



Artigo

Taxa de dados adaptativa LoRaWAN aprimorada para dispositivos móveis

Dispositivos da Internet das Coisas

Arshad Farhad , Dae Ho Kim , Santosh Subedi * Jae-Young Pyun

Laboratório de Sistemas de Comunicação Móvel e Sem Fio, Departamento de Engenharia de Informação e Comunicação, Universidade Chosun, Gwangju 61452, Coreia; arshad@chosun.kr (AF); wireless@chosun.kr (D.-HK); santoshmsubedi@chosun.kr (SS)

* Correspondência: jypyun@chosun.ac.kr

Recebido: 29 de setembro de 2020; Aceito: 7 de novembro de 2020; Publicado: 12 de novembro de 2020



Resumo: Uma rede de longa distância (LoRaWAN) é uma das principais tecnologias de comunicação para aplicações de Internet das Coisas (IoT). Para atender aos requisitos de aplicação habilitados para IoT, LoRaWAN emprega um mecanismo de taxa de dados adaptativa (ADR) tanto no dispositivo final (ED) quanto no servidor de rede (NS). O ADR gerenciado por NS visa oferecer um recurso confiável e com uso eficiente de bateria para EDs, gerenciando o fator de propagação (SF) e a potência de transmissão (TP). No entanto, essa gestão é gravemente afetada pela falta de agilidade na adaptação às variáveis condições do canal. Assim, podem ser necessárias várias horas ou mesmo dias para convergir para um nível de comunicação estável e energeticamente eficiente. Portanto, propomos dois ADRs gerenciados por NS, um ADR baseado em filtro gaussiano (G-ADR) e um ADR baseado em média móvel exponencial (EMA-ADR). Ambos os esquemas propostos operam como um filtro passa-baixa para resistir a mudanças rápidas na relação sinal-ruído dos pacotes recebidos no NS. Os métodos propostos visam alocar os melhores SF e TP para EDs estáticos e móveis, buscando reduzir o período de convergência no modo confirmado de LoRaWAN. Com base nos resultados da simulação, mostramos que os esquemas G-ADR e EMA-ADR reduzem o período de convergência num cenário estático em 16% e 68%, e num cenário de mobilidade em 17% e 81%, respectivamente, em comparação com RAM típica. Além disso, mostramos que os esquemas propostos são bem-sucedidos na redução do consumo de energia e no aumento da taxa de sucesso dos pacotes.

Palavras-chave: LoRaWAN; taxa de dados adaptativa; mobilidade; Internet das Coisas; atribuição de recursos; período de convergência

1. Introdução

Redes de área ampla de baixo consumo de energia (LPWANs) são uma tecnologia crescente que visa aplicações estáticas e móveis de Internet das Coisas (IoT) que exigem comunicação de longo alcance, com eficiência energética e baixa taxa de dados [1]. Uma rede de longa distância (LoRaWAN) [2] é uma tecnologia LPWAN que tem sido amplamente adotada como um substituto para aplicações IoT [3]. As aplicações IoT podem ser categorizadas em nove grupos: medição inteligente, agricultura (por exemplo, monitoramento de colheitas), rastreamento (por exemplo, logística e localização de animais de estimação), redes inteligentes, saúde, indústria, cidade inteligente, automação residencial e telemática de veículos [4]. Essas aplicações têm requisitos rigorosos, incluindo comprimento de pacote, taxa de sucesso de pacote (PSR), confiabilidade e características de mobilidade [5]. LoRaWAN fornece soluções eficazes para atender a uma ampla gama de requisitos de aplicações IoT.

Os dispositivos finais LoRaWAN (EDs) são classificados como classe A, classe B e classe C [6]. Entre eles, os EDs classe A lidam com sensores e são implementados em aplicações IoT, devido à sua eficiência energética e comunicações bidirecionais. A Figura 1a mostra uma rede LoRaWAN, onde EDs que descrevem nós IoT sempre transmitem pacotes para um gateway (GW) enquanto usam fatores de espalhamento (SFs) variando de sete (SF7) a doze (SF12) no uplink (UL). O GW está conectado através de outra comunicação

tecnologias (por exemplo, celular (3G/4G), Ethernet) para um servidor de rede centralizado (NS) responsável por funções como gerenciamento de tráfego [7]. O NS é implantado em um ambiente de computação em nuvem (raramente co-localizado próximo ao GW [8]), responsável por coletar dados do GW e enviá-los para aplicações apropriadas. Portanto, no caso de aplicações sensíveis a atrasos, soluções de edge e fog computing também têm sido estudadas a fim de implantar componentes de rede LoRaWAN [9,10], aproximando serviços, como análises avançadas e armazenamento distribuído, dos EDs [11]. Na classe A, cada transmissão UL é seguida por duas janelas de recepção, nomeadamente RX1 e RX2, para receber uma confirmação (ACK) de downlink (DL) do NS, conforme destacado na Figura 1b. RX1 usa o mesmo SF e conjunto de canais da transmissão UL, enquanto o RX2 usa um canal dedicado (ou seja, 869,525 MHz) e um SF fixo (ou seja, SF12) [12]. Se um ACK não for recebido em ambas as janelas de recepção, um atraso aleatório, ou seja, ACK_TIMEOUT, é adicionado antes de uma retransmissão ser conduzida para evitar colisões consecutivas. Para tanto, um ED escolhe um tempo aleatório entre 1 e 3 s e aplica uma retransmissão [13].

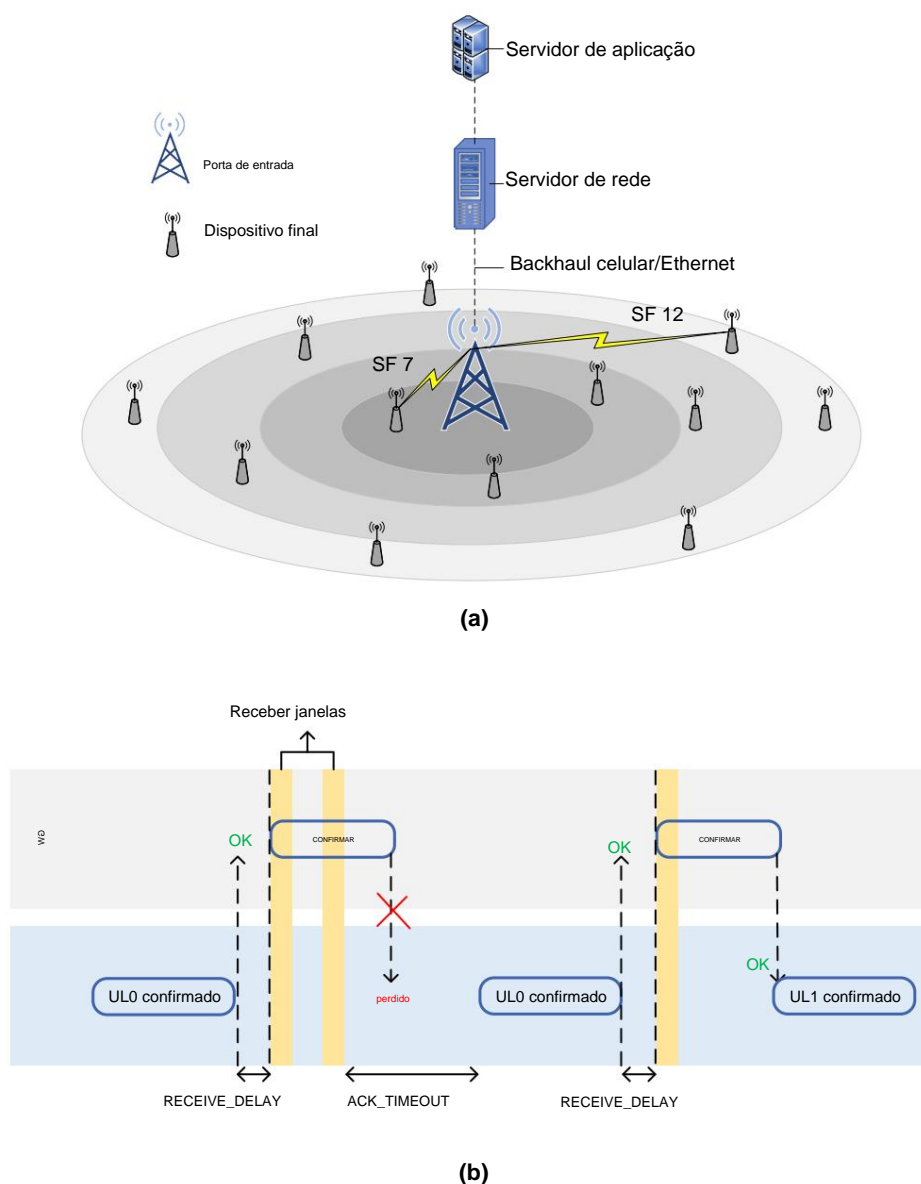


Figura 1. Um breve funcionamento da rede de longa distância (LoRaWAN): **(a)** arquitetura subjacente composta por dispositivos finais (EDs), gateway (GW), servidor de rede (NS) e servidor de aplicativos, e **(b)** transmissão procedimento em modo confirmado.

Além disso, os EDs classe A do LoRaWAN empregam um mecanismo de taxa de dados adaptativa (ADR) tanto no ED quanto no NS [14]. O ADR gerenciado pelo ED é responsável apenas pelo incremento do SF. Ao mesmo tempo, o ADR gerenciado por NS ajusta tanto o SF quanto a potência de transmissão (TP) após receber M ($M = 20$ é usado [15] para os experimentos e discussão neste estudo) pacotes UL do ED com base no canal predominante condições. No entanto, o desempenho do ADR em termos do PSR é severamente afetado pelas condições variáveis do canal [16]. Portanto, o ADR típico sofre de um alto período de convergência, devido ao processo demorado dos ADRs gerenciados pelo ED e pelo NS.

O esquema ADR típico requer várias horas ou dias para convergir para um estado de comunicação estável e com eficiência energética quando o NS começa a monitorar os pacotes M. Durante o período de convergência, o ADR típico sofre uma enorme perda de pacotes causada por interferência e pacotes que chegam abaixo da sensibilidade pré-definida no GW. O período de convergência para EDs estáticos foi estudado sob condições variáveis de canal em [17], onde foi revelado que o ADR sofre de um período de alta convergência quando a qualidade do link se degrada, e os EDs querem passar de um SF ou TP mais baixo para um mais alto para se recuperar sua conectividade. Além disso, os autores em [18] propuseram algumas mudanças em um ADR típico, onde foi sugerido alterar o SF e o TP do ED individual após cinco pacotes UL (em um ADR típico, esse histórico de UL é definido como M pacotes) sob um ambiente ED estático. Portanto, a fim de reduzir o período de convergência e melhorar o PSR (para IoT EDs estáticos e móveis) de forma confirmada, propomos dois ADRs gerenciados por NS e reivindicamos as seguintes contribuições.

1. Primeiro, propomos um ADR baseado em filtro gaussiano (G-ADR) para suavizar a relação sinal-ruído (SNR) de M pacotes recebidos no NS. Através de experimentos em tempo real e simulações computacionais, mostramos que o SNR dos pacotes LoRaWAN recebidos em um NS segue uma distribuição gaussiana. Ao empregar um filtro gaussiano, o G-ADR pode encontrar de forma ideal os parâmetros SF e TP, o que resulta em um período de convergência reduzido e em um PSR melhorado.
2. Em segundo lugar, propomos outro ADR gerido pelo NS com base na média móvel exponencial (EMA-ADR). Através de simulações computacionais, mostramos que o processo de suavização utilizando o filtro EMA diminui os picos dos valores brutos de SNR. Conseqüentemente, o EMA-ADR avança o PSR e reduz o período de convergência quando comparado ao ADR típico.
3. Além disso, mostramos que tanto o G-ADR quanto o EMA-ADR, quando utilizados em conjunto com o método inicial de alocação do SF, melhoram significativamente o período de convergência e o PSR.

O restante do artigo está organizado da seguinte forma: A Seção 2 fornece uma visão geral da literatura publicada composta por um aprimoramento e redução do período de convergência em um ADR típico. A Seção 3 detalha os esquemas propostos. A Seção 4 apresenta os resultados experimentais e uma análise dos esquemas propostos em comparação com o ADR típico. A seção 6 apresenta algumas considerações finais.

2. Estudos Relacionados

Muitos estudos foram realizados para resolver os problemas de ADRs típicos em termos de período de convergência, escalabilidade e PSR. Em particular, a literatura está focada no aprimoramento [19–22] e na redução do período de convergência de uma RAM típica [17,18].

2.1. Melhorias no ADR típico

Em [19], é apresentada uma abordagem para evitar alterações desnecessárias no SF que ocorrem no ADR gerenciado pelo NS. Seu método oferece um classificador de congestionamento, que determina se deve-se mudar para um SF mais alto ou ajustar o tempo de espera para evitar congestionamento massivo. O classificador de congestionamento é baseado em pacotes UL e DL. Se o número de pacotes DL recebidos pelo ED for igual ao número de pacotes UL, então nenhum congestionamento será mostrado. Caso contrário, o SF é reduzido porque um SF mais elevado é vulnerável a interferências devido a um elevado tempo no ar. Quando um ED não recebe um ACK após ADR_ACK_DELAY, ele escolhe um longo tempo de espera. Por outro lado, aumenta o SF para estender o

escalabilidade e cobertura da rede. Os autores mostraram que seu método reduz o atraso porque o ED mantém o SF e aumenta o tempo de recuo quando ocorre congestionamento.

Um esquema ADR+ foi proposto em [20] para melhorar o desempenho do ADR. O esquema ADR+ modifica ligeiramente o ADR gerenciado por NS, calculando o SNR médio dos últimos M pacotes recebidos. Assim, o ADR+ desempenha um papel vital no aumento da consistência e eficiência energética dos EDs sob condições variáveis de canal. O ADR+ apresenta um desempenho melhorado em termos de PSR e consumo de energia quando comparado com um ADR típico.

Deve-se notar que um ADR típico é inadequado e ineficiente quando os EDs são móveis, pois gerencia o SF e o TP após a recepção de M pacotes [21]. Além disso, o ADR típico não considera a degradação do sinal recebido causada pela mobilidade do ED, pela presença de perda de penetração no edifício ou por objetos em movimento. Portanto, Ref. [21] sugere um ADR aprimorado gerenciado por rede (E-ADR). O E-ADR baseia-se principalmente na técnica de trilateração para estimar a próxima posição de um ED móvel com uma trajetória pré-definida. Um experimento usando E-ADR em comparação com um ADR típico foi conduzido aplicando cinco EDs e três GWs em um cenário de teste. Os autores afirmam que o NS define rapidamente SF e TP, o que resulta em baixo consumo de energia e perda de pacotes.

Em [22], os autores sugerem outro ADR aprimorado com adaptação da taxa de codificação no LoRaWAN sob o modo não confirmado de LoRaWAN. O objetivo principal é melhorar o equilíbrio entre o PSR e o consumo de energia, que considera a taxa de codificação e o efeito de captura, tomando a média de M pacotes para ajustar o desempenho do link dos EDs. O método descrito em [22] supera um ADR típico em termos de consumo de energia e justiça.

Resumindo, os métodos apresentados em [19–22] melhoraram o desempenho de uma RAM típica. O método baseado em classificador de congestionamento descrito em [19] está focado apenas em melhorar a adaptação da taxa de dados. Porém, ignora a adaptação do TP porque o consumo de energia no LoRaWAN é baseado principalmente no TP e no SF [23]. Em [20], o ADR+ foi avaliado apenas em um ambiente pequeno para DEs estáticos. O E-ADR descrito em [21] foi considerado para EDs móveis; no entanto, baseia-se unicamente numa trajetória pré-definida do DE. Finalmente, o método em [22] foi comparado a uma ADR típica em modo não confirmado. Observe que um desempenho típico de ADR é significativamente afetado pela comunicação bidirecional que suporta tanto UL quanto DL. Tendo estes factos em mente, propomos dois ADR geridos pelo NS para melhorar o desempenho do ADR em termos de período de convergência, PSR e consumo de energia.

2.2. Redução do período de convergência em ADR típico

Uma avaliação de desempenho do período de convergência sob diferentes parâmetros configuráveis foi realizada em [17]. Este estudo fornece uma visão aprofundada do ADR típico sob condições variáveis de canal, destacando limitações, como o período de convergência. Os resultados da simulação mostraram que o período de convergência do ADR e o consumo de energia dependem principalmente das condições do link e do número de EDs. Foi revelado que o ADR sofre um alto período de convergência sob condições variáveis de canal e quando os EDs alteram seu SF ou TP para um valor mais alto (como SF = 12 e TP = 14 dBm) para recuperar sua conectividade com o GW. Além disso, o período de convergência é mais sensível a ADR_ACK_DELAY do que ADR_ACK_LIMIT (isto é, ADR_ACK_DELAY e ADR_ACK_LIMIT são iguais a 32 e 64 pacotes UL no ADR gerenciado por ED, respectivamente). Os resultados da simulação também revelaram que o período típico de convergência do ADR introduz maior consumo de energia e perdas de pacotes mais significativas.

Foi recentemente indicado que ADRs típicos (gerenciados por ED e NS) sofrem de problemas de convergência [18]. Um ADR gerenciado por ED é ineficiente para links com perdas, o que resulta em um tempo considerável para convergir para um estado constante e estável. Enquanto isso, o ADR gerenciado por NS leva M pacotes para alterar o SF e o TP, o que torna muito demorado determinar uma configuração confiável. Portanto, Ref. [18] sugere algumas mudanças (como a diminuição de pacotes M durante a adaptação da configuração SF e TP) em ADRs gerenciados por ED e NS para aprimoramento. O ADR gerenciado por NS controla o ADR gerenciado por ED calculando o PSR de um ED individual antes de enviar o pacote DL (LinkADRReq) em resposta a

ADRACKReq. Aqui, o PSR é comparado a um limite predefinido (ou seja, $PSR < 80\%$). Se a condição mantém, NS envia o comando da camada MAC LinkADRReq para o ED contendo SF e TP. De fato, ele altera o SF e o TP do ED individual após cinco pacotes UL (em um ADR típico, esse histórico do UL é definido como M pacotes). O desempenho de ambos os métodos aprimorados (RAMs gerenciadas por ED e NS) foi em comparação com ADRs típicas, onde os resultados mostram melhores resultados em termos de convergência período, consumo de energia e PSR. No entanto, a avaliação de desempenho dos métodos aprimorados é limitado a EDs estáticos e é apenas um modo de comunicação confirmado. Em contrapartida, consideramos mobilidade sob interferência intra-SF e diferentes modelos de perda de propagação (como log-distância e sombreamento de perdas).

3. Esquemas ADR propostos

A Figura 2 mostra uma visão geral dos esquemas de ADR propostos e geridos pelos NS. Observe que não modificar o método ADR gerenciado por ED, mas a operação ADR gerenciada por NS é substituída pelo métodos propostos.

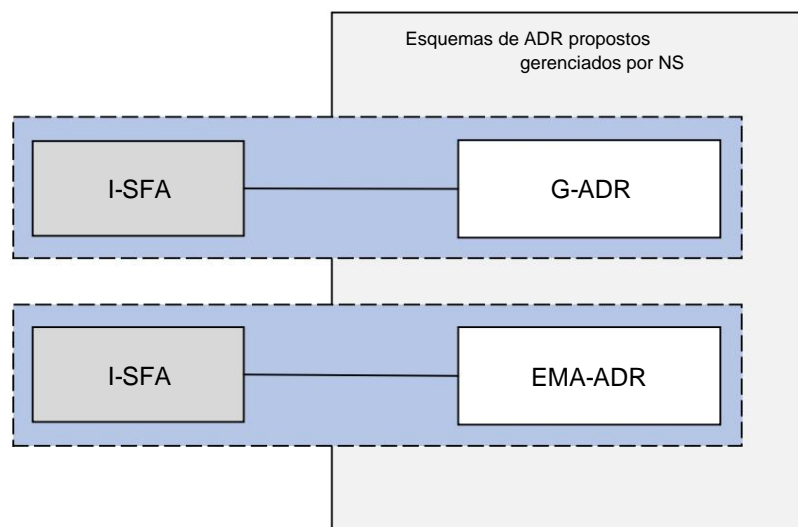


Figura 2. Visão geral dos esquemas de ADR propostos e geridos pelos NS.

Conforme indicado na Figura 2, usamos um esquema de alocação inicial de SF (I-SFA) [24] durante a implantação fase em conjunto com os métodos propostos. O objectivo principal do regime I-SFA é atribuir o FE a os EDs durante a implantação inicial com base na intensidade do sinal recebido (Pr) no GW (ou seja, um GW receberia do ED). O esquema I-SFA não segue uma operação de atribuição de SF de largura fixa, devido às condições variáveis do canal causadas pelo sombreamento e desbotamento. O trabalho O procedimento do esquema I-SFA é mostrado na Figura 3, onde cada ED calcula Pr no GW. Baseado em Pr , os SFs são alocados de forma que Pr seja sempre maior que a sensibilidade de cada SF (Sg , conforme mostrado na Tabela 1), diminuindo assim a interferência e evitando a perda de pacotes que chegam dos EDs sob a sensibilidade no GW.

Tabela 1. Sensibilidade e relação sinal-ruído (SNR) necessária de EDs e GW no modo 125 kHz [25,26].

Sensibilidade SF GW (Sg) [dBm] Sensibilidade ED (Se) [dBm] SNR [dB]			
12	ŷ142,5	ŷ137,0	ŷ20
11	ŷ140,0	ŷ135,0	ŷ17,5
10	ŷ137,5	ŷ133,0	ŷ15
9	ŷ135,0	ŷ130,0	ŷ12,5
8	ŷ132,5	ŷ127,0	ŷ10
7	ŷ130,0	ŷ124,0	ŷ7,5

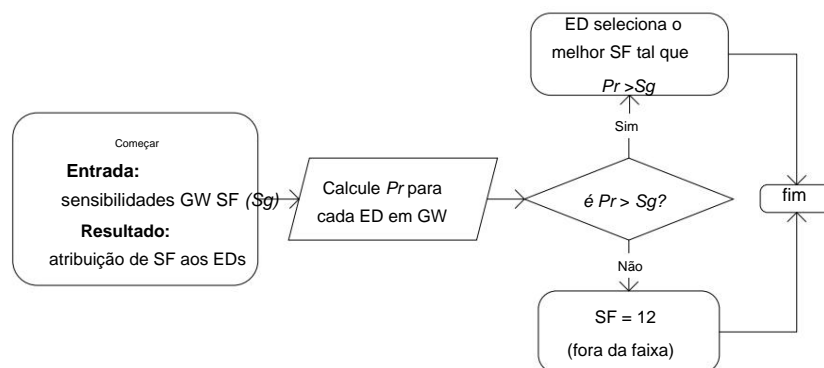


Figura 3. Procedimento de trabalho do esquema I-SFA [24].

3.1. ADR baseado em filtro gaussiano (G-ADR)

A intensidade do sinal recebido no GW pode ser considerada uma distribuição gaussiana [27]. Por exemplo, mostramos através de experimentos em tempo real e simulações computacionais que o SNR recebido no NS segue uma distribuição gaussiana usando SF 7 e SF 12, conforme mostrado na Figura 4a,b, respectivamente. Portanto, propomos o uso de um filtro gaussiano para estimar o valor do SNR para calcular com precisão SF, TP, ou ambos, porque esses parâmetros (SF e TP) são dependentes do SNR. Através de uma simulação computacional, calculamos a intensidade do sinal recebido com base em um modelo de medição do enlace, que considera diversos aspectos, como TP, sombreamento, desvanecimento rápido e ganhos de antena, conforme mostrado em [6]. As etapas envolvidas no esquema G-ADR proposto são as seguintes:

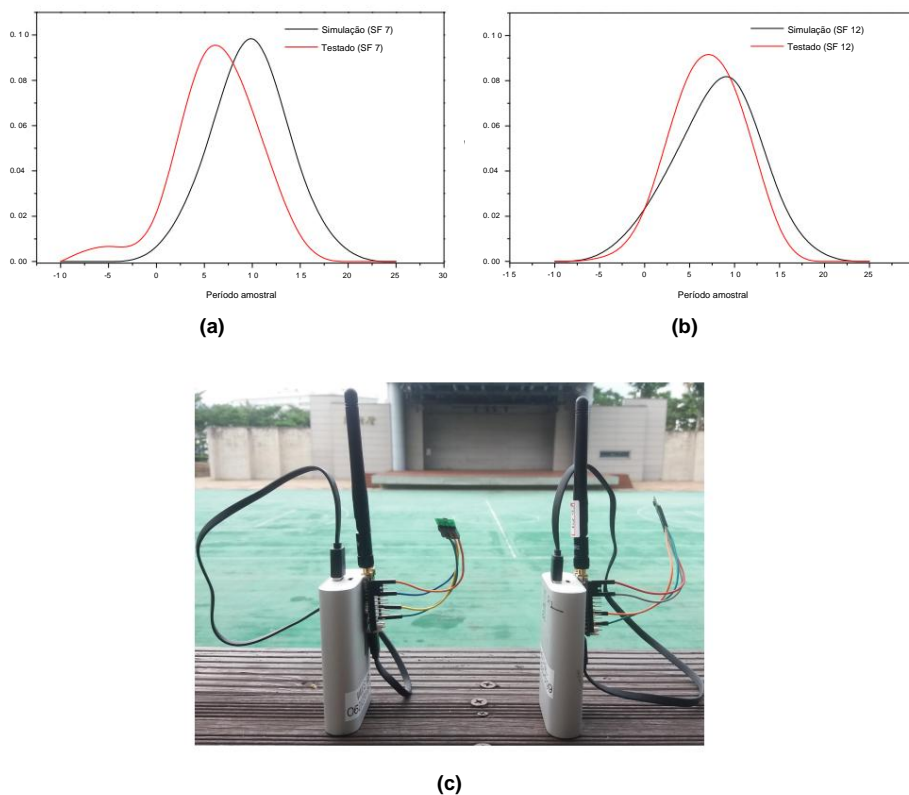


Figura 4. A função de densidade de probabilidade (PDF) do SNR de M pacotes recebidos no servidor da rede usando experimento em tempo real e simulação computacional: **(a)** PDF do SNR usando SF7; **(b)** PDF de SNR usando SF12, e **(c)** implantação de dois EDs com SF7 e SF12.

1. Quando o NS recebe um pacote UL com o bit ACK habilitado no cabeçalho do quadro do comando MAC ADRACKReq, o NS começa a rastrear o SNR dos M pacotes recebidos. O algoritmo G-ADR é iniciado calculando a média (μ) e a variância (γ) usando (1) e (2) [28], respectivamente.

$$\mu = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^M \text{SNR}_i, \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^M (\text{SNR}_i - \mu)^2, \quad (2)$$

onde i é o i -ésimo pacote entre M , onde $M = 20$.

Agora, a função de densidade de probabilidade (PDF) é expressa da seguinte forma [28]:

$$f(\text{SNR}) = \gamma \frac{1}{\gamma} e^{-\frac{\gamma(\text{SNR} - \mu)^2}{\gamma}}. \quad (3)$$

2. O G-ADR proposto aceita os valores SNR centralizados que estão dentro da faixa efetiva de $\mu + \gamma$ e $\mu - \gamma$. O valor SNR é estimado calculando a média dos valores que estão dentro da faixa efetiva.
3. Finalmente, o G-ADR obtém o SNR necessário (SNRreq, um limite de demodulação baseado na taxa de dados atual (DR), conforme mostrado na Tabela 1) e calcula a margem SNR (SNRmargin) e Nstep enquanto usa (4) e (5) [17], respectivamente.

$$\text{SNRmargin} = \text{SNRm} - \text{SNRreq}(\text{DR}) - \text{margin dBm}, \quad (4)$$

$$N_{\text{passo}} = \text{int} \left(\frac{\text{Margem SNR}}{3} \right). \quad (5)$$

Em (5), Nstep representa o número de vezes que o algoritmo é executado [17]. Quando Nstep é 0, o ED já está utilizando a melhor condição de configuração possível. Se Nstep for maior que 0, indica que ainda existe uma margem razoável para otimizar os parâmetros configuráveis. Primeiro, o número de SFs é diminuído até atingir um limite mínimo (observe que o ADR gerenciado pelo NS não aumenta o SF, e apenas o ADR gerenciado pelo ED é responsável por aumentar esse número). Segundo, o TP é diminuído em 2 até atingir um limite mínimo (ou seja, 2 dBm). Finalmente, quando Nstep é negativo, apenas o TP é aumentado em 2 até que o limite máximo seja atingido (ou seja, 14 dBm). Essas configurações de parâmetros (SF e TP) são transmitidas para o ED correspondente durante o uso do comando LinkADRReq MAC como não confirmado (ou seja, NS não requer notificação ACK dos EDs). O Algoritmo 1 descreve a operação detalhada do método G-ADR.

3.2. ADR baseado em média móvel exponencial (EMA-ADR)

Um EMA é um tipo de média móvel ponderada, que se refere a um fator de ponderação para cada valor SNR de M pacotes. Em geral, o SNR varia ao longo do tempo, mesmo em um ambiente fixo, resultando em uma configuração SF e TP imprecisa [16]. As razões pelas quais o SNR mostra uma variabilidade tão alta no espaço e no tempo incluem vários fatores de ruído, desvanecimento, interferência e atenuação. A EMA para dados de séries temporais pode ser calculada iterativamente, como segue:

$$S_t = \begin{cases} Y_t, & t = 1 \\ \gamma \cdot Y_t + (1 - \gamma) \cdot S_{t-1}, & t > 1 \end{cases} \quad (6)$$

Em (6), Y_t representa o valor SNR atual no tempo t , S_t denota o valor da EMA em qualquer momento t e γ é um fator de suavização ($0 < \gamma < 1$). Observe que um valor maior de γ reduz o nível de suavização, enquanto um valor de γ próximo de zero tem um efeito de suavização maior e é menos responsivo ao SNR recente.

observações. Portanto, usamos $\tilde{\gamma} = 0,7$, devido ao recurso de mobilidade (Ref. [29] usa $\tilde{\gamma} = 0,5$ para posicionamento interno).

Algoritmo 1: Esquema proposto de taxa de dados adaptativa baseada em filtro gaussiano (G-ADR).

Entrada : TP = 2 $\tilde{\gamma}$ 14, SF = 7 $\tilde{\gamma}$ 12, M, SNRreq, devicemargin

Saída : SF e TP //

calcula 1. média

do SNR de M pacotes recebidos 2. Variância ($\tilde{\gamma}$ 3.

Desvio padrão $\sqrt{\tilde{\gamma}}$)

($\tilde{\gamma}$)

4. LowPassFilter (LPF) = $(\mu - \tilde{\gamma})$ e HighPassFilter (HPF) = $(\mu + \tilde{\gamma})$ **para** $i \tilde{\gamma} 0$ **a** M **do**

 SNR = getSNR(i) **se**

 (SNR $\tilde{\gamma}$ LPF e SNR $\tilde{\gamma}$ HPF) **então** insira SNR
 | em SNRlist

fim

fim

para $i \tilde{\gamma} 0$ **para** lista SNR **faça**

 | Soma

fim

SNRm = Soma/ Tamanho da lista

SNR // calcula

Servidor de rede LoRaWAN ADR

1. SNRreq = piso de demodulação (taxa de dados atual) 2.

devicemargin = 10 3.

Padrão LoRaWAN

SNRmargin = (SNRm - SNRreq - devicemargin) 4. steps

= int (SNRmargin/3) **while** (steps

> 0 e SF > SFmin) **do** SF = SF - 1

 passos = passos -

1 **fim**

while (etapas > 0 e TP > TPmin) **faça**

 TP = TP - 2

 passos = passos -

1 **fim**

while (etapas < 0 e TP < TPmax) **faça**

 TP = TP + 2

 passos = passos +

1 **fim**

NS transmite LinkADRRReq

Em termos de estimativa de SF e TP ao usar o SNR medido, é necessário um processo de suavização de SNR. Portanto, realizamos uma suavização do SNR baseada em filtro EMA para vários pacotes recebidos no NS por meio de uma simulação computacional, conforme mostrado na Figura 5. Pode-se observar que o processo de suavização reduziu os picos dos valores brutos de SNR. Além disso, a operação de suavização na suavização EMA pode produzir resultados apenas com as duas primeiras observações SNR [29].

Foi recentemente demonstrado em [20] que, tomando a média de M pacotes, pode-se melhorar os resultados em termos de PSR e diminuir o consumo de energia quando comparado a um ADR típico. Portanto, propomos a utilização do filtro EMA para suavização de SNR, que resiste às rápidas mudanças no SNR de M pacotes e atua como uma função de média local, e está diretamente relacionado ao parâmetro $\tilde{\gamma}$.

A EMA-ADR proposta pode melhorar o desempenho em termos de PSR, período de convergência, e consumo de energia.

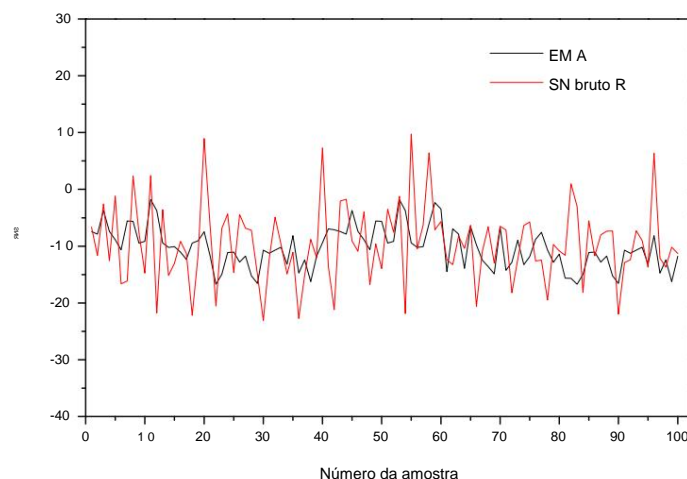


Figura 5. SNR suavizado usando filtro baseado em média móvel exponencial (EMA).

4. Resultados Experimentais e Análise

Nesta seção, apresentamos uma avaliação abrangente do desempenho dos esquemas propostos, que são examinados em comparação com ADR e ADR+ típicos [20] em termos da convergência período, PSR e consumo de energia em cenários estáticos e de mobilidade em modo confirmado. Os experimentos de simulação foram realizados usando um NS-3 [30].

4.1. Configuração de simulação

Consideramos EDs classe A (N), distribuídos uniformemente em torno de um único GW em um raio de 6 km. Estes EDs seguem a regulamentação de frequência da região europeia, onde o ciclo de trabalho UL do EDs e GW estão limitados a 1% e 10%, para os canais padrão, respectivamente. A antena GW e ED as alturas são definidas em 15 e 1,5 m, respectivamente. A mobilidade dos DEs segue um passeio aleatório bidimensional Modelo de mobilidade (2-D). EDs escolhem uma velocidade aleatória entre 0,5 e 1,5 m/s (em [31], 2 m/s é usado para posicionamento externo) e muda de direção a cada 1000 m [32]. Cada ED transmite γ pacotes/dia durante quatro dias do tempo de simulação, onde os resultados são gerados usando uma média de 10 simulações com sementes diferentes. A Tabela 2 apresenta o restante dos parâmetros de simulação.

Tabela 2. Parâmetros de simulação.

Parâmetro	Valor
Tempo de simulação [dias]	4
GW γ	1
—	24 pacotes/dia
Comprimento do pacote [bytes]	51 [24]
Limite de transmissão de pacotes UL	8
Expoente de perda de caminho	3,76 [33]
Modelo de propagação	log-distância
Sombreamento	distância de decorrelação = 110 m [34] e variância = 6 dB [35]
Velocidade de movimento ED [m/s]	0,5~1,5
Potência de transmissão [dBm]	2~14
Região de frequência	UE-868
Largura de banda do canal [kHz]	125
Taxa de codificação	4/8

4.2. Ambiente de rede LoRaWAN

4.2.1. Topologia de rede inicial

Durante a implantação inicial, SF = 12 é atribuído aos EDs como o SF inicial em todos os esquemas [18]. Em alguns casos, a dotação inicial do FE baseia-se no I-SFA (no caso apenas da proposta métodos). Os ambientes de simulação iniciais com SF = 12 e implantação I-SFA são mostrados em Figura 6a,b, respectivamente.

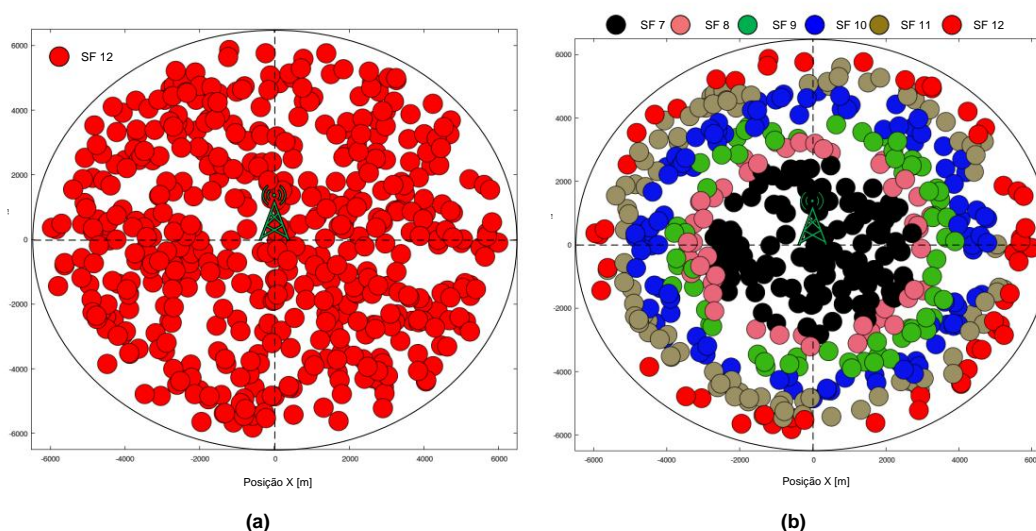


Figura 6. Topologia de rede inicial no caso de EDs estáticos com $N = 500$: **(a)** iniciando SF = 12, e **(b)** início de SF = I-SFA.

4.2.2. Topologia de rede final

A Figura 7 mostra uma visão de cima para baixo da rede, com um único GW localizado no centro e o localização de EDs individuais marcados de acordo com o SF estável final de cada ED. Na Figura 7, todos os Os EDs iniciam a transmissão de dados no UL usando SF = 12, onde o número de EDs é 500. A Tabela 3 lista os percentagens finais de atribuição de SF de EDs estáticos na convergência para aqueles que são mostrados na Figura 7.

Tabela 3. Porcentagem final de atribuição de SF de EDs estáticos (com SF inicial = 12, $N = 500$, uplink período = 24 pacotes/dia e tempo total de simulação = 4 dias).

Esquema	ADR	ADR+	G-ADR	G-ADR (I-SFA)	EMA-ADR	EMA-ADR (I-SFA)
SF 7	25,8%	14%	25,4%	SF 8 8,4%	6,2%	24%
6,4%	SF 9 11%	7%	12,2%	SF 10 16%	10%	25,8%
9,8%	14,4%	SF 11 24%	11,8%	23,4%	SF 12 14,8%	51,25%
18,2%						25,2%
						6,6%
						12%
						14%
						23,4%
						18,8%

4.3. Análise do Período de Convergência

Neste artigo, definimos o período de convergência como a quantidade de tempo até que os EDs na rede alcançar um SF e PSR estáveis. O período de convergência é altamente dependente tanto do SF inicial quanto do número de EDs na rede [18].

4.3.1. Cenário de EDs estáticos

O período de convergência e PSR de EDs estáticos durante um período de simulação de 4 dias é mostrado em Figura 8. Todos os esquemas iniciam a transmissão com SF = 12 e TP = 14 dBm, conforme indicado na Figura 8a.

A Figura 8a,b mostra a quantidade de tempo para os EDs atingirem um SF e PSR estáveis (ou seja, convergência período), enquanto tanto a ADR típica quanto a ADR+ requerem 20 horas para convergir para um estado estável. O primário A razão para este elevado período de convergência é que a frequência de um ADR típico (ADR gerido por NS) é totalmente arbitrário, que é ativado após pacotes M UL. As mudanças no ADR gerenciado pelo ED ocorrem no tempo em etapas de $ADR_ACK_DELAY \times uplink_period$ [18]. Este é um processo demorado e, portanto, produz um período de alta convergência. Em geral, uma ADR gerenciada por ED destina-se a maximizar a DL flexibilidade de tráfego, restrita pelas limitações do ciclo de trabalho impostas pelo LoRaWAN. Isto ajuda o EDs para restabelecer ligações de comunicação fiáveis através do aumento constante do SF ($SF < 12$). Esta flexibilidade aumenta o período de convergência no pior caso. Por exemplo, um ED está actualmente a empregar um valor mais baixo SF do que o necessário para entregar um pacote ao GW mais próximo com sucesso.

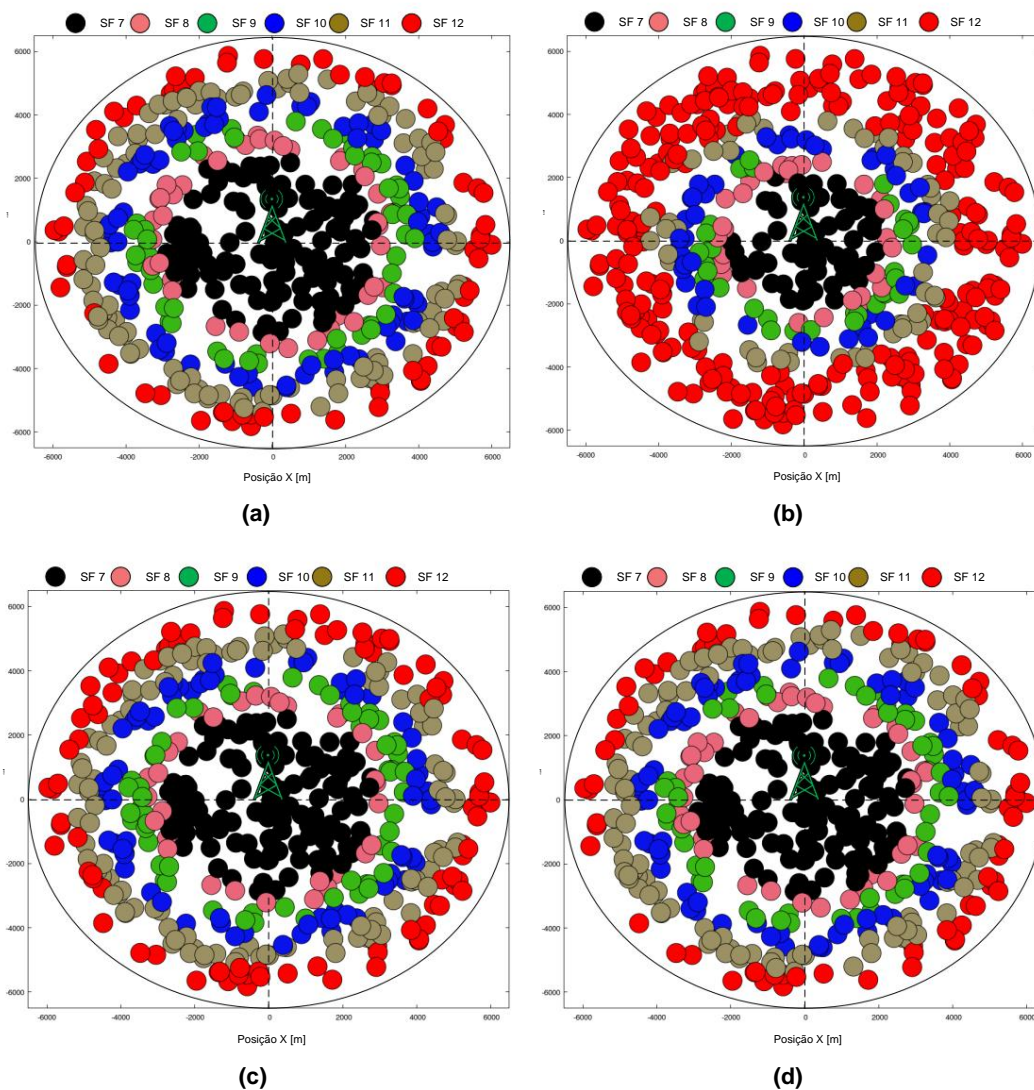


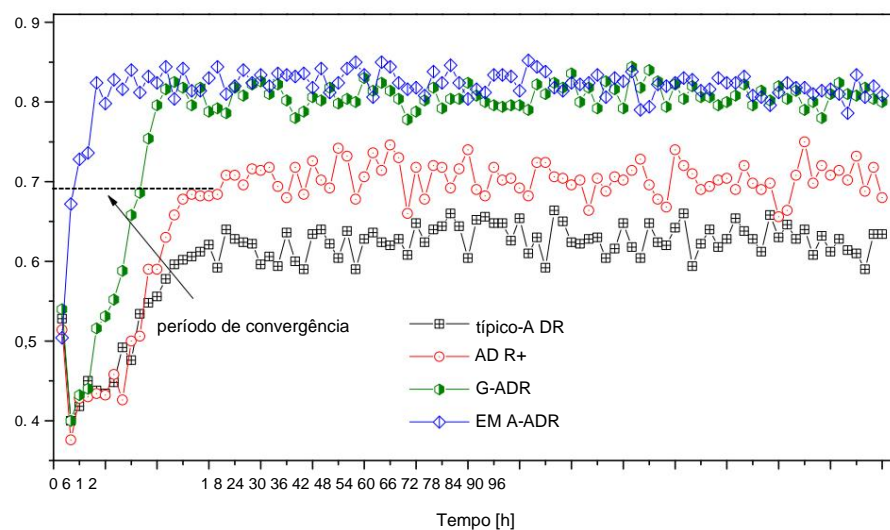
Figura 7. Topologia de rede final no caso de EDs estáticos com $N = 500$ e SF inicial = 12: (a) típico RAM; (b) RAM+; (c) G-ADR e (d) EMA-ADR.

Por outro lado, o G-ADR segue uma tendência semelhante com um período de convergência de 14 horas juntamente com uma melhor PSR quando comparado com um ADR típico e um ADR+. Além disso, a EMA-ADR supera as outras esquemas em termos de período de convergência (ou seja, 3 h) e PSR. Como a razão para o rápido convergência, o filtro EMA resiste às rápidas mudanças no SNR de M pacotes e atua como um função de média local. Assim, o esquema EMA-ADR proposto atinge um PSR mais elevado que está relacionado com ADR e ADR+ típicos, conforme mostrado na Figura 8a. A Figura 8b apresenta outro cenário em que G-ADR

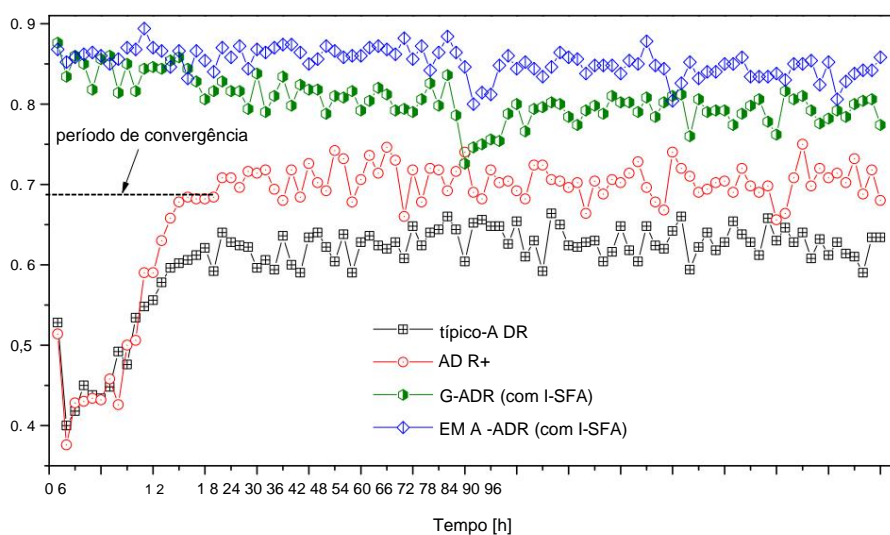
e EMA-ADR são empregados ao usar o esquema I-SFA. Não há período de convergência quando o I-SFA é utilizado em conjunto com o G-ADR e o EMA-ADR. Isso ocorre porque o I-SFA atribui um SF adequado aos EDs com base em Pr . A Tabela 4 destaca os períodos de convergência detalhados de diferentes EDs em horas para EDs estáticos.

Tabela 4. Período de convergência em horas para EDs estáticos (com SF inicial = 12, período de uplink = 24 pacotes/dia e tempo total de simulação = 4 dias).

N ADR ADR+ G-ADR G-ADR (I-SFA) EMA-ADR EMA-ADR (I-SFA)								
200	20	400	21	18	15	0	3	0
500	20	600	18	19	15	0	3	0
800	28	1000	40	20	14	0	5	0
				20	16	0	6	0
				28	26	0	11	0
				39	37	0	19	0



(a)



(b)

Figura 8. Período de convergência e PSR de EDs estáticos com $N = 500$: (a) alocação inicial de SF com 12, e (b) alocação inicial de SF com 12 (para ADR e ADR+) e alocação inicial de SF com I-SFA (para G-ADR e EMA-ADR).

4.3.2. Cenário de EDs móveis

A Figura 9 mostra o período de convergência e o PSR dos EDs móveis, onde tanto o ADR típico quanto o ADR+ requerem 15 horas e 14 horas, respectivamente. Além disso, na Figura 9a, podemos observar dois tipos de período de convergência (no caso de ADR típico e ADR+), que são o período de convergência inicial e o período de convergência causado pela mobilidade. O período de convergência inicial ocorre devido a um SF alto (porque todos os EDs inicialmente começam a transmitir pacotes com SF = 12). No entanto, após um curto período de estabilidade, o PSR diminui e tanto o ADR típico quanto o ADR+ sofrem um período de convergência. Este período de convergência é causado quando um ED móvel recebe um comando LinkADRreq MAC contendo SF e/ou TP do NS; o ambiente de propagação pode ter sido drasticamente alterado, resultando em perda massiva de pacotes [16,32].

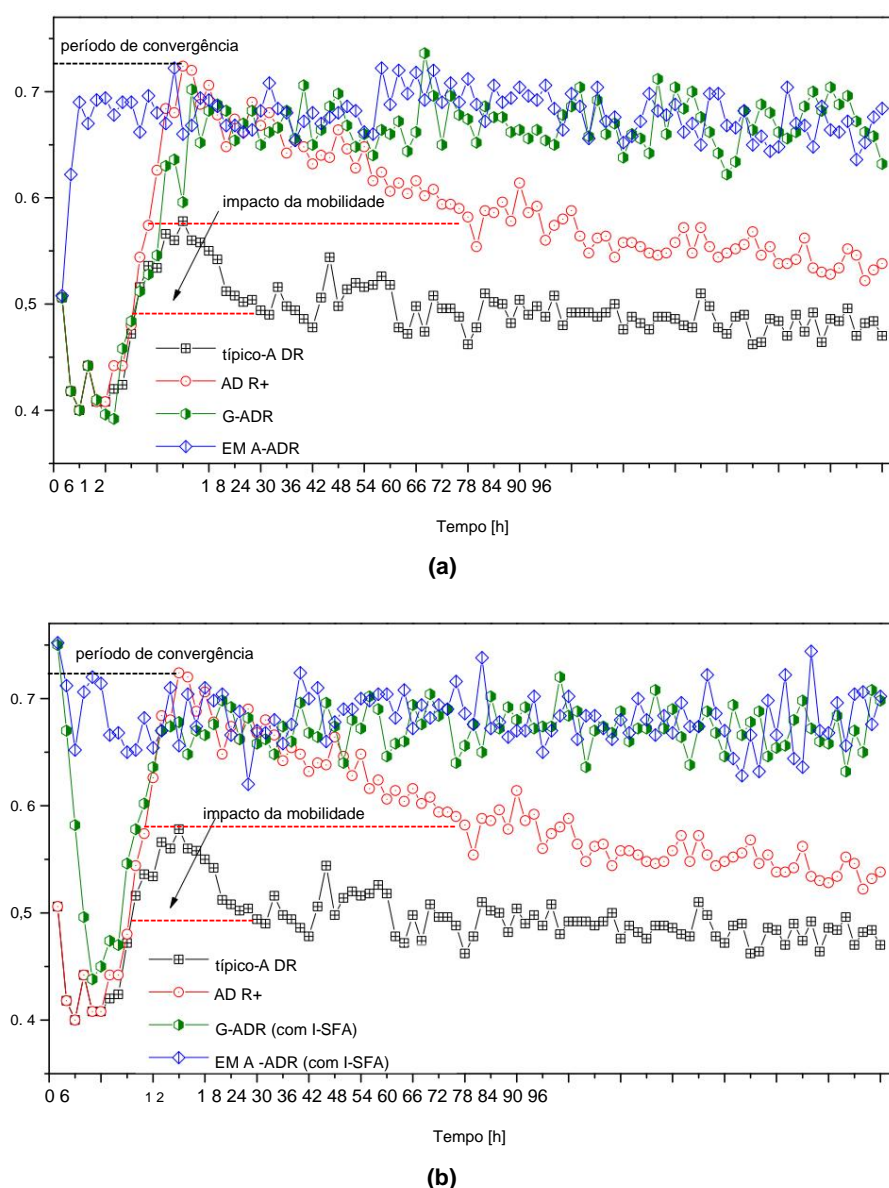


Figura 9. Período de convergência e PSR de EDs móveis com N = 500: **(a)** alocação inicial de SF = 12, e **(b)** alocação inicial de SF = 12 (para ADR e ADR+) e alocação inicial de SF com I-SFA (para G-ADR e EMA-ADR).

Na Figura 9a, G-ADR e EMA-ADR levam 16 horas e 3 horas para o período de convergência inicial, respectivamente, mas não sofrem um segundo período de convergência. Isto porque ambas as propostas

os esquemas empregam filtros, o que ajuda a reduzir o período de convergência e a melhorar o PSR. Como mostrado na Figura 9b, tanto o G-ADR quanto o EMA-ADR usam I-SFA como uma atribuição inicial de SF durante a implantação. Ao contrário de um cenário estático, tanto o G-ADR proposto como o EMA-ADR com o esquema I-SFA têm um período de convergência de 13h e 3h. No caso do G-ADR (com I-SFA), a mobilidade tem um peso considerável impacto no período de convergência porque os parâmetros recentemente adotados (ou seja, tanto SF como TP) não não fornecem garantia e comunicação eficiente. Nesse caso, o ambiente de propagação pode ter mudado radicalmente no momento em que o comando LinkADRreq atinge o ED móvel. Portanto, um novo pacotes deste ED com parâmetros adotados recentemente podem ser perdidos. No entanto, a EMA-ADR (com e sem I-SFA) tem um desempenho excepcionalmente bom nas condições de mobilidade, resultando em uma redução período de convergência e alto PSR. Os períodos de convergência detalhados de diferentes EDs móveis em horas são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5. Período de convergência em horas para EDs móveis (com SF inicial = 12, uplink período = 24 pacotes/dia, tempo total de simulação = 4 dias).

N ADR ADR+ G-ADR G-ADR (I-SFA) EMA-ADR EMA-ADR (I-SFA)							
200	22	400	21	15	16	3	0
23	500	15	20	17	15	6	0
600	13	800	14	16	13	3	3
20	1000	29	14	14	13	3	3
			21	22	15	4	3
			23	17	17	4	3

4.4. Análise média de PSR

Neste estudo, o PSR é definido como quando tanto o pacote de uplink confirmado quanto o equivalente pacotes downlink (ou seja, ACK) são recebidos corretamente em uma das tentativas de transmissão disponíveis [36].

4.4.1. Cenário de EDs estáticos

O PSR médio para um número diferente de EDs estáticos é apresentado na Figura 10. Aqui, Figura 10 mostra uma tendência decrescente no PSR com um número crescente de DEs em modo confirmado devido a alta interferência entre os SFs quando pacotes são transmitidos com SF alto. Esses SFs mais altos (por exemplo, 11 e 12) são fracos a interferências, devido ao alto ToA, o que influencia negativamente a capacidade do canal de comunicação [37–41]. Assim, as retransmissões dos EDs são aumentadas, o que resulta em congestionamento substancial e perda massiva de pacotes. No entanto, a EMA-ADR proposta com e sem o esquema I-SFA supera os outros esquemas em termos de PSR porque a EMA-ADR frequentemente altera os parâmetros SF e TP empregando um filtro passa-baixa e função de média. Além disso, para um cenário semelhante, conforme apresentado na Figura 10, a Tabela 6 mostra a melhoria média do PSR para ADR+ e os esquemas propostos quando comparados com um ADR típico.

Tabela 6. Melhoria do PSR para EDs estáticos.

N ADR ADR+ G-ADR G-ADR (I-SFA) EMA-ADR EMA-ADR (I-SFA)							
200	-	+12,5%	+17,3%	+8,9%	+19,7%	+22,8%	+24,3%
400	-	+17,7%	+5,5%		+20,7%	+23,8%	+25,0%
600	-	+14,7%	+5,1%	+12,9%	+19,5%	+20,9%	+22,7%
800	-				+21,5%	+21,0%	+23,0%
1000	-	+3,1%	+11,2%		+20,5%	+22,5%	+25,0%

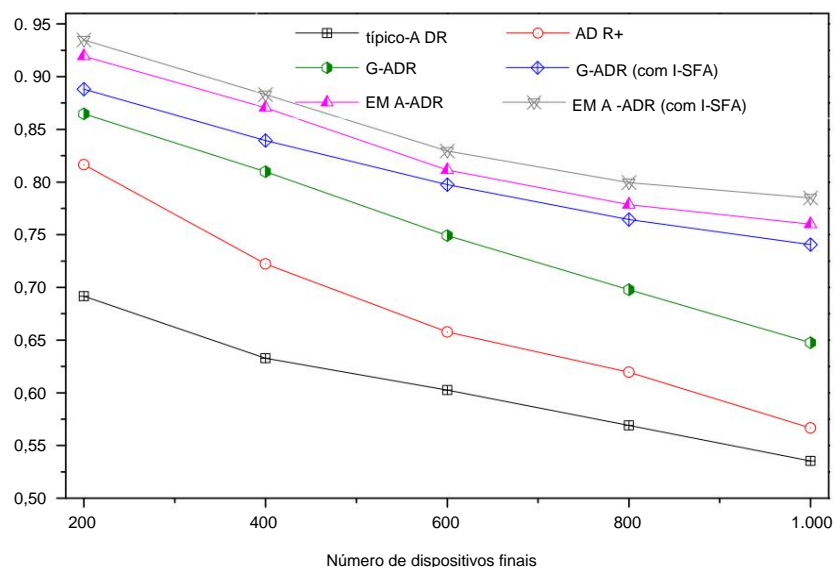


Figura 10. PSR médio de EDs estáticos (período de uplink = 24 pacotes/dia, tempo total de simulação = 4 dias).

4.4.2. Cenário de EDs móveis

A Figura 11 mostra uma análise do PSR médio para um número diferente de EDs móveis. A mobilidade dos EDs tem um alto impacto no PSR porque a mobilidade provoca mudanças frequentes na topologia, influenciando a intensidade do sinal entre um ED e um GW. Como resultado, o orçamento do link utilizado no local anterior após a movimentação do ED não seria mais válido. Assim, estes EDs são obrigados a alterar o seu SF devido às variações de intensidade do sinal recebido. Porém, quando o NS altera o SF e o TP (num típico ADR e ADR+), estes parâmetros deixam de ser válidos devido à mobilidade do ED. Como resultado, um pacote transmitido desses EDs é perdido por chegar abaixo da sensibilidade do GW.

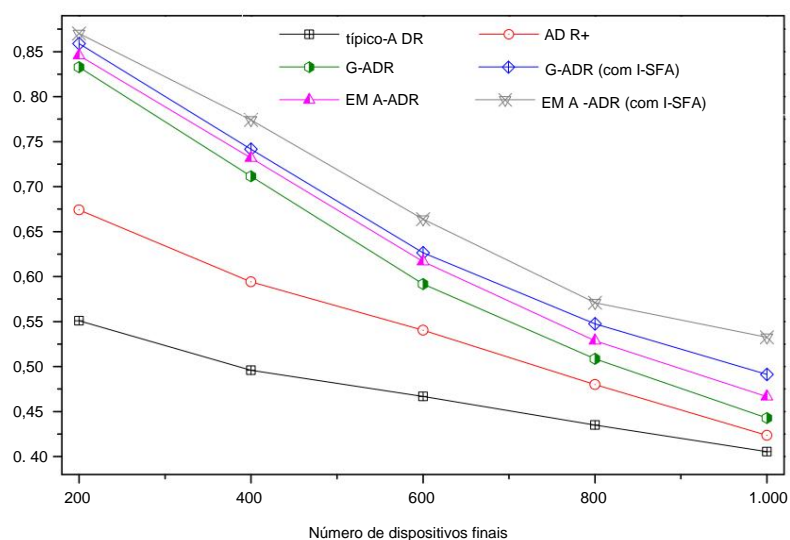


Figura 11. PSR médio de EDs móveis (período de uplink = 24 pacotes/dia, tempo total de simulação = 4 dias).

Outra razão para esta perda massiva de pacotes na Figura 11 é devido ao receptor saturado. Nessa situação, um pacote transmitido pelo ED chega ao GW com potência adequada; entretanto, todos os caminhos de recepção paralelos disponíveis já estão ocupados na recepção de outros pacotes recebidos, resultando em perda de pacotes. Um GW pode decodificar tantos pacotes sobrepostos quanto o número de caminhos que escutam aquele canal. Em outras palavras, quando um pacote chega em um determinado canal, ele “travará” apenas um caminho de recepção. Por outro lado, outros caminhos de recepção permanecem disponíveis para receber outros pacotes recebidos. Portanto, quando um pacote chega a um canal e não há caminhos de recepção disponíveis, o pacote é

perdido. Além disso, adotamos uma suposição de [35] que se o GW estiver em estado de recepção e for solicitado por o NS encaminhar um pacote DL para um ED, ele desistirá da recepção do pacote recebido e transmitirá o Pacote DL. Tanto o G-ADR quanto o EMA-ADR (com e sem I-SFA) conseguem um PSR alto quando comparados para um ADR e ADR+ típicos. Além disso, para um cenário semelhante ao da Figura 11, a Tabela 7 mostra o melhoria média do PSR para ADR+ e os esquemas propostos quando comparados com ADR típico.

Tabela 7. Melhoria do PSR para EDs móveis.

N	ADR+	G-ADR	G-ADR (I-SFA)	EMA-ADR	EMA-ADR (I-SFA)	
200	-	12.3	28.2	30,8	29,5	31,9
400	-	9,8	21.6	24,6	23,6	27,8
600	-	7.4	12,5	16,0	15,0	19,7
800	-	4,5	7.3	11.2	9.4	13.6
1000	-	1,8	3.8	8.6	6.1	12,7

4.5. Análise do Consumo Médio de Energia

Neste estudo, calculamos o consumo de energia como a energia total gasta pelos DEs durante o tempo de simulação dividido pelos pacotes recebidos com sucesso. Este estudo pressupõe uma abordagem baseada no estado (ou seja, transmitir, receber, esperar e dormir) módulo consumidor de energia [23]. O consumo de energia em LoRaWAN depende principalmente da quantidade de tempo gasto por um rádio LoRa em um determinado estado. Neste estudo utilizamos o módulo consumidor de energia, conforme mostrado em [42] e o módulo Semtech Ficha técnica do SX1272/73 com tensão de alimentação de 3,3 V [26].

4.5.1. Cenário de EDs estáticos

Em geral, o consumo de energia de todos os esquemas no modo confirmado apresenta um aumento tendência à medida que o número de DEs aumenta, conforme mostrado na Figura 12. No entanto, nos esquemas propostos, o consumo de energia é inferior ao típico ADR e ADR+, devido ao pequeno número de retransmissões. Entretanto, em ADR e ADR+ típicos, muitos EDs transmitem pacotes com alta parâmetros, incluindo SF = 12 e TP = 14 dBm. O número máximo de pacotes é perdido devido ao aumento da interferência, resultando em EDs retransmitindo pacotes com configurações mais altas. Portanto, alto consumo de energia é observado para ADR e ADR+ típicos, porque a energia de transmissão o consumo é baseado principalmente nos valores de SF, TP e ToA e nas retransmissões [23].

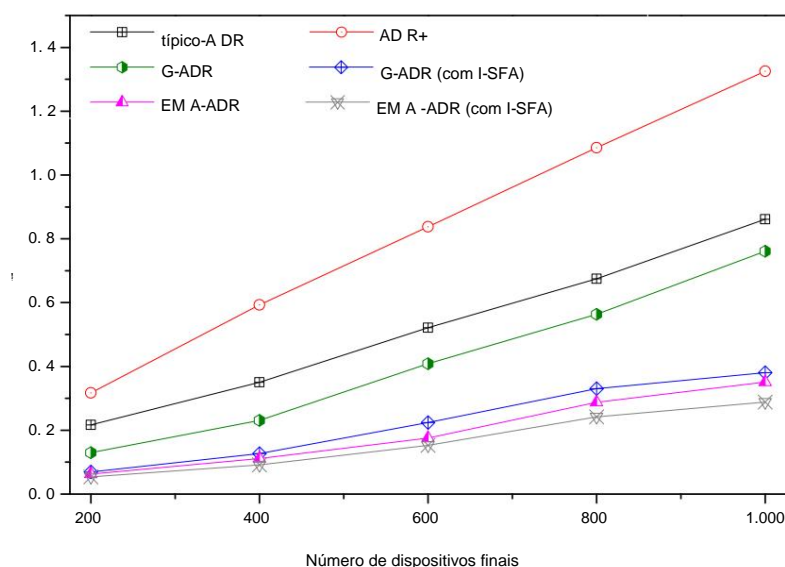


Figura 12. Consumo médio de energia para EDs estáticos (período de uplink = 24 pacotes/dia, simulação total tempo = 4 dias).

4.5.2. Cenário de EDs móveis

A Figura 13 mostra o consumo médio de energia dos esquemas propostos em comparação com ADR e ADR+ típicos. No geral, os consumos de energia do G-ADR e EMA-ADR propostos (com e sem I-SFA) são mais baixos devido ao PSR mais elevado. Geralmente, o consumo de energia de todos os esquemas mostra uma tendência crescente à medida que o número de EDs aumenta devido à retransmissão múltipla com altos SF e TP [32]. Quando pacotes são transmitidos com SFs mais altos, causa uma alta interferência devido ao alto ToA. Como os SFs mais altos são altamente suscetíveis a interferências, eles podem afetar negativamente o consumo de energia [37–41].

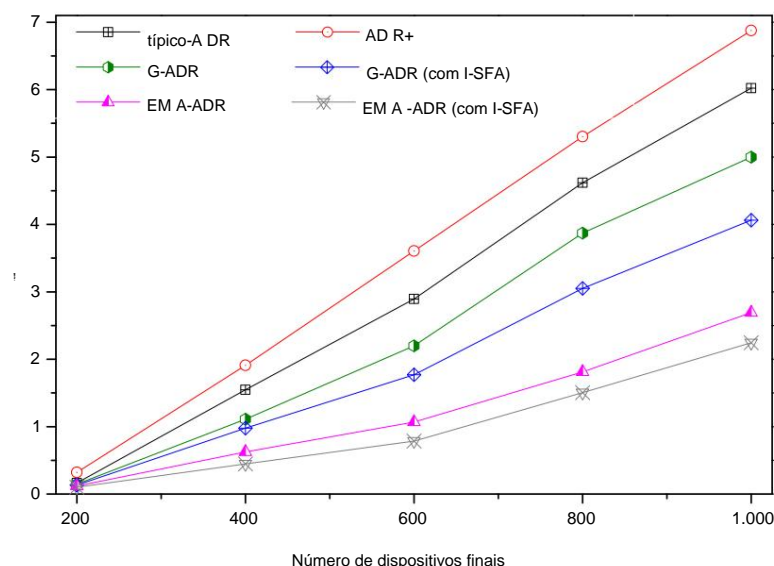


Figura 13. Consumo médio de energia para EDs móveis (período de uplink = 24 pacotes/dia, tempo total de simulação = 4 dias).

5. A adaptação dos esquemas propostos em uma implantação LoRaWAN

O ADR típico do LoRaWAN requer a operação do NS e do ED. Em geral, para implantar o novo ADR no ED, deve ser realizado o chamado processo de atualização de firmware. Essas atualizações de firmware geralmente são realizadas por meio de uma conexão com fio, como comunicação serial, ao ED de destino. No entanto, devido à natureza do enorme LoRaWAN, este método é desafiador. Portanto, STM, um dos fabricantes do LoRa Mote, suporta atualização de firmware pelo ar (FUOTA) [43,44]. FUOTA é uma excelente abordagem para implantar o algoritmo ADR no ED. No entanto, nossos métodos propostos (ou seja, G-ADR e EMA-ADR) são ADRs aprimorados no lado do servidor da rede e não requerem tecnologia de atualização ED como FUOTA. Portanto, os ADRs propostos podem ser implantados atualizando o próprio servidor como parte do seu trabalho de manutenção.

6. conclusões

LoRaWAN aloca recursos para os EDs (como SF e TP) por meio de métodos de taxa de dados adaptativa (ADR) gerenciados por NS e gerenciados por ED. No entanto, o ADR é gravemente afetado pela falta de agilidade para se adaptar às variáveis condições do canal. Assim, tem um período de convergência elevado e requer várias horas a dias para convergir para um estado de comunicação estável e energeticamente eficiente. Durante o período de convergência, o ADR típico sofre uma enorme perda de pacotes causada por interferência e pacotes que chegam abaixo da sensibilidade no GW. Portanto, para reduzir o período de convergência e melhorar o PSR (para IoT EDs estáticos e móveis), propusemos dois ADRs gerenciados por NS (G-ADR e EMA-ADR). Ambos os esquemas propostos operam como um filtro passa-baixa para resistir às rápidas mudanças no SNR de M pacotes. Através de experimentos de simulação NS-3, analisamos extensivamente os esquemas propostos em comparação com um ADR e ADR+ típicos. Mostramos que um ADR e um ADR+ típicos

sofrem de um período de convergência elevado devido ao processo demorado e à má adaptação dos o SF. Em contraste com o método típico de ADR os métodos propostos reduzem o período de convergência consumo de energia e melhorou o PSR para EDs estáticos e móveis. Observamos ainda que os métodos propostos são altamente adequados para aplicações estáticas e móveis baseadas em IoT que requerem um baixo período de convergência, alto PSR e confiabilidade sem sacrificar um alto consumo de energia.

Contribuições dos autores: Conceituação, AF, D.-HK, SS e J.-YP; metodologia, AF e D.-HK; Programas, FA; validação, AF, D.-HK e SS; análise formal, AF; investigação, AF e D.-HK; recursos, AF; curadoria de dados, AF; redação – preparação do rascunho original, AF; redação - revisão e edição, SS e J.-YP; visualização, AF; supervisão, J.-YP; administração do projeto, J.-YP aquisição de financiamento, J.-YP Todos os autores têm leu e concordou com a versão publicada do manuscrito.

Financiamento: Este trabalho foi apoiado pelo Instituto de Planejamento de Tecnologia da Informação e Comunicação e Subsídio de avaliação (IITP) financiado pelo governo coreano (MSIT) (2018-0-00691, Desenvolvimento de Sistemas Autônomos Tecnologias colaborativas de inteligência de enxame para dispositivos IoT descartáveis). Além disso, foi apoiado por “Smart city infraestrutura urbana monitoramento da qualidade do ar em tempo real e desenvolvimento de tecnologia de plataforma de previsão ”através de o Ministério do Comércio, Indústria e Energia (MOTIE) (P0006855, 2018).

Conflitos de interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Abreviações

As seguintes abreviações são usadas neste manuscrito:

CONFIRMAR	Reconhecimento
ADR	Taxa de dados adaptativa
DL	Link descendente
DE	Dispositivo final
EMA-ADR Média Móvel Exponencial	ADR
G-ADR	ADR baseado em distribuição gaussiana
GW	Porta de entrada
I-SFA	Atribuição inicial de fator de dispersão
IoT	Internet das Coisas
Rede de área ampla de longo alcance	LoRaWAN
Rede de área ampla de baixa potência	LPWAN
MAC	Controle de acesso de mídia
E	Servidor de rede
PSR	Taxa de sucesso de pacotes
RX	Janela de recebimento
SF	Fator de propagação
SNR	A relação sinal-ruído
ParaA	Tempo no ar
PT	Potência de transmissão
UL	Ligação ascendente

Referências

- Georgiou, O.; Raza, U. Análise de rede de área ampla de baixa potência: escala LoRa. IEEE Wirel. Comun. Vamos. **2017**, *6*, 162–165. [RefCruz]
- Aliança, L. Especificação LoRaWANTM 1.1. 2020. Disponível online: https://lora-alliance.org/sites/default/files/2020-06/rp_2-1.0.1.pdf (acessado em 2 de setembro de 2020).
- Marais, JM; Abu Mahfouz, AM; Hancke, GP Uma Pesquisa sobre a Viabilidade do Tráfego Confirmado em um LoRaWAN. Acesso IEEE **2020**, *8*, 9296–9311. [RefCruz]
- Ducrot, N.; Raio, D.; Saadani, A.; Hersent, O.; Pop, G.; Remond, G. Lora Guia do desenvolvedor de dispositivos. 2016. Disponível online: <https://developer.orange.com/wp-content/uploads/LoRa-Device-Developer-Guide- Orange.pdf> (acessado em 6 de maio de 2020).

5. GSMA-3GPP. Tecnologias de área ampla de baixo consumo de energia 3GPP. 2016. Disponível on-line: <https://www.gsma.com/iot/wp-content/uploads/2016/10/3GPP-Low-Power-Wide-Area-Technologies-GSMA-White-Paper.pdf> (acessado em 4 março de 2020).
6. Farhad, A.; Kim, D.H.; Pyun, JY Alocação de recursos para Internet das coisas massiva em LoRaWANs. *Sensores* **2020**, *20*, 2645. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
7. Semtech. Compreendendo a taxa de dados adaptativa LoRa. 2019. Disponível online: https://loro-developers.semtech.com/uploads/documents/files/Understanding_LoRa_Adaptive_Data_Rate_Downloadable.pdf (acessado em 4 de agosto de 2020).
8. Marini, R.; Cerroni, W.; Buratti, C. Um novo algoritmo de taxa de dados adaptativo com reconhecimento de colisão para redes LoRaWAN. *IEEE Internet Things J.* **2020**. [\[CrossRef\]](#)
9. Davoli, G.; Cerroni, W.; Tomovic, S.; Buratti, C.; Contoli, C.; Callegati, F. Gerenciamento de serviços baseado em intenção para domínios de infraestrutura heterogêneos definidos por software. *Internacional J. Rede. Gerenciar.* **2019**, *29*, e2051. [\[RefCruz\]](#)
10. Pan, J.; McElhannon, J. Futura nuvem de ponta e computação de ponta para aplicações de Internet das coisas. *IEEE Internet Things J.* **2017**, *5*, 439–449. [\[RefCruz\]](#)
11. Sarker, VK; Queralt, JP; Gia, TN; Tenhunen, H.; Westerlund, T. Uma pesquisa sobre LoRa para IoT: Integrando computação de ponta. Em *Anais da Quarta Conferência Internacional sobre Fog e Mobile Edge Computing (FMEC) de 2019*, Roma, Itália, 10–13 de junho de 2019; págs. 295–300.
12. Haxhibeqiri, J.; De Poorter, E.; Moerman, I.; Hoebeke, J. Uma pesquisa de lorawan para iot: da tecnologia à aplicativo. *Sensores* **2018**, *18*, 3995. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
13. Mikhailov, K.; Petaejaejaervi, J.; Haenninen, T. Análise de capacidade e escalabilidade da tecnologia de rede de área ampla de baixa potência LoRa. Em *Anais do European Wireless 2016; 22ª Conferência Europeia sem Fios*, Oulu, Finlândia, 18–20 de maio de 2016; páginas 1–6.
14. Kufakunesu, R.; Hancke, GP; Abu-Mahfouz, AM Uma pesquisa sobre otimização adaptativa da taxa de dados em LoRaWAN: soluções recentes e grandes desafios. *Sensores* **2020**, *20*, 5044. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
15. Hauser, V.; Héger, T. Proposta de algoritmo de taxa de dados adaptativo para infraestrutura baseada em lorawan. In *Proceedings of the 2017 IEEE 5th International Conference on Future Internet of Things and Cloud (FiCloud)*, Praga, República Tcheca, 21–23 de agosto de 2017; pp. 85–90.
16. Kousias, K.; Caso, G.; Alay, Ö.; Lemic, F. Análise Empírica da Taxa de Dados Adaptativa LoRaWAN para Aplicações Móveis de Internet das Coisas. In *Proceedings of 2019 on Wireless of the Students, by the Students, and for the Students Workshop*, Los Cabos, México, 21 de outubro de 2019; pp. 9–11.
17. Li, S.; Raza, U.; Khan, A. Como Agile é o mecanismo adaptativo de taxa de dados do LoRaWAN. Em *Proceedings of the IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Abu Dhabi, Emirados Árabes Unidos, 9–13 de dezembro de 2018; páginas 206–212.
18. Finnegan, J.; Farrell, R.; Brown, S. Análise e aprimoramento do esquema de taxa de dados adaptativa LoRaWAN. *IEEE Internet Things J.* **2020**, *7*, 7171–7180. [\[RefCruz\]](#)
19. Kim, DY; Kim, S.; Hassan, H.; Park, JH Controle adaptativo de taxa de dados em redes de longa distância de baixa potência para serviços IoT de longo alcance. *J. Computação. Ciência.* **2017**, *22*, 171–178. [\[RefCruz\]](#)
20. Slabicki, M.; Prensankar, G.; Di Francesco, M. Configuração adaptativa de redes LoRa para implantações densas de IoT. Em *Anais do Simpósio de Operações e Gerenciamento de Rede IEEE/IFIP*, Taipei, Taiwan, 23–27 de abril de 2018; páginas 1–9.
21. Benkahla, N.; Tounsi, H.; Sim, Frikha, M. ADR aprimorado para redes LoRaWAN com mobilidade. In *Proceedings of the 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC) de 2019*, Tânger, Marrocos, 24–28 de junho de 2019; páginas 1–6.
22. Parque, J.; Parque, K.; Bae, H.; Kim, Ck EARN: ADR aprimorado com adaptação de taxa de codificação em LoRaWAN. *IEEE Internet Things J.* **2020**. [\[CrossRef\]](#)
23. Finnegan, J.; Marrom, S.; Farrell, R. Modelando o consumo de energia de LoRaWAN em ns-3 com base em medições do mundo real. In *Proceedings of the Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS) de 2018*, Salónica, Grécia, 23–25 de outubro de 2018; páginas 1–4.
24. Magrin, D.; Centenaro, M.; Vangelista, L. Avaliação de desempenho de redes LoRa em cenário de cidade inteligente. Em *Anais da Conferência Internacional IEEE sobre comunicações (ICC)*, Paris, França, 21–25 de maio de 2017; páginas 1–7.

25. Semtech. Folha de dados de produtos sem fio e sensoriamento Semtech SX1301. 2017. Disponível on-line: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-gateways/sx1301> (acessado em 2 de janeiro de 2020).
26. Semtech. PRODUTOS SEM FIO E SENSORIZADORES Semtech, Sx1272. 2017. Disponível on-line: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-transceivers/sx1272>, (acessado em 2 de janeiro de 2020).
27. Aernouts, M.; BniLam, N.; Podevijn, N.; Plets, D.; José, W.; Berkvens, R.; Weyn, M. Combinando TDoA e AoA com um filtro de partículas em uma rede LoRaWAN externa. Em Anais do Simpósio de Posição, Localização e Navegação IEEE/ION 2020 (PLANS), Portland, OR, EUA, 20–23 de abril de 2020; páginas 1060–1069.
28. Subedi, S.; Pyun, JY Localização prática de impressões digitais para sistemas de posicionamento interno usando beacons. *J. Sens.* **2017**, *2017*, 9742170. [CrossRef]
29. Subedi, S.; Gangue, HS; Ko, NY; Hwang, SS; Pyun, JY Melhorando o posicionamento de impressão digital interna com agrupamento de propagação de afinidade e impressão digital centróide ponderada. *Acesso IEEE* **2019**, *7*, 31738–31750. [RefCruz]
30. Simulador de Rede (ns)-3. Disponível online: <https://www.nsnam.org/> (acessado em 11 de dezembro de 2019).
31. Podevijn, N.; Plets, D.; Trogh, J.; Martens, L.; Suanet, P.; Hendrikse, K.; Joseph, W. Posicionamento externo baseado em TDoA com algoritmo de rastreamento em uma rede LoRa pública. *Wirel. Comun. Multidão. Computação.* **2018**, *2018*, 1864209. [RefCruz]
32. Farhad, A.; Kim, D.H.; Kim, BH; Maomé, AFY; Pyun, JY Atribuição de recursos com reconhecimento de mobilidade para aplicações IoT em redes de longa distância e ampla área. *Acesso IEEE* **2020**, *8*, 186111–186124. [RefCruz]
33. Farhad, A.; Kim, D.; Pyun, J. Escalabilidade de LoRaWAN em um ambiente urbano: um estudo de simulação. Em Anais da Décima Primeira Conferência Internacional sobre Redes Ubíquas e Futuras (ICUFN), Zagreb, Croácia, 2–5 de julho de 2019; páginas 677–681. [RefCruz]
34. 3GPP. Suporte de sistema celular para Internet das Coisas (CIoT) de complexidade ultrabaixa e baixo rendimento. 2016. Disponível online: <https://itctec.com/archive/3gpp-specification-tr-45-820/> (acessado em 4 de março de 2020).
35. Capuzzo, M.; Magrin, D.; Zanella, A. Tráfego confirmado em LoRaWAN: Armadilhas e contramedidas. In Proceedings of the 17th Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (Med-Hoc-Net) de 2018, Capri, Itália, 20–22 de junho de 2018; páginas 1–7.
36. Magrin, D.; Capuzzo, M.; Zanella, A. Um estudo completo do desempenho LoRaWAN sob diferentes parâmetros configurações. *IEEE Internet Things J.* **2019**, *7*, 116–127. [RefCruz]
37. Korbi, IE; Ghamri-Doudane, Y.; Saidane, LA Análise LoRaWAN sob condições de tráfego não saturado, fator de propagação ortogonal e não ortogonal. Em Anais do 17º Simpósio Internacional de Computação e Aplicações de Rede (NCA) do IEEE 2018, Cambridge, MA, EUA, 1–3 de novembro de 2018; páginas 1–9.
38. Croce, D.; Gucciardo, M.; Tinnirello, I.; Garlisi, D.; Mangione, S. Impacto da ortogonalidade imperfeita do fator de propagação nas comunicações lora. No Workshop Internacional do Tirreno sobre Comunicação Digital; Springer: Berlim/Heidelberg, Alemanha, 6 de setembro de 2017; pp. 165–179.
39. Zhu, G.; Lião, CH; Suzuki, M.; Narusue, Y.; Morikawa, H. Avaliação do desempenho do receptor LoRa sob interferência de co-tecnologia. Em Anais da 15ª Conferência Anual de Comunicações e Redes de Consumidores da IEEE (CCNC) de 2018, Las Vegas, NV, EUA, 12–15 de janeiro de 2018; páginas 1–7.
40. Waret, A.; Kaneko, M.; Guitton, A.; El Rachkidy, N. Análise de rendimento LoRa com espalhamento imperfeito ortogonalidade dos fatores. *IEEE Wirel. Comun. Vamos.* **2018**, *8*, 408–411. [RefCruz]
41. Caillouet, C.; Heusse, M.; Rousseau, F. Alocação ideal de SF em LoRaWAN considerando captura física e ortogonalidade imperfeita. Em Proceedings of the GLOBECOM 2019 — IEEE Global Communications Conference, Waikoloa, HI, EUA, 9–13 de dezembro de 2019; páginas 1–8.
42. Bor, MC; Roedig, U.; Voigt, T.; Alonso, JM As redes de área ampla de baixo consumo de energia da LoRa são escaláveis? Em Anais da 19ª Conferência Internacional ACM sobre Modelagem, Análise e Simulação de Sistemas Sem Fio e Móveis (MSWiM), Nova York, NY, EUA, 13–17 de novembro de 2016; pp. 59–67.

43. STM32. Pacote de expansão STM32 LoRaR para STM32Cube, UM2073 Rev 10. 2019. Disponível online : https://www.st.com/resource/en/user_manual/dm00300436-stm32-lora-expansion-package-for-stm32cube-stmicroelectronics.pdf (acessado em 27 de outubro de 2020).
44. Alliance, L. Recomendação técnica resumida do processo FUOTA, TR002 v1.0.0. 2019. Disponível online: https://lora-alliance.org/sites/default/files/2019-04/tr002-fuota_process_summary-v1.0.0.pdf (acessado em 27 de outubro de 2020).

Nota do Editor: O MDPI permanece neutro em relação a reivindicações jurisdicionais em mapas publicados e afiliações institucionais.



© 2020 pelos autores. Licenciado MDPI, Basileia, Suíça. Este artigo é um artigo de acesso aberto distribuído sob os termos e condições da Creative Commons Attribution (CC BY) licença (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).