

CONVERSORES CC-CC E SEU USO NA TELEFONIA

Gabriel Antonio da Silva Coelho¹, Frederico Silva Moreira¹

¹Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, Brasil
(gabriel.a.s.coelho@ufms.br)

Resumo: Os conversores CC-CC constituem elementos fundamentais na alimentação de sistemas de telefonia modernos, desde terminais móveis até estações rádio-base de quinta geração (5G). Este trabalho apresenta uma revisão geral dos principais tipos de conversores CC-CC (Buck, Boost, Buck-Boost e Flyback) e analisa suas aplicações e impactos na eficiência energética da telefonia, evidenciando as tendências tecnológicas para os próximos anos

Palavras-chave: Conversores CC-CC; Telefonia; Eletrônica de Potência; Eficiência Energética; Regulação de Tensão

INTRODUÇÃO

A telefonia moderna opera sobre uma infraestrutura elétrica de elevada complexidade, composta por extensos sistemas eletrônicos, nos quais a conversão e o condicionamento de energia elétrica em corrente contínua (CC) desempenham papel fundamental. Desde os primeiros sistemas de telefonia fixa, em que retificadores simples eram suficientes para alimentar os circuitos de linha, a evolução tecnológica do setor passou a exigir soluções cada vez mais sofisticadas para o fornecimento e controle da energia elétrica.

Atualmente, os sofisticados terminais móveis e as estações rádio-base (ERBs) de quinta geração (5G) demandam múltiplos níveis de tensão, com elevada estabilidade e eficiência. Nesse contexto, os conversores CC-CC consolidaram-se como componentes indispensáveis, sendo responsáveis por adequar os níveis de tensão às necessidades específicas dos diversos subsistemas eletrônicos presentes nas redes de telecomunicações.

Um conversor CC-CC é um circuito eletrônico de potência capaz de transformar um nível de tensão contínua em outro (superior, inferior ou de polaridade invertida) com rendimento energético muito superior ao dos reguladores lineares tradicionais, em que ocorre a dissipação da energia excedente em forma de calor (Mohan *et al.*, 2003). Em aplicações de telefonia, onde a autonomia de bateria, a densidade de potência e a confiabilidade são críticas, essa eficiência distingue os conversores chaveados de qualquer outra modalidade.

O mercado global de dispositivos móveis ultrapassou 6,8 bilhões de assinantes em 2023 (ITU, 2023), impulsionando a demanda por circuitos integrados de gerenciamento de energia que incorporam, em uma

única pastilha de silício, múltiplos estágios de conversão CC-CC.

Paralelamente, as ERBs 5G (Figura 1), que operam na faixa de potência de vários quilowatts, demandam conversores de alta eficiência para reduzir custos operacionais e emissões de CO₂ (Auer *et al.*, 2011).



Figura 1. Estações Rádio-base 5G.

MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa bibliográfica de natureza qualitativa e exploratória, complementada por análises analíticas e simulações computacionais, com o objetivo de revisar os fundamentos teóricos dos conversores CC-CC, identificar suas principais aplicações em sistemas de telefonia fixa e móvel, comparar o desempenho das principais topologias e discutir as tendências tecnológicas associadas às redes de quinta geração (5G) e à Internet das Coisas (IoT).

Para sistematizar a análise, adotou-se uma metodologia baseada em três etapas complementares: (i) revisão bibliográfica em bases científicas consolidadas, incluindo IEEE Xplore, Scopus e Web of Science, abrangendo publicações entre 2000 e 2024, com ênfase nos trabalhos mais recentes; (ii) análise de modelos analíticos em regime permanente para avaliação das características elétricas das principais topologias de conversores CC-CC; e (iii) observação e execução de simulações computacionais de circuitos representativos das aplicações identificadas na literatura.

Na etapa de revisão bibliográfica, foram consultados artigos científicos, livros técnicos, normas, relatórios de organismos internacionais e documentos de fabricantes, priorizando publicações relacionadas à eletrônica de potência aplicada às telecomunicações, arquiteturas de conversores CC-CC, sistemas de alimentação para equipamentos de telefonia e soluções energéticas para redes móveis de última geração. Os documentos selecionados foram analisados quanto aos princípios de funcionamento, classificação das topologias, faixas de potência, níveis de tensão, eficiência energética, densidade de potência, complexidade de controle e adequação às diferentes aplicações.

Os conversores foram classificados de acordo com sua função principal, contemplando topologias abaixadoras (buck), elevadoras (boost), abaixadoras-elevadoras (buck-boost), bem como configurações isoladas e não isoladas. A análise comparativa foi realizada com base nos parâmetros técnicos reportados na literatura e nos resultados obtidos pelos modelos e simulações, permitindo identificar vantagens, limitações e requisitos operacionais de cada configuração nos diferentes cenários de aplicação em sistemas de telecomunicações.

Os parâmetros de desempenho avaliados incluíram a eficiência energética (η), definida como a razão entre a potência entregue à carga e a potência consumida na entrada; a ondulação da tensão de saída ($\Delta V_s/V_s$); a resposta transitória a variações de carga; a densidade de potência (W/cm^3); e o custo relativo de implementação. Cada topologia foi analisada nos cenários de aplicação mais representativos da telefonia, incluindo equipamentos de rede fixa, estações rádio-base (ERBs), dispositivos móveis e sensores conectados.

Os parâmetros empregados nos modelos e simulações foram definidos com base em dados amplamente reportados na literatura técnica e em especificações publicadas por fabricantes líderes de circuitos integrados de gerenciamento de energia, como Texas Instruments, Analog Devices e STMicroelectronics. As frequências de chaveamento

consideradas variaram entre 200 kHz e 3 MHz, faixa típica dos modernos conversores CC-CC utilizados em aplicações móveis e sistemas avançados de telecomunicações.

Por fim, os resultados obtidos foram sintetizados e discutidos à luz das tendências tecnológicas atuais, incluindo a miniaturização dos sistemas eletrônicos, o aumento da densidade de potência, a integração de múltiplos estágios de conversão em um único circuito integrado e a crescente utilização de semicondutores de banda larga proibida (Wide Bandgap), como carbeto de silício (SiC) e nitreto de gálio (GaN), em aplicações associadas ao 5G e à IoT.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tipos de Conversores CC-CC

Os conversores CC-CC são classificados em não-isolados e isolados, conforme a presença ou ausência de isolamento galvânico entre entrada e saída. Nas aplicações de telefonia, ambas as classes são encontradas, dependendo dos requisitos de segurança e da severidade do ambiente de aplicação (Hart, 2011).

Conversor Buck (Redutor): Opera rebaixando a tensão de saída em relação à entrada. A razão cíclica D , definida como a fração do período em que a chave semicondutora permanece conduzindo, determina a tensão de saída segundo a relação $V_s = D \cdot V_e$, onde V_e é a tensão de entrada e V_s é a tensão de saída (Rashid, 2011). Amplamente empregado no carregamento de baterias de lítio em *smartphones*, onde o padrão USB-PD entrega 20 V ao carregador e o conversor Buck (Figura 2) reduz esse valor para 4,2 V a 4,4 V, adequado para as células de íon-lítio (Texas Instruments, 2023).

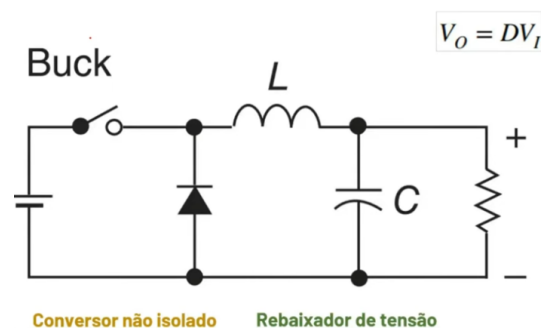


Figura 2. Conversor Buck (reductor).

Conversor Boost (Elevador): Eleva a tensão de saída acima da entrada. A equação fundamental é $V_s = V_e / (1 - D)$. Em terminais móveis, conversores Boost (Figura 3) são usados nos amplificadores de potência de rádio-frequência (PA), que necessitam de tensões de alimentação superiores à da bateria (3,0 V a 4,2 V) para operar com máxima eficiência e potência de saída (Cripps, 2006).

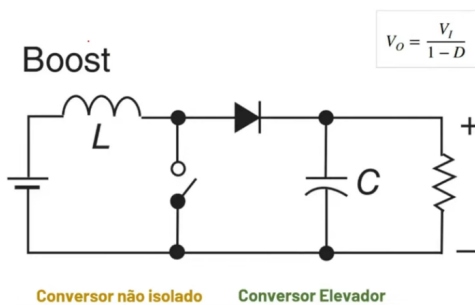


Figura 3. Conversor Boost (elevador).

Conversor Buck-Boost: Capaz de operar como redutor ou elevador conforme o ciclo de trabalho, com polaridade invertida na saída, conforme exemplificado na Figura 4. A relação de conversão é $V_{-s} = -(D / (1 - D)) \cdot V_{-e}$. Usado em equipamentos que precisam manter saída estável durante toda a descarga da bateria, cuja tensão oscila entre 4,2 V (carga total) e 2,7 V (carga esgotada). Dispositivos IoT de telecomunicações, como sensores sem fio alimentados por pilhas, utilizam bastante essa topologia.

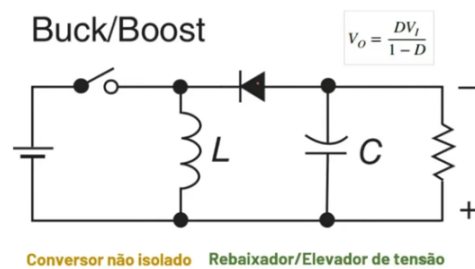


Figura 4. Conversor Buck/Boost.

Conversor Flyback: Derivado da topologia Buck-Boost com a adição de um transformador que fornece isolamento galvânico e permite múltiplas saídas. A relação de tensões é $V_{-s} = (n_s / n_p) \cdot D / (1 - D) \cdot V_{-e}$, onde n_s e n_p são os números de espiras secundárias e primárias, respectivamente. Presente em carregadores de smartphones e nas fontes internas de ERBs, onde o isolamento é exigido por normas de segurança elétrica como a IEC 60950-1 (IEC, 2005).

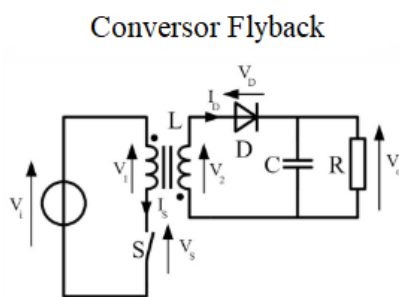


Figura 5. Conversor Flyback.

Conversor SEPIC: O Single-Ended Primary-Inductor Converter (SEPIC), ilustrado na Figura 6, permite saída igual, superior ou inferior à entrada com polaridade não-invertida, sendo preferido quando a continuidade de polaridade é crítica. Aplica-se em sistemas de telefonia solar e unidades de *backup* de baterias em centrais telefônicas.

Conversor SEPIC

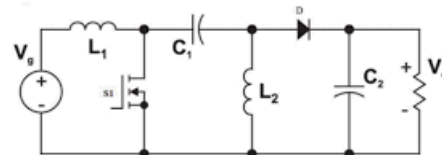


Figura 6. Conversor SEPIC.

Conversor Ćuk: Ilustrado na Figura 7, ele combina as características do Buck-Boost com ondulação de corrente de entrada e saída reduzidas, o que o torna atraente em aplicações sensíveis a interferências eletromagnéticas, como circuitos de recepção de sinais, presentes em equipamentos de telecomunicações.

Conversor Ćuk

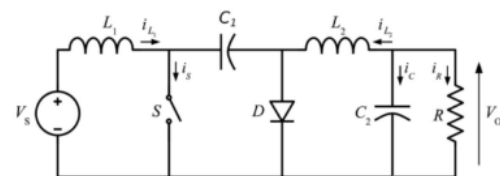


Figura 7. Conversor Ćuk.

Aplicações em Terminais Móveis

O smartphone atualmente integra, em média, seis estágios distintos de conversão CC-CC (Rêgo, 2025). A Figura 8 ilustra esquematicamente a distribuição desses estágios no subsistema de alimentação de um terminal móvel de alto desempenho, a qual mostra a aplicação de topologias Buck, Boost e Buck-Boost no mesmo dispositivo.

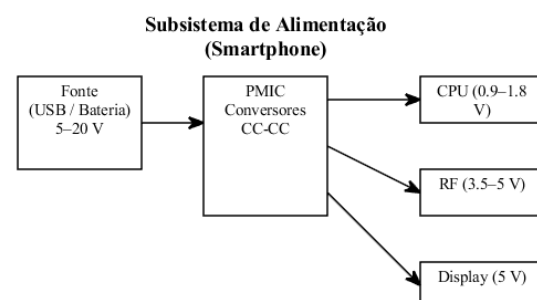


Figura 8. Subsistema de alimentação de smartphone com múltiplos estágios de conversão CC-CC.

O PMIC (*Power Management Integrated Circuit*) é o circuito integrado responsável por reunir esses estágios de conversão em um único encapsulamento de dimensões reduzidas. Fabricantes como Qualcomm, Dialog Semiconductor e MediaTek desenvolvem PMICs capazes de atingir eficiências de até 97% em conversores Buck internos operando a frequências da ordem de 3 MHz (Qualcomm, 2022). Esse desempenho evidencia o elevado grau de otimização alcançado pelos modernos sistemas de gerenciamento de energia.

Além da elevada eficiência, a operação em altas frequências de chaveamento possibilita a utilização de filtros de saída significativamente mais compactos, contribuindo para a redução das dimensões do sistema sem comprometer a qualidade da energia fornecida. Nessas aplicações, a ondulação da tensão de saída deve permanecer inferior a 20 mV pico a pico, de modo a evitar interferências e degradação do desempenho dos circuitos analógicos de radiofrequência.

Uma das aplicações mais críticas dos conversores CC-CC em dispositivos móveis é a alimentação do amplificador de potência (PA) de radiofrequência, responsável por uma parcela significativa do consumo energético do sistema, podendo representar cerca de 60% da potência consumida pelo módulo de rádio em condições de plena carga.

Nesse contexto, conversores Boost empregados em técnicas de Envelope Tracking (ET) ajustam dinamicamente a tensão de alimentação do PA em sincronismo com a envoltória do sinal de radiofrequência. Essa estratégia permite reduzir as perdas de potência associadas à amplificação do sinal, proporcionando economias de energia que podem atingir 30% quando comparadas aos sistemas convencionais de alimentação com tensão constante em redes LTE.

Aplicações em Estações Rádio-Base 4G/5G

As ERBs 4G e 5G constituem, em termos de potência, o segmento mais exigente da telefonia celular. Uma ERB 5G de médio porte consome entre 3 kW e 6 kW em plena operação. A cadeia de alimentação típica envolve: (i) retificação da rede CA (220 V ou 48 V CC de barramento), (ii) conversor CC-CC de entrada para isolamento e pré-regulação, (iii) conversores Buck intermediários para níveis de tensão de processamento digital (0,9 V, 1,0 V, 1,8 V) e (iv) reguladores lineares de baixo ruído para estágios analógicos críticos.

No contexto 5G massive MIMO, as unidades de rádio remota (RRU) integram dezenas de cadeias de amplificação. O aproveitamento de conversores LLC ressonantes (conversor CC-CC isolado ressonante do tipo LLC, com chaveamento em tensão nula (ZVS))

para alimentar os PA's de 5G tem demonstrado eficiências superiores a 96% em condições de potência nominal, reduzindo significativamente a necessidade de resfriamento ativo (Xu *et al.*, 2022). A economia de energia em escala de rede móvel nacional pode representar reduções de milhões de toneladas de CO₂ ao ano.

Tabela 1. Comparação das topologias de conversores CC-CC em aplicações de telefonia.

Topologia	Fórmula do Ganho	Isolamento	$\eta(\%)$	Aplicação
Buck	D	Não	92–97	PMIC, carregadores USB-PD
Boost	$1/(1-D)$	Não	88–95	PA com ET, NFC
Buck-Boost	$-D/(1-D)$	Não	85–93	IoT, bat. descarregando
Flyback	$n \cdot D/(1-D)$	Sim	80–90	Adaptadores, ERB PSU
LLC Res.	Variável	Sim	94–98	ERBs 5G, centrais DSLAM
SEPIC	$D/(1-D)$	Não	86–92	Solar telecom, UPS

Aplicações em Telefonia Fixa e Infraestrutura IP

A telefonia fixa, apesar de ter diminuído o número de assinantes no mundo, mantém papel crítico em ambientes corporativos e na *backhaul* de redes móveis. Modems ADSL/VDSL e equipamentos ONU (*Optical Network Unit*) de redes PON (*Passive Optical Network*) operam com barramento de 12 V ou 48 V CC e requerem conversão interna para alimentação dos processadores SoC (*System-on-Chip*) em níveis de 1,0 V, 1,2 V e 3,3 V, via conversores Buck multifase que atingem eficiências de 94–96% (Anand *et al.*, 2013).

Centrais telefônicas privadas (PABX) e equipamentos VoIP de alta disponibilidade demandam fontes de alimentação com entrada de ampla faixa (90 V–264 V CA), isolamento galvânico e saídas múltiplas reguladas. Nestas aplicações, o conversor com fator de correção de fator de potência (PFC) opera em estágio Boost elevando a tensão do barramento para 400 V CC, seguido de um estágio LLC ressonante isolado que converte para 48 V CC, do qual partem Buck síncronos multifase para os níveis digitais internos.

Análise de Eficiência e Comparação

Os resultados reportados na literatura técnica e em simulações disponibilizadas por fabricantes,

plataformas especializadas e comunidades técnicas na internet mostraram boa concordância com os valores teóricos esperados para as diferentes topologias analisadas. Adicionalmente, foi realizada a simulação de um conversor Buck, cujos resultados são apresentados na Figura 9.

Utilizando MOSFETs de GaN (nitreto de gálio) operando a 3 MHz, o conversor Buck apresentou eficiência máxima de 96,8% para uma condição de carga correspondente a 50% da potência nominal, enquanto a configuração equivalente empregando MOSFETs convencionais de silício atingiu 92,1%. Embora essa diferença de eficiência pareça relativamente pequena em termos percentuais, ela corresponde a uma redução de aproximadamente 54% nas perdas de conversão.

Em um PMIC processando 5 W, essa melhoria representou cerca de 190 mW a menos de potência dissipada na forma de calor, reduzindo o estresse térmico dos componentes eletrônicos. Como resultado, espera-se um impacto positivo na confiabilidade operacional, na vida útil do dispositivo e na autonomia da bateria.

A ondulação de tensão de saída (ΔV_s) média é cerca de 8 mV pico a pico para o Buck a 3 MHz com indutor de 1 μ H e capacitor de saída de 22 μ F (MLCC Cerâmico X5R), compatível com os requisitos da norma JEDEC JESD79F para alimentação de memórias LPDDR5.

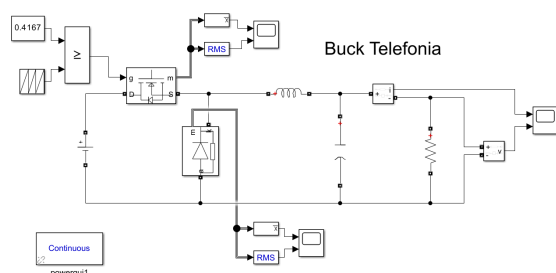


Figura 9. Imagem da Simulação de um conversor Buck em um app de simulação de circuitos.

Para o Flyback em modo de condução descontínua (DCM), a ondulação foi de 45 mV a saída de 5 V/2 A, dentro do especificado pelo padrão USB-PD.

A resposta transitória a degraus de carga entre 10% e 90% da carga nominal revelou que conversores dotados de malha de controle em modo corrente de pico, associada à compensação do tipo III, são capazes de restabelecer a tensão de saída em menos de 15 μ s. Esse desempenho atende aos requisitos dos processadores de aplicações móveis, que normalmente exigem desvios transitórios inferiores a ± 50 mV.

Por sua vez, conversores Boost empregados em técnicas de *Envelope Tracking* podem apresentar tempos de resposta da ordem de 500 ns, valor compatível com as exigências dinâmicas de sinais *LTE-Advanced* (LTE-A) com larguras de banda de até 40 MHz.

Tendências: GaN, SiC e Integração Monolítica

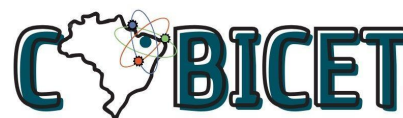
A substituição do silício por semicondutores de banda proibida larga (*Wide Bandgap* — WBG), especialmente o GaN e o Carbeto de Silício (SiC), representa a principal força capaz de promover a modernização dos conversores CC-CC para telefonia. O GaN exibe resistência de condução específica ($R_{DS(on)}$) cerca de dez vezes menor que o MOSFET de Si equivalente e cargas de gate significativamente menores, viabilizando o chaveamento acima de 10 MHz sem perda expressiva de eficiência (Lidow *et al.*, 2019).

No contexto 5G, a transição para arquiteturas Open RAN (O-RAN) distribuídas implica em unidades de hardware menores e mais eficientes. Conversores CC-CC baseados em GaN-on-Si integrados como módulos BGA de alta densidade de potência (>200 W/cm²) já estão sendo qualificados para ERBs, com eficiências reportadas superiores a 97% a 1 MHz e saída de 48 V (*Efficient Power Conversion*, 2023). Essa densidade permite eliminar sistemas de resfriamento ativo de alto custo e baixa confiabilidade.

A integração conjunta de conversores CC-CC, indutores e capacitores em um único chip, denominada *fully integrated power converter* (FIPC), encontra-se em fase de maturação. Pesquisas conduzidas no MIT e no IMEC demonstraram conversores Buck totalmente integrados em tecnologia CMOS 65 nm atingindo eficiências de 87% e densidade de potência de 850 mW/mm², projetados para PMICs de próxima geração em terminais 6G (Wens e Steyaert, 2011). A redução de componentes externos possibilitará maior confiabilidade e menor custo de montagem dos dispositivos finais.

Energia Verde e Sustentabilidade em Telecom

O setor de telecomunicações responde por aproximadamente 2% do consumo mundial de energia elétrica (IEA, 2023), parcela que tende a crescer com a expansão do 5G e da IoT. Conversores CC-CC de alta eficiência são parte essencial da estratégia de descarbonização das operadoras. A tecnologia de conversão por energia solar em sistemas de telecomunicações *off-grid*, por exemplo, combina painel fotovoltaico, conversor MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) baseado em topologia Boost e banco de baterias, sendo essencial em zonas rurais e remotas ainda não atendidas por



energia elétrica convencional (Buso e Mattavelli, 2015).

No Brasil, o programa Conectividade Rural da ANATEL prevê a instalação de ERBs em localidades com menos de 600 habitantes, muitas fora da rede elétrica. Nesses cenários, a eficiência do conversor CC-CC do sistema solar-bateria-rádio é determinante para a autonomia da estação, pois cada ponto percentual de ganho em eficiência de conversão reduz o tamanho do banco de baterias e do painel fotovoltaico necessários, diminuindo investimento e pegada de carbono (ANATEL, 2025).

CONCLUSÃO

Este trabalho demonstrou que os conversores CC-CC constituem elementos fundamentais em todas as camadas dos sistemas modernos de telecomunicações, desde os PMICs integrados em smartphones até as fontes de alimentação de estações rádio-base (ERBs) 5G, incluindo ainda os sistemas de armazenamento de energia e geração renovável empregados em ambientes isolados da rede elétrica (*off-grid*).

A diversidade de topologias disponíveis, como Buck, Boost, Buck-Boost, Flyback, LLC ressonante e SEPIC, oferece aos projetistas um amplo conjunto de soluções para atender, simultaneamente, aos requisitos de elevada eficiência energética, reduzido volume físico, alta densidade de potência e robustez operacional.

A simulação e a revisão da literatura evidenciaram que a adoção de semicondutores de banda larga proibida (*Wide Bandgap* – WBG), em particular os dispositivos baseados em nitreto de gálio (GaN), possibilita que os conversores CC-CC atinjam eficiências na faixa de 97% a 98%, além de operarem em frequências de chaveamento da ordem de megahertz. Essas características favorecem a redução das dimensões dos circuitos e contribuem para a miniaturização requerida pelo ecossistema 5G.

Adicionalmente, a evolução da integração monolítica promete reduzir significativamente a quantidade de componentes passivos externos, permitindo a incorporação de estágios completos de gerenciamento de energia no mesmo sistema integrado que abriga o System-on-Chip (SoC) principal.

Do ponto de vista ambiental, a melhoria contínua da eficiência dos conversores CC-CC empregados em sistemas de telecomunicações transcende os aspectos econômicos e operacionais, contribuindo também para a redução do consumo de energia elétrica e das emissões associadas à sua geração. Dessa forma, o aumento da eficiência energética configura-se como um importante instrumento para a mitigação dos

impactos ambientais decorrentes da expansão das infraestruturas de telecomunicações.

Considera-se, portanto, que o desenvolvimento de conversores CC-CC mais eficientes, compactos e integrados permanecerá como um dos principais vetores de inovação da eletrônica de potência aplicada às telecomunicações nas próximas décadas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino, Ciência e Tecnologia do Estado de Mato Grosso do Sul (FUNDECT) pelo suporte financeiro às pesquisas anteriores relacionadas à sensorização de sistemas, e a uma pesquisa atual que faço relacionada à conversores de eletrônica de potência aplicados em eletropostos.

REFERÊNCIAS

- ANATEL. Consulta Pública Nº 25. Agência Nacional de Telecomunicações, Brasília, 2025. Disponível em: <https://apps.anatel.gov.br/ParticipaAnatel/VisualizarTextoConsulta.aspx?ConsultaId=2348&TelaDeOrigem=3>. Acesso em: 10/06/2026.
- ANAND, Sandeep; FERNANDES, Bailão G.; GUERRERO, José. *Distributed Control to Ensure Proportional Load Sharing and Improve Voltage Regulation in Low-Voltage DC Microgrids*. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 28, no. 4, pp. 1900-1913, April, 2013. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6287047>. Acesso em: 01/06/2026.
- AUER, G.; GIANNINI, V.; DESSET, C.; GÓDOR, I.; SKILLERMARK, P.; OLSSON, M.; IMRAN, M. A.; SABELLA, D.; GONZALEZ, M. J.; BLUME, O.; FEHSKE, A. How much energy is needed to run a wireless network? IEEE Wireless Communications, v. 18, n. 5, p. 40–49, out., 2011. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6056691>. Acesso em: 15/05/2026.
- BUSO, Simone; MATTAVELLI, Paolo. *Digital Control in Power Electronics*. 2. ed. San Rafael, CA: Morgan & Claypool Publishers, 2015. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-02499-3>. Acesso em: 21/04/2026.
- CRIPPS, Steve C. *RF Power Amplifiers for Wireless Communications*. 2. ed. Norwood, MA: Artech House, 2006.
- EFFICIENT POWER CONVERSION. *EPC2218: 100 V, 231 A Enhancement-Mode GaN Power Transistor*. EPC Corp., El Segundo, CA, 2023.



- Disponível em:
<https://epc-co.com/epc/products/gan-fets-and-ics/epc2218>. Acesso em: 17/05/2026.
- HART, D. W. *Power Electronics*. McGraw-Hill, New York, 2011.
- IEA. *Data Centres and Data Transmission Networks*. Paris: IEA (International Energy Agency), 2023. Disponível em:
<https://www.iea.org/energy-system/digitalisation/data-centres-and-data-transmission-networks>. Acesso em: 14/05/2026.
- IEC. *IEC 60950-1: Information technology equipment - Safety - Part 1: General requirements*. 2. ed. Geneva: IEC (International Electrotechnical Commission), 2005. Disponível em:
<https://www.iecee.org/certification/iec-standards/iec-60950-12005>. Acesso em: 09/05/2026.
- ITU. *Measuring Digital Development: Facts and Figures 2023*. Geneva: International Telecommunication Union, 2023. Disponível em:
<https://www.itu.int/itu-d/reports/statistics/facts-figures-2023/>. Acesso em: 24/04/2026.
- LIDOW, A. et al. *GaN Transistors for Efficient Power Conversion*. 3. ed. Wiley, Chichester, 2019.
- MIDDLEBROOK, R. D.; CUK, S. *A general unified approach to modelling switching-converter power stages*. In: IEEE PESC, Cleveland. Proceedings... IEEE, p. 18–34, 1976. Disponível em:
<https://authors.library.caltech.edu/records/eyy0t-at60>. Acesso em: 02/05/2026.
- MOHAN, N.; UNDELAND, T. M.; ROBBINS, W. P. *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003.
- QUALCOMM. *QC 5.0 Power Management Architecture*. Qualcomm Technologies Inc., San Diego, 2022. Disponível em:
<https://qualcomm.com>. Acesso em: mai. 2026.
- RASHID, M. H. *Power Electronics Handbook: Devices, Circuits and Applications*. 3. ed. Elsevier, Burlington, 2011.
- RÊGO, Vinícius Vasconcelos do. *Carregador de baterias usando energia de um sistema bio-eletromecânico*. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2025. Disponível em:
https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/81784/3/2025_tcc_vvrego.pdf. Acesso em: 18/04/2026.
- TEXAS INSTRUMENTS. *LMQ61460-Q1 36-V Automotive Buck Converter Datasheet*. Texas Instruments, Dallas, 2023. Disponível em:
<https://ti.com>. Acesso em: mai. 2026.
- WENS, Mike; STEYAERT, Michiel. *Design and Implementation of Fully-Integrated Inductive DC-DC Converters in Standard CMOS*. Springer, Dordrecht, 2011. Disponível em:
<https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-007-1436-6>. Acesso em: 28/04/2026.
- XU, Xiaozhi; GUAN, Yueshi; WANG, Yijie; XU, Dianguo. *A Single-stage LLC Resonant GaN-based DC-DC Converter with Switched Capacitor*. 25th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Chiang Mai, Thailand, 2022. Disponível em:
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9982972>. Acesso em: 29/05/2026.