

LFR: Um modelo de FUOTA via LoRa

Leonardo E. Mota, Francisco J. A. Aquino, João P. B. Lima, Rogério Diógenes e Gabriel J. A. Santos

Resumo—A cada ano mais dispositivos IoT são instalados mundialmente, previsões para 2025 são que teremos cerca de 75 bilhões de dispositivos em todo mundo, assim cada vez mais a atualização de firmware se torna necessária para manter a vida útil dessas aplicações. Neste artigo propomos um FUOTA via LoRa. O modelo é composto de quatro etapas: configuração, atualização, ativação de sementes futuras e ativação de dispositivos comuns. Após isso foi implementada uma prova-de-conceito. Em seguida foram detalhados os ensaios de laboratório e de campo. Concluiu-se com os resultados que o LFR consegue obter um tempo de transferência inferior aos relatados na literatura.

Palavras-Chave—FUOTA, LoRa, IoT.

Abstract—Every year more IoT devices are installed worldwide, predictions for 2025 are that we will have about 75 billion devices worldwide, so more and more firmware update becomes necessary to maintain the useful life of these applications. In this article we propose a FUOTA via LoRa. The model is composed of four steps: configuration, update, activation of future seeds and activation of common devices. After that, a proof-of-concept was implemented. The laboratory and field tests were then detailed. It was concluded with the results that the LFR is able to obtain a transfer time lower than those reported in the literature.

Keywords—FUOTA, LoRa, IoT.

I. INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, a demanda por coleta de informações se torna mais presente e necessária, seja em cidades inteligentes, setor agropecuário, setor energético [1]. Diante dessa demanda o número de dispositivos conectados para realizar a aquisição desses dados tem aumentado significativamente. Até 2025 estimasse que cerca de 75 bilhões (figura 1) de dispositivos inteligentes estejam instalados e operacionais em diversos sistemas e ambientes em todo o mundo [2]. Esse conceito de conectar objetos, eletrônicos, sensores e vários outros dispositivos, permitindo o envio de informações para aplicações e pessoas é chamado de Internet das Coisas, do inglês *Internet of Things - IoT*.

Para viabilizar essa demanda cada vez maior de tornar e manter esses dispositivos conectados, diversas tecnologias de comunicação via rádio para aplicações IoT vem sendo cada vez mais utilizadas, dentre essas inúmeras tecnologias estão as redes LPWAN, do inglês *Low-Power Wide Area Network*, que surgem como a opção mais adequada para aplicações que requerem uma ampla cobertura, sem a necessidade de uma alta taxa de transmissão de dados, possuindo uma alta escalabilidade, baixo consumo de energia e baixo custo de

Leonardo Mota, PPGT, IFCE, leonardoestevaioif@gmail.com; Francisco Aquino, PPGT, IFCE, Fortaleza-CE, fcoalthes_aq@ifce.edu.br; João Brasil, PPGCC, IFCE, Fortaleza-CE, joãopedro.bl02@gmail.com; Rogério Diógenes, Departamento de Informática, IFCE-Morada Nova, Fortaleza-CE, rogerio.diogenes@ifce.edu.br; Gabriel J. A. Santos, PPGEE, UFMA, Equatorial Energia, São Luís Maranhão, gabriel.jas@discente.ufma.br.

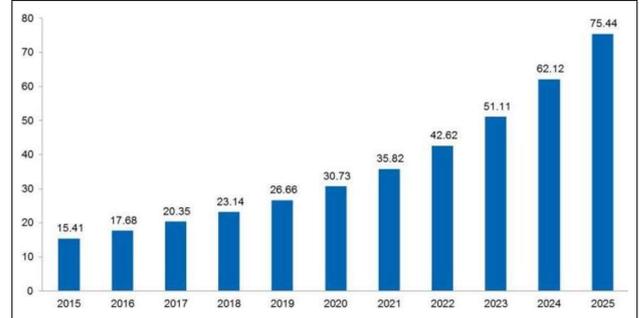


Fig. 1. Estimação de dispositivos IoT x Ano. [2]

implantação [1], [2], [3], [4], [5]. Dentre as diversas tecnologias LPWAN, destaca-se a tecnologia de modulação LoRa (*Long Range*) e seu protocolo de rede LoRaWAN [6] como sendo a mais popular e utilizada [7]. As redes LoRaWAN possuem uma topologia em estrela, onde os dispositivos se comunicam com um nó central chamado *Gateway*, que faz a ponte entre os dispositivos *LoRa/LoRaWAN* e um servidor externo, funcionando como um encaminhador de pacotes para uma entidade de software chamado *LoRa Network Server (LNS)* [6].

Uma das características mais críticas para instalações de IoT é o *Firmware Update Over The Air (FUOTA)*. O FUOTA é um processo de atualização do *firmware* de dispositivos de forma remota em redes sem fio, tal característica permite aos dispositivos IoT expandir o seu tempo de vida e melhorar sua performance em campo, pois novas funcionalidades podem ser instaladas sem a necessidade de intervenção humana *in loco*. O FUOTA representa um meio de manter os dispositivos IoT atualizados durante todo o seu tempo de vida, mantendo assim a confiabilidade, segurança e operação à longo prazo [11].

Atualmente os *firmwares* de dispositivos embarcados como aqueles supracitados são da ordem de algumas centenas de *kilobytes*, por exemplo, o *firmware* implementado para os testes realizados do protocolo proposto por esse artigo possui cerca de 196kB. Atualizar dispositivos com esse tamanho de *firmware* é um desafio para dispositivos LoRaWAN [4], [11], pois uma das características desse protocolo de rede é o seu baixo *data rate*. Outra característica do protocolo LoRaWAN é o fato dele operar em uma banda sub-GHz não licenciada [6], [10], o que significa que o seu *Gateway* deve operar com uma restrição de *duty-cycle*, por exemplo, na Europa essa restrição é de 1%, em outras palavras o *Gateway* precisa ficar em silêncio um período igual à 99 vezes o tempo da última transmissão [6], [11]. Para entender melhor sobre como essas limitações impactam em um possível FUOTA LoRaWAN, pode-se tomar como exemplo a transferência de uma imagem de *firmware* de cerca de 50kB de tamanho levaria cerca de 17 horas em

uma transmissão com confirmação de recebimento [11], ou seja, para cada mensagem do servidor→dispositivo (*downlink*) teria-se uma mensagem do dispositivo→servidor (*uplink*). Estima-se que para uma transferência sem confirmação esse tempo cairia pela metade, de toda forma ainda seriam cerca de 8,5 horas para se transmitir uma imagem de apenas 50kB.

Diante do exposto, este artigo propõe o desenvolvimento de um protocolo de rede que seria utilizado para a implementação de um mecanismo de *FUOTA* LoRa, não LoRaWAN, mais rápido e eficiente que seu análogo que utiliza *LoRaWAN*. Ao longo desse artigo estão descritas as especificações de protocolo de rede para viabilizar um *FUOTA* LoRa, além disso, analisa-se os resultados iniciais de transmissões de imagens de *firmware* por meio do protocolo proposto por esse trabalho

II. ARQUITETURA DE REDE PROPOSTA

Nesta secção está descrita a arquitetura de rede para o protocolo proposto, doravante, o modelo e o protocolo serão chamados de LFR.

As redes LFR são normalmente dispostas na topologia em árvore, ou hierárquica, onde uma semente-mestre (*master-seed*) transmite as mensagens para os dispositivos localizados nos galhos (níveis hierárquicos) abaixo, sendo que alguns destes dispositivos podem vir a ser sementes-futuras (*future-seeds*) assim dando continuidade e criando sub-redes (ver secção *Modelo de FUOTA Proposto*). Uma característica das redes LFR é que embora dispostas em árvore, elas são dinâmicas, permitindo que os dispositivos mudem de nível hierárquico e/ou mudem de galhos (*branches*). Importante ressaltar que diferente do protocolo LoRaWAN, o protocolo LFR dispensa a necessidade de *Gateways*, uma vez que sua topologia é em árvore e não estrela.

Os parâmetros de modulação *LoRa* podem ser configurados conforme o padrão de parâmetros regionais para o lugar onde os dispositivos estiverem instalados, dessa forma a frequência do canal utilizado pode ser escolhida conforme a documentação definida pela *LoRa Alliance* [10]. Nesse trabalho foram escolhidos os canais que compreendem a faixa de 902MHz à 928MHz, que possui frequência nominal de 915MHz, frequência essa utilizada pelos dispositivos LoRa/LoRaWAN nas Américas

III. MODELO DE FUOTA PROPOSTO

Nesta secção está descrito as especificações do modelo LFR incluindo formato das mensagens e diagramas de sequência. Na figura 2 está descrito o processo de *FUOTA* proposto por este artigo. O modelo consiste de quatro etapas: *Setup*, *Update*, *Future Seeds* e por último *Common end-node*. Abaixo segue cada uma dessas etapas.

A. Etapa de Configuração - Setup

Nesta etapa são configuradas as especificações que a rede LFR irá operar. Para esta etapa são necessários o envio de dois comandos via *LoRaWAN* para todos os dispositivos que forem operar na rede LFR. Os comandos são os seguintes:

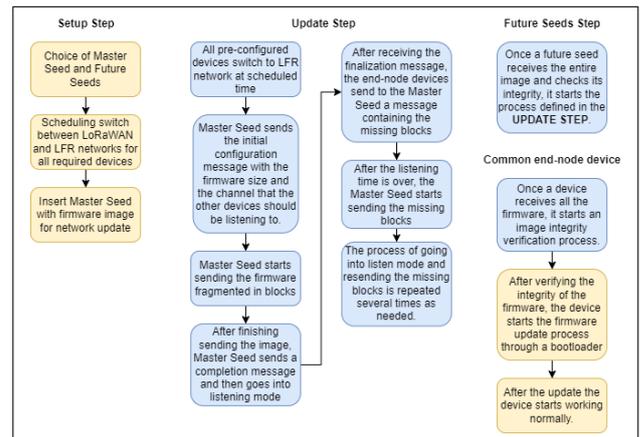


Fig. 2. Modelo de Fuota Proposto - LFR. Fonte: Autor

- `SetLfrRole`: Comando responsável por definir qual o papel do dispositivo LoRa na rede LFR.
 - `Common-Device`: Papel atribuído ao dispositivo da rede LFR que somente recebe a imagem de *firmware* e se atualiza quando a mesma é enviada por completo.
 - `Future-seed`: Papel atribuído ao dispositivo da rede LFR que após receber uma imagem de *firmware* válida, inicia o processo de envio da mesma para os dispositivos de sua sub-rede LFR.
 - `Master-Seed`: Papel atribuído ao dispositivo da rede LFR que inicia o envio da imagem de *firmware* tão logo o mesmo comute para a rede LFR.
- `SwitchSchedulingForLfr`: Comando responsável por definir o horário de agendamento para a mudança de rede dos dispositivos, entre LoRaWAN e LFR. Esse comando contém o horário inicial de mudança para a rede LFR e o horário final de retorno para a rede LoRaWAN pré-definida no dispositivo. Importante notar que todos os dispositivos retornam para a rede LoRaWAN, ao final do agendamento, independente de terem ou não concluído sua transmissão e/ou recepção da imagem de *firmware*.

B. Etapa de Transmissão e Atualização - Update

Nesta etapa todos os dispositivos pré-configurados para operarem na rede LFR, mudam para a rede LFR no horário de agendamento definido. E seguindo o fluxo definido na figura 2 a *Master-seed* inicia o envio do comando `FuotaConfiguration`, contendo a frequência de operação da transmissão da imagem e o tamanho da imagem em blocos, posteriormente são enviados os comandos `FirmwareUpdateMessage` contendo os blocos com a imagem de *firmware* a ser transferida.

Após o envio de toda a imagem, a *Master-seed* envia o comando `DownloadedFirmware` e entra no modo de escuta por um tempo pré-determinado; uma vez que os dispositivos da rede que estavam recebendo a imagem recebem o comando de conclusão do envio, os mesmos analisam se toda a imagem foi transferida, caso algum bloco esteja faltando os dispositivos enviam para a *Master-seed* um comando

FirmwarePendingBlocks contendo um mapa de *bits* que representa todos os blocos da mensagem e indica quais desses estão pendentes.

Uma vez que o tempo de escuta termine a *Master-seed*, analisa todas as mensagens de blocos pendentes que foram recebidas e inicia um novo processo de envio das mensagens contendo os blocos da imagem de *firmware*, contudo, somente para os blocos que foram sinalizados como pendentes.

Esse processo se repete por todo o horário de agendamento da rede LFR que foi definido durante a etapa de Configuração. Na figura 3 está descrito o processo que foi explicado acima, porém em uma representação de um diagrama de sequência.

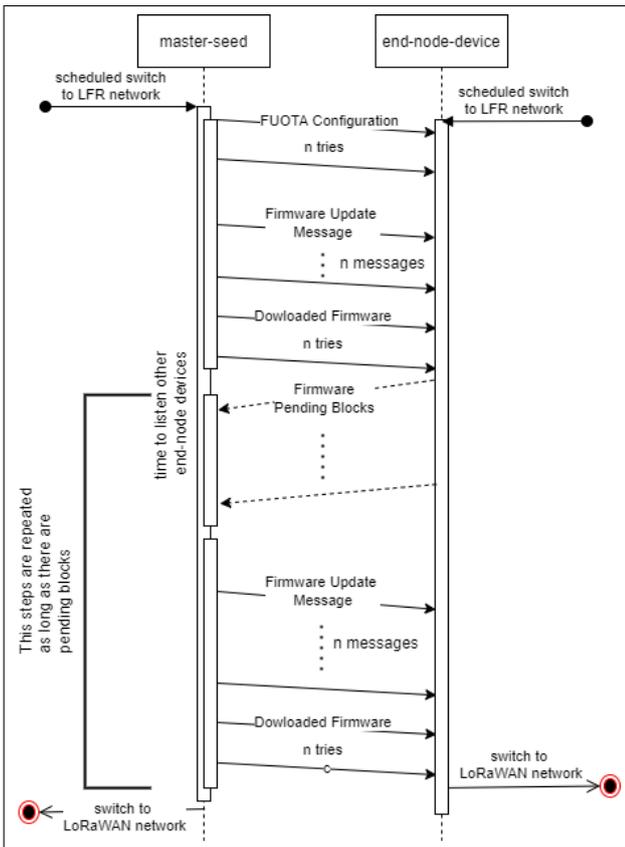


Fig. 3. Diagrama de Sequência Unicast para FUOTA LFR. Fonte: Autor

Abaixo estão descritos os comandos LFR utilizados durante a etapa de transmissão e atualização.

- **FuotaConfiguration:** Comando responsável por realizar a configuração inicial da transmissão da imagem de *firmware*, ele configura a frequência de operação da rede LFR durante o processo de FUOTA e envia para os dispositivos comuns (*Common-Device*) qual o tamanho da imagem que será transferida em números de blocos. Importante ressaltar que o tamanho do bloco padrão é definido durante a etapa de projeto e desenvolvimento do código-fonte.
- **FirmwareUpdateMessage:** Comando que contém os blocos com os fragmentos da imagem do *firmware*, além de conter também um identificador do bloco, para que o código-fonte da aplicação do *Common-device* possa identificar qual o bloco que está sendo recebido.

- **DownloadedFirmware:** Comando que indica que a transferência de toda a imagem do *firmware* foi concluída.
- **FirmwarePendingBlocks:** Comando enviado pelo *Common-device* para a *Master-seed* ou *Future-seed* da rede LFR. Esse comando indica quais blocos da imagem do *firmware* estão pendentes de serem recebidos pelo *Common-device*.

C. Etapa de ativação da Future Seed

Nesta etapa todos os dispositivos que foram configurados com o papel *Future-seed* verificam a integridade da imagem de *firmware* enviada, de forma análoga aos *Common-device*, contudo em vez de inicializar o processo de atualização, estes por sua vez iniciam o processo de Transmissão, conforme descrito na seção B - Etapa de Transmissão e Atualização.

Observação importante, nessa nova etapa de transmissão o papel da *Master-seed* será realizado pela *Future-seed* para a nova sub-rede LFR. Na figura 4 pode-se observar o diagrama de sequência para um processo de FUOTA Multicast, onde existem *Future-seeds* na rede LFR.

D. Etapa de atualização do Common End-node Device

Nesta etapa todos os dispositivos que foram configurados com o papel *Common-device* verificam a integridade da imagem de *firmware* enviada e uma vez que esta imagem esteja íntegra o dispositivo inicia o processo de atualização, que consiste basicamente de reiniciar o dispositivo para que o código-fonte do *bootloader*, sub-programa responsável por instalar novas imagens no processador, possa atualizar o dispositivo com a nova imagem recém recebida. Após essa atualização o dispositivo retorna a rede LoRaWAN e volta ao seu funcionamento normal de acordo com a aplicação de cada dispositivo.

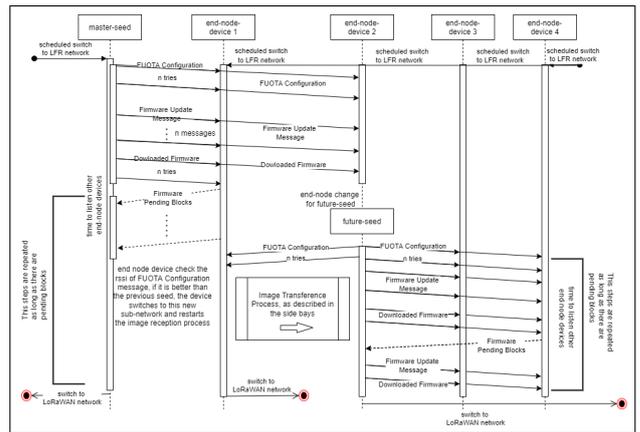


Fig. 4. Diagrama de Sequência Multicast para FUOTA LFR. Fonte: Autor

IV. HARDWARE UTILIZADO

Para o desenvolvimento do FUOTA proposto neste trabalho foi utilizado um hardware composto basicamente de um microcontrolador Arm Cortex-M4 ST32WB55 [8] e um transceptor LoRa SX1262 [9], na figura 5 está demonstrado a placa de

circuito impresso (PCI) utilizada para testar a implementação do modelo. Essa placa foi desenvolvida em parceria com o Núcleo de Pesquisas do Norte e Nordeste - NEPEN.

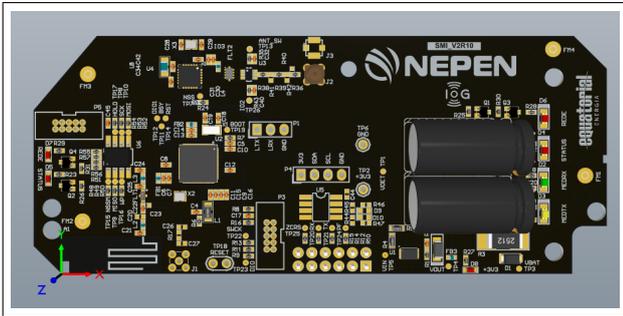


Fig. 5. Placa de circuito impresso com o sistema de hardware IoT LoRa. Fonte: Autor

A antena utilizada pela PCI foi uma antena externa omnidirecional que opera na faixa de 900 a 930 MHz, possui ganho de 2,2dBi e impedância de 50Ω. Na figura 6 está disposta uma imagem da antena utilizada.



Fig. 6. Antena Omnidirecional Miot. Fonte: Miot Wireless Solutions.

V. AVALIAÇÃO DO MODELO

Para realizar a avaliação preliminar do modelo proposto por esse trabalho foram realizadas duas etapas de testes, a primeira em laboratório e a segunda com os dispositivos localizados em campo em locais próximos entre si. Na figura 7 temos a locação dos dispositivos do teste de campo. Ambos os testes consistiram do envio de duas imagens de *firmware*, uma com o tamanho de 196kB e outra com o tamanho de 260kB. A variável utilizada para validar o modelo proposto nesse artigo foi o tempo de transferência da imagem, contudo também foram utilizadas as seguintes variáveis auxiliares para medir o desempenho da transferência: *RSSI* (*Received Signal Strength Indicator*) que mede a força do sinal recebido, o *SNR* (*Signal-to-Noise Ratio*) que indica a qualidade do sinal recebido por meio de uma taxa calculada entre a potência do sinal e o ruído de fundo.

Os testes de laboratório foram realizados com o seguinte cenário, foram colocados dois dispositivos com apenas alguns metros de distância entre si, onde um deles assumia o papel de

TABELA I

TEMPO DE TRANSFERÊNCIA DA IMAGEM VIA LFR

Tamanho da Imagem	SF10	SF12
100kB (indoor)	31 min	41 min
100kB (outdoor)	35.5 min	47 min
260kB (indoor)	41.2 min	54.5 min
260kB (outdoor)	47.5 min	63.2 min

Master-seed e o de *Common-device*, em seguida era realizado o processo de *FUOTA* conforme definido na secção 3.

TABELA II

MEDIDAS DE DESEMPENHO E DISTÂNCIA ENTRE OS SÍTIOS

Sítio	RSSI Médio	SNR Médio	SF	Distância
1	-98dBm	-8dB	10	143m
2	-99dBm	-4dB	10	97m
3	-91dBm	5db	10	53m
4	-114dBm	-14db	10	140m
5	-79dBm	3db	12	131m
6	-85dBm	3db	12	422m
7	-111dBm	-13db	12	290m

Por sua vez, os testes de campo foram realizados também em dois dispositivos, contudo, a distância entre eles era maior e variável se comparada com a distância dos testes de laboratório, onde o dispositivo que possuía o papel de *Common-device* foi alocado em diferentes distâncias, modificadas entre cada um dos testes. Na tabela II estão as distâncias entre os *Common-devices* e a *Master-seed*. Ambos os testes foram realizados para *spreading factors* 10 e 12. Na figura 7 é mostrada a localização de todos os sítios utilizados durante os testes de campo.

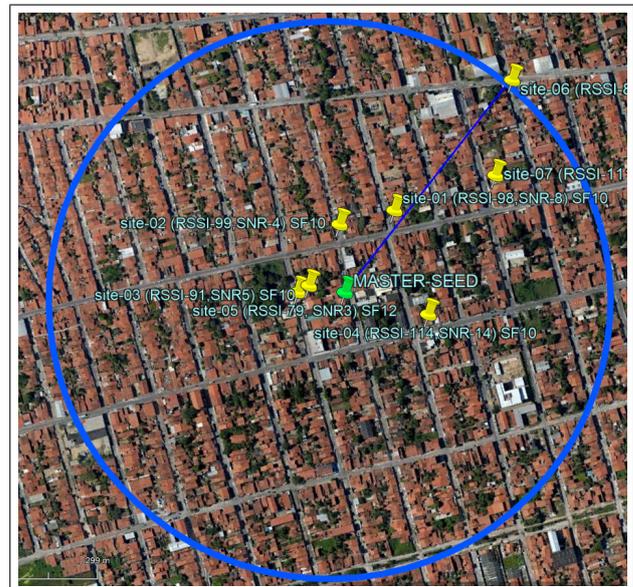


Fig. 7. Locações dos dispositivos para os testes. Fonte: Autor.

VI. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela I pode-se observar que o tempo de transferência para *spreading factor* (*SF*) 10 são menores que para SF12,

contudo observando a tabela II pode-se ver que os dispositivos que estavam operando em SF12 conseguem valores melhores de *RSSI* e *SNR*, conseqüentemente operando em distâncias maiores para o dispositivo *Master-seed*.

Importante notar que observando as figuras 8, 9 e 10, onde tem-se respectivamente os perfis de elevação para os sítios 4, 6 e 7; pode-se ver que os sítios 6 e 7 apesar de possuírem perfis de elevação piores do que o sítio 4, conseguem operar de forma similar no caso do sítio 7 e melhor no caso do sítio 6.

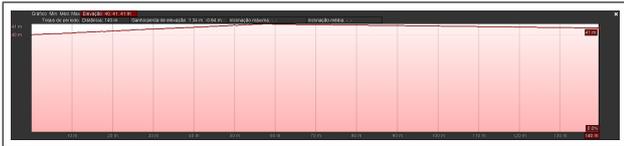


Fig. 8. Perfil de elevação entre Master-Seed e Common-device 4. Fonte: Autor.



Fig. 9. Perfil de elevação entre Master-Seed e Common-device 6. Fonte: Autor.



Fig. 10. Perfil de elevação entre Master-Seed e Common-device 7. Fonte: Autor.

Analisando os tempos de transferência alcançados pelo LFR em ambos os testes, seja em laboratório ou em campo, pode-se observar que o modelo de FUOTA proposto neste trabalho foi mais rápido em transferir imagens do que os modelos propostos por Anastasiou [12], onde segundo o mesmo, para imagens de cerca de 200kB o tempo de transferência seria algo próximo de 300 horas, e o modelo apresentado no trabalho de Abdelfadeel [11], onde a transferência de uma imagem de cerca de 100kB levaria algo em torno de 15 horas para SF12. Vale observar que ambos os modelos propostos por Anastasiou e Abdelfadeel utilizam rede LoRaWAN, logo possuem limitações por parte da regulação de cada região, contudo é importante ressaltar que por serem LoRaWAN também necessitam da presença de um *gateway*. No caso do LFR essas limitações não existem uma vez que os dispositivos transferem a imagem de *firmware* entre si obedecendo somente a topologia em árvore proposta.

VII. CONCLUSÕES

A atualização de *firmware* é algo extremamente importante em dispositivos IoT, pois aumenta a vida útil da aplicação,

garantindo a segurança, confiabilidade e otimização de processos e funções. Neste trabalho foi apresentado um modelo de FUOTA para ser utilizado em dispositivos LoRa, de forma a implementar uma camada de rede que possa vim a ser utilizada no lugar de LoRaWAN durante processo de atualização ou envio de imagens muito grandes, da ordem de *kilobytes*. Para realizar uma prova de conceito, o modelo foi implementado em um microcontrolador Arm Cortex M4 e os resultados experimentais e iniciais dão fortes indícios que o LFR pode ser escalado para aplicações IoT onde sejam necessárias atualizações em diversos dispositivos. Para trabalhos futuros, pretende-se implementar e testar sub-redes LFR com diversos *Future-seeds*, bem como se faz necessário realizar testes com outros *spreading factors* para verificar a relação velocidade-alcance. Por fim, planeja-se realizar um teste de campo em uma rede com pelo menos 100 dispositivos IoT.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao IFCE, ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Telecomunicações - PPGET, à FUNCAP, ao NEPEN e a Equatorial Energia por apoiarem este trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] Filip Turcinovic et al, Analysis of LoRa Parameters in Real-World Communication. Proceedings Elmar-International Symposium Electronics in Marine. ISBN: 9781728159720. Ano: 2020.
- [2] Noushin Poursafar et al, Long-range wireless technologies for IoT applications: A review. Proceedings of the International Conference on Sensing Technology, ICST. ISBN: 9781509065264. Ano: 2018.
- [3] Ana Elisa Ferreira et al, A study of the LoRa signal propagation in forest, urban, and suburban environments. Annales des Telecommunications/Annals of Telecommunications, Volume: 75, Páginas: 333-351. DOI: 10.1007/s12243-020-00789-w. Ano: 2020.
- [4] Anestis Staikopoulos et al, Image Transmission via LoRa Networks - A Survey. 2020 IEEE 5th International Conference on Image, Vision and Computing, ICIVC 2020, Páginas: 150-154. DOI: 10.1109/ICIVC50857.2020.9177489. Ano: 2020.
- [5] Alireza Zourmand et al, Internet of Things (IoT) using LoRa technology. 2019 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems, I2CACIS 2019 - Proceedings, Páginas: 324-330. DOI: 10.1109/I2CACIS.2019.8825008. Ano: 2019.
- [6] LoRa Alliance Technical Committee, LoRaWAN™ 1.1 Specification. LoRa Alliance. Ano: 2017.
- [7] Njabulo S. Mtetwa et al, OTA Firmware Updates for LoRaWAN Using Blockchain. 2020 2nd International Multidisciplinary Information Technology and Engineering Conference, IMITEC. DOI: 10.1109/IMITEC50163.2020.9334108. Ano: 2020.
- [8] STMicroelectronics, Multiprotocol wireless 32-bit MCU Arm® -based Cortex®-M4 with FPU, Bluetooth® 5.2 and 802.15.4 radio solution. STMicroelectronics. Ano: 2022.
- [9] Semtech, SX1261/2 Long Range, Low Power, sub-GHz RF Transceiver. Semtech. Ano: 2021.
- [10] LoRa Alliance Technical Committee, RP002-1.0.2 LoRaWAN® Regional Parameters. LoRa Alliance. Ano: 2020.
- [11] Khaled Abdelfadeel et al, How to make Firmware Updates over LoRaWAN Possible. Proceedings - 21st IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, WoWMoM 2020. DOI: 10.1109/WoWMoM49955.2020.00018. Ano: 2020.
- [12] A. Anastasiou et al, IoT Device Firmware Update over LoRa: The Blockchain Solution. Proceedings - 16th Annual International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems, DCOSS 2020. DOI: 10.1109/DCOSS49796.2020.00070. Ano: 2020.