

Análise da Alocação de Slots e Carga de Usuários no Trade-off Energia-QoS em RUs Open RAN

Rodrigo K. Y. Aoki, Iran M. Braga Jr., João V. B. Labres, Francisco H. Costa Neto e Paulo Cardieri

Resumo—As redes *Open Radio Access Network* (O-RAN) destacam-se por suas arquiteturas programáveis e desagregadas. Este trabalho apresenta uma avaliação empírica em hardware dos *trade-offs* entre consumo de energia e desempenho nessas redes. Utilizando um *testbed* 5G *Standalone* com componentes comerciais (COTS), o estudo investigou como diferentes alocações *Time Division Duplexing* e cargas de usuários afetam a Qualidade de Serviço (QoS) e o consumo energético nas *Radio Units* (RUs). Os resultados demonstram que a restrição de recursos para economizar potência causa perdas desproporcionais na QoS e na eficiência energética global sob diferentes cenários de carga e configurações TDD.

Palavras-Chave—Open RAN, Eficiência Energética, Medição de Potência, QoS.

Abstract—Open Radio Access Networks (O-RANs) stand out for their programmable and disaggregated architectures. This work presents an empirical hardware evaluation of the trade-offs between energy consumption and performance in these networks. Using a 5G standalone testbed with commercial (COTS) components, the study investigated how different Time Division Duplexing (TDD) allocations and user loads affect Quality of Service (QoS) and energy consumption in Radio Units (RUs). The results demonstrate that resource restriction to save power causes disproportionate losses in QoS and overall energy efficiency under different load scenarios and TDD configurations.

Keywords—Open RAN, Energy Efficiency, Power Measurement, QoS.

I. INTRODUÇÃO

Para solucionar as dores de mercado de dependência exclusiva de fornecedor (*vendor lock-in*) e a restrição de escalabilidade, a indústria está impulsionando uma mudança de paradigma estratégico em direção a arquiteturas desagregadas e construídas no conceito de redes definidas por software (SDN). Nesse contexto, a rede de acesso *Open Radio Access Network* (O-RAN) emergiu como um facilitador-chave para a inovação, promovendo a interoperabilidade entre fornecedores, interfaces abertas e a integração de Inteligência Artificial (IA) para o gerenciamento inteligente da rede [1]–[3]. Entretanto, o consumo de energia continua sendo uma problemática que precisa ser abordada. De fato, a *Radio Access Network* (RAN) é responsável pela maioria do consumo energético de uma operadora móvel [4], onde a *Radio Unit* (RU) responde por mais de 70% da potência consumida em um site de rádio [5]. Consequentemente, otimizar a eficiência energética da

RU é fundamental para alinhar a sustentabilidade ambiental com a redução do *Operational Expenditure* (OPEX) para as operadoras [6], [7].

O consumo de energia já era um ponto de interesse antes mesmo do surgimento do O-RAN. Estudos como [8], [9] demonstraram que o consumo de energia nas redes 4G e 5G é dominado pela infraestrutura para manter o rádio. No entanto, esses estudos não consideraram novas arquiteturas de rede como as desagregadas, o que limita as medições de consumo agregado da estação rádio-base e evita a análise de componentes de hardware ou funções de rede específicos.

Dentro do ecossistema O-RAN, esforços recentes priorizaram o consumo energético das camadas virtualizadas (*Centralized Unit* (CU)/*Distributed Unit* (DU)) ou a otimização baseada em IA orquestrada pelo RAN *Intelligent Controller* (RIC) [10]–[12]. Em [13], os autores propuseram um estudo experimental sobre o consumo de energia de uma rede 5G baseada em O-RAN variando as condições de tráfego. No entanto, dada a predominância do consumo de energia da RU, estudos específicos sobre medições de energia em O-RU permanecem escassos na literatura. De fato, a eficiência específica da RU por meio de modos de suspensão (*sleep modes*) foram investigados em [14], [15], enquanto [16] realizou medições de potência em múltiplas RU considerando parâmetros operacionais, como configurações *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) e cargas de tráfego. Todavia, o impacto da alocação de recursos de rádio (por exemplo, a estrutura dos slots *Time Division Duplex* (TDD)) no consumo instantâneo de potência da RU permanece pouco explorado.

Para preencher essa lacuna, este artigo investiga os *trade-offs* críticos entre o consumo instantâneo de potência, o gasto total de energia (Joules) e a degradação do *Quality of Service* (QoS), medida em uma rede O-RAN real, com foco na perspectiva da RU. Em resumo, as principais contribuições deste trabalho são:

- (i) Uma avaliação empírica utilizando um ambiente de testes (*testbed*) O-RAN 5G baseado em servidores *Commercial Off-The-Shelf* (COTS) para quantificar o consumo de energia da O-RU sob diferentes alocação de slots e carga de usuários;
- (ii) Uma caracterização de como as configurações TDD estáticas e conservadoras em termos de energia interagem com a alta demanda de carga de usuários;
- (iii) Uma análise abrangente do consumo de energia e da latência, destacando os *trade-offs* fundamentais entre o consumo de energia e o QoS em implantações O-RAN.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma: O ambiente Open RAN é introduzido na Seção II. O quadro

Rodrigo K. Y. Aoki, Iran M. Braga Jr., João V. B. Labres e Francisco H. Costa Neto, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPQD), Campinas-SP, Brasil, e-mail: {rkenji, iranjr, jvlabres, fhugo}@cpqd.com.br; Rodrigo K. Y. Aoki e Paulo Cardieri, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas-SP, Brasil, e-mail: cardieri@unicamp.br.

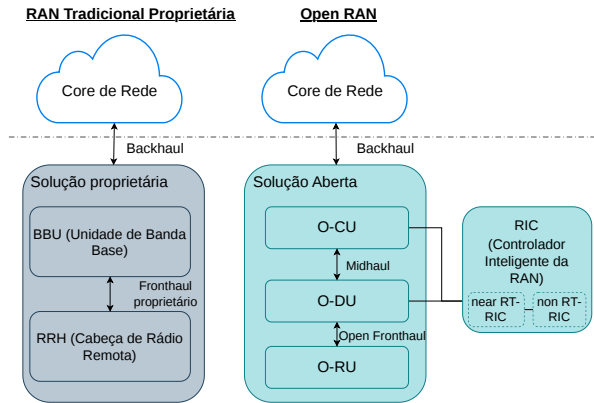


Fig. 1: Comparação entre arquitetura estrutural de RAN Tradicional Proprietária e Open RAN.

TDD é descrito na Seção II-A e a Seção III detalha o *setup* experimental e a metodologia. Os resultados são discutidos na Seção IV. e, por fim, a Seção V apresenta as conclusões.

II. AMBIENTE OPEN-RAN

Implantações tradicionais de redes de acesso a rádio frequentemente dependiam de estações rádio base proprietárias e monolíticas, nas quais *Baseband Unit* (BBU) e a *Remote Radio Head* (RRH) eram fortemente integradas por meio de interfaces específicas do fornecedor, inibindo a interoperabilidade de múltiplos fornecedores (*multi-vendor*) e o uso amplo de componentes COTS [2]. Para superar essas limitações estruturais, a O-RAN Alliance padronizou uma arquitetura totalmente desagregada, nativa em nuvem (*cloud-native*) e aberta [2], [3]. Conforme ilustrado na Figura 1, a *Next Generation Node B* (gNB) tradicional é desacoplado em três unidades funcionais distintas:

- CU: Responsável pelas camadas superiores da pilha de protocolos, por exemplo, *Packet Data Convergence Protocol* (PDCP) e *Radio Resource Control* (RRC).
- DU: Lida com as camadas inferiores, incluindo *Radio Link Control* (RLC), *Medium Access Control* (MAC) e a subcamada física *High-PHY*. Devido aos seus rigorosos requisitos de processamento de baixa latência, geralmente está localizada na borda da rede (*edge computing*).
- RU: O *hardware* físico de rádio que gerencia a subcamada física *Low-PHY*, a conversão digital-analógico e a amplificação de potência de *Radio Frequency* (RF). Como principal interface com o meio sem fio, a RU é o ponto focal deste estudo, particularmente no que diz respeito à correlação entre a alocação de *slots* TDD e o consumo de potência do *hardware*.

Além disso, esses componentes se comunicam por meio de interfaces abertas padronizadas, como a interface F1, que conecta a CU e a DU e a interface *Open Fronthaul*, que fornece a conexão crítica entre a O-DU e a O-RU, facilitando o transporte de dados *In-phase/Quadrature* (IQ), sincronização de pacotes e sinais de controle.

A. Quadro TDD

No 5G *New Radio* (NR), o TDD organiza as transmissões por meio de uma estrutura temporal hierárquica. Um quadro de rádio padrão abrange 10 ms e é subdividido em *slots*, cuja quantidade é ditada pela numerologia configurada, μ (ou seja, o espaçamento de subportadora (SCS)). No nível do *slot*, os recursos são configurados como *Downlink* (DL), *Uplink* (UL) ou Especial (S), com a configuração TDD expressa como uma sequência desses tipos de *slots* (por exemplo, DDDSU). A Fig. 2 ilustra uma configuração de quadro TDD com $\mu = 1$.

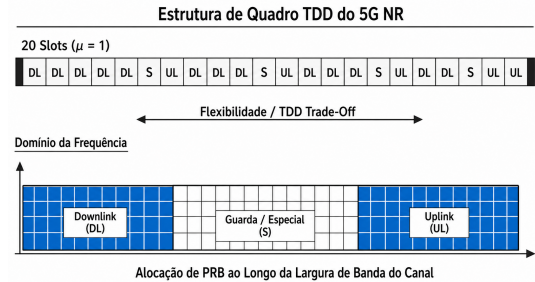


Fig. 2: Padrões de Configuração de *Slots* TDD e Blocos de Recursos Físicos

Essa configuração de *slots* governa estritamente as oportunidades de transmissão disponíveis e, consequentemente, o tempo necessário para transmitir uma determinada carga útil de dados (*payload*). Assim, a seleção de um padrão TDD específico é um *trade-off* de projeto crítico que impacta diretamente a QoS para diferentes casos de uso do 5G. Por exemplo, *Ultra-Reliable and Low Latency Communications* (URLLC) requer comutações frequentes entre DL e UL ou periodicidades mais curtas para minimizar o tempo de espera por reconhecimentos via *Hybrid Automatic Repeat Request* (HARQ) e concessões de escalonamento (*scheduling grants*), reduzindo, assim, a latência de ponta a ponta. De uma perspectiva energética, o padrão TDD impõe um ciclo de trabalho (*duty cycle*) de *hardware* à O-RU, afetando o consumo de energia.

III. SETUP EXPERIMENTAL & METODOLOGIA

O arranjo experimental para as medições compreende um sistema O-RAN 5G particionado em um servidor de borda e uma RU, conforme mostrado na Figura 3. O servidor de borda COTS é equipado com um processador Intel(R) Xeon(R) Gold 6433N, 256 GB de RAM e uma placa de rede Intel E810 de 4 portas 25GbE com suporte a protocolo *Precision Time Protocol* (PTP). Além de hospedar um core de rede *open-source* instalada em uma *Virtual Machine* (VM) Open5Gs, o servidor executa uma pilha de *software* comercial que integra os processos L1, CU e DU em uma solução unificada (*all-in-one*) todas instaladas no próprio servidor (*bare-metal*). A L1 é a camada física de protocolos no 5G e é responsável pelo processamento dos pacotes em banda base e pela transmissão e recepção efetivas de dados do usuário *Over-the-air* (OTA) entre a RAN e o *User Equipment* (UE). Conectada à placa de rede, está uma RU *indoor* Foxconn RPQN-7801, que transmite pacotes OTA para um Amarisoft UE *Simbox* o qual permite a variação do número da carga de usuários conectados à rede

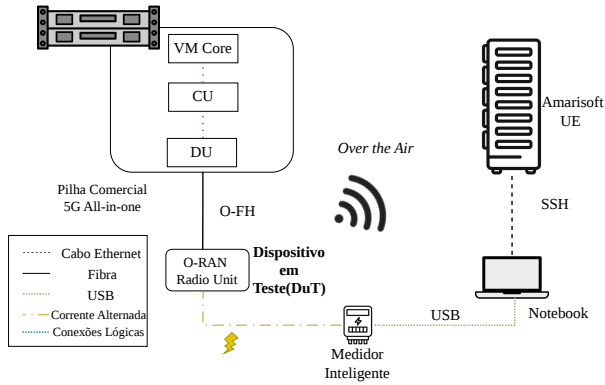


Fig. 3: Setup de Medição da Configuração 5G SA NR

5G e, adicionalmente, o perfil de tráfego de cada usuário. O consumo de energia é monitorado utilizando um módulo transdutor de energia de corrente alternada, que emprega um transformador de corrente não invasivo para a medição da corrente e fornece aquisição de dados por meio do protocolo Modbus-Remote Terminal Unit (RTU) sobre uma interface serial Transistor-Transistor Logic (TTL).

O setup 5G foi configurado utilizando os parâmetros definidos na Tabela I e uma estrutura de slots TDD variável. Para investigar o impacto do tráfego assimétrico, o slot TDD foi definido em um ciclo de cinco slots: um slot foi fixado como um slot especial não modificável enquanto os quatro slots restantes foram particionados entre *Downlink* e *Uplink*. Se s representa o número de slots alocados para o *Downlink* ($s \in \{1, 2, 3\}$), o número de slots UL é dado pelo complemento $4 - s$ no total. A coordenação desses slots é realizada por um Algoritmo Round-Robin (RR) que garante que os slots de comunicação disponíveis sejam distribuídos de forma equitativa entre todos os UEs ativos.

TABELA I: Parâmetros de Configuração da Rede 5G

Parâmetros	Valor
Arquitetura 5G	SA
Banda NR / Largura de Banda	n78 / 100 MHz
MCS NR (DL/UL)	19 / 10
Modo de Transmissão	2x2 MIMO
Esquema de Modulação	QAM64 / QAM64
Blocos de Recursos	273
SCS NR	30 kHz

A fim de emular cenários com alta carga de usuários, o número de UEs (N_{UE}) foi escalonado em 1, 4, 8, 16, 32 e 64 UEs. A carga de trabalho consistiu em cada UE transferir um buffer de 100 MBytes via (OTA) simultaneamente por meio da ferramenta *Iperf* via protocolo *Transmission Control Protocol* (TCP). Esta carga de trabalho foi projetada para emular um cenário de saturação de Downlink, típico de aplicações como streaming de alta resolução ou download de grandes arquivos em redes móveis com alta carga de usuários. Esse processo foi gerenciado por um script de automatização que é executado no core de rede Open5gs através de um laptop que inicia um número x de dispositivos móveis onde x é o número de sessões *Iperf* concorrentes dos UEs dentro do simulador Amarisoft.

O objetivo é que cada sessão *iperf* corresponda ao tráfego específico do UE, simulando um cenário de competição de recursos de dados. Para cada sessão, os tempos de transferência individuais foram registrados simultaneamente com o consumo de potência da RU medido em Watts (W). Para garantir a confiança estatística, cada cenário específico foi repetido 30 vezes. Após essas iterações, um vetor médio e sua respectiva variância foram calculados para a modelagem estatística.

Para avaliar mais a fundo o impacto energético, definimos uma métrica normalizada baseada no consumo de potência de base (*baseline*) do sistema, $P_{base} = 37 W$ em que este valor de potência se refere ao consumo da RU para um estado de *stand-by* (sem transação de dados porém com módulo de RF ligado), dada por:

$$\bar{P} = \frac{P_{med} - P_{base}}{P_{base}} \times 100, \quad (1)$$

onde P_{med} é a demanda de potência média absoluta medida. Nota-se que a métrica $\bar{P}$ foi escolhida para isolar o consumo dinâmico de potência associado aos difentes cenários de tráfego avaliados. Ao subtrair a potência de linha de base (P_{base}), desvinculamos o consumo de potência estático e constante das variações de potência induzidas pela atividade do sistema. Essa normalização fornece uma medida relativa do impacto energético, melhorando a comparabilidade entre diferentes condições de operação e enfatizando o custo energético marginal da solução proposta.

IV. AVALIAÇÃO DE PERFORMANCE

A avaliação experimental apresentada nesta seção investiga o *trade-off* crítico entre o consumo de potência e a QoS em redes O-RAN. A análise estuda o comportamento do sistema sob variações de (N_{UE}) variando de 1 a 64 e diferentes configurações de quadros TDD.

Com base na análise de dados, três estratégias foram exercitadas para o RRM:

- 1) **Prioridade de Downlink:** Otimizada para entrega de conteúdo que exige alta largura de banda, alocando 3 slots para *downlink* e 1 slot para *uplink*.
- 2) **Simétrica:** Projetada para tráfego bidirecional balanceado, fornecendo um número igual de slots de *uplink* e *downlink*.
- 3) **Prioridade de Uplink:** Adaptada para cenários de envio de grandes taxas de dados por parte do UE, alocando 1 slot para *downlink* e 3 slots para *uplink*.

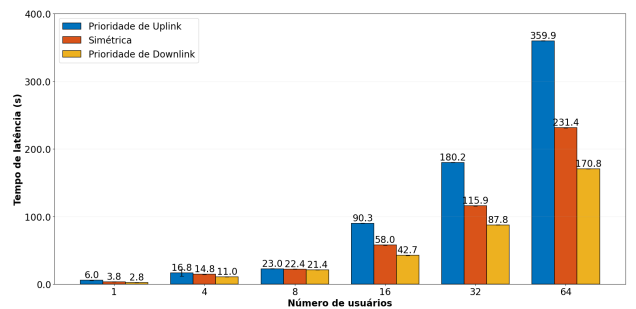


Fig. 4: Tempo de transferência para diferentes cargas de UE.

TABELA II: Análise Consolidada do Consumo de Potência: Potência Média (P_{med}) e Métrica Normalizada ($\bar{P}$) expressas em Média $\pm$ Desvio Padrão

N_{UE}	Prioridade de <i>Uplink</i>		Simétrica		Prioridade de <i>Downlink</i>	
	P_{med} (W)	$\bar{P}$ (%) (%)	P_{med} (W)	$\bar{P}$ (%) (%)	P_{med} (W)	$\bar{P}$ (%) (%)
1	40.29 $\pm$ 1.07	8.89 $\pm$ 2.89	40.79 $\pm$ 1.76	10.24 $\pm$ 4.76	40.90 $\pm$ 2.37	10.54 $\pm$ 6.41
4	41.37 $\pm$ 0.88	11.81 $\pm$ 2.38	42.50 $\pm$ 1.24	14.86 $\pm$ 3.35	43.16 $\pm$ 2.04	16.65 $\pm$ 5.51
8	41.13 $\pm$ 0.66	11.16 $\pm$ 1.78	42.62 $\pm$ 0.92	15.19 $\pm$ 2.49	43.34 $\pm$ 1.45	17.14 $\pm$ 3.92
16	41.15 $\pm$ 0.34	11.22 $\pm$ 0.92	42.49 $\pm$ 0.67	14.84 $\pm$ 1.81	43.47 $\pm$ 1.07	17.49 $\pm$ 2.89
32	41.33 $\pm$ 0.24	11.70 $\pm$ 0.65	42.68 $\pm$ 0.49	15.35 $\pm$ 1.32	43.44 $\pm$ 1.45	17.41 $\pm$ 3.92
64	41.32 $\pm$ 0.28	11.68 $\pm$ 0.76	42.66 $\pm$ 0.46	15.30 $\pm$ 1.24	44.00 $\pm$ 0.64	18.92 $\pm$ 1.73

A. Análise do Tempo de Transferência

Para avaliar o desempenho da QoS, a Fig. 4 apresenta o tempo de transferência do *buffer* em função do número de UEs ativos para diferentes alocação de *slots* TDD. Como podemos ver, o tempo de transferência aumenta à medida que N_{UE} aumenta. Isso ocorre porque há maior competição por recursos e o escalonador RR requer mais tempo para concluir um ciclo de alocação completo, impactando diretamente o tempo de transferência geral. Além disso, em regimes de baixa carga ($N_{UE} \leq 8$), todas as configurações TDD mantêm tempos de serviço semelhantes entre o mesmo número de usuários independente da estratégia adotada. No entanto, para valores acima de 8 UEs, o sistema entra em divergência: Em cenários de alta carga de usuários ($N_{UE} = 64$), sob a estratégia de Prioridade de *Uplink*, o sistema experimentou severa degradação de desempenho, registrando uma latência média de 359.9 s. Por outro lado, a estratégia de Prioridade de *Downlink* demonstrou maior resiliência, mantendo o tempo de transferência em 170.8 s, uma melhoria de tempo de mais de 50% em comparação com a configuração de Prioridade de *Uplink*.

B. Perfil de Consumo de Potência

A Tabela II apresenta os resultados consolidados de consumo de potência para diferentes cargas de UE e configurações de Quadro TDD. Como observado, a configuração do Quadro TDD é o fator dominante na demanda de energia quando comparado à carga do UE. Enquanto a potência absoluta P_{med} mostrou uma variação relativamente estreita de aproximadamente 4 W em todos os testes, $\bar{P}$ isolou efetivamente o componente dinâmico, revelando que a sobrecarga de energia associada ao tráfego de Prioridade de *Downlink* é significativamente maior do que a dos padrões Simétrico ou de Prioridade de *Uplink*. De fato, o cenário de Prioridade de *Uplink* provou ser o mais eficiente em termos de potência, com um impacto normalizado máximo ($\bar{P}$) de 11.70%. Por outro lado, o padrão de Prioridade de *Downlink* exibiu o maior consumo, atingindo um $\bar{P}$ de 18.92% em $N_{UE} = 64$. Isso ocorre porque o cenário de Prioridade de *Downlink* aloca mais *slots* para transmissão em *downlink*, o que incorre em um custo de energia mais alto devido ao aumento do processamento computacional e da atividade do módulo de RF.

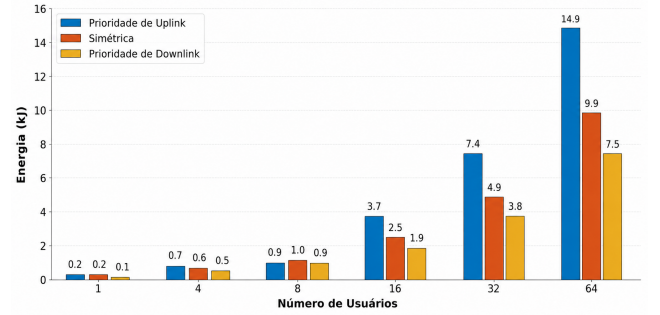


Fig. 5: Consumo total de energia (kJ) necessário para concluir a transferência do *buffer* em diferentes cargas de UE.

C. Análise do Consumo Total de Energia

Enquanto P_{med} fornece uma visão sobre a intensidade operacional instantânea, uma avaliação abrangente requer a análise da energia total gasta em quilojoules (kJ), que é uma função tanto de P_{med} quanto do tempo total de transferência (t). A Figura 5 ilustra o esforço total de energia exercido pelo sistema em várias cargas de N_{UE} .

Curiosamente, os resultados de energia apresentam uma tendência inversa em comparação com a análise de consumo de potência. Embora a configuração de Prioridade de *Uplink* tenha sido previamente identificada como a mais eficiente em termos de potência (menor $\bar{P}$), ela exibe o maior consumo total de energia, atingindo 14.9 kJ para 64 usuários. Por outro lado, a configuração de Prioridade de *Downlink*, apesar de sua maior demanda de potência instantânea, prova ser a mais eficiente em termos de energia para concluir a tarefa, exigindo apenas 7.5 kJ sob a mesma carga. A análise comparativa demonstra uma clara assimetria entre o custo de potência e o ganho em desempenho. Enquanto a estratégia de Prioridade de *Uplink* alcança uma pequena redução de potência instantânea ($\approx 6.5\%$ em alta carga), essa economia é ofuscada pela penalidade no QoS e por um custo total de energia que é quase o dobro. Além disso, à medida que o N_{UE} aumenta, essa lacuna de energia entre as configurações se alarga linearmente, sugerindo que a estratégia de Prioridade de *Uplink* é fundamentalmente ineficiente em cenários de alta carga de usuários ($N_{UE} = 64$) tanto de uma perspectiva de QoS quanto de energia total. Para redes eMBB congestionadas, as estratégias Simétrica ou

de Prioridade de *Downlink* oferecem o *trade-off* ideal para garantir tanto a disponibilidade do serviço quanto a eficiência energética real.

V. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho investigou o *trade-off* entre consumo de potência e QoS em redes com padrão TDD variando a carga de usuários. Avaliações experimentais das configurações de quadros com Prioridade de Uplink, Simétrica e Downlink, revelaram que, embora, a potência instantânea de energia apresente uma redução de aproximadamente 6,5%, a latência do serviço e o gasto total de energia aumentam consideravelmente sob cargas elevadas em cenários com Prioridade de Uplink. Esses resultados demonstram que a economia marginal de energia obtida com a priorização de slots de uplink não justifica as penalidades significativas na experiência do usuário e o aumento de quase o dobro no gasto total de energia (14.9 kJ vs. 7.5 kJ) em comparação com a configuração com prioridade de Downlink. Consequentemente, embora a prioridade de Uplink possa ser necessária para cenários específicos, como IoT massiva ou monitoramento, ela se mostra ineficiente para perfis de tráfego *Enhanced Mobile Broadband* (eMBB) dominados por Downlink. Trabalhos futuros devem investigar tráfego de diferentes perfis com predominância em uplink, misto UL/DL ou políticas de TDD adaptativo capazes de equilibrar dinamicamente essas compensações, com foco na implementação de soluções baseadas em IA e estratégias cooperativas de Gerenciamento de Recursos de Rádio (RRM) em múltiplas RUs para maximizar a eficiência energética e a disponibilidade do serviço em todo a rede.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio dado a este trabalho pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, pelo CNPq (Processo 311344/2025-9) e pelo MCTI-Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, com recursos financeiros do FUNTEL administrados pela FINEP, no âmbito do projeto ERA 6G - Evolução em Redes Abertas rumo ao 6G (Contrato 01.26.0141.00, Referência 2124/25).

REFERÊNCIAS

- [1] W. Azariah, F. A. Bimo, C.-W. Lin, R.-G. Cheng, N. Nikaein, and R. Jana, "A survey on open radio access networks: Challenges, research directions, and open source approaches," *Sensors*, vol. 24, no. 3, p. 1038, Feb. 2024. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.3390/s24031038>
- [2] M. Polese, L. Bonati, S. D'Oro, S. Basagni, and T. Melodia, "Understanding O-RAN: Architecture, interfaces, algorithms, security, and research challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 25, no. 2, pp. 1376–1411, 2023.
- [3] O-RAN Alliance, "O-RAN architecture description," O-RAN Alliance, Technical Specification O-RAN.WG1.OAD-R003-v11.00, 2024.
- [4] M. Uitto, O. Apilo, J. Koivisto, and N. Gupta, "Towards energy-aware video streaming in 5g/b5g – application perspective," in *2025 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit)*, 2025, pp. 452–457.
- [5] Intel Corporation, "A holistic study of power consumption and energy savings strategies for open vran systems," Intel Industry Solution Builders, Tech. Rep., 2023.
- [6] A. I. Abubakar, O. Onireti, Y. Sambo, L. Zhang, G. K. Ragesh, and M. Ali Imran, "Energy efficiency of open radio access network: A survey," in *2023 IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring)*, 2023, pp. 1–7.
- [7] F. H. C. Neto, J. V. B. Labres, W. V. F. Mauricio, M. B. d. Paiva, F. E. C. Chaves, P. R. B. d. Silva, and F. M. Abinader, "Energy efficiency in open radio access networks: Challenges and research perspectives," pp. 2–11, 2025.
- [8] G. Auer, V. Giannini, C. Desset, I. Godor, P. Skillermark, M. Olsson, M. Imran, D. Sabella, M. Gonzalez, O. Blume, and A. Fehske, "How much energy is needed to run a wireless network?" *IEEE Wireless Communications*, vol. 18, no. 5, pp. 40–49, Oct. 2011.
- [9] C. Centofanti, G. Venkateswarlu, J. Santos, R. R. Tella, A. Marotta, F. Graziosi, and K. Kondepudi, "An energy measurement framework for 5g ran using usrp and real-time monitoring," in *2024 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS)*. IEEE, Dec. 2024, pp. 1–5.
- [10] L. Bonati, S. D'Oro, M. Polese, S. Basagni, and T. Melodia, "Intelligence and learning in O-RAN for data-driven NextG cellular networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, no. 10, pp. 21–27, Oct. 2021.
- [11] X. Liang *et al.*, "Enhancing energy efficiency in o-ran through intelligent xapps deployment," in *2024 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE, 2024.
- [12] M. K. Maheshwari *et al.*, "Energy-efficient optimization in o-ran for intelligent iot systems," in *2025 Sixteenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*. IEEE, 2025, pp. 44–49.
- [13] J. Z. Correia, F. M. Abinader, and I. Aldaya, "Estimation of 5g core power consumption for open ran deployments," in *2025 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS)*. IEEE, Nov. 2025, pp. 1–6.
- [14] J. Gomez *et al.*, "Kairos: Energy-efficient radio unit control for o-ran via advanced sleep modes," in *2025 IEEE INFOCOM – IEEE Conference on Computer Communications*. IEEE, 2025.
- [15] M. Q. Usman, C. J. Sreenan, M. Dryjanski, and A. O'Driscoll, "Power modeling of the o-ran o-ru & application of advanced sleep modes for enhanced energy efficiency," in *2025 IEEE 22nd Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*. IEEE, Jan. 2025, pp. 1–8.
- [16] Z. Li, P. Maddala, N. K. Shankaranarayanan, I. Seskar, S. Puthenpura, A. Stancu, C. N. Alvarez, and G. Albrecht, "Energy efficiency testing and power modeling of o-ran radio units," in *2025 IEEE Future Networks World Forum (FNWF)*. IEEE, Nov. 2025, pp. 1–6.