

# Prototipagem e Análise de Desempenho do NB-IoT em um Cenário de Criação de Gado Semi-Intensiva

Marília Costa Muniz, Daniel Rodrigues de Luna, Gabriel M. de Macedo e Vicente A. de Sousa Jr.

**Resumo**—O alvo deste estudo é o *narrowband IoT* (NB-IoT), uma alternativa do 3GPP para a tecnologia de Internet das Coisas (IoT). O estudo foca na modelagem e na análise de desempenho das redes NB-IoT para monitorar o gado, considerando a movimentação sazonal e o regime de criação semi-intensiva. O simulador ns-3 foi utilizado como ferramenta de prototipagem para evitar o alto custo de tal estudo em um ambiente real de criação de gado. A análise de desempenho se baseia em métricas como latência e consumo energético, considerando diferentes modos de transmissão e dois cenários distintos de distribuição do gado (confinado e não confinado). Embora o módulo LENA-NB do ns-3 tenha apresentado limitações durante as tentativas de deixar o cenário de simulação mais crítico, foi possível avaliar a escalabilidade da rede e realizar um comparativo entre os modos de transmissão. Os resultados obtidos demonstraram a viabilidade do NB-IoT no setor pecuário, principalmente quando utiliza o modo de transmissão *early data transmission*. Em todos os testes simulados, o sistema não apresentou taxa de perda de pacotes, mostrando-se robusto ao aumento no número de dispositivos.

**Palavras-Chave**—NB-IoT, ns-3, Pecuária.

## I. INTRODUÇÃO

A Internet das Coisas (IoT) é um paradigma tecnológico que trouxe a possibilidade de conectar qualquer tipo de dispositivo à internet e extrair uma massiva quantidade de dados [1]. Esta inovação tem ganhado cada vez mais força com o surgimento do 5G NR e seu caso de uso denominado *massive machine type communication* (mMTC), que permite a conexão simultânea de um grande número de dispositivos [2].

Para atender à demanda de serviços de IoT, surgiram as redes *Low Power Wide Area* (LPWAN), que oferecem dispositivos de comunicação de baixo consumo de energia, de baixa taxa de transmissão e com cobertura extensa [3]. Existem diversas aplicações que podem se beneficiar com o uso das redes LPWAN, como o monitoramento em cidades inteligentes [4], a agricultura de precisão [5] e a pecuária [6]. Devido à grande importância do setor agropecuário para a economia brasileira, vem-se buscando cada vez mais utilizar tecnologias que ampliem a produtividade de maneira eficiente e sustentável. Em 2024, o Produto Interno Bruto (PIB) do agronegócio alcançou R\$ 2,7 trilhões, fechando o ano com um crescimento de 1,81% em relação a 2023. Na análise mais detalhada desse indicador, o segmento pecuário apresentou um aumento de 12,48%, enquanto o segmento agrícola puxou o resultado geral para baixo, com -2,19% [7].

Todos os autores são do Leading Advanced Technologies Center of Excellence (LANCE), Universidade Federal do Rio Grande do Norte. E-mails: marilia.muniz.124@ufrn.edu.br, daniel.luna.088@ufrn.edu.br, gabriel.maia.115@ufrn.edu.br, vicente.sousa@ufrn.edu.br. Gabriel M. de Macedo é do Instituto de Pesquisas Eldorado, Manaus-AM. Esse estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. As simulações fornecidas por esse trabalho foram realizadas com o apoio do Núcleo de Processamento de Alto Desempenho da UFRN (NPAD/UFRN).

Uma alternativa para impulsionar ainda mais o setor é a Pecuária Inteligente, termo utilizado para representar o uso de tecnologias de ponta na gestão de rebanhos, com o objetivo de otimizar a produção, melhorar o bem-estar animal e aumentar a eficiência e a sustentabilidade da atividade. A gestão de rebanhos pode ser otimizada pelo monitoramento em tempo real com o uso de sensores, de coleiras inteligentes, de câmeras e de drones para acompanhar a saúde, o comportamento, a localização e o desempenho dos animais.

A rede LoRaWAN tem sido amplamente investigada em cenários de Internet das Coisas (IoT) [8], especialmente no fornecimento de dados de sensores para sistemas *web* em aplicações agropecuárias. No entanto, suas configurações padrão de comunicação nem sempre atendem de forma eficiente às particularidades do ambiente de criação de gado. Em resposta a esses desafios, diversos estudos propõem adaptações na camada de controle de acesso ao meio (MAC, *Medium Access Control*), buscando melhorar o desempenho da rede em contextos pecuários com diferentes graus de mobilidade e confinamento [9]. A exigência em termos de cobertura e densidade de conexões varia significativamente conforme o comportamento do rebanho, por exemplo, quando os animais estão dispersos no pasto em comparação a momentos de alimentação concentrada em instalações fechadas [10].

Embora existam diversas investigações sobre o uso de IoT aplicado à pecuária, poucos utilizam o NB-IoT como alternativa de sistema de telecomunicações, mesmo sendo uma tecnologia já disponibilizada comercialmente por várias operadoras. De acordo com dados da GSA (2024) [11], 176 operadoras ao redor do mundo haviam implementado e estavam explorando o NB-IoT. Embora os benefícios para a gestão de rebanhos sejam evidentes [12], ainda não existe um consenso sobre qual tecnologia LPWAN representa a melhor escolha [13].

Diante desse contexto, este estudo apresenta uma análise de desempenho do NB-IoT aplicado ao monitoramento de gado em criação semi-intensiva. O trabalho está estruturado como a seguir. A Seção II apresenta os principais estudos envolvendo o uso de redes LPWANs na pecuária inteligente, com ênfase nos trabalhos que utilizam NB-IoT. A Seção III descreve brevemente o NB-IoT e suas principais funcionalidades, com foco nas camadas PHY, MAC e RRC. Na Seção IV, é abordada a prototipagem utilizando o simulador ns-3, o módulo LENA-NB, os cenários modelados e os parâmetros utilizados nas campanhas de simulações. Os resultados obtidos são apresentados e discutidos na Seção V, que também inclui uma subseção dedicada às limitações encontradas no módulo NB-IoT do ns-3. Por fim, a Seção VI traz as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## II. TRABALHOS RELACIONADOS

Esta seção tem como objetivo apresentar o panorama atual da pesquisa científica relacionada à aplicação de redes LPWAN na pecuária inteligente, com foco nas soluções baseadas em NB-IoT. Busca-se identificar os principais desafios enfrentados, bem como as abordagens propostas na literatura e as perspectivas ainda pouco exploradas.

Para isso, foi realizado um mapeamento dos trabalhos nas bases *SCOPUS* e *Web of Science* (WoS) em abril de 2025, conforme apresentado na Tabela I. A estratégia de busca considerou a palavra-chave *livestock*, combinada com termos como *sensors*, IoT, LoRa, NB-IoT e Sigfox. Foram contabilizados os trabalhos que continham os termos da primeira coluna no título, resumo e/ou nas palavras-chave. Os resultados indicam uma ampla produção científica voltada à pecuária e à IoT em geral. Contudo, observa-se uma queda no número de publicações à medida que o foco se restringe às tecnologias LPWAN, evidenciando uma oportunidade de investigação, sobretudo no contexto de aplicações com NB-IoT.

TABELA I: Resultado da busca nas bases SCOPUS e WoS com diferentes combinações de palavras-chave.

Palavras-chave	Escopo	SCOPUS	WoS
Livestock	Título, resumo e/ou palavra-chave	53174	40541
Livestock AND Sensors	Título, resumo e/ou palavra-chave	1387	974
Livestock AND IoT	Título, resumo e/ou palavra-chave	547	221
Livestock AND LoRa	Título, resumo e/ou palavra-chave	51	30
Livestock AND Sigfox	Título, resumo e/ou palavra-chave	10	6
Livestock AND NB-IoT	Título, resumo e/ou palavra-chave	8	4

Dentre os trabalhos sobre NB-IoT aplicados ao monitoramento de gado, observa-se um conjunto de características recorrentes que refletem o estado atual das pesquisas na área. A maioria dos estudos encontrados realiza experimentos reais utilizando sensores vestíveis em um número reduzido de dispositivos, 1 a 3 *User Equipments* (UEs), em ambientes controlados ou semiabertos, com foco na eficiência energética [14], na precisão da detecção de eventos como estro ou quedas [15] e [16], e a viabilidade de operação contínua com baterias de longa duração [17]. Embora promissores, esses trabalhos ainda não abordam amplamente cenários com alta densidade de dispositivos ou mobilidade em pastagens extensivas, o que sinaliza um campo de pesquisa aberto para soluções escaláveis e adequadas a diferentes regimes de criação.

Este trabalho realiza uma análise de desempenho do NB-IoT aplicado à pecuária em regime semi-intensivo, considerando dois momentos distintos: o período que os animais estão soltos no pasto e o de confinamento para suplementação alimentar. A principal contribuição está em avaliar como a concentração ou dispersão dos dispositivos afeta os indicadores de desempenho do sistema de comunicação. Utilizando o ns-3 para a prototipagem da rede NB-IoT, são analisadas métricas como consumo energético e latência, com o objetivo de compreender os limites de escalabilidade e eficiência do NB-IoT nesse tipo de aplicação.

## III. TECNOLOGIA NB-IoT

O NB-IoT é uma tecnologia LPWAN que opera com largura de banda estreita (180 kHz ou 200 kHz), possui ampla cobertura (até 15 km), longa autonomia de bateria e suporta alta densidade de dispositivos por célula. É uma tecnologia que pode ser ofertada a baixo custo, especialmente por ter a possibilidade de coexistir com redes consolidadas, como o 4G e o GSM, utilizando a infraestrutura já existente [18]. Essas características tornam o NB-IoT uma alternativa promissora para aplicações no setor agropecuário, que demandam conectividade em áreas remotas, com uma grande quantidade de sensores distribuídos em regiões extensas e que necessitam de baterias com vida útil longa.

Esses benefícios são resultados de adaptações feitas nas camadas PHY, MAC e RRC em relação ao LTE. Na camada PHY, destacam-se a existência de duas opções de espaçamentos de subportadoras (15 kHz e 3,75 kHz), o uso de esquemas de modulação BPSK e QPSK, bem como canais físicos otimizados para operar com baixas taxas de dados [19]. Na camada MAC, foram introduzidos mecanismos como os *buffer status report* (BSR) e *power headroom report* (PHR), adaptados para permitir o envio antecipado de pacotes, nos modos C-IoT-Opt e EDT [20]. Na camada RRC, foram incorporados os esquemas de economia de energia *Extended Discontinuous Reception* (eDRX) e *Power Saving Mode* (PSM), além dos modos de transmissão *RRC Connection Resume Procedure* [21], *Cellular IoT Optimization* [21] e *Early Data Transmission* [22].

O NB-IoT tem como grande preocupação com o *overhead* de sinalização, que pode ser significativo em relação à transmissão de pequenos volumes de dados. Assim, os modos de transmissão foram desenvolvidos para melhorar a eficiência da rede na comunicação, gerenciando a sinalização como forma de reduzir o consumo energético. O NB-IoT não tem um canal de controle de *uplink* e o UE precisa realizar o acesso aleatório e o pedido de conexão RRC antes de transmitir alguma mensagem.

Como ilustrado na Fig. 1, o modo de transmissão de referência utiliza o *RRC Resume procedure*. Com esse procedimento, o acesso aleatório é realizado com a troca de duas mensagens (Msg1 e Msg2), enquanto o estabelecimento da conexão RRC é feito por meio de três mensagens (Msg3, Msg4 e Msg 5).

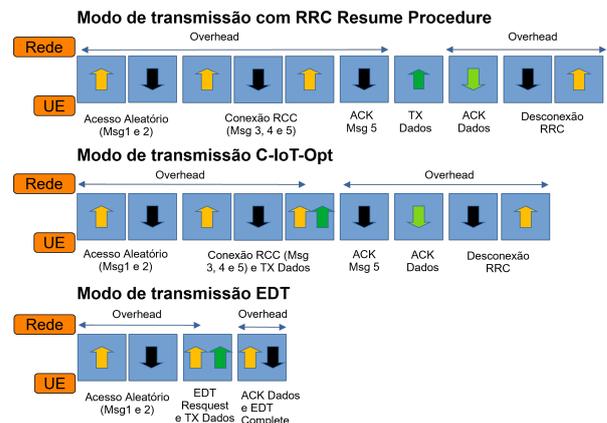


Fig. 1: Modos de transmissão do NB-IoT.

O *C-IoT-Opt* permite a transmissão de dados do usuário diretamente durante o restabelecimento da conexão RRC, minimizando a sobrecarga de sinalização. O modo EDT permite que dados sejam transmitidos durante o acesso aleatório, em um procedimento chamado de *RRCEarlyDataRequest*, mesmo sem o UE entrar no modo conectado, o que melhora significativamente a latência e a eficiência energética, especialmente em redes com alta densidade de dispositivos [23].

#### IV. PROTOTIPAGEM DO SISTEMA

Diante da complexidade dos sistemas de telecomunicações, nota-se uma crescente preferência, por parte das empresas e centros de pesquisa, por prototipagem em software nas fases de concepção e teste de soluções, até porque o protótipo está mais próximo dos sistemas reais, que agora têm muitas de suas partes virtualizadas. Assim, a ferramenta de prototipagem escolhida para esse estudo é o software de código aberto *Network Simulator Version 3 (ns-3)* [24], que possui módulos dedicados para sistemas como Wi-Fi, NR, LoRa e NB-IoT.

O módulo utilizado neste estudo é o LENA-NB [25], desenvolvido a partir de modificações no módulo do LTE, o LENA. Dentre os principais ajustes implementados, destacam-se: a configuração da largura de banda para 180 kHz, o suporte ao UE NB-IoT, a adição das máquinas de estado para economia de energia (PSM e eDRX), os diferentes modos de transmissão, o *cross-subframe scheduling* e os modelos de erro e adaptação de enlace específicos do NB-IoT. Embora existam outros módulos do NB-IoT disponíveis para o ns-3, o LENA-NB é o que possui implementações mais atualizadas.

A partir de adaptações no módulo LENA-NB, foram desenvolvidos dois *scripts* distintos, representando cenários que juntos caracterizam os momentos do regime de criação semi-intensiva, amplamente usado em fazendas que combinam manejo extensivo com confinamento estratégico. O primeiro cenário é o confinado, no qual os animais estão concentrados na sede da fazenda, próximos à estação rádio base (ERB). A área da sede de confinamento corresponde ao necessário para que cada animal ocupe aproximadamente 5 m<sup>2</sup>. Já o segundo cenário é o não confinado, em que o gado está fora da sede de confinamento e é distribuído aleatoriamente em toda a área da fazenda [10]. Os dois cenários são ilustrados na Figura 2.

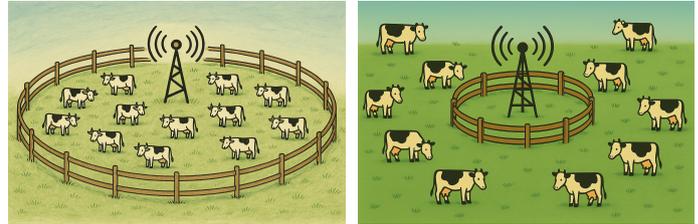
As dimensões da propriedade simulada baseiam-se na Fazenda São Geraldo, dedicada à criação de gado da raça Guzerá, com área total de aproximadamente 2160 hectares [26]. Devido à extensa área de pasto e à quantidade de animais considerada neste estudo, os dispositivos NB-IoT tendem a ficar mais dispersos no pasto durante o momento não confinado. O estudo considera que existe um dispositivo por vaca.

Para avaliar o comportamento da rede NB-IoT nos dois cenários (confinado e não confinado), foram definidos os parâmetros de simulação apresentados na Tabela II.

É válido destacar que ambos os cenários têm os mesmos parâmetros, diferindo apenas em relação a área de distribuição do gado (confinado e em movimento no pasto). O modelo de propagação é o *Winner Plus Propagation Loss Model*, que opera em 900 MHz e abrange as coberturas *indoor*, *deep indoor* e a *outdoor* [27], sendo a última a escolhida neste estudo. Foi fixado um valor de 20 dBm [23] para potência

TABELA II: Parâmetros utilizados nas simulações.

Parâmetros	Valores
Modelo de propagação	winner-plus-propagation-loss-model
Frequência de operação e Enlace	900 MHz, Uplink, 180 kHz de banda
Potência do UE	20 dBm
Tamanho dos pacotes	50 bytes
Tempo de simulação	15 minutos
Tráfego oferecido	1 pacote por vaca
Número de dispositivos	11, 52 e 105



(a) Cenário confinado.

(b) Cenário não confinado.

Fig. 2: Cenário de Criação Semi-Intensiva. Imagens geradas por IA (Sora/ChatGPT).

de transmissão dos dispositivos, que enviaram pacotes de 50 bytes, valor recomendado pelo relatório da GSMA de 2016 [28] para aplicações de rastreamento de dados com dispositivos LPWANs, que normalmente envolvem o envio de dados como localização, identificação e condições fisiológicas.

As simulações têm uma duração total de 15 minutos, dividida em três fases distintas: (i) nos primeiros 5 minutos, os UEs iniciam a ativação do tráfego; (ii) nos 5 minutos intermediários, quando o tráfego de todos os terminais está estabilizado, os resultados de desempenho são coletados; e (iii) nos últimos 5 minutos, os UEs que iniciaram transmissões na fase intermediária concluem suas transmissões. Para garantir que a quantidade de dispositivos ativos na fase intermediária corresponda ao valor desejado no cenário, o total de UEs simulados é multiplicado por 3 e dividido igualmente entre as fases. Cada dispositivo transmite apenas um pacote durante a simulação, e apenas os UEs ativos durante o intervalo central são considerados na análise. O número de UEs nesse período varia de 11 a 105 por célula, o que equivale, em uma projeção diária, a aproximadamente 1.000 a 10.000 dispositivos por célula. Esse total é calculado multiplicando o número de UEs por 24 horas e pelo número de ciclos de 15 minutos em uma hora (60/15) [23].

#### V. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Cada campanha de simulação tem 9 simulações independentes (3 quantidades de dispositivos para cada um dos 3 modos de transmissão). Cada campanha foi executada 14 vezes, utilizando diferentes sementes do gerador de números aleatórios. Assim, cada ponto dos gráficos mostrados nesta seção é resultado da média dessas 14 rodadas independentes de simulação.

Todos os gráficos contêm três curvas que representam os diferentes modos de transmissão do NB-IoT. A área em torno das linhas representa o intervalo de confiança de 95%. As simulações de todos os modos resultaram em perda de pacotes igual a zero. Ao final da simulação, também foi possível coletar a latência média de envio de pacotes e o consumo energético médio de cada dispositivo NB-IoT.

Para o cenário confinado (Figuras 3 e 4), o modo EDT apresentou menor consumo energético e menor latência. À medida que ocorre o aumento do número de dispositivos, há um leve aumento nos valores de latência e energia consumida média, mas nada muito expressivo, dado que todos os dispositivos estavam localizados na sede de confinamento, muito próximos à estação rádio base. A otimização de sinalização promovida pelo C-IoT-Opt não se reverteu em ganho significativo de desempenho em relação ao *RRC Resume Procedure*.

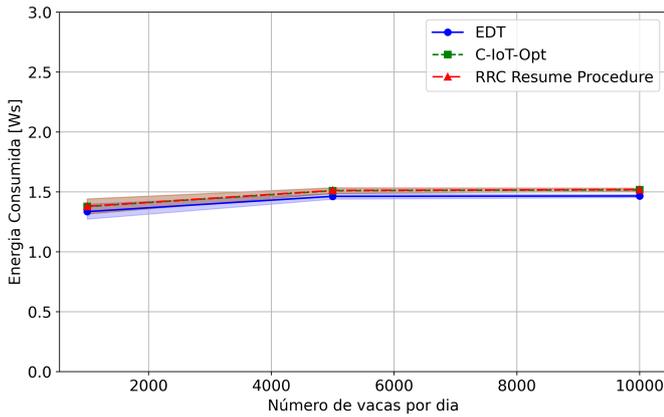


Fig. 3: Consumo Energético – Cenário confinado.

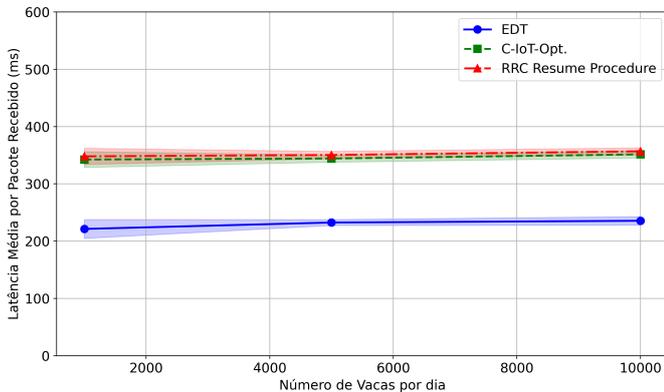


Fig. 4: Latência – Cenário confinado.

No cenário não confinado, o modo EDT também apresenta melhor desempenho, como pode ser observado nas Figuras 5 e 6. Diferente do esperado, não foi observada diferença significativa de gasto energético médio ao comparar os cenários confinado e não confinado (Figuras 3 e 5), mesmo com as vacas estando mais longe da estação base no cenário não confinado. Assim, mesmo com a variação no número de vacas, o sistema NB-IoT foi capaz de atender o monitoramento em uma área de 2160 hectares, pois não apresentou perda de pacotes.

Ao comparar as Figuras 6 e 4, observa-se o aumento de latência devido ao afastamento das vacas em relação à estação base, proporcionado no cenário não confinado. A Figura 6 também revela que a otimização de sinalização do modo C-IoT-Opt reflete em uma suave diferença de latência quando comparado ao modo *RRC Resume Procedure*, especialmente para alta carga.

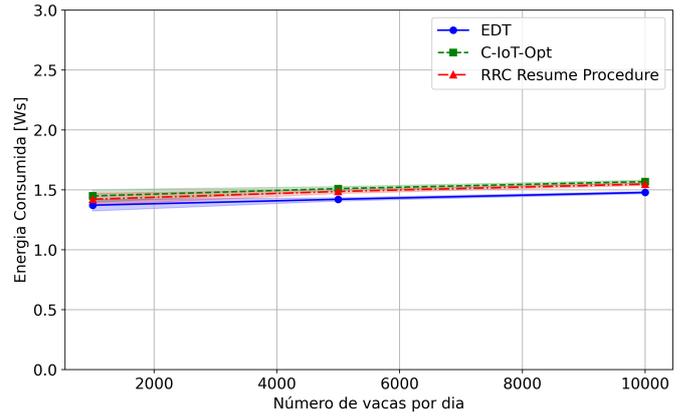


Fig. 5: Consumo Energético – Cenário não confinado.

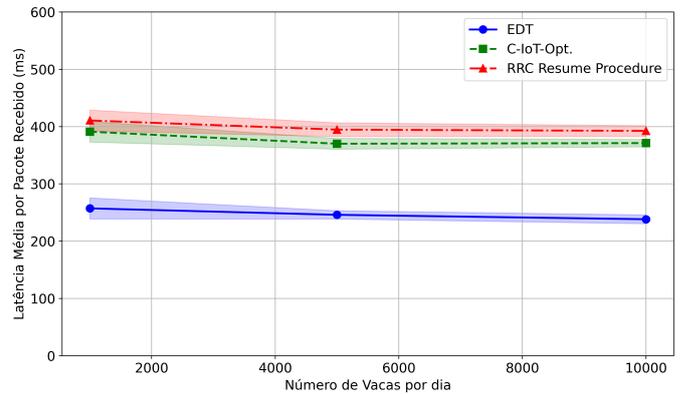


Fig. 6: Latência – Cenário não confinado.

#### A. Limitações do módulo LENA-NB

Durante a execução das simulações com o LENA-NB, foram identificados alguns desafios nas tentativas de deixar os cenários mais críticos.

A principal limitação encontrada ocorreu quando o simulador não localizava o identificador temporário (RNTI) do UE, o que interrompia a simulação. Tal falha foi observada ao tentar aumentar significativamente o número de dispositivos, alterar o intervalo entre pacotes, reduzir a potência do UE ou modificar o modelo de propagação. Por exemplo, a redução da potência do UE, embora tenha introduzido erros na recepção dos pacotes, resultou também na falha de alocação do RNTI em determinadas posições dos dispositivos, inviabilizando a execução da simulação.

Assim, embora todas as simulações apresentadas neste artigo tenham sido completadas com sucesso, o módulo LENA-NB não é flexível o bastante para uma campanha de simulação exaustiva, que envolva cenários com densidade de dispositivos maior, maior tráfego de pacotes e outros modelos de canal.

## VI. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma análise de desempenho do NB-IoT em um cenário de criação semi-intensiva de gado utilizando o ns-3. O módulo LENA-NB foi configurado para refletir as dimensões de uma fazenda e as condições espaciais de distribuição do gado, similar ao realizado em [10].

Pelo estudo aqui realizado, o NB-IoT tem características que suprem as necessidades do cenário de criação de gado, em especial a baixa taxa de perda de pacotes. Os resultados obtidos mostraram que o modo de transmissão EDT apresentou desempenho similar em termos de consumo energético, mas com menor latência que os demais modos analisados. Também foi observada maior latência para situações de não confinamento.

Entretanto, as investigações revelaram limitações no módulo LENA-NB que impedem a realização de estudos mais abrangentes. Foi observado um problema na execução das simulações ao serem alterados os valores do intervalo entre pacotes, potência do UE e modelo de propagação. Esse problema foi reportado aos desenvolvedores do módulo LENA-NB e será investigado em trabalhos futuros.

#### REFERÊNCIAS

- [1] H. Mroue, C. Assi *et al.*, “MAC Layer-Based Evaluation of IoT Technologies: LoRa, SigFox and NB-IoT,” in *2018 IEEE Middle East and North Africa Communications Conference (MENACOMM)*. IEEE, 2018, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8371022>
- [2] E. U. Ogbodo, A. M. Abu-Mahfouz, and A. M. Kurien, “A Survey on 5G and LPWAN-IoT for Improved Smart Cities and Remote Area Applications: From the Aspect of Architecture and Security,” *Sensors*, vol. 22, no. 16, 2022. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/16/6022>
- [3] K. Mekki, E. Bajic *et al.*, “A Comparative Study of LPWAN Technologies for Large-Scale IoT Deployment,” *ICT Express*, vol. 5, no. 1, pp. 1–7, Mar. 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405959518302951>
- [4] E. Kadusic *et al.*, “A Smart Parking Solution by Integrating NB-IoT Radio Communication Technology into the Core IoT Platform,” *Future Internet*, vol. 14, no. 8, p. 219, July 2022, acesso em: ago. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/fi14080219>
- [5] M. Swain, A. K. Rath *et al.*, “A Cost-Effective LoRa-Based Customized Device for Agriculture Field Monitoring and Precision Farming on IoT Platform,” *IJCS*, vol. 34, no. 6, November 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/dac.4632>
- [6] R. Casas *et al.*, “Real-Time Extensive Livestock Monitoring Using LPWAN Smart Wearable and Infrastructure,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 3, p. 1240, January 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app11031240>
- [7] CEPEA/ESALQ-USP and CNA, “Sumário Executivo: PIB do Agronegócio – 4º Trimestre de 2024,” *Relatório Técnico*, 2025, acesso em: maio 2025. [Online]. Available: <https://www.cnabrazil.org.br/publicacoes/sumario-executivo-pib-do-agronegocio-4o-trimestre-de-2024>
- [8] A. Pagano, S. Bertuletti *et al.*, “A Survey on LoRa for Smart Agriculture: Current Trends and Future Perspectives,” *IEEE Internet of Things Journal*, pp. 1–1, 2022. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9895797>
- [9] L. Germani, A. Mancini *et al.*, “An IoT Architecture for Continuous Livestock Monitoring Using LoRa LPWAN,” *Electronics*, vol. 8, no. 12, p. 1435, December 2019. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2079-9292/8/12/1435>
- [10] G. M. de Macedo, V. A. de Sousa Jr. *et al.*, “LoRaWAN em Pecuária Inteligente: Análise de Desempenho de Algoritmos de ADR,” in *SBRT 2023*, São José dos Campos, SP, Brasil, 2023.
- [11] Global mobile Suppliers Association (GSA), “NB-IoT & LTE-M April-2024 – Summary Report,” <https://gsacom.com/paper/nb-iot-lte-m-april-2024-summary-report/>, April 2024, acesso em: maio 2025.
- [12] A. Sutanto, A. Rakhman *et al.*, “Narrowband IoT in Livestock Farming: A Technological Innovation for Productivity and Sustainability,” *International Journal of Science, Technology & Management*, vol. 5, pp. 1291–1297, 09 2024.
- [13] J. Pablo Becoña, M. Grané *et al.*, “LoRa, Sigfox, and NB-IoT: An Empirical Comparison for IoT LPWAN Technologies in the Agribusiness,” *IEEE Embedded Systems Letters*, vol. 16, no. 3, pp. 283–286, 2024.
- [14] J. P. Becona and A. Arnaud, “An Empirical Energy Consumption Analysis in a Cattle Geolocation Device,” in *2021 IEEE URUCON*. IEEE, November 2021, pp. 209–212, accessed: 28 Apr. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/URUCON53396.2021.9647404>
- [15] N. Ma, J. Liu *et al.*, “NB-IoT Estrus Detection System of Dairy Cows Based on LSTM Networks,” in *PIMRC 2020: Track 4: Applications and Business*. IEEE, 2020, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9217104>
- [16] H. Wang, X. Hu *et al.*, “Electronic Sheepdog: A Novel Method With UAV-Assisted Wearable Grazing Monitoring,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 10, no. 18, pp. 16 036–16 047, September 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3258447>
- [17] J. P. Becoña, A. Arnaud, and E. Petrini, “LoRa, Sigfox, and NB-IoT: An Empirical Comparison for IoT LPWAN Technologies in the Agribusiness,” *IEEE Embedded Systems Letters*, pp. 1–1, January 2024, accessed: 17 Oct. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/les.2024.3394446>
- [18] M. C. Muniz, W. M. C. do Nascimento *et al.*, “Análise de Viabilidade do Uso do ns-3 para Prototipagem do NB-IoT,” in *SBRT 2024*. SBRT, January 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.14209/sbrt.2024.1571029020>
- [19] M. Kanj, V. Savaux, and M. Le Guen, “A Tutorial on NB-IoT Physical Layer Design,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 22, no. 4, pp. 2408–2446, Fourth Quarter 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/COMST.2020.3022751>
- [20] C. B. Mwakwata, H. Malik *et al.*, “Narrowband Internet of Things (NB-IoT): From Physical (PHY) and Media Access Control (MAC) Layers Perspectives,” *Sensors*, vol. 19, no. 11, 2019. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/11/2613>
- [21] 3GPP TS Group Radio Access Network, “3GPP TR 36.888 v12.0.0; Study on Provision of Low-Cost Machine-Type Communications (MTC) User Equipments (UEs) Based on LTE,” 3GPP, Tech. Rep., 2013.
- [22] 3GPP, “Release 15 Summary,” 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Tech. Rep., 2018, available: <https://www.3gpp.org/release-15>.
- [23] P. Jörke, T. Gebauer, and C. Wietfeld, “From LENA to LENA-NB: Implementation and Performance Evaluation of NB-IoT and Early Data Transmission in ns-3,” in *Proceedings of the 2022 Workshop on ns-3*, New York, NY, USA, 2022, p. 73–80. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3532577.3532600>
- [24] ns 3. (2025, Abril) Network Simulator version 3. <https://www.nsnam.org/>.
- [25] TUDO-CNI Team, “ns3-lena-nb: An Extension of LENA for NB-IoT Simulation,” <https://github.com/tudo-cni/ns3-lena-nb>, 2021, accessed: 28 Apr. 2025.
- [26] Compre Rural, “Top 10: As maiores fazendas do Brasil,” <https://www.compre rural.com/top-10-as-maiores-fazendas-do-brasil/>, 2023, acesso em: 29 abr. 2025.
- [27] S. Monhof, S. Böcker *et al.*, “Cellular Network Coverage Analysis and Optimization in Challenging Smart Grid Environments,” in *2018 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm)*. Denmark: IEEE, 2018, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/SmartGridComm.2018.8587520>
- [28] GSMA, “3GPP Low Power Wide Area Technologies,” <https://www.gsma.com/solutions-and-impact/technologies/internet-of-things/wp-content/uploads/2016/10/3GPP-Low-Power-Wide-Area-Technologies-GSMA-White-Paper.pdf>, October 2016, white Paper. Acesso em: 29 abr. 2025.