

**UNIVERSIDADE REGIONAL INTEGRADA DO ALTO URUGUAI E DAS MISSÕES  
PRÓ-REITORIA DE ENSINO, PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
CÂMPUS DE ERECHIM  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS E CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**AFONSO CARLOS HINKEL JÚNIOR**

**ANÁLISE E IMPLEMENTAÇÃO DE UM CONVERSOR BOOST *BRIDGELESS* PFC**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**ERECHIM - RS  
2019**

**AFONSO CARLOS HINKEL JÚNIOR**

**ANÁLISE E IMPLEMENTAÇÃO DE UM CONVERSOR BOOST *BRIDGELESS* PFC**

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharias e Ciência da Computação da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – Câmpus de Erechim.**

**Orientador:** Prof. Adilson Luís Stankiewicz

**Coorientador:** Prof. Cássio Luciano Baratieri

**ERECHIM - RS**

**2019**

**AFONSO CARLOS HINKEL JÚNIOR**

**ANÁLISE E IMPLEMENTAÇÃO DE UM CONVERSOR BOOST *BRIDGELESS* PFC**

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharias e Ciência da Computação da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – Câmpus de Erechim.**

Erechim, 13 de dezembro de 2019.

**BANCA EXAMINADORA**



---

Prof. Me. Adilson Luis Stankiewicz (Orientador)  
URI Erechim



---

Prof. Dr. Cássio Luciano Baratieri (Coorientador)  
URI Erechim



---

Prof. Esp. Glênio Luis de Vasconcellos Rigoni (Examinador)  
URI Erechim



---

Prof.ª Ma. Camila Sampaio dos Reis (Examinadora)  
URI Erechim

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo analisar e projetar um conversor Boost *Bridgeless* PFC. Nesse sentido, inicialmente expõem-se conceitos importantes para o entendimento do trabalho, tais como fator de potência, distorções harmônicas e formas de se realizar a correção do fator de potência. Além disso, aborda-se o conversor Boost convencional e o conversor Boost *Bridgeless*, exaltando-se suas principais características. A fim de cumprir com os objetivos específicos do trabalho, a metodologia empregada analisa os modos de operação do conversor Boost *Bridgeless* e propõe seu funcionamento no Modo de Condução Contínua (MCC). Sendo assim, inicia-se o projeto do circuito de potência e controle, os quais são simulados a partir dos *softwares* PSIM e Matlab. Após isso, parte-se para a implementação prática do protótipo por intermédio da fabricação das Placas de Circuito Impresso (PCIs) dos circuitos de potência, controle e retificação. Os resultados de simulação satisfazem as metas propostas, realizando de forma adequada a correção de fator de potência, obtendo-se o valor de 0,998 para FP e 5,14% para *Total Harmonic Distortion* (THD). A implementação prática foi iniciada, obtendo-se resultados parciais.

**Palavras-chave:** Boost *Bridgeless*. PFC. MCC.

## ABSTRACT

The present work aims to analyze and design a Boost Bridgeless converter. PFC. In this sense, initially are expose indispensable concepts for the understanding of the work such as power factor, harmonic distortions and ways to perform the correction of the power factor. In addition, the conventional Boost converter and the Boost Bridgeless converter are discussed, extolling its main features. In order to meet the objectives specifics to the work, the methodology employed analyzes the operating modes of the inverter Boost Bridgeless and proposes its operation in Continuous Driving Mode (MCC). Thus, the design of the power and control circuit begins, which are simulated from PSIM and Matlab softwares. After that, start with the practical implementation of the prototype through the manufacture of the printed circuit boards (PCIs) of the power circuits, control and rectification. Simulation results meet the proposed goals, performing adequately the power factor correction, obtaining the value of 0.998 for PF and 5.14 % to Total Harmonic Distortion (THD). However, in the practice of results not fully meet expectations as the system does not perform a factor correction power properly.

**Keywords:** Boost Brigeless. PFC. CCM.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Triângulo de potências.....	16
Figura 2 – Relevância das componentes harmônicas em sinais de tensão e corrente.....	18
Figura 3 – Formas de onda após conversão CA/CC comum (a) Tempo contínuo (b) Conteúdo harmônico.....	18
Figura 4 – Formas de onda em correção de fator de potência ativa (a) Tempo contínuo (b) Conteúdo harmônico.....	20
Figura 5 – Conversor CA/CC Boost convencional.....	20
Figura 6 – Corrente no indutor do conversor Boost operando no: (a) MCD; (b) MCL; (c) MCC.....	21
Figura 7 – Funcionamento do conversor Boost convencional com a chave aberta.....	22
Figura 8 – Funcionamento do conversor Boost convencional com a chave fechada.....	23
Figura 9 – Conversor CA/CC Boost <i>Bridgeless</i> .....	24
Figura 10 – Fluxograma da estrutura organizacional do projeto.....	26
Figura 11 – Operação do conversor Boost <i>Bridgeless</i> no semiciclo positivo - etapa 1....	28
Figura 12 – Operação do conversor Boost <i>Bridgeless</i> no semiciclo positivo - etapa 2....	28
Figura 13 – Operação do conversor Boost <i>Bridgeless</i> no semiciclo negativo - etapa 1....	29
Figura 14 – Operação do conversor Boost <i>Bridgeless</i> no semiciclo negativo - etapa 2....	29
Figura 15 – Diagrama de controle.....	32
Figura 16 – Diagrama de bode da planta $G_{id}$ .....	34
Figura 17 – Resposta ao degrau para a malha de corrente.....	34
Figura 18 – Parâmetros da malha de corrente.....	35
Figura 19 – Diagrama de bode da planta $G_{vi}$ .....	36
Figura 20 – Resposta ao degrau para a malha de tensão.....	36
Figura 21 – Parâmetros da malha de tensão.....	37
Figura 22 – Circuito de potência conversor Boost <i>Bridgeless</i> .....	39
Figura 23 – Circuito de controle PFC.....	40
Figura 24 – PCI de Potência.....	41
Figura 25 – Diagrama de blocos CI UC3854.....	42
Figura 26 – PCI Retificadora.....	43
Figura 27 – Circuito de controle com CI UC3854.....	44
Figura 28 – PCI de Controle.....	44
Figura 29 – Protótipo de bancada do conversor Boost <i>Bridgeless</i> PFC.....	47
Figura 30 – Tensão $V_o$ e corrente $I_o$ nos terminais de saída do conversor Boost <i>Bridgeless</i>	49
Figura 31 – Análise transitória da tensão de saída $V_o$ .....	49
Figura 32 – Potência CA de entrada e potência CC de saída do circuito.....	50
Figura 33 – Corrente de referência da malha de controle.....	50
Figura 34 – Tensão da rede e corrente no indutor em pu.....	51
Figura 35 – Transitório de corrente no indutor Boost.....	52

Figura 36 – Corrente no indutor Boost durante o semiciclo positivo da rede em comparação a corrente de referência da malha de controle.....	53
Figura 37 – Espectro harmônico de corrente no indutor Boost.....	53
Figura 38 – Corrente no diodo $D_1$ .....	54
Figura 39 – Corrente na chave $S_1$ .....	55
Figura 40 – Corrente na entrada do conversor sem a atuação do controle.....	56
Figura 41 – Sinal PWM gerado pelo controlador.....	56
Figura 42 – Corrente de entrada e sinal PWM de controle.....	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações de projeto do conversor Boost <i>Bridgeless</i> PFC .....	30
Tabela 2 – Corrente nos dispositivos semicondutores.....	38
Tabela 3 – Elementos passivos.....	39
Tabela 4 – Componentes da PCI de potência.....	40
Tabela 5 – Componentes da PCI de controle .....	45
Tabela 6 – Componentes do protótipo de bancada.....	46
Tabela 7 – Valores de fator de potência e THD obtidos.....	52

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CI	Circuito Integrado
EMI	<i>Electromagnetic Interference</i>
FP	Fator de Potência
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
MCC	Modo de Condução Contínua
MCD	Modo de Condução Descontínua
MCL	Modo de Condução Limite
NTC	<i>Negative Temperature Coefficient</i>
PCI	Placa de Circuito Impresso
PI	Proporcional e Integral
PFC	<i>Power Factor Correction</i>
pu	Valor por Unidade
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
TC	Transformador de Corrente
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$C_v$	Controlador da malha de tensão
$C_i$	Controlador da malha de corrente
$C_o$	Capacitor de saída [F]
$d$	<i>Duty cycle</i> controlado
$D$	<i>Duty Cycle</i>
$D_m$	<i>Duty cycle</i> médio
$D_n$	Diodo n, com $n = \{1,2,3,4\}$
$e_v$	Erro da malha de tensão [pu]
$e_i$	Erro da malha de corrente [pu]
$f_c$	Frequência de comutação [Hz]
$f_r$	Frequência da rede elétrica [Hz]
$G_{id}$	Função de transferência da malha de corrente
$G_{pi}$	Função de transferência do controlador PI
$G_{vi}$	Função de transferência da malha de tensão
$I_{D_{rms}}$	Corrente eficaz no diodo retificador [A]
$\overline{I_D}$	Corrente média no diodo retificador [A]
$I_{DS_{rms}}$	Corrente eficaz no diodo antiparalelo da chave semicondutora [A]
$\overline{I_{DS}}$	Corrente média no diodo antiparalelo da chave semicondutora [A]
$I_g$	Corrente de gate dos dispositivos semicondutores
$i_{lb}$	Corrente no indutor Boost [A]
$i_{lb_{rms}}$	Corrente eficaz no indutor Boost [A]
$i_{lb_{pu}}$	Corrente no indutor Boost [pu]
$I_o$	Corrente de saída [A]
$I_{S_{rms}}$	Corrente eficaz na chave semicondutora [A]
$\overline{I_S}$	Corrente média na chave semicondutora [A]
$I_{cc}$	Corrente no barramento CC [A]
$I_{rms}$	Corrente RMS [A]
$I_n$	Amplitude harmônica de ordem n [A]
$I_1$	Amplitude da componente fundamental [A]
$K_p$	Ganho proporcional
$K_i$	Ganho integral
$L_b$	Indutor Boost [H]

$L_{min}$	Indutância mínima [H]
$P$	Potência ativa [W]
$P_o$	Potência de saída [W]
$R_o$	Resistor de carga [ $\Omega$ ]
$S$	Potência aparente [VA]
$S_n$	Chave semicondutora n, com $n = \{1,2\}$
$t_h$	<i>Hold up time</i> [s]
$T_i$	Tempo integral [s]
$V_{ac}$	Tensão CA [V]
$V_{rms}$	Tensão RMS [V]
$V_{in}$	Tensão de entrada [V]
$V_o$	Tensão de saída [V]
$V_{omin}$	Tensão mínima de saída [A]
$V_{in_{pu}}$	Tensão de entrada [pu]
$V_{o*}$	Tensão de saída de referência [V]
$V_{o_{pu}}$	Tensão de saída [pu]
$V_p$	Tensão de pico [V]
$\varphi$	Ângulo de defasagem entre tensão e corrente [rad]
$\alpha$	Relação entre tensão de entrada e tensão de pico de saída
$\mu_m$	Sinal modulante
$\Delta V_o$	Ondulação de tensão na saída [%]

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>1.1 Objetivo Geral</b> .....	14
1.1.1 Objetivos Específicos .....	14
<b>1.2 Organização do Trabalho</b> .....	14
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	16
<b>2.1 Fator de Potência</b> .....	16
2.1.1 Distorções Harmônicas .....	17
2.1.2 Correção de Fator de Potência .....	18
2.1.2.1 Correção Passiva .....	19
2.1.2.2 Correção Ativa .....	19
<b>2.2 Conversor Boost Convencional</b> .....	20
2.2.1 Modos de Operação .....	21
2.2.2 Funcionamento com a Chave Semicondutora Aberta .....	22
2.2.3 Funcionamento com a Chave Semicondutora Fechada .....	22
<b>2.3 Conversor Boost <i>Bridgeless</i></b> .....	23
2.3.1 Controle do Conversor Boost <i>Bridgeless</i> PFC .....	24
2.3.2 Circuito Integrado UC3854 .....	25
2.3.3 Modulação PWM .....	25
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	26
<b>3.1 Etapas de Operação do conversor Boost <i>Bridgeless</i></b> .....	27
3.1.1 Semiciclo Positivo .....	27
3.1.2 Semiciclo Negativo .....	28
<b>3.2 Projeto do Circuito de Potência</b> .....	29
3.2.1 Especificações de Projeto .....	30
3.2.2 Dimensionamento de Resistência de Carga e <i>Duty Cycle</i> .....	30
3.2.3 Dimensionamento do Indutor .....	31
3.2.4 Dimensionamento do Capacitor .....	31
<b>3.3 Projeto do Circuito de Controle</b> .....	32
3.3.1 Controlador de Corrente de Entrada .....	33
3.3.2 Controlador de Tensão .....	35
<b>3.4 Análise das Correntes nos Semicondutores</b> .....	37
3.4.1 Corrente nas Chaves .....	37

3.4.2	Corrente nos Diodos Antiparalelos das Chaves .....	38
3.4.3	Corrente nos Diodos Retificadores .....	38
<b>3.5</b>	<b>Diagrama de Simulação do Conversor Boost <i>Bridgeless</i> PFC .....</b>	<b>39</b>
<b>3.6</b>	<b>Implementação Prática .....</b>	<b>40</b>
3.6.1	PCI de Potência .....	40
3.6.2	PCI de Controle .....	41
3.6.3	Testes de Bancada .....	45
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>48</b>
<b>4.1</b>	<b>Validação do Conversor Boost <i>Bridgeless</i> .....</b>	<b>48</b>
4.1.1	Tensão e Corrente de saída .....	48
4.1.2	Potência de Entrada e Saída .....	49
4.1.3	Malha de Controle .....	50
<b>4.2</b>	<b>Análise de Correção do Fator de Potência .....</b>	<b>51</b>
4.2.1	Corrente no indutor Boost .....	52
4.2.2	Análise Harmônica .....	53
<b>4.3</b>	<b>Corrente nos Semicondutores .....</b>	<b>54</b>
4.3.1	Corrente nos Diodos .....	54
4.3.2	Corrente nas Chaves .....	54
<b>4.4</b>	<b>Implementação Prática .....</b>	<b>55</b>
4.4.1	Hipóteses de melhorias .....	57
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>59</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>60</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A demanda de energia elétrica vem crescendo consideravelmente nos últimos anos e tem sido fator de preocupação pelos órgãos governamentais em todo o mundo, tanto no que diz respeito aos impactos ambientais gerados, como na gestão e qualidade de energia elétrica do sistema de distribuição de energia. As perdas ocasionadas desde a geração e distribuição de energia, até fugas de corrente de diversas naturezas, provocam a redução da potência ativa disponível (ROGGIA, 2009).

Nesse sentido, as preocupações com perturbações harmônicas se intensificaram a partir da década de 1990, quando a utilização de equipamentos eletrônicos começou a atingir grandes proporções. Esses, em muitos casos, são causadores da deterioração da qualidade de energia devido às deformações das formas de onda de tensões e correntes que eles geram (MORENO, 2008).

Um importante critério de avaliação da eficiência e qualidade de energia é o fator de potência. Ele indica o percentual de energia ativa que está sendo consumido em relação à energia aparente demandada em um dado equipamento ou sistema elétrico. O baixo fator de potência pode propiciar diversos problemas ao sistema de energia, tais como perdas e redução da eficiência do equipamento (FERRAZ, 2012; ROGGIA, 2009).

Sendo assim, meios de correção de fator de potência (*Power Factor Correction*, PFC) são de suma importância para o funcionamento de equipamentos e sistemas elétricos. Com essa correção há diminuição de energia reativa consumida, proporcionando maior eficiência, qualidade de energia e aumento da vida útil de dispositivos (FERRAZ, 2012).

Com a evolução tecnológica, a utilização de técnicas ativas vem ganhando espaço na correção de fator de potência principalmente em equipamentos eletrônicos, acionamento de motores e circuitos de amplificação de potência (FORTUNA, 2017; MOREANO, 2018).

Conforme Damasceno (2006), nas técnicas ativas utilizam-se basicamente conversores estáticos de energia. Estes circuitos são complexos, mas proporcionam performance satisfatórias mediante ao controle adequado de desempenho.

Um dos conversores mais utilizados para o PFC é o conversor Boost. Essa topologia tem algumas vantagens estruturais para o PFC, tais como a característica de elevação de tensão e a presença de um indutor na entrada, filtrando variações abruptas de tensão da rede (ROGGIA, 2009).

Entretanto, devido algumas desvantagens apresentadas pelo conversor Boost convencional, variações na sua estrutura apresentadas pelo conversor Boost *Bridgeless* surgem como uma

opção mais eficiente no PFC. Nessa topologia, a retificação está intrínseca ao processo de correção de fator de potência, descartando a utilização de ponte de diodos. Dessa forma, reduzem-se perdas por condução, e as perdas nos semicondutores também diminuem decorrente da operação de apenas uma das duas chaves semicondutoras a cada semiciclo da rede (BELTRAME, 2009; HUBER; JANG; JOVANOVIĆ, 2008).

Diante do exposto, este trabalho propõe o projeto de um conversor Boost *Bridgeless* PFC, executando desde a análise de modos de operação até o projeto do circuito de potência e circuito de controle, contemplando a construção do protótipo do sistema.

## 1.1 Objetivo Geral

Analisar, projetar e implementar um Conversor Boost *Bridgeless* para correção de fator de potência (*Power Factor Correction*, PFC).

### 1.1.1 Objetivos Específicos

- Revisar a literatura a respeito do Conversor Boost *Bridgeless* PFC, buscando diferentes técnicas e métodos para sua implementação;
- Analisar as etapas de operação do sistema e realizar a modelagem matemática para plena compreensão do seu funcionamento;
- Diferenciar o conversor Boost *Bridgeless* PFC e o Boost PFC, evidenciando as principais características de cada um deles;
- Projetar as etapas de potência e controle do conversor, validando-as por intermédio de simulação computacional;
- Implementar protótipo de bancada e obter resultados práticos de correção de fator de potência.

## 1.2 Organização do Trabalho

O capítulo 1 apresenta a contextualização no que se refere à correção ativa de fator de potência, tendo em destaque o conversor *Boost Bridgeless* PFC. Ainda, apresenta o objetivo geral e os objetivos específicos do projeto.

O capítulo 2 apresenta os principais conceitos a respeito do fator de potência, distorções harmônicas, bem como as formas de realizar a correção de fator de potência. Além disso, aborda-se o conversor Boost convencional e o conversor Boost *Bridgeless*, apresentando seus modos de operação, suas principais características, vantagens e desvantagens.

Por conseguinte, o capítulo 3 primeiramente modela o conversor Boost *Bridgeless*. Em seguida realiza o projeto do circuito de potência com critérios de projeto, além do dimensionamento da carga, razão cíclica, indutância e capacitância. Ademais, propõe o circuito de controle, a análise das correntes nos dispositivos semicondutores e o diagrama de simulação do conversor, além de apresentar os procedimentos metodológicos utilizados na implementação prática do conversor.

O capítulo 4 dispõe os resultados das simulações e da implementação em bancada dos circuitos de controle e potência, evidenciando as principais respostas de ambas abordagens, bem como propostas de melhorias do projeto. Por fim, o capítulo 5 apresenta as considerações finais do trabalho.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são apresentadas as principais definições acerca do conversor Boost *Bridgeless* PFC de modo a contribuir para o entendimento do sistema como um todo. Inicialmente é abordado o fator de potência, as distorções harmônicas e as diferentes formas de se realizar a correção do fator de potência. A seguir apresenta-se o conversor Boost convencional e seus principais conceitos. Por fim, expõe-se o conversor Boost *Bridgeless* e de que forma ele pode contribuir para a correção do fator de potência.

### 2.1 Fator de Potência

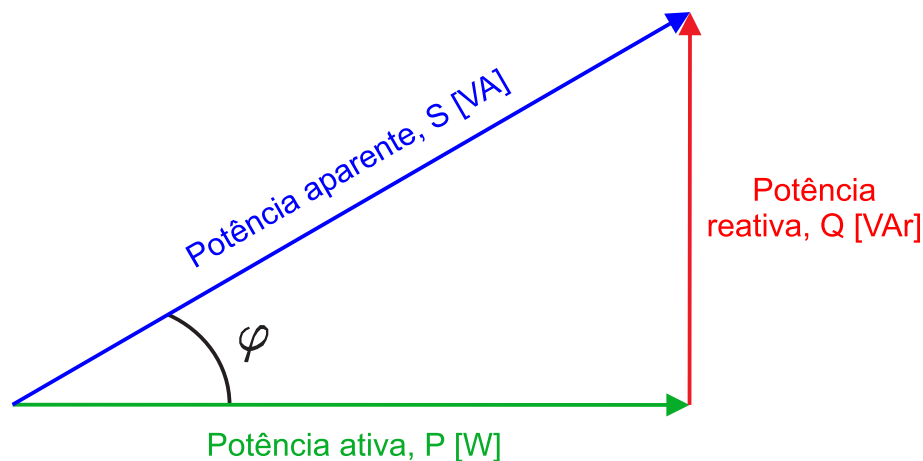
Fator de potência (FP) é um importante indicador que informa a eficiência com a qual a energia está sendo consumida. Em termos técnicos, indica a defasagem entre tensão elétrica e corrente elétrica, em um circuito de corrente alternada, dada pela razão da potência ativa ou útil (P) e a potência aparente ou complexa (S) (ROGGIA, 2009; DAMASCENO, 2006), conforme representação do triângulo de potências da figura 1.

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{V_{rms} I_{rms}} \quad (2.1)$$

onde  $V_{rms}$  e  $I_{rms}$  referem-se, respectivamente, aos valores de tensão eficaz e corrente eficaz. Em sistemas com formas de ondas senoidais, o fator de potência também pode ser representado pelo cosseno do ângulo de defasagem entre as formas de onda de tensão e corrente,  $\varphi$ .

$$FP = \cos(\varphi) \quad (2.2)$$

Figura 1 – Triângulo de potências



Fonte: Elaborada pelo autor

O FP é um número adimensional que varia de zero a um, e o seu valor ótimo é a unidade, obtida quando a corrente elétrica está na forma senoidal e está em fase com a tensão elétrica. Neste momento a potência ativa corresponde a potência aparente do sistema (DAMASCENO, 2006).

### 2.1.1 Distorções Harmônicas

Outro fator que interfere no fator de potência, e conseqüentemente na eficiência da energia elétrica, são as distorções harmônicas.

A *International Electrotechnical Commission* (IEC), por meio de normas aplicadas na comunidade europeia, define os limites de emissões harmônicas na rede. A IEC 613000-3-2 é aplicada em equipamentos elétricos e eletrônicos que demandam uma corrente de entrada igual ou inferior a 16 A por fase, enquanto a IEC 61000-3-4 destina-se a equipamentos elétricos e eletrônicos que demandam corrente de entrada maiores que 16 A por fase.

Define-se *Total Harmonic Distortion* (THD) como a relação entre o somatório do valor eficaz das componentes harmônicas da corrente e de sua componente fundamental (ERICKSON; MAKSIMOVIC, 2001).

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (2.3)$$

onde  $I_n$  é a amplitude harmônica de ordem  $n$  e  $I_1$  é a amplitude da fundamental.

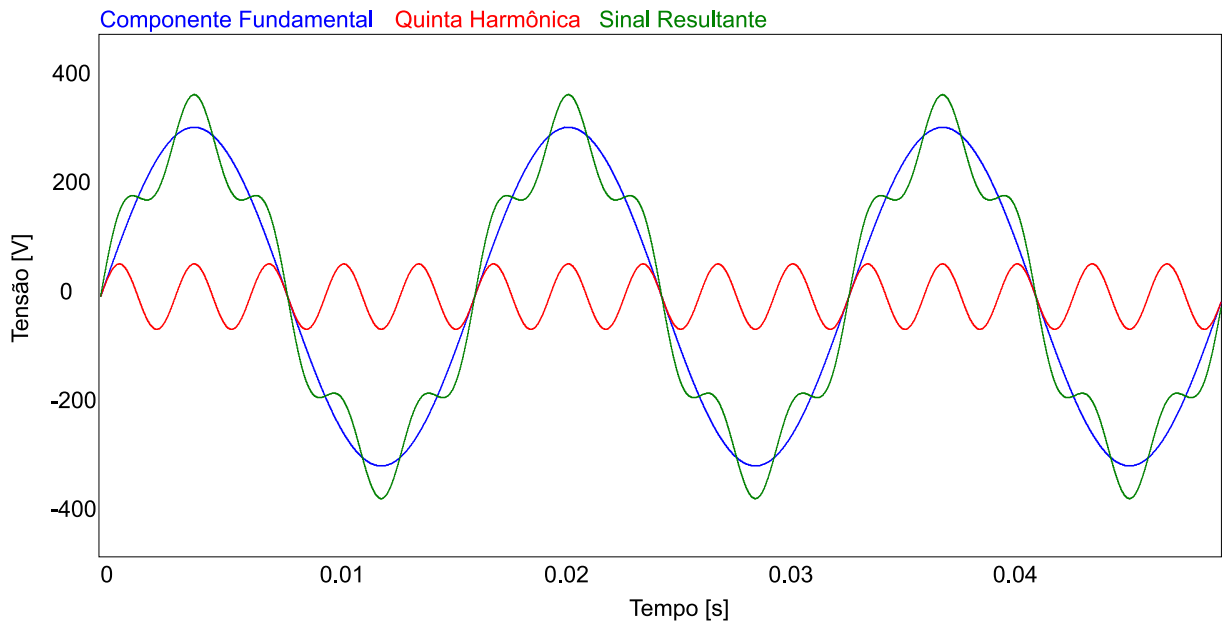
A equação (2.3) mostra a relação direta entre o Total Harmonic Distortion (THD) e o fator de potência.

$$THD = \sqrt{\frac{1}{FP^2} - 1} \quad (2.4)$$

A figura 2 exemplifica a interferência de uma componente harmônica no sinal resultante no domínio do tempo, assim como a figura 3, que mostra a interferência dos componentes harmônicos em um conversor CA/CC comum, em tempo contínuo (a) e seu espectro harmônico (b).

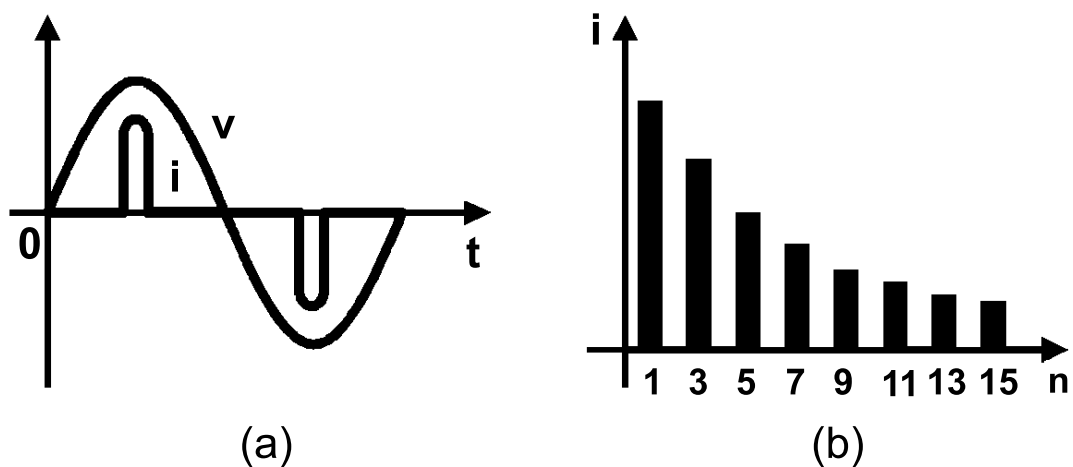
Consoante ao exposto, observa-se a grande importância do controle do conteúdo harmônico da rede, bem como a manutenção de um alto fator de potência (ROGGIA, 2009).

Figura 2 – Relevância das componentes harmônicas em sinais de tensão e corrente



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 3 – Formas de onda após conversão CA/CC comum (a) Tempo contínuo (b) Conteúdo harmônico



Fonte: Adaptada de Roggia (2009)

### 2.1.2 Correção de Fator de Potência

Segundo Ferraz (2012), um FP baixo pode ocasionar diversos problemas ao sistema de energia. Entre os principais, estão as perdas de energia e a redução da eficiência de equipamentos. Os causadores desses problemas são as cargas indutivas, capacitivas ou mistas, que interferem no fator de potência do sistema. Dessa forma, maneiras de correção do fator de potência são imprescindíveis para um bom funcionamento do sistema.

Com a realização da correção do fator de potência, o consumo de energia reativa diminui, os sistemas podem se tornar mais eficientes, a qualidade de energia elétrica aumenta, o aquecimento dos equipamentos diminui e tendem a ter uma vida útil maior (FERRAZ, 2012).

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) não cobra a correção de fator de potência para unidades consumidoras de baixa tensão. Entretanto, por meio do Artigo número 95 da Resolução ANEEL número 414, exige-se que as indústrias mantenham o fator de potência de suas respectivas instalações em no mínimo 0,92 capacitivo nas primeiras seis horas do dia, e 0,92 indutivo das 06h até 23h59min, acarretando multa prevista na legislação em caso de não cumprimento do estabelecido.

Segundo Damasceno (2006), há diversas formas de se realizar a correção do fator de potência, sendo usualmente classificados conforme a complexidade, diferenciando os circuitos PFC ativos dos passivos.

#### 2.1.2.1 Correção Passiva

Os circuitos passivos utilizam apenas componentes passivos, como indutores, resistores e capacitores. Por outro lado, nos circuitos ativos, além de componentes passivos, são empregados conversores comutados.

Conforme Mamede (2017), plantas industriais comumente utilizam banco de capacitores para realizar a correção do fator de potência, os quais são componentes robustos e de fácil dimensionamento. Tais equipamentos fornecem energia reativa capacitiva com o intuito de equilibrar a potência reativa indutiva atribuída a rede por intermédio dos motores das máquinas.

#### 2.1.2.2 Correção Ativa

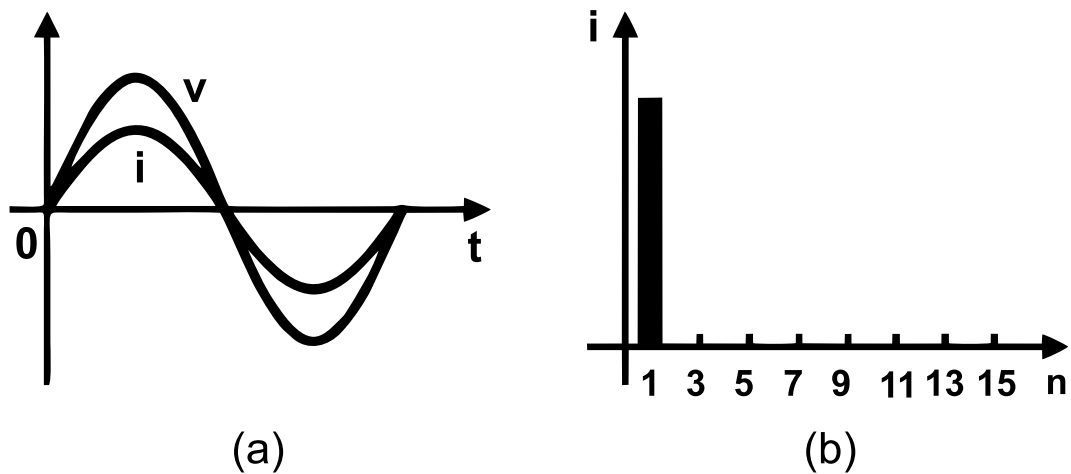
Com a evolução tecnológica, a aplicação de fontes chaveadas vem ganhando espaço na correção de fator de potência principalmente em equipamentos eletrônicos, acionamento de motores e circuitos de amplificação de potência (FORTUNA, 2017; MOREANO, 2018).

Conforme Pieniz (2006), apesar dos circuitos passivos serem mais simples, robustos e de menor custo, são adequados apenas para baixas potências devido ao grande volume e massa associados aos elementos passivos.

Nas técnicas ativas de PFC são utilizados basicamente conversores estáticos de energia. Estes circuitos são complexos, mas proporcionam performance satisfatória mediante ao controle adequado de seu desempenho (DAMASCENO, 2006). Tais técnicas também produzem harmô-

nicos, mas em alta frequência, e podem ser atenuados com filtros de menor volume (DIAS, 2017). A figura 4 ilustra as formas de onda de tensão e corrente, bem como a injeção de conteúdo harmônico após circuitos ativos de PFC.

Figura 4 – Formas de onda em correção de fator de potência ativa (a) Tempo contínuo (b) Conteúdo harmônico

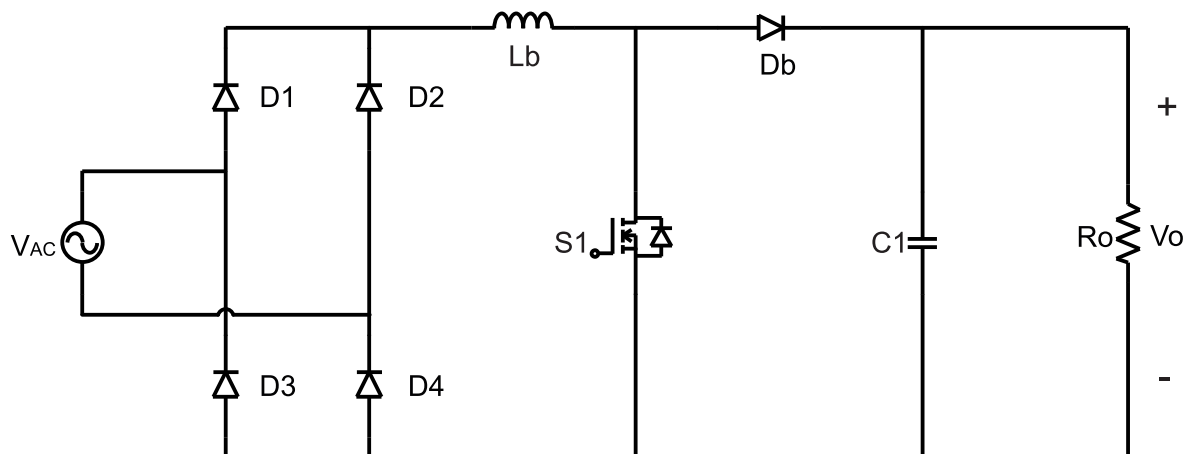


Fonte: Adaptada de Roggia (2009)

## 2.2 Conversor Boost Convencional

O conversor Boost convencional é utilizado para diversas aplicações, sendo umas das principais a correção de fator de potência. Essa topologia funciona basicamente como um elevador de tensão, já que a mínima tensão média na saída é, teoricamente, igual a tensão de entrada (MARTINS; BARBI, 2011).

Figura 5 – Conversor CA/CC Boost convencional



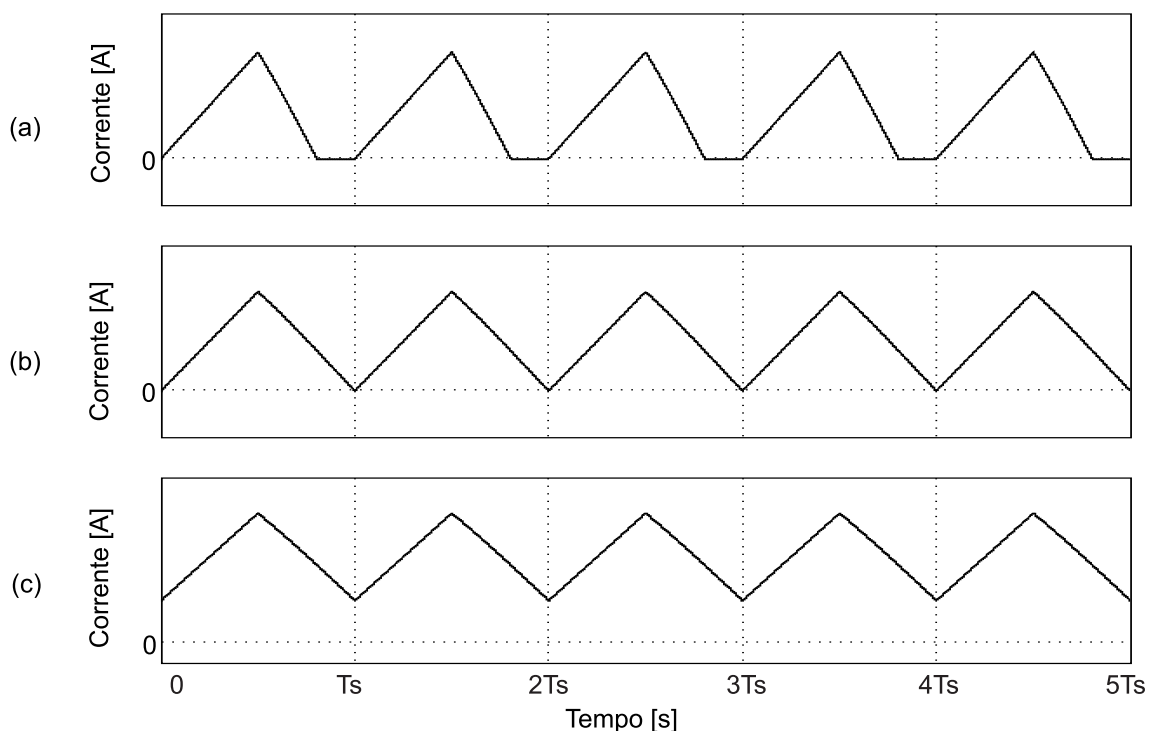
Fonte: Elaborada pelo autor

A entrada do conversor Boost é caracterizada como um sinal de tensão contínua, de valor fixo, sem ondulação e, por intermédio da comutação periódica realizada por MOSFET ou IGBT, fornece na saída um valor de tensão predeterminada, maior que a da entrada, contínua e sem inversão de polaridade (ARRABAÇA; GIMENEZ, 2014; HART, 2011).

### 2.2.1 Modos de Operação

De acordo com Arrabaça e Gimenez (2014), existem três modos de operação do conversor Boost: Modo de Condução Contínua (MCC), Modo de Condução Limite (MCL) e Modo de Condução Descontínua (MCD).

Figura 6 – Corrente no indutor do conversor Boost operando no: (a) MCD; (b) MCL; (c) MCC



Fonte: Elaborada pelo autor

Conforme exemplificado na figura 6, que mostra os três tipos de operação do Boost, no MCC a comutação da chave é realizada antes da corrente elétrica no indutor chegar a zero. No MCL, a corrente elétrica no indutor atinge zero exatamente no final do período de chaveamento. No MCD, o chaveamento acontece após a corrente elétrica no indutor estiver nula (ARRABAÇA; GIMENEZ, 2014).

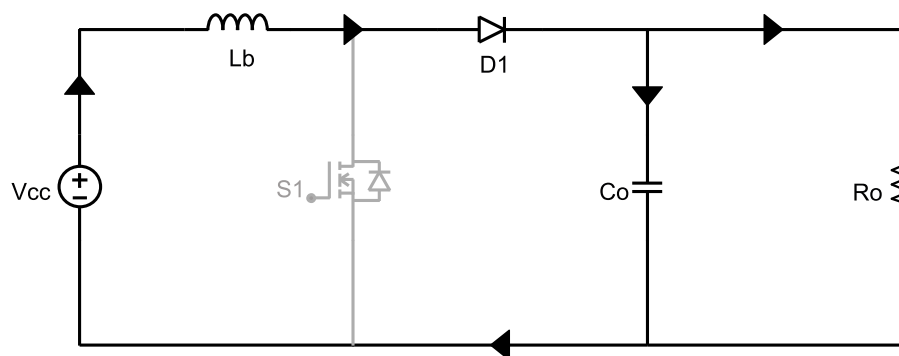
De acordo com Roggia (2009), geralmente aplica-se o MCD para baixas potências, devido ao chaveamento com corrente nula, o que reduz as perdas por comutação, além de não ter

recuperação reversa do diodo. Para altas potências utiliza-se o MCC por ter menores perdas por condução, bem como reduzida formação de Interferências Eletromagnéticas (*Electromagnetic interferences*, EMI).

### 2.2.2 Funcionamento com a Chave Semicondutora Aberta

Enquanto a chave  $S_1$  está aberta, funcionando como um circuito aberto, o diodo  $D_1$  é polarizado diretamente, fornecendo um caminho para a corrente elétrica armazenada no indutor  $L_b$  como representado na figura 7. Essa corrente, além de alimentar a carga, dissipa energia para o carregamento do capacitor,  $C_o$ . A tensão média no indutor, no caso do chaveamento periódico, será sempre nula (HART, 2011).

Figura 7 – Funcionamento do conversor Boost convencional com a chave aberta



Fonte: Elaborada pelo autor

### 2.2.3 Funcionamento com a Chave Semicondutora Fechada

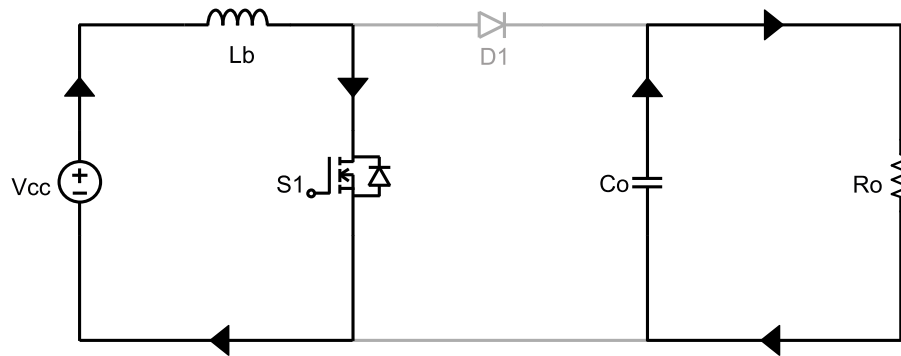
Quando a chave está fechada ou em curto-circuito, conforme ilustrado na figura 8, a fonte de tensão de entrada alimenta o indutor, aumentando a corrente elétrica linearmente. A energia armazenada no capacitor é dissipada para a carga.

A relação entre tensão de entrada  $V_{in}$ , taxa de trabalho (*Duty Cycle*,  $D$ ) - que refere-se ao percentual de tempo em que o sinal de controle permanece ativo em relação ao período completo da onda - e tensão de saída,  $V_{out}$ , pode ser expressa pela equação (2.5):

$$V_o = \frac{V_{in}}{1 - D} \quad (2.5)$$

Nota-se que, caso a chave fique aberta infinitamente e  $D$  seja zero, a tensão de saída será igual a tensão de entrada. Analogamente, conforme a taxa de trabalho se aproxima de um, a tensão de saída tende ao infinito.

Figura 8 – Funcionamento do conversor Boost convencional com a chave fechada



Fonte: Elaborada pelo autor

### 2.3 Conversor Boost *Bridgeless*

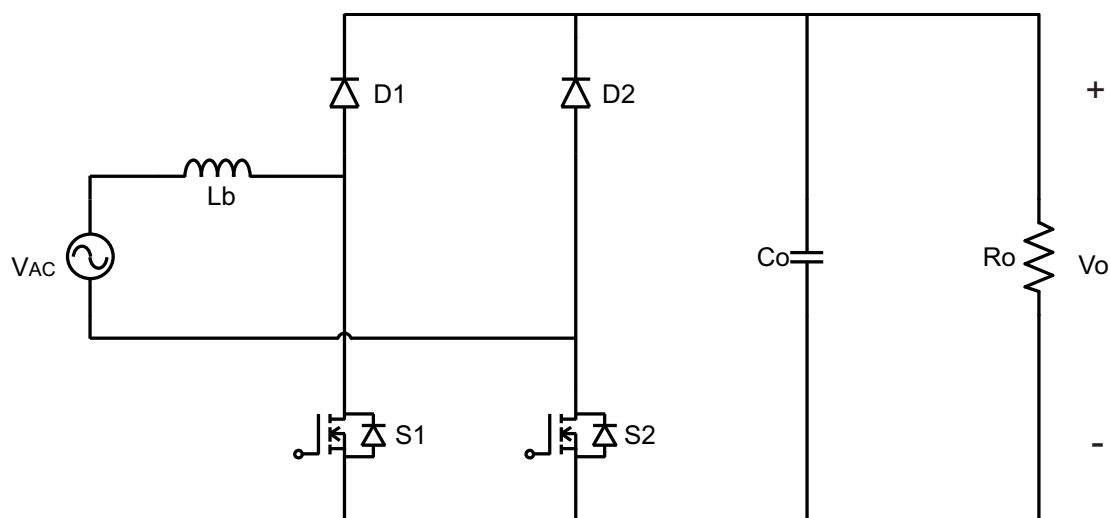
O conversor Boost *Bridgeless*, representado na figura 9, também conhecido como Dual Boost ou Semi-Boost simétrico, surge como uma opção mais eficiente na correção de fator de potência em relação ao conversor Boost convencional. Essa topologia insere a retificação diretamente ao processo de correção do fator de potência, descartando a utilização da ponte de diodos. Dessa forma, reduzem-se as perdas por condução, já que em qualquer instante, somente dois semicondutores podem estar no fluxo de potência (HUBER; JANG; JOVANOVIĆ, 2008; SHANTHI; SEYEZHAI, 2018; AHAMAD et al., 2016).

Além disso, há duas chaves semicondutoras nessas topologias ( $S_1$  e  $S_2$ ), mas somente uma delas entra em operação a cada semiciclo da tensão de entrada. Sendo assim, a corrente sobre as chaves semicondutoras diminui, contribuindo para a redução das perdas nos semicondutores Beltrame (2009).

Liu e Smedley (2004) e Beltrame (2009) citam as principais características do conversor Boost *Bridgeless*:

- Alta eficiência;
- Alta confiabilidade;
- Aplicável a maiores níveis de potência, se comparado ao Boost convencional;
- Boa resposta dinâmica para significativas variações de carga;
- Eliminação da ponte retificadora;
- Maior custo e complexidade no controle em comparação ao Boost convencional;
- Não é possível isolamento entre os terminais da entrada e da saída.

Figura 9 – Conversor CA/CC Boost *Bridgeless*



Fonte: Elaborada pelo autor

Ainda, nessa topologia o indutor localiza-se no lado CA, logo após a entrada de energia da rede, podendo ser empregado tanto na entrada positiva quanto na negativa, sem mudar seu funcionamento. Essa configuração permite a redução das EMI, já que o indutor na entrada diminui o ruído de modo diferencial (BELTRAME, 2009).

Nesse sentido, Martinez e Enjeti (1996) propõem a implementação do conversor Boost *Bridgeless* PFC para o acionamento de motores monofásicos, exibindo resultados para diversas faixas de potência, entre 300 W e 1400 W.

Moriconi (2004) utiliza o Circuito Integrado (CI) de alto desempenho L4981 para o controle de um conversor Boost *Bridgeless* PFC de 800 W de potência de saída.

Huber, Jang e Jovanović (2008), Beltrame (2009) e Ahamad et al. (2016) realizam uma análise comparativa entre topologias Boost *Bridgeless*, utilizando MCC, MCD e sistema híbrido MCC/MCD.

### 2.3.1 Controle do Conversor Boost *Bridgeless* PFC

O controle do conversor Boost *Bridgeless* pode ser implementado tanto de forma analógica como digital. Como alternativa de baixo custo, pode ser utilizado o Circuito Integrado (CI) UC3854.

### 2.3.2 Circuito Integrado UC3854

O CI UC3854 da Unitrode, além de baixo custo, apresenta um desempenho satisfatório no controle de corrente. Esse CI utiliza o método de controle pela corrente média com três malhas. A primeira malha deve ter resposta rápida e sua principal função é dar referência à corrente retificada de entrada para que fique em fase com a tensão. A segunda é uma malha de tensão, responsável pela regulação da tensão de saída de acordo com o valor pré-determinado em projeto. Essa malha deve ter resposta lenta para que ondulações de frequência da segunda harmônica não sejam introduzidas na corrente de referência. A terceira malha é denominada *feed-forward*, tendo um filtro passa-baixa responsável pela compensação das variações de tensão na entrada (BELTRAME, 2008).

### 2.3.3 Modulação PWM

A Modulação por Largura de Pulso (*Pulse Width Modulation*, PWM) é comumente empregada na correção ativa de fator de potência. Nessa topologia de modulação, a amplitude permanece igual, sendo modificadas as larguras dos pulsos do sinal modulado em função da comparação entre a portadora e o sinal modulante de referência (MEDEIROS, 2010; NEPOMUCENO, 2008).

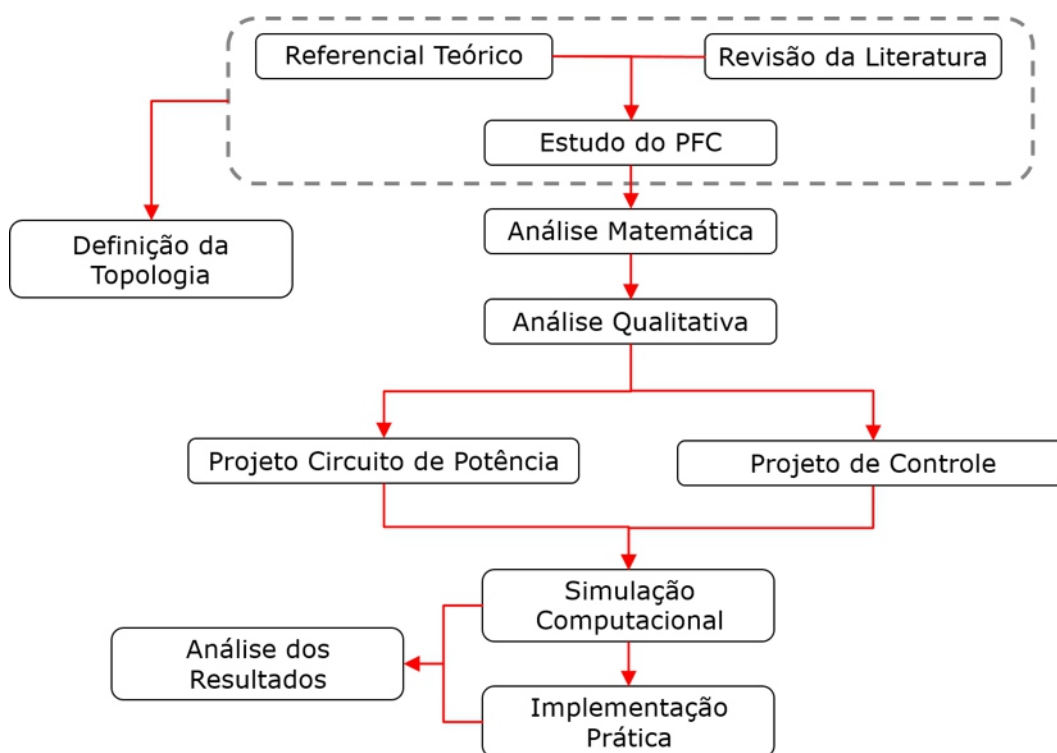
No controle do conversor Boost *Bridgeless* PFC, o PWM é utilizado para fornecer os sinais de controle às chaves semicondutoras  $S_1$  e  $S_2$ , comparando-se o sinal modulante controlado de referência com um sinal da portadora de onda triangular de alta frequência (BORGES, 2019).

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo aborda-se o projeto do conversor Boost *Bridgeless* PFC e as variantes envolvidas. O conversor Boost *Bridgeless* no MCC foi escolhido para este projeto após análise da bibliografia proposta, levando em consideração algumas vantagens por ele apresentadas, como por exemplo, baixo custo e alto rendimento. Sendo assim, para a realização da correção do fator de potência por meio desse conversor, é preciso seguir algumas etapas.

A figura 10 mostra a estrutura organizacional do projeto, evidenciando as principais etapas e a sequência lógica de execução.

Figura 10 – Fluxograma da estrutura organizacional do projeto



Fonte: Elaborada pelo autor

Na próxima seção desenvolveu-se a análise das etapas de operação do conversor Boost *Bridgeless*. Em seguida, para a elaboração do projeto do circuito de potência, primeiramente são apresentadas as condições preliminares de projeto. Na sequência, são expostas as definições da carga, razão cíclica, bem como o dimensionamento dos elementos passivos.

Além disso, procedem-se as análises de correntes nos elementos semicondutores e apresentam-se as simulações do projeto do circuito de controle, efetuadas por meio dos *softwares* PSIM, Matlab e MathCad.

Ademais, realiza-se a implementação em bancada do Conversor Boost *Bridgeless* por

intermédio da fabricação das PCIs dos módulos de potência e controle do sistema.

### 3.1 Etapas de Operação do conversor Boost *Bridgeless*

Conforme descrito na seção 2.2.1, as topologias Boost podem operar no MCC, MCD e MCL. Quando operando no MCD ou MCL, normalmente o circuito de controle torna-se mais simples, porém apresenta demasiado *ripple* de corrente, acrescentando perdas eletromagnéticas e por condução, além de aumentar o ruído durante o chaveamento (BORGES, 2019; ROGGIA, 2009).

Sendo assim, esses modos de condução são mais utilizados para aplicações de baixa potência, enquanto o MCC é geralmente empregado em conversores de média e alta potência (BORGES, 2019; BELTRAME, 2009).

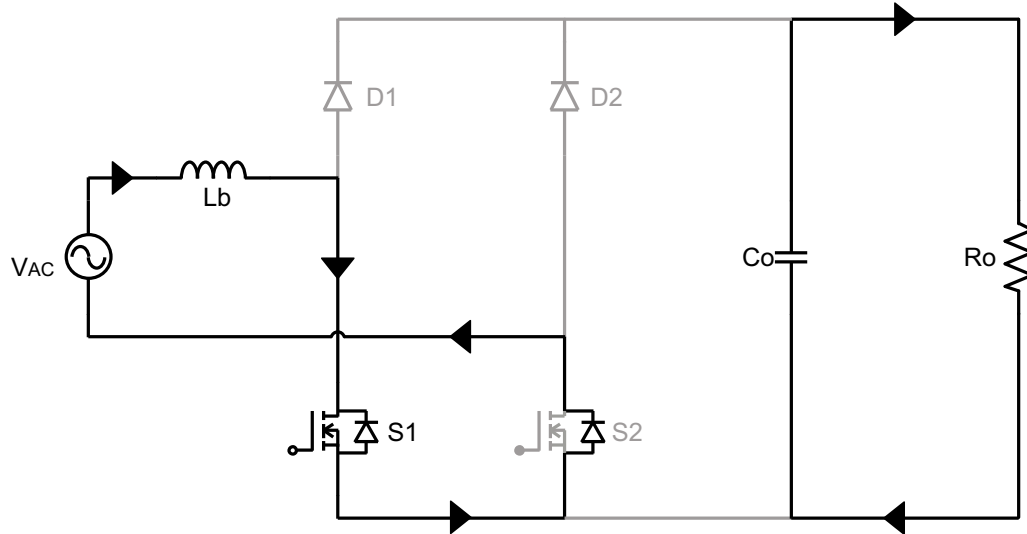
Como critério de projeto, opta-se pela atuação do conversor Boost *Bridgeless* no MCC. Conforme Beltrame (2009), esse modo de condução apresenta quatro etapas de operação, sendo duas no semiciclo positivo e duas no semiciclo negativo da rede.

#### 3.1.1 Semiciclo Positivo

Durante o semiciclo positivo da rede acontecem duas etapas de operação do conversor no MCC. A primeira é enquanto  $S_1$  está em condução. Neste momento, a corrente flui através do indutor  $L_b$ , da chave semicondutora  $S_1$  e do diodo antiparalelo de  $S_2$ , retornando ao terminal negativo da entrada. Ainda durante a primeira etapa, a carga  $R_o$  recebe a energia armazenada no capacitor  $C_o$ , conforme esquemático ilustrado na figura 11.

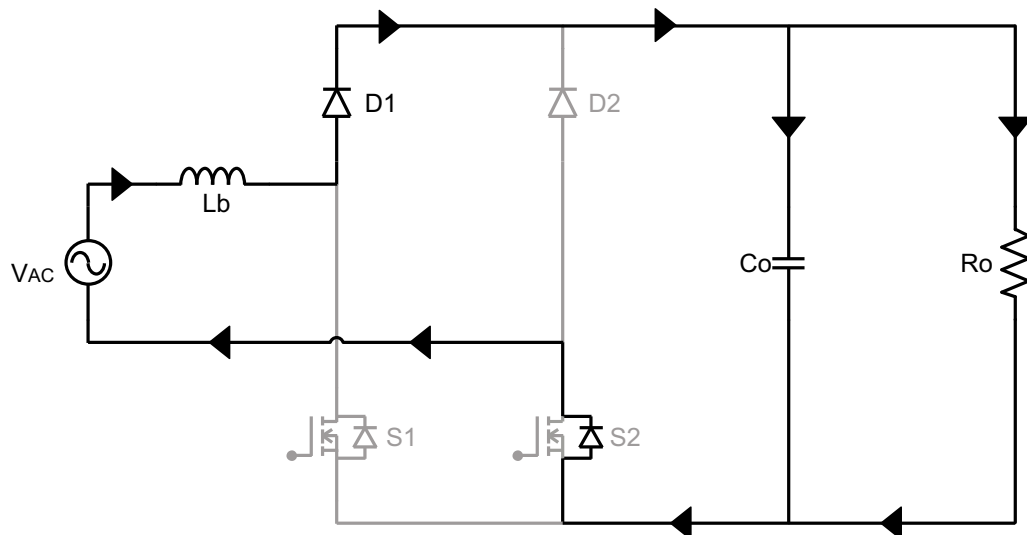
Na segunda etapa do semiciclo positivo, as chaves semicondutoras  $S_1$  e  $S_2$  permanecem fechadas. Assim, a corrente flui através do diodo  $D_1$ , do capacitor  $C_o$ , da carga  $R_o$ , fechando o caminho de corrente por meio do diodo antiparalelo de  $S_2$ , conforme figura 12.

Figura 11 – Operação do conversor Boost *Bridgeless* no semiciclo positivo - etapa 1



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 12 – Operação do conversor Boost *Bridgeless* no semiciclo positivo - etapa 2



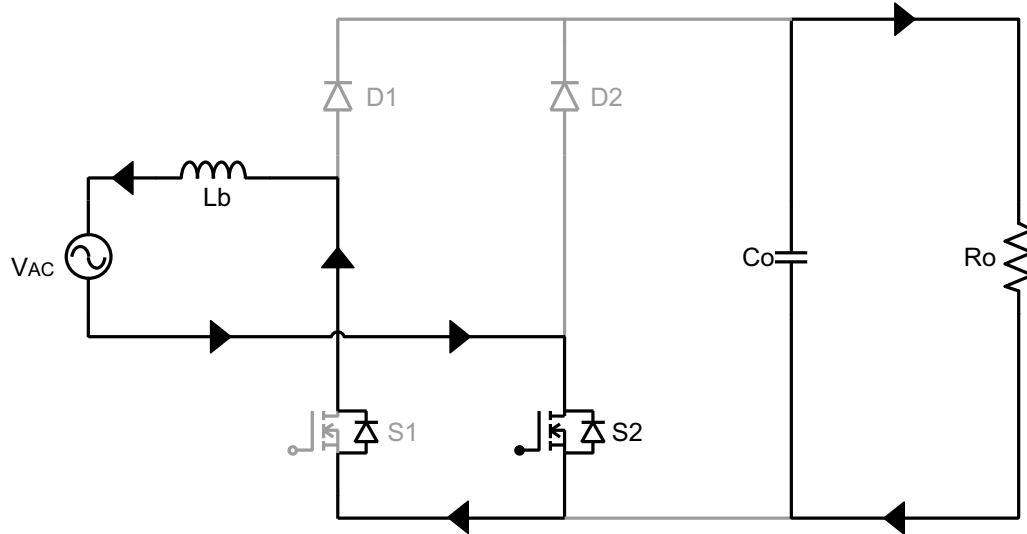
Fonte: Elaborada pelo autor

### 3.1.2 Semiciclo Negativo

A primeira etapa do semiciclo negativo é similar à primeira etapa do semiciclo positivo, a não ser pela atuação das chaves semicondutoras. Nesse estágio a corrente flui por  $S_2$ , pelo capacitor e a carga, retornando pelo diodo antiparalelo de  $S_1$ , conforme figura 13.

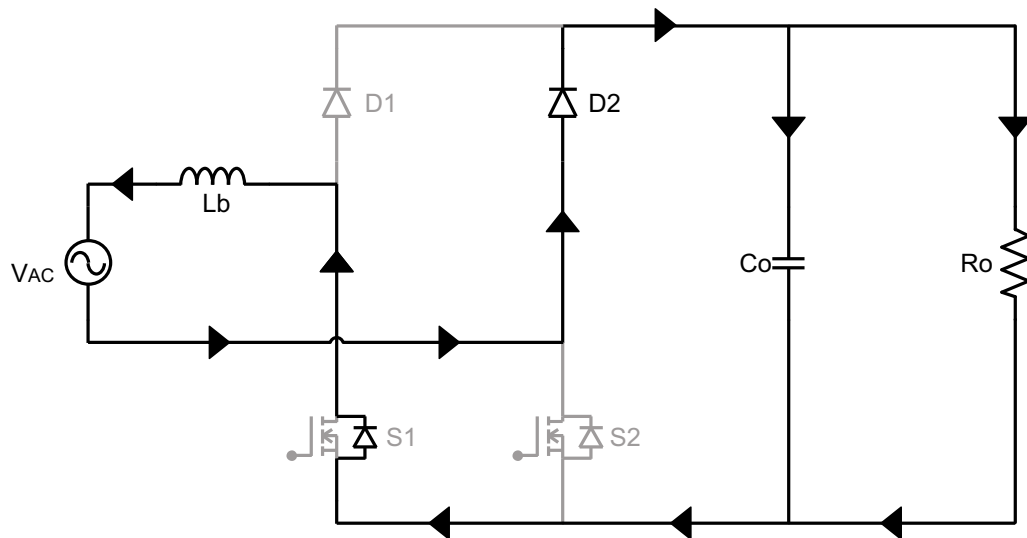
Na segunda etapa do semiciclo negativo as chaves  $S_1$  e  $S_2$  permanecem fechadas. Conforme a figura 14, a corrente flui pelo indutor, capacitor e carga, fechando o caminho de corrente por meio do diodo antiparalelo de  $S_1$ .

Figura 13 – Operação do conversor Boost *Bridgeless* no semiciclo negativo - etapa 1



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 14 – Operação do conversor Boost *Bridgeless* no semiciclo negativo - etapa 2



Fonte: Elaborada pelo autor

### 3.2 Projeto do Circuito de Potência

A base dos conversores PFC é o projeto do circuito de potência. Dessa forma, nessa seção foi realizada a análise e proposição de critérios de projeto, bem como o dimensionamento dos elementos passivos.

### 3.2.1 Especificações de Projeto

Algumas pré-definições são de suma importância para o correto dimensionamento do conversor. A tabela 1 apresenta os parâmetros básicos para o seguimento do projeto. A tensão  $V_{in}$ , bem como a frequência de entrada,  $f_r$  foram escolhidas levando em consideração a tensão da rede elétrica da grande maioria das cidades do Brasil. A tensão de saída,  $V_o$ , foi definida a fim de permitir a passagem pela conversão CC/CA e retornar a amplitude de tensão da rede elétrica. A ondulação da tensão de saída,  $\Delta V_o$ , refere-se à amplitude máxima que a tensão de saída pode atingir de forma a não prejudicar o rendimento do conversor. A frequência de comutação,  $f_c$ , refere-se à frequência na qual comuta-se o sinal da portadora na PWM, enquanto a potência de saída,  $P_o$ , simula uma carga típica, da qual pode ser feita a correção de fator de potência. *Hold up time*,  $t_h$ , é o tempo máximo para que o circuito atinja o regime permanente.

Tabela 1 – Especificações de projeto do conversor Boost *Bridgeless* PFC

Parâmetro	Simbologia	Valor
Tensão eficaz de fase da rede elétrica	$V_{in}$	220 V
Tensão média de saída do conversor	$V_o$	400 V
Potência média de saída do conversor	$P_o$	400 W
Frequência da rede elétrica	$f_r$	60 Hz
Frequência de comutação	$f_c$	50 kHz
Ondulação da tensão na saída do conversor	$\Delta V_o$	5 %
<i>Hold up time</i>	$t_h$	10 ms

Fonte: Elaborada pelo autor

### 3.2.2 Dimensionamento de Resistência de Carga e *Duty Cycle*

Com base na tabela 1, é possível encontrar a resistência de carga,  $R_o$ , e a corrente elétrica na carga,  $I_o$ .

$$R_o = \frac{V_o^2}{P_o} = 400 \Omega \quad (3.1)$$

$$I_o = \frac{P_o}{V_o} = 1 \text{ A} \quad (3.2)$$

A razão cíclica (*duty cycle*,  $D_m$ ) média pode ser encontrada pela equação 3.3:

$$D_m = 1 - \alpha = 0,222 \quad (3.3)$$

onde  $\alpha$  é a relação entre tensão de entrada e a tensão de saída do conversor, conforme equação 3.4:

$$\alpha = \frac{V_p}{V_o} = 0,778 \quad (3.4)$$

onde  $V_p$  é a tensão de pico da entrada do conversor.

### 3.2.3 Dimensionamento do Indutor

Conforme Beltrame (2009), quanto maior o valor de indutância utilizado, menor será a ondulação de corrente e, conseqüentemente, menor será a emissão de EMI de modo diferencial. Em contrapartida, quanto menor o valor de indutância, maior será a ondulação de corrente.

A indutância,  $L_{min}$  refere-se ao limiar entre o MCC e o MCD, ou seja, valores acima do especificado na equação (3.5) garantem a condução contínua do conversor.

$$L_{min} = \frac{R_o}{4 f_c \left(\frac{V_o}{V_p}\right)^2} = 1,21 \text{ mH} \quad (3.5)$$

O indutor boost, operando no MCC, pode ser obtido por meio da equação 3.6:

$$L_b = \frac{V_o}{4 f_c \Delta i_{l_{max}}} = 4 \text{ mH} \quad (3.6)$$

onde  $\Delta i_{l_{max}}$  refere-se à máxima ondulação de corrente no indutor, sendo limitado em 0,5 A como critério de projeto.

### 3.2.4 Dimencionamento do Capacitor

O dimensionamento do capacitor pode ser realizado com base em dois fatores: *hold up time*,  $t_h$ ; ou a máxima ondulação sobre o capacitor. Como critério de projeto, adotou-se o método de  $t_h$ , conforme equação 3.7:

$$C_o = \frac{2 P_o t_h}{V_o^2 - V_{o_{min}}^2} = 512 \text{ } \mu\text{F} \quad (3.7)$$

onde  $V_{o_{min}}$  é a mínima tensão de saída admitida.

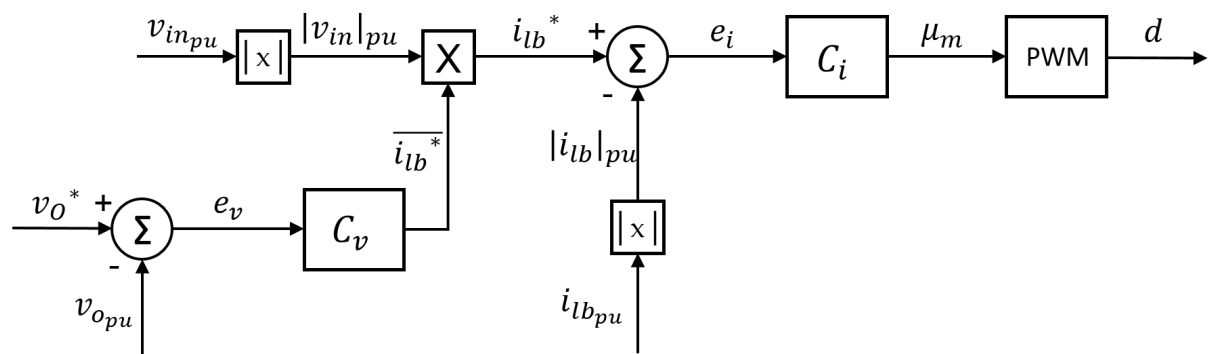
Com base nos valores comerciais de capacitores, optou-se pela escolha da capacitância de  $470 \mu F$ .

### 3.3 Projeto do Circuito de Controle

O controle do conversor Boost *Bridgeless* empregado nesse trabalho leva em consideração uma malha de controle para a regulação da tensão CC de saída com o valor pré-determinado em projeto, perante aos diferentes tipos de carga e tensão de entrada e outra malha de controle para manter a forma de onda senoidal da corrente do indutor Boost, em fase com a tensão da rede.

Ambas as malhas de controle podem ser analisadas de forma autônoma, já que apresentam comportamento dinâmico diferentes. A malha de tensão possui resposta dinâmica lenta para não causar distorções na malha de corrente, a qual possui resposta dinâmica rápida para o rastreamento da referência de corrente.

Figura 15 – Diagrama de controle



Fonte: Elaborada pelo autor

A figura 15 mostra o diagrama de blocos da estratégia de controle empregada. Na malha de tensão, um controlador Proporcional e Integral (PI) é utilizado para controlar o erro de tensão, caracterizado pela subtração entre o sinal de referência de tensão e o sinal da tensão de saída por unidade (pu).

A malha de tensão é multiplicada pelo valor pu absoluto da tensão da rede que e em seguida subtrai-se o valor absoluto da corrente de entrada do conversor, personalizando o erro da malha de corrente, o qual, assim como a malha de tensão, é equilibrado por um controlador PI, que tem sua função de transferência definida pela equação (3.8). Finalmente, a modulação PWM é realizada com o sinal resultante e a portadora de onda triangular de  $50 kHz$ , resultando no sinal de razão cíclica empregado nas chaves semicondutoras.

$$G_{pi} = \frac{K_p \left( s + \frac{1}{T_i} \right)}{s} = \frac{K_p s + K_i}{s} \quad (3.8)$$

onde  $K_p$  é o ganho proporcional,  $K_i$  é o ganho integral e  $T_i$  é o tempo integral ou *reset-time*, correspondente ao tempo em que a parcela proporcional da ação de controle é duplicada.

### 3.3.1 Controlador de Corrente de Entrada

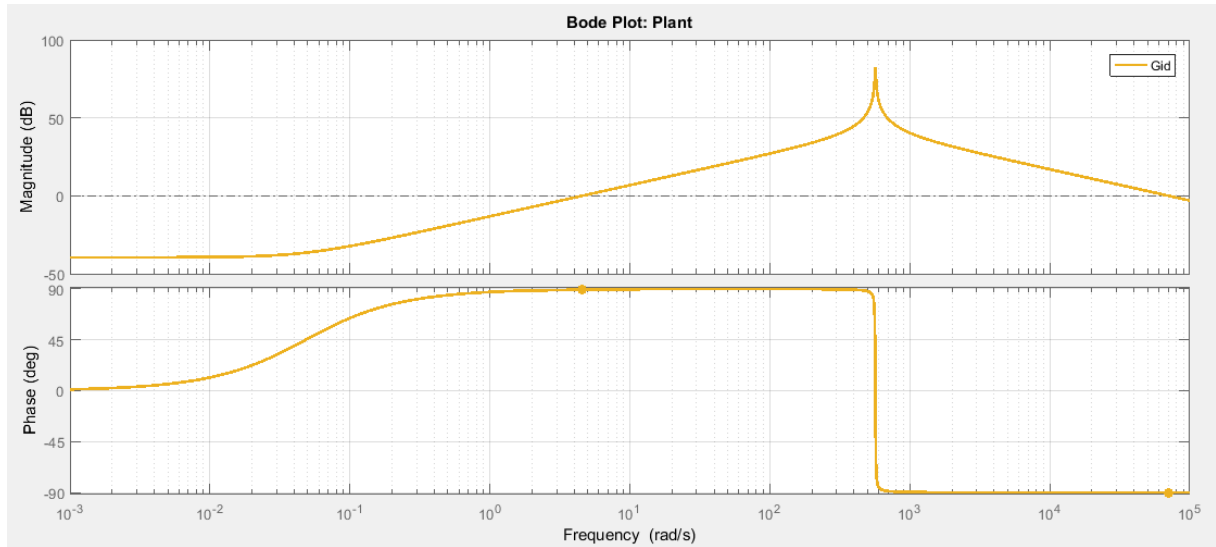
De acordo com (ROGGIA, 2009), o objetivo do controlador de corrente de entrada é fazer com que a corrente média da entrada do conversor Boost *Bridgeless* localize a referência senoidal da tensão da rede, de forma que apresente baixo conteúdo harmônico, baixo THD e alto fator de potência ao dispositivo.

Com o auxílio do *software* Matlab, simulou-se a função de transferência da planta da malha de corrente, representada pela equação (3.11). Essa função de segunda ordem relaciona a corrente no indutor com a razão cíclica. Dessa forma, por intermédio da ferramenta *sisotool*, analisou-se o diagrama de bode, o diagrama de polos e zeros e a resposta ao degrau da planta com a inserção do compensador,  $C_i$ .

$$G_{id} = \frac{V_{in} C_o R_o s + 2}{\alpha (C_o L_b R_o s^2 + L_b s + R_o \alpha^2)} \quad (3.9)$$

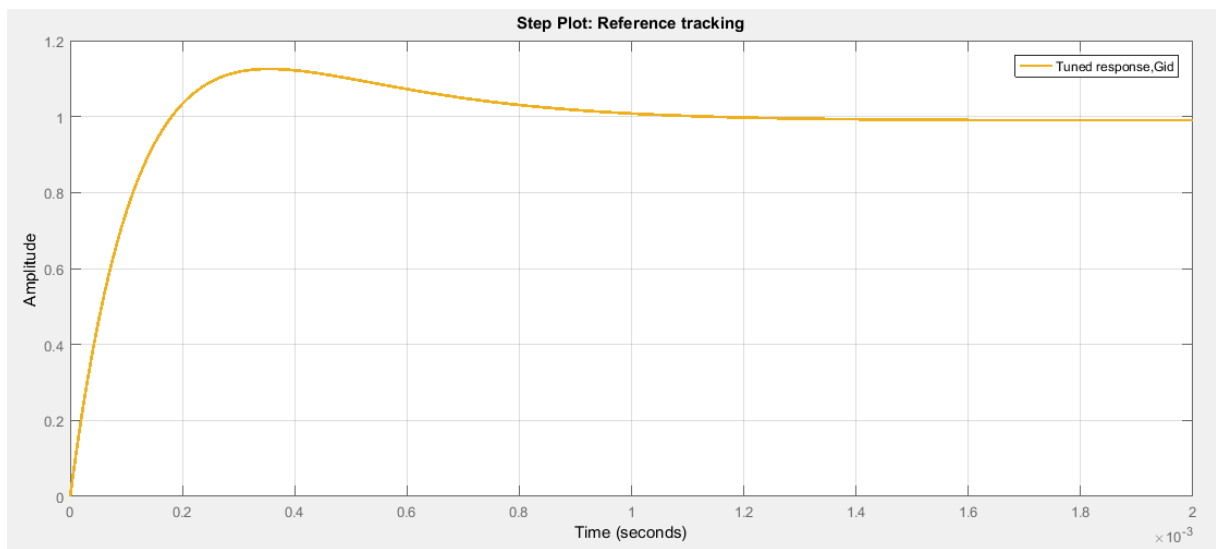
No diagrama de polos e zeros do sistema foram posicionados um zero real e um integrador, caracterizando o controlador PI do compensador  $C_i$ , de forma a garantir a estabilidade do sistema e estabelecer margens de fase e ganho específicos.

A figura 16 apresenta o diagrama de bode de fase e ganho da planta com a inserção do controlador. Destaca-se a margem infinita de ganho e a margem de fase de  $77^\circ$ . Ainda, a figura 17, mostra a resposta ao degrau do sistema, que possui resposta rápida para que a referência senoidal possa ser eficientemente rastreada.

Figura 16 – Diagrama de bode da planta  $G_{id}$ 

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 17 – Resposta ao degrau para a malha de corrente



Fonte: Elaborada pelo autor

Dessa forma, o compensador  $C_i$  projetado é representado pela equação 3.10, enquanto a figura 18 mostra os valores dos ganhos  $K_p$  e  $K_i$ , além de indicadores de performance do controlador, como *overshoot*, margem de fase e de ganho.

$$C_i = \frac{0,15993s + 430,4065}{s} \quad (3.10)$$

Figura 18 – Parâmetros da malha de corrente

Controller Parameters	
	Tuned
Kp	0.15993
Ki	430.4065
Kd	n/a
Tf	n/a

Performance and Robustness	
	Tuned
Rise time	0.000131 seconds
Settling time	0.000877 seconds
Overshoot	12.5 %
Peak	1.13
Gain margin	Inf dB @ NaN rad/s
Phase margin	77 deg @ 1.16e+04 rad/s
Closed-loop stability	Stable

Fonte: Elaborada pelo autor

### 3.3.2 Controlador de Tensão

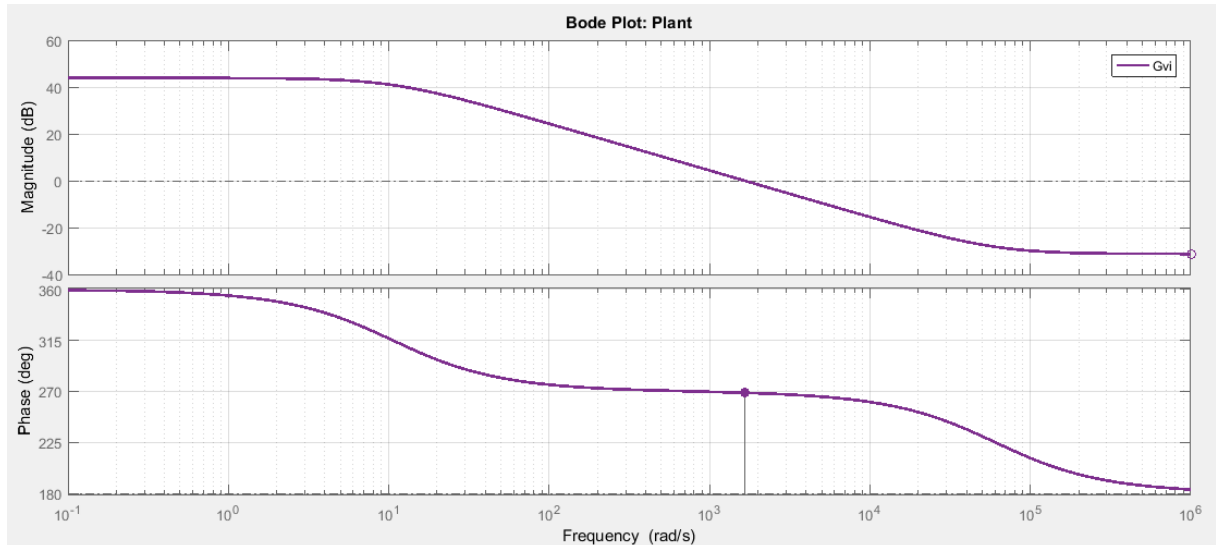
O controlador de tensão tem a função de corrigir a amplitude de tensão de saída e, como já mencionado, deve ter resposta lenta para não interferir na malha de corrente.

Analogamente a malha de controle, o controlador de tensão foi projetado por intermédio da ferramenta *sisotool* do *software* Matlab. A equação (3.11) mostra a função de transferência de primeira ordem da planta, relacionando a tensão de saída com a corrente no indutor.

$$G_{vi} = \frac{-L_b s + R_o \alpha^2}{\alpha (C_o R_o s + 2)} \quad (3.11)$$

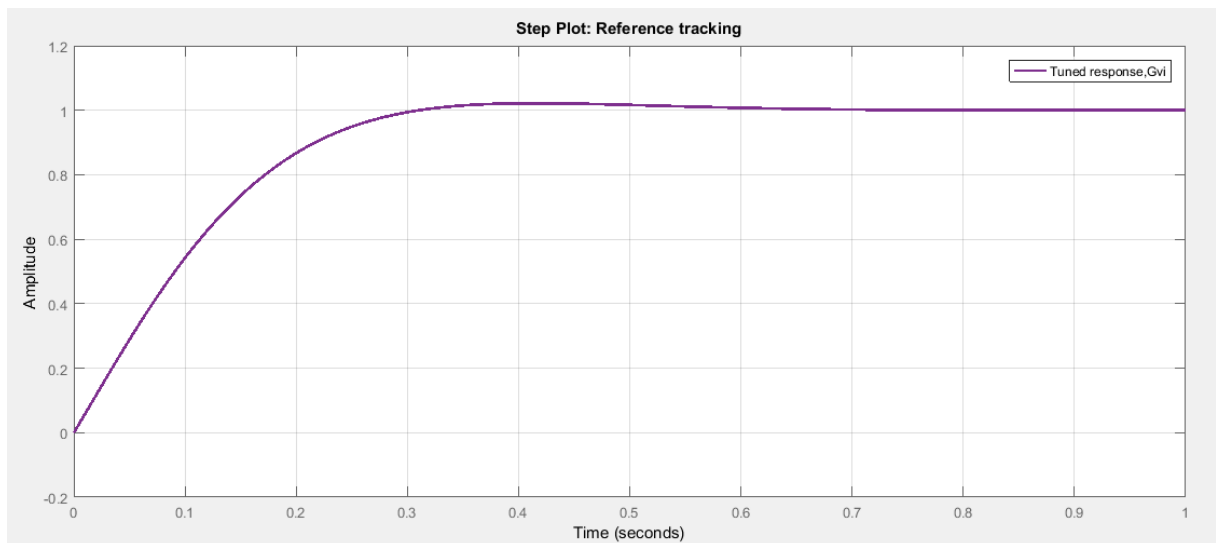
No diagrama de polos e zeros do sistema foram posicionados um zero real e um integrador, caracterizando o controlador PI do compensador  $C_i$ , com o propósito de garantir a estabilidade do sistema e estabelecer margens de fase e ganho específicos.

A figura 19 expõe o diagrama de bode de fase e ganho da planta com a inserção do controlador. Destaca-se a margem de ganho de 80,4 db e a margem de fase de 76°. Além disso, a figura 20, mostra a resposta ao degrau do sistema, que possui resposta mais lenta que a malha de corrente e suficiente para regular a tensão de saída em 400 V, com pouco índice de ondulação.

Figura 19 – Diagrama de bode da planta  $G_{vi}$ 

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 20 – Resposta ao degrau para a malha de tensão



Fonte: Elaborada pelo autor

Sendo assim, o compensador  $C_v$  projetado é representado pela equação (3.12), enquanto a figura 21 mostra os valores dos ganhos  $K_p$  e  $K_i$ , bem como alguns indicadores de performance do controlador, como *overshoot*, margem de fase e de ganho.

$$C_v = \frac{0,00347s + 0,06425}{s} \quad (3.12)$$

Figura 21 – Parâmetros da malha de tensão

Controller Parameters	
	Tuned
Kp	0.0034749
Ki	0.064247
Kd	n/a
Tf	n/a

Performance and Robustness	
	Tuned
Rise time	0.2 seconds
Settling time	0.459 seconds
Overshoot	2.18 %
Peak	1.02
Gain margin	80.4 dB @ Inf rad/s
Phase margin	76 deg @ 8.58 rad/s
Closed-loop stability	Stable

Fonte: Elaborada pelo autor

### 3.4 Análise das Correntes nos Semicondutores

Nas subseções a seguir são calculadas as correntes rms e média que fluem nas chaves semicondutores e nos diodos.

#### 3.4.1 Corrente nas Chaves

As correntes nas chaves semicondutoras  $S_1$  e  $S_2$  podem ser calculadas por meio das equações (3.13) e (3.14), que descrevem, respectivamente, as correntes rms e média.

$$I_{S_{rms}} = I_{lb_{rms}} \sqrt{\left(\frac{1}{2} + \frac{4V_p}{3\pi V_o}\right)} \quad (3.13)$$

$$\bar{I}_S = I_{lb_{rms}} \frac{\sqrt{2}}{\pi} \left(1 - \frac{\pi V_p}{4V_o}\right) \quad (3.14)$$

onde  $I_{lb_{rms}}$  é a corrente rms no indutor Boost, que pode ser encontrada pela equação (3.15), considerando  $P_o = P_{in}$ .

$$I_{lb_{rms}} = \frac{P_{in}}{V_{in}} \quad (3.15)$$

### 3.4.2 Corrente nos Diodos Antiparalelos das Chaves

As equações (3.16) e (3.17) retratam, respectivamente, as correntes rms e média dos diodos antiparalelos das chaves semicondutoras  $S_1$  e  $S_2$ .

$$I_{DS_{rms}} = \frac{\sqrt{2}I_{lb_{rms}}}{2} \quad (3.16)$$

$$\overline{I_{DS}} = \frac{\sqrt{2}I_{lb_{rms}}}{\pi} \quad (3.17)$$

### 3.4.3 Corrente nos Diodos Retificadores

Nos diodos retificadores  $D_1$  e  $D_2$ , as correntes podem ser calculadas pelas equações (3.18), que referem-se à corrente rms, e (3.19), que diz respeito à corrente média.

$$I_{D_{rms}} = I_{lb_{rms}} - I_{S_{rms}} \quad (3.18)$$

$$\overline{I_D} = \frac{I_{cc}}{2} \quad (3.19)$$

onde  $I_{cc}$  é a corrente no barramento CC.

A tabela 2 evidencia os valores rms e médio das correntes nos dispositivos semicondutores do conversor Boost *Bridgeless*.

Tabela 2 – Corrente nos dispositivos semicondutores

Dispositivo semicondutor	Corrente rms [A]	Corrente média [A]
Chaves $S_1$ e $S_2$	1,657	0,318
Diodos antiparalelos das chaves	0,5	0,162
Diodos retificadores $D_1$ e $D_2$	1,286	0,818

Fonte: Elaborada pelo autor

### 3.5 Diagrama de Simulação do Conversor Boost *Bridgeless* PFC

A simulação dos circuitos de potência e controle foram reproduzidos por intermédio do *software* PSIM. A tabela 3 mostra os elementos passivos utilizados na simulação, os quais estão dimensionados conforme subseções 3.2.3 e 3.2.4.

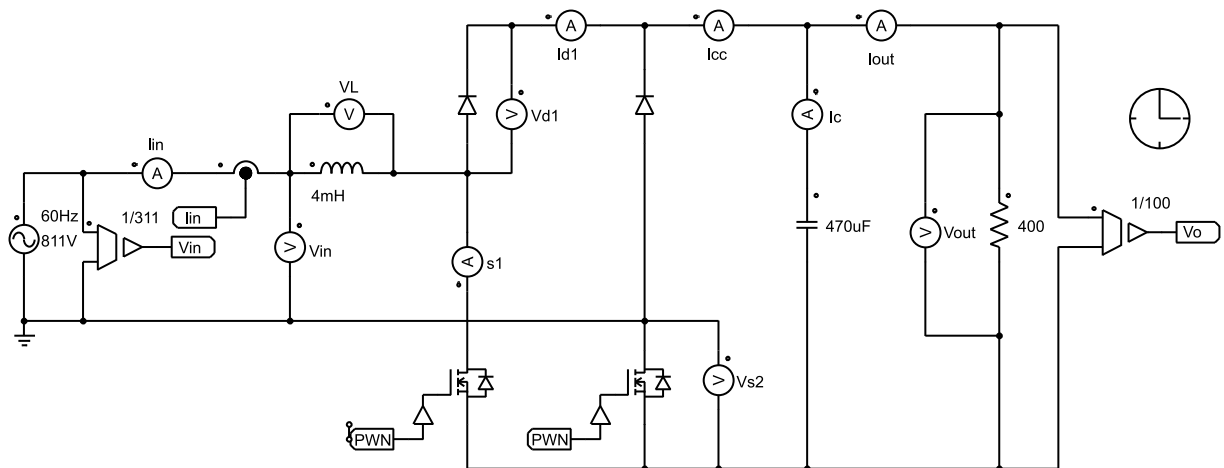
Tabela 3 – Elementos passivos

Parâmetro	Simbologia	Valor
Indutor Boost	$L_b$	4 mH
Capacitor de saída	$C_o$	470 $\mu F$

Fonte: Elaborada pelo autor

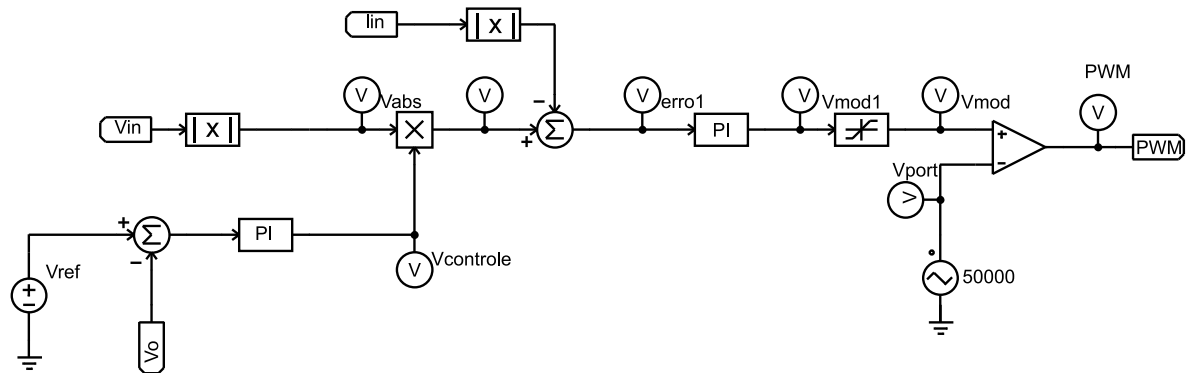
A figura 22 mostra a simulação do circuito de potência do conversor Boost *Bridgeless* PFC. Vale salientar que  $I_{in}$ ,  $V_{in}$  e  $V_o$  são parâmetros de saída aferidos para o circuito de controle, enquanto PWM é parâmetro de entrada obtido por meio do circuito de controle. O circuito de controle, devidamente fundamentado na seção 3.3, segue na figura 23.

Figura 22 – Circuito de potência conversor Boost *Bridgeless*



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 23 – Circuito de controle PFC



Fonte: Elaborada pelo autor

### 3.6 Implementação Prática

A implementação prática pode ser dividida em três etapas: construção da PCI de Potência; construção da PCI de Controle; Testes de Bancada. Tais etapas caracterizam, respectivamente, as subseções a seguir.

#### 3.6.1 PCI de Potência

A PCI do circuito de potência compreende os componentes que constam no conversor Boost *Bridgeless*. Os elementos passivos foram escolhidos conforme o dimensionamento realizado na seção 3.2, enquanto a escolha dos dispositivos semicondutores se deu considerando a análise das correntes elétricas do circuito apresentada na seção 3.4.

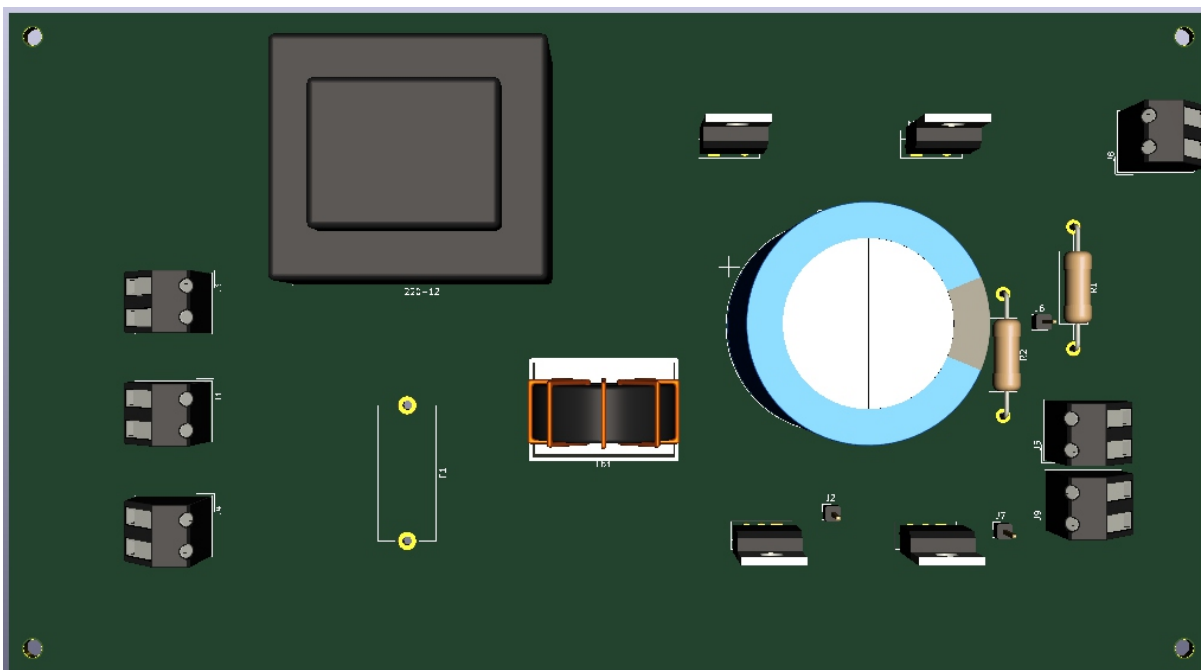
Tabela 4 – Componentes da PCI de potência

Componente	Quantidade	Referência / Modelo
Indutor Boost	1	4 mH
Capacitor de saída	1	470 $\mu F$
Diodo	2	MUR 860
IGBT	2	IRGP50b60pd1
Fusível	1	5 A
Bloco terminal	6	400 V

Fonte: Elaborada pelo autor

Dessa forma, os componentes utilizados nesse circuito podem ser observados na tabela 4, enquanto a figura 24 ilustra a PCI, projetada a partir do *software* Kicad.

Figura 24 – PCI de Potência



Fonte: Elaborada pelo autor

### 3.6.2 PCI de Controle

A implementação prática do controlador se deu a partir da análise de três formas de implementação: controle digital, controle analógico e controle utilizando o CI UC3854.

O controle digital depende de menos componentes para sua implementação, sendo assim, menos propenso a erros e distorções de elementos. Entretanto, foram verificados problemas no rastreamento da referência de corrente senoidal, além da alta frequência de chaveamento, sendo empecilhos para a implementação digital.

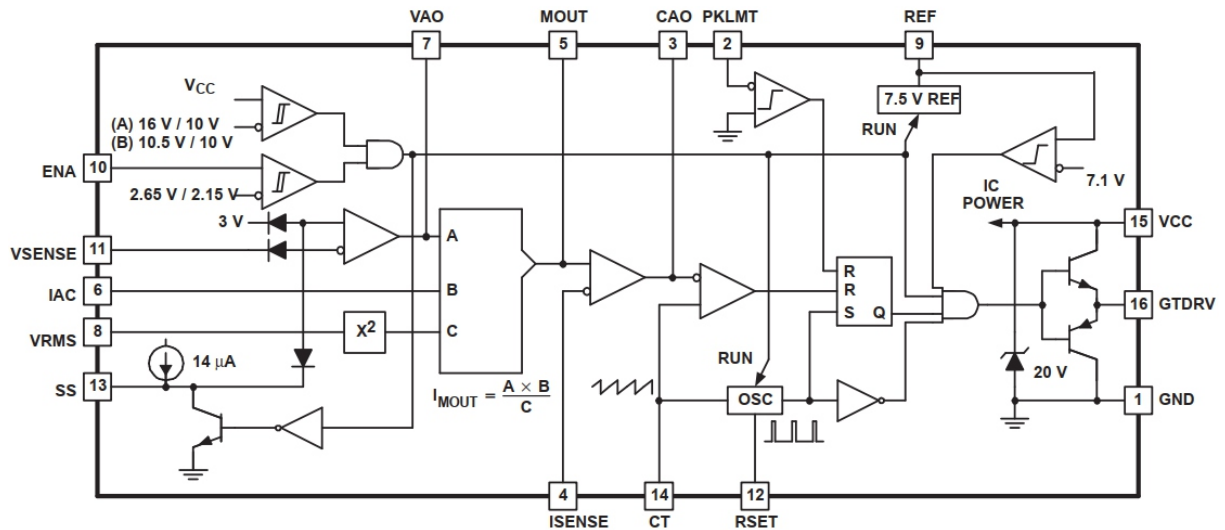
A demanda de grande quantidade de componentes necessários para a realização do controle totalmente analógico, bem como a indisponibilidade de componentes para a realização de operações específicas do controle projetado, acabaram inviabilizando essa forma de implementação.

Sendo assim, optou-se pelo controle utilizando o CI UC3854, previamente exposto na subseção 2.3.2. A metodologia aplicada com a utilização desse CI é semelhante ao que Todd (1999) propõe ao realizar o controle PFC para um conversor Boost. Porém, por se tratar de um

conversor Boost *Bridgeless*, se fazem necessárias adaptações de projeto.

A figura 25 mostra o diagrama de blocos do CI UC3854, a partir do qual são explicados as funções de cada pino e os respectivos componentes a eles conectados, com base em TI (2005), Eckstein (2014) e Todd (1999):

Figura 25 – Diagrama de blocos CI UC3854



Fonte: Texas Instruments, 2005

- Pino 1 (GND): referência;
- Pino 2 (PKLMT): conectado ao polo negativo do sensor de corrente;
- Pino 3 (VCAO): saída de um amplificador operacional que gera o sinal de erro compensado da malha de corrente por intermédio da comparação entre o pino 4 e o pino 5;
- Pino 4 (ISENSE): responsável pela leitura de corrente do conversor;
- Pino 5 (MOUT): por intermédio dele mitiga-se o erro de modo comum devido à sua configuração como amplificador diferencial, sendo resultado da operação envolvendo os pinos 6 (B), 7 (A) e 8 (C), descrita na equação (3.20)
 
$$I_{MOUT} = \frac{A * B}{C^2} \quad (3.20)$$
- Pino 6 (IAC): nele conecta-se um sinal de corrente retificado com o intuito de reproduzir o formato senoidal de referência;
- Pino 7 (VAO): saída do amplificador de tensão;

- Pino 8 (VRMS): conectado também ao sinal de tensão retificado após passagem por filtros capacitivos (tensão RMS);
- Pino 9 (VREF): sinal de tensão de referência após circuito integrador;
- Pino 10 (ENA): habilitador/desabilitador de controle;
- Pino 11 (VSENSE): entrada do sensor de tensão;
- Pinos 12 (RSET) e 14 (CT): configuram a frequência do sinal PWM. O valor é definido pela resistência e capacitância associadas respectivamente aos pinos 12 e 14, com base na equação (3.21)

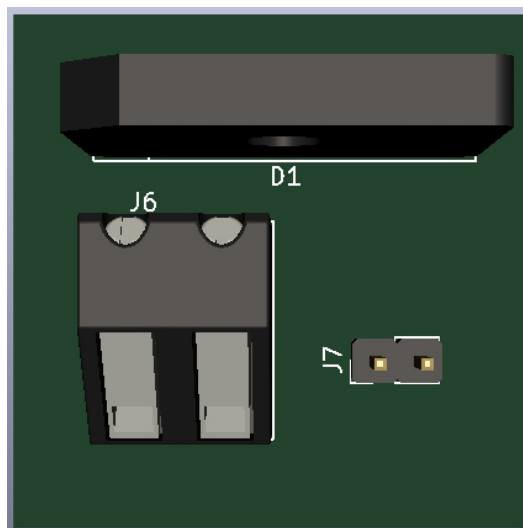
$$f_c = \frac{1,25}{R_{set} * C_t} \quad (3.21)$$

- Pino 13 (SS): *soft start*;
- Pino 15 (VCC): alimentação do CI;
- Pino 16 (GTDRV): saída PWM para o chaveamento dos dispositivos semicondutores;

Como se trata de um conversor Boost *Bridgeless*, onde não há processo de retificação direto, fez-se necessário construir uma PCI retificadora específica, a qual tem seu projeto representado na figura 26.

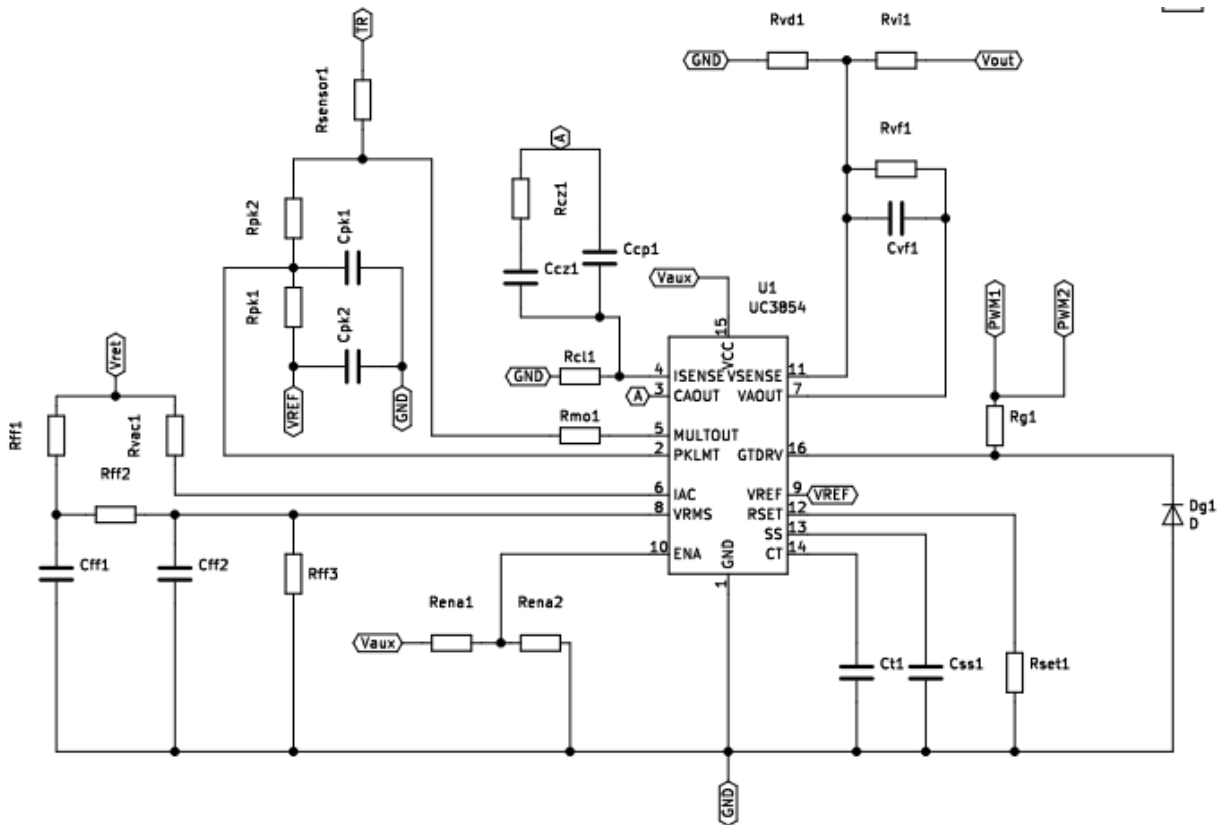
Sendo assim, o circuito de controle pode ser visualizado na figura 27, cujos elementos foram calculados fundamentando-se em Todd (1999). Para a realização do sensoriamento de corrente do conversor, utilizou-se um resistor shunt de 0,22  $\Omega$ , empregado na referência do circuito de potência.

Figura 26 – PCI Retificadora



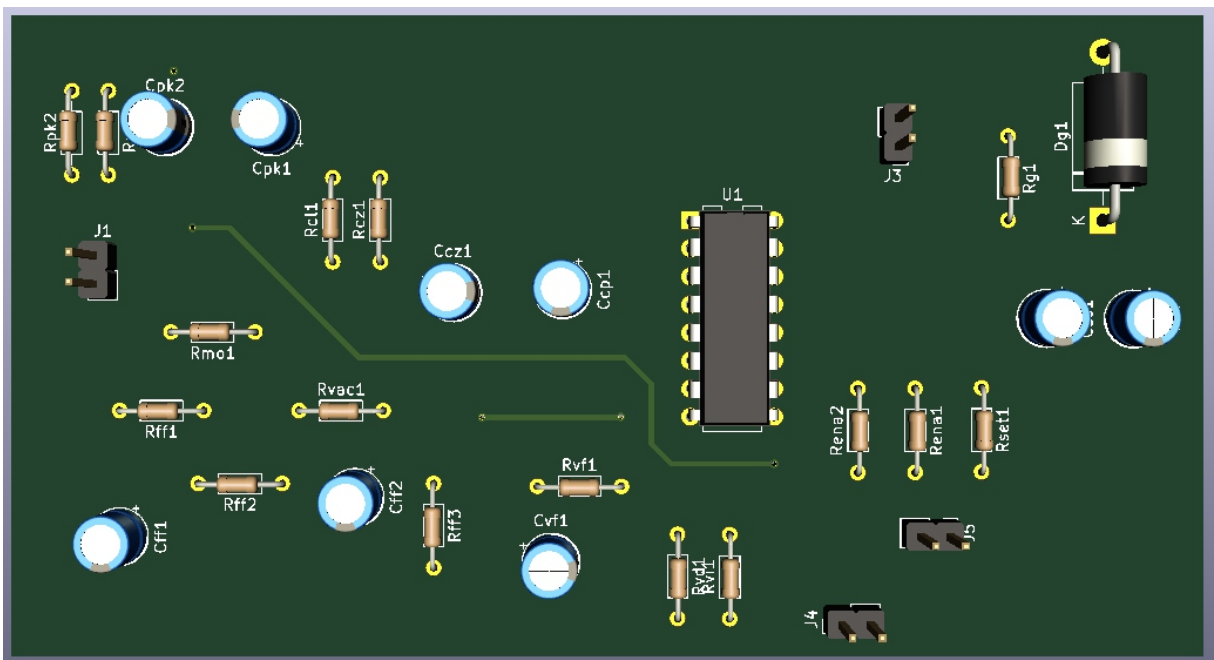
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 27 – Circuito de controle com CI UC3854



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 28 – PCI de Controle



Fonte: Elaborada pelo autor

O projeto da placa de controle elaborado no *software* Kicad é representado na figura 28. Os componentes utilizados no circuito de controle podem ser observados na tabela 5.

Tabela 5 – Componentes da PCI de controle

Componente	Referência / Valor	Componente	Referência / Valor
$R_G$	22 $\Omega$	$R_{vd}$	4,7 k $\Omega$ + 390 $\Omega$
$R_{pk1}$	10 k $\Omega$	$R_{vf}$	150 k $\Omega$
$R_{pk2}$	1,5 k $\Omega$	$R_{vi}$	680 k $\Omega$
$R_{ff1}$	820 k $\Omega$ + 100 k $\Omega$	$C_{cp}$	22 pF
$R_{ff2}$	68 k $\Omega$	$C_{cz}$	220 pF
$R_{ff3}$	18 k $\Omega$	$C_{ff1}$	150 nF
$R_{vac}$	2,2 M $\Omega$	$C_{ff2}$	470 nF
$R_{ci}$	10 k $\Omega$	$C_{pk1}$	100 pF
$R_{cz}$	68 k $\Omega$	$C_{pk2}$	1 mF
$R_{ENA1}$	22 k $\Omega$	$C_{ss}$	1 mF
$R_{ENA2}$	10 k $\Omega$	$C_t$	1,5 nF
$R_{mo}$	10 k $\Omega$	$C_{vf}$	68 F
$R_{set}$	12 k $\Omega$	$D_g$	1N4732

Fonte: Elaborada pelo autor

### 3.6.3 Testes de Bancada

Após a fabricação das PCIs, partiu-se para os testes de bancada. Para tanto, alguns percalços foram encontrados, os quais fizeram com que equipamentos adicionais fossem incluídos ao protótipo.

Na faixa de tempo em que ocorre a pré-carga do capacitor, gera-se um alto pico de corrente transitória, o que poderia danificar os demais equipamentos. Para mitigar esse problema, optou-se pela utilização de um Variac ou Autotransformador, no qual a relação de espiras do primário e secundário pode ser variada. Desse modo, a tensão de entrada da PCI de potência pode ser aumentada gradativamente e a pré-carga do capacitor ocorre sem pico de corrente degradável ao circuito.

Ainda, como redundância na atenuação da corrente de pico na pré-carga do capacitor,

incorporou-se logo após a entrada da PCI de Potência um Termistor NTC (*Negative Temperature Coefficient*), o qual apresenta um valor de resistência elétrica conforme a variação de temperatura atuante sobre ele. Sendo assim, na inicialização do sistema, enquanto ele está com baixa temperatura a resistência é alta, limitando a corrente do circuito. Em regime permanente, com o NTC atingindo maiores temperaturas, atua como baixos valores de resistência, não tendo interferência significativa no comportamento do conjunto.

Além disso, para que fosse possível unir as referências das PCIs de potência, controle e retificação, fez-se necessário a inserção de um transformador. Ele foi posicionado entre a rede elétrica e a PCI de retificação e ajustado na configuração 220/220 V. Sua única função no circuito é, por meio de sua isolação galvânica, separar os circuitos para que ao se unir as referências de cada circuito, não ocorra curto-circuito na operação do sistema.

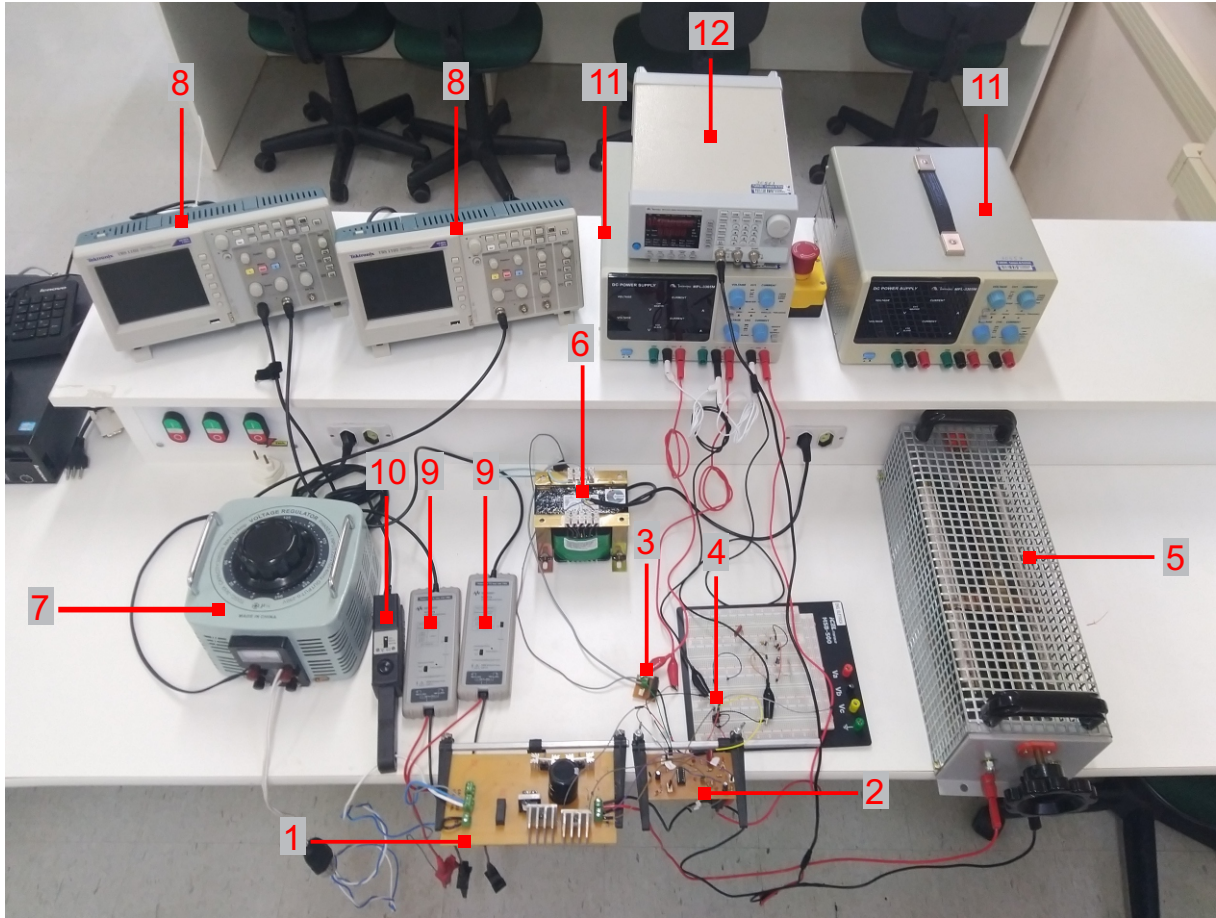
Para emular a carga, optou-se por um Reostato de 1 kW - 1 k $\Omega$ , ajustado para 400  $\Omega$ , conforme projetado. Além disso, utilizou-se uma fonte CC para alimentar o CI UC3854, bem como para setar parâmetros indicados pelo fabricante. Para captar as formas de onda de tensão e corrente geradas pelo sistema em operação empregou-se um osciloscópio, conectado ao circuito por intermédio de ponteiros isoladas de tensão e corrente.

A figura 29 exhibe o protótipo montado em bancada com a indicação dos principais componentes do circuito, os quais são especificados na tabela 6.

Tabela 6 – Componentes do protótipo de bancada

Componente	Descrição
1	PCI de Potência
2	PCI de Controle
3	PCI de Retificação
4	Circuito <i>Buffer</i> para acionamento dos IGBTs
5	Reostato 1 k $\Omega$ - 1 kW
6	Transformador isolador 220/220 V
7	Variac (Autotransformador) 250 V
8	Osciloscópio
9	Ponteira isolada para medição de tensão
10	Ponteira isolada para medição de corrente
11	Fonte CC auxiliar
12	Gerador de funções

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 29 – Protótipo de bancada do conversor Boost *Bridgeless* PFC

Fonte: Elaborada pelo autor

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os principais resultados obtidos por intermédio da metodologia utilizada, expressa no capítulo 3.

Primeiramente, valida-se o conversor Boost *Bridgeless*, evidenciando suas principais formas de onda. Em seguida, faz-se a análise da correção do fator de potência, verificando a eficácia do projeto dos circuitos de potência e controle implementados, além da apuração dos valores obtidos de fator de potência e THD.

Além disso, averigua-se as formas de onda nos dispositivos semicondutores, confirmando os valores de correntes adquiridos por meio dos cálculos realizados na seção 3.4.

Ademais, verificam-se os resultados para os testes de bancada realizados e propõem-se hipóteses de melhorias futuras para o projeto.

### 4.1 Validação do Conversor Boost *Bridgeless*

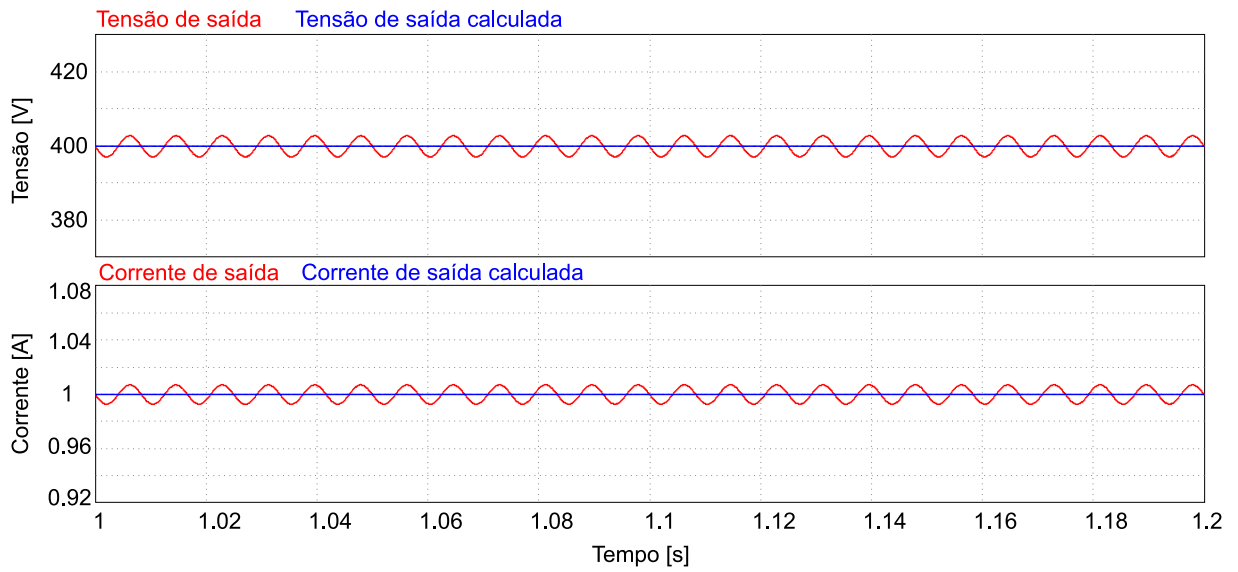
Nessa seção validam-se os circuitos de potência e controle. Primeiramente apresentam-se as formas de onda de tensão e corrente de saída, tanto no regime transitório quanto em permanente. Posteriormente, verificam-se os valores de potência de entrada e saída e, por fim, são exibidos os resultados para a malha de controle.

#### 4.1.1 Tensão e Corrente de saída

Verifica-se por meio da figura 30 a tensão de saída  $V_o$  e a corrente de saída  $I_o$  do conversor. Ambos parâmetros seguem os valores pré-determinados em projeto, com pouca ondulação, sendo 400 V para  $V_o$  e 1 A para  $I_o$ , assim como a potência de saída  $P_o$ , que manteve-se em 400 W na média.

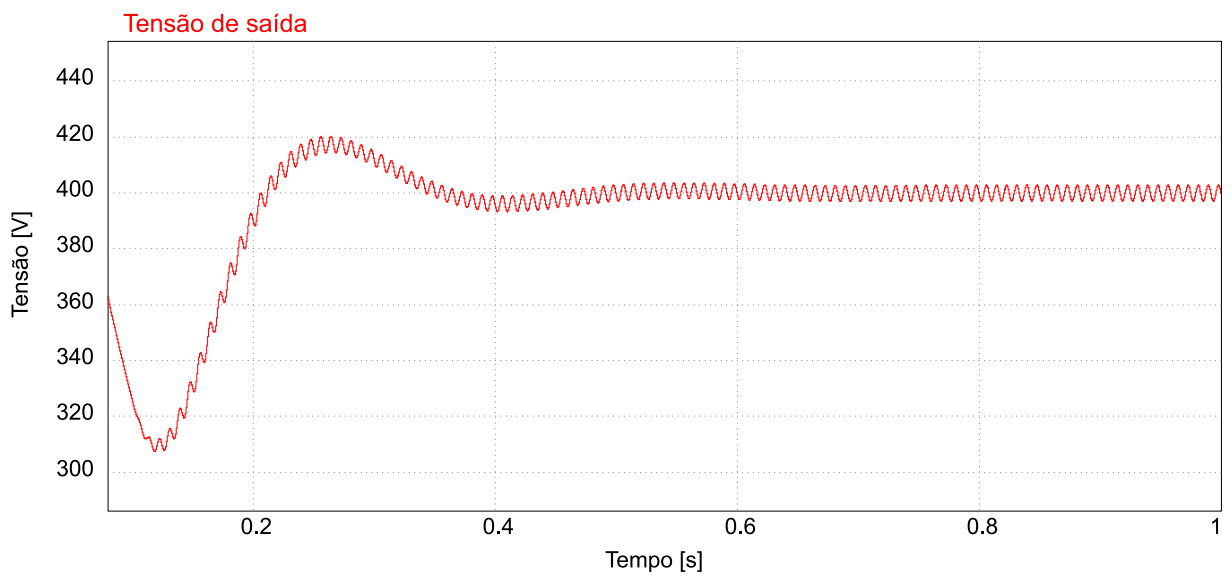
A figura 31 mostra o transitório de tensão de saída  $V_o$ , que apresenta pequeno *overshoot*, mas segue a referência de tensão em menos de meio segundo.

Figura 30 – Tensão  $V_o$  e corrente  $I_o$  nos terminais de saída do conversor Boost *Bridgeless*



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 31 – Análise transitória da tensão de saída  $V_o$

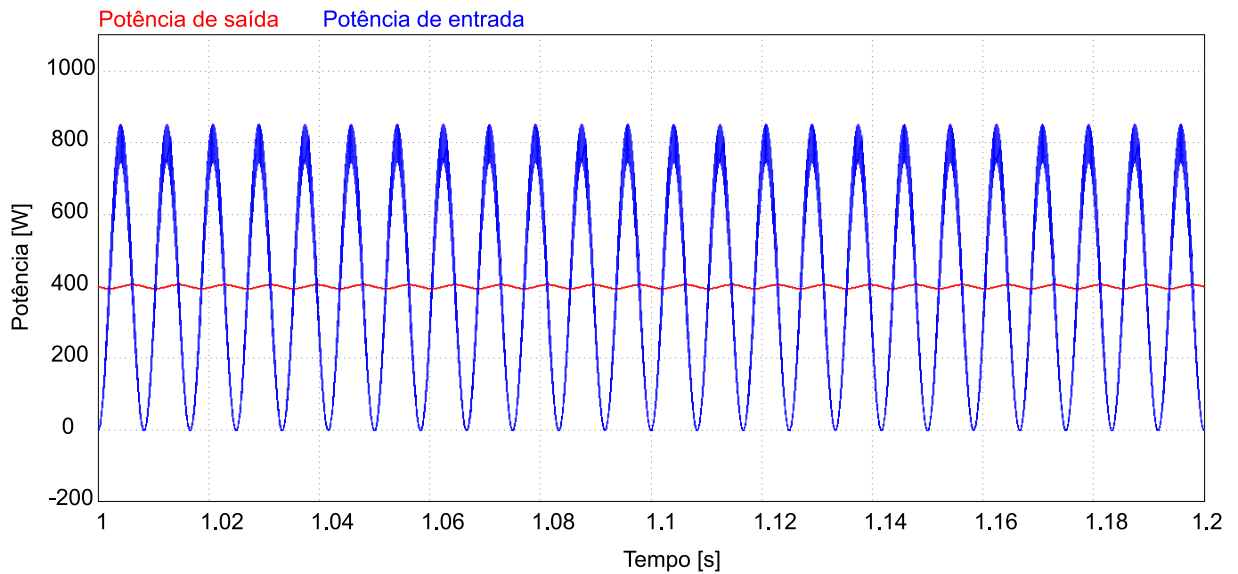


Fonte: Elaborada pelo autor

#### 4.1.2 Potência de Entrada e Saída

A figura 32 mostra a potência CA de entrada e a potência CC de saída, ambas com o valor eficaz de 400 W.

Figura 32 – Potência CA de entrada e potência CC de saída do circuito

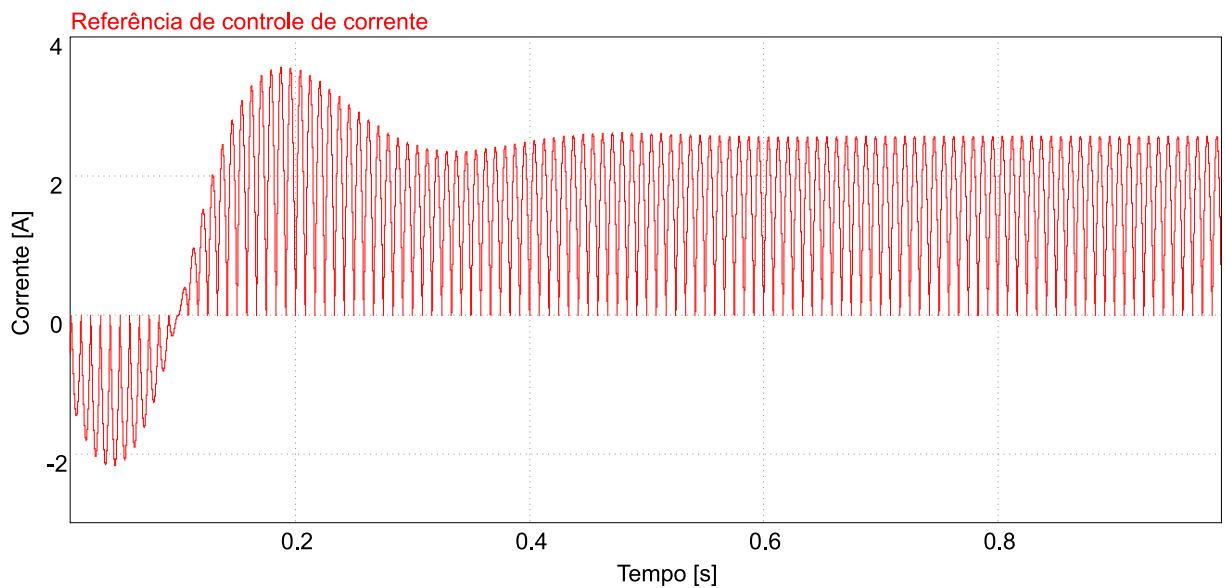


Fonte: Elaborada pelo autor

#### 4.1.3 Malha de Controle

A malha de controle do sistema, apresentada na seção 3.3 teve o objetivo de regular a tensão de saída do circuito de potência, bem como controlar a corrente de entrada de modo a seguir uma referência senoidal, estabelecida pelo próprio circuito de controle.

Figura 33 – Corrente de referência da malha de controle



Fonte: Elaborada pelo autor

A figura 33 mostra a referência de corrente da malha de controle, evidenciando a atuação do controle desde o regime transitório até atingir o regime permanente.

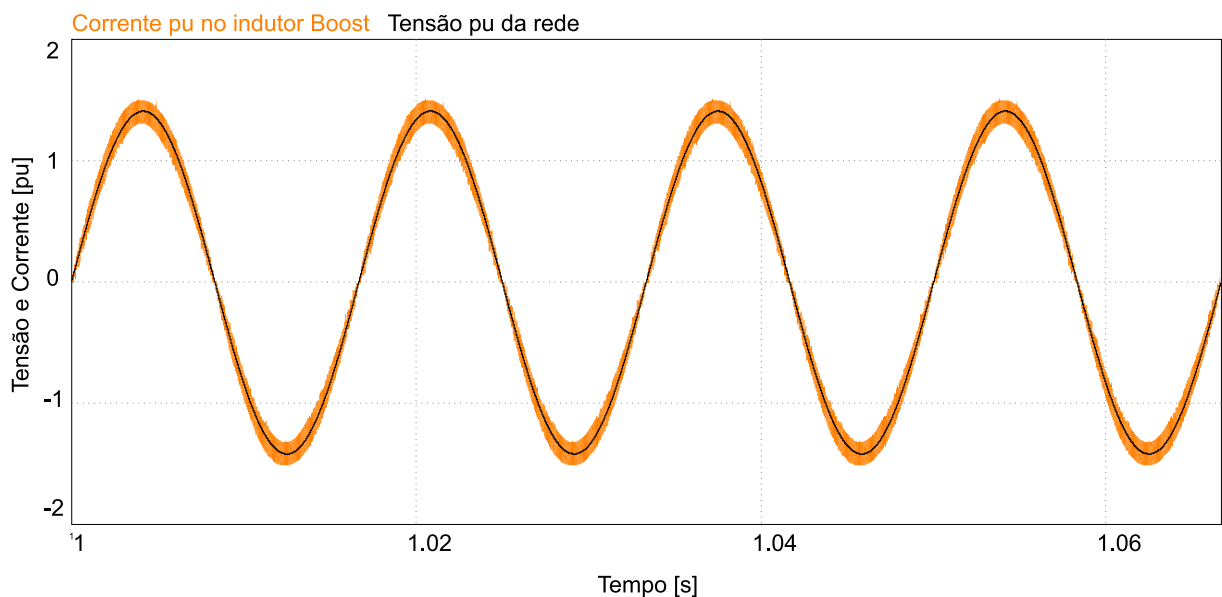
## 4.2 Análise de Correção do Fator de Potência

A correção de fator de potência, principal intuito desse trabalho, foi obtida por intermédio do alinhamento entre projeto de potência e controle, devidamente embasado no capítulo 2 e explicado no 3 o procedimento executado nesse trabalho.

A tabela 7 evidencia os valores de fator de potência e THD obtidos nas simulações do projeto. O FP alcançado, 0,998 aproxima-se da unidade, enquanto a THD 5,14%, prova o baixo índice obtido de distorções harmônicas.

Sendo assim, a figura 34 representa a tensão da rede e a corrente do indutor Boost, ambos em valores pu, em quatro ciclos da rede. Na imagem, observa-se que ambos parâmetros estão praticamente sobrepostos, demonstrando a fase entre tensão e corrente.

Figura 34 – Tensão da rede e corrente no indutor em pu



Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 7 – Valores de fator de potência e THD obtidos

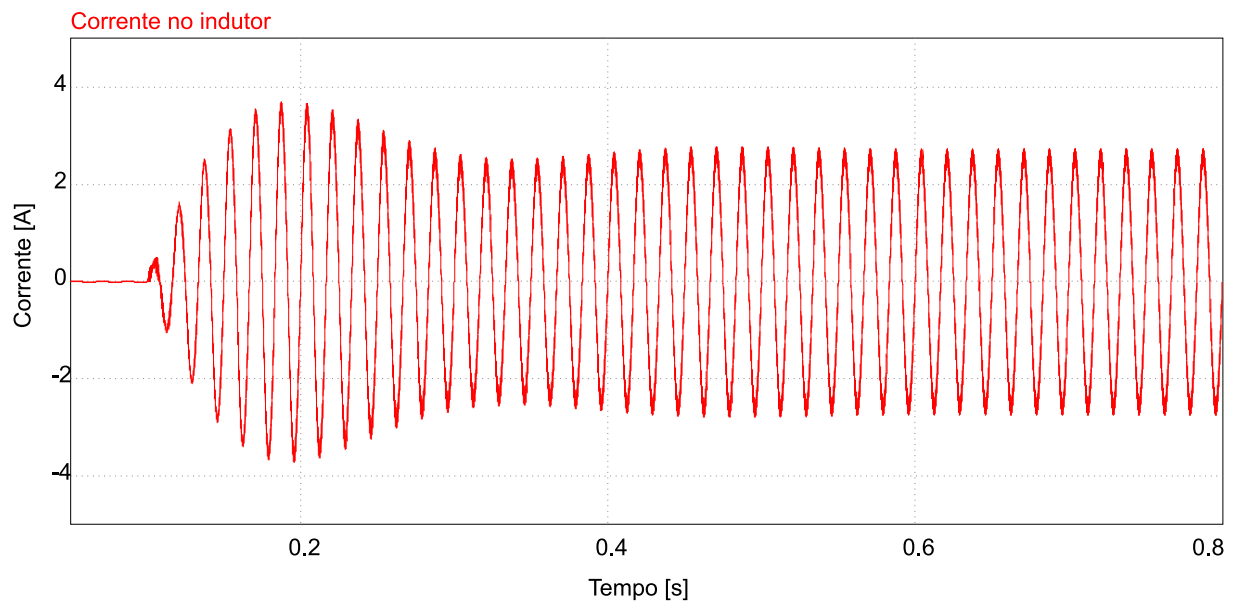
Parâmetro	Valor
FP	0,998
THD	5,14 %

Fonte: Elaborada pelo autor

#### 4.2.1 Corrente no indutor Boost

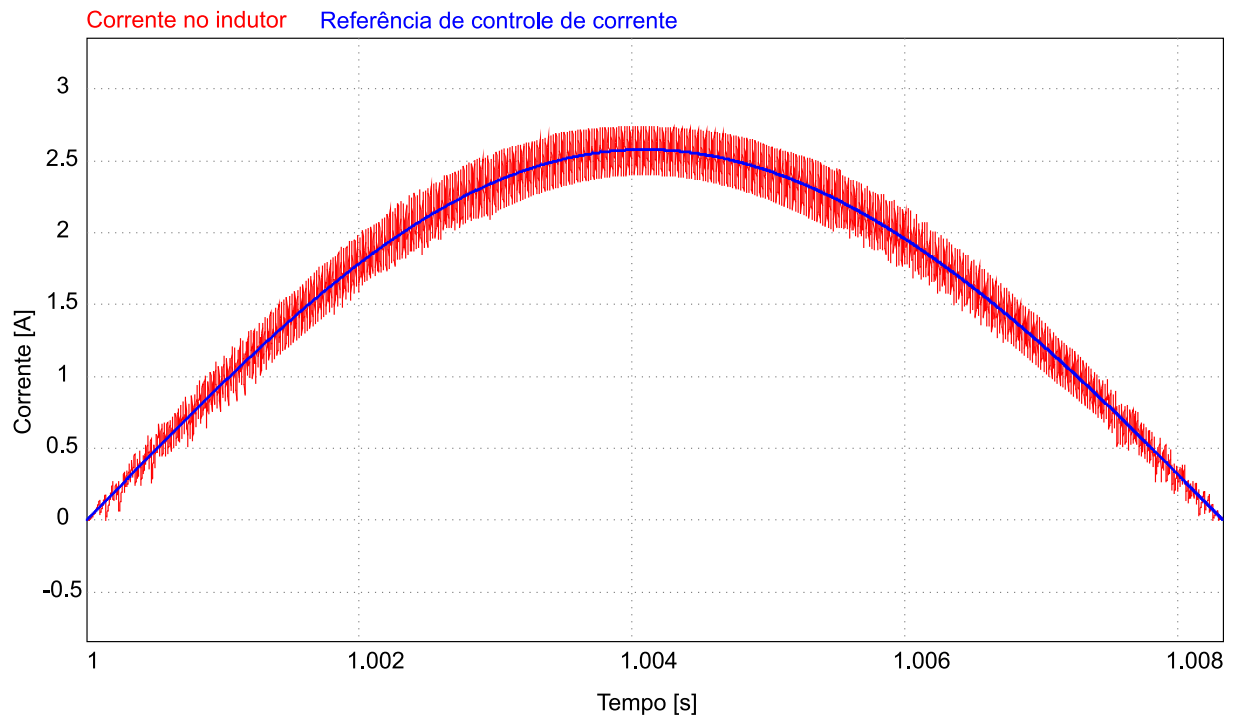
A figura 35 mostra o transitório de corrente no indutor Boost, explicitando o rápido rastreamento da forma de onda de referência, enquanto a figura 36 representa a corrente no indutor Boost e a referência de corrente da malha de controle durante meio ciclo da rede em regime permanente.

Figura 35 – Transitório de corrente no indutor Boost



Fonte: Elaborada pelo autor

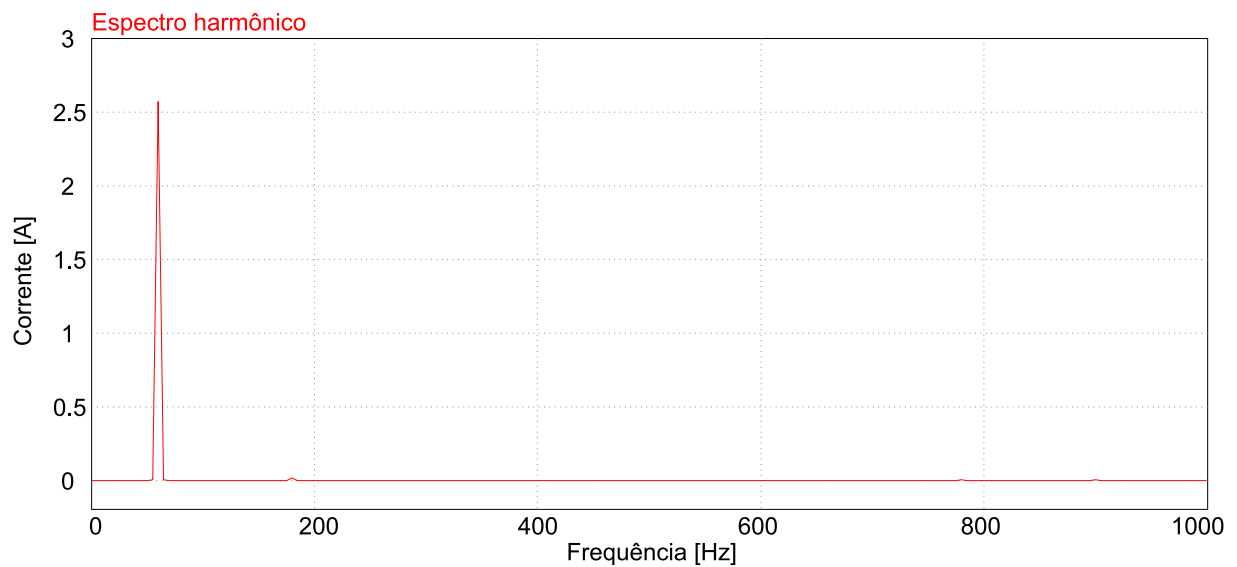
Figura 36 – Corrente no indutor Boost durante o semiciclo positivo da rede em comparação a corrente de referência da malha de controle



Fonte: Elaborada pelo autor

#### 4.2.2 Análise Harmônica

Figura 37 – Espectro harmônico de corrente no indutor Boost



Fonte: Elaborada pelo autor

O espectro harmônico de magnitude da corrente no indutor Boost da figura 37, expressa a praticamente nula THD do sinal de corrente.

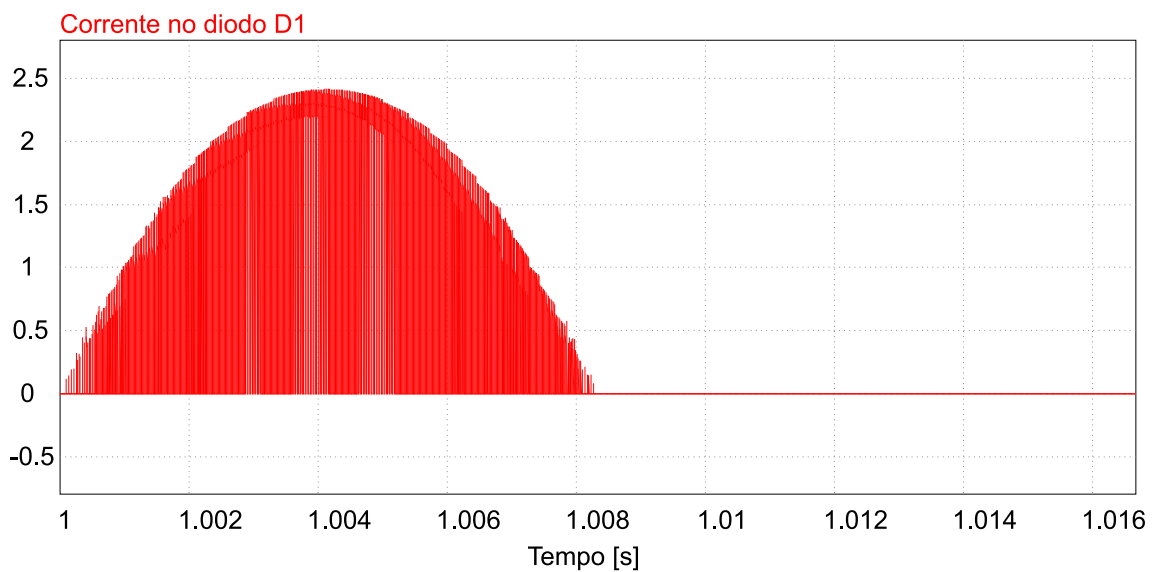
### 4.3 Corrente nos Semicondutores

A corrente nos dispositivos semicondutores, outrora calculados na seção 3.4, são representados em um ciclo da rede nas subseções a seguir.

#### 4.3.1 Corrente nos Diodos

A corrente no diodo  $D_1$ , que atua de forma análoga ao diodo  $D_2$  é demonstrada pela figura 38.

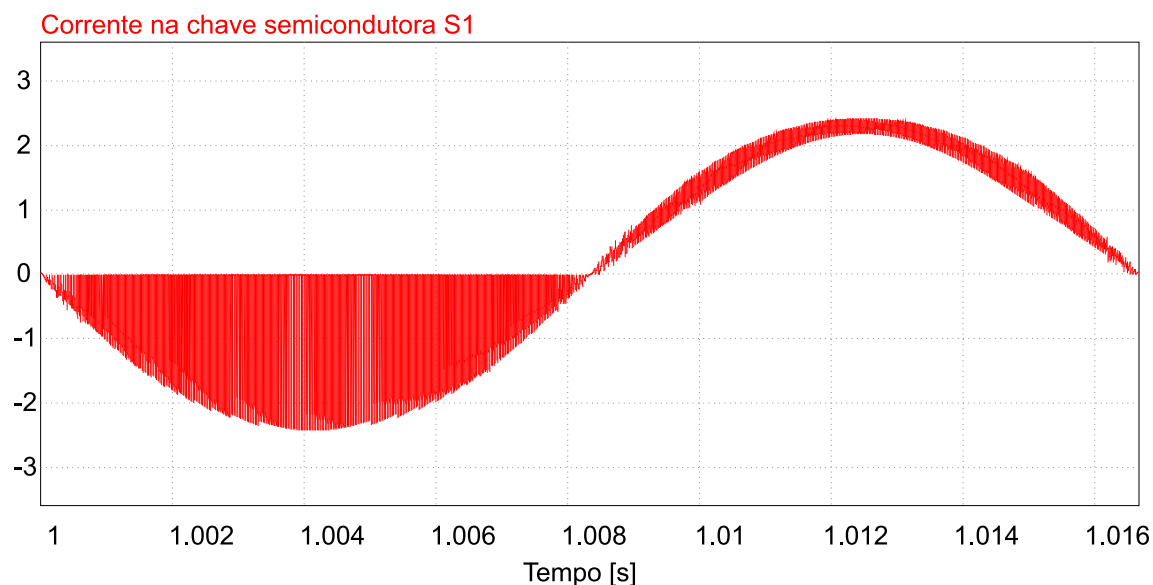
Figura 38 – Corrente no diodo  $D_1$



Fonte: Elaborada pelo autor

#### 4.3.2 Corrente nas Chaves

Assim como nos diodos, a corrente nas chaves semicondutoras  $S_1$  e  $S_2$  são análogas, sendo representada então a forma de onda na chave semicondutora  $S_1$  por meio da figura 39.

Figura 39 – Corrente na chave  $S_1$ 

Fonte: Elaborada pelo autor

#### 4.4 Implementação Prática

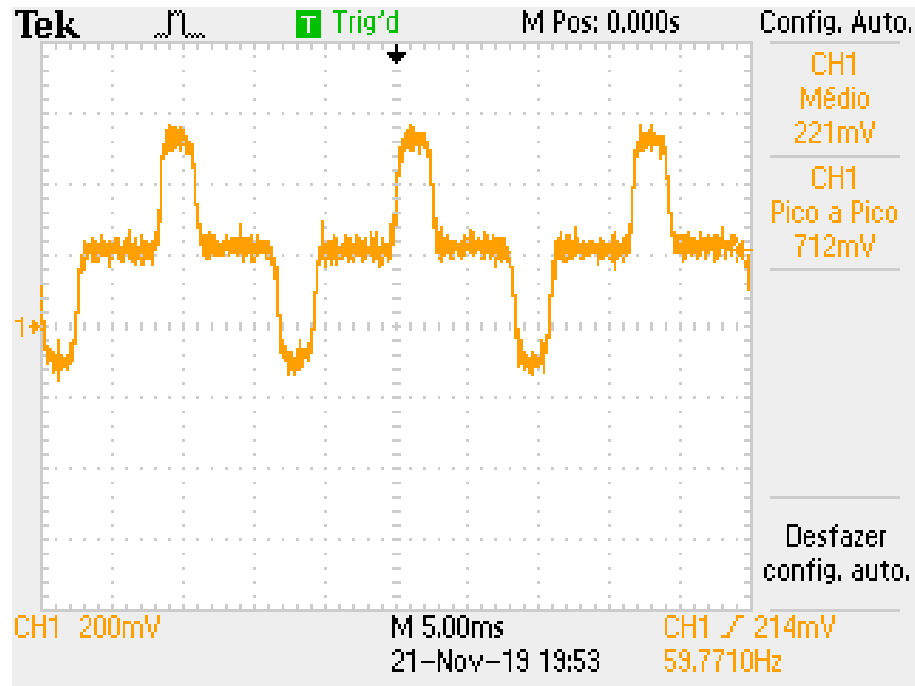
A implementação prática se deu a partir da fabricação das PCIs de potência, controle e retificação, bem como circuitos auxiliares e acessórios de medição, tendo seu funcionamento devidamente explicado na seção 3.6. Os circuitos atuaram de forma satisfatória individualmente, mas quando atuando juntos, não tiveram o comportamento esperado.

Nesse sentido, a figura 40 exibe o comportamento da corrente de entrada do conversor quando utiliza-se um sinal PWM emulado por um gerador de função com *duty cycle* fixo para o chaveamento dos IGBTs, sem a atuação de controle. Nessa configuração o circuito de potência realiza a função de elevar a tensão, porém não corrige o FP devido à não atuação do controlador.

Analogamente, emulando as referências de tensão, corrente e forma de onda indicados para cada pino do CI UC3854, gera-se o sinal PWM de controle, mostrado na figura 41.

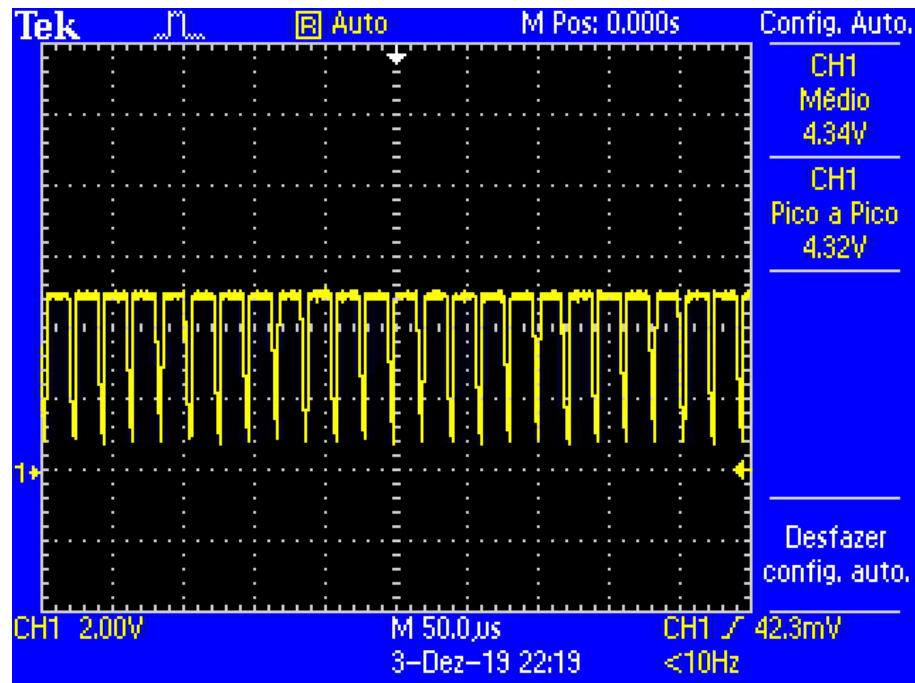
A figura 42 exibe a corrente de entrada do conversor Boost *Bridgeless* - parte superior da imagem - e o sinal PWM gerado pelo circuito de controle - parte de baixo da imagem - quando o sistema está operando com ambos os circuitos interligados. Nota-se que há um esforço para que a corrente siga a referência senoidal, porém a onda gerada não satisfaz adequadamente o objetivo de corrigir o fator de potência.

Figura 40 – Corrente na entrada do conversor sem a atuação do controle



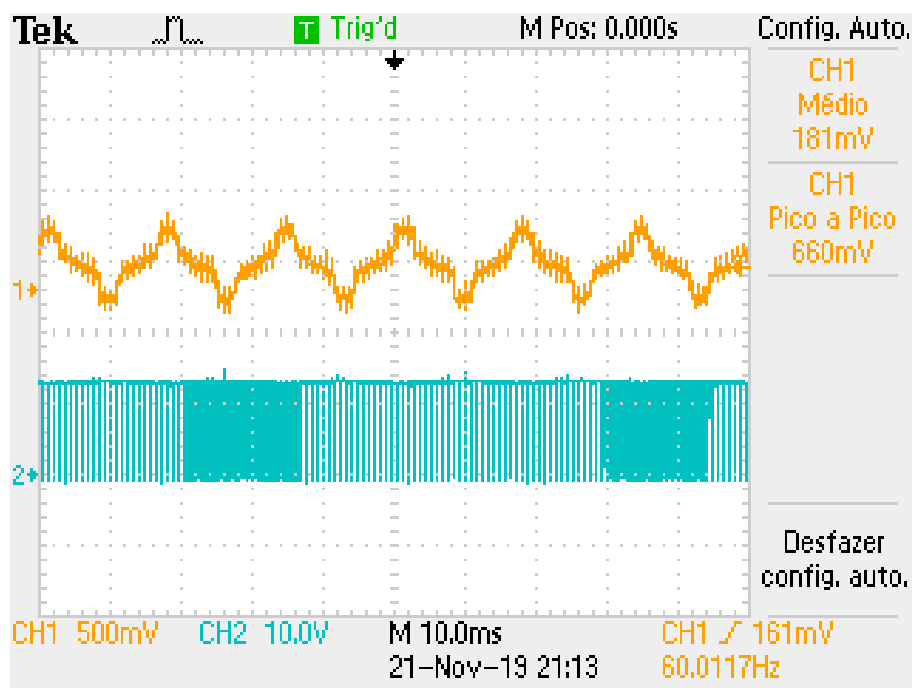
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 41 – Sinal PWM gerado pelo controlador



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 42 – Corrente de entrada e sinal PWM de controle



Fonte: Elaborada pelo autor

Sendo assim, ao contrário das simulações computacionais, a implementação prática não gerou os resultados desejados para o projeto. Tanto o conversor Boost *Bridgeless*, como o circuito de controle atuaram adequadamente quando alimentados individualmente, fornecendo à carga uma tensão CC elevada em relação a entrada e gerando o sinal PWM de controle, respectivamente. Entretanto, quando os circuitos atuaram juntos, os sinais não conseguiram ter o mesmo comportamento.

Ademais, vale salientar que é inédita a implementação do controlador do conversor Boost *Bridgeless* PFC utilizando o CI UC3854, visto que esse circuito integrado é empregado em conversores Boost comuns, com apenas uma chave semicondutora e com o circuito de retificação intrínseco no processo.

#### 4.4.1 Hipóteses de melhorias

Os resultados obtidos para o protótipo de bancada não atenderam integralmente as expectativas para o projeto. Dessa forma, seguem hipóteses de eventuais erros que possam ter interferido no comportamento do conversor, além de proposições de melhorias que podem ser executadas para que sejam realizados testes a fim de se obter o correto funcionamento do sistema.

- Referência entre circuitos: percebeu-se que, ao interligar os circuitos de potência, controle e retificação, o sistema teve comportamento irregular e instável, evidenciando problemas na referência entre os circuitos;
- Chaveamento dos dispositivos semicondutores: analogamente ao item acima, o chaveamento dos IGBTs também foi irregular enquanto recebiam o sinal de controle do CI UC3854. Dessa forma, propõe-se a troca dos IGBTs por MOSFETs que exijam menor corrente de gate ( $I_g$ ) para serem chaveados;
- Frequência da PWM: o dispositivo UC3854 atua com diversas faixas de frequência, porém a frequência típica recomendada por TI (2005) é 100 kHz, o que pode ser alterado no atual projeto;
- Sensor de corrente: para a medição de corrente do conversor, utilizou-se um resistor *shunt*, entretanto a utilização de outra forma de sensoriamento, como um Transformador de Corrente (TC), por exemplo, pode mitigar erros de precisão e perdas do circuito;
- Diminuição da potência do conversor: os parâmetros setados no projeto dos circuitos consideraram tensão de entrada do conversor de 220 V, tensão de saída 400 V e potência de saída de 400 W. Devido à instabilidade do sistema, nem sempre foi possível trabalhar com essas faixas de valores, acarretando inclusive a danificação de componentes. Sendo assim, propõe-se ajustar o projeto com parâmetros de menor valor para facilitar o manejo do conversor Boost *Bridgeless* PFC;
- Controle digital: mediante ao não funcionamento do PFC com o circuito integrado, surge a possibilidade de tentar implementar o controle digital, utilizando microcontrolador que atenda aos requisitos do sistema.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo desse trabalho foi projetar e implementar um conversor Boost *Bridgeless* PFC com o intuito de melhorar a qualidade de energia elétrica, diminuindo distorções harmônicas e corrigindo o fator de potência de dispositivos e sistemas.

Na primeira parte do projeto, contextualizaram-se os conceitos imprescindíveis para o entendimento do projeto. Assim, com base no estudo bibliográfico realizado, optou-se pela utilização do conversor Boost *Bridgeless* operando no MCC para a realização da correção de fator de potência.

O projeto de potência e o projeto de controle foram desenvolvidos com o auxílio dos *softwares* PSIM, Matlab e Mathcad, pelos quais foi possível validar o projeto. A malha de controle cumpriu adequadamente o que se propôs, tanto para regulação de tensão de saída, fixando em 400 V, como para o fator de potência, para o qual foi alcançado o valor de 0,998, muito próximo a unidade, além da THD, com uma taxa de 5,14 %.

Na implementação prática utilizou-se o CI UC3854 para controlar o conversor Boost *Bridgeless*, caracterizando um fato inédito na literatura, visto que utiliza-se esse CI para controlar conversores Boost convencionais, diferentes da topologia *Bridgeless* proposta nesse trabalho. Os circuitos de potência e controle funcionaram individualmente, porém, não apresentaram resultados precisos atuando juntos.

Diante do exposto, as simulações corresponderam de forma adequada às expectativas, porém problemas na implementação do protótipo inviabilizaram resultados práticos concisos. Entretanto, o trabalho tem plenas condições de ser levado adiante para a resolução dos eventuais problemas de implementação, de forma a atingir resultados concretos na correção do fator de potência de sistemas e dispositivos elétricos.

Visando a continuidade do trabalho, será empregado ao conversor as hipóteses de melhorias sugeridas na subseção 4.4.1.

## REFERÊNCIAS

- AHAMAD, I. et al. Comparison of Conventional PFC Boost Converter and Bridgeless PFC Boost Converter. **International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering**, v. 4, n. 5, p. 210–212, 2016.
- ARRABAÇA, D. A.; GIMENEZ, S. P. **Conversores de Energia Elétrica CC/CC para aplicações em Eletrônica de Potência: conceitos, metodologia de análise e simulação**. 1ª. ed. São Paulo: Editora Érica, 2014. 224 p.
- BELTRAME, R. C. **Projeto e Implementação de um Conversor Boost PFC CCM de 650 W com Entrada Universal de Tensão**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — UFSM, Santa Maria, 2008.
- BELTRAME, R. C. **Análise Comparativa de Conversores Monofásicos Aplicados à Correção de Fator de Potência**. Dissertação (Mestrado) — UFSM, Santa Maria, 2009.
- BORGES, J. A. **Projeto e Análise de um Conversor CA-CC Monofásico Boost Entrelaçado sem Ponte de Diodos e com Correção Ativa do Fator de Potência Empregando a Técnica de Imposição de Corrente Média**. Dissertação (Mestrado) — UFU, Uberlândia, 2019.
- DAMASCENO, D. d. M. S. **Metodologia de Projetos de Conversores Boost para Correção de Fator de Potência Aplicada a Sistemas Ininterruptos de Energia**. Dissertação (Mestrado) — UFSM, Santa Maria, 2006.
- DIAS, J. C. **Família de Retificadores Boost Unidirecionais Híbridos Monofásicos com Célula de Capacitor Chaveado**. Dissertação (Mestrado) — UFSC, Florianópolis, 2017.
- ECKSTEIN, R. H. **Sistema para Conexão de Pequenos Aerogeradores com a Rede Elétrica: Análise, Projeto e Experimentação**. Dissertação (Mestrado) — UFSC, Florianópolis, 2014.
- ERICKSON, R. W.; MAKSIMOVIC, D. **Fundamentals of Power Electronics**. 2ª. ed. New York: Kluwer Academic Publishers, 2001. ISSN 1098-6596. ISBN 9781466580077.
- FERRAZ, W. D. C. **Modelagem e Simulação de uma Fonte Chaveada com elevado Fator de Potência**. Dissertação (Mestrado) — UFSM, Santa Maria, 2012.
- FORTUNA, M. J. **Estudo Experimental de um Conversor de Tensão Monofásico-Trifásico com Elevado Fator de Potência**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — URI, Erechim, 2017.
- HART, D. W. **Eletrônica de Potência - análise e projeto de circuitos**. 8ª. ed. Porto Alegre: Editora Bookman, 2011. ISBN 9780073380674.
- HUBER, L.; JANG, Y.; JOVANOVIĆ, M. M. Performance evaluation of bridgeless PFC boost rectifiers. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 23, n. 3, p. 1381–1390, 2008. ISSN 08858993.

- LIU, Y.; SMEDLEY, K. Control of a dual boost power factor corrector for high power applications. **IECON - 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**, n. 949, p. 2929–2932, 2004.
- MAMEDE, J. F. **Instalações Elétricas Industriais**. 9<sup>a</sup>. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2017. ISBN 9783540773405.
- MARTINEZ, R.; ENJETI, P. A high-performance single-phase rectifier with input power factor correction. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 11, n. 2, 1996.
- MARTINS, D. C.; BARBI, I. **Conversores CC-CC Básicos Não Isolados**. 4<sup>a</sup>. ed. Florianópolis: Edição dos Autores, 2011.
- MEDEIROS, K. P. **Estratégia de Controle para Retificadores Boost PWM Bidirecionais Monofásicos e Trifásicos**. Dissertação (Mestrado) — UFCG, Campina Grande, 2010.
- MOREANO, J. P. **Projeto de um Conversor bridgeless PFC para Ensino de Controle de Conversores**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — UDESC, Joinville, 2018.
- MORENO, H. **Harmônicas em instalações elétricas**. 1<sup>a</sup>. ed. São Paulo: Procobre - O Instituto Brasileiro do Cobre, 2008.
- MORICONI, U. **Designin a High Power Factor Switching Preregulator With the L4981 Continuous Mode**. [S.l.]: STMicroelectronics Application Note AN628, 2004.
- NEPOMUCENO, L. E. R. **Estudo da Modulação por Largura de Pulso (PWM) para Inversores de Potência**. [S.l.], 2008.
- PIENIZ, M. **Análise da Influência da Frequência de Comutação e da Ondulação da Corrente de Entrada no Projeto de Conversores PFC para Minimização do Volume de Magnéticos**. Dissertação (Mestrado) — UFSM, Santa Maria, 2006.
- ROGGIA, L. **Estudo, Controle e Implementação do Conversor Boost PFC Operando no Modo de Condução Mista**. Dissertação (Mestrado) — UFSM, Santa Maria, 2009.
- SHANTHI, M.; SEYEZHAI, R. Simulation and Analysis of Bridgeless Dual Boost PFC with LLC Resonant Converter for Battery Charging Applications. **International Journal of ChemTech Research**, v. 11, n. 04, p. 27–37, 2018. ISSN 09744290.
- TI. **UC3854AB: Advanced High-Power Factor Pre-Regulator (Datasheet)**. Texas Instruments. [S.l.], 2005.
- TODD, P. C. **UC3854 Controlled Power Factor Correction Circuit Design**. [S.l.]: Unitrode Application Note U-134, 1999.