



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS TERESINA CENTRAL
CURSO DE TECNOLOGIA EM ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS**

NÍCOLAS RAFAEL SILVA ALVES

**ANÁLISE DE ESCALABILIDADE EM REDES LORAWAN: UM ESTUDO
COMPARATIVO DE ESTRATÉGIAS DE ALOCAÇÃO DE SPREADING FACTORS NO
NS-3**

**TERESINA, PIAUÍ
2026**

NÍCOLAS RAFAEL SILVA ALVES

ANÁLISE DE ESCALABILIDADE EM REDES LORAWAN: UM ESTUDO
COMPARATIVO DE ESTRATÉGIAS DE ALOCAÇÃO DE SPREADING FACTORS NO
NS-3

Trabalho de Conclusão de Curso (Artigo Científico) apresentado como exigência parcial para obtenção do diploma do Curso de Tecnologia em Análise e Desenvolvimento de Sistemas do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Central.

Orientador: Prof. Me. Francisco Marcelino Almeida de Araújo

TERESINA, PIAUÍ
2026

ANÁLISE DE ESCALABILIDADE EM REDES LORAWAN: UM ESTUDO COMPARATIVO DE ESTRATÉGIAS DE ALOCAÇÃO DE SPREADING FACTORS NO NS-3

Nícolas Rafael Silva Alves¹

Prof. Me. Francisco Marcelino Almeida Araújo²

RESUMO

Introdução: A Internet das Coisas (IoT) impulsiona a adoção massiva de redes LPWAN, como o LoRaWAN, destacado pela alta tolerância a falhas e eficiência energética. Em cenários de alta densidade, a escalabilidade é um desafio determinante: o protocolo ALOHA, adotado pelo LoRaWAN, eleva a probabilidade de colisões à medida que a densidade de dispositivos cresce. Esse desafio é agravado pela diversidade regulatória global — este trabalho investiga dois planos distintos: EU868 (Europa), que impõe *Duty Cycle* de 1% ao *gateway*, e AU915 (Brasil), que opera com 64 canais sem esse limite, criando cenários de escalabilidade intrinsecamente diferentes. **Objetivo:** Comparar o desempenho de duas estratégias de alocação de *Spreading Factors* (SF) — Alocação Estática baseada em distância e o mecanismo dinâmico *Adaptive Data Rate* (ADR) — em redes massivas sob EU868 e AU915. **Metodologia:** Simulação computacional no NS-3, avaliando cinco níveis de densidade (100 a 5000 nós) em ambas as regiões, com 33 repetições por configuração para validação estatística. **Resultados e Discussão:** Na região EU, o ADR sofreu saturação elevada com 5000 nós ($PDR \approx 1,54\%$), causada pelo esgotamento do orçamento de *downlink* do *gateway* — o denominado *Bootstrapping Problem*. Na região BR (AU915), o mesmo cenário produziu PDR de 60,41% com ADR e 86,02% com Alocação Estática. O *cross-check* físico revelou, contudo, que limitações reais do *gateway* reduzem esse teto teórico de 86% para 41%. **Conclusão:** O planejamento regionalizado e a consciência das limitações de *hardware* são determinantes para a viabilidade de redes LoRaWAN massivas.

Palavras-chave: LoRaWAN; Escalabilidade; NS-3; Adaptive Data Rate; Spreading Factor; IoT Massiva.

ABSTRACT

Introduction: The Internet of Things (IoT) drives the massive adoption of LPWAN technologies such as LoRaWAN, highlighted by its robustness and energy efficiency. In

¹ Discente do Curso de Tecnologia em Análise e Desenvolvimento de Sistemas. Instituto Federal do Piauí (IFPI) – Campus Teresina Central. E-mail: nicolas.alves@aluno.ifpi.edu.br

² Docente do Instituto Federal do Piauí (IFPI) – Campus Teresina Central. Orientador do trabalho. E-mail: francisco.marcelino@ifpi.edu.br

high-density scenarios, scalability is a critical challenge: the ALOHA protocol adopted by LoRaWAN increases packet collision probability as device density grows. This challenge is compounded by global regulatory diversity — this work investigates two distinct plans: EU868 (Europe), which imposes a 1% Duty Cycle on gateway transmissions, and AU915 (Brazil), which operates with 64 channels and no such constraint, creating intrinsically different scalability environments. **Objective:** To compare the performance of two Spreading Factor (SF) allocation strategies — distance-based Static Allocation and the dynamic Adaptive Data Rate (ADR) mechanism — in massive network scenarios under EU868 and AU915. **Methodology:** A computational simulation study was conducted using NS-3, evaluating five density levels (100 to 5000 nodes) in both regions, with 33 repetitions per configuration for statistical validation. **Results and Discussion:** In the EU region, ADR suffered severe saturation with 5000 nodes ($PDR \approx 1.54\%$), caused by the depletion of the gateway downlink budget — the so-called Bootstrapping Problem. In the BR region (AU915), the same scenario yielded a PDR of 60.41% with ADR and 86.02% with Static Allocation. However, the physical cross-check revealed that real gateway limitations reduce this theoretical ceiling from 86% to 41%. **Conclusion:** Regionalized planning and awareness of hardware limitations are crucial for the viability of massive LoRaWAN networks.

Keywords: LoRaWAN; Scalability; NS-3; Adaptive Data Rate; Spreading Factor; Massive IoT.

Data de Aprovação: 26 de Junho de 2026

1 INTRODUÇÃO

A Internet das Coisas (IoT) impulsiona a adoção de redes LPWAN, com destaque para o LoRaWAN por sua robustez e baixo custo (Jouhari *et al.*, 2023; Mekki *et al.*, 2019). Contudo, em cenários de alta densidade, o protocolo de acesso ALOHA eleva a probabilidade de colisões, degradando a comunicação (Bor, Vidler & Roedig, 2016; Georgiou & Raza, 2017). Esse desafio de escalabilidade é amplificado pelas regulamentações regionais de radiofrequência: o plano europeu EU868 impõe um *Duty Cycle* de 1% ao *gateway*, limitando severamente a capacidade de *downlink*. Em contrapartida, o plano brasileiro (AU915) opera com 64 canais sem esse limite restrito.

O planejamento eficiente depende da alocação de Fatores de Espalhamento (SF). A complexidade logística de testes massivos torna a simulação computacional via *Network Simulator 3* (NS-3) a abordagem ideal para avaliar o desempenho (Van den Abeele *et al.*, 2017). Assim, este artigo investiga a escalabilidade massiva de redes LoRaWAN comparando a Alocação Estática com o mecanismo dinâmico *Adaptive Data*

Rate (ADR) nos planos EU868 e AU915, quantificando os limites de saturação através de métricas de entrega e consumo energético no NS-3.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A modulação *Chirp Spread Spectrum* (CSS) confere robustez ao LoRaWAN, dividindo transmissões em *Spreading Factors* (SF7 a SF12). Um SF maior aumenta o alcance, mas eleva o *Time on Air* (ToA) — SF12 possui um ToA 30 vezes superior ao SF7, afetando diretamente consumo e colisões. Embora SFs distintos sejam quase ortogonais, a interferência Co-SF e a Rejeição de Canal Adjacente causam perdas que exigem um limiar de SNIR (Efeito de Captura) mínimo de 6 dB para o sucesso da recepção (Haxhibeqiri *et al.*, 2017; Rahmadhani & Kuipers, 2018; Bankov, Khorov & Lyakhov, 2017; Bellouch *et al.*, 2021).

O protocolo MAC padrão (Classe A) utiliza ALOHA puro sem verificação de canal livre (*Listen Before Talk*), visando economia extrema de energia. Porém, em alta densidade, a ausência de coordenação degrada exponencialmente o tráfego (Adelantado *et al.*, 2017; Georgiou & Raza, 2017). Além das colisões, a regulação restringe o *downlink*: na região europeia (EU868), o limite de 1% de *Duty Cycle* gera esgotamento rápido do orçamento de transmissão do *gateway*. Sem *downlink*, nós com mecanismo de otimização *Adaptive Data Rate* (ADR) — que depende de comandos MAC para ajustar SF e potência dinamicamente — ficam travados em SF12, fenômeno letal conhecido como *Bootstrapping Problem* (Finnegan, Farrell & Brown, 2020). O cenário brasileiro (AU915), com 64 canais e maior permissividade, minimiza esse gargalo estrutural.

3 METODOLOGIA

O estudo segue diretrizes de Jain (1991), utilizando o simulador NS-3 (v3.45) e o módulo `lorawan` do *signetlabdei* (Magrin, Centenaro & Vangelista, 2017; Magrin, Capuzzo & Zanella, 2019). O ambiente suporta interferência cumulativa e Efeito de Captura (limiar 6 dB), com modelo de energia calibrado para o *chipset* Semtech SX1272 (Finnegan, Brown & Farrell, 2018). O canal *wireless* aplica o modelo *Log-Distance* ($n = 2,8$) (Augustin *et al.*, 2016; Haxhibeqiri *et al.*, 2017). A corrente de transmissão (TX) obedece à regulamentação regional: 28 mA para EU868 (14 dBm) e 350 mA para AU915 (30 dBm) (LoRa Alliance, 2021).

Estratégias Avaliadas: 1) **Alocação Estática:** *Uplink-only*, definindo SF de forma fixa baseada na distância em anéis concêntricos; 2) **ADR Dinâmico:** O *Network Server* ajusta SFs baseando-se na qualidade do *link* histórico com margem de 10 dB (Kufakunesu, Hancke & Abu-Mahfouz, 2020). Ambas foram avaliadas nas regiões EU868 (*Duty Cycle* de 1%) e AU915 (emulado com 64 canais). As métricas incluem PDR, consumo e Índice de Justiça de Jain. Cada configuração correu 33 sementes (IC 95%).

Topologia e Tráfego: O cenário consiste em uma topologia *Star-of-Stars* com 1 *Gateway* e raio de 5.000 m. Foram simuladas densidades de $N \in \{100, 500, 1000, 2000, 5000\}$ nós, enviando *payloads* de 51 Bytes a cada 600 s. Cada execução abrangeu 24 horas (86.400 s) simuladas para atingir o regime estacionário.

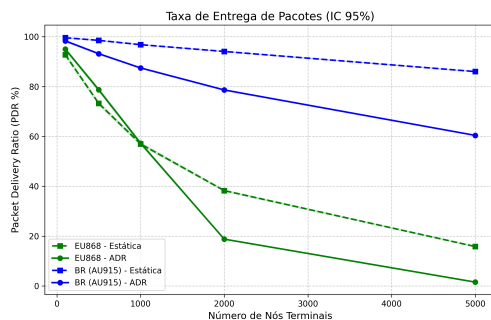
Dilatação Temporal e Limites Físicos: Como o simulador gerava colapso lógico (*buffer overflow*) ao alocar 64 canais da AU915, utilizou-se uma Dilatação Temporal matemática (Little, 1961). O período de envio da aplicação (600 s) foi multiplicado pelo fator estocástico ($64/3 \approx 21,3$), isolando e simulando a carga agregada corretamente sem quebrar a simulação computacional. Contudo, essa aproximação lógica omite os limites de *hardware* intrínsecos de um *Gateway* — como o teto físico de apenas 8 demoduladores do *chip* SX1301 (Semtech, 2017). Para evidenciar essa lacuna, um experimento menor de auditoria cruzada (*Cross-Check*) sem dilatação foi configurado para validar a queda real frente à previsão dilacerada em cenários massivos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 TAXA DE ENTREGA DE PACOTES (PDR) E O BOOTSTRAPPING PROBLEM

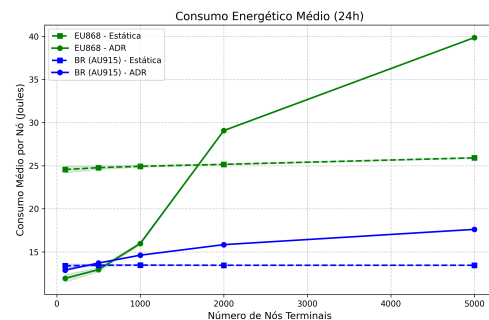
No cenário de controle (100 nós), validou-se o funcionamento sob baixa densidade: $PDR > 92\%$ na EU868 e $> 98\%$ na AU915, com ADR economizando mais da metade da energia. Porém, o aumento da densidade revelou limites estruturais drásticos (Figura 1). Na EU868, o PDR decaiu exponencialmente, com o ADR atingindo singelos 1,54% a 5000 nós. Na AU915, a Alocação Estática alcançou impressionantes 86,02%, limitando-se menos pelas colisões graças à sua natureza estática (*uplink-only*) que ignora problemas de *downlink*. A causa da falha do ADR em alta densidade reside no longo *Time-on-Air* (ToA) do SF12 e nas barreiras do plano europeu: a rede engasga e o *Gateway* extingue seu 1% de *Duty Cycle* sem conseguir emitir os comandos *LinkADRReq* aos nós periféricos — travando-os ineficientemente em SF12, consolidando o letal *Bootstrapping Problem* (Finnegan, Farrell & Brown, 2020).

Figura 1 – PDR em função da densidade de nós.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 2 – Consumo energético médio (tendência).

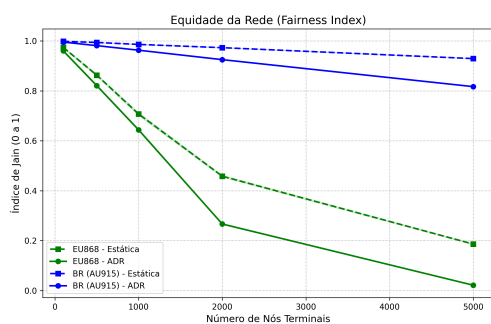


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.2 CONSUMO ENERGÉTICO E EQUIDADE

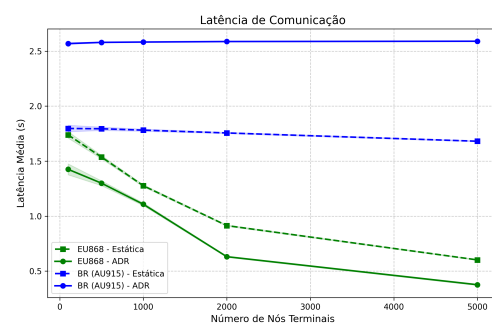
Na região BR, a alocação suportou bem a demanda com consumo em torno de 13 a 17 J. Já a região EU sofreu pico intenso: os nós estancados em SF12 elevaram o consumo bruto da rede sem eficácia de entrega (Figura 2). A Justiça de Jain seguiu o mesmo declínio (Figura 3). Em 5000 nós na EU com ADR, o índice de Jain atingiu incríveis 0,02 — evidenciando que somente nós já alocados em SF7 conseguiam se comunicar, resultando em profunda iniquidade de acesso.

Figura 3 – Índice de Justiça de Jain (equidade).



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 4 – Latência média de comunicação.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.3 O PARADOXO DA LATÊNCIA (EFEITO DE CAPTURA) E LIMITES FÍSICOS

O comportamento da latência (Figura 4) apresentou um viés paradoxal: a latência caiu de 1,43 s para 0,38 s em pleno colapso de densidade. Essa distorção provém do Viés de Sobrevivência e do Efeito de Captura: nas colisões destrutivas entre nós SF7 (curtos) e SF12 (longos), a interferência descarta os longos e preserva os curtos. A estatística final, lida apressadamente, oculta que a vasta maioria agonizou.

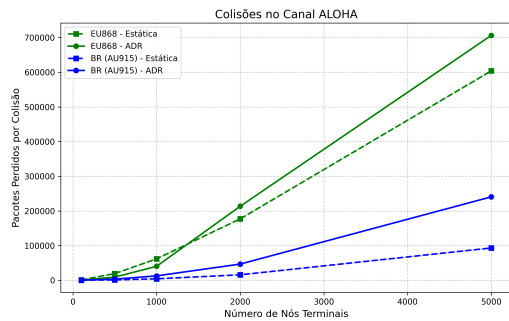
Por fim, o *Cross-Check* com a infraestrutura física exata validou a abstração, mas expôs um abismo prático (Figura 6). A 5.000 nós, a simulação dilacerada prometia 86% de sucesso estático; na realidade do transceptor *hardware* SX1301, o resultado cai para 41,63%. A razão é inabalável: o *gateway* dispõe nativamente de apenas 8 canais paralelos de demodulação para ouvir simultaneamente, resultando inevitavelmente em engarrafamento e pacotes descartados não por colisão no espectro livre, mas por estrangulamento nos caminhos lógicos locais de recepção.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou uma investigação profunda sobre a escalabilidade massiva em redes LoRaWAN, isolando os impactos entre planos regulatórios (EU868 e AU915) e estratégias estáticas e dinâmicas de alocação de Fatores de Espalhamento.

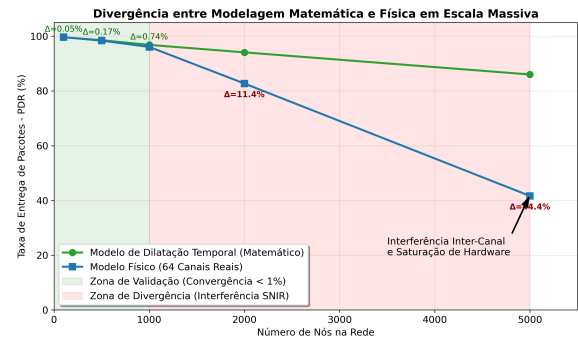
Concluiu-se, primariamente, a inviabilidade do algoritmo padrão ADR em cenários

Figura 5 – Pacotes perdidos por colisão (ADR).



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 6 – Validação Cross-Check Físico (16 canais).



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

massivos severamente restritivos como o mercado europeu: com o *Bootstrapping Problem*, a escassez de *downlink* gera uma cascata de falhas e aprisionamento dos sensores, desaguando em 1,54% de entrega em redes densas de 5.000 nós. Em contrapartida, no cenário brasileiro AU915, a disponibilidade de 64 canais viabiliza o escoamento contínuo dos sinais; todavia, a adoção puramente baseada na Alocação Estática ainda superou o modelo adaptativo. Evidenciou-se também que o planejamento de capacidade não deve se apoiar isoladamente nas colisões em propagação, revelando, por meio de validação computacional baseada na física do transceptor, a necessidade de projetar topologias cientes do gargalo extremo de demodulação dos limitados canais de recepção em um *Gateway* concentrador.

Como propostas futuras de trabalhos, indica-se a testagem aprofundada de simulações orientadas por *Machine Learning* — especificamente via *Reinforcement Learning* (DQN) — no servidor de rede para prevenir proativamente o colapso do *Bootstrapping Problem*, bem como validar modelos empíricos por meio de abordagens robustas de testes baseados em Hardware (*Hardware-in-the-Loop*).

REFERÊNCIAS

- ADELANTADO, F. *et al.* Understanding the limits of LoRaWAN. **IEEE Communications Magazine**, IEEE, v. 55, n. 9, p. 34–40, 2017.
- AUGUSTIN, A. *et al.* A study of LoRa: Long range & low power networks for the IoT. **Sensors**, MDPI, v. 16, n. 9, p. 1466, 2016.
- BANKOV, D.; KHOROV, E.; LYAKHOV, A. Mathematical model of LoRaWAN channel access with capture effect. In: IEEE. **2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)**. [S.l.], 2017. p. 1–5.
- BELLOUCH, A. *et al.* Modeling and performance evaluation of LoRa network based on capture effect. In: **Advanced Intelligent Systems for Sustainable Development**. [S.l.]: Springer, 2021. p. 249–263.
- BOR, M.; VIDLER, J.; ROEDIG, U. Do LoRa low-power wide-area networks scale? In: ACM. **Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems**. [S.l.], 2016. p. 59–67.
- FINNEGAN, J.; BROWN, S.; FARRELL, R. Modeling the energy consumption of LoRaWAN in ns-3 based on real world measurements. In: IEEE. **2018 Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS)**. [S.l.], 2018. p. 1–4.
- FINNEGAN, J.; FARRELL, R.; BROWN, S. Analysis and enhancement of the LoRaWAN adaptive data rate scheme. **IEEE Internet of Things Journal**, IEEE, v. 7, n. 8, p. 7171–7180, 2020.
- GEORGIU, O.; RAZA, U. Low power wide area network analysis: Can LoRa scale? **IEEE Wireless Communications Letters**, IEEE, v. 6, n. 2, p. 162–165, 2017.
- HAXHIBEQIRI, J. *et al.* LoRa scalability: A simulation model based on interference measurements. **Sensors**, MDPI, v. 17, n. 6, p. 1193, 2017.
- JAIN, R. **The Art of Computer Systems Performance Analysis: Techniques for Experimental Design, Measurement, Simulation, and Modeling**. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1991. ISBN 978-0471503361.
- JOUHARI, M. *et al.* A survey on scalable LoRaWAN for massive IoT: Recent advances, potentials, and challenges. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, IEEE, v. 25, n. 3, p. 1841–1876, 2023.
- KUFAKUNESU, R.; HANCKE, G. P.; ABU-MAHFOUZ, A. M. A survey on adaptive data rate optimization in LoRaWAN: Recent solutions and major challenges. **Sensors**, MDPI, v. 20, n. 18, p. 5044, 2020.
- LITTLE, J. D. C. A proof for the queuing formula: $l = \lambda w$. **Operations Research, INFORMS**, v. 9, n. 3, p. 383–387, 1961.
- LoRa Alliance. **LoRaWAN® 1.0.4 Regional Parameters**. [S.l.], 2021. Disponível em: <<https://resources.lora-alliance.org/document/lorawan-regional-parameters-v1-0-4>>.

MAGRIN, D.; CAPUZZO, M.; ZANELLA, A. A LoRaWAN module for ns-3: Implementation and evaluation. **Proceedings of the 10th Workshop on ns-3 (WNS3)**, p. 1–8, 2019.

MAGRIN, D.; CENTENARO, M.; VANGELISTA, L. Performance evaluation of LoRa networks in a smart city scenario. In: IEEE. **2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)**. [S.l.], 2017. p. 1–7.

MEKKI, K. *et al.* A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. **ICT Express**, Elsevier, v. 5, n. 1, p. 1–7, 2019.

RAHMADHANI, F.; KUIPERS, F. When LoRaWAN frames collide. In: ACM. **Proceedings of the 13th International Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental Evaluation & Characterization (WiNTECH)**. [S.l.], 2018. p. 59–68.

SEMTECH. **SX1301 Digital Baseband Chip for LoRa Gateways - Datasheet**. [S.l.], 2017. Disponível em: <<https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-core/sx1301>>.

Van den Abeele, F. *et al.* Scalability analysis of large-scale LoRaWAN networks in ns-3. **IEEE Internet of Things Journal**, IEEE, v. 4, n. 6, p. 2186–2198, 2017.