redes celulares baseado em parâmetros que representam a experiência dos usuários autenticados. O sistema coleta, por meio de um aplicativo instalado nos aparelhos celulares Android dos usuários, parâmetros importantes relacionados ao espectro de rádio-frequência, às taxas dos dados trafegados, ao sistema operacional e aos aspectos físicos de cada aparelho celular. As informações obtidas são enviadas a um conjunto de servidores para processamento dos dados e posterior consultas em rede. Por fim, com este sistema, é possível gerar diversos resultados úteis que permitam obter e apresentar informações sobre cobertura e taxa de dados das redes das operadoras, de forma individualizada ou coletiva, em diferentes regiões do mundo, além de fazer análises preditivas sobre as características de propagação do canal sem fio num determinado caminho percorrido.

Palavras-Chave—Aplicativo celular, cobertura, medição, sistemas distribuídos, taxa de dados.

I. INTRODUÇÃO

A implementação e a gerência de redes móveis dependem de indicadores de desempenho tais como latência, taxa de transmissão, intensidade do sinal recebido e demanda dos usuários [1], que podem ser utilizados pelas operadoras para auxiliar na tomada de decisão sobre planejamento e otimização das redes, assim como ajudar a identificar potenciais falhas de cobertura e de capacidade. A obtenção desses indicadores pode ser feita de acordo com pelo menos duas abordagens diferentes. A primeira é a realização de medições controladas utilizando equipamentos e mão de obra especializada na forma de *drive tests*. Devido ao custo, essa abordagem impede as operadoras de realizar testes contínuos na cobertura além de limitar o escopo geográfico das medições, o que pode fazer com que falhas na cobertura não sejam percebidas corretamente, por sua vez provocando efeitos negativos na experiência dos clientes. Uma alternativa a essa abordagem consiste em fazer medições por meio de aplicativos instalados nos aparelhos celulares dos usuários. Essas medições são feitas por diversos dispositivos distribuídos geograficamente e enviadas para servidores remotos para processamento [2], o que naturalmente aumenta o escopo geográfico das medições. Isso permite que os testes sejam feitos de forma contínua, aumentando a confiabilidade dos mesmos. De fato, diferentes

Os autores pertencem ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília. E-mails: {jorge,leticia,eduardo.calandrini}@redes.unb.br e ugodias@ieee.org.

A pesquisa de J. G. S. dos Santos foi parcialmente apoiada pela CAPES e pela SEST-MP (TED 011/2016 MP-FUB). A pesquisa de L. M. Valle foi parcialmente apoiada pela CAPES e pela SENACON-MJ (TED 01/2015 MJ-FUB). As pesquisas de E. C. R. da Costa e U. S. Dias foram parcialmente apoiadas pela SENACON-MJ (TED 01/2015 MJ-FUB).

exemplos desse tipo de aplicação já foram apresentados na literatura [1]–[5].

Também é possível utilizar medições individuais e sequenciais de cada usuário do sistema como forma preliminar de estimar e caracterizar o canal rádio-móvel. Por mais que estudos apontem que as diferenças nas medições realizadas entre diferentes aparelhos seja um empecilho para a estimação exata da perda de percurso do ambiente [6], a análise dos efeitos deletérios do multipercurso e do sombreamento pode ser feita de forma independente uma vez que os fenômenos podem ser processados separadamente. [7].

Recentemente [3]–[6], pesquisadores apresentaram dados e testaram ferramentas computacionais semelhantes, incluindo suas respectivas precisões técnicas. Além disso, há propostas de sistemas que surgiram com o objetivo de fazer testes de qualidade e desempenho de forma colaborativa, algumas delas permitindo a execução de testes personalizados criados por pesquisadores e usuários [2]. No entanto, pelo conhecimento dos autores, não é possível identificar na literatura qualquer sistema que tenha como princípio a colaboração dos usuários finais de modo a obter e a apresentar informações sobre cobertura e taxa de dados das redes das operadoras, de forma individualizada ou coletiva, em diferentes regiões do mundo, além de fazer análises preditivas sobre as características de propagação de um determinado canal sem fio num caminho percorrido. De fato, há uma ferramenta comercial com objetivos razoavelmente tangíveis [8], porém, ela apresenta limitações acentuadas na precisão da generalização do mapa de cobertura, além de não implementar todos os recursos que aqui propostos.

II. ARQUITETURA DO SISTEMA

O sistema desenvolvido é baseado no modelo *cliente-servidor*. O *back-end* é responsável por atender às solicitações dos clientes e é formada por uma API REST, por um servidor de imagens de mapa, ambos escritos em Python, e por um banco de dados não-relacional baseado em documentos no qual os dados são salvos em formato desnormalizado. Há uma terceira entidade responsável pelo *caching* de consultas frequentes, um banco de dados não-relacional do tipo chave-valor, presente no sistema para melhorar a experiência de uso através da redução dos tempos de espera das chamadas ao *back-end*.

Os principais clientes nessa arquitetura são os dispositivos dos usuários, pois são os responsáveis por enviar as medições realizadas. As medições são feitas em intervalos de tempo configuráveis (aproximadamente 1 segundo) e são enfileiradas

e armazenadas em lotes que são enviados para os servidores de aplicação em intervalos de tempo também configuráveis (1 minuto). Quando um dispositivo perde conectividade com a rede, a aplicação continua fazendo medições, mas armazenando-as localmente até o momento em que a conectividade é reestabelecida, quando os dados armazenados são finalmente enviados.

A API padrão do Google para Android é a principal base computacional que forma o conjunto sistêmico de coleta de dados. O sistema é capaz de obter 38 parâmetros e está restrito, até o presente momento, em aparelhos celulares com sistema operacional Android. Dentre os parâmetros coletados, pode-se destacar:

- Intensidade do sinal recebido;
- Velocidade de deslocamento do dispositivo;
- Localização e sua precisão em coordenadas decimais (EPSG:4326) [9];
- Nome da operadora;
- Número da tecnologia;
- Tipo de conexão em uso (dados móveis ou Wi-Fi);
- Instante de medição (*timestamp*);
- Taxa de dados instantânea;

Como a experiência dos usuários é fundamental nesse tipo de sistema, foram tomadas decisões para otimizar o funcionamento do aplicativo nos *smartphones*, tornando-o mais responsivo. Entre as decisões que ajudam nesse aspecto, está o fato de que todos os cálculos que exigem processamento necessariamente precisam ser feitos nos servidores, de modo que o aplicativo se responsabiliza a medir, armazenar temporariamente e exibir os dados que são calculados e disponibilizados pelos servidores.

A. Cálculo do grid hexagonal para mapa de cobertura

O sistema divide e apresenta a cobertura de medições de milhões de pontos em hexágonos regulares, de modo a permitir o perfeito encaixe das formas geométricas ao longo do mapa, o que não ocorreria com círculos por exemplo. Isso significa que para qualquer ponto de medição feito no mundo, haverá um hexágono que o circunscreve, o que permite calcular as coordenadas do centro de tal hexágono. Junto com o cálculo das coordenadas, o sistema calcula a média das intensidades de sinal medidas em cada ponto posicionado dentro de cada polígono. O raio (ou lado) do hexágono é arbitrário e pode ser modificado facilmente através da edição de um arquivo de configuração presente nos servidores de aplicação.

O cálculo dos hexágonos utiliza o algoritmo de equivalência com o sistema de coordenadas hexagonal simétrico proposto em [10]. Assim, coordenadas cartesianas (longitude, latitude) = (x, y) são convertidas para o sistema hexagonal (x', y', z') em um processo de duas etapas. Primeiro, as coordenadas cartesianas são convertidas para o sistema de coordenadas oblíquas usando a matriz de transformação linear [10]

$$\begin{bmatrix} q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & 0 \\ -1/3 & \sqrt{3}/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ s \end{pmatrix}, \quad (1)$$

em que s representa o tamanho do lado do hexágono. Em seguida, no *grid* hexagonal, duas das coordenadas são as

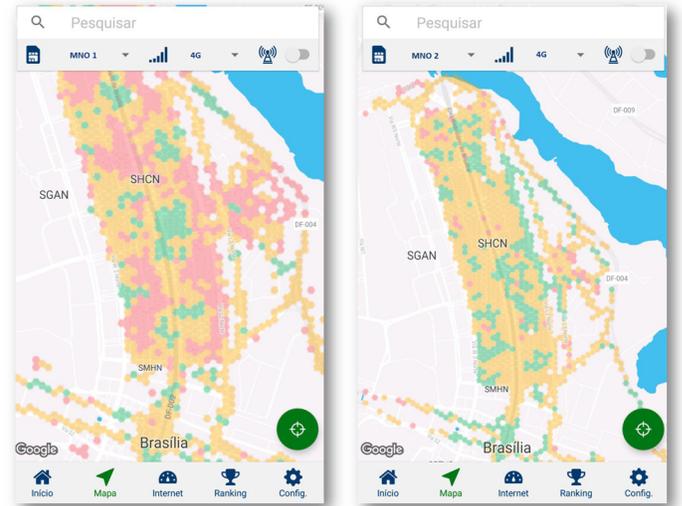


Figura 1. Mapas de cobertura de duas MNOs distintas na Asa Norte, Brasília. Hexágonos verdes representam que as médias locais de potências recebidas pelos usuários são superiores a -80 dBm, amarelos representam o intervalo de -80 a -100 dBm, e vermelhos representam médias inferiores a -100 dBm.

mesmas das coordenadas oblíquas (q, r) [10]. Além disso, vale a condição $x' + y' + z' = 0$. Após arredondamento, as coordenadas hexagonais (chamadas aqui de x'_r, y'_r, z'_r) são convertidas de volta para o sistema de coordenadas oblíquas através do descarte do termo y'_r , ou seja, $(q_r, r_r) = (x'_r, z'_r)$. Então, finalmente, a matriz de transformação inversa é utilizada para calcular as coordenadas cartesianas do centro do hexágono (longitude, latitude). Dessa forma, dado qualquer ponto no mapa em coordenadas decimais, é possível calcular o hexágono que circunscreve tal ponto.

III. MEDIÇÕES DE CAMPO E ANÁLISES

O sistema pode gerar resultados úteis de acordo com a necessidade de cada usuário. Para uso geral, quando o usuário está interessado em conhecer a operadora com melhor intensidade de sinal para uma determinada região, está disponível a visualização por meio de um mapa de cobertura baseado em hexágonos assim como por meio de uma tela de ranking. Cada hexágono recebe uma cor que representa um intervalo de potência média recebida por todos os aparelhos naquela área. Para o cálculo do ranking, a seguinte formulação é definida

$$v_i = \left(\frac{1}{w_c + w_p} \right) \left(w_c \frac{c_i}{\max\{c_i\}} + w_p \frac{p_i}{\max\{p_i\}} \right), \quad (2)$$

em que v_i representa o valor usado para classificação referente à operadora i , w_c e w_p são os pesos atribuídos à contagem de hexágonos e à média de intensidade de sinal, respectivamente, c_i é a contagem de hexágonos para a operadora i , e p_i é o valor da média de intensidade de sinal para a operadora i .

Para os administradores e pesquisadores envolvidos no desenvolvimento do sistema há um painel de controle interno de uso restrito que permite visualizar pontos de medição individuais de qualquer usuário.

Uma imagem contendo duas capturas de tela do aplicativo aberto com a visualização do mapa de cobertura é apresentado

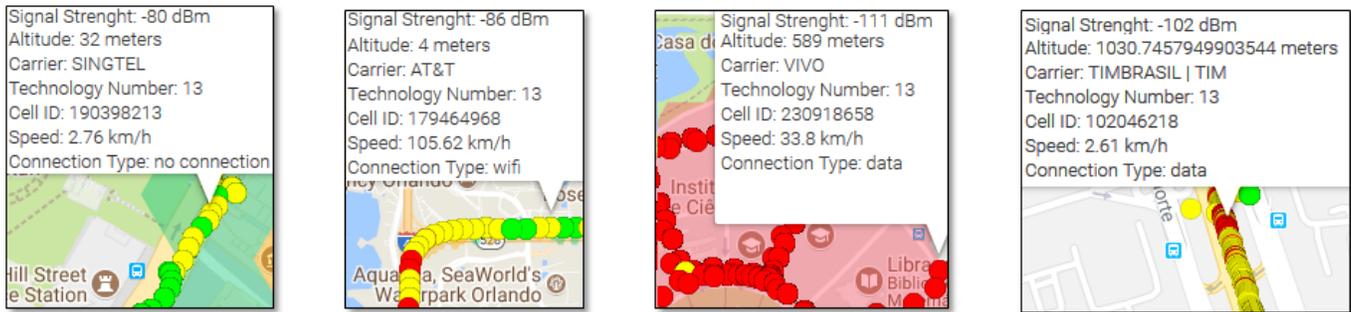


Figura 2. Medições de campo. Da esquerda para a direita: (a) Cingapura. Dispositivo: Nexus 5x; (b) Orlando, EUA. Dispositivo: Nexus 5x; (c) Unicamp, Campinas, Brasil. Dispositivo: Moto G4; (d) Eixão Norte, Brasília, Brasil. Dispositivo: Galaxy S7 Edge. Imagens editadas para remover informações sensíveis.

na Figura 1. Cada uma dessas telas representa a cobertura 4G LTE para uma operadora (MNO) em uma determinada localidade. Cada um dos hexágonos mostrados foram calculados utilizando o algoritmo descrito na Seção II-A e recebe uma cor diferente de acordo com o valor da média das intensidades de sinal correspondente. Cada combinação de operadora e tecnologia é uma camada de imagens de mapa (chamadas de *tiles*) que é sobreposta a um mapa no aplicativo. Dessa forma, os usuários podem comparar diferentes operadoras (e tecnologias) por meio da simples ação de mudar seleções em menus.

A. Campanhas de Medição Individualizadas

As campanhas de medição individualizadas também podem ser realizadas pelo aplicativo, em moldes equivalente a um *drive* ou *walk-test*. Esse recurso permite a visualização dinâmica, sobre um mapa, de cada um dos pontos de medição de cada aparelho celular. Todas as ferramentas utilizadas são gratuitas e os resultados gerados não precisam de pós-processamento exíguo.

De forma interessante, essa funcionalidade permite ter o conhecimento do estado atual da rede celular em medição, de modo a verificar as otimizações e correções que porventura sejam necessárias à rede. As capturas de tela apresentadas na Figura 2 ilustram alguns pontos de medição conforme são visualizados no sistema. Na Figura 2 (a), é possível observar uma sequência de pontos que foram medidos na Hill Street, em Cingapura. Um desses pontos está destacado para mostrar os detalhes de alguns parâmetros medidos em um momento específico. Os dados mostram uma medição com intensidade de sinal de -80 dBm medida com o aparelho conectado à rede usando canalização de 1,8 GHz, a uma altitude de 32 metros e em movimento. Vale observar, nesse caso, a presença da informação *no connection*, que indica que os pontos foram medidos quando não havia conexão com a Internet disponível, evidenciando a capacidade do aplicativo de fazer medições *offline*, armazenando os pontos localmente para posterior envio ao servidor para armazenamento definitivo e processamento devido.

Outra campanha de medição individual interessante é apresentada na Figura 2 (b) na cidade de Orlando, EUA. Essa medição se caracteriza pela velocidade de deslocamento do dispositivo (aproximadamente 105 km/h) e pela forma de

conexão, que é Wi-Fi. Essa medição foi feita dentro de um veículo em movimento utilizando os serviços de dados móveis de outro aparelho próximo usando um *hotspot* Wi-Fi. Esse exemplo ajuda a demonstrar a capacidade de coleta de informações do sistema.

A campanha de medição individual da Figura 2 (c) apresenta um deslocamento em um padrão circular concêntrico. Ao contrário das medições anteriores, essa medição se caracteriza pela utilização de rede de dados móveis (conforme indicado pelo campo *Connection Type*) e de uma velocidade de deslocamento intermediária, de aproximadamente 33 km/h. Novamente, a essa velocidade, a medição foi feita de dentro de um veículo em movimento.

Para ilustrar melhor a coleta de dados do sistema, uma campanha de medição específica foi feita com uma velocidade de deslocamento mais baixa do que a das medições apresentadas anteriormente. Essas medições consistiram de diversas caminhadas (*walk-test*) realizadas ao longo de um mesmo percurso com diversos aparelhos diferentes, cada um realizando medições na rede de uma operadora diferente.

A Figura 2 (d) ilustra essas medições. Na imagem são mostrados parte dos 5000 pontos que correspondem aos dois sentidos de deslocamento da medição realizada com um dos dispositivos utilizados no teste. A tecnologia em uso no momento é identificada pelo número 13 (LTE 4G).

Para ilustrar o comportamento do sinal recebido pelo aparelho ao longo do tempo, um dos percursos de ida e volta da campanha de medição mostrada na Figura 2 (d) foi escolhido. Como a identificação de ERB é enviada pela rede e é lida pelo aplicativo para ser enviada para os servidores junto com as medições, é possível associar a informação de intensidade de sinal com a identificação da ERB e, assim, identificar possíveis eventos de *handoff*, como pode ser observado na Figura 3.

Para cada uma das ERBs identificadas foi utilizada uma cor diferente. Logo, é possível identificar seis ERBs diferentes e estimar os momentos em que ocorreram os *handoffs*. Por se tratar de um deslocamento feito em dois sentidos, a primeira metade do gráfico se refere a um sentido enquanto a segunda metade se refere ao sentido contrário. É possível observar que não há simetria ao redor da região central desse gráfico no que diz respeito às cores e seu posicionamento, mostrando que a conexão em uma célula nem sempre é uma função apenas da distância do terminal, mas também de outras configurações da

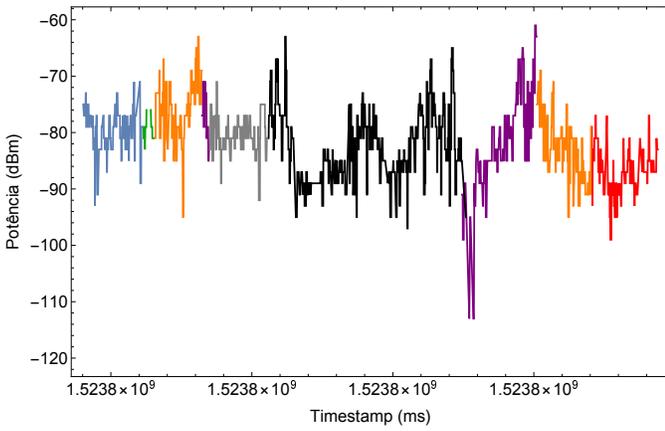


Figura 3. Perfil de potência com destaque para realização de *handoff* diferenciado por cores em rede 3G de uma única MNO. Cada cor representa uma célula em que o aparelho esteve conectado. Dispositivo: Xiaomi Mi A1.

rede.

Ainda referente à campanha de medição da Figura 2 (d), foi realizada uma análise preliminar do canal em relação ao desvanecimento de larga escala. Já que a taxa de amostragem de dados máxima permitida pelo sistema operacional Android é insuficiente para capturar nuances de desvanecimento rápido, o sinal medido nas campanhas de medição são compostos por perda de percurso e sombreamento. Como o objetivo aqui é fazer análises preliminares do desvanecimento em larga escala, os dados medidos devem ser pré-processados para retirada da perda de percurso por meio de uma regressão linear da curva de potência do sinal. O resultado dessa operação é uma curva de média zero composta por variações do sinal relacionadas a obstruções naturais (relevo e vegetação) e a construções, como casas e edifícios, que fazem com que o móvel fique em uma região de sombra. A Figura 4 ilustra a PDF de sombreamento para o operador de rede móvel (MNO) de número 1 para duas tecnologias diferentes e o ajuste das curvas empíricas com a distribuição Gamma Generalizada de 3 parâmetros, uma generalização da já consagrada distribuição Log-normal, definida por [11]

$$f_{\Gamma}(r) = \frac{\gamma\beta^{\lambda/\gamma}r^{\lambda-1}}{\Gamma(\lambda/\gamma)} \exp(-\beta r^{\gamma}), \quad (3)$$

em que $\Gamma(\cdot)$ é a função Gamma, e λ , γ e β são derivados a partir de [11, Eq. 1].

Observa-se na Figura 4 o comportamento menos determinístico da PDF da envoltória da MNO 1 para a tecnologia 4G em comparação com a 3G. Observa-se também que as curvas teóricas se aproximam muito bem do comportamento das curvas empíricas, obtendo um erro quadrático médio (MSE) de 1.54% para a curva 3G e de 2.26% para a curva 4G. A Tabela I ilustra os valores dos parâmetros utilizados nos ajustes.

Tabela I
PARÂMETROS ESTIMADOS DA FUNÇÃO GAMMA GENERALIZADA

Tecnologia da MNO	$\hat{\gamma}$	$\hat{\lambda}$	$\hat{\beta}$	MSE (%)
3G	1.18	2.35	1.7	1.54
4G	1.16	3.2	2.5	2.26

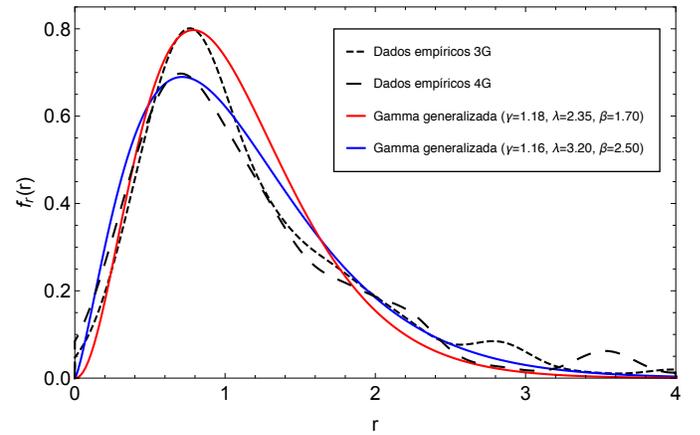


Figura 4. PDF da envoltória da MNO 1 para sinais 3G e 4G com comparação entre curvas experimentais e teóricas. Local: Eixão Norte, Brasília.

Por fim, a função de autocorrelação (ACF) também é investigada com o objetivo de analisar o grau de similaridade entre amostras em um dado local, assim como investigar o ajuste devido entre curvas empíricas e teóricas modeladas pela distribuição α - μ [12], definida como [12]

$$A_R(d) = \frac{\hat{r}\Gamma^2(\mu + \frac{1}{\alpha}) {}_2F_1(-\frac{1}{\alpha}, -\frac{1}{\alpha}; \mu; \rho(d))}{\mu^{\frac{2}{\alpha}}\Gamma^2(\mu)}, \quad (4)$$

em que α é o parâmetro de potência que representa as não-linearidades do meio de propagação, μ está relacionado com número de clusters de multipercurso, $\hat{r} = \sqrt[\alpha]{E(r^\alpha)}$ e $\rho(d) = \left| \frac{\zeta I_0(\sqrt{\kappa^2 - (2\pi d/\lambda)^2 + j4\pi\kappa d \cos(\varphi)/\lambda}) + (1-\zeta)J_0(2\pi d/\lambda)I_0(\kappa)}{I_0(\kappa)} \right|^2$, em que $0 \leq \zeta \leq 1$ indica a quantidade de recepção direcional, $\varphi \in [-\pi, \pi]$ representa a direção média do ângulo de chegada e $\kappa \geq 0$ controla a largura do feixe.

A Figura 5 e a Tabela II ilustram os resultados das curvas práticas e teóricas e os valores dos parâmetros estimados, respectivamente. Observa-se, além do excelente ajuste entre as curvas empíricas e teóricas, como as curvas teóricas seguem as mesmas tendências de mudança de concavidade das curvas práticas.

Tabela II
VALORES ESTIMADOS DE ACF PARA MODELO ANISOTRÓPICO.

MNO	$\hat{\alpha}$	$\hat{\mu}$	$\hat{\zeta}$	$\hat{\kappa}$	$\hat{\varphi}$
1	0.5	1.2	0.4	18	0
2	0.3	3	0.65	15	0

B. Medições de Taxa de Dados

O aplicativo utiliza a informação de tempo de execução em conjunto com o contador de volume de dados mantido pelo sistema operacional para determinar a taxa instantânea de dados em cada instante de medição. Essa é uma forma de não onerar significativamente o plano de dados do usuário e conseguir capturar sua experiência de uso normal, diferente dos habituais *speed test* que buscam mostrar a máxima capacidade da rede durante pequenos intervalos de tempo e, por isso, nem sempre refletem a experiência percebida por cada usuário.

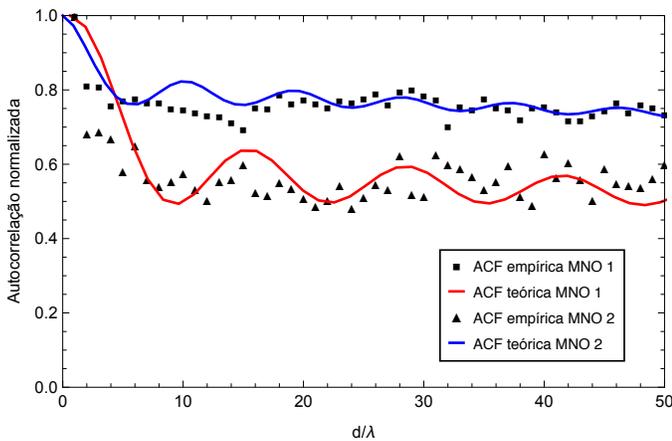


Figura 5. Autocorrelação entre as curvas empíricas e teóricas para MNO 1 e MNO 2. Local: Eixão Norte, Brasília.

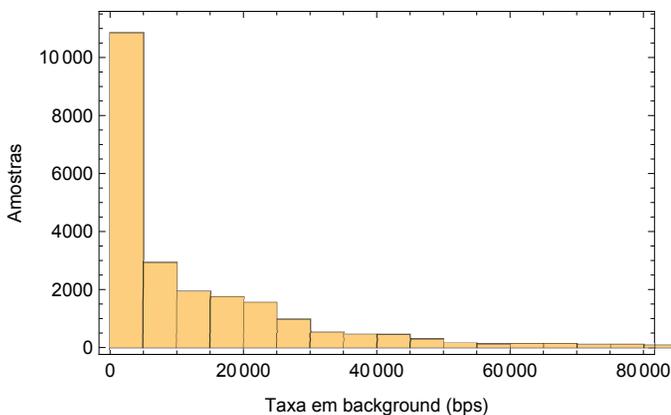


Figura 6. Distribuição da taxa de dados para MNO 2.

O gráfico na Figura 6 mostra a distribuição dos valores de taxa de dados coletados na forma de histograma. Esses dados levam em conta todos os dados já coletados pelo sistema para uma operadora e não são correspondentes a uma campanha de medição específica. O objetivo é ilustrar a capacidade do sistema de coletar as informações de taxas de dados em *background*. Pode-se observar maior concentração de pontos em baixos valores de taxa de dados devido ao tamanho das primeiras barras do histograma, o que é esperado uma vez que as medições foram feitas em segundo plano, sem gerar tráfego de dados artificialmente.

Quanto maior for a atividade dos usuários enquanto o aplicativo mede em segundo plano, mais tráfego de dados será gerado. Essa sensibilidade ao comportamento dos usuários permite visualizar os histogramas do ponto de vista da experiência dos mesmos. Se, em média, os usuários de uma determinada operadora são muito ativos e costumam precisar de taxas de dados mais altas, o formato dos gráficos terá uma tendência a ter valores maiores ao longo de todas as barras do histograma. Dessa forma, os gráficos são uma forma de visualizar a demanda de recursos da rede em termos da taxa de dados utilizada pelos usuários.

IV. CONCLUSÃO

Nesse trabalho, foi apresentado um sistema colaborativo que está sendo desenvolvido com foco no usuário final, cujo principal objetivo é informá-los sobre a cobertura e a taxa de dados das redes móveis de uma determinada região com base nos dados obtidos de forma colaborativa por todos os demais usuários do sistema.

O uso de hexágonos dinâmicos no mapa de cobertura é um diferencial em comparação com outros sistemas. A capacidade de gerar imagens de mapas com qualquer informação coletada, como a intensidade de sinal que foi demonstrada e a taxa de dados trafegada, também é um diferencial. Assim, os usuários podem avaliar a cobertura dos operadores com maior nível de detalhes, mapeando as regiões com cobertura deficiente, baixa intensidade de sinal recebido ou baixa taxa de dados média. Essas informações também são úteis para as operadoras que atuam em uma dada região como forma de analisar potenciais falhas de cobertura, mapear o perfil de uso de tráfego de seus clientes na região, dentre outros.

Este sistema também possui capacidade de caracterização de canais sem fio para análise dos efeitos de sombreamento e perda de percurso. Assim, ele pode ser um ponto de partida para análises mais completas, além de ajudar em validações práticas de distribuições de desvanecimento a partir de campanhas de medições controladas. Em breve essa ferramenta será disponibilizada para *download* gratuito na loja de aplicativos da Google. (A maioria das capturas de telas do aplicativo foram omitidas neste artigo por motivo de espaço).

REFERÊNCIAS

- [1] M. Lauridsen, I. Rodriguez, L. M. Mikkelsen, L. C. Gimenez, and P. Mogensen, "Verification of 3g and 4g received power measurements in a crowdsourcing android app," in *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2016 IEEE*. IEEE, 2016, pp. 1–6.
- [2] U. Goel, M. P. Wittie, K. C. Claffy, and A. Le, "Survey of end-to-end mobile network measurement testbeds, tools, and services," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 1, pp. 105–123, 2016.
- [3] A. Nikraves, H. Yao, S. Xu, D. Choffines, and Z. M. Mao, "Mobilyzer: An open platform for controllable mobile network measurements," in *Proceedings of the 13th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*. ACM, 2015, pp. 389–404.
- [4] S. Sonntag, J. Manner, and L. Schulte, "Netradar-measuring the wireless world," in *Modeling & Optimization in Mobile, Ad Hoc & Wireless Networks (WiOpt), 2013 11th International Symposium on*. IEEE, 2013, pp. 29–34.
- [5] S. Rosen, S.-j. Lee, J. Lee, P. Congdon, Z. M. Mao, and K. Burden, "Menet: Crowdsourcing wireless performance measurements through the eyes of mobile devices," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 10, pp. 86–91, 2014.
- [6] R. Enami, Y. Shi, D. Rajan, and J. Camp, "Pre-crowdsourcing: Predicting wireless propagation with phone-based channel quality measurements," in *Proceedings of the 20th ACM International Conference on Modelling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*. ACM, 2017, pp. 197–206.
- [7] A. Aragon-Zavala, *Antennas and propagation for wireless communication systems*. John Wiley & Sons, 2008.
- [8] "Opensignal," <https://opensignal.com/>, accessed: 2018-04-08.
- [9] "Wgs84 - world geodetic system 1984, used in gps," <https://epsg.io/4326>, accessed: 2018-05-03.
- [10] I. Her, "Geometric transformations on the hexagonal grid," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 4, no. 9, pp. 1213–1222, 1995.
- [11] E. W. Stacy, "A generalization of the gamma distribution," *The Annals of mathematical statistics*, pp. 1187–1192, 1962.
- [12] U. S. Dias and M. D. Yacoub, "On the $\alpha - \mu$ autocorrelation and power spectrum functions: Field trials and validation," *IEEE GLOBECOM*, 2009.