

# **DESENVOLVIMENTO DE UM INVERSOR DE TENSÃO MONOFÁSICO COM SAÍDA SENOIDAL PURA PARA CARGAS NÃO LINEARES**

Development of a single-phase voltage inverter with pure sinusoidal output for  
non-linear loads

**ADONO, Gustavo Thomaz**

Centro Universitário de Jaguariúna - UNIFAJ

**SANTOS, Leonardo Caíque**

Centro Universitário de Jaguariúna - UNIFAJ

**CATÃO, Gabriel Pinto**

Centro Universitário de Jaguariúna - UNIFAJ

**TASSO, Gabriel**

Centro Universitário de Jaguariúna - UNIFAJ

## **INTRODUÇÃO**

Ao longo dos tempos, o homem se utilizou de sistemas conversores de energia para transformação dos mais variados tipos de energia, seja desta em outra forma ou trabalho, tais como energia cinética em energia elétrica ou vice-versa.

A eletrônica de potência, objeto deste artigo, trata das conversões de energia no ramo da eletricidade e pode ser definida como a arte de converter energia elétrica de forma eficiente, limpa, compacta e arrojada, satisfazendo as necessidades definidas (RASHID, 2014). Utiliza como principal elemento para realização das conversões elétricas as chaves semicondutoras, que observaram uma revolução notável a partir de 1958, com o desenvolvimento do tiristor pela *General Electric Company* e posteriormente entre o final dos anos 80 e início da década de 90 (CARROL, 1996), possibilitando o chaveamento mais veloz de dispositivos de potência cada vez mais elevada.

O uso dos conversores na eletrônica de potência, possibilita a transformação dos níveis de tensão, corrente e frequência, podendo estes serem classificados em quatro tipos: corrente contínua para corrente contínua (CC-CC), corrente alternada para corrente alternada (CA-CA), corrente alternada para corrente contínua (CA-CC) e corrente contínua para corrente alternada (CC-CA).

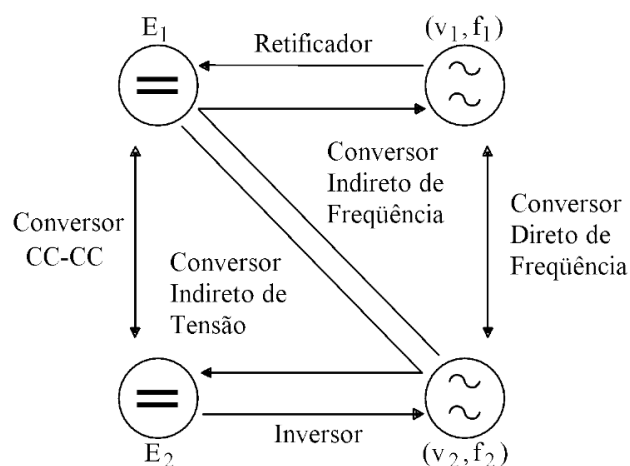


Figura 1 : Conversores da eletrônica de potência  
Fonte: BARBI (2019).

### Fundamentação teórica

Também conhecidos como inversores, os conversores CC-CA têm a finalidade de transformar um sinal de entrada contínuo em um sinal de saída alternado simétrico, com amplitude e frequência desejados (BEDFORD e HOFT, 1964).

Classificados como inversores de tensão ou corrente, sendo seu sistema monofásico ou trifásico, os inversores apresentam diversas topologias para alcançar a conversão de tensão ou corrente desejados.

Essencialmente, um inversor de tensão é alimentado por uma fonte CC constante, normalmente uma bateria ou algum retificador controlado, e o inversor executa a conversão para uma tensão de saída CA (AHMED, 2000).

O objetivo deste artigo, é verificar as duas principais topologias e técnicas de controle disponíveis para os inversores de tensão monofásicos.

#### Inversor de tensão em meia-ponte

Considerado a base dos inversores de tensão e utilizado em aplicações de baixa potência, a configuração em meia-ponte utiliza duas chaves semicondutoras, que comumente podem ser um BJT (*Bipolar Junction Transistor*) ou um MOSFET (*metal-oxide semiconductor field-effect transistor*), duas fontes de tensão DC e dois diodos completam o circuito, mantendo o funcionamento adequado do mesmo quando a carga é indutiva (AHMED, 2000).

Realizando a conexão entre a carga e as fontes de tensão, as chaves se alternam ciclicamente entre abertas e fechadas por metade do ciclo de trabalho

cada, apresentando na saída um sinal de tensão quadrado AC, que por limitação desta topologia, tem amplitude igual a metade da soma das fontes de tensão de entrada.

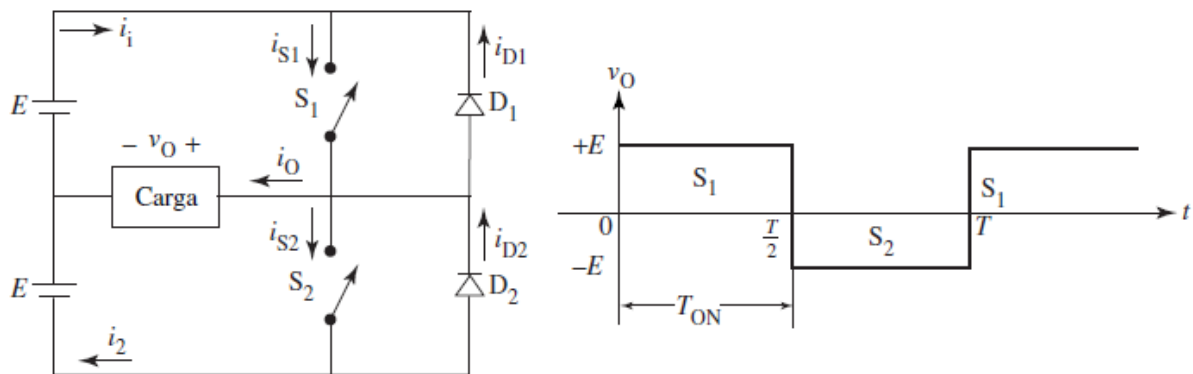


Figura 2: Inversor de tensão em meia ponte, sinal de saída.  
Fonte: Adaptado de AHMED (2000, p 353).

### Inversor de tensão em ponte completa

Originário da combinação entre dois circuitos em meia ponte, o inversor de ponte completa tem seu funcionamento baseado no chaveamento em pares das quatro chaves semicondutoras presentes no circuito, durante metade de cada ciclo de trabalho (AHMED, 2000).

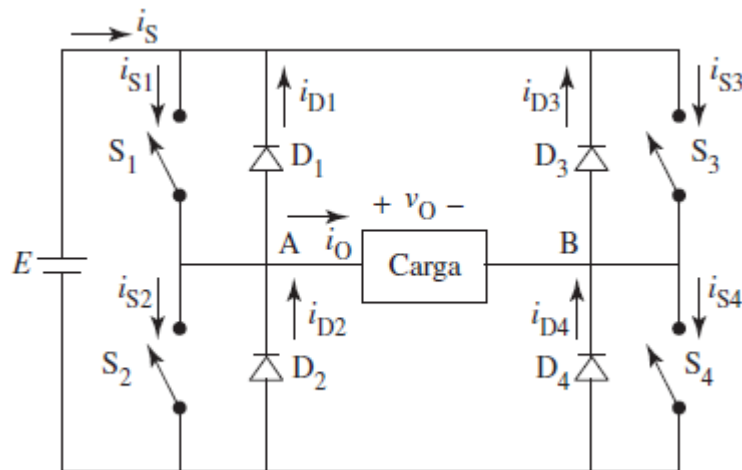


Figura 3: Inversor de tensão em ponte completa.  
Fonte: AHMED (2000, p 357)

Seu funcionamento é baseado no chaveamento alternado em pares dos quatro elementos interruptores. Com a passagem de corrente entre S1 e S4 ou S2 e S3, é permitido a alternância de polaridade na carga, fornecendo à saída do circuito um sinal alternado de amplitude máxima igual à tensão de entrada (AHMED, 2000).

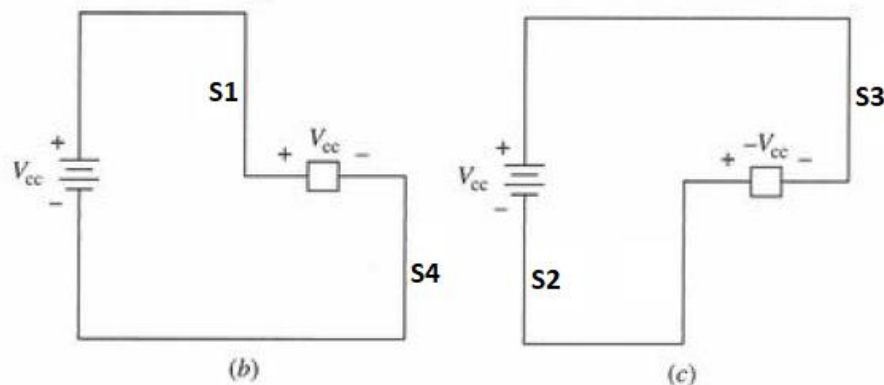


Figura 4: Chaveamento S1/S4 e S2/S3 da carga.  
Fonte: Adaptado de HART (2012, p 347).

No entanto, devemos notar que as chaves S1 e S2 e S3 e S4 não podem ser fechadas ao mesmo tempo, visto que ocorreria um curto-circuito da fonte de entrada. Como na prática as chaves eletrônicas não possuem ativação instantânea, é necessário realizar a temporização adequada da transição entre as chaves, evitando um curto-circuito. O nome deste procedimento é conhecido como tempo morto (HART, 2012).

Dentre as técnicas existentes para efetuar o controle dos elementos comutadores do inversor de tensão, a modulação por largura de pulso (PWM) é a mais encontrada. Nela, a tensão de saída é uma onda modulada, onde a largura dos pulsos se altera conforme a necessidade de projeto. A modulação por largura de pulso pode ser classificada em três grupos: modulação por largura de pulso simples, modulação por largura de pulso múltipla e modulação por largura de pulso senoidal (AHMED, 2000).

### **Modulação por largura de pulso simples**

Neste método de controle o sinal de saída apresenta apenas um pulso por semiciclo da tensão, onde a amplitude máxima do sinal é definida pela alteração do tempo de condução de cada par de chaves semicondutoras, no caso de um inversor de ponte completa (AHMED, 2000).

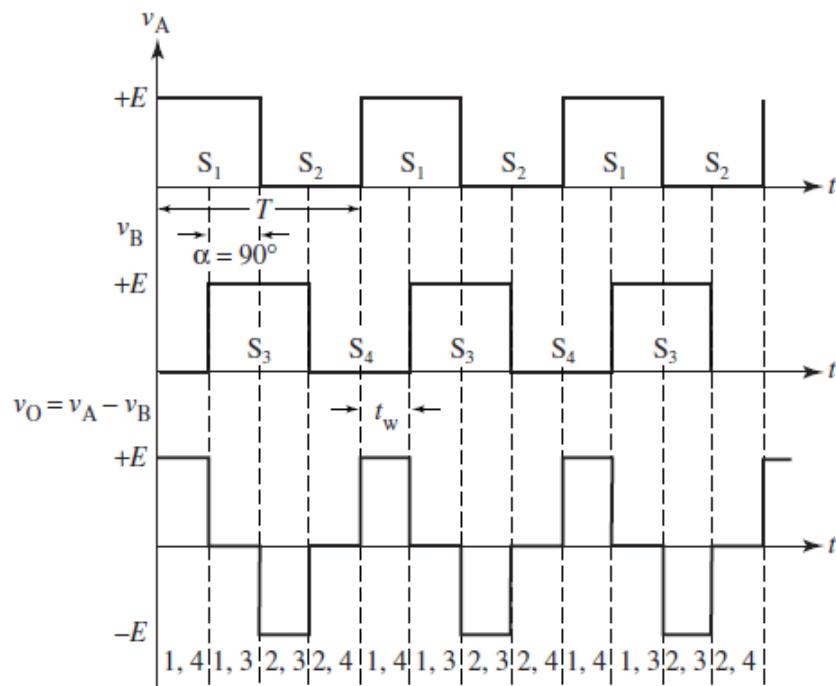


Figura 5: Modulação por largura de pulso simples.  
Fonte: AHMED (2000, p 367).

### Modulação por largura de pulso múltipla

O controle por largura de pulso múltipla, ao contrário da técnica anterior, não limita a duração de um único pulso por semiciclo, e sim aumenta a quantidade de pulsos existentes em cada semiciclo, a fim de controlar a tensão de saída (AHMED, 2000).

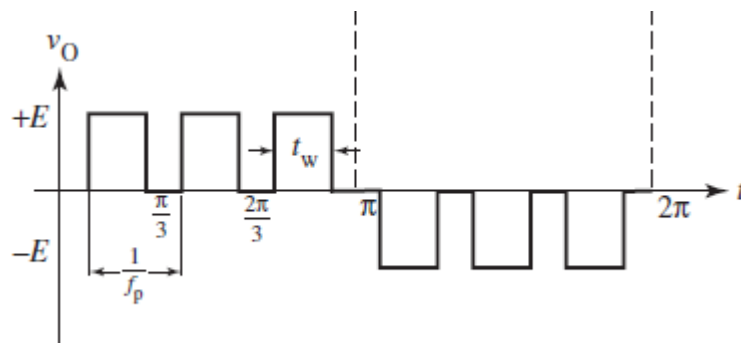


Figura 6: Sinal de saída modulado por largura de pulso múltipla.  
Fonte: Adaptado de AHMED (2000, p 368).

A geração do sinal de controle é obtida a partir da comparação entre um sinal de referência linear e uma onda portadora triangular, que são aplicados aos elementos comutadores (RASHID, 2014), como exemplificado na Figura 7.

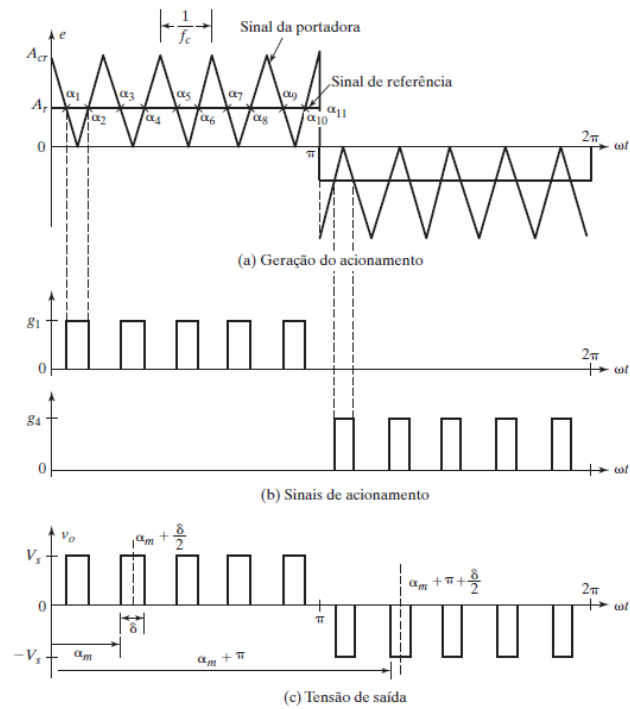


Figura 7: Processo de geração do sinal modulado por largura de pulso múltipla.  
Fonte: RASHID (2014, p 263).

### Modulação por largura de pulso senoidal

Desejando obter na saída um sinal senoidal, esta técnica utiliza uma onda senoidal como referência de comparação à um sinal triangular. Neste método, a duração dos pulsos por semiciclo se altera conforme a amplitude da onda senoidal utilizada na comparação (RASHID, 2014). Dessa forma, os pulsos terão duração mais longa nos momentos de pico da onda senoidal (AHMED, 2000).

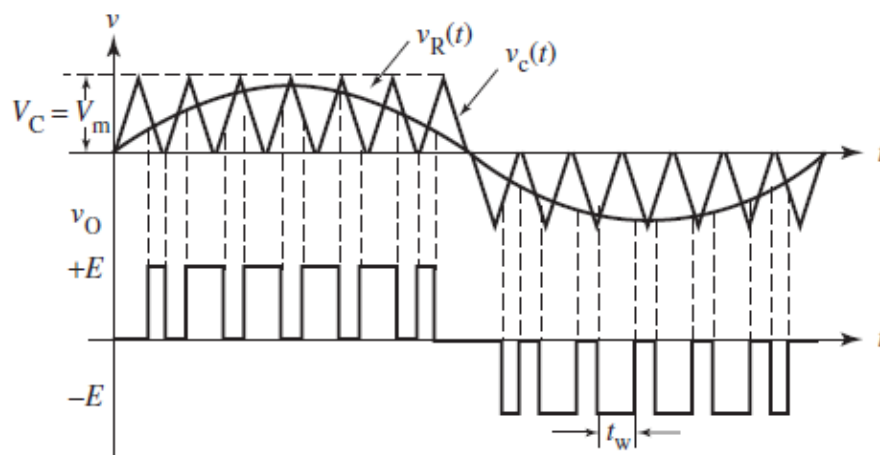


Figura 8: Comparação do sinal senoidal e triangular, geração da modulação por largura de pulso senoidal.

Fonte: AHMED (2000, p 370).

## Transformador

Devido aos dois métodos de conversão abordadas nesse artigo, sendo meia-ponte (Half Bridge) e ponte completa (Full Bridge), deve-se atentar a construção do transformador, etapa destinada a elevação de tensão, onde surge preocupações com possíveis saturação de núcleo (GERENT, 2005)

Conforme a Figura 9, a escolha do núcleo é dada pela área da janela do núcleo ( $A_w$ ) e do entreferro ( $A_e$ ).

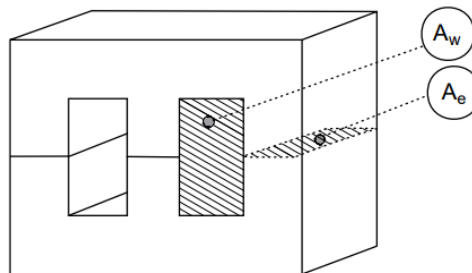


Figura 9: Núcleo Transformador  
Fonte: BARBI (2007).

A definição do núcleo se dá por (1.1):

$$A_s A_{sw} = \frac{1,1 P_{out} 10^4}{K_p K_w J f \Delta B} \text{ cm}^4 \quad (1.1)$$

Onde a constante  $K_p$  representa o fator de utilização do primário e a constante  $K_w$  o fator de utilização da área do enrolamento, tendo seus valores sugeridos por (Barbi, 2007), como  $K_p = 0,41$  e  $K_w = 0,4$ .

Para a adoção da secção do fio de cobre devemos observar abaixo (1.2) (BARBI, 2007):

$$S_{cm} = \frac{I_{sf}}{J} \quad (1.2)$$

Para a definição do número de espiras do primário utilizamos (1.3) (OLIVEIRA, 2009):

$$N_1 \geq \frac{V_{imin} D_{max}}{A_s B F_a} \quad (1.3)$$

Deste modo (1.4) apresenta a relação de transformação (OLIVEIRA, 2009).

$$N = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.4)$$

### Filtro de Saída

Em função da manutenção das frequências de saída, devido as altas distorções harmônicas, provenientes da condensação do sinal senoidal, a adoção de um filtro LC passa-baixa apresentado na Figura 10, torna-se fundamental (MICHELS, CAMARGO, & BOTTERÓN, 2005).

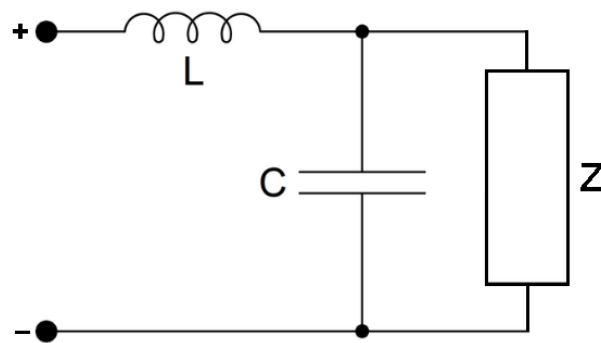


Figura 10: Filtro LC  
Fonte: Adaptado de MICHELS, CAMARGO, & BOTTERÓN (2005).

Deste modo o resultado da função de transferência se mostra em (2.1) e (2.2), onde a frequência de corte do filtro é dada por ( $\omega$ ), e o coeficiente de amortecimento por ( $\zeta$ ) (SANTOS, 2017).

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{\frac{1}{LC}}{S^2 + \frac{1}{RC}S + \frac{1}{LC}} \quad (2.1)$$

e,

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{\omega_o^2}{S^2 + 2\zeta\omega_o S + \omega_o^2} \quad (2.2)$$

Sendo,

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.3)$$

e,



$$\zeta = \frac{1}{2R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.4)$$

Devemos ressaltar que o valor do coeficiente de amortecimento tenha seu valor acima de 0,7, como também não deve ultrapassar a 1, afim de preservar-se de oscilações e defasagens respectivamente.

Em função da frequência de corte recomendasse considerar valores próximos a trinta vezes superior que a fundamental (SANTOS, 2017).

## **OBJETIVO**

O trabalho surge pela motivação de disponibilizar uma fonte de energia de corrente alternada (CA) a partir da conversão de energia de uma bateria (fonte de corrente contínua), a fim de solucionar necessidades de acesso em locais sem a devida infraestrutura.

Posto isso o trabalho visa o estudo, projeto e montagem de um inversor senoidal monofásico com saída senoidal pura para cargas não lineares, visando o aprimoramento de conversores comerciais que não apresentam tais características.

## **DESENVOLVIMENTO / METODOLOGIA**

Para este trabalho foi indispensável uma vasta pesquisa bibliográfica afim de gerar e melhorar os fundamentos necessários para o desenvolvimento deste trabalho. Através desta pesquisa, foi possível determinar o circuito de controle, interface de potência, transformador elevador e o filtro LC que atende a necessidade das cargas não-lineares. O projeto foi dividido em seis etapas a qual a Figura 11, ilustra.

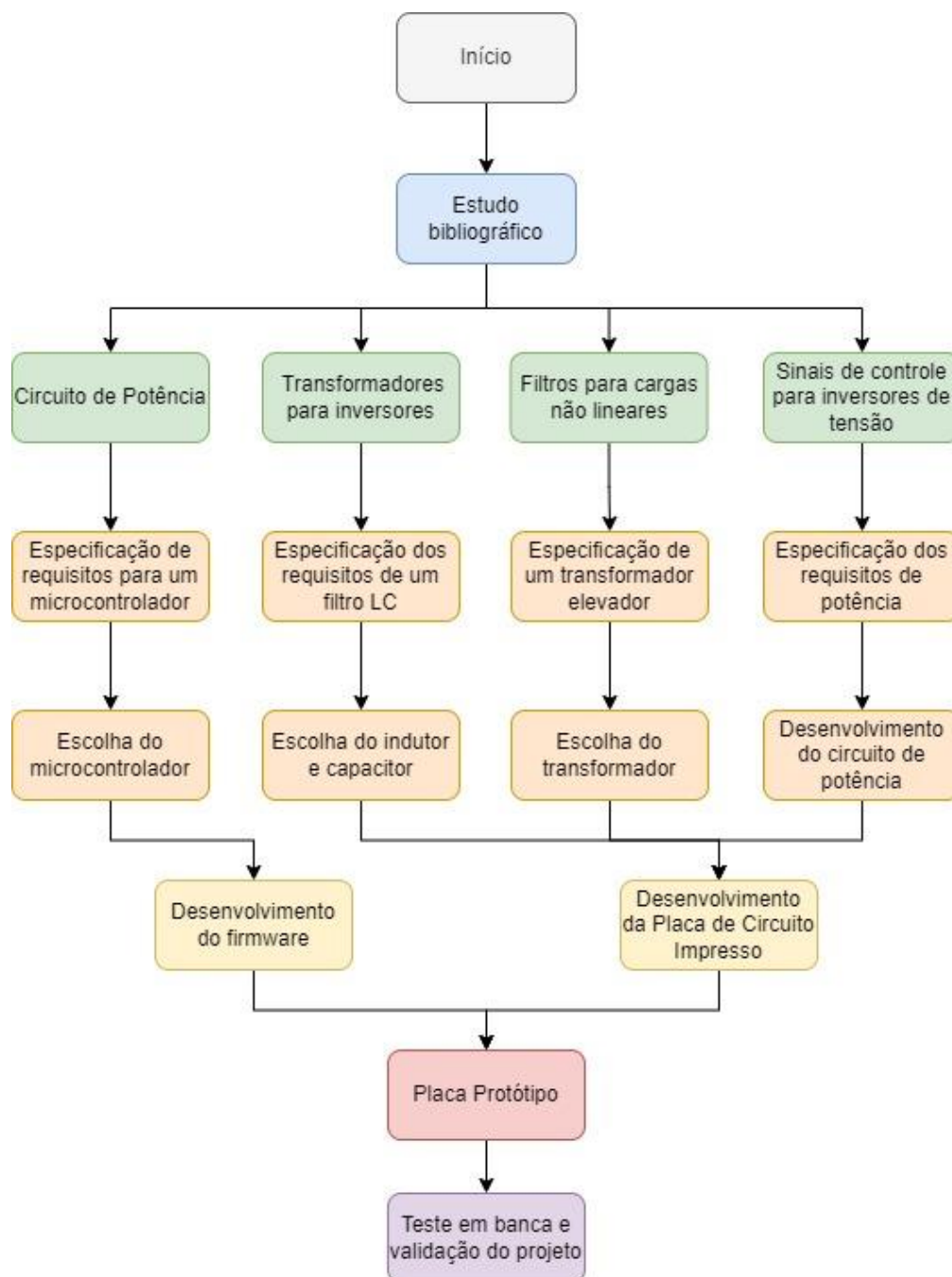


Figura 11: Fluxograma de desenvolvimento do projeto.

A primeira etapa foi baseada na pesquisa bibliográfica, foram analisadas na literatura artigos científicos, livros, monografias e dissertações.

Assim foi possível descobrir e melhorar os fundamentos utilizados ao longo do desenvolvimento do projeto.

Na segunda etapa, foi determinado a separação dos principais temas abordados no trabalho e cada um estudado de forma aprofundada. Aqui foi possível realizar uma especificação das técnicas e requisitos dos materiais necessários para o desenvolvimento do protótipo físico.

Na terceira etapa, será feita a especificação e dimensionamento dos indutores, capacitores, chaves de potência, microcontrolador, transformador e demais componentes para que seja possível realizar a confecção de um protótipo físico.

Com esse protótipo, poderemos realizar testes de bancada e validar as teorias abordadas. Também é de escopo desta etapa estudar e determinar as plataformas de softwares a serem utilizados para o desenvolvimento do firmware, testes elétricos e funcionais.

Na quarta etapa, será desenvolvido o circuito elétrico, o layout da placa de circuito impresso, a lista de materiais e arquivos de fabricação, dessa forma podemos solicitar a fabricação de uma placa protótipo em uma empresa especializada. Nesta etapa também será desenvolvido as bibliotecas e algoritmos necessários para realizar o controle da interface de potência.

A quinta etapa será responsável pela montagem do protótipo, tanto da parte eletrônica quanto da parte elétrica e mecânica, nesta etapa também será realizado testes, elétricos e funcionais a fim de garantir a integridade dos sub circuitos e algoritmos desenvolvidos previamente.

Já na sexta etapa, será realizado testes elétricos e funcionais com cargas não lineares, dessa forma será possível analisar se o inversor irá atender a todos os requisitos impostos neste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDEL-RAHIM, N. M. (1996). Analysis and design of a multiple feedback loop control strategy for single-phase voltage-source UPS inverters. *IEEE Transactions on power electronics*, 532--541.
- AHMED, A. (1998). *Eletrônica de Potência*. Pearson.
- AHMED, A. (2000). *Eletrônica de Potência*. Pearson.
- ANIS, M. I. (2009). Techniques for SPWM using LUTs on low-cost microcontrollers. *2009 5th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications*, 327--331.
- BARBI, I. (2007). *Eletrônica de potência: Projeto de fontes chaveadas*. Edição do autor.
- BEDFORD, B. D.; HOFT, R. G. (1964). *Principle of Inverter Circuits*.
- CARROLL, E. I. (1996). "Power Electronics: Where Next?". *Power Engineering Journal*.
- GERENT, F. H. (2005). Metodologia de Projeto de Inversores monofásicos de tensão para cargas não-lineares. Florianópolis.
- HART, D. W. (2012). *Eletrônica de Potência: análise e projeto de circuitos*.
- MICHELS, L., CAMARGO, R. F., & BOTTERÓN, F. (2005). Metodologia de projeto de filtros de segunda ordem para inversores de tensão com modulação PWM digital. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, v. 16, n. 2,, p. 221-242,.
- OLIVEIRA, J. C. (2009). PROJETO E ESTUDO DE UM CONVERSOR CA/CC DE ALTA POTÊNCIA, 14,4 V E 300 A PARA APLICAÇÕES AUTOMOTIVAS. Londrina.
- RASHID, M. H. (2014). *Eletrônica de Potência. Dispositivos, circuitos e aplicações*.
- SANTOS, W. B. (2017). Estudo, reprodução e análise de um inversor de tensão em ponte completa chaveado em alta frequência com saída senoidal pura. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

### **Sobre os autores**

Gustavo Thomaz Adono.

Graduando em Engenharia Elétrica.

E-mail para contato: [adonogustavo@gmail.com](mailto:adonogustavo@gmail.com)

Leonardo Caique dos Santos.

Graduando em Engenharia Elétrica.

E-mail para contato: [leonardocaiquesantos@outlook.com](mailto:leonardocaiquesantos@outlook.com)

Gabriel Pinto Catão.

Graduando em Engenharia Elétrica.

E-mail para contato: [bielcatao9@gmail.com](mailto:bielcatao9@gmail.com)

Gabriel Tasso.

Graduando em Engenharia Elétrica.

E-mail para contato: [gabrieltassoo@gmail.com](mailto:gabrieltassoo@gmail.com)