



Universidade Federal
de Campina Grande

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELETRICA E INFORMATICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PROJETO: FONTE CHAVEADA 12V/80A COM
TOPOLOGIA FULL-BRIDGE

Alcindo José da Costa Medeiros

CAMPINA GRANDE – PB
AGOSTO DE 2018

Alcindo José da Costa Medeiros

Relatório do trabalho de conclusão de curso apresentado à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para obtenção do título de graduado em Engenharia Elétrica.

Campina Grande – PB
Agosto de 2018

Alcindo José da Costa Medeiros

PROJETO: FONTE CHAVEADA 12V/80A COM
TOPOLOGIA FULL-BRIDGE

Relatório do trabalho de conclusão de curso apresentado à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para obtenção do título de graduado em Engenharia Elétrica.

Área de concentração Eletrônica de Potencia

Aprovado em / / .

Professor Avaliador

Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Alexandre Cunha Oliveira

Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Campina Grande – PB
Agosto de 2018

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos primeiros a Deus por me dar força e coragem para seguir nos estudos.

À Minha esposa, por estar comigo sempre que preciso, me apoiando em todas as situações para que eu consiga estudar.

Aos meus pais por terem contribuído enquanto puderam para minha formação.

Não tem como não passar por esse curso de engenharia elétrica e não ser muito agradecido à “mãezona” Adail e ao grande Tchai que nos adota, pegando na mão desde o primeiro dia do curso e ajudando em todas as situações.

Agradeço ao meu orientador, Alexandre, bem como muitos outros professores do departamento pela boa vontade em compartilhar seus conhecimentos.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para realização desse trabalho, OBRIGADO POR TUDO.

RESUMO

O presente trabalho apresenta estudos referente à topologia de conversores dita isolada para implementação de uma fonte chaveada destinada a sons automotivos. O estudo de chaveamento, geração da onda triangular, PWM e controle da saída também compõe esse trabalho. Todos esses blocos de circuitos são implementados a fim de se ter uma boa potência na saída com o menor tamanho possível do conversor.

A topologia adotada é a topologia full-bridge, com controle por PWM.

Encontra-se nesse trabalho diversas simulações referentes a cada bloco e ao conjunto, para que se tenha o máximo de previsão para possível montagem física.

Palavras-chave: conversores de potência, topologia full-bridge, PWM, controlador PI.

Dedico este trabalho à minha esposa e filha,
que torcem e almejam o final dessa jornada.

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Ampère;
Ae	área do núcleo de um indutor/transformador;
$B_{m\acute{a}x}$	máximo campo magnético suportado pelo núcleo;
CA	corrente alternada;
CC	corrente contínua;
$C_{m\acute{i}n}$	capacitância mínima da saída da fonte;
D	ciclo de trabalho;
F	frequência;
IGBT	insulated gate bipolar transistor ou transistor bipolar de porta isolada;
$I_{o\acute{m}a}x$	corrente máxima de saída;
$I_{o\acute{m}i}n$	corrente mínima de saída;
$I_{p\acute{i}c}o$	corrente de pico do enrolamento;
L	indutância do primário/secundário;
$L_{m\acute{i}n}$	indutância mínima;
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, ou transistor de efeito de campo metal – óxido;
Pi	potência de entrada;
PI	proporcional e integral;
Po	potência de saída;
PWM	pulse width modulation – modulação por largura de pulso;
Vg	tensão de saída do PWM;
Vi	tensão de entrada;
Vo	tensão de saída;
$V_{o\acute{i}m}a\acute{g}e\acute{m}$	imagem da tensão coletada na saída da fonte;
$V_{r\acute{e}f}$	tensão de referência da saída da fonte;
V	volt;;
Vrms	volts em tensão eficaz;
W	watts;
ΔI_o	variação da corrente de saída;
ΔV_o	variação da tensão de saída;
$I_{o\acute{m}a}x$	

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Configuração usual de uma Fonte Chaveada	12
Figura 2:	esquema de algumas fontes chaveadas isoladas	13
Figura 3:	esquema do conversor flyback	13
Figura 4:	formas de onda do conversor flyback	14
Figura 5:	esquema do conversor flyback com múltiplas saídas	15
Figura 6:	esquema do conversor full bridge	16
Figura 7:	circuito clamper limitador de tensão	17
Figura 8:	exemplos de diversos núcleos para transformador.	19
Figura 9:	ilustração da modulação por largura de pulso (PWM)	20
Figura 10:	esquema de uma planta $G(s)$ e controlador PI	22
Figura 11:	controlador PI implementado com amplificador operacional	22
Figura 12:	diagrama do gerador de onda triangular.	29
Figura 13:	transformador para alimentação dos circuitos de sinal e controle	29
Figura 14:	forma de onda do gerador de onda triangular.	30
Figura 15:	frequência de 22kHz da onda triangular.	30
Figura 16:	implementando um PWM com duas saídas complementares Q1 e Q2 a partir do gerador de onda.	27
Figura 17:	Saídas Q1 e Q2 do PWM	27
Figura 18:	Circuito de potência da fonte.	28
Figura 19:	gráfico da tensão e da corrente de saída da fonte para uma carga máxima.	32
Figura 20:	Gráfico da tensão em uma das chaves durante a comutação	33
Figura 21:	Gráfico da tensão e corrente em uma das chaves durante a comutação com o circuito limitador de tensão.	33
Figura 22:	circuito de comando com a saída PWM melhorada pra o IR2108.	33
Figura 23:	bootstrap e circuito de rastreo da tensão de referência implementando no circuito de potência	34

SUMÁRIO

Agradecimentos	4
Resumo	5
LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS	7
Lista de figuras	8
Sumário	9
1 INTRODUÇÃO	10
2 OJETIVOS	10
2.1 Objetivo Geral	10
2.2 Objetivos Específicos	11
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
3.1 Fontes Chaveadas	11
3.2 Fontes Chaveadas Isoladas	12
3.3 Topologia Full-bridge	15
3.4 Tranformadores	15
3.5 Modulação PWM	18
3.6 Controladores PI	19
4. METODOLOGIA	21
4.1 Pesquisa de Mercado	21
4.2 Estudo Bibliográfico, Definição da Topologia e Circuitos Secundários Usados no Protótipo	22
4.3 Dimensionando os Componentes	22
5. SIMULAÇÃO	26
6. CONCLUSÃO	31
REFERÊNCIAS	32

1. INTRODUÇÃO

O mercado de sons automotivos tem gerado demanda para inovação de diversos componentes necessários à implementação desse sistema.

Cada dia tem aparecido componentes melhores, com maior potência e eficiência. Dentre a gama desses componentes, um que se destaca é a fonte que alimenta todo o sistema. Até um tempo atrás, esses dispositivos utilizados eram exclusivamente as fontes retificadas. O principal atrativo desse tipo de fonte era um preço menor em relação às chaveadas. No entanto, elas ocupam maior volume. Já as fontes chaveadas têm como vantagem um tamanho reduzido, algo ideal para montagem de um som em um carro que tem pouco espaço disponível.

De fato, após pesquisa de mercado, constatou-se que os consumidores que buscam essas fontes são unânimes quanto uma exigência: o menor tamanho possível. Com a troca das fontes retificadas pelas chaveadas no sistema de som, ganha-se mais espaço, algo que tem muita importância na confecção desses sistemas.

Outra vantagem das fontes chaveadas é a sua eficiência energética no processo de conversão. O que pode significar menor dissipação do calor para entregar mais potência ao sistema.

Assim, desenvolver fontes chaveadas voltadas para esse mercado pode ser um bom negócio para uma empresa do setor.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Projetar fonte de alimentação para som automotivo que seja capaz de entregar uma tensão de 14.4volts e 80 ampères ao sistema de som, bem como, alimentar possível banco de baterias que tal sistema exija.

2.2 Objetivos Específicos

- ▶ Fazer o levantamento das exigências no mercado para o tipo de fonte em questão;
- ▶ Decidir, através do estudo da literatura a melhor topologia a ser adotada para a necessidade do projeto;
- ▶ Realizar medições na simulação para testar seu funcionamento, verificando tensões de saída, de entrada, entre outras características sobre o produto;

- ▶ Desenhar o “layout” de todo o circuito para implementação de protótipo em uma loja de componentes eletrônicos.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Apresenta-se a seguir, os pressupostos teóricos que fundamentam esse trabalho.

3.1 Fontes Chaveadas

Sucessoras das fontes lineares de tensão, as fontes chaveadas são circuitos eletrônicos de potência que têm a finalidade de converter tensões de entrada em nível diferente da tensão de saída, proporcionando uma saída regulada através de chaveamento por interruptores eletrônicos (tipo transistores Mosfet ou IGBT).

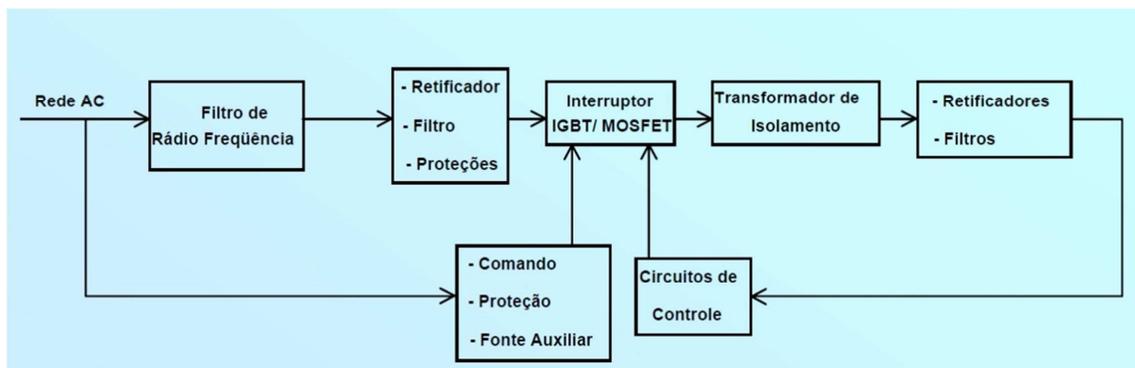
Essa regulação da tensão de saída por chaveamento proporciona uma diminuição no volume da fonte em relação à sua precursora, bem como melhor controle do seu funcionamento.

Essas fontes podem entregar tensão alternada (em geral senoidais), fontes CA ou tensão contínua no tempo, fontes CC. Abordar-se-á neste relato as fontes que operam com tensão contínua.

Segundo Muhammad (1999, p. 571), para a maioria das aplicações, essas fontes precisam ter pelo menos as seguintes especificações:

- ▶ Isolação entre a fonte e a carga;
- ▶ Alta densidade de potência para redução do tamanho e do peso;
- ▶ Sentido do fluxo de potência controlado;
- ▶ Eficiência da conversão elevada;
- ▶ Formas de onda de entrada e saída com baixa distorção harmônica total para que os filtros sejam pequenos;
- ▶ Fator de potência controlado se a tensão de entrada da fonte for CA.

Figura 01: Configuração usual de uma Fonte Chaveada.



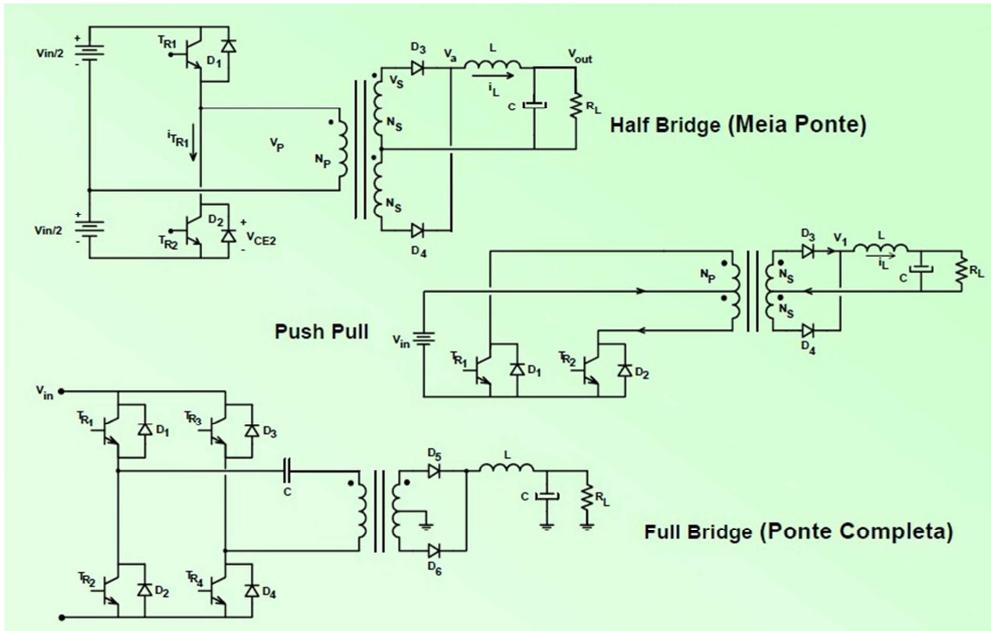
Fonte: SOUZA p. 9.

3.2 Fontes Chaveadas Isoladas

Fontes chaveadas são ditas isoladas quando o circuito de entrada opera de forma isolada eletricamente do circuito de saída. Isso ajuda a proteger os usuários do risco de choque elétrico devido à fuga de corrente e à alta tensão do circuito de entrada. Normalmente essa isolação é feita usando-se transformadores. Neste caso, a única ligação entre a entrada e a saída é o fluxo magnético compartilhado entre os dois circuitos. O transformador pode operar como indutor acoplado, armazenando a energia em forma de fluxo magnético e depois entregando esta energia para a saída, ou simplesmente convertendo diretamente o fluxo em tensão no estágio de saída (POMILIO, 2018, p. 2-1).

Há quatro configurações comuns para conversores isolados: flyback, push-pull, half-bridge (meia ponte) e full-bridge (ponte completa) (Muhammad, 1999 p. 572). Na figura 2 vê-se o esquema de alguns deles:

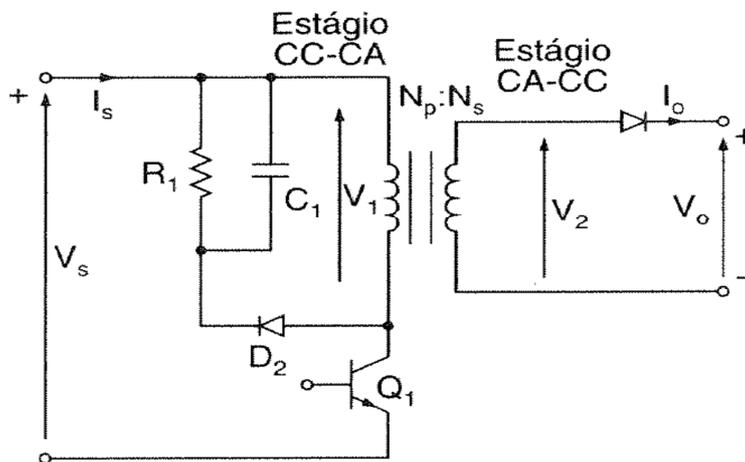
Figura 02: Esquema de algumas fontes chaveadas isoladas,



Fonte: SOUZA, p. 74

Como exemplos desse tipo de fonte, temos ainda o flyback, que, segundo (Barbi, 2007), é um conversor amplamente utilizado em fontes chaveadas de baixa potência. Seu funcionamento é baseado no funcionamento do conversor “buck”, onde a energia é armazenada em um indutor num período de tempo e só depois é transferida para a carga. Para o flyback, a diferença é que o indutor é substituído por um transformador. Com a inserção deste, o antigo circuito “buck” ganha duas características a mais, a saber, isolamento galvânica e a possibilidade de um ajuste da tensão de saída por meio da relação do número de espiras entre o primário e o secundário.

Figura 03: Esquema do conversor flyback, fonte: MUHAMMAD, p. 574



Fonte: MUHAMMAD, 1999, p. 574

O esquema ilustrado na figura 3 mostra que o circuito opera em duas etapas. Na primeira, “quando o transistor Q1 entra em condução, a tensão de alimentação aparece sobre o primário do transformador e uma tensão correspondente é induzida no secundário” (MUHAMMAD, p. 572). Na segunda etapa, “quando Q1 é cortado, uma tensão de polaridade oposta é induzida no primário pelo secundário, devido à ação do transformador” (MUHAMMAD, p. 572) e a energia acumulada no campo elétrico do transformador durante a primeira etapa é transferida para a carga e para o capacitor.

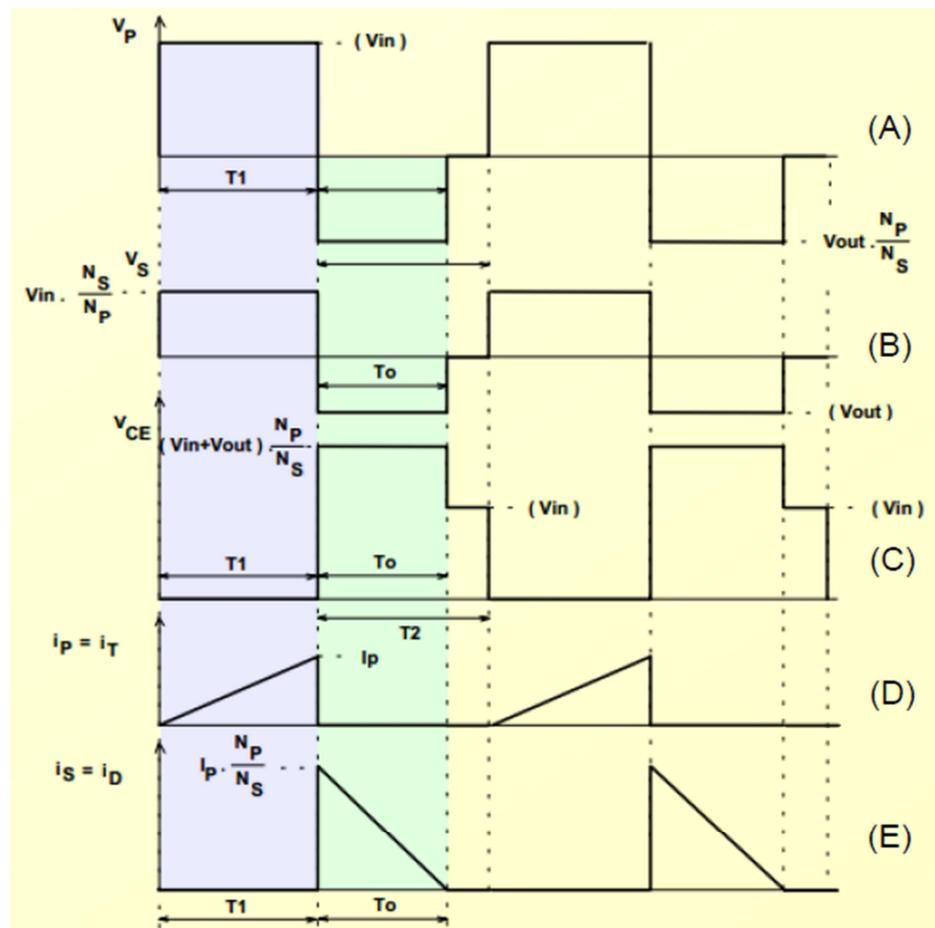
A relação tensão de entrada “Vi” e tensão de saída “Vo” no modo de condução contínua é:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{D}{1 - D}$$

, onde D é definido como ciclo de trabalho e pode variar.

As principais formas de onda desse conversor em funcionamento encontram-se na figura 4.

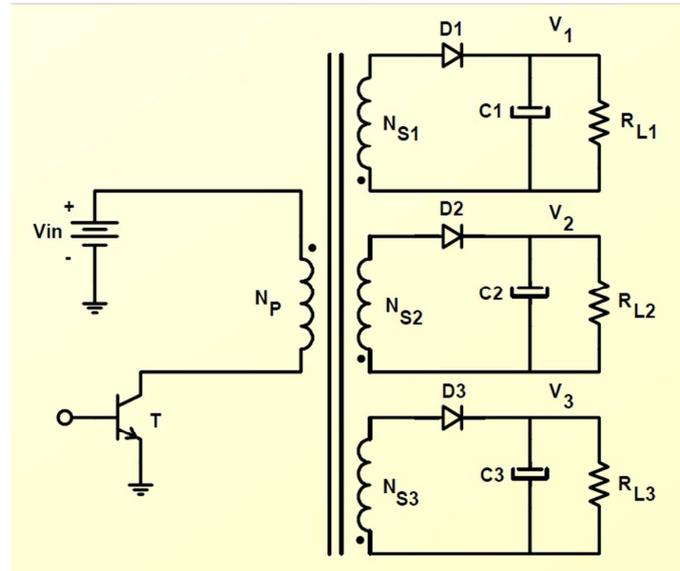
Figura 04: Formas de onda do conversor flyback. (A) Tensão no primário do transformador (B) Tensão no secundário do transformador. (C) Tensão coletor emissor do transistor T. (D) Corrente no primário do transformador. (E) Corrente no secundário do transformador



Fonte: SOUZA, p. 43

Uma desvantagem na utilização desse conversor é que a corrente de entrada é pulsante e descontínua e a tensão mínima no transistor é duas vezes a tensão de entrada, assim como sua corrente, quando o ciclo de trabalho é de 50%. Uma vantagem dessa configuração é a configuração com múltiplas saídas, como ilustrado na figura 05.

Figura 05: esquema do conversor flyback com múltiplas saídas



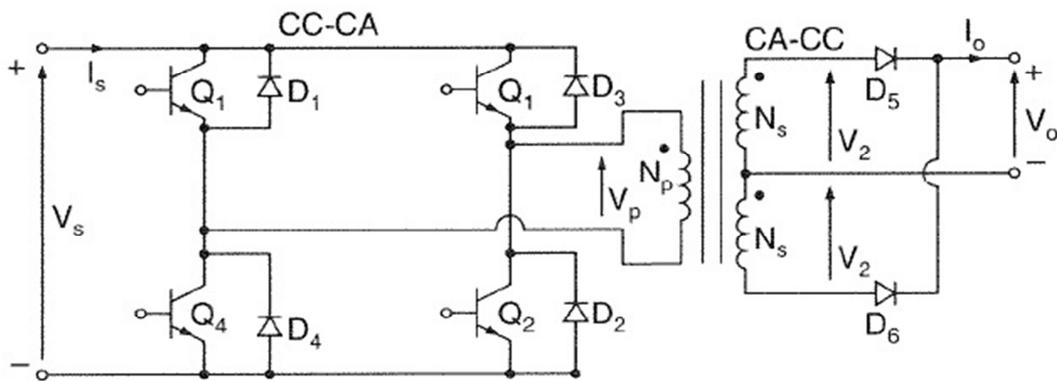
Fonte: SOUZA, p. 44

3.3 Conversor Full Bridge

Para conversores que necessitam entregar potência maior que 500W na saída, a configuração flyback não é apropriada devido à grande exigência das chaves (transistor e diodos) em relação à tensão e corrente. Para potências maiores a configuração mais indicada é o conversor “full bridge”.

Esse conversor tem no seu circuito de entrada uma ponte “H” composta de 4 chaves eletrônicas, que são ligadas duas a duas de maneira cruzada, proporcionando tensões diferentes para o primário do transformador mesmo com uma tensão no barramento fixa. Isto faz com que as correntes sejam divididas por todas elas, diminuindo o esforço para cada chave. Na figura 6 tem-se uma ilustração do circuito deste conversor:

Figura 06: esquema do conversor full bridge



Fonte: MUHAMMAD, p. 574

No arranjo “full bridge” mostrado na figura 6, segundo (MUHAMMAD, 1999, p. 574), quando Q1 e Q2 conduzem, a tensão no primário do transformador é igual à tensão de entrada (V_s). Quando Q3 e Q4 conduzem, a tensão primária é invertida para um valor simétrico da tensão de entrada ($-V_s$).

A relação entre a tensão de saída V_o e a tensão de entrada V_i é dada por:

$$\frac{V_{o_{\max}}}{V_{i_{\min}}} = \frac{N_s}{N_p} \cdot 2D$$

, onde D = ciclo de trabalho e tem que ser inferior a 50%.

Como características desse circuito, temos uma tensão de circuito aberto na chave igual à tensão de entrada V_i e corrente igual à corrente de entrada. Como o ciclo de trabalho deve ser inferior a 50%, tem-se que a corrente média nas chaves deve ser menor que a corrente de entrada.

Esses valores denunciam um esforço menor nos transistores e implicam uma capacidade de entregar maior potência na saída. É então por esse motivo, que foi escolhido esse conversor para implementar a fonte, objeto deste trabalho.

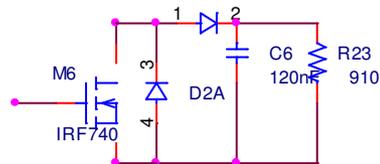
Como essa topologia utiliza um transformador e, na prática, o acoplamento não é ideal, é possível ocorrer o efeito de indutância de dispersão. Esse efeito, associado ao uso de chaves reais, onde a capacitância desses dispositivos produzem componentes de correntes que também impactam no seu funcionamento, possibilita a ocorrência de ressonância no circuito. Essa ressonância implica em uma oscilação, a qual pode representar uma importante fonte de interferência eletromagnética e perdas nos componentes do circuito.

Segundo (Pomilio, 2018, p. 2-11), esses comportamentos indesejados devem ser limitados por meio de circuitos adicionais que minimizem a sobretensão e contenham a ressonância. Há diversas soluções possíveis, todas com o objetivo de

absorver a energia presente na indutância de dispersão no momento da interrupção da corrente (desligamento do transistor).

Uma solução possível é uso de um circuito auxiliar limitador de tensão: o circuito clamper, o qual é acoplado nos terminais da chave. A figura 7 ilustra o circuito.

Figura 7: circuito clamper limitador de tensão.



Sem esse circuito, controlar o chaveamento fica mais complicado devido às oscilações de tensão no dreno e na fonte do transistor.

3.4 Transformadores

Esse dispositivo elétrico tem como principal função elevar ou diminuir a tensão ou corrente em um determinado circuito. Porém, os transformadores são muito utilizados como isoladores galvânicos, além de terem também utilidade no casamento de impedâncias entre diferentes circuitos ou fazerem parte de filtros em circuitos que utilizam rádio frequência.

Todo transformador é composto, por no mínimo, dois enrolamentos. Em sua maioria esses enrolamentos são independentes entre si, mas sofrem a ação do campo eletromagnético. A tensão obtida no secundário depende da relação de espiras entre o primário e o secundário do transformador e da tensão aplicada ao primário.

O princípio de funcionamento do transformador se dá pelo fenômeno conhecido como indução eletromagnética. Quando um circuito é submetido a um campo magnético variável, surge nele uma corrente elétrica que possui intensidade proporcional às variações de fluxo magnético. Quando uma corrente elétrica alternada é aplicada ao primário do transformador, produz um campo magnético proporcional à intensidade da corrente e ao número de espiras do enrolamento. Através do material do transformador o fluxo magnético praticamente não encontra resistência e concentra-se no núcleo, em grande parte, chegando ao enrolamento secundário com pequenas perdas. No secundário do transformador, ocorre a indução eletromagnética. Surge uma tensão elétrica que varia de acordo com a corrente no primário e com a razão entre os números de espiras dos dois enrolamentos.

Esse dispositivo pode ser usado tanto em baixa como em alta frequência. Para as altas frequências é possível usar um transformador de menor tamanho.

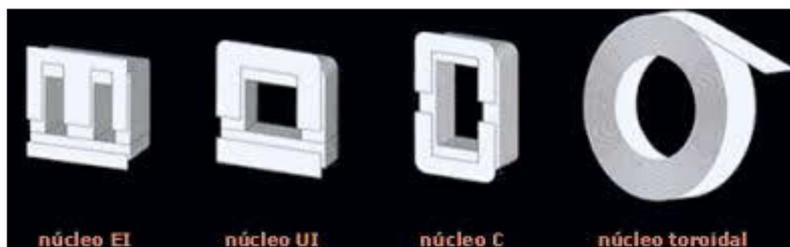
O grande problema reside no fato de que transformadores e indutores operando em alta frequência inserem no circuito de potência uma série de elementos parasitas (não-idealidades), tais como: indutância magnetizante, indutância de dispersão, capacitâncias entre enrolamentos, capacitâncias entre espiras, etc.

Tais elementos parasitas se refletem em resultados indesejáveis no funcionamento do conversor. Os resultados mais comumente observáveis são picos de tensão nos semicondutores, altas perdas e emissão de ruídos (interferência eletromagnética conduzida e irradiada).

O sucesso na construção e no perfeito funcionamento de um conversor CC-CC está intimamente ligado com um projeto adequado dos elementos magnéticos (BARBI, 2002).

É de extrema importância a escolha do tipo de núcleo a ser utilizado na construção de um transformador, pois suas características podem afetar diretamente o desempenho do circuito. No mercado, existem vários tipos de núcleos que podem ser utilizados na fabricação de um transformador, como mostra a Figura 07.

Figura 8: Exemplos de diversos núcleos para transformador.



Fonte: <http://brito.blog.incolume.com.br/2017/10/como-enrolar-transformadores-toroidais.html>.

O objetivo do núcleo magnético é fornecer um caminho adequado para o fluxo magnético.

Entre os tipos de materiais utilizados na construção de núcleos destacam-se o ferrite e as lâminas de ferro-silício. Em operações em baixas frequências as lâminas de ferro-silício são mais adequadas, porém, com o aumento da frequência de operação, as perdas por histerese e conseqüentemente a elevação de temperatura tornam impraticáveis o seu uso. Os núcleos de ferrite são indicados para operação em frequências mais elevadas, porém, apresentam algumas desvantagens em relação às lâminas de ferro silício, tais como baixa densidade de fluxo de saturação (0,3T) e baixa robustez a choques mecânicos (BARBI, 2002).

Além do núcleo, para produzir um enrolamento (indutor) também é preciso saber o número de espiras necessárias para que se alcance a indutância necessária.

Para encontrar o número de espiras no primário usa-se a seguinte equação:

$$N = \frac{L \cdot I_{\text{pico}}}{B_{\text{máx}} \cdot Ae}$$

, onde:

L= indutância do primário/secundário;

I_{pico}= corrente máxima do enrolamento;

B_{máx} = máximo campo magnético suportado pelo núcleo e

Ae = área do núcleo.

3.5 Modulação PWM

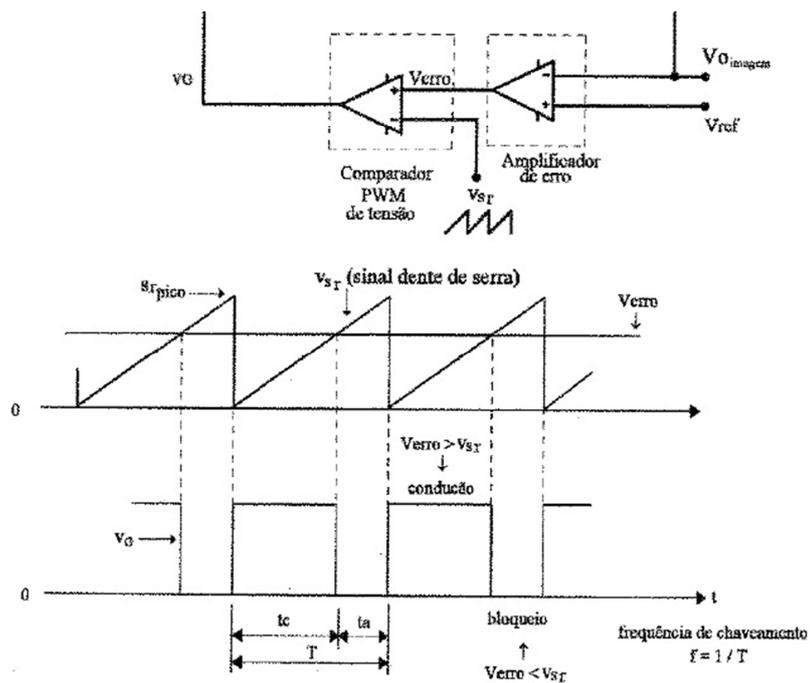
A fim de manter a tensão da saída do conversor constante, com a carga variando de zero ao seu valor máximo, é necessário controlar o chaveamento do circuito de entrada.

Via de regra, as fontes chaveadas operam a partir de uma fonte de tensão CC de valor fixo, enquanto na saída tem-se também uma tensão CC, mas de valor distinto

(fixo ou não). As chaves semicondutoras estão ou no estado bloqueado ou em plena condução. A tensão média de saída depende da relação entre o intervalo em que a chave permanece fechada e o período de chaveamento. Define-se ciclo de trabalho (largura de pulso ou razão cíclica) como a relação entre o intervalo de condução da chave e o período de chaveamento.

Segundo (BARBI, 2000 p. 51), para controlar a tensão de saída dos conversores a modulação PWM (Pulse Width Modulation), ou modulação por largura de pulso, é a mais usada. A figura 08 ilustra o princípio básico de funcionamento.

Figura 9: ilustração da modulação por largura de pulso (PWM).



Fonte: BARBI, 2000 p. 52.

Na figura, $V_{oimagem}$ normalmente é obtida a partir de um divisor resistivo e comparado com um sinal de referência V_{ref} . Essa comparação gera um erro entre a tensão de referência (tensão de saída desejada) e a tensão medida na saída do conversor. Esse erro é amplificado e em seguida, comparado com um sinal triangular na entrada do comparador PWM. A tensão na saída do comparador será uma forma de onda retangular V_g que definirá o tempo de condução da chave. Quando o erro for maior do que o sinal triangular então V_g assume valor V_g^+ , caso contrário, V_g assume valor $V_g^- = 0$. E o ciclo de trabalho D será então definido por:

$$D = \frac{V_{erro}}{V_{pico}}$$

, onde: $V_{erro} = V_{oimagem} - V_{ref}$ e V_{pico} = tensão de pico do sinal triangular.

É possível ver que o tempo de condução da chave é controlado de forma a manter a tensão de saída correspondente ao valor de tensão da referência.

Para controle de chaves dimensionadas em ponte, é comum implementar duas saídas para o PWM. Onde uma saída controla o primeiro estágio, em que a tensão de saída na ponte é positiva. Já outra saída controla o segundo estágio, em que a tensão de saída na ponte é negativa. Neste caso uma saída trabalha apenas na primeira metade do período (de 0 a $T/2$) e a outra trabalha na segunda metade ($T/2$ a T). Ambas podem ficar ativas (valor alto) no máximo 50% do tempo do período.

3.6 Controlador PI

Os mais diversos sistemas dinâmicos têm necessidade de controlar automaticamente suas variáveis. A ideia central é que a saída de um sistema possa ser medida e retransmitida a um controlador usado para fazer o controle da planta que se quer controlar. E com isso, conseguir estabilidade, rastreabilidade a entradas de comando e insensibilidade a distúrbios (FRANKLIN, 2013).

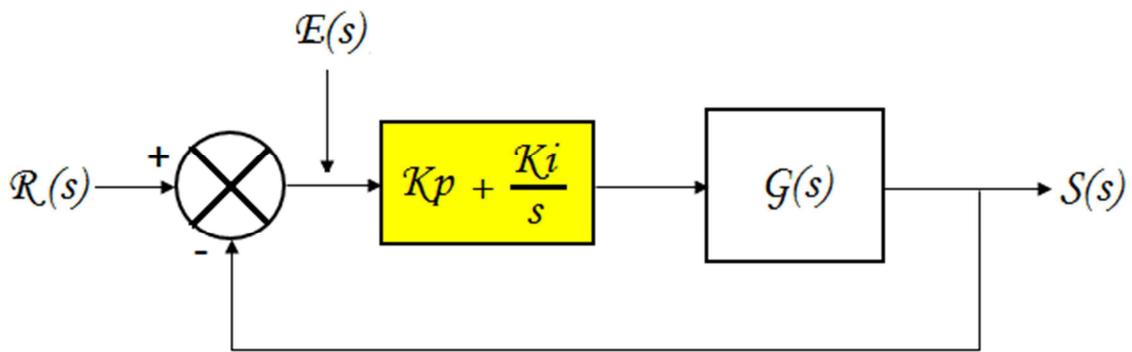
Várias são as técnicas e controladores usados para se alcançar esses objetivos. O mais comumente utilizado é o controlador proporcional e integral – PI. Esses controladores apresentam, em suas ações de controle, diferentes proporcionalidades em relação ao sinal, de modo que o sinal que sai do controlador e vai para o sistema é proporcional ao erro, de maneira instantânea, e também este mesmo sinal é proporcional à integral do erro.

É importante ressaltar que ambos os controladores isolados (o controlador proporcional e integral), possuem vantagens e desvantagens. Como por exemplo, o fato de o controlador proporcional poder fazer com que o sistema atinja o regime permanente de maneira mais rápida, porém, sem eliminar o erro estacionário para uma entrada em degrau, em contrapartida, o controlador integral pode proporcionar a eliminação deste erro, pagando o preço de não produzir uma ação de controle tão rápida quanto a anterior.

O controlador em questão tem duas componentes em sua ação de controle, uma proporcional ao erro e outra proporcional à integral do erro.

O esquema do sistema no domínio da frequência é ilustrado na figura 10.

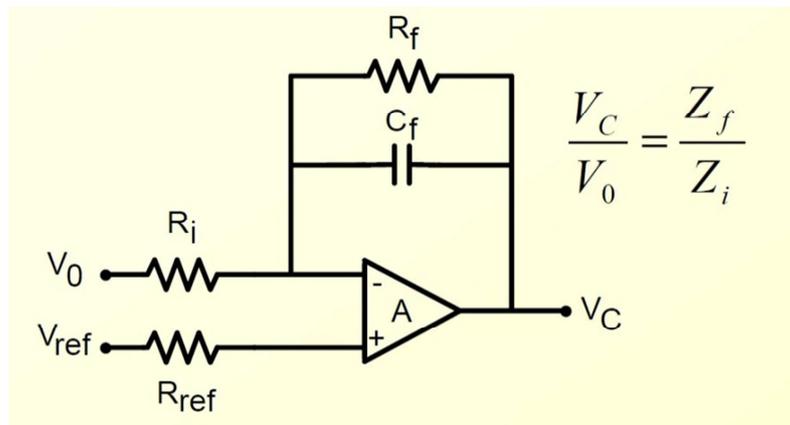
Figura 10: esquema de uma planta $G(s)$ e controlador PI.



Fonte: <https://www.embarcados.com.br/controlador-pi-primeira-ordem/>

Para controlar a tensão de saída do conversor será utilizado o controlador PI, o qual será implementado por meio de circuitos analógicos, usando amplificadores operacionais, resistores e capacitores. O arranjo do circuito é ilustrado na figura 11.

Figura 11: controlador PI implementado com amplificador operacional.



Fonte: SOUZA, p. 130

Observando que, V_0 na figura 11 representa a tensão de saída da fonte e V_{ref} representa a tensão de referência.

4. METODOLOGIA

A seguir será apresentado, o percurso metodológico e os instrumentos que foram utilizados para atingir os resultados desejados.

4.1 Pesquisa de Mercado

Para projetar um produto que tem finalidade comercial, inicialmente foi feita uma pesquisa de mercado com diversas montadoras de som automotivo, para entender melhor o mercado, buscando especificações, preços de venda, etc. que melhor atendem à demanda desse segmento.

Essa pesquisa apontou que o mercado exige fontes com o menor tamanho possível. Sua estrutura deve ter altura da ordem de 10 centímetros. Essa necessidade se dá pelo fato dos automóveis terem espaço reduzido para acomodar toda a estrutura automotiva.

Em relação às especificações de mercado, constatou-se que existe demanda para fontes com tensões de 14,4volts. Esse valor específico de tensão tem a finalidade de, caso haja banco de baterias, a fonte ser capaz de recarregá-las. Quanto à potência de saída desses equipamentos, os valores disponíveis no mercado são fontes com potência suficientes para entregar correntes de 40 a 200 ampères. Sendo as mais populares as fontes de 60, 80 e 100 ampères. É importante também, grande estabilidade na entrega de tensão e menor aquecimento possível.

Para esse protótipo, optou-se por um dispositivo que entregue 80 ampères na saída que é o valor de maior demanda no mercado, segundo as lojas especializadas.

A frequência de chaveamento deve ser escolhida com a finalidade de ter maior redução possível nos enrolamentos dos indutores e do transformador (visto que o tamanho está ligado à frequência), mas com o cuidado que se deve ter na frequência de trabalho dos outros componentes do sistema. Comercialmente, é possível encontrar tais fontes com frequência de chaveamento da ordem de 20kHz a 100kHz. Esses valores dependem da potência de saída – quanto maior a potência, maior a frequência – versus a propensão de interferência gerada pelo chaveamento. Como o som tem a faixa de frequência desde alguns Hertz até 20kHz, é normal que se encontre produtos no mercado com chaveamento a partir de 20kHz. Baseado nisso, foi proposto frequência de 22kHz para o projeto.

Tem agradado aos usuários dessas fontes, informações instantâneas de tensão e corrente de saída, bem como a temperatura interna. Ou seja, é possível pensar em um display que mostre essas informações ao usuário.

Assim, levantou-se os seguintes parâmetros para construção do protótipo:

Tensão de entrada: $V_i = 220V_{rms} = 311,12V_{pico}$;

Tensão de saída: $V_o = 14,4V$;

Corrente de saída: $I_o = 80A$;

Frequência de operação: $f = 22kHz$;

Período: $T=45,454\mu s$;

Eficiência: $\eta = 90\%$;

Varição da tensão de entrada: $\Delta V_i = 5\%$;

Varição da tensão de saída: $\Delta V_o = 5\%$;

4.2 Estudo Bibliográfico, Definição da Topologia e Circuitos Secundários Usados No Protótipo.

Para definição da topologia, foi feito um minucioso estudo bibliográfico das diversas topologias disponíveis na literatura, bem como verificação dos outros circuitos necessários ao funcionamento da fonte, tais como gerador de onda, controlador, PWM, etc.

De posse das opções, foi feito o levantamento sobre o custo benefício de cada topologia e dos circuitos complementares. Optou-se então pelo uso da topologia full-bridge. Para geração de onda com frequência de 22 kHz optou-se pelo circuito Schmitt Trigger. Para rastrear a tensão de referência e comandar o chaveamento das chaves, utilizou-se PWM com controlador PI analógico.

De posse dessas decisões é possível dimensionar os componentes.

4.3 Dimensionando os Componentes

a) Dimensionando o transformador principal:

Seja a tensão de entrada: $V_p = 311,12V$;

Para que haja um folga entre a tensão de saída do secundário V_s e a tensão nominal (14,4V), optou-se por $V_s = 20V$. Essa diferença de aproximadamente 6V ajuda a manter o ciclo de trabalho um pouco distante de 50%.

Tem-se então:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{311,12}{20} = 15,55$$

Tome-se:

$$\frac{N_p}{N_s} = 16$$

Para cálculo das indutâncias, tome-se a indutância no primário, $L_p = 8\text{mH}$.

Assim:

$$\frac{N_p}{N_{s_1} + N_{s_2}} = \sqrt{\frac{L_p}{L_{s_1} + L_{s_2}}}$$
$$\frac{16}{2} = \sqrt{\frac{8\text{mH}}{2L_s}} \leftrightarrow L_s = 62\mu\text{H}$$

- b) Dimensionando transformador para alimentação de circuitos de sinais, controle, etc.

Para produzir a tensão de alimentação de amplificadores operacionais, a saber, +12V e -12V, projetou-se outro transformador. Este também com secundário em derivação central. Assim, tem-se:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{311,12}{14} = 22,22$$

Tome-se:

$$\frac{N_p}{N_s} = 22$$

Tomando uma indutância no primário de 650 microhenrys, projeta-se o secundário:

$$\frac{N_p}{N_{s_1} + N_{s_2}} = \sqrt{\frac{L_p}{L_{s_1} + L_{s_2}}}$$
$$\frac{22}{2} = \sqrt{\frac{650\text{mH}}{2L_s}} \leftrightarrow L_s = 2,69\mu\text{H}$$

O filtro capacitivo foi determinado $C = 2\mu\text{F}$

- c) Dimensionando o ciclo de trabalho D:

Para pensar-se em um ciclo de trabalho máximo real, é preciso considerar a tensão de entrada máxima, a tensão mínima de saída e a eficiência. Assim, temos a seguinte equação para esse cálculo:

$$D = \frac{V_{O_{\text{máx}}}}{N_s / N_p \cdot 2 \cdot V_{i_{\text{mín}}}} \cdot \eta$$

Como:

$$V_{O_{\text{máx}}} = 14,4 \cdot 1,05 = 15,12V;$$

$$V_{i_{\text{mín}}} = 311,12 \cdot 0,95 = 295,6V;$$

Relação de espiras. Sugestão: $\frac{N_p}{N_s} = 16$

$$D = \frac{15,12}{2 \cdot 295,6 \cdot 0,9} \cdot 16 \cong 0,37$$

d) Cálculo da variação da corrente de saída:

Considerando uma variação na tensão de 5%

$$\Delta V_o = 5\%;$$

$$13,68 < \Delta V_o < 15,12$$

A potência de saída será:

$$P_o = 80 \cdot 14,4 = 1.152W$$

Para uma tensão de 13,68V, temos:

$$I_{O_{\text{máx}}} = \frac{P_o}{V_o} = \frac{1.152}{13,68} = 84,12A$$

$$I_{O_{\text{mín}}} = \frac{P_o}{V_o} = \frac{1.152}{15,12} = 76,19A$$

Tem-se então a seguinte variação de corrente ΔI_o :

$$\Delta I_o = I_{O_{\text{máx}}} - I_{O_{\text{mín}}} = 84,12 - 76,19 = 8,02A$$

e) Dimensionando o indutor:

Levando em consideração a tensão mínima de entrada, $V_{i\text{mín}}$; a tensão máxima de saída, $V_{o\text{máx}}$; e a variação da corrente, ΔI_o ; é possível calcular a indutância mínima $L_{\text{mín}}$ a partir da equação:

$$L_{\text{mín}} = \frac{2 \cdot N_2 / N_1 \cdot V_{i\text{mín}} - V_{o\text{máx}}}{\Delta I_o \cdot f} \cdot D_{\text{máx}}$$

$$L_{\text{mín}} = \frac{2 \cdot \frac{1}{16} \cdot 295,6 - 15,12}{8,02 \cdot 22 \cdot 10^3} \cdot 0,37$$

$$L_{\text{mín}} = 123,72 \mu\text{H}$$

Para haver uma margem de folga, dimensionou-se $L = 150 \mu\text{H}$

f) Dimensionando o capacitor de saída:

Levando em consideração a tensão de saída e sua variação, bem como a indutância mínima, é possível calcular a capacitância mínima a partir de:

$$C_{\text{min}} = \frac{(1 - 2D_{\text{máx}}) \cdot V_o}{32 \cdot \Delta V_o \cdot L_{\text{mín}} \cdot f^2}$$

$$C_{\text{min}} = \frac{(1 - 2 \cdot 0,456) \cdot 15,12}{32 \cdot 0,05 \cdot (56,41 \cdot 10^{-6}) (22 \cdot 10^3)^2}$$

$$C_{\text{min}} = 39,07 \mu\text{F}$$

g) Dimensionamento das chaves:

Tensão máxima de polarização reversa: 311,12V

Calculando a corrente nas chaves:

$$P_i = \frac{P_o}{\eta}$$

$$P_i = \frac{1,152}{0,9}$$

$$P_i = 1,280\text{W}$$

$$P_i = 1280 = V_i \cdot I_i$$

$$I_{i_{\text{máx}}} = \frac{P_i}{V_{i_{\text{mín}}}} = \frac{1280}{295,6}$$

$$I_{i_{\text{máx}}} = 4,33\text{A}$$

h) Diodos:

A corrente máxima que passa pelos diodos é a corrente de saída $I_o = 80\text{A}$. Como estes só conduzem no máximo por meio ciclo, então a corrente média é $I_o = 40\text{A}$

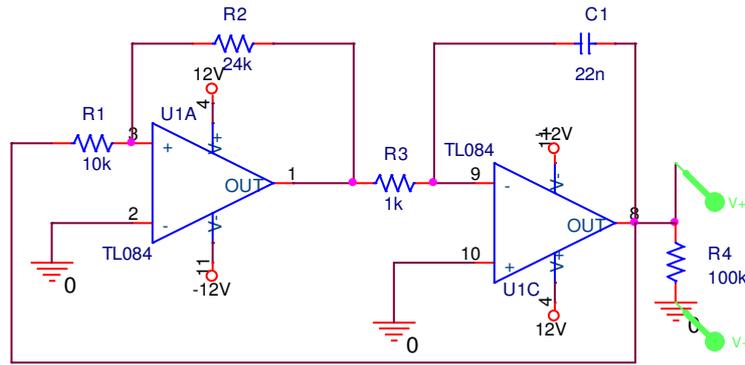
5. SIMULAÇÃO

De posse destes cálculos, iniciou-se o processo de simulação.

Para este projeto foi utilizado o simulador de circuitos Orcad Pspice Capture CIS.

Inicialmente projetou-se uma onda triangular com o circuito Schmitt Trigger. Na figura 12 é possível ver esse circuito projetado:

Figura 12: Diagrama do gerador de onda triangular.



Para projetar a tensão de pico V_p e a frequência de oscilação f para este circuito, utiliza-se as seguintes equações:

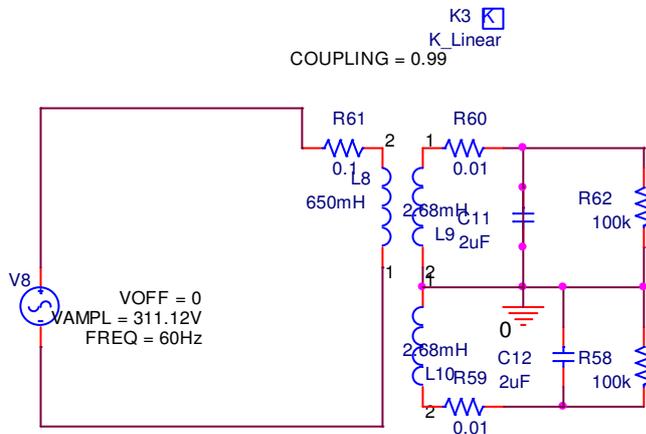
$$V_p = \frac{R_1}{R_2} \cdot V_{sat}$$

, onde V_{sat} representa a tensão de saturação do amplificador. E

$$f = \frac{R_1}{4 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot C_1}$$

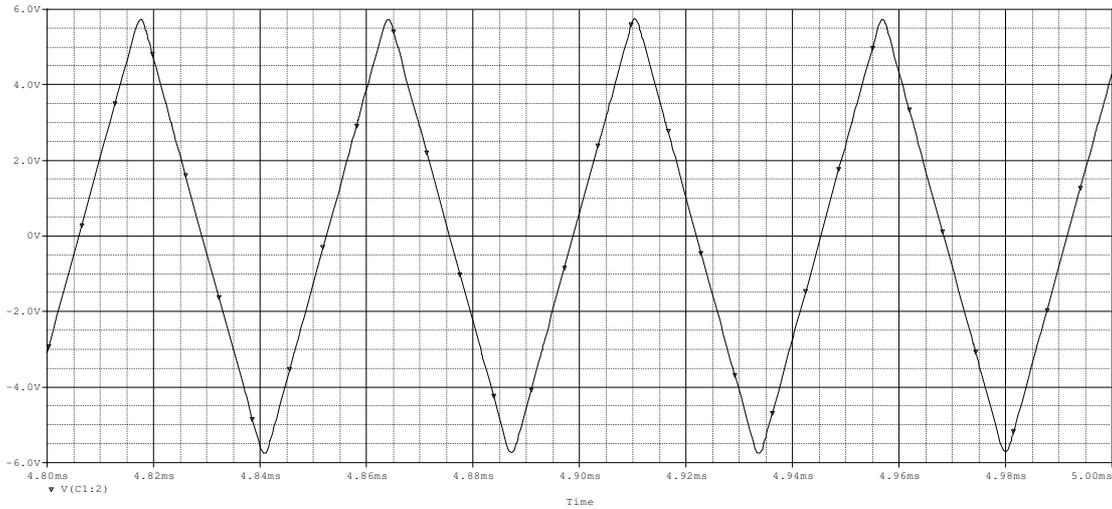
Para alimentar o circuito da figura 12 com +12V e -12V projetou-se o circuito da figura 13.

Figura 13: transformador para alimentação dos circuitos de sinal e controle.



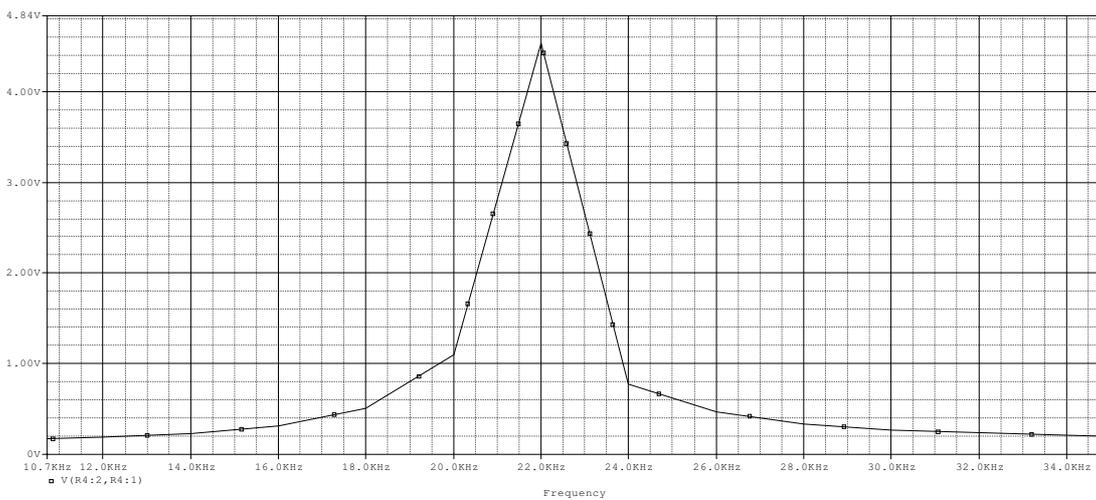
É possível ver na figura 14 como ficou a forma de onda em cima do resistor R4:

Figura 14: Forma de onda do gerador de onda triangular.



Aplicando a ferramenta “Fourier” do Pspice, foi possível verificar a frequência de oscilação desta forma de onda, que foi projetada para 22kHz:

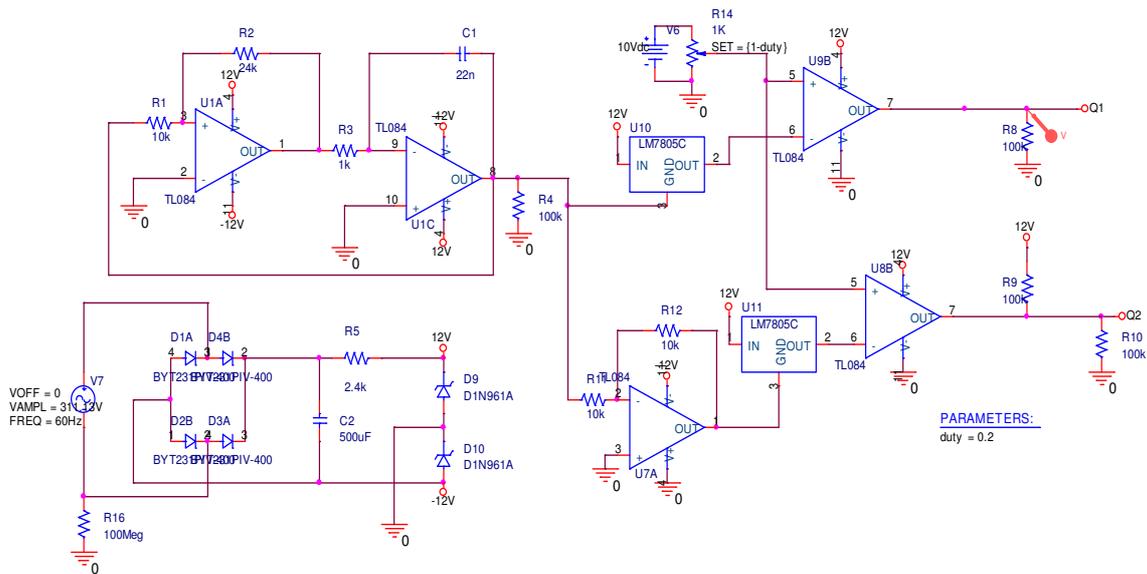
Figura 15: Frequência de 22kHz da onda triangular.



Para acionamento das chaves foi pensando um PWM com duas saídas complementares em que a saída Q1 acione um par de chaves e a saída Q2 acione o outro par.

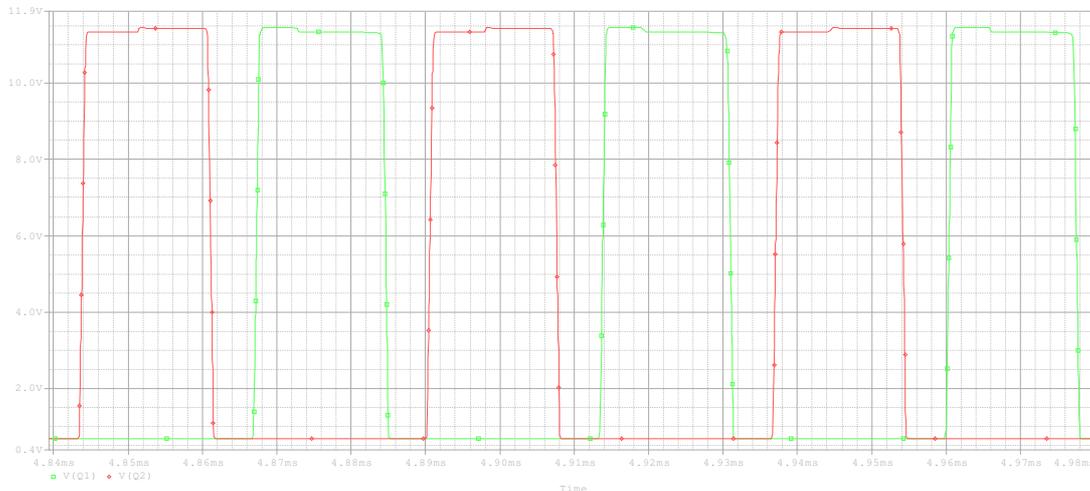
Esse arranjo é mostrado na figura 16:

Figura 16: Implementando um PWM com duas saídas complementares Q1 e Q2 a partir do gerador de onda.



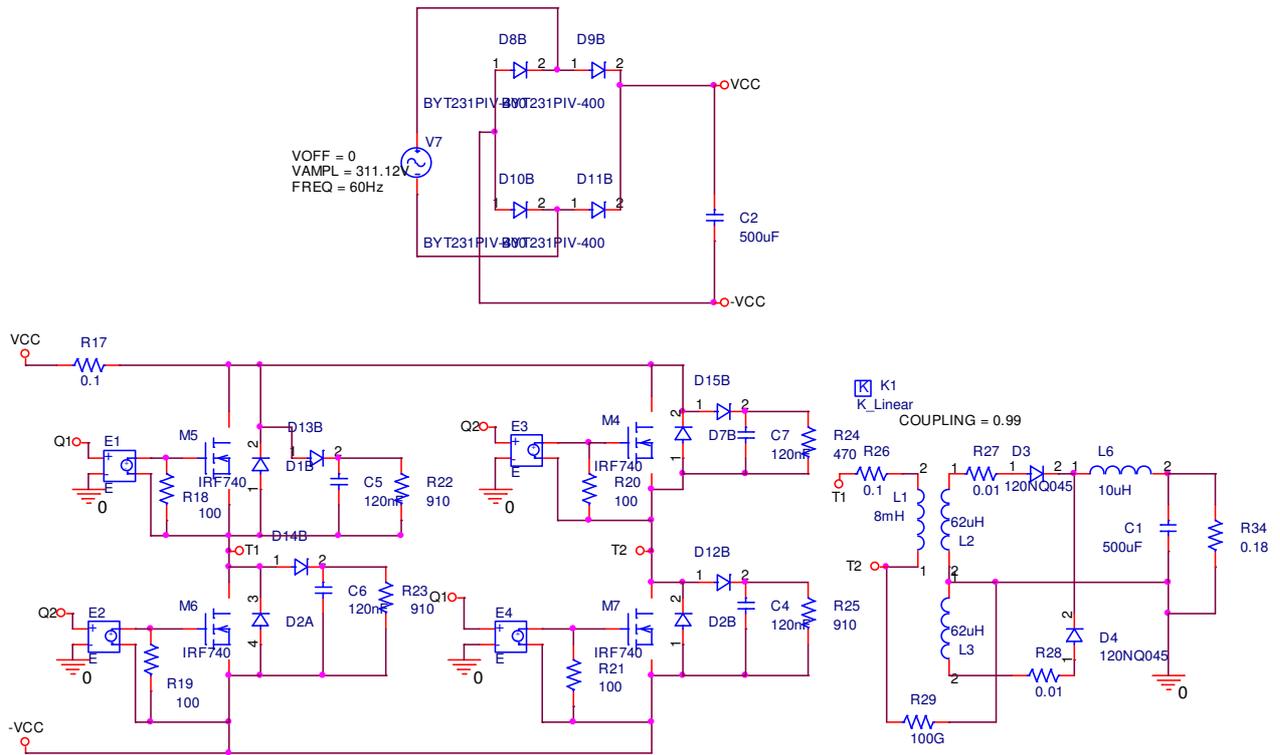
Para geração do sinal PWM, considerou-se um ciclo de trabalho de 40%. Inicialmente, para simular o erro da tensão de rastreabilidade, foi usado uma fonte de tensão 10V e um potenciômetro. Vê-se abaixo o comportamento das saídas Q1 e Q2:

Figura 17: Saídas Q1(verde) e Q2(laranja) do PWM com D=40%



O próximo passo é a simulação do circuito de potência. Para implementá-lo foi utilizado a topologia full-bridge e uma ponte retificadora e fonte de tensão de 220 Vrms. O circuito é ilustrado na figura 18.

Figura 18: Circuito de potência da fonte.

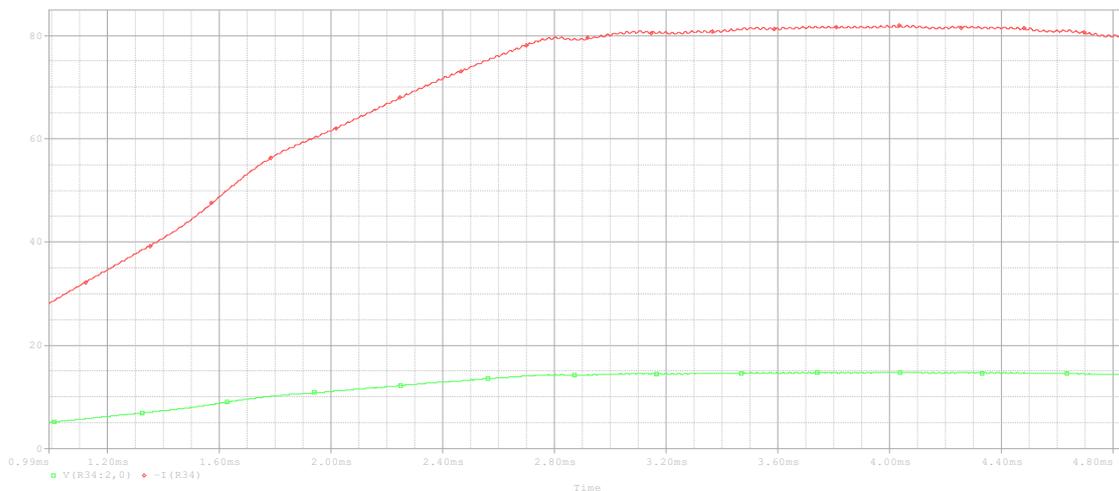


Como a fonte deve operar com 14,4V, para que se tenha 80 ampères na saída, é necessário simular o circuito da figura 18 com uma resistência de saída de:

$$R = \frac{V_o}{I_o} = \frac{14,4}{80} = 0.18\text{ohm}$$

Assim, para o circuito da figura 18, temos o gráfico ilustrado na figura 19

Figura 19: gráfico da tensão e da corrente de saída da fonte para uma carga máxima.

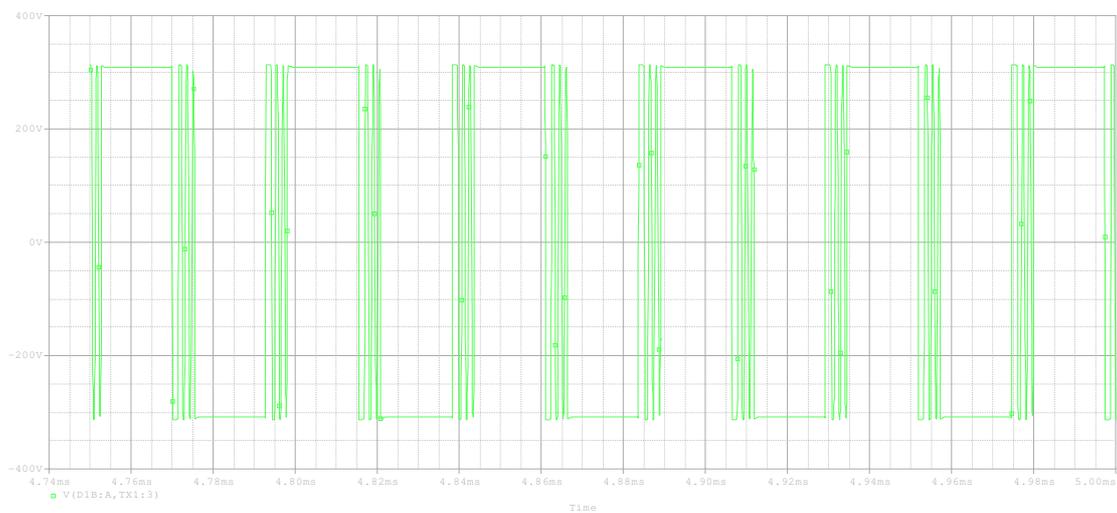


Vê-se pelo gráfico que a tensão estabilizou em aproximadamente 14.4V e a corrente foi a 80 ampères.

É possível ver no diagrama da figura 8 o circuito auxiliar limitador de tensão em cada chave. Ele auxilia amortecendo os transientes de alta tensão que ocorrem na comutação da carga. Estes transientes tanto podem causar interferências como forçar o dispositivo de comutação, chegando a causar sua queima. Também são utilizados para proteger as chaves de comutação.

Sem esse circuito, os circuitos de controle da chave não atuavam normalmente, causando uma variação abrupta na tensão dos terminais, impossibilitando o fechamento e a abertura como previsto. É possível ver esse comportamento na figura 20

Figura 20: Gráfico da tensão em uma das chaves durante a comutação.



Observando a figura 21 vê-se o efeito do circuito auxiliar na tensão dos mosfets. É possível ver que ocorre um amortecimento na oscilação da tensão.

Figura 21: Gráfico da tensão e corrente em uma das chaves durante a comutação com o circuito limitador de tensão.

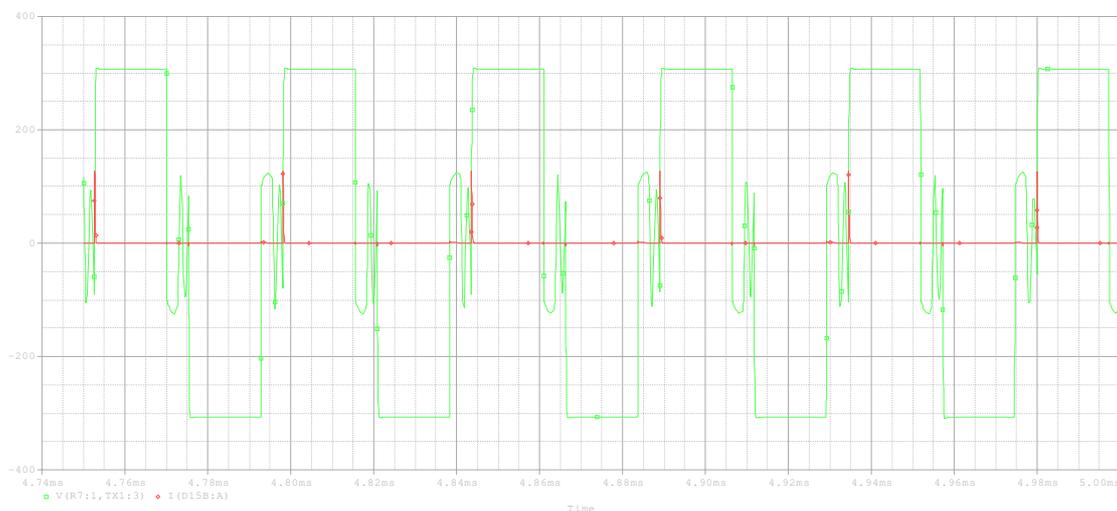
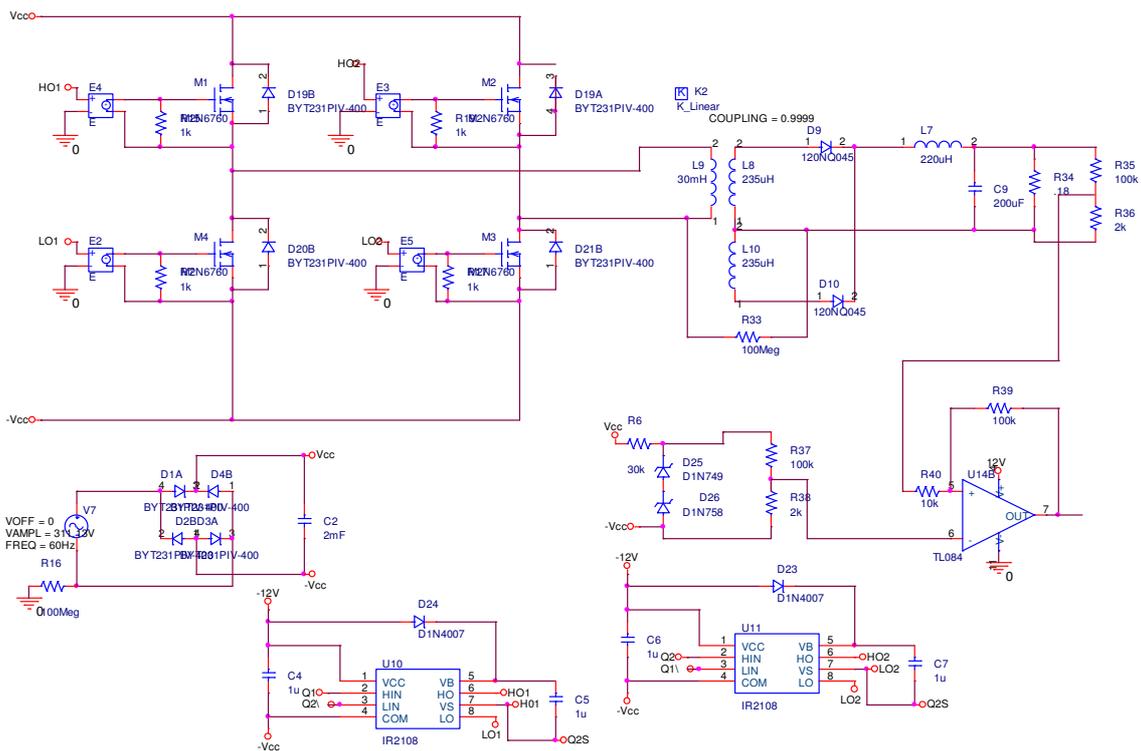


Figura 23: bootstrap e circuito de rastreo da tensão de referência implementado no circuito de potência.



Para colher a tensão de saída, utilizou-se um divisor de tensão, colhendo 2% da tensão real.

6. CONCLUSÃO

Este documento relata a concepção de um projeto para implementar um protótipo a ser testado ao mercado.

Para alcançar essas metas fez uma pesquisa de mercado para que chegasse a parâmetros que sejam comerciais, bem como valores de mercado e para que haja possibilidade de inserção do produto no mercado.

Em seguida projetou-se os componentes a serem usados e criou-se várias simulações. Muitos problemas de natureza prática, o simulador consegue prever e isso foi de grande valia para o aprendizado nesse.

Todo esse trabalho seria apenas a primeira etapa para concepção total do produto. Porém, a mais importante. Toda a concepção de um projeto como esse é de fundamental importância para que o estudante de engenharia seja capaz de por em prática os conhecimentos adquiridos no curso, alinhando o conhecimento científico com o conhecimento prático. Foi uma grande oportunidade para que fosse verificado os problemas técnicos inerentes à montagem de componentes reais. Vê-se então a

necessidade do alinhamento perfeito do estudo, simulação e montagem. E isso só é possível graças à qualidade do curso como um todo.

A montagem certamente iria proporcionar uma melhor experiência do trabalho, mas infelizmente os correios atrasaram a entrega de alguns componentes, de forma que ficou inviável fazê-la.

Como proposta para seguimento do projeto, seria de grande importância a implantação de comutação suave por tensão ou corrente. O estudo da dissipação de calor dos componentes, para implementação de encapsulamento do protótipo é de muita importância. Um display, informando a temperatura interna, a tensão e corrente de saída poderia ser também um bom apelo ao usuário.

O uso de microcontrolador para oferecer outros serviços tais como, carga inteligente de banco de baterias, desligamento automático quando a saída não está sendo solicitada, etc., poderia ser um grande diferencial para o mercado

REFERÊNCIAS

- Barbi, Ivo; Font, Carlos Henrique Illa; Alves, Ricardo Luiz. **Projeto Físico De Indutores e Transformadores.** / – Florianópolis: Apostila, 2002.
- BARBI, Ivo. **Projeto de fontes chaveadas.** 2. ed. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2007
- BARBI, Ivo; MARTINS, Denizar Cruz. **Eletrônica de potência: conversores CC-CC básicos não isolados.** Florianópolis Ed. do Autor, 2000. vii, 377 p. ISBN 859010463X.
- FRANKLIN, **Gene F. Sistemas de Controle para Engenharia** – 6. ed. – Porto Alegre: Ed. Bookman, 2013
- HART. Daniel W. **Electrónica de Potencia.** Pearson Educación. S. A., Madrid, 2001.
- MUHAMMAD H, Rashid. **Eletrônica de Potência** – São Paulo: Makron Books, 1999
- Barbi, Ivo. **Conversores CC-CC isolados de alta frequência com comutação suave.** / Ivo Barbi, Fabiana Pöttker de Souza. – Florianópolis: Ed. dos autores, 1999.
- NED. Mohan. **Power Electronics: converters, applications, and design.** Tore M. Undeland; William P. Robbins. – 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc. New York, 1995.
- PRIM, César Augusto; HALABI, Samir El. **Fonte Chaveada para Carregadores Automotivos Topologia Adotada: Full Bridge.** Proposta para Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Departamento Acadêmico de Engenharia Industrial. Curitiba, PR, 2012.
- Pomilio, José Antenor. **Fontes Chaveadas.** ed. rev. Campinas, SP, 2018. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/it505/>>. Acesso em 26 jul. 2018
- SOUZA, Alexandre Ferrari de. **Projeto de Fontes Chaveadas.** Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. Disponível em: <<http://caveromiranda.galeon.com/cursosfontes.pdf>>. Acesso em 27 jul. 2018.