

Análise de Viabilidade do Uso do ns-3 para Prototipagem do NB-IoT

Marília Costa Muniz, William M. C. do Nascimento, Daniel Rodrigues de Luna, Tarciana Cabral de Brito Guerra e Vicente A. de Sousa Jr.

Resumo—A avaliação de desempenho e a busca de uma configuração de rede otimizada nos estágios de concepção de funcionalidades e pré-implantação são muito desafiadores para redes IoT, devido a cobertura extensa, o grande número de dispositivos e a duração do período de avaliação (dias de avaliação), pois os serviços IoT, geralmente, demandam baixa taxa de transmissão. Outro desafio importante é a personalização do cenário de avaliação, que depende fortemente da aplicação IoT alvo. Modelar um sistema de monitoramento sem fio para uma fazenda de criação de gado é bem diferente de modelá-lo para fins agrícolas. Essas peculiaridades se materializam em desafios a serem vencidos na etapa de prototipagem do sistema de telecomunicações, demandando flexibilidade de configuração e eficiência computacional da ferramenta de simulação. Este artigo explora o simulador ns-3 como ferramenta de prototipagem para serviços IoT utilizando o sistema NB-IoT. O módulo de NB-IoT do ns-3 foi instalado e uma análise de desempenho exploratória foi realizada. O artigo contribui para adoção do ns-3 como ferramenta de prototipagem de soluções e análise de valor agregado, pois os testes realizados revelam que o módulo é de fácil uso e tem flexibilidade para implementação de novas funcionalidades.

Palavras-Chave—LTE, ns-3, NB-IoT, mercado IoT.

I. INTRODUÇÃO

Existe uma grande expectativa por novos negócios e serviços vinculados à Internet das Coisas (IoT, em inglês) em redes 5G. Com a implantação da rede 5G ao redor do mundo, tanto o setor acadêmico como o industrial direcionaram foco para a capacidade de conectar um grande número de dispositivos. A intenção é colher quantidades massivas de dados por meio de dispositivos 5G IoT, objetivando a prestação de serviços de monitoramento, gerenciamento e cuidado com a saúde, casas, fábricas e cidades inteligentes e agricultura de precisão. Esse sistema e seus serviços agregados respondem ao anseio da população por melhor qualidade de vida; da indústria, por menor custo e maior lucratividade; e do governo, por mais eficiência em serviços públicos nos setores de energia, transporte, água, gás e conversação ambiental.

Redes *Low Power Wide Area Network* (LPWANs) são a principal alternativa para esse tipo de sistema de telecomunicações. Elas suportam muitos dispositivos conectados à uma baixa taxa de transmissão e com cobertura extensa. Essa característica aliada ao tipo de serviço prestado, resulta em dispositivos de tamanho reduzido e com vida útil de bateria por volta de 10 a 15 anos, mesmo com recurso energético finito. Outra faceta importante de tais sistemas é

o uso do espectro, que pode ser licenciado ou não. LoRa e o Sigfox são as tecnologias LPWANs mais populares que operam em banda não licenciada, enquanto o LTE-M e o NB-IoT são as alternativas em banda licenciada.

Apresentado no *Release* 13 do 3GPP [1], o NB-IoT foi criado para ser uma das principais alternativas de IoT do 3GPP. Com o objetivo de reduzir o custo sua implantação, o NB-IoT pode ser implantado tanto nas infraestruturas de redes 4G LTE e 5G NR. O NB-IoT permite a utilização de uma banda de 200 kHz, sendo uma alternativa econômica para redes de sensores de baixa taxa de transmissão. Além disso, a utilização de banda licenciada permite melhor gerência de interferência no NB-IoT, bem como a não existência de um limite diário de utilização da banda, o que a diferencia de outras tecnologias de IoT, tais como o SigFox e o LoRaWAN [2]. Ademais, a grande vantagem do uso das tecnologias de banda licenciada é sua integração com as redes celulares, pois tais tecnologias fazem parte do ecossistema do 3GPP.

A Figura 1 mostra uma breve comparação entre as principais tecnologias IoT. As tecnologias disponibilizadas pelo 3GPP aliam alta cobertura, com alternativa de alta e baixa taxa de transmissão, dependendo da largura de banda utilizada. Além disso, tais tecnologias podem atender a um número de dispositivos relativamente maior do que as demais. O NB-IoT, em especial, devido à sua banda estreita, consegue atender a até 50.000 dispositivos [3], mais que o dobro do que SigFox, LoRa, EC-GSM e LTE-M. No mais, é importante destacar que todas as tecnologias mostradas possuem bom alcance e longa autonomia de bateria.

A. Mercado de IoT e o NB-IoT

Um dos principais objetivos da tecnologia IoT é prover a conectividade com bilhões de dispositivos de baixo custo com baterias de longa duração. A ITU cita um total de 1.000.000 de dispositivos por km^2 . De acordo com o relatório da Ericsson de novembro de 2023 [8], até 2029 espera-se ter 38,9 bilhões de usuários IoT com um crescimento anual no número de dispositivos e conexões de 16%. Parte desse resultado é devido ao aumento no número de aplicações *Machine-to-Machine* (M2M) como monitoramento por vídeo, assistência médica, transportes, rastreamento de encomendas, por exemplo. Os dados apontam a IoT como uma das tendências emergentes da década atual.

Devido as várias aplicações e oportunidades que surgem com o mMTC no mercado e na indústria, previsões para o mercado de IoT são de maior investimento e número de dispositivos para os próximos anos, mesmo após tempos incertos sob uma perspectiva global devido a problemas como menor crescimento do PIB e altas taxas de juros [9]. Em 2022, na indústria de IoT foram investidos US\$ 201 bilhões, e as previsões apontam para investimentos de US\$ 344 bilhões em

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, william.nascimento.086@ufrn.edu.br, daniel.luna.088@ufrn.edu.br, tarciana.guerra.051@ufrn.edu.br, vicente.sousa@ufrn.edu.br. 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).

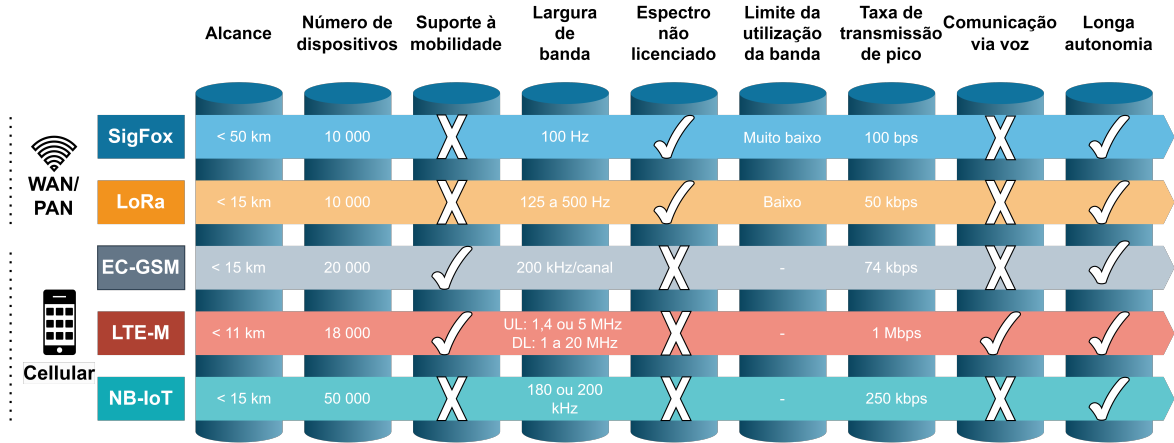


Fig. 1: Comparação entre diferentes tecnologias habilitadoras do IoT (construída com dados de [3]–[7]).

2025 [9], atingindo a ordem de 27 bilhões de dispositivos IoT conectados [10]. A Fig. 2 apresenta o crescimento da redes IoT no mercado de telecomunicações em relação ao seu número de conexões ativas e ao investimento. Existe uma tendência exponencial de crescimento de conexões ativas e linear no investimento em tais redes.

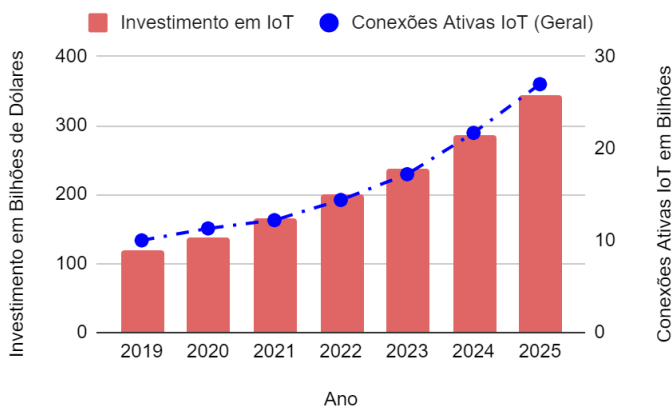


Fig. 2: Investimento e conexões IoT ao longo dos anos (construída com dados de [10]).

O NB-IoT vem se mostrando uma alternativa bem aceita no mercado para aplicações que exigem um número massivo de dispositivos conectados. A Fig. 3, construída com dados de [11], evidencia que o crescimento de dispositivos utilizando tecnologia *Cellular Massive IoT* (que incluem o NB-IoT e LTE-M) vem acontecendo e mantendo essa tendência no futuro.

Mais de 160 operadoras já implementaram, estão implementando ou estão estudando a implementação do NB-IoT em vários países diferentes [12]. A Fig. 4 apresenta a distribuição do número de operadoras em cada situação de implantação.

Essa tendência de crescimento de novos negócios com redes NB-IoT desperta o interesse na análise de desempenho de suas funcionalidades nos diversos cenários de IoT. Esse interesse não é exclusivo da fase de implantação do sistema, mas também no momento de concepção de funcionalidades para sua evolução. Este trabalho investiga o simulador ns-3 como ferramenta de prototipagem do sistema NB-IoT. Além do levantamento de trabalhos que exploram o módulo de NB-IoT do ns-3, o processo de instalação do módulo é brevemente documentada. Uma análise de desempenho exploratória foi

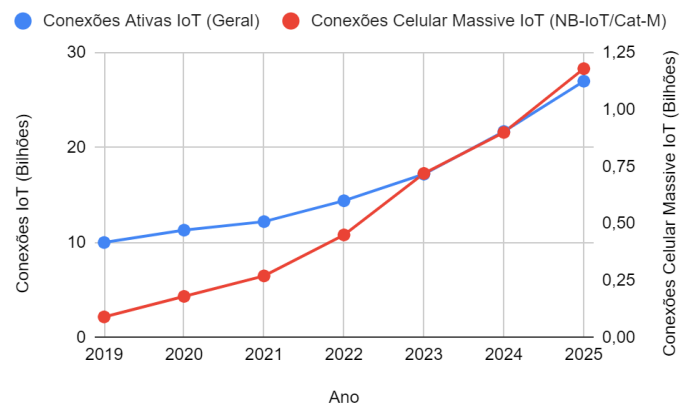


Fig. 3: Conexões Ativas IoT e especificamente NB-IoT e Cat-M (construída com dados de [11]).

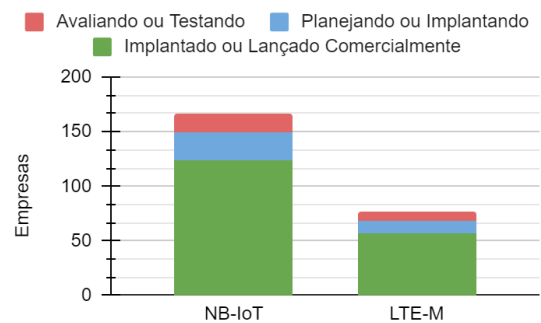


Fig. 4: Empresas investindo em NB-IoT e LTE-M (construída com dados de [12]).

realizada a fim de investigar a curva de aprendizado e a flexibilidade de uso do módulo para a configuração de cenários de teste e a implementação de novas funcionalidades.

É importante destacar que não é objetivo deste artigo descrever e explicar o funcionamento do NB-IoT em detalhes, esse tipo de informação pode ser encontrada em artigos como [13], [14], que detalham as camadas PHY e MAC do NB-IoT.

II. SIMULADOR NS-3 COMO ALTERNATIVA DE PROTOTIPAGEM DO NB-IOT

Primeiramente, é essencial destacar que analisar sistemas de telecomunicações por meio de sistemas reais pode ser financeiramente inviável, especialmente para grupos de pesquisa pequenos e quando o sistema está na fase de concepção. Realizar análise puramente matemática pode não ser adequado devido à complexidade dos sistemas de

telecomunicações e a inviabilidade de encontrar formulações que representem com acurácia todos os aspectos envolvidos na modelagem do sistema, considerando toda pilha de protocolos e o ambiente de propagação. Por esses motivos, a prototipagem por meio de *software* pode ser uma melhor alternativa, especialmente devido ao legado de bibliotecas de código disponíveis. Outro aspecto em prol da prototipagem em *software* é que um sistema moderno de telecomunicações está convergindo para um sistema de *software* com funções de redes virtualizadas que usam o *front-end* de rádio frequência (RF) como meio de transmissão. Assim, o protótipo em *software* está convergindo para o sistema real virtualizado, que atualmente é utilizado em sistemas comerciais.

Entre as ferramentas de prototipagem de sistemas de telecomunicações de código aberto, o *network simulator version 3* (ns-3) se destaca por ser voltado para uso em pesquisa e ensino, sendo constantemente atualizado com novos recursos, melhorias e correções, além de ter uma implementação modular [15]. O simulador surgiu em 2008, sendo uma evolução de seu antecessor de sucesso, o ns-2. Seus principais financiadores são o governo federal norte-americano, além da parceria com o *Google Summer of Codes*, que traz alguns estímulos para o projeto.

O ns-3 pode ser utilizado para fazer análises de comportamento e de desempenho de sistemas de comunicação com acurácia, possuindo modelos para sistemas cabeados e de diversas redes sem fio, por exemplo, redes ethernet, Wi-Fi, LTE, NB-IoT, LoRa e NR. Cada um desses sistemas possui um módulo dedicado, permitindo que novas contribuições possam ser realizadas alterando apenas a parte do código que lhe diz respeito.

No que se refere ao NB-IoT, seu módulo, chamado de LENA-NB, foi apresentado pelos autores de [16] e disponibilizado em <https://github.com/tudo-cni/ns3-lena-nb>. O módulo possui a vantagem de utilizar o ns-3 como base, além de possuir várias funcionalidades específicas do NB-IoT implementadas. O repositório possui instruções para instalação do simulador, incluindo as alterações necessárias do módulo *lte* para o padrão NB-IoT do 3GPP. É possível analisar o desempenho de uma série de cenários IoT, ajustando os efeitos de degradação do canal, posicionamento dos pontos de acesso e comportamento dos sensores, por exemplo. Portanto, dadas as vantagens destacadas e a adesão aos padrões 3GPP, o simulador NB-IoT do ns-3 foi escolhido como ferramenta principal de investigação desse trabalho.

A. Módulo NB-IoT do ns-3: Mapeamento de Trabalhos

Os criadores do módulo publicaram também os trabalhos [17] e [18]. Em [17], eles analisam o desempenho do NB-IoT com diferentes modos de transmissão: 1) Transmissão tradicional; 2) *Cellular IoT Optimization* e; 3) *Early Data Transmission*. Os autores concluem que o Modo 3) é o mais indicado para cenários IoT densos, embora tenha indicado problemas de escalabilidade e a necessidade de ajuste nos parâmetros do sistema. Em [18], os autores otimizaram os parâmetros do acesso aleatório utilizando o Modo *Early Data Transmission*. Os resultados mostram um aumento significativo na quantidade de dispositivos suportados, devido ao aumento na quantidade de acessos aleatórios por segundo. Por fim, os autores destacam a importância da configuração correta do sistema NB-IoT, destacando a relação entre a eficiência

espectral, o *early data transmissions* e os parâmetros do acesso aleatório.

Outros trabalhos que exploram o módulo do NB-IoT do ns-3 incluem os seguintes assuntos: economia de energia [19]; estratégias de escalonamento [20]; estratégia de acesso aleatório [21]; mecanismo de segurança [22]; interoperabilidade com redes SigFox, LoRa, NB-IoT e LTE-M via Funções Virtuais de Rede (VNF) [23]; escalonamento semi-persistente (SPS) em redes LTE-M e NB-IoT [24], [25]; e uso de *machine learning* para priorização de tráfego e localização de dispositivos NB-IoT [26], [27].

Os trabalhos citados anteriormente utilizam o ns-3 como ferramenta de simulação e testam temas específicos em cada estudo desenvolvido. Os objetivos deste trabalho são o de mapear as funcionalidades do módulo NB-IoT do ns-3, sumarizar quais grupos e em quais temas o módulo está sendo explorado, e finalmente, realizar um estudo exploratório de usabilidade do módulo, discutindo sua curva de aprendizado e sua flexibilidade para realização de estudos de desempenho e implementação de novas funcionalidades.

B. Módulo NB-IoT do ns-3: Breve Descrição

Como o NB-IoT é uma tecnologia projetada a partir do LTE, o módulo LENA-NB do ns-3 está sendo desenvolvido a partir de alterações no módulo LENA [16], que implementa o sistema LTE no ns-3. O módulo está sempre em evolução e recebe atualizações constantes de seus desenvolvedores. A Fig. 5, adaptada de [16], mostra a pilha de protocolos do NB-IoT implementada no ns-3. A figura destaca em quais camadas da pilha de protocolos houveram mudanças menores e maiores, destacando também funcionalidades adicionadas recentemente tanto no UE quanto na eNB.

As principais funcionalidades do módulo NB-IoT do ns-3 são [16]: tráfego de sinalização em *downlink*: DL MIB-NB and SIB-NB; suporte ao UE NB-IOT (CAT NB1) [16]; modelo de energia e modos de economia de energia: máquinas de estados do *Extended Discontinuous Reception* (eDRX) e do *Power Saving Mode* (PSM); *Cross-Subframe Scheduler*; *RRC Connection Resume Procedure* (3GPP Rel. 13); *Cellular IoT Optimization* (3GPP Rel. 13); *Early Data Transmission* (3GPP Rel. 15); *Cross-Subframe Scheduling*; novo procedimento de retomada de RRC (*RRC resume*); e curvas de desempenho de enlace específicas para o NB-IoT (usados na adaptação de enlace e no modelo de erro).

Dessa forma, o módulo LENA-NB implementa aspectos fundamentais do NB-IoT e tem potencial para ser um módulo robusto para prototipagem de tal sistema.

III. RESULTADO DEMONSTRATIVO

Esta seção tem por objetivo demonstrar a usabilidade do módulo do NB-IoT do ns-3, incluindo seu processo de instalação, configuração de uma campanha de simulação e visualização dos resultados.

O módulo faz uso da versão 3.32 do ns-3, sendo necessário apenas a substituição da pasta *lte* padrão do ns-3 pela existente no repositório <https://github.com/tudo-cni/ns3-lena-nb>. Também é necessário substituir a pasta *propagation* pelo conteúdo do seguinte repositório <https://github.com/tudo-cni/ns3-propagation-winner-plus>. Depois de realizar

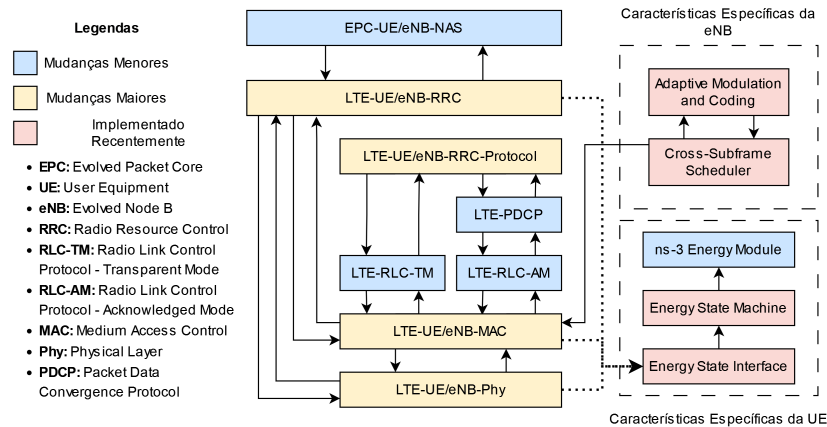


Fig. 5: Mudanças nos protocolos do módulo LENA (construída a partir de [16]).

essas duas etapas de substituição de códigos, é possível construir os executáveis utilizando os comandos:

- **Para configurar:**
`CXXFLAGS="-Wall" ./waf configure`
- **Para gerar os executáveis:**
`./waf.`

É possível simular os três modos de operação do NB-IoT (RRC Connection Resume Procedure, Cellular IoT Optimization e Early Data Transmission) com o exemplo chamado *lena-nb-5G-scenario.cc*, disponibilizado em <https://github.com/tudo-cni/ns3-lena-nb>.

Como forma de avaliar a usabilidade do módulo, foi realizado uma análise de desempenho com esse mesmo *script*. O cenário de simulação compreende UEs distribuídos aleatoriamente em um disco de área 4,91 km² (raio de 2,5 km), que representa o tamanho médio de uma célula na cidade de Dortmund, Alemanha [16]. Os UEs são distribuídos uniformemente em coberturas *indoor*, *deep indoor* e *outdoor*, de acordo com o modelo de propagação escolhido. Foi simulado o modelo de canal Winner+ UMaNLOS com 15,4 dB de perda de penetração para cenários *indoor* e 20,9 dB para *deep indoor*.

As simulações tem 15 minutos de duração dividida em três momentos: (i) 5 minutos iniciais para os UEs ativarem o tráfego; (ii) 5 minutos intermediários, com tráfego estável de todos os terminais, em que os resultados de desempenho são coletados; e (iii) 5 minutos finais para que os UEs que começaram transmissões no momento intermediário possam completar suas transmissões.

Com a finalidade de realizar a campanha de simulação de uma maneira mais eficiente e rápida, os autores do módulo NB-IoT disponibilizaram um *script* em Python chamado *runner_example.py*. Com ele, é possível rodar as simulações em paralelo, gerando pastas com os resultados separados pelo modo de transmissão da seguinte forma: (i) final *0_0*, para RRC Connection Resume Procedure, final *1_0*, para Cellular IoT Optimization; e (iii) final *1_1*, para o Early Data Transmission.

Nas simulações deste artigo, o número de UEs varia de 27 a 243 por célula durante 15 minutos, resultando em um total de 2592 a 23328 dispositivos por célula diariamente. Este total é calculado multiplicando o número de UEs por 24 horas e pelo número de ciclos de 15 minutos em uma hora (60/15). As simulações foram realizadas em uma máquina processador Intel® Xeon® Silver 4114 CPU @ 2,20GHz, equipada com

192 GB de RAM DDR4 2133 RDIMM (6 x 32GB). A simulação mais longa teve duração de aproximadamente 133 minutos.

Após a execução de cada simulação, os seguintes arquivos de resultados são salvos:

- **<dia_mês_ano>_<hora>_DataTrans.log:** arquivo com os resultados de rastreamento do processo de transmissão. Traz as seguintes informações: IMSI (identificador do UE), Time of Tx Packets (tempo que uma transmissão de pacote foi realizada). Essas métricas são armazenadas pela classe *LteUeRrc*;
- **<dia_mês_ano>_<hora>_DataRecep.log:** arquivo com os resultados de rastreamento do processo de recepção. Traz as seguintes informações: IMSI (identificador do UE), Time of Rx Packets (tempo que uma recepção de pacote foi realizada). Essas métricas são armazenadas pela classe *LteEnbRrc*;
- **<dia_mês_ano>_<hora>_MAC.log:** arquivo com os resultados de rastreamento da camada MAC. Traz as seguintes informações: IMSI (identificador do UE), MSG (mensagens de controle da camada MAC) e Time (tempo que a mensagem de controle foi enviada). Essas métricas são armazenadas pela classe *LteUeMac*;
- **<dia_mês_ano>_<hora>_RRC.log:** arquivo com os resultados de rastreamento da camada RRC. Traz as seguintes informações: IMSI (identificador do UE), MSG (mensagens do protocolo *Radio Resource Control*) e Time (tempo que a mensagem do protocolo foi enviada). Essas métricas são armazenadas pela classe *LteEnbRrcProtocolReal*;
- **<dia_mês_ano>_<hora>_Energy.log:** nesse arquivo estão contidas as informações do módulo de consumo de energia. Traz as seguintes informações: IMSI (identificador do UE), *MAC Sap Provider* (métodos MAC chamados pelo RLC), *Energy Remaining* (energia restante em *Joule*) e *Energy Remaining Fraction* (energia restante em porcentagem). Essas métricas são armazenadas pela classe *LteUeRrc*.

A partir do entendimento das métricas de saída das simulações é possível construir gráficos e analisá-los. A análise exploratória apresentada neste artigo é baseada na Fig. 6, que mostra o consumo energético dos UEs com o aumento de carga na rede. Conforme esperado, o valor médio de consumo energético por dispositivos não aumenta significativamente com o aumento do número de UEs, e o modo EDT apresenta

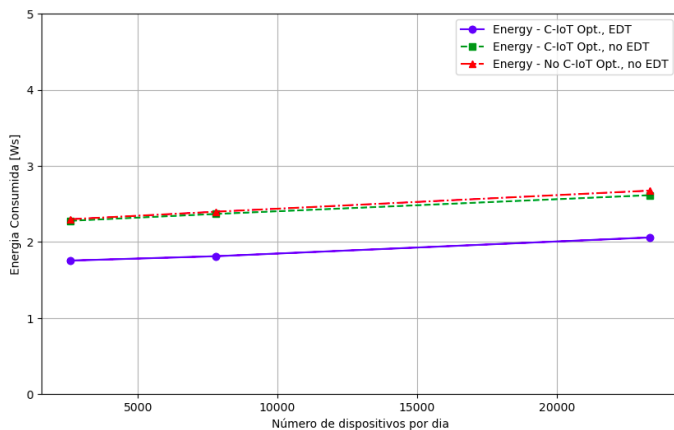


Fig. 6: Consumo de energia versus carga.

um desempenho superior em termos de economia de energia em comparação aos outros modos, mesmo em cenários mais densos. O modo C-IoT não influencia significativamente no consumo energético.

IV. CONCLUSÕES

Por ser uma tecnologia LPWAN padronizada pelo 3GPP, o NB-IoT apresenta-se como uma alternativa promissora para redes IoT baseadas no envio de poucos dados por uma massiva quantidade de dispositivos. Este artigo apresenta em sua introdução uma análise de investimentos em IoT e a tendência de crescimento dos números de dispositivos conectados nos próximos anos. Como principal contribuição, foi investigada a viabilidade do uso do módulo LENA-NB para a análise de desempenho de modos de operação do NB-IoT.

Outrossim, esse artigo contribui para a disseminação e o melhor entendimento do módulo do LENA-NB como ferramenta de prototipagem, bem como uma demonstração de seu funcionamento. A partir de análises do código e testes de seu funcionamento, foi possível constatar que o módulo é uma ferramenta viável para a realização de análises de desempenho e estudos de cenários diversos do NB-IoT. Os *scripts* de simulação são de fácil entendimento para alguém já ambientado com o ns-3. Já as métricas de saída das simulações, descritas neste artigo, não são tão triviais de identificar. Estudos futuros incluem uma caracterização ampla do NB-IoT em cenários mais realistas, incluindo mais dispositivos e métricas de saída.

REFERÊNCIAS

- [1] 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," 3rd Generation Partnership Project, Tech. Rep., 2013.
- [2] M. Vaezi, A. Azari *et al.*, "Cellular, Wide-Area, and Non-Terrestrial IoT: A Survey on 5G Advances and the Road Toward 6G," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 24, no. 2, pp. 1117–1174, 2022.
- [3] S.-H. Hwang and S.-Z. Liu, "Survey on 3gpp low power wide area technologies and its application," in *2019 IEEE VTS Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS)*, 2019, pp. 1–5.
- [4] M. Vaezi, A. Azari *et al.*, "Cellular, wide-area, and non-terrestrial iot: A survey on 5g advances and the road toward 6g," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 24, no. 2, pp. 1117–1174, 2022.
- [5] M. A. M. Almuhaya, W. A. Jabbar *et al.*, "A survey on lorawan technology: Recent trends, opportunities, simulation tools and future directions," *Electronics*, vol. 11, no. 1, 2022. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2079-9292/11/1/164>
- [6] E. M. Migabo, K. D. Djouani, and A. M. Kurien, "The narrowband internet of things (nb-iot) resources management performance state of art, challenges, and opportunities," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 97 658–97 675, 2020.

- [7] M. T. Abbas, K.-J. Grinnemo *et al.*, "Energy-saving solutions for cellular internet of things—a survey," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 62 073–62 096, 2022.
- [8] "Ericsson Mobility Report, November 2023," Disponível em: <https://www.techinside.com/wp-content/uploads/2023/12/ericsson-mobility-report-november-2023.pdf>. Acesso em: 18 de julho de 2024, 2023.
- [9] Philipp Wegner, "Global IoT market size to grow 19% in 2023—IoT shows resilience despite economic downturn," Disponível em: <https://iot-analytics.com/iot-market-size/>. Acesso em: 30 de maio 2023, 2023.
- [10] Satyajit Sinha, "State of iot 2023: Number of connected iot devices growing 16% to 16.7 billion globally," Disponível em: <https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/>. Acesso em: 30 de maio 2023, 2023.
- [11] "Ericsson Mobility Report, November 2022," Disponível em: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/reports>. Acesso em: 30 de maio 2023, 2022.
- [12] "NB-IoT and LTE-M September-2022 – Summary," Disponível em: <https://gsacom.com/paper/nb-iot-and-lte-m-september-2022-summary/>. Acesso em: 30 de maio 2023, 2022.
- [13] 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, 2020.
- [14] 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>
- [15] ns 3. (2023, Junho) Network Simulator version 3. <https://www.nsnam.org/>.
- [16] 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*, ser. WNS3 '22. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2022, p. 73–80. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3532577.3532600>
- [17] P. Jörke, T. Gebauer *et al.*, "Scaling Dense NB-IoT Networks to the Max: Performance Benefits of Early Data Transmission," vol. 2022-June. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022.
- [18] P. Jörke, D. Ronschka, and C. Wietfeld, "Performance Evaluation of Random Access for Small Data Transmissions in Highly Dense Public and Private NB-IoT Networks," 2023.
- [19] A. K. Sultania, C. Delgado, and J. Famaey, "Implementation of NB-IoT power saving schemes in ns-3," in *Proceedings of the 2019 Workshop on Next-Generation Wireless with ns-3*, 2019, pp. 5–8.
- [20] T. Chou and S. Yang, *Simulating Narrow Band Internet of Things Scheduler: Using ns-3*. Universidade Nacional Tsing Hua, 2019. [Online]. Available: <https://github.com/a3794110/ns-3-NB-IoT>
- [21] K. Lin and S. Yang, *Simulating NB-IoT Random Access: Using ns-3 as an Example*. Universidade Nacional Tsing Hua, 2018. [Online]. Available: <https://github.com/a3794110/ns-3-NB-IoT>
- [22] G. Pathak, J. Gutierrez *et al.*, "LPWAN Key Exchange: A Centralised Lightweight Approach," *Sensors*, vol. 22, 7 2022.
- [23] S. T. Arzo, F. Zambotto *et al.*, "A Translator as Virtual Network Function for Network Level Interoperability of Different IoT Technologies." Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 6 2021, pp. 416–422.
- [24] K. A. Nsiah, Z. Amjad *et al.*, "Performance Evaluation of Latency for NB-LTE Networks in Industrial Automation," in *2019 IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2019, pp. 1–7.
- [25] —, "Latency Reduction Techniques for NB-IoT Networks," in *2019 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*, vol. 1, 2019, pp. 478–482.
- [26] Z. Yi, J. Zhao *et al.*, "Neural Network Based Prediction and Analysis for NB-IoT Network Location," in *2019 11th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, 2019, pp. 1–5.
- [27] Y.-A. Daraghmi, E. Y. Daraghmi *et al.*, "Edge-Fog-Cloud Computing Hierarchy for Improving Performance and Security of NB-IoT-Based Health Monitoring Systems," *Sensors*, vol. 22, no. 22, 2022. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/22/8646>