



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS - UFAL
CAMPUS DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ATHIRSON CONRADO DE OLIVEIRA SILVA

SISTEMA DE ARMAZENAMENTO INTELIGENTE COM ESTRATÉGIA ZERO GRID
PARA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA

RIO LARGO -
AL 2026

ATHIRSON CONRADO DE OLIVEIRA SILVA

**SISTEMA DE ARMAZENAMENTO INTELIGENTE COM ESTRATÉGIA ZERO GRID
PARA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA**

Artigo Científico apresentado ao Colegiado do
Curso de Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Alagoas como requisito para
obtenção da nota final do Trabalho de
Conclusão de Curso (TCC).

Orientadora: Prof. Drº. Leonardo Faustino
Lacerda de Souza

**RIO LARGO –
AL 2026**

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Campus de Engenharias Ciências Agrárias
Bibliotecário Responsável: Stefano João dos Santos

S586s Silva, Athirson Conrado de Oliveira

Sistema de armazenamento inteligente com estratégia zero grid para geração distribuída fotovoltaica . – Rio Largo - Al, 2026.

25 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Alagoas, Campus Ceca – Rio largo, 2026.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Faustino Lacerda de Souza

1 Buck intercalado; Geração distribuída; Zero Grid

CDU: 621.311

FOLHA DE APROVAÇÃO

ATHIRSON CONRADO DE OLIVEIRA SILVA

SISTEMA DE ARMAZENAMENTO INTELIGENTE COM ESTRATÉGIA ZERO GRID PARA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de
Alagoas, como requisito parcial para a
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica.

Aprovado em 09/06/2026

Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente
 **LEONARDO FAUSTINO LACERDA DE SOUZA**
Data: 12/06/2026 09:04:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Drº. Leonardo Faustino Lacerda de Souza, (Orientador)
Universidade Federal de Alagoas

Documento assinado digitalmente
 **ALLAN DAVID DA COSTA SILVA**
Data: 10/06/2026 17:31:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. MSc. Allan David Silva da Costa
Universidade Federal de Alagoas

Documento assinado digitalmente
 **THAMYRIS DA SILVA EVANGELISTA**
Data: 10/06/2026 17:25:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Drª. Thamyris da Silva Evangelista
Universidade Federal de Alagoas

SISTEMA DE ARMAZENAMENTO INTELIGENTE COM ESTRATÉGIA ZERO GRID PARA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA

DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT STORAGE SYSTEM WITH ZERO GRID STRATEGY TO MITIGATE THE IMPACTS OF PHOTOVOLTAIC DG

Athirson Conrado de Oliveira Silva*
Leonardo Faustino Lacerda de Souza**

RESUMO

Este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema de armazenamento de energia inteligente para mitigar os impactos negativos da Geração Distribuída fotovoltaica nas redes elétricas, como a inversão do fluxo de potência e o aumento indesejado de tensão. Para isso, o estudo utiliza uma estratégia de controle chamada *Zero-Grid*, que prioriza o armazenamento do excedente de energia em baterias em vez de injetá-lo na rede da concessionária. A arquitetura do sistema baseia-se num carregador composto por um retificador que garante alta eficiência e correção do fator de potência na interface com a rede, conectado a um conversor *Buck* Intercalado, responsável por gerenciar o carregamento de um banco de baterias. O gerenciamento de energia é realizado por meio de malhas de controles que monitoram a tensão do barramento e a corrente de carga, garantindo que o sistema residencial apenas consuma energia da rede ou opere em regime de autoconsumo. Os resultados das simulações demonstram que o dispositivo responde de forma dinâmica às variações de irradiação solar, mantendo a estabilidade da tensão e atendendo aos rigorosos limites de distorção harmônica recomendados pela norma IEC 61000-3-2. Concluiu-se que a solução é escalável e eficaz para atualizar sistemas fotovoltaicos on-grid já instalados, dotando-os de capacidade de gerenciamento ativo e auxiliando a resiliência do sistema elétrico.

Palavras-chave: Buck Intercalado, Geração Distribuída, *Zero-grid*.

ABSTRACT

This work proposes the development of a smart energy storage system to mitigate the negative impacts of photovoltaic Distributed Generation on power grids, such as power flow inversion and unwanted voltage increase. To do this, the study uses a control strategy called *Zero-Grid*, which prioritizes storing surplus energy in batteries instead of injecting it into the utility grid. The system's architecture is based on a charger composed of a rectifier that ensures high efficiency and correction of the power factor in the interface with the grid, connected to an Interleaved Buck converter, responsible for managing the charging of a battery bank. Energy management is carried out through control loops that monitor the DC bus voltage and load current, ensuring that the residential system only consumes energy from the grid or operates in a self-consumption regime. The results of the simulations demonstrate that the device responds dynamically to variations in solar irradiation, maintaining voltage stability and meeting the strict harmonic distortion limits imposed by the IEC 61000-3-2 standard. It was concluded that the solution is scalable and effective to upgrade already installed on-grid photovoltaic systems, providing them with active management capacity and improving the resilience of the electrical system.

Keywords: Interleaved Buck, Distributed Generation, *Zero-grid*.

Data de Submissão: 19/05/2026.

Data de Aprovação: 09/06/2026.

*Aluno da Universidade Federal de Alagoas, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, Engenharia Elétrica –
athirson.silva@ceca.ufal.br

**Prof. Dr. da Universidade Federal de Alagoas, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, Engenharia Elétrica -
leonardo.souza@ceca.ufal.br

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, muitas mudanças ocorreram no setor elétrico para melhorar a eficiência energética e a sustentabilidade ambiental dos segmentos de geração, transporte e uso final, envolvendo a necessidade de atualizar e aprimorar as redes elétricas. A energia elétrica gerada no próprio local de consumo, a Geração Distribuída (GD), teve um grande impacto nas redes de transmissão e distribuição, em termos de fluxos de eletricidade e sistemas de proteção (VIEIRA E BARBOSA, 2023).

Quando uma grande quantidade de GD variável é integrada a sistemas elétricos tradicionais, o impacto na confiabilidade e resiliência do sistema elétrico pode ser significativo. É sabido que fenômenos caóticos nas redes de distribuição existentes ocorrem quando a penetração de GD atinge um nível alto em comparação com a energia líquida, causando congestionamento na rede, comprometendo a qualidade da energia por distúrbios de tensão e frequência e causando restrições de geração (do inglês, *curtailment*) (ARBOLEYA, *et al.*, 2015).

A principal fonte de energia para a GD é a energia solar. À medida que a integração fotovoltaica na matriz elétrica aumenta rapidamente, ela traz problemas em termos de operação dos sistemas de transmissão e distribuição. O comportamento natural da fonte solar faz com que a geração tenha um perfil flutuante. A rápida variação da potência fotovoltaica introduz uma flutuação de tensão ao longo do tempo de injeção de potência (SINGH, *et al.*, 2019). Na rede de distribuição uma potência elétrica reversa pode ser introduzida em cenários de alta geração, resultando num aumento das tensões dos barramentos e a perdas nos alimentadores (VEIGA, *et al.*, 2023).

Se a geração fotovoltaica for maior do que a carga a jusante do local, o fluxo de potência pode ser revertido em direção à subestação. Consequentemente, pode-se esperar um aumento de tensão ao longo do alimentador do sistema de distribuição como resultado do fluxo de potência reverso (SINGH, *et al.*, 2019).

Sistemas fotovoltaicos *on-grid* ou *grid-tie*, tem como características a necessidade de estar conectado com a rede de distribuição para sincronizar e injetar energia na mesma. Como podem injetar energia na rede, acabam gerando a possibilidade de poder aplicar créditos de energia com a utilização de medidores bidirecionais, configurando-se como um modelo de negócio interessante para consumidores residenciais e comerciais e que cresceu exponencialmente nos últimos anos no Brasil e no mundo.

Já o *zero-grid* é uma estratégia de controle na qual o sistema só injeta potência quando a carga está atendida e a bateria carregada. Para que essa alternativa seja utilizada, é necessário que o inversor tenha a capacidade de controlar a quantidade de energia injetada e que consiga receber a informação da quantidade de energia que está sendo consumida instantaneamente pelas cargas do local.

Além do inversor com capacidade de ajustar a sua geração e receber dados em alguns casos, é necessário um medidor inteligente que seja capaz de medir o consumo atual das cargas e enviar para o inversor e os equipamentos de proteção do sistema, ou um Gerente de Energia Inteligente que possa limitar a exportação de energia, monitorar o autoconsumo e controlar a potência reativa (SILVA, 2024).

A vantagem deste sistema é que, com a entrega otimizada de potência à rede, é possível mitigar efeitos danosos da inserção massiva de GD no sistema elétrico de potência, tais como inversão de fluxo e *curtailment*. Além disso, um sistema *Zero-Grid* dotado com baterias permite o fornecimento ininterrupto de energia ao consumidor, mesmo em momentos de falhas de fornecimento da rede de distribuição.

Neste artigo será estudado um conversor de potência capaz de controlar o armazenamento de energia num banco de baterias quando a geração de um sistema fotovoltaico exceder o autoconsumo. Objetiva-se projetar um carregador inteligente com potencial de escalabilidade, capaz de ser conectado a sistemas fotovoltaicos *on-grid* já instalados, dotando-os com a capacidade de controlar a injeção de energia na rede, proporcionando uma atualização dos mesmos. Será empregado um conversor *Buck* Intercalado (BI) (JAKOBSEN, *et al.*, 2008) (CHA, *et al.*, 2014) como topologia para

carregador de baterias, e um retificador com correção de fator de potência (BARBI, 2015) (MUSAVI, *et al.*, 2013).

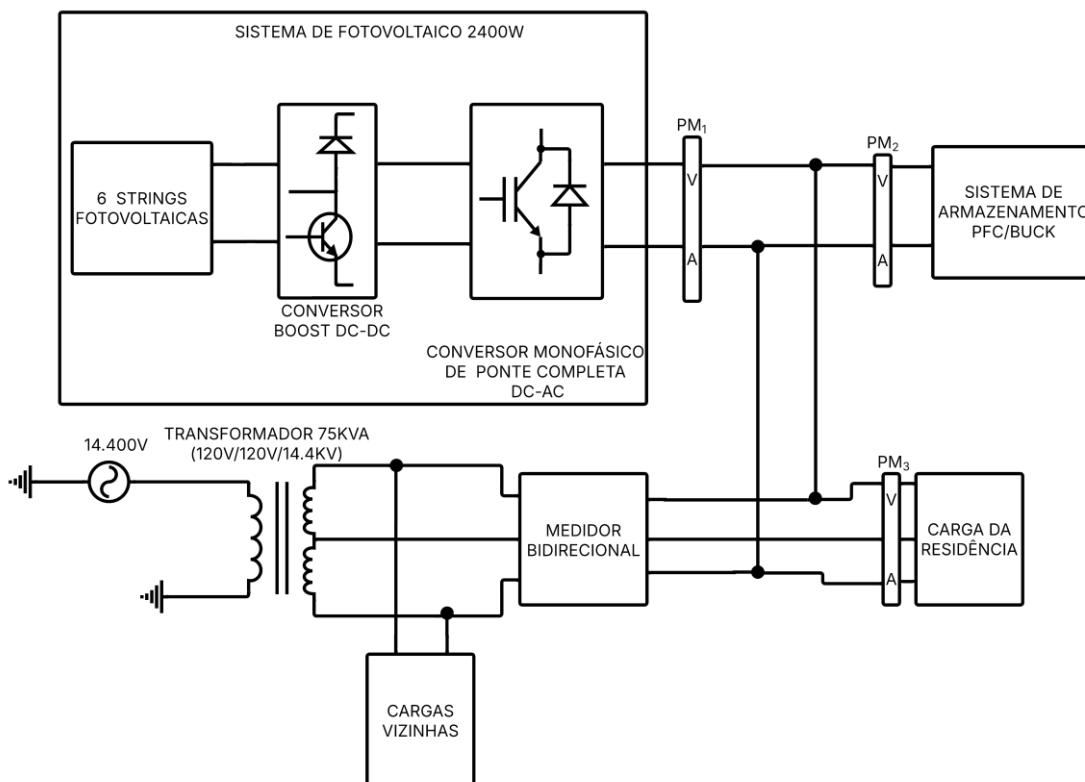
2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O sistema de armazenamento de energia desenvolvido neste estudo foi elaborado para um sistema fotovoltaico *on-grid*, conforme é mostrado na Fig. 1, desde que ajustado os parâmetros do circuito e do controlador desenvolvido. Neste estudo, as análises e discussões sobre questões de controle de injeção de energia na rede e armazenamento de energia na bateria foram realizadas considerando um sistema fotovoltaico composto por seis módulos em série, totalizando 2.400 W de potência instalada. Considerou-se para os cálculos um valor de irradiância solar variante entre 0 e 1000 W/m².

A energia produzida pelos módulos fotovoltaicas alimenta a residência e a rede elétrica usando um conversor em dois estágios: um regular de tensão e um inversor de ponte completa monofásico. Ambos os conversores são controlados por PWM com uma frequência de comutação de 100 kHz.

A rede elétrica de distribuição é modelada usando um transformador típico montado em poste e uma fonte CA ideal de 14,4 kVrms. O enrolamento secundário do transformador de 240 V é rosqueado no centro e o fio neutro central é aterrado. O inversor, a carga residencial de 500 W, bem como a carga dos vizinhos, são conectados ao enrolamento secundário de 240V.

Figura 1- Diagrama esquemático do sistema proposto.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O circuito de armazenamento de energia de bateria é conectado em paralelo ao circuito residencial, antes do medidor, e responde a injeção de energia no medidor bidirecional, limitando a quantidade de corrente injetada.

Os pontos de medição (PM) para controle e análise do sistema foram divididos em 4, em PM₁ foram feitas as medições de tensão e corrente do sistema fotovoltaico, em PM₂ foram feitas as medições do sistema de armazenamento e em PM₃, as medições da carga da residência, para as medições na rede elétrica, foi utilizado do medidor bidirecional (MB).

Para realizar a estrutura do carregador foi utilizado um conversor BI (JAKOBSEN, *et al.*, 2008) (CHA, *et al.*, 2014) conectado em série a um retificador com correção do fator de potência (do inglês, *PFC Semi-Bridgeless Boost*) (BARBI, 2015) (MUSAVI, *et al.*, 2013).

A bateria foi simulada usando as especificações de uma tecnologia da (UNIPOWER, 2023), mostrada na Tab.1, que tem aplicações em telecomunicações, energia renováveis, automação e controle.

Tabela1 - Especificações da bateria.

Tensão	48V
Capacidade	100Ah
Energia	5000Wh
Tensão de operação	42V - 54V
Tensão de carga	53,4V - 54,0V
Corrente máxima de recarga	100A
Corrente máx. de descarga contínua	100A
Tensão de corte	42V

Fonte: UNIPOWER (2023).

3 ESTRATÉGIA PARA O ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

O conversor BI foi utilizado para o carregamento da bateria devido a sua eficiência com alta potência de saída. Além disso, ao adicionar uma estratégia de controle apropriada, que exiba resiliência a incertezas, priorizando robustez e confiabilidade, uma ampla faixa de tensões de saída é alcançada (MAMMERI, *et al.*, 2025).

Um conversor BI é projetado para intercalar múltiplas fases do conversor *Buck* convencional em paralelo, essa topologia tem sido amplamente adotada para módulos reguladores de tensão que fornecem energia para a maioria das GPUs, CPUs e unidades de memória DDR (ZHANG, *et al.*, 2025). Além disso, são usados como eletrônica de potência em aplicações fotovoltaicas, como, por exemplo, na interface de controle de tensão de carregamento em baterias de veículos elétricos (KRITHIGA, *et al.*, 2022) (SOUZA, 2020).

Retificadores de diodo convencionais convertem uma fonte de alimentação CA em uma tensão CC, consumindo corrente pulsada da rede de alimentação, o que aumenta a interferência eletromagnética (EMI), reduz a eficiência energética e diminui a capacidade da rede de transportar energia elétrica.

Para a alimentação do circuito *Buck* foi usado o conversor Potência de Reforço Controlada (CBP) em vez de retificadores de diodo convencionais, pois os conversores CBP implementam a técnica de Correção do Fator de Potência (do inglês, *power factor correction* - PFC) (HUANG, *et al.*, 2025) que consiste em controlar a corrente CA demandada da rede de tal forma que esta seja senoidal e em fase com a tensão da rede de alimentação e, ao mesmo tempo, realizam a regulação da tensão CC em sua saída.

Basicamente, os conversores CBP se comportam como uma carga resistiva para a rede elétrica, melhorando a qualidade da energia e a eficiência geral, e ajudando a cumprir as regulações harmônicas.

Outro aspecto importante é que os conversores CBP também podem evitar o uso de filtros de potência ativos entre a rede elétrica e as cargas, o que produz uma solução mais econômica e adequada nesses tipos de aplicações.

A implementação de conversores CBP evita componentes reativos e harmônicos no fluxo de energia através do sistema elétrico reduzindo as perdas de energia nas linhas de transmissão e distribuição, melhorando, portanto, a qualidade da energia.

Em termos gerais, a melhoria da qualidade de energia por meio de conversores CBP, não apenas para correção de Fator de Potência, mas também para redução de EMI e da taxa de distorção harmônica da corrente (THDi), são questões que preocupam usuários, distribuidores e geradores (ORTIZ-CASTRILLÓN, *et al.*, 2021).

4 TOPOLOGIA PARA CARREGADOR DE BANCO DE BATERIAS

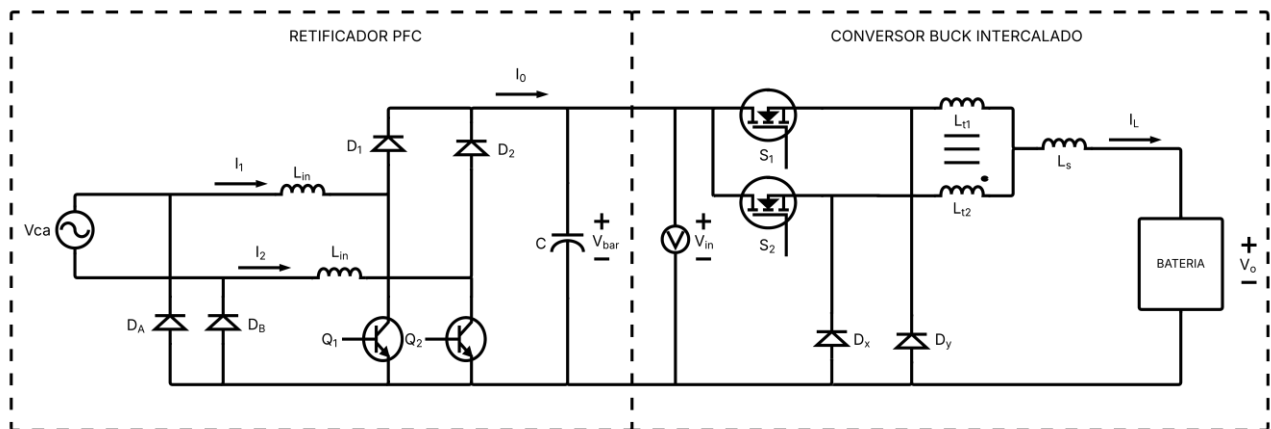
O carregador de banco de baterias proposto é dividido em dois subsistemas: um retificador de entrada com correção de fator de potência e um conversor BI, como é ilustrado na Fig. 2 (DACOL, 2019).

Por ser composta por dois conversores Boost, cada um operando em um semiciclo da tensão senoidal de entrada, essa topologia do retificador com correção do fator potência também é conhecida como retificador PFC *dual boost* (ORTIZ-CASTRILLÓN, *et al.*, 2021).

O conversor proposto quando comparado ao conversor Boost tradicional, elimina o retificador de entrada (FISCHER, *et al.*, 2017) (MUSAVI, *et al.*, 2013), reduzindo a quantidade de semicondutores no circuito e, consequentemente, as fontes de perdas por chaveamento e capacitâncias parasitas. A correção do fator de potência fica por conta da estratégia de controle, que fará com que a corrente de entrada esteja em fase com a tensão de entrada retificada (DACOL, 2019).

Uma vantagem deste conversor é que os interruptores Q_1 e Q_2 podem ser acionados com o mesmo sinal de controle. Esta topologia influencia os ruídos de modo comum (CM), que são ruídos que se propagam pelas linhas de fase e de neutro, e nos ruídos de modo diferencial (DM), que se propagam apenas pela linha de fase (ZEGHOUDI, *et al.*, 2021). Ela reduz o ruído CM, uma vez que os diodos D_A e D_B evitam o acoplamento entre o aterramento e a fonte de alimentação. No entanto, o ruído DM e a ondulação de corrente podem aumentar, uma vez que apenas um indutor opera em cada semiciclo.

Figura 2 - Topologia do retificador de entrada com correção de fator de potência (PFC *Semi-Bridgeless Boost*).



Fonte: DACOL (2019).

Em comparação com a topologia convencional com uma ponte retificadora, este conversor tem menos ondulação de corrente e, consequentemente, um filtro menor pode ser usado para esta topologia, o que o torna menos dispendioso (ORTIZ-CASTRILLÓN, *et al.*, 2021).

O retificador proposto deve ser projetado com vistas à conexão em série com um conversor *Buck*. O *Buck* é uma topologia básica que regula a tensão contínua (BARBI E MARTINS, 2006). No entanto, o *Buck* apresenta *ripple* de saída na tensão e na corrente, necessitando de um valor

considerável de indutância e capacitância para o filtro de saída. Com componentes maiores, o peso, as dimensões e o custo de implementação aumentarão.

A desvantagem do *Buck* convencional pode ser resolvida aplicando uma configuração intercalada, aqui chamada de BI. O conversor BI mostrado na Fig. 2, é uma alternativa alvissareira ao conversor *Buck* convencional. Nessa topologia os esforços nos semicondutores são divididos proporcionalmente entre cada um dos braços do conversor.

O BI consiste em dois ou mais *Buck* em conexão paralela, também conhecido como conversor *Buck* Multifásico (MAMMERI, *et al.*, 2025). A corrente que flui tem metade do valor em comparação com a topologia convencional no mesmo nível de potência. Além disso, a aplicação de fases diferentes para cada sinal de comutação no BI gerará cancelamento de ondulação e reduzirá o tamanho da capacitância de saída. O BI pode funcionar para aplicações com ampla faixa de tensão de entrada e saída. O BI proposto foi projetado para corrente de entrada contínua com baixas perdas de comutação e baixa ondulação da corrente de saída (APRILIANO, *et al.*, 2022).

O comando dos interruptores S_1 e S_2 é acionado com 180° de defasagem entre eles, assim o conversor BI terá quatro etapas de operação quando a razão cíclica for inferior a 50% e apenas três etapas de operação quando a razão cíclica for superior a 50%. Nesse trabalho será estudado somente a condição onde a razão cíclica é inferior a 50% (DACOL, 2019).

5 ESTRATÉGIA DE CONTROLE PARA CARREGADOR PROPOSTO

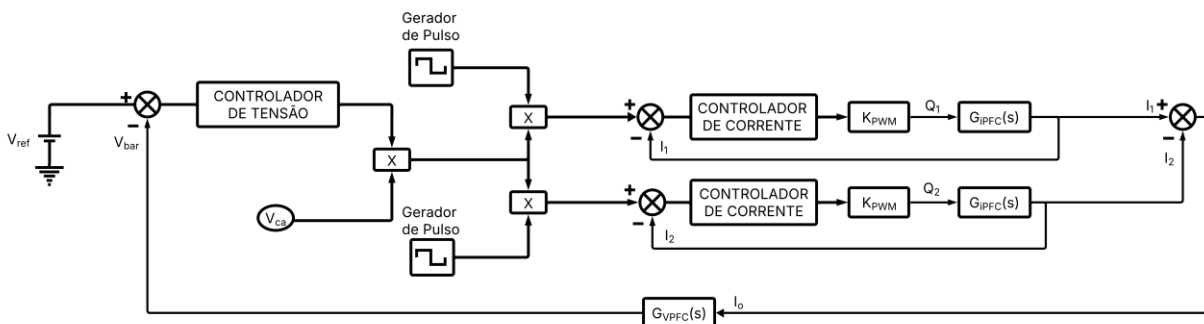
5.1 Retificador PFC *Semi-Bridgeless Boost*

A estratégia de controle é dividida em duas malhas de controle: uma malha mais rápida para o controle da corrente de entrada e uma malha mais lenta para o controle da tensão do barramento.

Para a operação dessa estratégia de controle é necessário o sensoriamento da tensão de barramento, da tensão de entrada e das correntes dos dois indutores de entrada, como mostrado na Fig. 3.

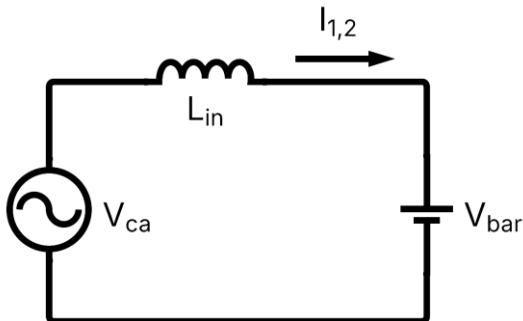
A partir das etapas de operação do conversor Boost, pode-se obter o circuito equivalente simplificado para valores médios para a modelagem da função transferência da malha de corrente e da malha de tensão, como mostrado na Fig. 4 e 5, respectivamente.

Figura 3 - Diagrama de blocos da estrutura da malha de controle do conversor PFC *Semi-Bridgeless Boost*.



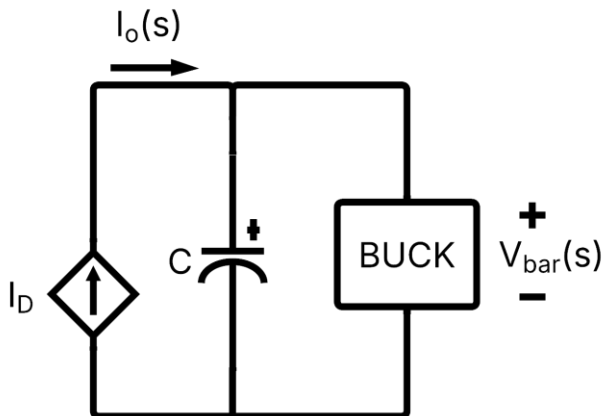
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 4 - Circuito equivalente simplificado do conversor Boost para obtenção da função transferência da malha de corrente.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 5 - Circuito equivalente simplificado do conversor Boost para obtenção da função transferência da malha de tensão.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A partir das versões simplificadas do circuito Boost mostrada na Fig. 4, podemos obter a função de transferência da corrente de entrada pela razão cíclica D , conforme a Eq. (1), e a função de transferência da tensão saída por valores médios conforme a Eq. (2), P_o é a potência nominal e V_{in} é a tensão de entrada projetada para o circuito Buck (Fig. 2).

$$G_{iPFC} = \frac{\Delta I_{1,2}}{\Delta D} = \frac{V_{bar}}{sL_{in}} \quad (1)$$

$$G_{vPFC} = \frac{V_{bar}(s)}{I_o(s)} = \frac{V_{in}^2}{sCV_{in}^2 + P_o} \quad (2)$$

A Eq. (3), apresenta o ganho do modulador PWM, que depende da frequência de chaveamento f_s e da frequência de clock é f_{clk} a serem definidas pelo controlador, deste modo calcula-se o ganho do modulador.

$$K_{pwm} = \frac{1}{\frac{f_{clk}}{f_s} - 1} \quad (3)$$

Os valores de indutância e capacitor de saída podem ser calculados usando as Eq. (4), e Eq. (5). respectivamente.

$$L_{in} = \frac{\Delta i_{fp} \times V_{bar}}{2 \times \Delta i_{fMAX} \times 2 \times f_s} \quad (4)$$

Onde Δi_{fp} é a variação da ondulação da corrente e Δi_{fMAX} é a variação máxima da corrente de pico nominal projetada. E ΔV_{bar} é a máxima variação da tensão de barramento.

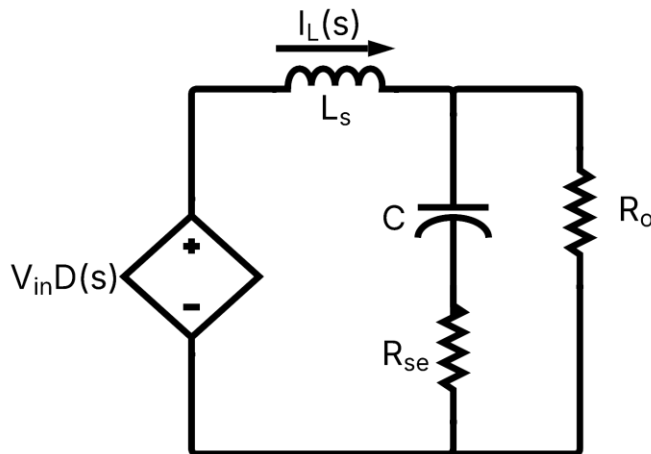
$$C = \frac{P_o}{2 \times \pi \times \Delta V_{bar} \times V_{bar}} \quad (5)$$

5.2 Conversor BI

O comando dos interruptores é acionado com 180° de defasagem entre eles, assim o conversor BI terá quatro etapas de operação quando a razão cíclica for inferior a 50% e apenas três etapas de operação quando a razão cíclica for superior a 50%. Neste trabalho será estudado somente a condição em que a razão cíclica é inferior a 50%.

Para obter a função de transferência da corrente, $G_i(s)$, em um conversor *Buck*, operando no modo de condução contínua, pode-se simplificar o conversor para o modelo apresentado na Fig. 6, e a bateria pode ser substituída por um circuito equivalente RC. Nesse modelo o interruptor e o diodo de roda livre apresentados na Fig. 2, são substituídos por uma fonte de tensão controlado em função da razão cíclica, para assim obter um modelo com parâmetros lineares e assim poder trabalhar no domínio da frequência, que a transformada de Laplace pode ser utilizada em modelos lineares e invariantes no tempo.

Figura 6 - Modelo de pequenos sinais do conversor *Buck*.



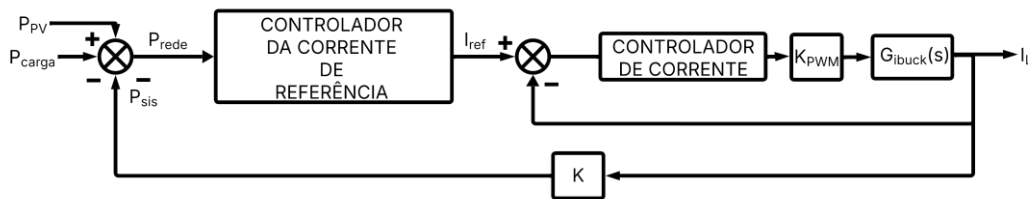
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Para evitar sobrecarga de energia na rede da concessionária, o projeto foi idealizado para que o sistema residencial apenas consumisse energia da rede e não injetasse. Esse controle é feito através da potência consumida pelo sistema de armazenamento de energia. Essa potência é diretamente controlada pela corrente de carregamento da bateria. Sendo assim, 2 malhas de controle foram utilizadas como estratégia nesse sistema.

A primeira malha de controle tem como objetivo o gerenciamento da corrente de carregamento da bateria, fazendo com que essa corrente alcance um valor de referência recebido na entrada do controlador.

A segunda malha visa o controle do valor de referência da corrente, tendo a potência de fornecida pela rede como entrada do controlador.

Figura 7 – Diagrama do sistema de controle do conversor *Buck*.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Para o dimensionamento do controlador foram consideradas a Eq. (3), para o cálculo do ganho do PWM e a Eq. (6), para a função transferência da corrente do *Buck* que pode ser desenvolvida a partir da modelo simplificado da Fig. 5.

$$G_{ibuck}(s) = \frac{I_L(s)}{D(s)} = \frac{V_{in}(SR_{se}C + 1)}{R_o L C S^2 + L S + R_o} \quad (6)$$

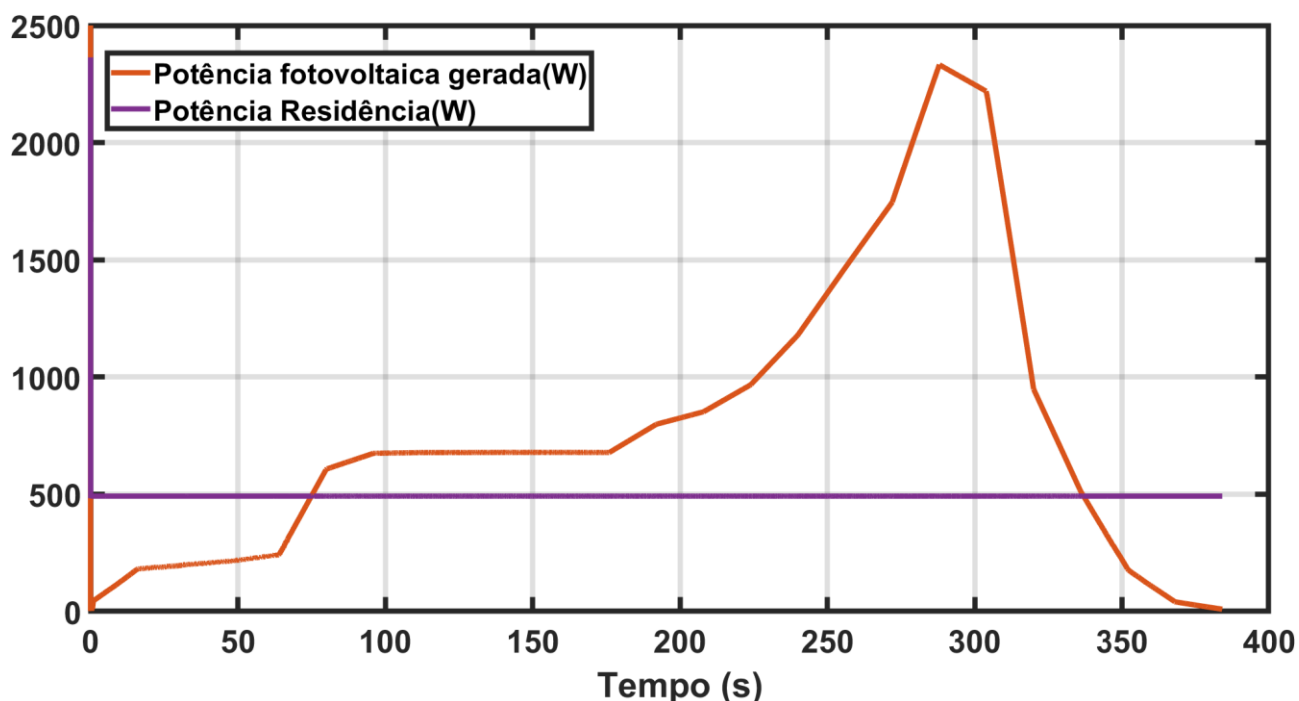
O valor da indutância de saída pode ser calculado usando a Eq. (7).

$$L_s = \frac{(1 - 2D_{min})V_{in} \times D_{min}}{2 \times \Delta I_o \times 2 \times f_s} \quad (7)$$

6 RESULTADOS

O comportamento do sistema de controle projetado foi testado em 2 situações distintas, uma no tempo total de 386s, aplicando uma entrada de irradiação solar onde o sistema fotovoltaico inicia e finaliza com potência nula e atinge seu pico de potência fornecida de 2332W em t=288s, conforme é mostrado na Fig. 8. Neste primeiro cenário, não houve variações abruptas da energia gerada pelo sistema fotovoltaico e a carga residencial se manteve constante durante toda a simulação.

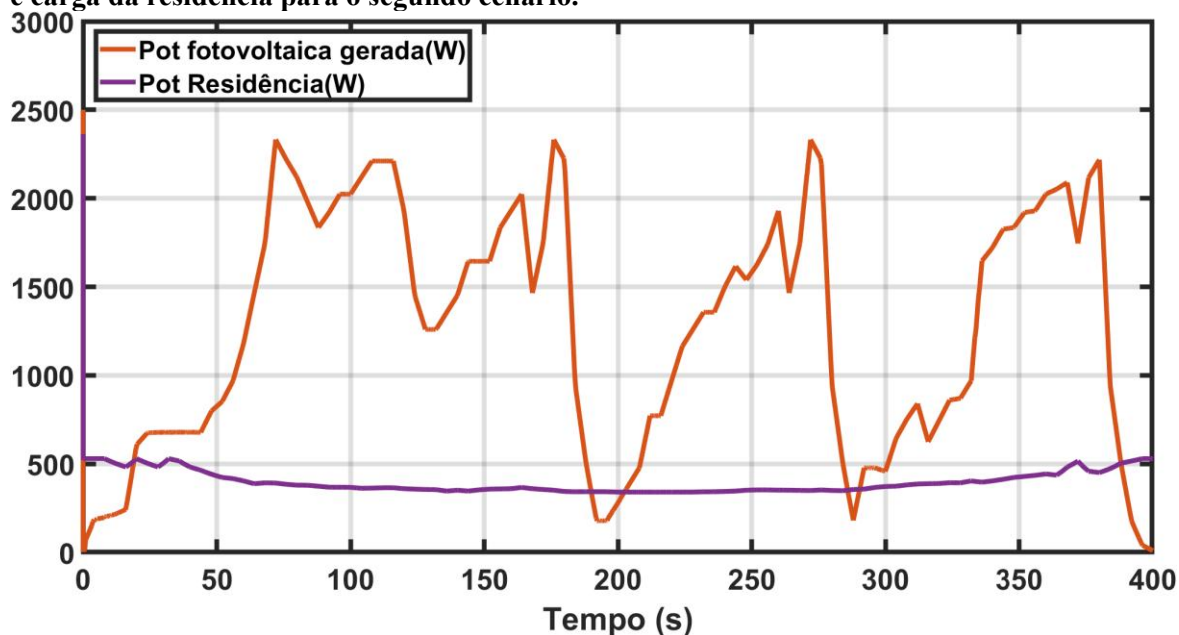
Figura 8- Comportamento das medições de Potência durante a simulação potência fotovoltaica gerada e carga da residência para o primeiro cenário.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

No segundo cenário, a simulação teve um tempo total de 400s, aplicando uma entrada de irradiação solar onde o sistema fotovoltaico inicia e finaliza com potência nula e atinge seu pico de potência fornecida de 2332W em alguns instantes da simulação, conforme é mostrado na Fig. 9. A carga residencial varia seu consumo entre 530W e 300W, tendo consumo mínimo no instante $t=200s$.

Figura 9- Comportamento das medições de Potência durante a simulação potência fotovoltaica gerada e carga da residência para o segundo cenário.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Para ambos os cenários, foi utilizado o controle Proporcional-Integral (PI) para todas as estratégias de controle do sistema. Para os cálculos dos parâmetros dos componentes eletrônico e dos

controladores PIs dos circuitos *Buck* e PFC, foram consideradas as especificações da Tab. 2 e a Tab. 3, respectivamente.

Tabela 2 - Especificações de projeto do circuito *Buck*.

V_{in}	P_{out}	I_{Lmax}	V_{omin}	V_{omax}	ΔI_L	f_s
400V	2000W	54A	42V	54V	1A	50kHz

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 3 - Especificações do retificador PFC *Semi-Bridgeless Boost*.

V_{ca}	P_o	V_{bar}	ΔV_{bar}	f_{rede}	f_s
220V	2000W	400V	2V	60Hz	100kHz

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Levando em consideração as equações e os diagramas da seção 5, foram especificados os valores da Tab. 4 e da Tab. 5 para o retificador PFC e o conversor *Buck*.

Tabela 4 - Parâmetros do retificador PFC.

Circuito		Controlador de Tensão		Controladores de Corrente	
L_{in}	C	P	I	P	I
8mH	9mF	3	0,5	0,01	0,0001

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 5 - Parâmetros do conversor *Buck*.

Circuito	Controlador de Corrente		Controlador da corrente de referência	
L_s	P	I	P	I
144mH	1,769	66.142,91	0,0005	0,007

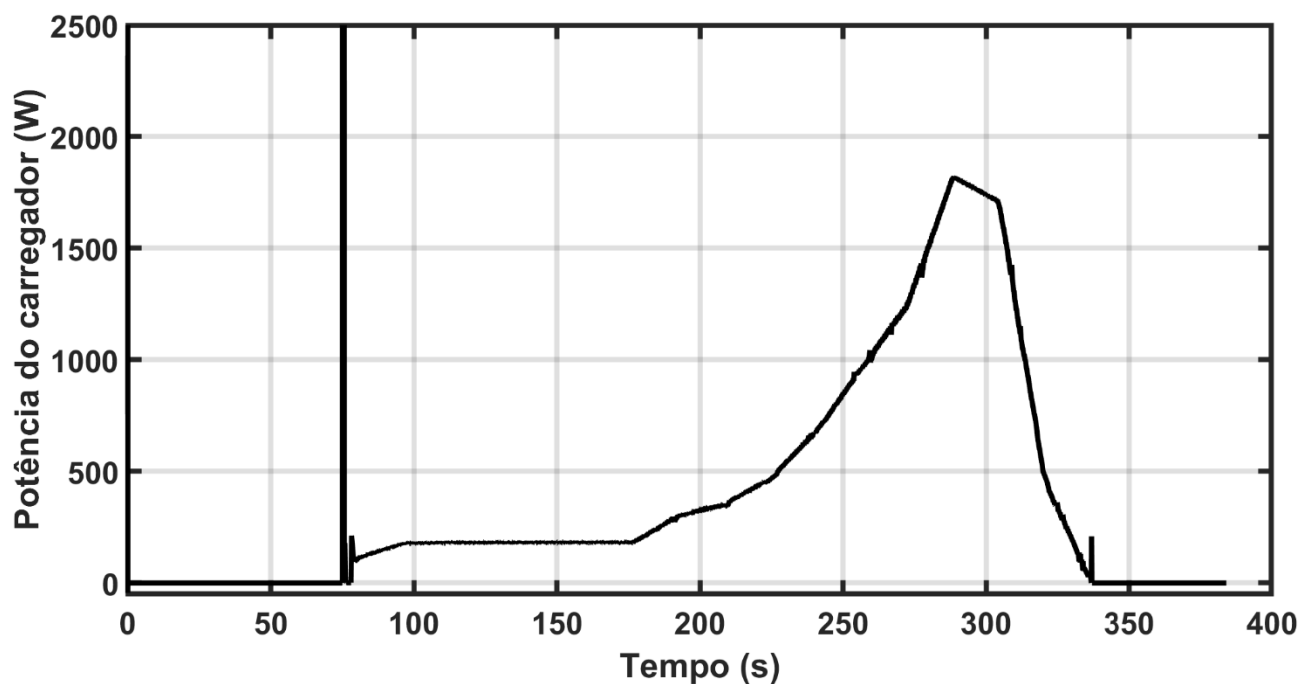
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

As Fig. 10 e 11 mostram o comportamento das potências do sistema de carregamento de bateria e da potência fornecida da rede da concessionária para a residência da primeira situação.

Como é possível observar na Fig. 8, entre $t=0s$ e $t=75s$, a potência fotovoltaica fornecida não é suficiente para alimentar a residência, sendo necessário energia da rede como complementar alimentação da carga.

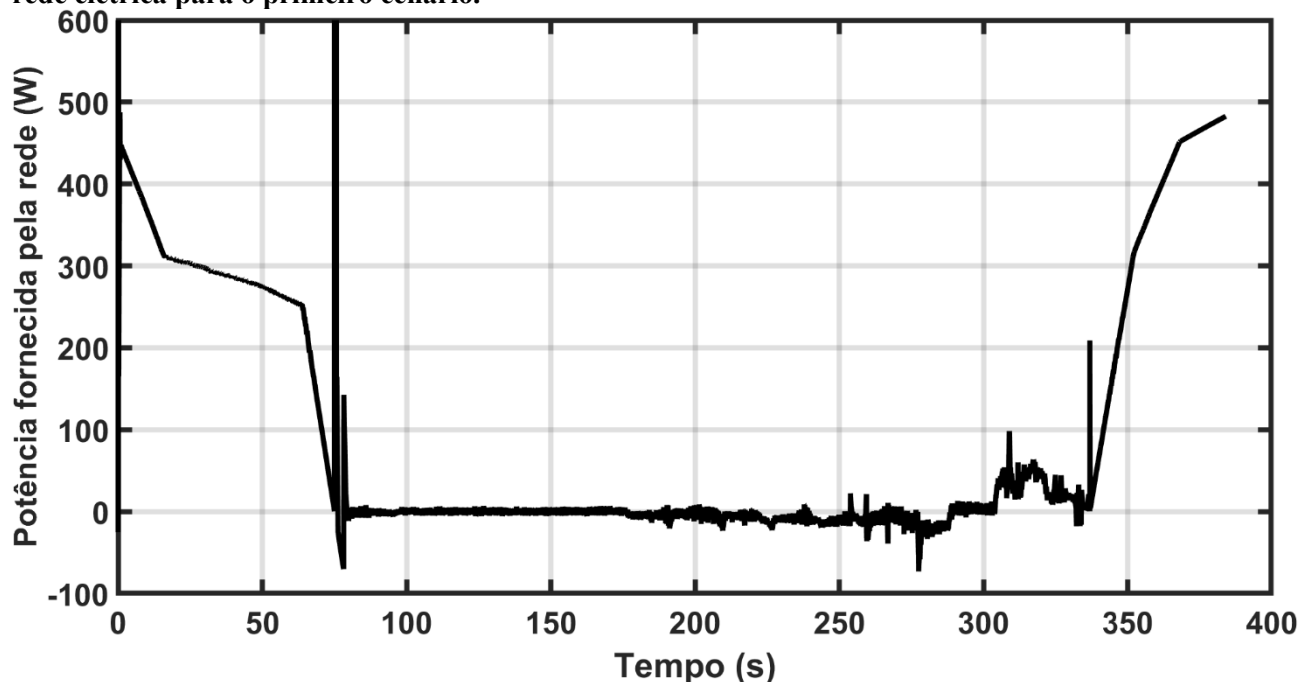
Entre $t=75s$ e $t=336s$, a energia gerada pelo sistema fotovoltaico supera a carga, sendo necessário o acionamento do sistema de carregamento de bateria para que a energia excedida não seja injetada na rede elétrica. A partir de $t=336s$, se repete a situação entre $t=0s$ e $t=75s$.

Figura 10- Comportamento das medições de Potência durante a simulação potência do sistema de armazenamento do primeiro cenário.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 11- Comportamento das medições de Potência durante a simulação potência fornecida pela rede elétrica para o primeiro cenário.



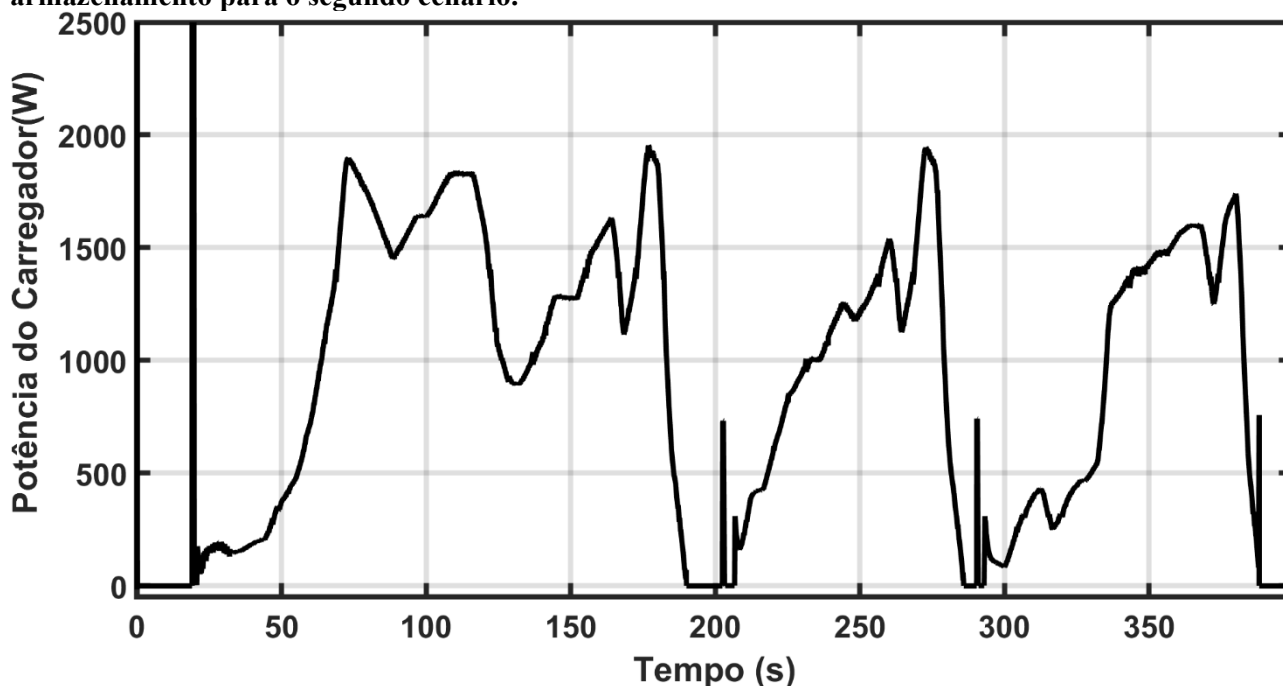
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

De maneira análoga, as Fig. 12 e 13 mostram o comportamento das potências do sistema de carregamento de bateria e da potência fornecida da rede da concessionária para a residência da segunda situação.

Observa-se na Fig. 9, que além do início e do final da simulação, entre os instantes $t=189s$ e $t=202s$, e entre $t=286s$ e $t=290s$, a potência fotovoltaica fornecida não é suficiente para alimentar a residência, sendo necessário energia da rede como complementar alimentação da carga.

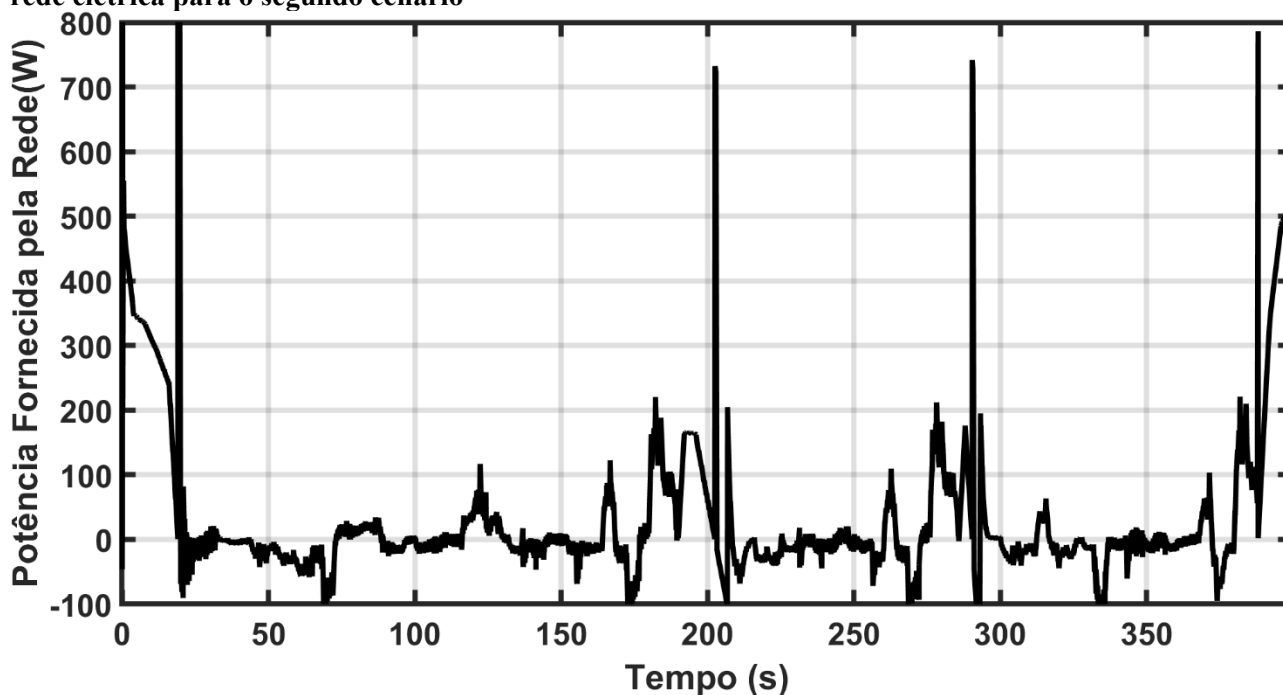
Entre $t=17s$ e $t=189s$, $t=202s$ e $t=286s$, $t=290s$ e $t=388s$ a energia gerada pelo sistema fotovoltaico supera a carga, sendo necessário o acionamento do sistema de carregamento de bateria para que a energia excedida não seja injetada na rede elétrica. Nos momentos em que a potência fornecida pelo sistema fotovoltaico ultrapassa a da carga consumida pela residência, são observados picos de energia no momento em que o sistema de carregamento é acionado.

Figura 12- Comportamento das medições de Potência durante a simulação potência do sistema de armazenamento para o segundo cenário.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

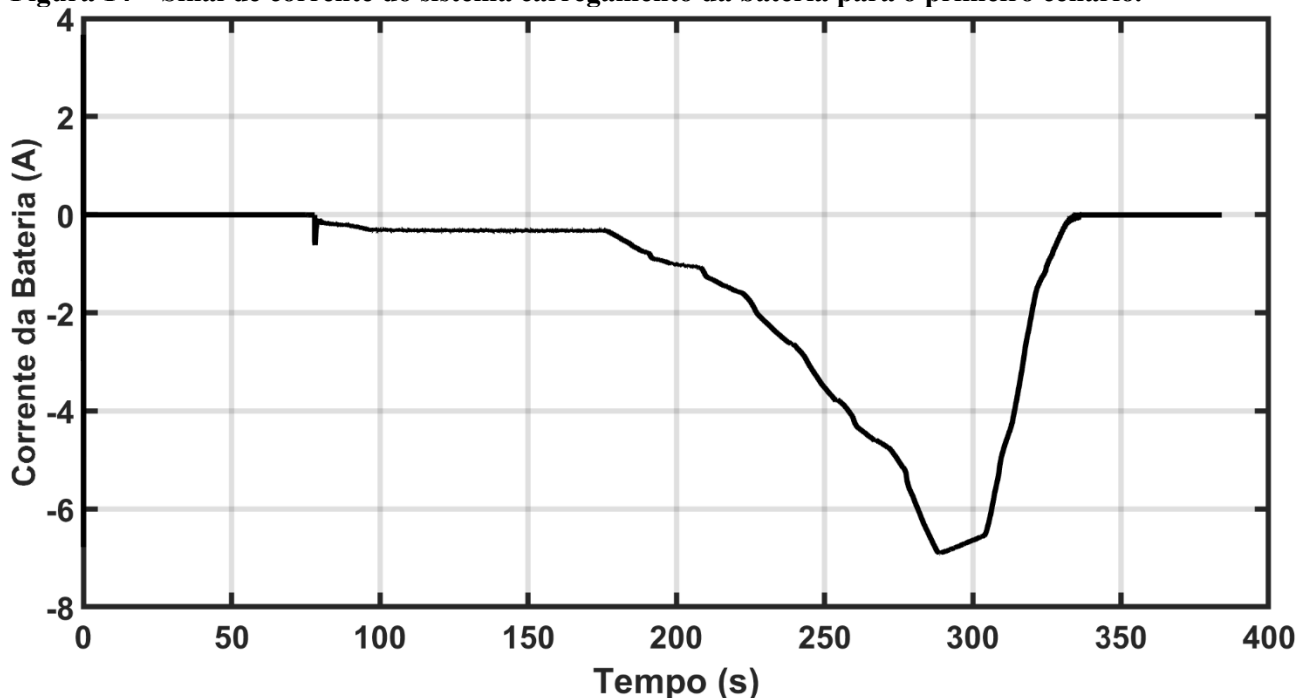
Figura 13- Comportamento das medições de Potência durante a simulação potência fornecida pela rede elétrica para o segundo cenário



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

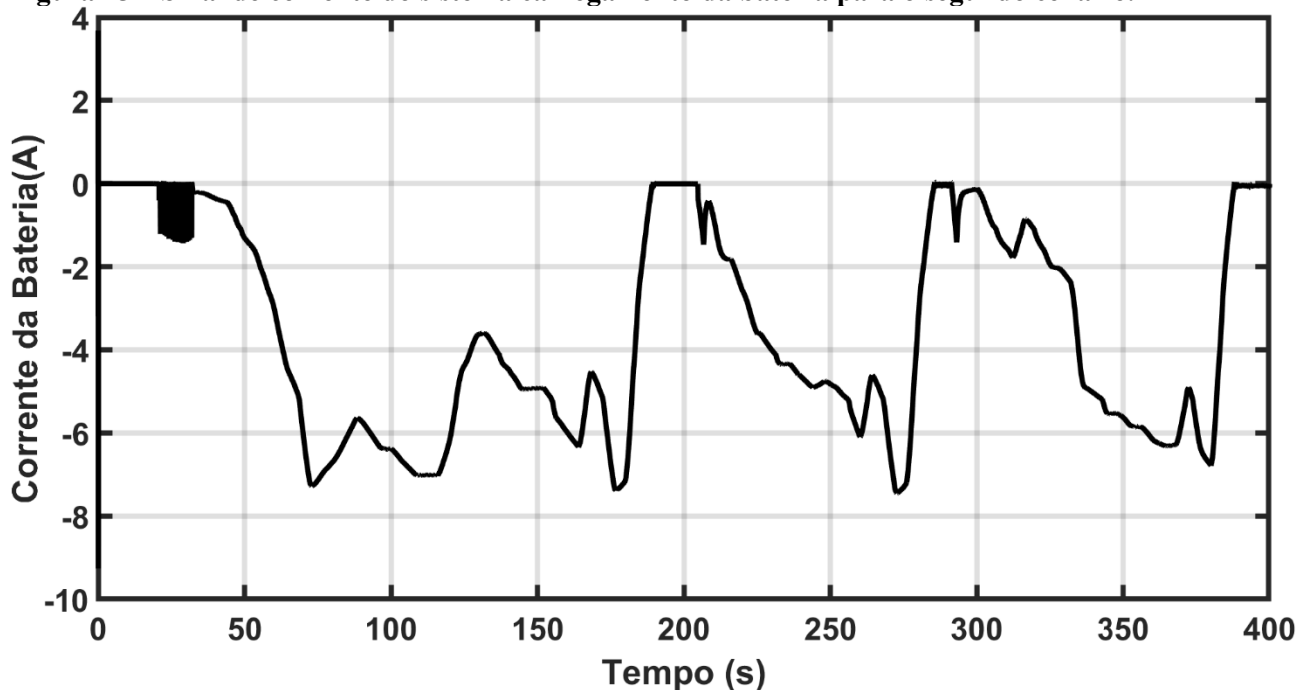
A corrente de carregamento da bateria é mostrada na Fig. 14 para a primeira situação e na Fig. 15 para a segunda situação. Observa-se que a corrente de carregamento da bateria é proporcional a potência consumida pelo sistema de carregamento mostrado nas Fig. 10 e 12, sendo responsável pelo controle da potência consumida. As Fig. 16 e 17 apresentam a estabilidade da tensão de saída do retificador, diante do carregamento da bateria, note na Fig. 17 que essa tensão também sofre com os picos durante o acionamento do sistema de carregamento.

Figura 14 – Sinal de corrente do sistema carregamento da bateria para o primeiro cenário.



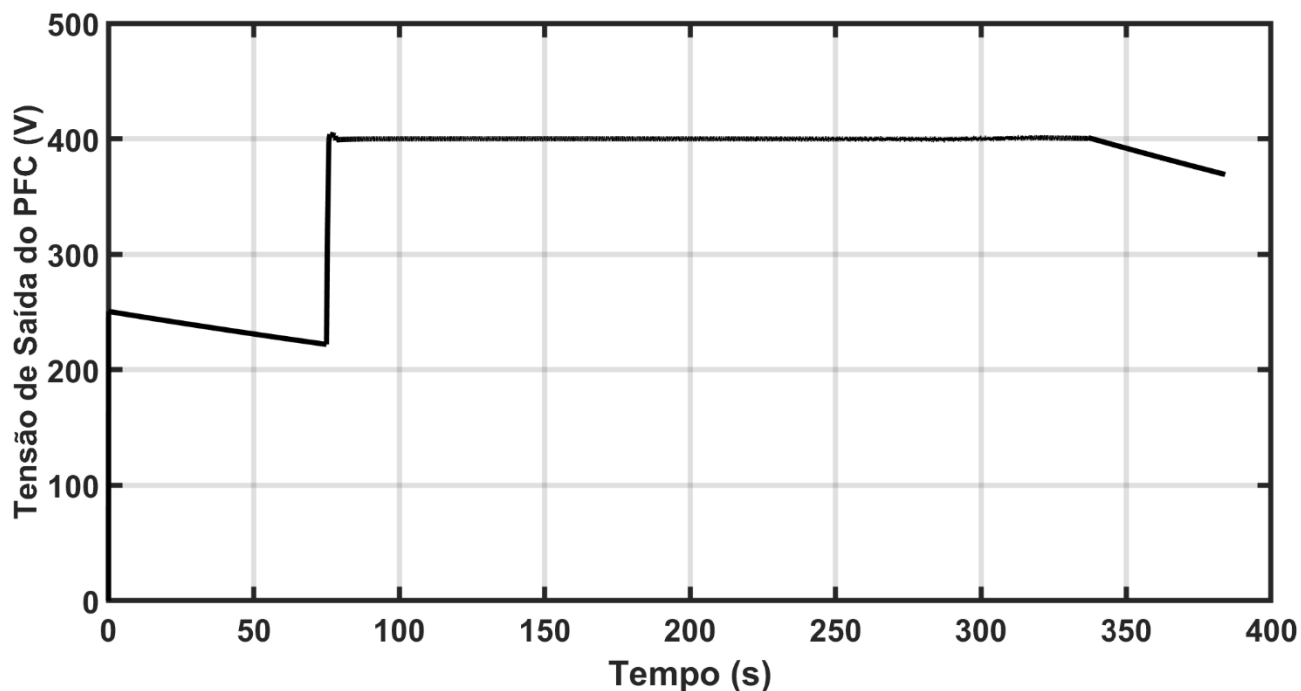
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 15 – Sinal de corrente do sistema carregamento da bateria para o segundo cenário.



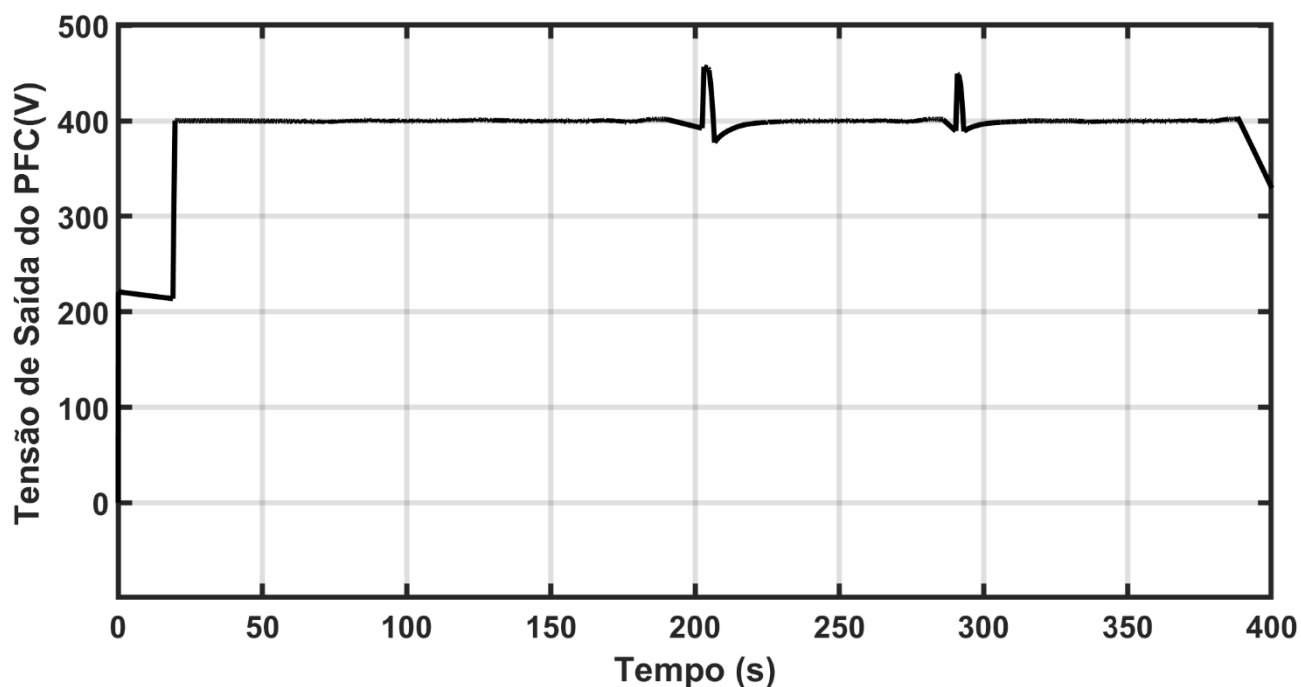
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 16 – Sinal de tensão de saída do PFC para o primeiro cenário.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 17 – Sinal de tensão de saída do PFC para o segundo cenário.

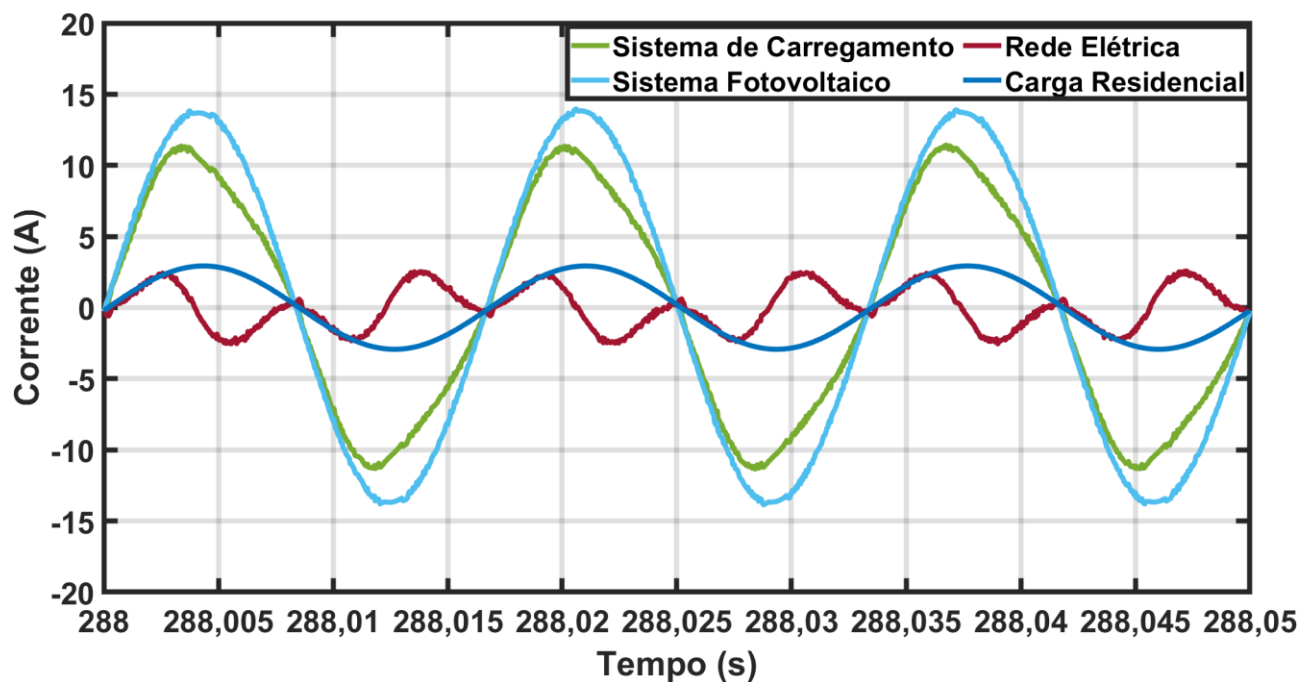


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

As medições de tensão em todos os pontos permaneceram em fase e em módulo para ambas as situações, as Fig. 18 e 19 mostram todos os sinais de corrente entre $t=360s$ e $360.05s$, onde o sistema de carregamento está desativado, e entre $t=288s$ e $288.05s$, onde o sistema está consumindo o máximo de potência durante o primeiro cenário.

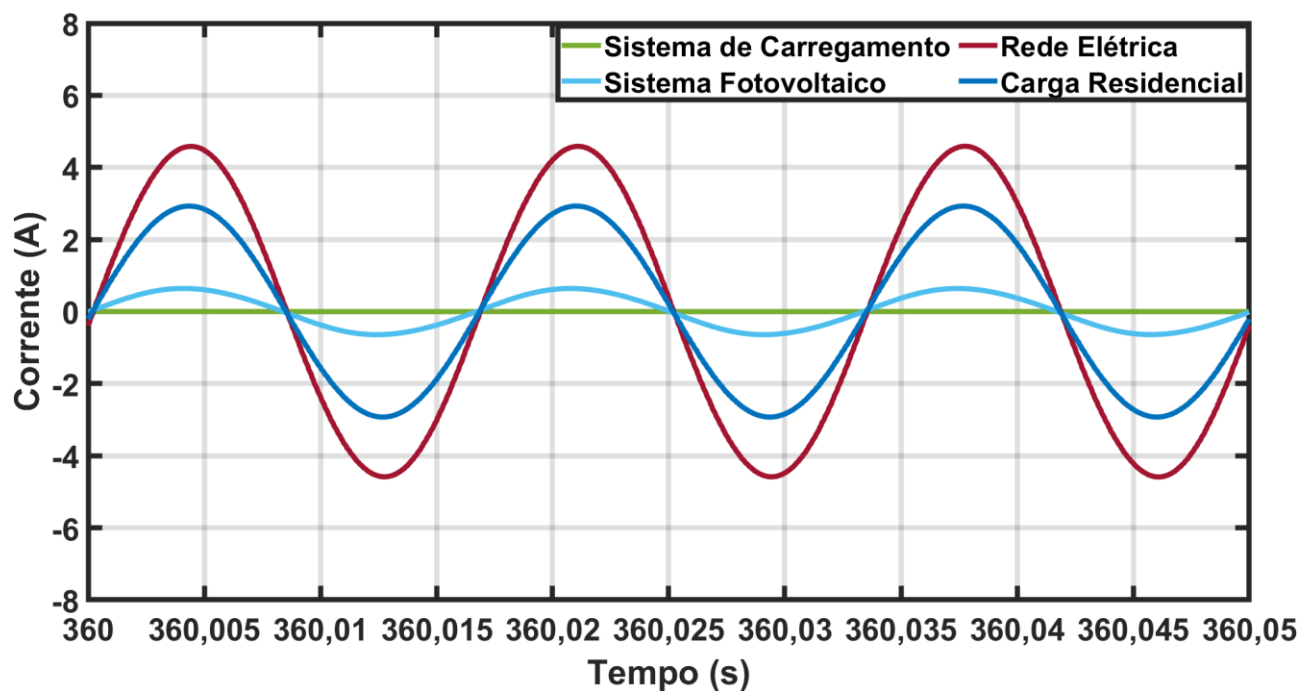
As correntes também se mostraram em fase nos pontos de máximo e mínimos do sistema de carregamento.

Figura 18- Sinal de Corrente entre $t=288s$ e $t=288,05s$ durante o primeiro cenário.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

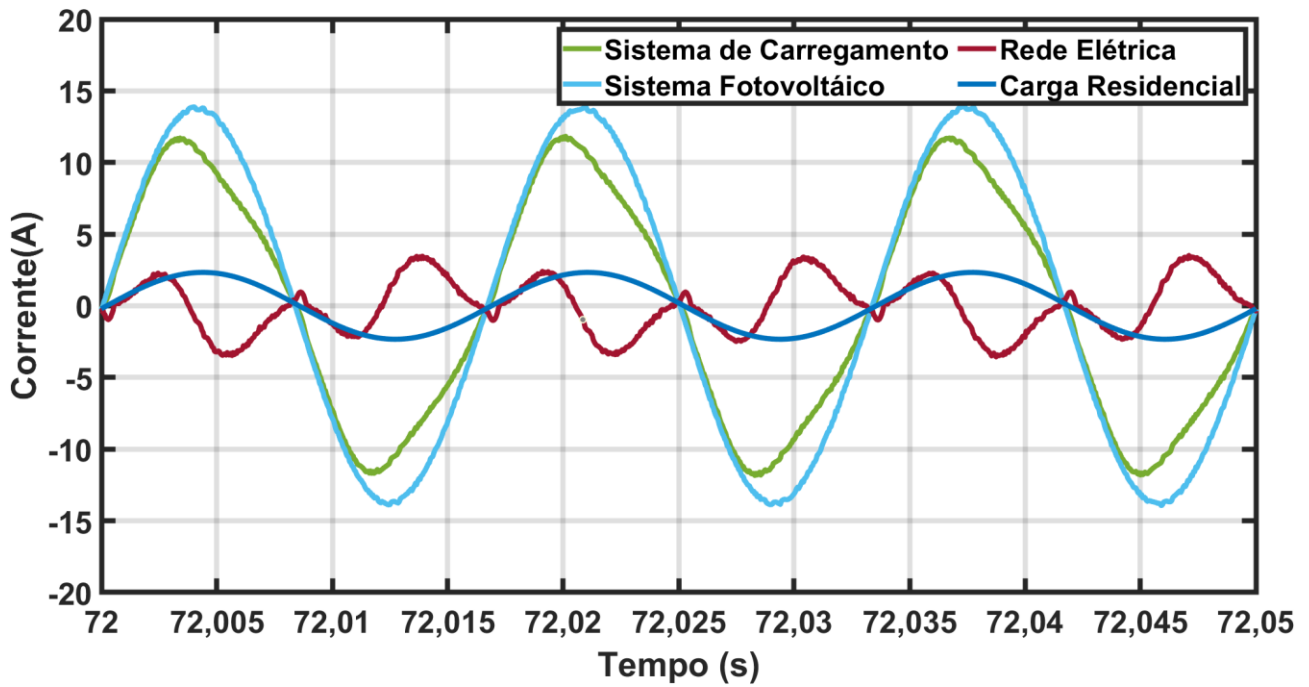
Figura 19- Sinal de Corrente entre $t=360s$ e $t=360,05s$ durante o primeiro cenário.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

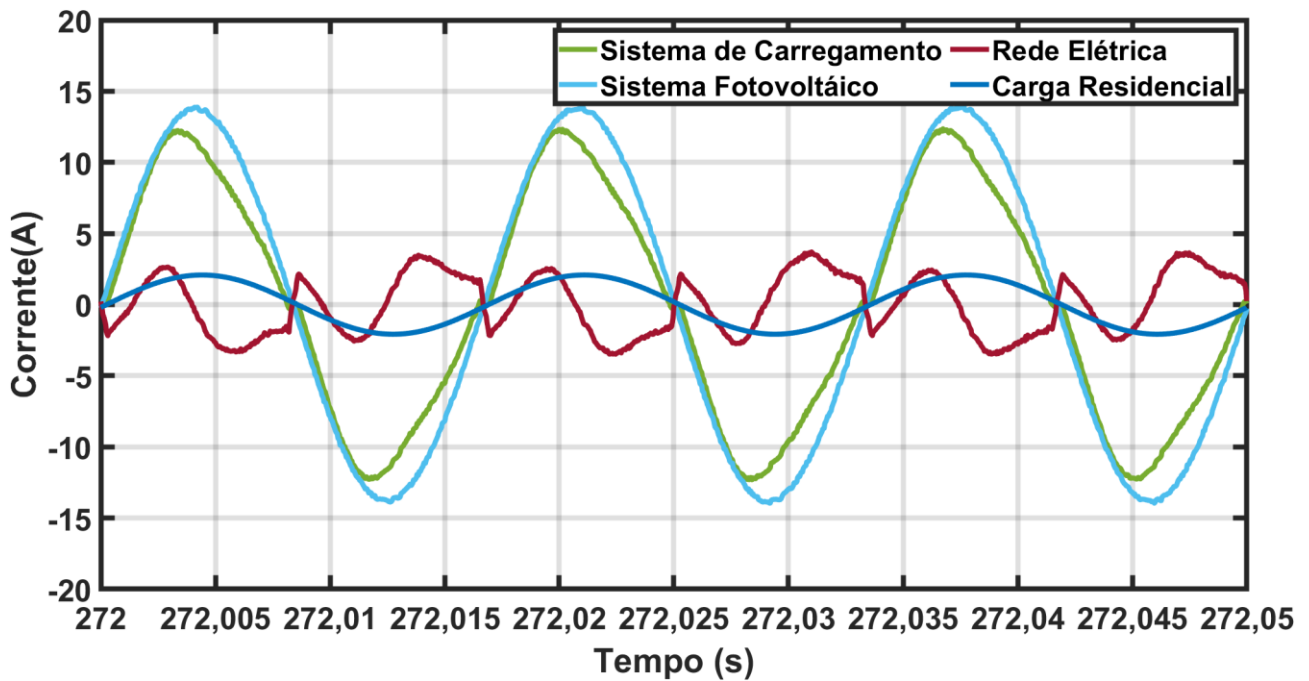
Já as Fig. 20, 21 e 22 mostram todos os sinais de corrente entre $t=196s$ e $196,05s$, onde o sistema de carregamento está desativado, e entre $t=272s$ e $272,05s$, e $t=72s$ e $72,05s$ onde o sistema está consumindo o máximo de potência.

Figura 20- Sinal de Corrente entre $t=72s$ e $t=72,05s$ durante o segundo cenário.



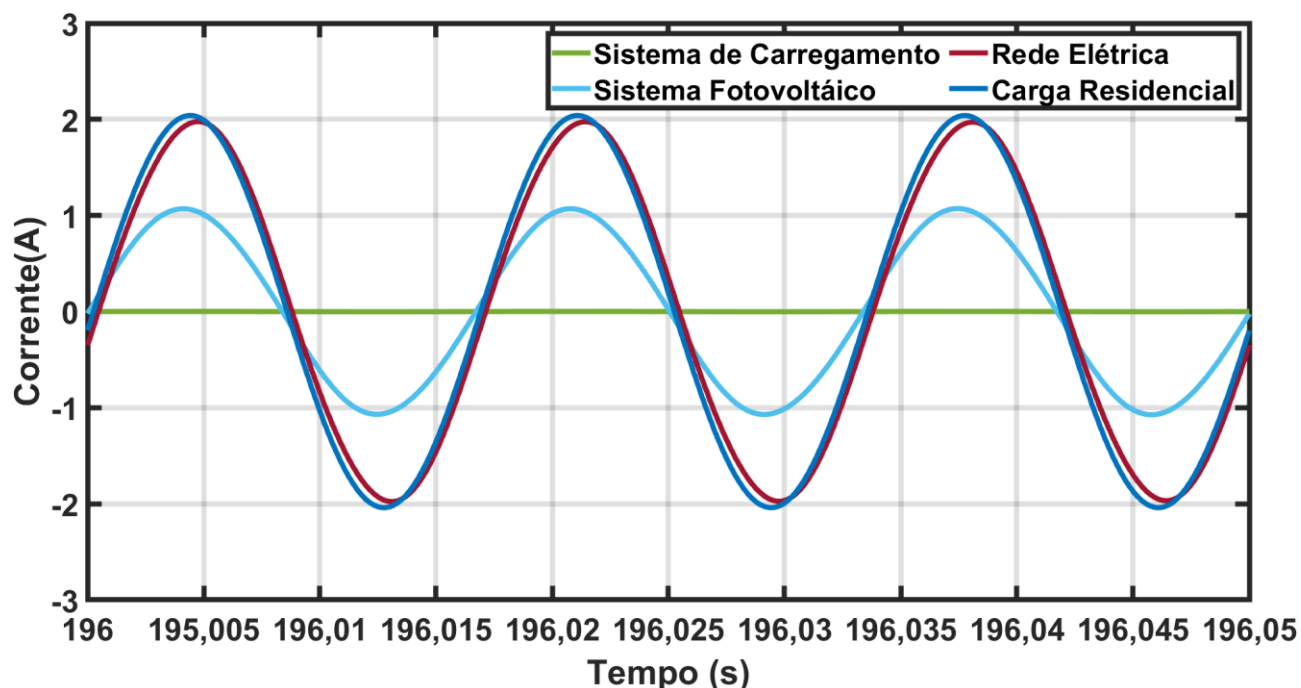
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 21- Sinal de Corrente entre $t=272s$ e $t=272,05s$ durante o segundo cenário.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

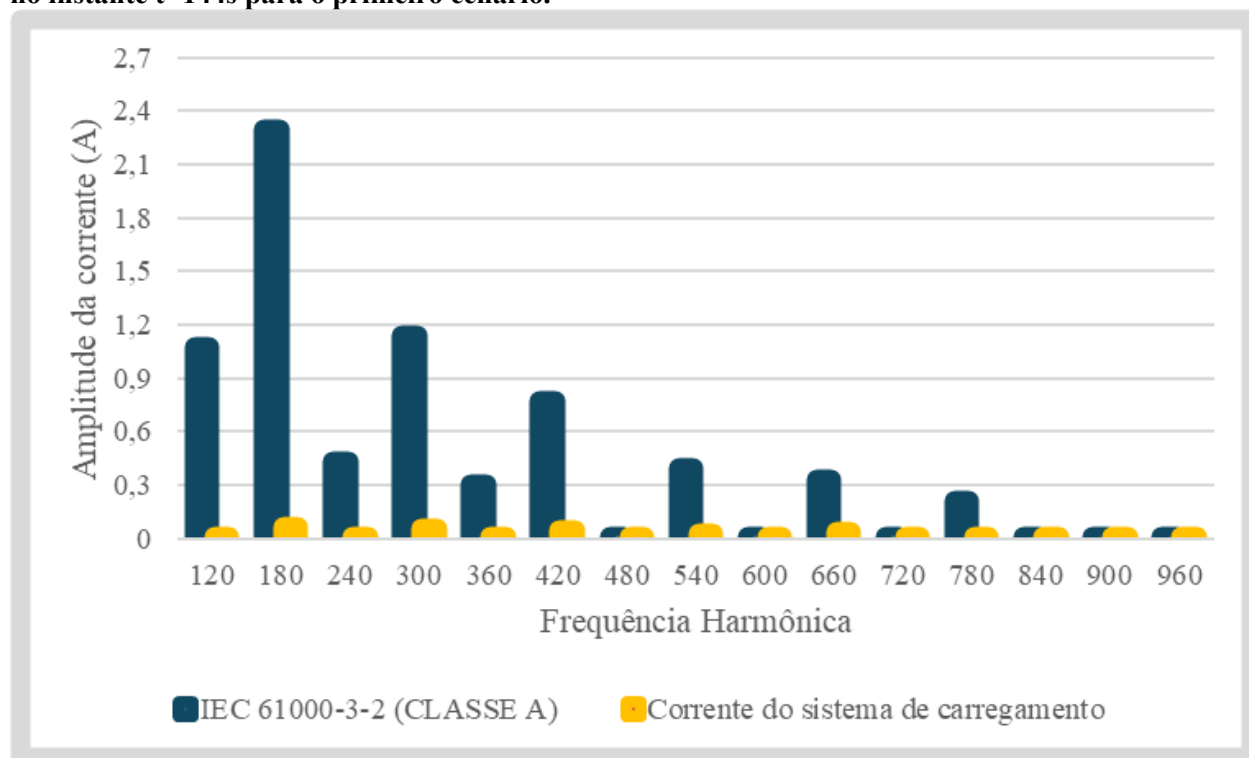
Figura 22- Sinal de Corrente entre $t=196s$ e $t=196,05s$ durante o segundo cenário.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

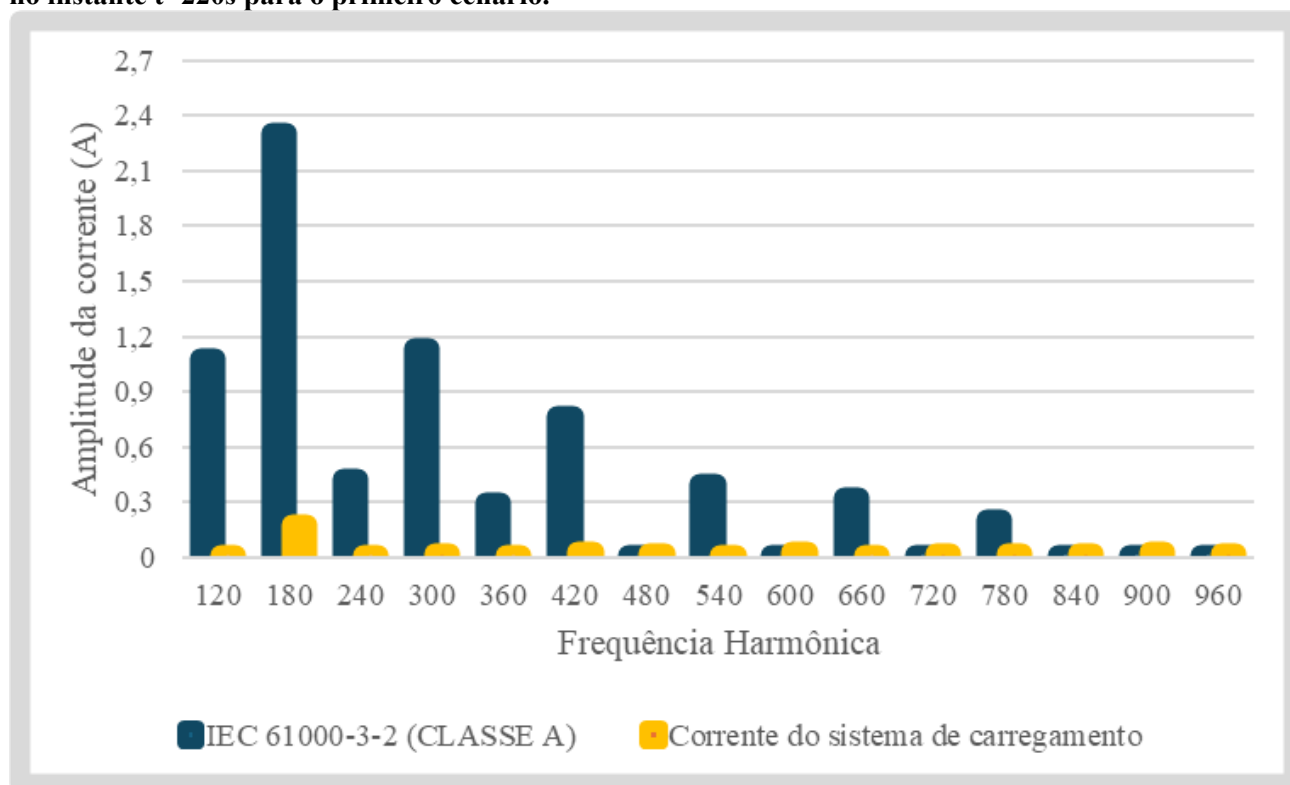
Das Fig. 23 até a Fig. 27 são ilustrados os espectros harmônicos das amplitudes das correntes do sistema de carregamento. Isso é comparado aos limites para equipamentos classificados como classe A na norma IEC 61000-3-2. O sistema proposto atende aos limites da classe A para todos os harmônicos.

Figura 23 - Comparação do Amplitude da corrente do sistema com os limites da norma IEC 61000-3-2 no instante $t=144s$ para o primeiro cenário.



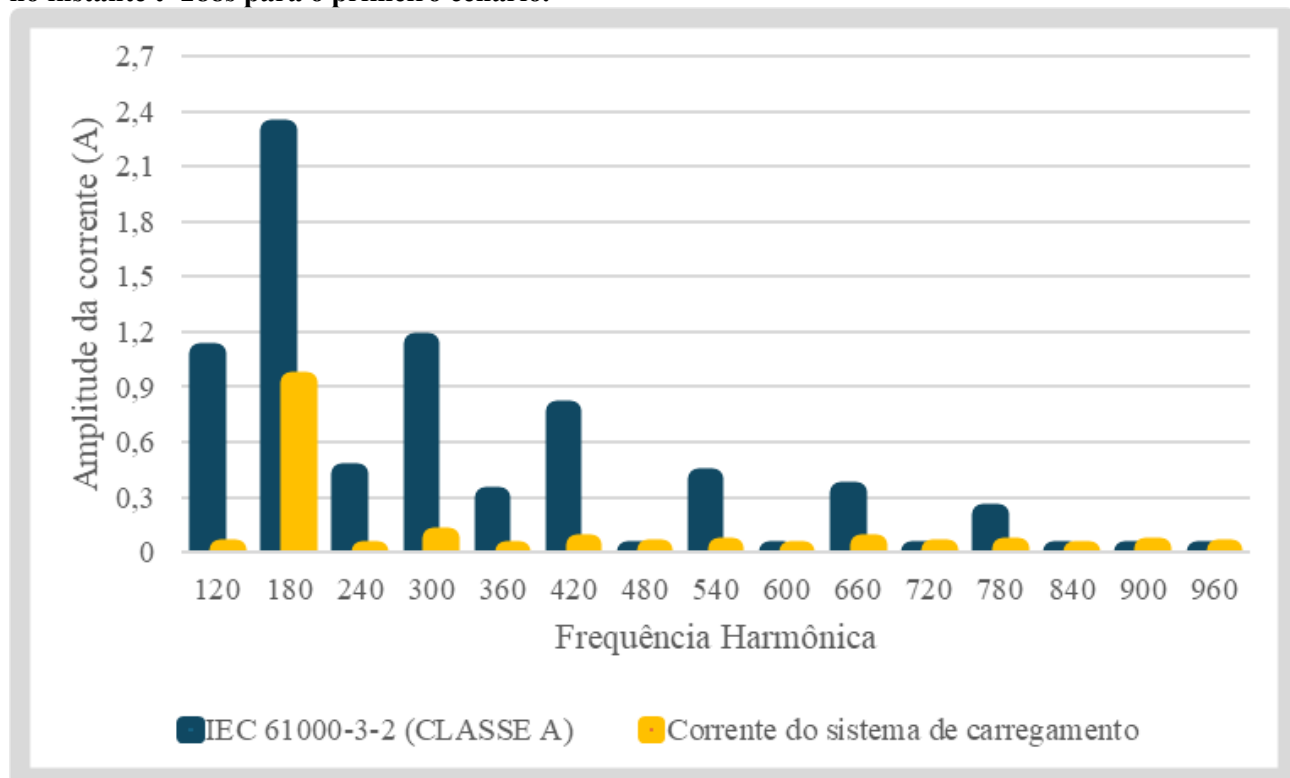
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 24 - Comparação do Amplitude da corrente do sistema com os limites da norma IEC 61000-3-2 no instante $t=220s$ para o primeiro cenário.



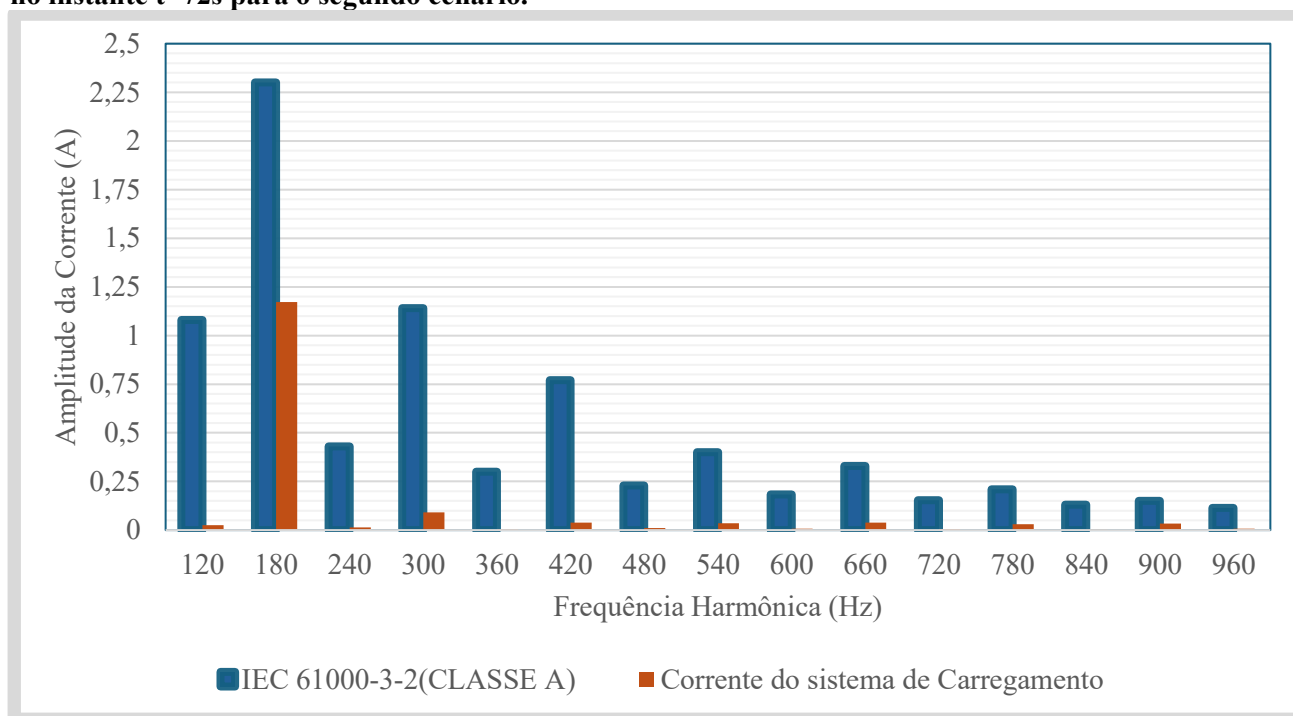
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 25 - Comparação do Amplitude da corrente do sistema com os limites da norma IEC 61000-3-2 no instante $t=288s$ para o primeiro cenário.



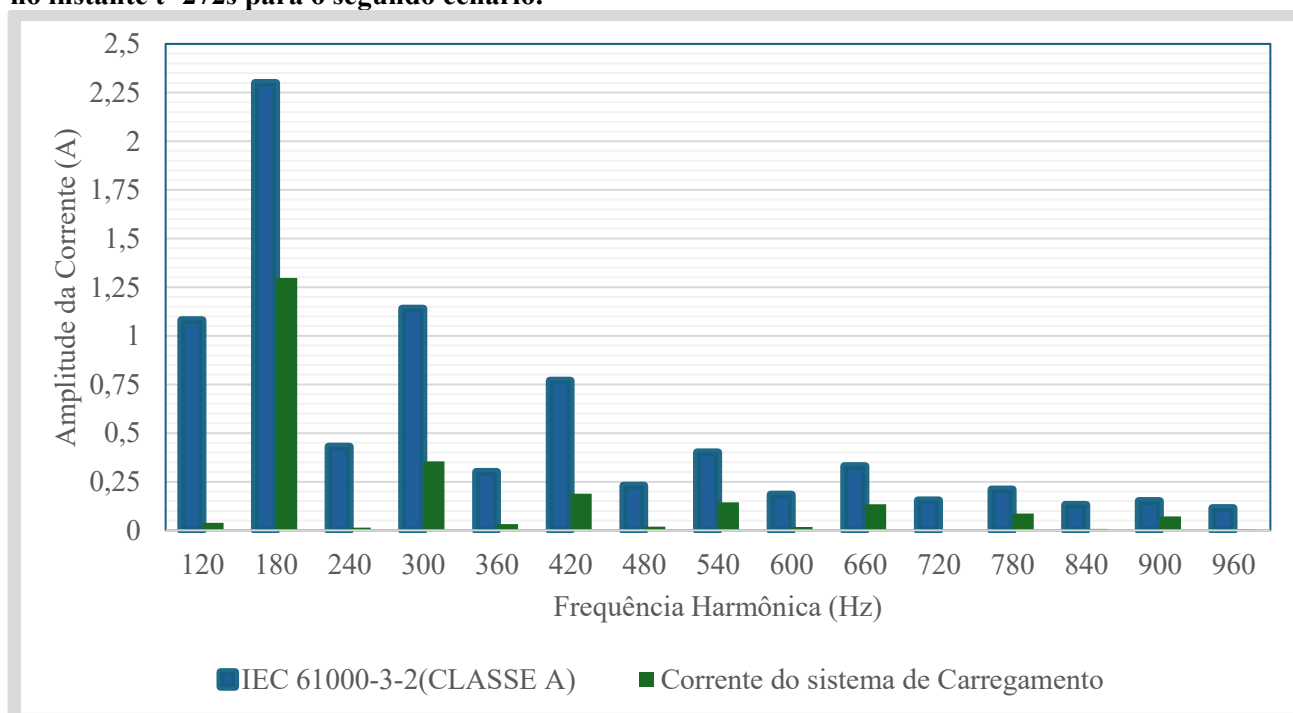
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 26 - Comparação do Amplitude da corrente do sistema com os limites da norma IEC 61000-3-2 no instante $t=72s$ para o segundo cenário.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 27 - Comparação do Amplitude da corrente do sistema com os limites da norma IEC 61000-3-2 no instante $t=272s$ para o segundo cenário.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

7 CONCLUSÃO

O presente trabalho propôs um sistema de armazenamento de energia utilizando topologias robustas dos circuitos *Buck* e *Boost*, no qual o controle está atrelado ao gerenciamento de injeção de energia do sistema fotovoltaico. Este sistema foi testado por meio de simulações e se mostrou eficaz

na resolução do problema de controle de injeção de energia mantendo a qualidade da geração de um sistema fotovoltaico residencial.

Verificou-se um controle de injeção de energia na rede elétrica dinâmico e eficiente. Observou-se o comportamento estável da corrente de carregamento da bateria durante todo o período das 2 simulações. O desempenho do sistema se encaixa nos padrões de distúrbio harmônico permitidos pela norma IEC 61000-3-2 (Classe A), mesmo quando o circuito opera 80% abaixo da sua potência nominal. Percebeu-se, ainda, que a sintonia dos controladores é extremamente importante para os resultados dos sistemas e controle da injeção, juntamente com os cálculos dos indutores e capacitores dos circuitos.

Trabalhos futuros versarão sobre séries temporais maiores da geração fotovoltaica. Além disso, observou-se que para valores de potência maiores o sistema torna-se cada vez mais estável. Sendo, a princípio, promissora a ideia de teste futuro do conversor proposto em sistemas fotovoltaicos de maiores potência, ou com fontes de alimentação híbrida para atendimento da carga, podendo, no limite, tornar-se um sistema off-grid.

REFERÊNCIAS

APRILIANO, R. A.; ARIEFIANO, R. M. Interleaving Technique for Improving Conventional Buck Converter Performance. In: **2022 INTERNATIONAL CONFERENCE ON TECHNOLOGY AND POLICY IN ENERGY AND ELECTRIC POWER (ICT-PEP)**, Jakarta, Indonesia. Proceedings... Jakarta: IEEE, 2022. p. 249-254.

ARBOLEYA, P. et al. **Efficient Energy Management in Smart Micro-Grids: ZERO Grid Impact Buildings**. IEEE Transactions on Smart Grid, v. 6, n. 2, p. 1055-1063, mar. 2015.

BARBI, Ivo; MARTINS, Denizar Cruz. **Eletrônica de potência: conversores CC-CC básicos não isolados**. Florianópolis: Edição dos autores, 2006.

BARBI, Ivo. **Modelagem de conversores CC empregando modelo médio e espaço de estados**. Florianópolis: Edição do Autor, 2015.

CHA, D. -J. et al. **Development of interleaved buck converter using soft-switching for high current applications**. In: 2014 IEEE INTERNATIONAL POWER MODULATOR AND HIGH VOLTAGE CONFERENCE (IPMHVC). Proceedings... IEEE, 2014. p. 623-626.

DACOL, R. P. **Carregador de Baterias não Isolado com Retificador Pfc Semi-bridgeless Boost**. 2019. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Eletrônicos) – Centro de Engenharia da Mobilidade, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Joinville, 2019.

FISCHER, J. C. et al. **A front-end bridgeless power factor corrector for electric vehicle battery chargers**. Eletrônica de Potência, v. 22, n. 4, p. 389–397, out./dez. 2017.

HUANG, Z. et al. **A multi-mode variable-frequency discrete control for boost PFC converter**. In: 2025 IEEE 14th INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS, CIRCUITS AND SYSTEMS (ICCCAS). Proceedings... IEEE, 2025. p. 23-28.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **IEC 61000-3-2: Harmonics Standards Overview**. Edson: SCHAFFNER, 2006.

JAKOBSEN, L. T. et al. **Interleaved buck converter with variable number of active phases and a predictive current sharing scheme**. In: 2008 IEEE POWER ELECTRONICS SPECIALISTS CONFERENCE. Proceedings... Rhodes: IEEE, 2008. p. 3360-3365.

KRITHIGA, S. et al. **FLC-based, PV-fed interleaved dual buck-boost converter for EV battery charging applications**. Heliyon, v. 8, n. 4, p. e09238, abr. 2022.

MAMMERI, E. N. et al. **Modeling and control of a three-phase interleaved buck converter as a battery charger**. IEEE Access, v. 13, p. 18325-18345, 2025.

ORTIZ-CASTRILLÓN, J. R. et al. **PFC Single-Phase AC/DC Boost Converters: Bridge, Semi-Bridgeless, and Bridgeless Topologies**. Applied Sciences, v. 11, n. 16, p. 7651, 2021.

SILVA, L. A. **Aplicação da Estratégia de Controle Zero Grid em uma Usina de Microgeração Voltada a Redução do Consumo Diurno**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, 2024.

SINGH, R.; TRIPATHI, P.; YATENDRA, K. **Impact of Solar Photovoltaic Penetration In Distribution Network**. In: 2019 3rd INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT DEVELOPMENTS IN CONTROL, AUTOMATION & POWER ENGINEERING (RDCAPE), Noida, India. Proceedings... IEEE, 2019. p. 551-556.

SOUZA, J. J. S. **Conversor Ca-cc Monofásico Bidirecional Isolado Aplicado como Carregador De Baterias De Veículos Elétricos**. 2020. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, 2020.

UNIPOWER. **Bateria de Lítio - UPLFP48-100 3U**. 2023. Disponível em: [Link se houver]. Acesso em: 29 abr. 2026.

VEIGA, M. F. D. et al. **Impactos da inserção de geração fotovoltaica na qualidade de energia elétrica: Uma análise em transformadores da rede de distribuição**. In: 2023 XV BRAZILIAN CONFERENCE ON QUALITY OF POWER (CBQEE). Anais... IEEE, 2023. p. 1-8.

VIEIRA, L. M. d. S.; BARBOSA, D. **Análise do impacto da geração distribuída nos estudos de proteção de alimentadores usando o software ATP/ATPDraw**. In: 2023 XV BRAZILIAN CONFERENCE ON QUALITY OF POWER (CBQEE). Anais... IEEE, 2023. p. 1-7.

ZEGHOUDI, A. et al. **Common mode and differential mode noise of AC/DC LED driver**. In: 2021 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENT AND ELECTRICAL ENGINEERING. Proceedings... IEEE, 2021. p. 1-6.

ZHANG, X.; ZHANG, G.; YU, S. S. **Review of control techniques for interleaved buck converters: Control strategies, efficiency optimization and phase shedding**. Chinese Journal of Electrical Engineering, v. 11, n. 1, p. 40-58, mar. 2025.