

# Caracterização de Disrupções na Faixa ISM de 900 MHz em Ambiente de Floresta

Ana Elisa Ferreira<sup>¶,†</sup>, Fernando M. Ortiz<sup>†</sup>, Luís Henrique M. K. Costa<sup>†</sup>

**Resumo**—Novos usos da Internet das Coisas e redes de sensores trouxeram a necessidade de comunicação em diferentes ambientes. Este trabalho busca identificar o comportamento de um enlace de rádio dentro da floresta, empregando experimentos práticos com a tecnologia LoRa, uma LPWAN. A floresta é um ambiente hostil à propagação, causando forte atenuação, intensa variabilidade do sinal e disrupções. Os resultados dos experimentos são usados para descrever a comunicação e caracterizar empiricamente as disrupções. As distribuições de Nakagami, Rayleigh e Weibull são aplicadas aos dados, revelando a necessidade de um novo modelo de propagação mais adequado ao ambiente florestal.

**Palavras-Chave**—Caracterização de canal rádio, LoRa, propagação na floresta.

**Abstract**—New uses of the Internet of Things and sensor networks have brought the need for communication in different environments. This work aims to identify the behavior of a radio link within the forest, using practical experiments with LoRa technology, a LPWAN. The forest is an environment hostile to propagation, causing strong attenuation, intense signal variability and disruption. The results of the experiments are used to describe the communication and empirically characterize the disruptions. The Nakagami, Rayleigh and Weibull distributions are applied to the data, revealing the need for a new propagation model that is more suited to the forest environment.

**Keywords**—Radio channel characterization, LoRa, forest propagation.

## I. INTRODUÇÃO

A onda eletromagnética sofre diferentes fenômenos de acordo com o ambiente de propagação e a frequência transmitida. Novas tecnologias de rádio para comunicação na Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT) e em redes de sensores sem-fio (*Wireless Sensors Network* - WSN) simultaneamente fomentam e atendem a demanda por novas aplicações, em novos ambientes de utilização. Um dos ambientes em que a propagação é extremamente desafiadora são as florestas tropicais, biomas onde a umidade é muito alta e há uma grande quantidade e diversidade de vegetação.

Estudos vêm sendo conduzidos pela equipe do GTA/UFRJ em parceria com o Parque Nacional da Serra dos Órgãos (PARNASO), para a melhoria da assistência ao visitante do Parque. Entre estes estudos, diferentes tecnologias têm sido avaliadas no ambiente florestal [1], [2]. RSSI (*Received Signal Strength Indication*), SNR (*Signal-to-Noise Ratio*), taxa de perda de pacotes, latência e jitter são as métricas usadas para avaliar

o comportamento e o alcance máximo dos enlaces de comunicação. Além do alcance reduzido pela forte atenuação, os enlaces têm apresentado um comportamento altamente variável, levando a uma comunicação com características oportunistas.

Assim, o objetivo principal deste trabalho é gerar e avaliar curvas que descrevam o comportamento experimentado pelo sinal ao ser propagado na floresta. Para isso, são caracterizadas as disrupções ocorridas durante medições de longa duração, através da experimentação prática usando a tecnologia LoRa (*Long Range*) [3]. São avaliadas variáveis físicas do ambiente, temperatura e umidade, capturadas por meio de sensoriamento, e as métricas RSSI, SNR, taxa de perda de pacotes e tempo de recepção entre pacotes (PIR - *Packet Inter-Reception time*).

A LoRa é uma tecnologia de rede sem fio de baixo consumo e longo alcance (*Low Power Wide Area Network* - LPWAN). As LPWAN são uma alternativa às redes de dados móveis e às redes de curto alcance, para conectar um grande número de terminais geograficamente dispersos. Embora existam outras tecnologias LPWAN [4], o foco na LoRa deve-se a esta tecnologia ser uma das mais difundidas atualmente, para aplicações que exigem baixo consumo e longo alcance. Além disso, a LoRa opera na faixa não licenciada de ISM (*Industrial Scientific and Medical*) de 900 MHz.

O artigo está assim organizado: a Seção II discute trabalhos relacionados. A Seção III descreve os equipamentos e experimentos realizados, enquanto a Seção IV apresenta os resultados obtidos e avalia estatisticamente os dados usando três modelos de propagação. Por fim, a Seção V conclui o trabalho e aponta desafios futuros.

## II. TRABALHOS RELACIONADOS

Diversos trabalhos na literatura apresentam medições de propagação com tecnologias sem-fio para a modelagem de canais de comunicação. Campos *et al.* [5] apresentam um sistema de baixo custo para medições e caracterização do canal de rádio. É feita uma modelagem de canal na faixa de 700 a 900 MHz, que aborda perda de percurso, sombreamento e desvanecimento de pequena escala. Estas frequências são importantes para a implantação dos sistemas 5G mMTC (*massive Machine Type Communications*) definido pelo ITU e para sistemas de outras tecnologias de suporte à IoT.

Rama Rao *et al.* [6] realizam medições da propagação em plantações de manga e goiaba, nas faixas de 868/915/2400 MHz. A atenuação é calculada a partir dos valores de *Received Signal Strength Indication* (RSSI) e comparada com os modelos ITU-R, Weissberger e COST 235 usando simulações no MATLAB. Os autores observam que o modelo

<sup>¶</sup>Coordenação de Engenharia de Computação, CEFET-RJ campus Petrópolis, Petrópolis-RJ, Brasil. <sup>†</sup>Grupo de Teleinformática e Automação (GTA), Programa de Engenharia Elétrica (PEE/COPPE) e Departamento de Eletrônica e Computação (DEL/Poli), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro-RJ, Brasil. E-mails: {ferreira, fmolano, luish}@gta.ufrj.br.

COST 235 foi o que mais se aproximou dos valores obtidos experimentalmente. Mestre *et al.* [7] também realizam estudos de propagação para aplicações na agricultura. É avaliado o modelo Weissberger MED (*Modified Exponential Decay*), que expressa a atenuação como uma função da frequência e da parcela do enlace obstruída pela folhagem, e o modelo *Single Vegetative Obstruction Model* que não considera a frequência, mas apenas a distância e uma atenuação específica em dB/m para a vegetação. Ambos os modelos não foram considerados adequados para utilização direta, apenas após a multiplicação por uma constante definida pelo tipo de vegetação e pela sua distribuição espacial ao longo do enlace.

Azevedo e Santos [8] avaliam o uso do modelo de propagação *log-normal* para obter a atenuação em ambientes florestais com diferentes densidade de vegetação, relacionando e alterando seus parâmetros com as características do ambiente. O modelo desenvolvido é válido para distâncias até 400 m e frequências de 300 MHz a 30 GHz. Entretanto, as medições foram feitas apenas em florestas temperadas ao nível dos troncos de árvores como pinheiros e eucaliptos.

Stoyanova *et al.* [9] estudam um modelo prático para ambientes abertos, consistente com restrições como baixa potência, faixa de comunicação estreita, posicionamento dos nós próximos ao solo e antenas omnidirecionais, com foco em WSN. Os autores propõem um modelo chamado *Free-space Outdoor Model* (FOM), em que recalculam a potência recebida incluindo a reflexão no solo e uma variável Gaussiana randômica que descreve a incerteza do RSSI.

Este trabalho se distingue por estudar a propagação em floresta tropical e as disrupções causadas pelo desvanecimento em pequena escala, resultante do fenômeno multi-percurso. Os dados coletados nos experimentos práticos são analisados estatisticamente utilizando os modelos adequados para este tipo de desvanecimento. Florestas tropicais cobre grande parte do Brasil, incluindo a Amazônia e a Mata Atlântica, além de outras regiões pelo mundo. Melhorar a comunicação neste tipo de ambiente pode contribuir para a sua preservação e para o desenvolvimento econômico da sua população.

### III. EXPERIMENTOS

Os experimentos práticos são realizados na sede de Teresópolis do PARNASO. Nestes experimentos são coletados dados para identificar a variação do sinal ao longo do tempo dentro da floresta. Para caracterizar as disrupções, é observada a variação de RSSI, SNR, taxa de perda de pacotes e PIR ao longo do tempo em enlaces de 100 m e 200 m. Estas duas distâncias correspondem ao alcance intermediário e máximo atingido usando a LoRa dentro da floresta. Problemas pontuais são diferenciados de disrupções através dos valores de PIR e taxa de perda, comparados com dados de enlaces em operação normal no mesmo ambiente. As disrupções são então definidas neste trabalho como uma perda severa de comunicação, que apresente 100% de perda de pacotes durante um intervalo maior do que o PIR médio da operação normal.

#### A. LoRa

A LoRa é uma tecnologia de comunicação sem-fio, complementar às redes de dados móveis das operadoras de telefonia

celular e às tecnologias sem-fio de curto alcance, desenvolvida para aplicações de IoT com grandes áreas de cobertura [3], [4]. A camada física (PHY) da tecnologia LoRa modula sinais em sub-bandas da faixa de frequências não licenciadas ISM. A LoRa PHY usa correção antecipada de erros (*Forward Error Correction* - FEC) e modulação por espalhamento espectral de *chirps* (*Chirp Spreading Spectrum* - CSS) [10], que varia a frequência sem mudar a fase entre símbolos adjacentes [11], [12]. O fator de espalhamento (*Spread Factor* - SF) define a duração do símbolo e, juntamente com a banda e a taxa de código (*Code Rate* - CR) define a taxa de transmissão.

A LoRa emprega cabeçalhos reduzidos e simplifica o *hardware* e a topologia e o endereçamento da rede. Assim é viabilizada uma comunicação bidirecional simples, com o uso de uma infraestrutura mínima e baixo consumo de energia [13].

#### B. Metodologia

Num cenário com distância fixa foram feitas duas medições de longa duração, com intervalo de 12 horas, nas distâncias de 100 m e 200 m. Esse intervalo foi escolhido em função da duração das baterias que alimentam os equipamentos. A linha de visada esteve obstruída, coberta pela vegetação. A distância de 200 m foi escolhida por ser identificada em [2] como o alcance máximo real da LoRa operando com SF11 no ambiente florestal, embora muito reduzido em relação ao alcance teórico descrito na literatura, que se refere a ambientes abertos. A distância de 100 m é o alcance máximo para SF7 e um ponto intermediário para SF11, permitindo visualizar o comportamento da atenuação em sua total amplitude, sem que a potência do sinal se torne menor do que o limiar de recepção dos equipamentos usados.

Neste estudo são usados dois transceptores compostos por um microcontrolador Arduino e um módulo de transmissão e recepção LoRa. Os pacotes gerados possuem número de sequência, *timestamp* e dados dos sensores DHT22 de temperatura e umidade, para que seja possível avaliar a relação entre estas grandezas do ambiente e os fenômenos de propagação observados. O sensor de umidade é capacitivo e o sensor de temperatura é um resistor sensível à variações de temperatura. Dentro do sensor existe um microcontrolador que faz as medições e transmite os valores no formato digital através do pino de saída [14]. A recepção de cada pacote é registrada junto com seus dados, RSSI e SNR. A Tabela I mostra os componentes de *hardware* utilizados para as unidades transmissora e receptora.

TABELA I

COMPONENTES UTILIZADOS NA UNIDADE TRANSMISSORA E RECEPTORA.

	Módulo	Equipamento
Unidade Transmissora	Controlador	Arduino Uno R3
	Interface sem-fio	Dragino LoRa <i>Shield</i> RF96
	Antena	Antena 7dBi D-Link
	Receptor GNSS	U-blox NEO-6M
	Sensor	Sensor de Umidade e Temperatura DHT22
Unidade Receptora	Controlador	Arduino Uno R3
	Interface sem-fio	Dragino LoRa <i>Shield</i> RF96
	Antena	Antena 7dBi D-Link

IV. RESULTADOS

A Figura 1 apresenta um panorama completo das doze horas de medição feitas com 100m de distância entre os terminais. Como esta distância é intermediária não são identificadas disrupções, apenas alguns pontos com valor atípico e o comportamento periódico da SNR e do RSSI. Observando mais de perto na Figura 2, no intervalo de 23 h a 01 h podem ser visualizados pontos atípicos, principalmente na SNR, mas também no RSSI.

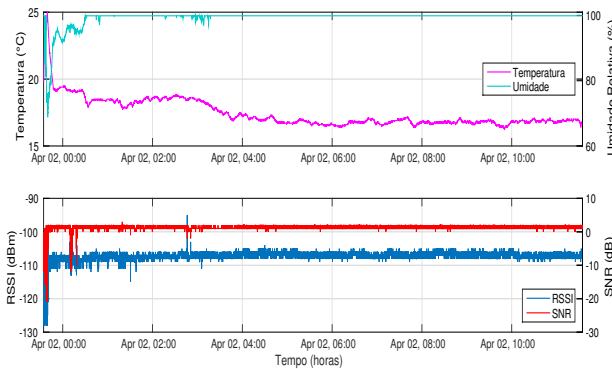


Fig. 1. Teste de longa duração em 100 m.

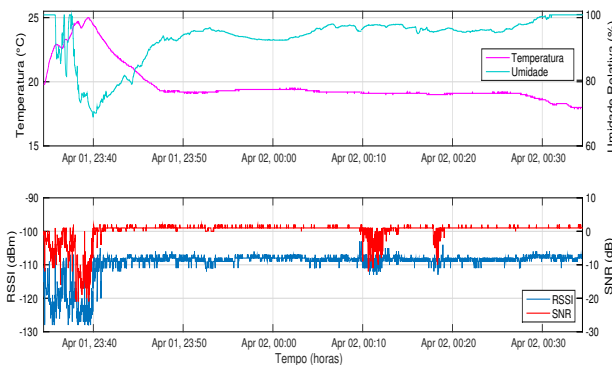


Fig. 2. Teste de longa duração em 100 m, no intervalo 23h-01h.

A Tabela II descreve a correlação entre a SNR e o RSSI com as variações de umidade e temperatura em 100m. O resultado mostra que a umidade pode inferir na SNR e no RSSI de forma moderada. Por outro lado, a propagação do enlace é independente da temperatura, sendo que as variações da mesma não incidem no comportamento do enlace.

TABELA II

CORRELAÇÃO DA SNR E DO RSSI COM RESPEITO À UMIDADE E TEMPERATURA EM 100 M.

	RSSI/Umid.	SNR/Umid.	RSSI/Temp.	SNR/Temp.
r	0,3614079	0,3844369	-0,5032384	-0,4071001

As Figuras 3 e 4 auxiliam a caracterizar o comportamento do sinal, mostrando o PIR e a taxa de perda, respectivamente. Exceto por poucos pontos com valores atípicos, ambas as métricas estão de acordo com os valores de operação normal neste

ambiente. O valor médio do PIR, como mostra a tabela IV de 1,1 s é compatível com a latência média de aproximadamente 1,4 s para distância de 100 m medida em [2]. A taxa de perda, inferior a 5% também é semelhante à obtida em [2] durante operação normal. Conclui-se assim que na distância de 100 m o enlace apresenta operação normal, ocorrendo apenas perdas pontuais sem disrupções.

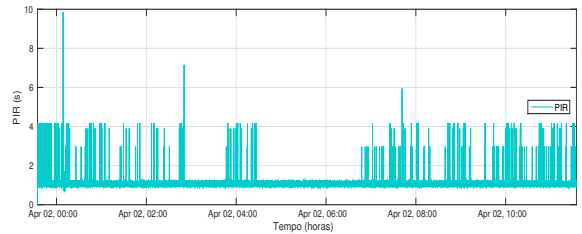


Fig. 3. Tempo de recepção entre pacotes (PIR) em 100 m.

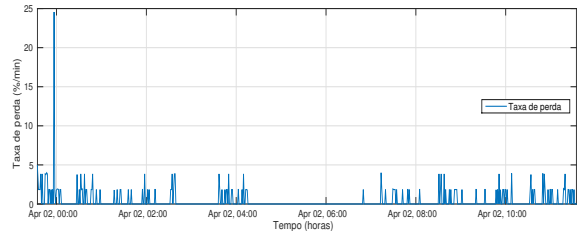


Fig. 4. Taxa de perda em 100 m.

A Figura 5 mostra as 12 h de medição feitas na distância de 200 m, que é o limite do alcance. Como esperado, em 200 m o sinal apresenta variações muito mais fortes, disrupções já podem ser observadas mesmo neste gráfico geral. No intervalo de 16 h a 18 h mostrado na Figura 6, percebe-se muito mais fortemente o comportamento periódico da SNR e do RSSI, e as disrupções presentes no sinal. Neste mesmo intervalo também ocorrem variações de umidade e temperatura. Essas variações não provocam alterações significativas nas medidas de potência. O RSSI reduz levemente seu valor médio, refletindo o aumento da umidade. Entretanto a SNR permanece estável, uma vez que a redução da temperatura reduz também o nível de ruído no ambiente.

A Tabela III mostra os resultados da correlação entre a SNR e o RSSI com as variáveis de umidade e temperatura. Observa-se uma correlação de moderada a forte entre o comportamento da SNR e as variações de temperatura e umidade. Já o comportamento do RSSI com a temperatura e a umidade, apesar de ter baixa correlação, indica que uma diminuição na temperatura e na umidade aumenta o RSSI, mantendo o enlace sem disrupções por um período maior.

TABELA III

CORRELAÇÃO DA SNR E DO RSSI COM RESPEITO À UMIDADE E TEMPERATURA EM 200 M.

	RSSI/Umid.	SNR/Umid.	RSSI/Temp.	SNR/Temp.
r	-0,7231419	0,7379868	-0,7330912	0,7343116

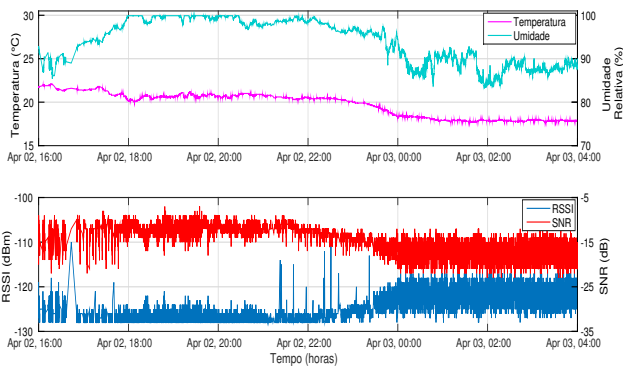


Fig. 5. Teste de longa duração em 200 m.

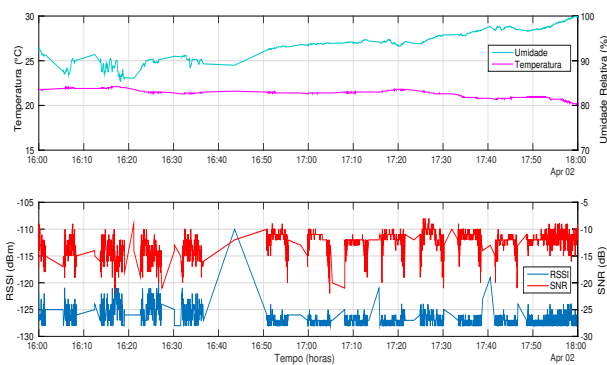


Fig. 6. Teste de longa duração em 200 m, no intervalo 16h-18h.

Novamente, as medições de PIR e taxa de perda auxiliam a avaliação dos fenômenos ocorridos. Neste caso claramente são identificadas disrupções. A taxa de perda esperada para o enlace de 200m em operação normal é menor do que 20% [2], entretanto em diversos pontos são medidos valores muito mais altos. Nestes mesmos pontos observamos um forte aumento do PIR, com valor médio muito acima da latência em 200 m, também medida em [2]. A intensa variação do PIR nessa distância pode ser observada também através do seu desvio padrão muito grande, como mostra a tabela IV. Esses pontos de exceção à normalidade são as disrupções, causadas pela variação aleatória das condições de propagação e dos obstáculos.

TABELA IV

VALOR MÉDIO DO TEMPO DE RECEPÇÃO ENTRE PACOTES (PIR).

Ponto de medição	Média $\mu$	Desvio padrão $\sigma$
100m	1,0794	0,251
200m	1,4329	5,7574

A. Estudo estatístico

Para a avaliação completa do comportamento do sinal, é feito um estudo estatístico usando as distribuições de Nakagami, Rayleigh e Weibull para modelar a propagação do sinal. Neste caso o sinal medido apresenta apenas variação

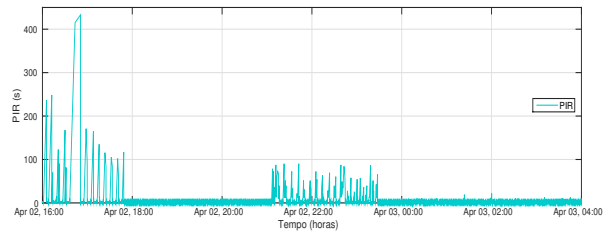


Fig. 7. Tempo de recepção entre pacotes (PIR) em 200 m.

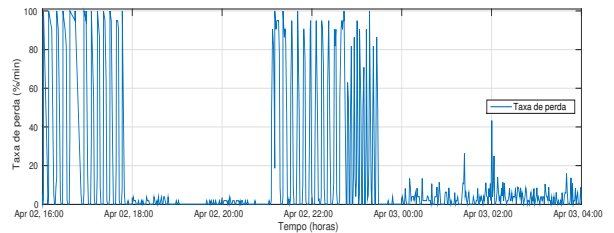


Fig. 8. Taxa de perda em 200 m.

em pequena escala, uma vez que os transceptores se mantêm fixos na mesma posição e assim não há contribuição da variação de larga escala. Embora usadas para modelar variação em pequena escala, estas distribuições não descrevem perfeitamente o comportamento do sinal devido à enorme quantidade de componentes multi-percurso que ocorrem na floresta. O sinal recebido será a soma dos sinais formados pelo sinal transmitido disperso por obstruções aleatórias, impondo diferentes atenuações e diferenças de fase no sinal resultante [15]. O tratamento dos dados coletados durante os experimentos práticos foram realizados utilizando o MATLAB e a biblioteca *fitdist*. As Figuras 9 e 10 mostram o histograma e a função densidade de probabilidade (PDF - *Probability Density Function*) do RSSI para as distâncias de 100 m e 200 m, respectivamente. A função de distribuição acumulada (CDF - *Cumulative Distribution Function*) das medições de RSSI em 100 m e 200 m é apresentada nas Figuras 11 e 12, respectivamente. A partir da CDF foi calculado o erro médio absoluto dos modelos avaliados apresentado na tabela V.

TABELA V

ERRO MÉDIO ABSOLUTO DOS MODELOS AVALIADOS.

Ponto de medição	Weibull	Nakagami-m	Rayleigh
100 m	0,3459	0,4603	0,2911
200 m	0,2072	0,1728	0,1974

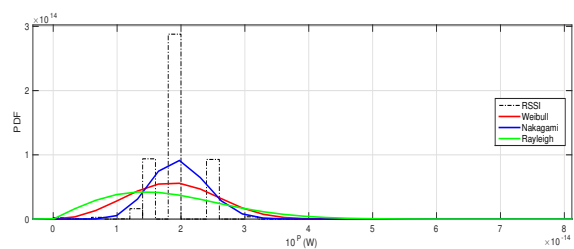


Fig. 9. PDF das medidas de RSSI à distância de 100 m.

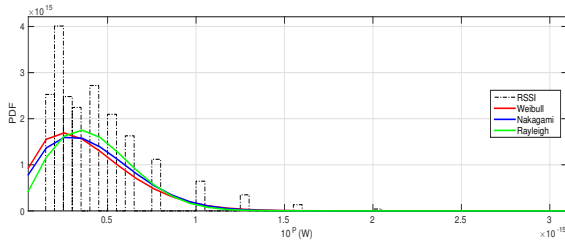


Fig. 10. PDF das medidas de RSSI à distância de 200 m.

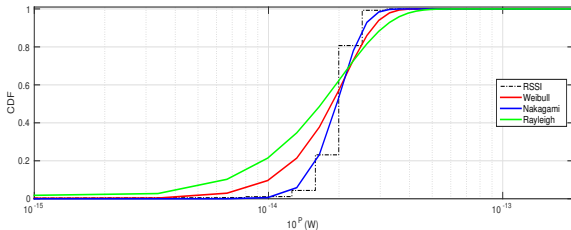


Fig. 11. CDF das medidas de RSSI à distância de 100 m.

Observa-se que a distribuição de Rayleigh é a que melhor se aplica ao ambiente de propagação florestal, com erro de 0,2911 em 100 m e 0,1974 para 200 m. Entretanto, todas as três distribuições empregadas apresentam disparidades em relação aos dados medidos, com erro médio de até 0,4603.

## V. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho é feito um estudo da propagação de um canal rádio na faixa de ISM dentro de uma floresta e a caracterização das disrupções que ocorrem devido à alta complexidade do ambiente. A influência da variação da umidade e da temperatura foi menor do que o esperado. A redução da temperatura melhora a SNR, ao reduzir o ruído, enquanto o aumento da umidade leva a uma redução do nível do sinal que se reflete piorando o RSSI e a SNR. A forte atenuação e a grande influência do fenômeno de multi-percurso fazem com que seja observado um padrão de comportamento periódico tanto no RSSI como na SNR, e na distância de 200 m ocorrem disrupções. As disrupções são confirmadas pelo forte aumento na taxa de perda e no PIR. Correspondem ao efeito do desvanecimento em pequena escala e foram modelados empregando as distribuições de Rayleigh, Nakagami e Weibull. Entretanto os valores preditos por estas distribuições apresentam respectivamente erro médio de 0,1974, 0,1728 e 0,2072 em relação aos dados medidos. Percebe-se portanto a necessidade de desenvolvimento de um modelo de propagação específico para este tipo de ambiente.

Assim, a proposta de um modelo de propagação para o ambiente florestal é o principal trabalho futuro que complementará a caracterização aqui apresentada. Este trabalho faz parte de um projeto para a melhoria da assistência ao visitante do PARNASO em parceria com o GTA/UFRJ. Neste projeto há terminais fixos, cuja comunicação foi aqui caracterizada, e terminais móveis. Portanto estudos considerando a mobilidade dos terminais também são parte de trabalhos futuros.

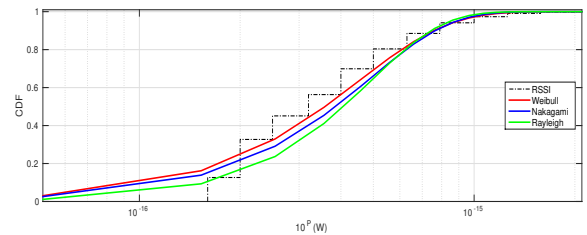


Fig. 12. CDF das medidas de RSSI à distância de 200 m.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pelas agências de fomento CAPES, CNPq, FAPERJ e pelos processos nº 15/24494-8 e nº 15/24490-2, da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP). Os autores estendem seus agradecimentos ao ICMBio, ao PARNASO e ao seu Coordenador de Pesquisa, Jorge “Julião” Nascimento.

## REFERÊNCIAS

- [1] G. F. C. de Queiroz, A. E. Ferreira, F. M. Ortiz, R. S. Couto, and L. H. M. K. Costa, “Posicionamento de pontos de acesso sem-fio para segurança de visitantes em parques florestais,” in *Anais do XXXVI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores SBRC’2018*, 2018.
- [2] A. E. Ferreira, F. M. Ortiz, and L. H. M. K. Costa, “Avaliação de tecnologias de comunicação sem-fio para monitoramento em ambientes de floresta,” in *Anais do XXXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, pp. 116–129, 2019.
- [3] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, and W. M. Townsley, “A study of LoRa: Long range & low power networks for the Internet of things,” *Sensors*, vol. 16, no. 9, p. 1466, 2016.
- [4] U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, “Low power wide area networks: An overview,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 19, pp. 855–873, Secondquarter 2017.
- [5] M. M. de M. Campos, W. V. de Oliveira, V. A. de Sousa Jr., W. S. Alves, A. G. D’Assunção, M. de O. Mattos, T. A. Scher, and Álvaro A. M. de Medeiros, “Medição de baixo custo para caracterização de canal 5G mMTC no cenário dual-stripe,” in *Anais do XXXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS - SBRT2018*, pp. 116–120, 2018.
- [6] T. R. Rao, D. Balachander, A. N. Kiran, and S. Oscar, “RF propagation measurements in forest & plantation environments for wireless sensor networks,” in *International Conference on Recent Trends in Information Technology*, pp. 308–313, IEEE, 2012.
- [7] P. Mestre, J. Ribeiro, C. Serodio, and J. Monteiro, “Propagation of ieee802. 15.4 in vegetation,” in *Proceedings of the World Congress on Engineering 2011*, vol. 2, pp. 1–6, 2011.
- [8] A. Joaquim and F. E. S. S. Azevedo, “An empirical propagation model for forest environments at tree trunk level,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 56, no. 6, pp. 2357–2367, 2011.
- [9] T. Stoyanova, F. Kerasiotis, A. Prayati, and G. Papadopoulos, “A practical RF propagation model for wireless network sensors,” in *2009 Third International Conference on Sensor Technologies and Applications*, pp. 194–199, IEEE, 2009.
- [10] Semtech Corporation, “LoRa modulation basics an1200.22.” <https://www.semtech.com/uploads/documents/an1200.22.pdf>, 2015.
- [11] C. Goursaud and J.-M. Gorce, “Dedicated networks for IoT : PHY / MAC state of the art and challenges,” *EAI endorsed transactions on Internet of Things*, Oct. 2015.
- [12] M. Bor, J. Vidler, and U. Roedig, “LoRa for the internet of things,” in *International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks (EWSN)*, pp. 361–366, 2016.
- [13] F. M. Ortiz, A. E. Ferreira, and L. H. M. K. Costa, “Caracterização de desempenho de uma rede LoRa: Simulação vs. prática,” in *Anais do III Workshop de Computação Urbana*, pp. 170–183, 2019.
- [14] Aosong(Guangzhou) Electronics Co., “Temperature and humidity module AM2302.” <http://www.aosong.com>. acessado em 26/05/2019.
- [15] L. Fernando, “Caracterização da distribuição de Weibull em ambientes indoor,” Master’s thesis, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, 2008.