Universidade Federal do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

Departamento de Eletrônica e de Computação

Desenvolvimento de uma Fonte de Média Tensão

Autor:

Eduardo Leandro de Souza

Autor:

Rodrigo Cesar Almeida de Carvalho

Orientador:

Prof. Maurício Aredes, Dr.-Ing.

Examinador:

Prof. Mariane Rembold Petraglia, PhD.

Examinador:

Mauro Sandro dos Reis, Eng.

DEL

Agosto de 2009

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado a todos meus familiares pela colaboração com meu crescimento profissional e pessoal, minha mãe por me auxiliar e orientar nas horas mais difíceis, meu irmão que sem ele não conseguiria chegar onde cheguei e meu pai, aonde quer que esteja, por ter me ensinado grandes valores na vida.
Dedico também ao grupo formado por Alexandre Campinho, Benito Fontes, Fábio Rodrigues e Leonardo Melo, que me deram apoio na minha jornada de estudos e trabalhos.
As minhas amigas Andreza Cristina e Vanessa Castro, pela amizade cultivada nesses longos períodos de faculdade.
Muito obrigado a todos.

Eduardo Leandro de Souza

Este trabalho é dedicado à meus pais que sempre estiveram do meu lado, me apoiando nos momentos mais difíceis. Não poderia esquecer da minha namorada, Aline Selder, que por muitas vezes ouviu meus problemas e sempre me apoiou.
Dedico também aos meus amigos da Ilha do Governador, da época de colégio e os da faculdade.
Aos professores que tive durante o curso de graduação que contribuíram para minha formação profissional e moral.
Muito obrigado a todos.

Rodrigo Cesar Almeida de Carvalho.

AGRADECIMENTO

Aos nossos pais que nos deram a vida e nos ensinaram a formar uma personalidade com dignidade e honestidade, além de passar-nos valores morais como justiça, ética e respeito.

Aos amigos, namoradas e familiares que compartilharam com os nossos ideais, compreendendo nossa falta de tempo, finais de semana de estudo e noites em claro, tendo sempre uma palavra e um sorriso a nos incentivar para que chegássemos ao final de mais uma etapa.

Não podemos deixar de agradecer nosso amigo e engenheiro, Mauro Sandro dos Reis, que nos ajudou diversas vezes a sanar dúvidas durante o desenvolvimento.

Somos gratos a todos os professores do DEL pelas lições e conhecimentos passados.

Aos amigos do LEMT, que por muitas vezes deixaram seus afazeres para nos ajudar. Em especial ao nosso orientador Maurício Aredes pela paciência ao passar os ensinamentos necessários para a conclusão do projeto.

Vocês fazem parte dessa vitória e da nossa história.

RESUMO

O desenvolvimento do projeto, assim como os testes e simulações, foi realizado no Laboratório de Eletrônica de Potência e Média Tensão (LEMT), na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e tem como objetivo apresentar o estudo e a construção de uma fonte chaveada de média tensão, apresentando facilidade de adaptação para a análise de técnicas e circuitos.

Os passos abordados na documentação incluem simulações esquemáticas da fonte, mostrando que o projeto se torna viável. A seguir, detalha-se a lista de componentes de maior relevância para a implementação do circuito na bancada, onde ficou concentrada a maior parte do trabalho. Constatado a sua funcionalidade, foi feito o *layout*, com o intuito da compactação do circuito através de uma futura placa de circuito impresso. E por fim, detalham-se os processos referentes (calculados, simulados e medidos) para a conclusão do projeto.

Este projeto final de graduação foi auxiliado por softwares profissionais licenciados (PSPICE, OrCAD, Proteus, MPLAB C Compilers, CCS), que contribuíram para uma melhoria significativa do layout de placa e simulação do circuito, diminuindo de forma considerável o tamanho da placa de circuito impresso, pois circuitos elétricos otimizados e compactados são objetivos sempre perseguidos pela Engenharia.

O presente material pretende mostrar a construção de uma fonte para uso exclusivo do LEMT. Envolve além de pesquisa básica, desenvolvimento de um produto final.

Palavras-Chave: Fonte, Média Tensão, Microcontrolador, Bobina de Ignição.

ABSTRACT

The development of this project was made in LEMT -UFRJ. Its objective is to present the production of a source of medium voltage with stability, efficiency and easy adaptation for the analysis of techniques and circuits using regular voltages.

The steps discussed in this document include simulations of the source schematic, showing that the project becomes viable. Next, the list of components which are most relevant to the implementation of the circuit bench is detailed, which has concentrated most of the work. Found its functionality, the layout was done with the purpose of compacting the circuit via a further printed circuit board. Finally,the procedures for the completion of the project are detailed.

This final project for graduation has been aided by professionals licensed software (PSPICE, OrCAD, Proteus, MPLAB C Compilers, CCS), which contributed to a significant improvement in board layout and circuit simulation, reducing considerably the size of the printed board since electric circuits optimized and compressed, are always the objective of engineering.

This material aims to show the construction of a source for exclusive use of Laboratory. Involves in addition to basic research, the develoment a final product

Keywords: Source, Medium voltage, microcontroler, Ignition coil.

SIGLAS

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

DEL – Departamento de Eletrônica

LEMT – Laboratório de Eletrônica de Potência e Média Tensão

PSPICE – Personal Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis

OrCAD - Oregon + Computer-Aided Design

CCS – Custom Computer Services

PIC – Peripherical Interface Controller

DC – Direct Current

AC – Alternating Current

RMS – Root Mean Square

PFM – Pulse-Frequency Modulation

PWM – Pulse-Width Modulation

RISC – Reduced Instruction Set Computer

EEPROM – Electrical Erasable Programmable Read-Only Memory

Conversores D/A – Conversores Digital/Analógico

Conversores A/D – Conversores Analógico/Digital

CI – Circuito Integrado

MOSFET - Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

AMP OP – Amplificador Operacional

LED – Light Emitter Diode

GaAlAs – Arsenieto de Gálio e Alumínio

TD – Time Delay

TR – Time Rise

TF – Time Fall

PW – Pulse Width

PER – Period

FET – Field Efect Transistor

ELEPOT – Eletrônica de Potência

CS – Condicionamento de Sinais

PCS – Placa de Condicionamento de Sinais

Sumário

CAPÍTULO 1 1

INTRODUÇÃO 1
1.1 – TEMA 1
1.2 – DELIMITAÇÃO 1
1.3 – JUSTIFICATIVA 1
1.4 – OBJETIVO 2
1.5 – METODOLOGIA 2
1.6 – DESCRIÇÃO 2

CAPÍTULO 2 4

GERAÇÃO DE ALTAS TENSÕES 4
2.1 – GERAÇÃO DE ALTAS TENSÕES EM CORRENTE CONTÍNUA 4
2.1.1 – Circuito retificador de meia onda com carga resistiva 4
2.1.2 – Circuitos retificadores em cascata 6
2.2 – OBTENÇÃO DE ALTAS TENSÕES EM CORRENTE ALTERNADA 7
2.2.1 – Transformadores de teste 8
2.2.2 – Circuitos série ressonantes 10

CAPÍTULO 3 11

TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE ALTAS TENSÕES 11
3.1 – FENDAS DE CENTELHAMENTO 11
3.2 – DIVISORES DE TENSÃO 13
3.2.1 – Divisores resistivos 14

CAPÍTULO 4 16

FONTES CHAVEADAS 16
4.1 – COMPARAÇÃO ENTRE AS FONTES CHAVEADAS E AS FONTES LINEARES 16
4.2 – TOPOLOGIAS BÁSICAS DE FONTES CHAVEADAS 16
4.2.1 – Conversor buck 17
4.2.2 – Conversor boost 17
4.2.3 – Conversor buck-boost 18
4.2.4 – Conversor forward 19
4.2.5 – Conversor push-pull 19
4.2.6 – Conversor Fly-back 20
4.3 – TÉCNICAS DE MODULAÇÃO EM FONTES CHAVEADAS 21
4.3.1 – Modulação PFM 21
4.3.2 – Modulação PWM 21

CAPÍTULO 5 23

MODELAGEM E SIMULAÇÃO 23
5.1 – DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES 23
5.1.1 – PIC 18F4520 23

5.1.2 – 7407 24
5.1.3 – 9552 25
5.1.4 – 7805 26
5.1.5 – ULN2803A 26
5.1.6 – BU2520DX 27
5.1.7 – Bobina de alta tensão 28
5.2 – ANÁLISE DOS COMPONENTES 31
5.3 – RESULTADOS DE SIMULAÇÃO 35
5.3.1 – Análise dos resultados 36

CAPÍTULO 6 38

A ENGENHARIA DA FONTE DE MÉDIA TENSÃO 38
6.1 – PROJETO DO CIRCUITO 38
6.1.1 – Montagem do protótipo da fonte 38
6.1.2 – Medição 40
6.1.3 – Ponta de prova para alta tensão 43
6.2 – SISTEMA DE CONDICIONAMENTO 44
6.3 – PROJETO DO LAYOUT DA PLACA 45

CAPÍTULO 7 47

CONCLUSÃO 47
TRABALHOS FUTUROS 48

BIBLIOGRAFIA 49

APÊNDICE A 51

PROJETO DO FLY-BACK 51

APÊNDICE B 53

AMPLIFICADORES OPERACIONAIS 53

APÊNDICE C 55

BOBINAS DE RUHMKORFF 55

ANEXO A 56

PROGRAMA NO PIC PARA GERAÇÃO DE UM PULSO QUADRADO DE TENSÃO 56

Lista de Figuras

EQUAÇÃO.....XIII

FIGURA 2.1 – RETIFICADOR DE MEIA ONDA COM CARGA RL.....5

FIGURA 2.2 – FORMA DE ONDA DO RETIFICADOR MONOFÁSICO COM CARGA RL.....6

FIGURA 2.3 – CIRCUITO DOBRADOR DE N ESTÁGIOS.....6

FIGURA 2.4 – FORMAS DE ONDA DO DOBRADOR DE N ESTÁGIOS.....7

FIGURA 2.5 – DIAGRAMA DO TRANSFORMADOR DE TESTE.....8

FIGURA 2.6 – TRANSFORMADORES DE TESTE.....9

FIGURA 2.7 – CIRCUITO DO TRANSFORMADOR EM CASCATA.....9

FIGURA 2.8 – CIRCUITOS SÉRIE RESSONANTES.....10

FIGURA 3.1 – CONFIGURAÇÃO VERTICAL.....12

FIGURA 3.2 – CONFIGURAÇÃO HORIZONTAL.....12

FIGURA 3.3 – MODELO DO DIVISOR DE TENSÃO.....13

FIGURA 3.4 – CIRCUITO EQUIVALENTE PARA O DIVISOR DE TENSÃO.....14

FIGURA 3.5 – MODELO APROXIMADO DO DIVISOR RESISTIVO.....15

FIGURA 4.1 – CONVERSOR BUCK.....17

FIGURA 4.2 – CONVERSOR BOOST.....18

FIGURA 4.3 – CONVERSOR BUCK-BOOST.....18

FIGURA 4.4 – CONVERSOR FORWARD.....19

FIGURA 4.5 – CONVERSOR PUSH-PULL.....20

FIGURA 4.6 – CONVERSOR FLY-BACK.....20

FIGURA 4.7 – PULSO MODULADO EM FREQUÊNCIA.....21

FIGURA 4.8 – DUTY CYCLE (PWM).....22

FIGURA 5.1 – DIAGRAMA DE PINAGEM DO PIC18F4520.....24

Lista de Equações

EQUAÇÃO

(2.1)....4

(2.2)....4

(2.3)....5

(2.4)....5

(2.5)....5

(2.6)....7

(2.7)....8

(3.1)....14

(3.2)....14

(3.3)....14

(5.1)....31

(5.2)....31

(5.3)....33

....33

(5.4)....33

(5.5).....33

(5.6).....34

.....34

(5.7).....35

(5.8).....40

Capítulo 1

Introdução

1.1 – Tema

Estudo e desenvolvimento de uma fonte chaveada de média tensão.

1.2 – Delimitação

Neste trabalho se dará ênfase ao processo de construção de um circuito gerador de altas tensões.

1.3 – Justificativa

Fontes geradoras de altas tensões são fabricadas com o intuito de produzir tensões acima dos valores usuais, pois elas são utilizadas na realização de testes de cunho científico ou prático, no caso de se desejar informações sobre a isolação de determinado equipamento.

Em particular, as fontes de alimentação chaveadas, são comuns em sistemas eletrônicos, como por exemplo, televisores, computadores e equipamentos industriais. Elas são utilizadas para substituição de reguladores lineares, quando uma eficiência maior e menor tamanho são necessários.

As fontes chaveadas utilizam o princípio de transferência de potência quantificada [24], ou seja, da entrada é retirada apenas a quantidade de potência que a carga solicita, na saída. Através de componentes de controle, a energia armazenada em componentes capacitivos e indutivos é transferida na medida exata à saída.

Uma pesquisa feita sobre fontes de alta tensão no mercado nacional mostrou que a maior parte delas utiliza tecnologias similares, porém são equipamentos importados, cuja manutenção depende de componentes não encontrados facilmente no mercado brasileiro, forçando o encaminhamento do equipamento para sua manutenção no exterior, com um tempo de espera e custo elevados [1].

A motivação deste trabalho surge como resposta à necessidade do LEMT de possuir uma fonte para uso próprio. Assim, o projeto visa ser adaptável para aplicações experimentais e também como ferramenta didática. Além disso, a construção da fonte de média tensão trará uma série de conhecimentos sobre a utilização de dispositivos eletrônicos, materiais e como projetar sistemas de medição que trabalhem em tensões elevadas.

1.4 – Objetivo

O presente trabalho tem por objetivo apresentar um estudo da geração de médias tensões, com ênfase no processo de simulação e construção de uma fonte chaveada para fins científicos e acadêmicos.

1.5 – Metodologia

Para alcançar as metas propostas neste trabalho, foram realizadas as seguintes etapas: estudo dos conceitos relacionados à geração de altas tensões e compreensão das técnicas necessárias para sua medição, através de pesquisas bibliográficas.

Em seguida, foi elaborado um resumo focando os pontos mais relevantes do estudo teórico, acompanhado do processo de construção e implementação da fonte, com o intuito da geração de altas tensões, atendendo aos interesses do LEMT. Por fim foram realizados testes e validações das funcionalidades da fonte.

1.6 – Descrição

Neste capítulo é apresentada uma visão geral do trabalho e o contexto no qual está inserido.

No Capítulo 2 é abordada uma visão teórica sobre a geração de altas tensões, bem como, dos circuitos envolvidos.

O Capítulo 3 apresenta alguns modelos e técnicas de medição utilizadas em alta tensão.

O Capítulo 4 aborda o princípio de funcionamento das fontes chaveadas e mostra algumas técnicas de modulação.

Os Capítulos 5 e 6 descrevem o projeto da fonte de média tensão com os seus resultados, medidas e o procedimento experimental. Além disso, são analisados os resultados obtidos e as dificuldades encontradas.

O Capítulo 7 apresenta a conclusão do projeto e passos futuros para a melhoria da fonte. Informações técnicas relevantes e maiores detalhes sobre a fonte de média tensão podem ser encontrados nos Apêndices.

Capítulo 2

Geração de Altas Tensões

Neste capítulo será introduzido o conceito de geração das altas tensões tanto em corrente contínua, quanto para as correntes alternadas.

2.1 – Geração de altas tensões em corrente contínua

Altas tensões em corrente contínua são usualmente produzidas para trabalhos de pesquisas científicas, sendo destacados na importância em equipamentos médicos como raios-x e aplicações industriais na precipitação e filtragem de gases de escape em centrais térmicas [4].

De acordo com a norma internacional IEC 60-1[2] ou IEEE Standard 4-1995[5] a tensão gerada é definida pelo seu valor aritmético médio, Equação (2.1), ou seja, a integral da tensão dividida por um período de tempo *T*. Em sinais *DC* existem oscilações nas "cristas" da tensão elétrica fornecida pela fonte, conhecidas como *ripple*, estas "ondulações" têm por definição a média entre os valores máximos e mínimos da tensão, Equação (2.2).

O fator de *ripple* é a razão entre o *ripple* e o valor médio da tensão, ou seja, $\delta V/V_{med}$, que para efeitos de teste não pode ultrapassar 3% [3].

$$V_{med} = \frac{1}{T}\int_0^T V(t)dt[V]$$

(2.1)

$$\delta V = \frac{1}{2}\left(V_{\max} - V_{\min}\right)[V]$$

(2.2)

2.1.1 – Circuito retificador de meia onda com carga resistiva

Um circuito retificador converte uma tensão de corrente alternada (*alternating current - AC*) em tensão de corrente contínua. A tensão obtida contém uma parte *AC* (*ripple*) superposta a um valor contínuo médio (*direct current - DC*).

Quando é conectada uma carga ao circuito, Figura 2.1, a tendência é de que o capacitor se descarregue por ela. Esta carga pode ser representada pela Equação (2.3), onde I é o valor médio da corrente DC fluindo pela carga, com valor Q, e período de tempo T, em que a corrente flui pela carga R_L.

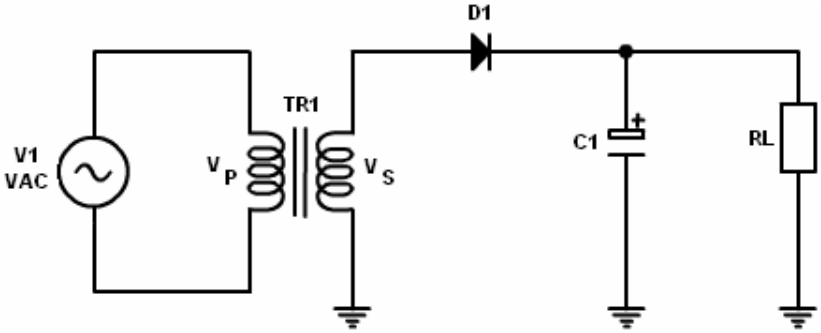

FIGURA 2.1 – RETIFICADOR DE MEIA ONDA COM CARGA R_L.
FONTE: SANTOS, R. B. [22].

$$Q = \int_T i_L(t)\,dt = \frac{1}{R_L}\int_T V(t)dt = IT = \frac{I}{f}$$

(2.3)

A Figura 2.2 mostra a forma de onda do retificador, cuja tensão sobre a carga varia entre V_{max} e V_{min}, a magnitude da carga entregue pelo capacitor pode ser representada pela Equação (2.4), onde $V_{min} = V_{max} - 2\delta V$. A Equação (2.5) mostra que o *ripple* na saída do retificador depende do produto fC e, portanto, quanto maior for o produto, menor será o *ripple* na saída DC.

$$Q = C\left(V_{\max} - V_{\min}\right)$$

(2.4)

$$Q = 2\delta VC = IT; \rightarrow \; 2\delta = \frac{IT}{2C} = \frac{I}{2fC}[C]$$

(2.5)

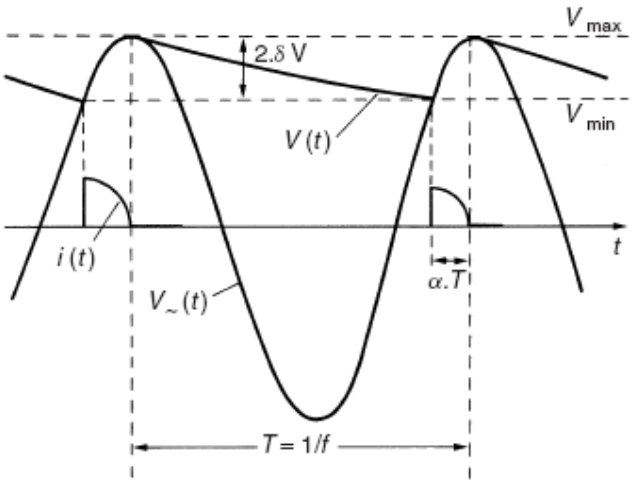

FIGURA 2.2 – FORMA DE ONDA DO RETIFICADOR MONOFÁSICO COM CARGA R_L.
FONTE: E. KUFFEL, W.S. ZAENGL, J. KUFFEL [4].

2.1.2 – Circuitos retificadores em cascata

Para se obter tensões maiores que as dos retificadores de meia onda, foram projetados circuitos multiplicadores de tensão.

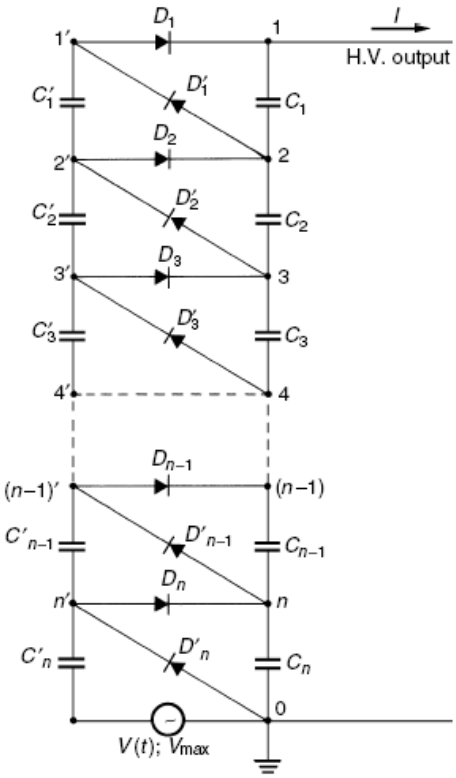

FIGURA 2.3 – CIRCUITO DOBRADOR DE *N* ESTÁGIOS.
FONTE: E. KUFFEL, W.S. ZAENGL, J. KUFFEL [4].

A Figura 2.3 mostra que se os terminais do circuito estão abertos inicialmente, no primeiro semiciclo positivo C'_n carrega com V_{max} e no semiciclo posterior negativo, atinge $2V_{max}$.

Considerando o ponto *n* estando aterrado no início, o capacitor também carrega com $2V_{max}$, sendo que no próximo semiciclo positivo o ponto *n'* chega novamente a V_{max}, então o capacitor C'_{n-s} é carregado com V_{max} e assim se segue sucessivamente até o estágio desejado. As suas formas de onda podem ser observadas na Figura 2.4.

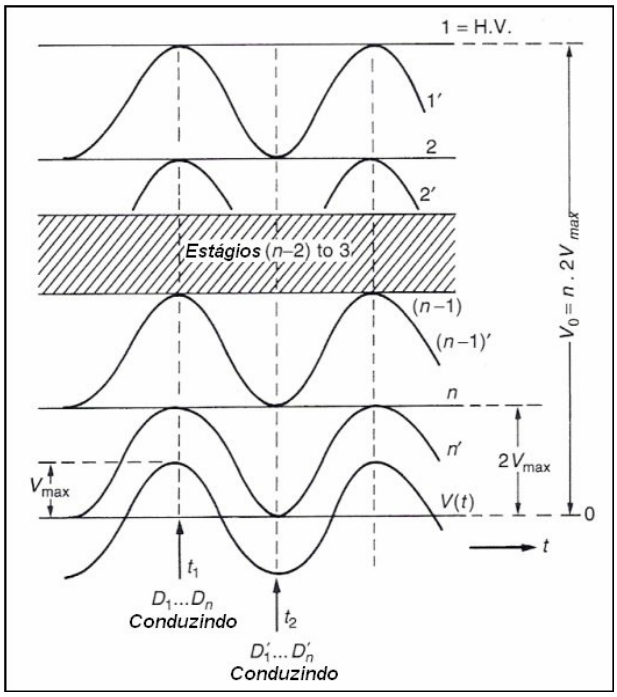

FIGURA 2.4 – FORMAS DE ONDA DO DOBRADOR DE *N* ESTÁGIOS.
FONTE: PESENTE, J. R. [3].

O *ripple* pode ser calculado, considerando que a quantidade de elétrons transmitida pelos capacitores à carga é igual a $q = IT$. Assim ele deve ser igual ao somatório da energia transferida por todos os capacitores à carga, sendo representado pela Equação (2.6).

$$2\delta V = IT\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{1}{C_i}\right) \tag{2.6}$$

2.2 – Obtenção de altas tensões em corrente alternada

A corrente alternada foi adotada para transmissão de energia elétrica devido à facilidade relativa que esta apresenta para ter o valor de sua tensão alterada por intermédio de transformadores.

Geralmente a tensão *AC* é dada quase sempre em seu valor eficaz, sendo igual ao valor quadrático médio desse sinal elétrico, do inglês, *root mean square* (*rms*) e que para um ciclo de período *T* é dado pela Equação (2.7).

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2}\int_0^T v^2(t)\,dt} \tag{2.7}$$

Existem duas maneiras eficientes de gerar altas tensões com corrente alternada: transformadores de teste e circuitos ressonantes.

2.2.1 – Transformadores de teste

A diferença dos transformadores de alta tensão para os monofásicos de potência é sua densidade de fluxo, sendo no primeiro muito menor. Isso evita altas correntes parasitas, as quais podem causar defeitos à isolação [4].

O diagrama de seu circuito pode ser observado através da Figura 2.5, e a Figura 2.6 mostra as seções transversais desses transformadores, cuja construção é similar aos de potência.

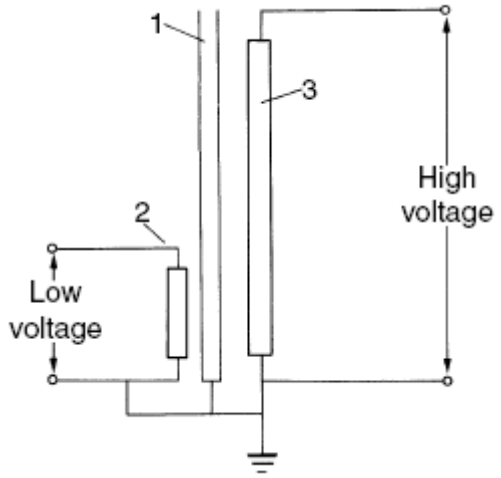

FIGURA 2.5 – DIAGRAMA DO TRANSFORMADOR DE TESTE.
FONTE: E. KUFFEL, W.S. ZAENGL, J. KUFFEL [4].

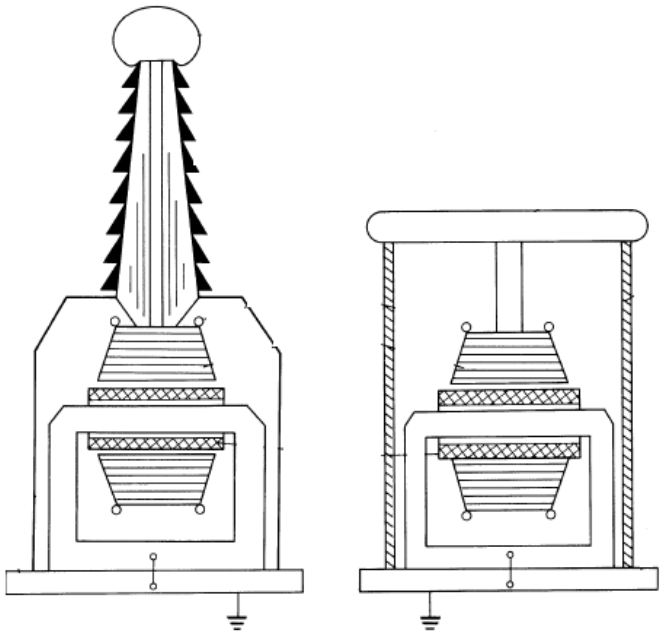

FIGURA 2.6 – TRANSFORMADORES DE TESTE.
FONTE: PESENTE, J. R. [3].

Alguns modelos de transformadores são formados por um conjunto de transformadores menores ligados em cascata. A Figura 2.7 ilustra um exemplo desses modelos.

A tensão do enrolamento *3* do secundário (Transf. I) é colocada em série com o primário do estágio seguinte (Transf. II), e o enrolamento *2* (Transf. I) do secundário é usado para fornecer tensão ao primário do Transf. II.

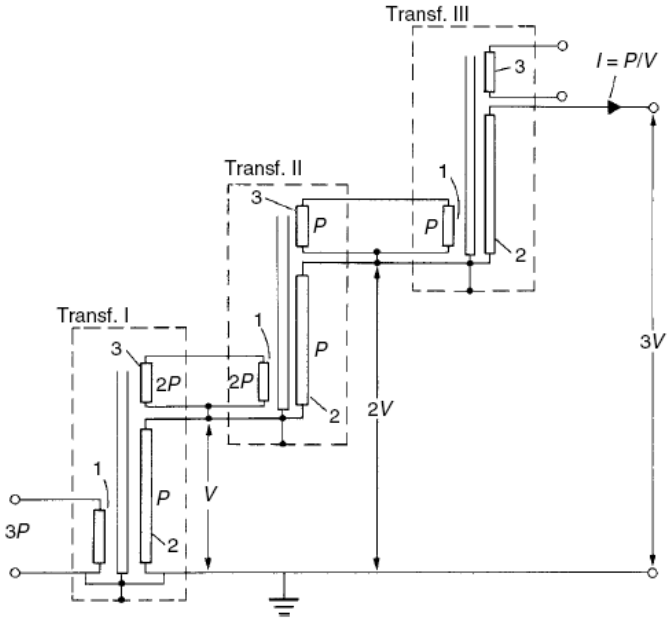

FIGURA 2.7 – CIRCUITO DO TRANSFORMADOR EM CASCATA.
FONTE: E. KUFFEL, W. S. ZAENGL, J. KUFFEL [4].

A principal desvantagem de utilizar transformadores para altas tensões é a alta potência consumida pelo conjunto. A fonte poderia ficar muito carregada, pois deve fornecer a potência consumida por todos os seus estágios.

2.2.2 – Circuitos série ressonantes

Alguns circuitos são construídos com intuito de se produzir uma ressonância que é controlada para resultar na freqüência fundamental, fazendo com que não apareça nenhuma ressonância indesejada.

A Figura 2.8 mostra o esquema desse circuito e o seu equivalente. Os indutores são ajustados para se conseguir um fator de qualidade alto, respeitando os limites de variação das indutâncias.

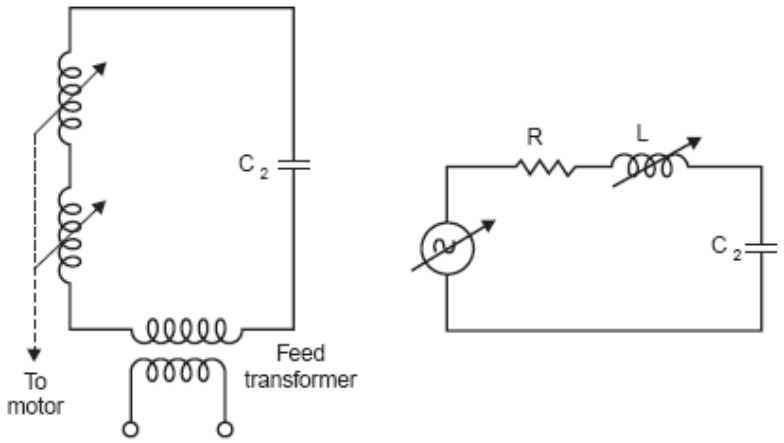

FIGURA 2.8 – CIRCUITOS SÉRIE RESSONANTES.
FONTE: C. L. WADHWA [23].

Mais leves que os transformadores de teste, os circuitos ressonantes ainda possuem a vantagem do sinal da saída ser melhorado, por causa da eliminação de tensões em freqüências diferentes da fundamental e também pela atenuação dos harmônicos que existem na fonte [3].

Capítulo 3

Técnicas de medição de altas tensões

Nesse capítulo as mais usuais formas de medição de altas tensões serão abordadas.

3.1 – Fendas de centelhamento

Essas fendas podem medir de forma indireta algumas dezenas de kV. Porém seu modelo físico é complicado de ser entendido, consistindo na formação de um arco, produzido por um centelhamento, através de sua isolação. Esta medição possui um grau razoável de incerteza, porém é considerado um bom método para laboratórios que desejam medições de forma simples.

A geometria das fendas de centelhamento é um fator decisivo para sua aplicação. Medidores esféricos, por exemplo, servem para a medição de tensões *AC*, *DC* e impulsivas. Esses medidores são espacialmente idênticos e possuem sua separação limitada, para que exista um campo elétrico homogêneo dentro das esferas [4].

A Figura 3.1. mostra a representação de um desses equipamentos, onde sua configuração encontra-se na vertical. Existe também uma configuração na horizontal que pode ser vista na Figura 3.2.

As figuras contêm a maior parte das instruções para definir a geometria das esferas, exceto os parâmetros *A* e *B*.

O valor *B,* por exemplo, determina a distância da esfera exterior, para que não haja o perigo de uma descarga com objetos próximos. O ponto de centelhamento é indicado por *P*, e não deve ser maior que os limites da esfera *D* e, por fim, o valor *A* é a altura do ponto *P* com relação ao solo.

A região de centelhamento deve ser livre de irregularidades na superfície das esferas e se a umidade estiver acima de 90%, a precisão das medidas e sua eficiência são prejudicas, pois pode haver condensação na superfície das esferas [4].

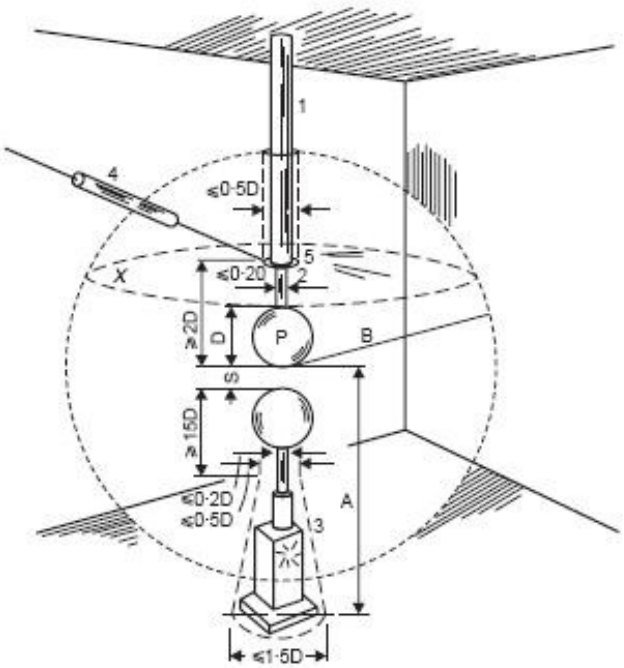

FIGURA 3.1 – CONFIGURAÇÃO VERTICAL.
FONTE: IEC PUBLICATION 52 [6].

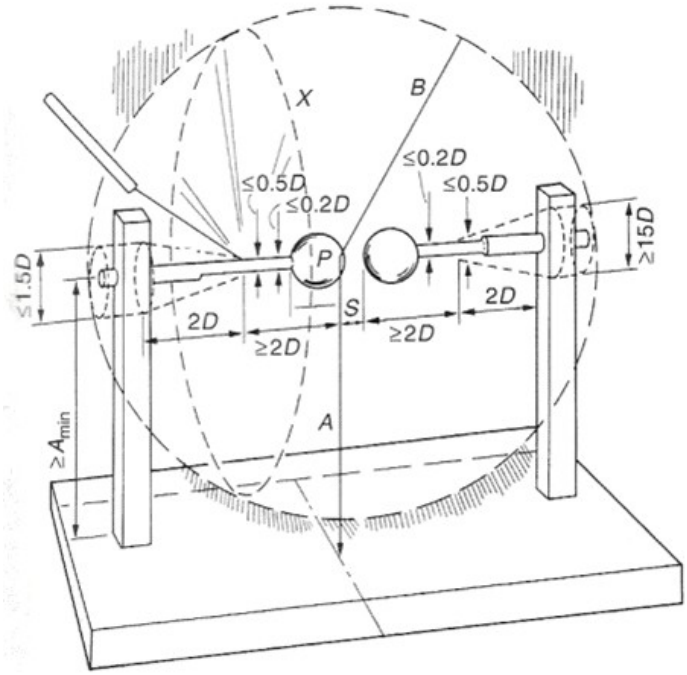

FIGURA 3.2 – CONFIGURAÇÃO HORIZONTAL.
FONTE: IEC PUBLICATION 52 [6].

3.2 – Divisores de tensão

Uma das melhores formas de se realizar medições de alta tensão é através de divisores de tensão. Eles podem ser constituídos de resistores, capacitores ou combinações convenientes desses elementos. Os divisores indutivos geralmente não são utilizados, pois geram complicações para tensões acima de 100 kV [4].

Apesar de muito usados, os divisores de tensão apresentam dificuldades quando se tenta fazer um modelamento matemático, mesmo que os resistores e os capacitores sejam conhecidos. O mesmo não pode se dizer de outras capacitâncias ou resistências parasitas proeminentes entre um terminal e um objeto próximo, por exemplo.

O modelo adotado consiste em construir um divisor com grande número de parâmetros concentrados, Figura 3.3, onde existe *n* (fator de escala ou razão de tensão) estágios responsáveis pela redução da tensão até um valor que possa ser lido. Com isso, *n* pode ser calculado como sendo a razão de *V/V2*.

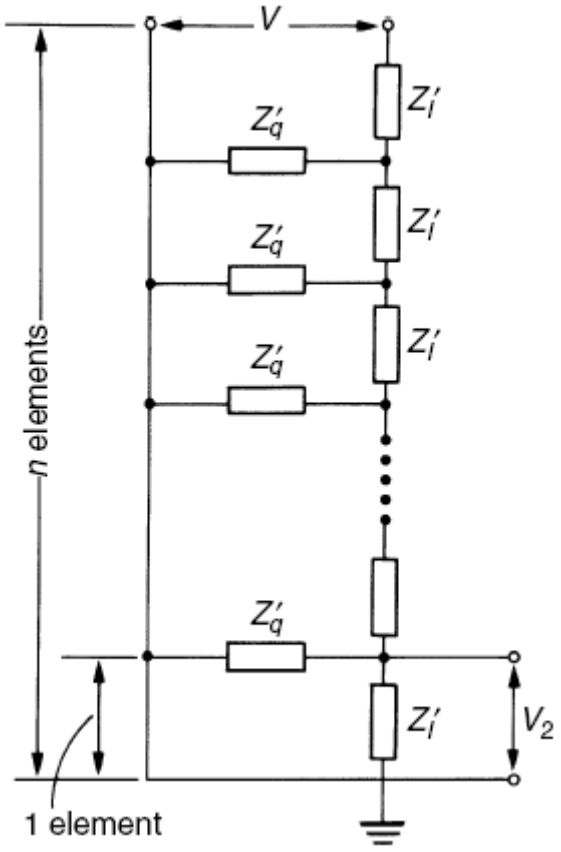

FIGURA 3.3 – MODELO DO DIVISOR DE TENSÃO.
FONTE: PESENTE, J. R. [3].

A impedância total do grupo, onde Z_l é a impedância em série e Z_q é a impedância em paralelo, pode ser dada pela Equação (3.1) e Equação (3.2).

$$Z_l = \sum Z_l^{'} = nZ_l^{'} [\Omega]$$

(3.1)

$$Z_q = \sum \frac{1}{Z_q^{'}} = \frac{Z_q^{'}}{n} [\Omega]$$

(3.2)

3.2.1 – Divisores resistivos

A Figura 3.4 representa um modelo de divisor resistivo. Neste modelo existem indutâncias e capacitâncias parasitas. Estas se devem a existência de campos magnéticos relacionados à circulação de corrente nos resistores e ao efeito dielétrico do ar sobre o equipamento, respectivamente. Se essas indutâncias e as capacitâncias forem desconsideradas, os efeitos de acoplamento podem surpreender na hora da medição, o que seria o mesmo que ignorar o efeito da permissividade e da permeabilidade do ar [3].

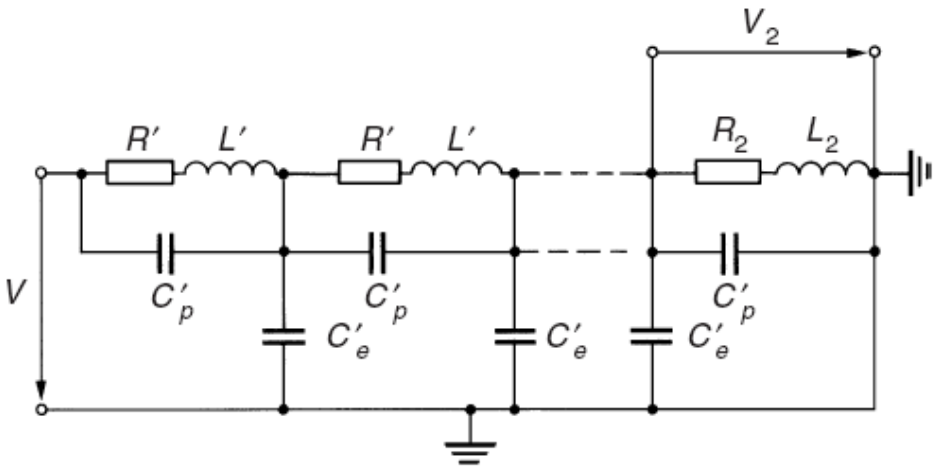

FIGURA 3.4 – CIRCUITO EQUIVALENTE PARA O DIVISOR DE TENSÃO.
FONTE: E. KUFFEL, W. S. ZAENGL, J. KUFFEL [4].

Para as medições *DC*, os divisores resistivos se tornam ideais e temos assim a Equação 3.3 [4]; onde R1 = (n-1)R' e R2 = R'.

$$V_2 = \frac{V}{n} = V \frac{R_2}{R_1 + R_2} [V]$$

(3.3)

Para medições de tensão *AC* existem uma série de aproximações, que podem ser encontradas em fontes literárias [3,4]. Sendo assim, a Figura 3.5 mostra um modelo com todos esses parâmetros aproximados, com $L = C_p = 0$. Vale ressaltar que o capacitor C_E, é o valor da capacitância não distribuída em relação ao potencial de terra.

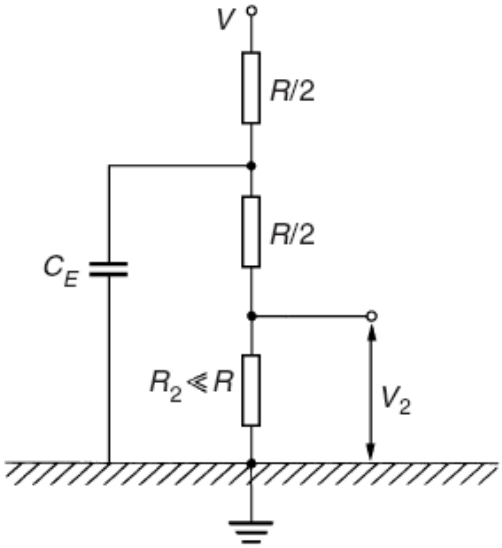

FIGURA 3.5 – MODELO APROXIMADO DO DIVISOR RESISTIVO.
FONTE: E. KUFFEL, W. S. ZAENGL, J. KUFFEL [4].

Capítulo 4

Fontes chaveadas

Nesse capítulo será apresentada uma comparação entre as fontes chaveadas e as fontes lineares, as estruturas básicas dos circuitos que, a partir de uma tensão fixa na entrada, fornecem uma tensão variável na saída e suas técnicas de modulação.

4.1 – Comparação entre as fontes chaveadas e as fontes lineares

Para produzir uma tensão de saída regulada, as fontes chaveadas e lineares utilizam técnicas diferentes. Isso resulta em algumas vantagens e desvantagens para cada aplicação.

As Fontes lineares apresentam diversas características, tais como simplicidade, boa regulação da tensão de saída e baixa emissão eletromagnética. Porém elas apresentam baixa eficiência, pois a fonte linear mantém sobre seu regulador a diferença de tensão. Se existir uma grande diferença de tensão e corrente na saída, resulta numa significante perda de potência sobre a fonte, o que implica no uso de dissipadores de calor e um aumento do volume e do custo do circuito.

As Fontes chaveadas são conversores de tensão ou corrente, alternada ou contínua [9]. Elas são preferidas quando se refere à compactação e leveza. Sua eficiência é superior, especialmente quando trabalhadas em altas freqüências, porém seu desempenho em termos de regulação e ruído é inferior ao das fontes lineares.

4.2 – Topologias básicas de fontes chaveadas

As fontes chaveadas utilizam interruptores de potência operando na região de corte e saturação. O projeto dessas fontes é mais complexo do que o de fontes lineares, exigindo maiores cuidados, principalmente na prevenção da interferência eletromagnética. Todas geram muito ruído, sendo necessário um circuito de filtragem e de controle para garantir a regulação.

4.2.1 – Conversor buck

Conversores buck (conversor abaixador) é um circuito utilizado para converter uma tensão de corrente contínua em outra de valor mais baixo. São usados, por exemplo, para reduzir a tensão de baterias de laptops, fornecendo os poucos Volts necessários para o seu funcionamento [7].

Quando a chave *T* da Figura 4.1 está aberta, não ocorre transferência de energia da entrada *E* para o restante do circuito. Com a chave fechada (transistor conduzindo), a corrente flui diretamente para o indutor e para o capacitor.

Desligando *T*, o diodo conduz, continuando a corrente do indutor. A energia armazenada em *L* é distribuída ao capacitor e à carga. Enquanto o valor da corrente pelo indutor for maior que a corrente da carga, essa diferença carrega o capacitor.

Quando essa corrente for menor, o capacitor se descarrega, suprimindo a diferença, a fim de manter a corrente de carga. A Figura 4.1, mostra o modelo do circuito. Se a corrente pelo indutor não vai a zero durante a condução do diodo, diz-se que o circuito opera no modo contínuo. Caso contrário tem-se o modo descontínuo. Normalmente se prefere operar no modo contínuo devido a haver, neste caso, uma relação bem determinada entre a largura de pulso e a tensão média de saída [8].

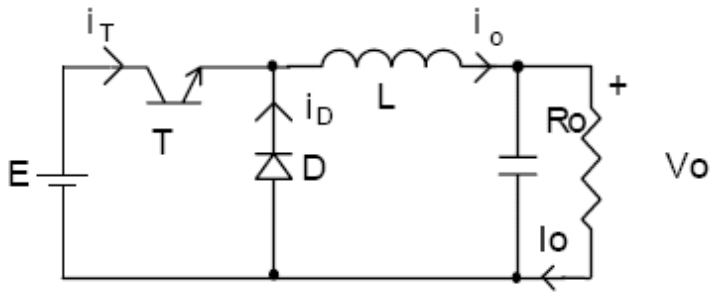

FIGURA 4.1 – CONVERSOR BUCK.
FONTE: POMILIO, J. A. [8].

4.2.2 – Conversor boost

Circuito com a função de converter a tensão de entrada em outra de maior valor na saída. Consistem de um diodo, um indutor e um semicondutor de potência (um transistor, por exemplo).

Quando a chave é acionada, a tensão é aplicada ao indutor e, o diodo se torna reversamente polarizado. O acúmulo de energia em *L* será enviado ao capacitor, quando a chave for desligada. A Figura 4.2 mostra a topologia do conversor boost, também

neste caso tem-se a operação no modo contínuo ou no descontínuo, considerando a corrente pelo indutor.

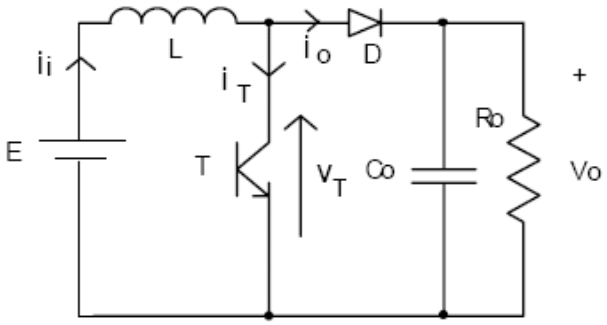

FIGURA 4.2 – CONVERSOR BOOST.
FONTE: POMILIO, J. A. [8].

4.2.3 – Conversor buck-boost

Usado para converter uma tensão em outra de polaridade oposta. Quando a chave é ligada, energia da fonte é transferida para o indutor. O diodo não conduz e a carga fica alimentada pelo capacitor. Esse conversor tanto pode ser utilizado para baixar como elevar a tensão de entrada, por esse motivo é utilizado em reguladores de tensão.

Desligando *T*, a continuidade da corrente do indutor se procede pela condução do diodo e a energia armazenada em *L* é transferida ao capacitor e à carga [8].

Em resumo: quando a chave está fechada, armazena-se energia no indutor; quando, abre entrega a energia a saída. A Figura 4.3 mostra o modelo desse conversor.

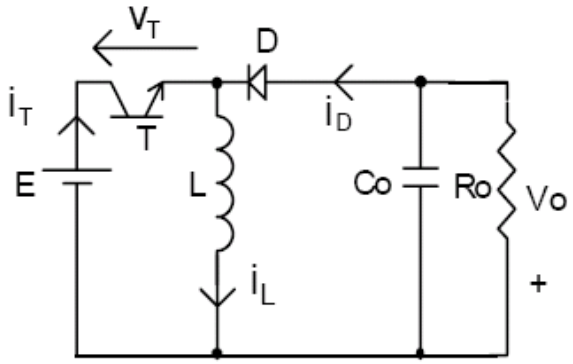

FIGURA 4.3 – CONVERSOR BUCK-BOOST.
FONTE: POMILIO, J. A. [8].

4.2.4 – Conversor forward

A Figura 4.4 mostra o circuito, derivado do abaixador de tensão. Quando a chave *T* conduz, aplica-se uma tensão em N_1. O diodo D_1 fica polarizado diretamente e cresce uma corrente que passa pelo indutor *L*.

Desligando *T*, a corrente do indutor de saída tem continuidade através de D_3. Em relação ao transformador, é necessário um caminho que permita a circulação de uma corrente que possa dar segmento ao fluxo magnético de modo a absorver a energia acumulada no campo, relativa à indutância de magnetização.

Isto se dá pela condução de D_2, durante este intervalo (de condução) uma tensão negativa é aplicada em N_2 e, assim, ocorre um retorno de energia para a fonte [8].

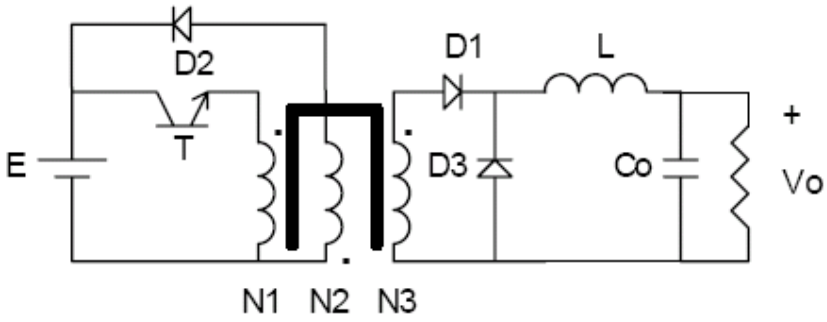

FIGURA 4.4 – CONVERSOR FORWARD.
FONTE: POMILIO, J. A. [8].

4.2.5 – Conversor push-pull

O modelo do push-pull pode ser visto na Figura 4.5. Esse conversor utiliza um transformador para alterar o nível de tensão de uma fonte de corrente contínua.

Semelhante ao conversor forward, o conversor push-pull utiliza-se do acoplamento magnético para obter na saída tensões variadas.

Quando T_1 conduz (considerando a polaridade dos enrolamentos), aparecem tensões nos secundários. O diodo D_2 conduz simultaneamente, mantendo o fluxo do transformador nulo, desconsiderando a magnetização.

No intervalo entre as conduções dos transistores, os diodos D_1 e D_2 conduzem de modo simultâneo (no instante em que T_1 é desligado, o fluxo nulo é garantido pela condução de ambos diodos, cada um conduzindo metade da corrente), atuando como diodos de livre-circulação e curto-circuitando o secundário do transformador [8].

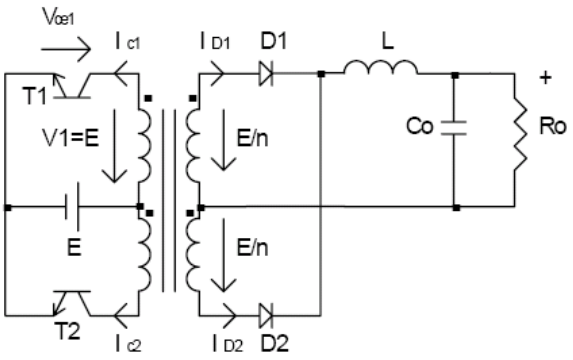

FIGURA 4.5 – CONVERSOR PUSH-PULL.
FONTE: POMILIO, J. A. [8].

4.2.6 – Conversor Fly-back

Baseia-se no armazenamento de corrente no indutor. Quando a chave *T* conduz, armazena-se energia na indutância do primário (no campo magnético) e torna o diodo reversamente polarizado.

Quando *T* desliga, para manter a continuidade do fluxo, o diodo entra em condução e essa energia acumulada no campo magnético é enviada à saída. A Figura 4.6 mostra o circuito.

O Fly-back pode funcionar de em dois modos diferentes, o modo contínuo e o modo descontínuo. No conversor de modo contínuo (corrente que circula no condutor nunca chega à zero) a corrente do indutor se eleva de acordo com a corrente de magnetização, o que provoca acréscimos sucessivos a ela.

No de modo descontínuo sua corrente no indutor deve sempre chegar à zero.

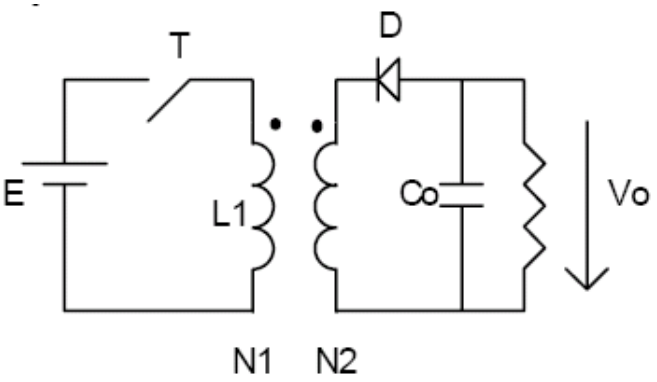

FIGURA 4.6 – CONVERSOR FLY-BACK.
FONTE: POMILIO, J. A. [8].

4.3 – Técnicas de modulação em fontes chaveadas

As fontes chaveadas operam a partir de uma fonte de tensão de corrente contínua, enquanto que na saída tem-se também uma tensão *DC*, porém de valor distinto (sendo fixo ou não).

As chaves semicondutoras dessas fontes 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 seu período de chaveamento.

Define-se ciclo de trabalho (*duty cycle*, largura de pulso ou razão cíclica) como a relação entre o intervalo de condução da chave e o seu período de chaveamento [8].

4.3.1 – Modulação PFM

A *pulse-frequênсy modulation* (*PFM*) é o método no qual a onda é usada para modular a freqüência de um circuito gerador de pulso.

A freqüência do pulso é variada a partir do seu valor padrão de acordo com a amplitude instantânea do sinal modulador em intervalos de amostragem. A amplitude e a largura dos pulsos são mantidas constantes. Ela opera a partir de um pulso de largura fixa, cuja taxa de repetição é variável.

A Figura 4.7 mostra um pulso de largura fixa modulado em freqüência.

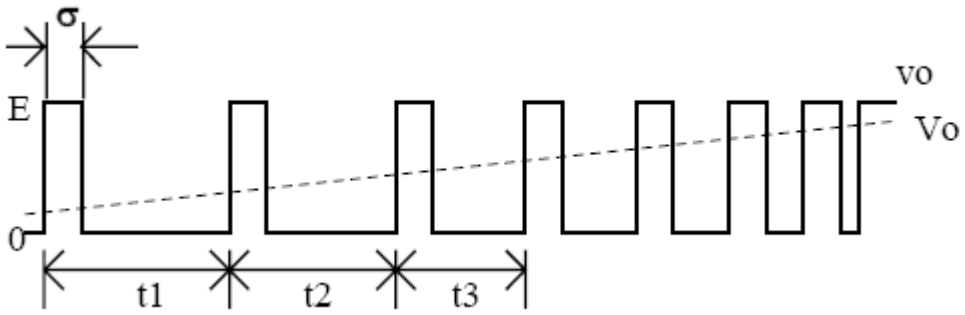

FIGURA 4.7 – PULSO MODULADO EM FREQUÊNCIA.
FONTE: POMILIO, J. A. [8].

4.3.2 – Modulação PWM

Essa modulação de largura de pulso, do inglês *pulse-width modulation* (*PWM*), envolve seu ciclo de trabalho para transportar qualquer informação sobre um canal de comunicação ou controlar o valor da alimentação entregue à carga, operando com freqüência constante, apenas variando o tempo em que a chave permanece acionada [8].

Se o *duty cycle* for ajustado de forma adequada, a tensão de saída pode ser mantida constante, tanto para variação na tensão de entrada da fonte como na carga. Quando se eleva o valor da carga, o controle tende a aumentar o seu ciclo de trabalho de forma a manter a tensão de saída constante.

O *duty cycle* varia quando muda o tempo em que o dispositivo de chaveamento está acionado e, de forma complementar, o tempo em que o dispositivo está desligado uma vez que $T = T_{ligado} + T_{desligado}$, onde *T* é o período de um ciclo completo.

A Figura 4.8 ilustra a saída do *PWM* para diferentes *duty cycles*.

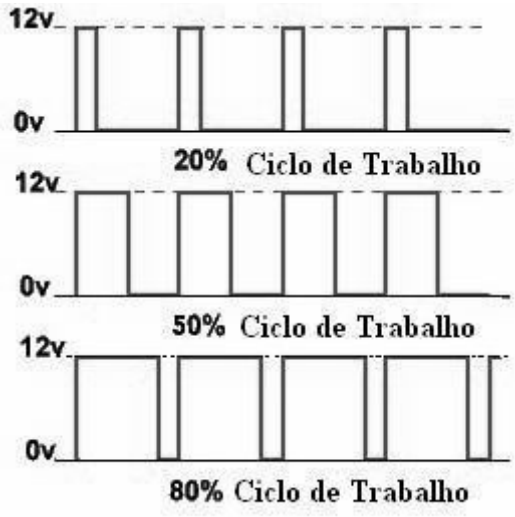

FIGURA 4.8 – DUTY CYCLE (PWM).
FONTE: AZZI, G. L. [1].

Capítulo 5

Modelagem e Simulação

Neste capítulo são apresentados os aspectos, teóricos e de bancada, da construção do protótipo e os componentes considerados de maior relevância para a implementação prática da fonte.

Em seguida, são apresentados os resultados de simulação digital com o programa PSpice. As formas de onda de maior relevância são apresentadas, onde se pode observar o correto funcionamento do circuito da fonte.

5.1 – Descrição dos componentes

Inicialmente teve-se a concepção do circuito, um exercício mental sobre a topologia, funções do circuito e escolha dos componentes.

Após a fase de análise, conversa e questionamentos, decidiu-se por escolher os componentes citados no tópico abaixo.

Optou-se por fazer essa breve introdução sobre a escolha dos componentes e no decorrer do texto apresentar uma análise mais profunda sobre cada um isoladamente e no circuito. Com isso achou-se que o leitor entenderia de maneira gradativa a opção de componente adotada.

5.1.1 – PIC 18F4520

O *PIC*, do inglês *peripherical interface controller*, pertence a uma família de microcontroladores fabricados pela Microchip. Este é um microprocessador que possui as seguintes características:

- Memória flash de 4 Kbytes;
- Espaço para código de 24 Kbytes;
- 13 canais Analógico-Digitais (*A/D*);
- 5 portas bidirecionais;
- 2 portas *PWM*;
- Clock interno de até 8 MHz.

Este *PIC* possui boa variedade de periféricos internos possibilitando diversas aplicações, conjunto de 35 instruções (*reduced instruction set computer* - *RISC*) com recursos de programação por Memória Flash e *EEPROM* (*electrical erasable programmable read-only memory*).

No projeto foi utilizado um oscilador de alta velocidade para geração de clock e uma fonte para prover a alimentação do circuito de controle. Esta fonte tem tensão de 5V.

Na aplicação a ser realizada será utilizada apenas a saída *PWM*, visto que é desejada uma onda quadrada. Para produzir essa onda, é necessário o *TIMER* (contador) do *PIC*, pois através dele pode-se controlar a freqüência de oscilação.

Escolheu-se um microcontrolador de baixo custo e alta confiabilidade. Este módulo do sistema é responsável por gerar onda *PWM* para o circuito.

Na Figura 5.1 pode-se visualizar a pinagem do PIC18F4520.

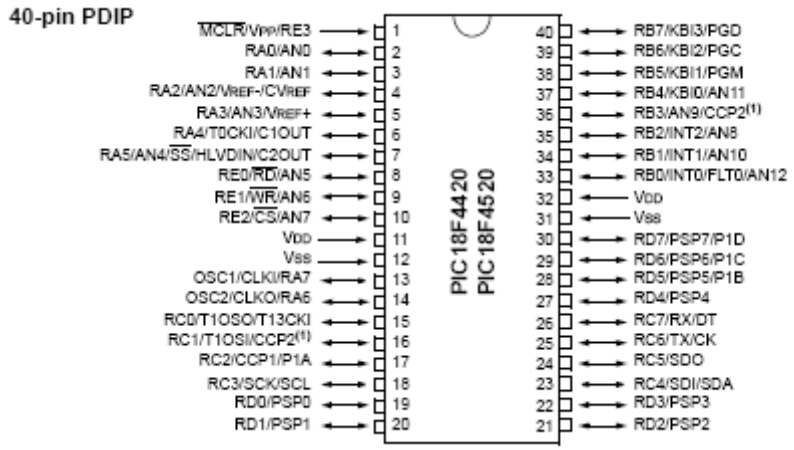

FIGURA 5.1 – DIAGRAMA DE PINAGEM DO PIC18F4520.
FONTE: MICROCHIP [11].

5.1.2 – 7407

Fabricado pela Fairchild Semiconductor, este dispositivo contém seis portas independentes cada uma desempenhando a função de buffer. Possui saída em coletor aberto (não tem resistor no coletor) exigindo resistências externas *pull-up* para um bom funcionamento lógico.

A idéia de um resistor *pull-up* é que ele fracamente "puxe" *(pulls)* a tensão do condutor que ele está conectado para 5V (ou qualquer tensão que represente o nível lógico alto).

Contudo, o resistor é intencionalmente “fraco” - alta-resistência - o suficiente para que, se qualquer outra coisa que puxe fortemente a tensão do condutor para 0V, a tensão irá para 0V [12]. A Figura 5.2 mostra o seu diagrama de pinagem.

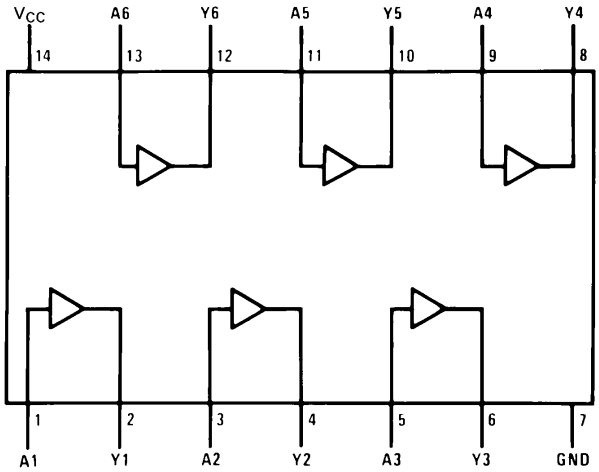

FIGURA 5.2 – DIAGRAMA DO 7407.
FONTE: ALL DATASHEET [13].

5.1.3 – 9552

Fabricado pela California Eastern Laboratories, a série PS955X são optoaclopadores isolados contendo diodo emissor de luz feito de arsenieto de gálio e alumínio (*GaAlAs LED*) na sua entrada (pinos 2 e 3) um circuito processador de sinais e um transistor de potência na saída (entre pinos 7 e 8).

Ele possui alta imunidade em modo comum e a comutação de alta velocidade. A Figura 5.3 ilustra a pinagem desse chip.

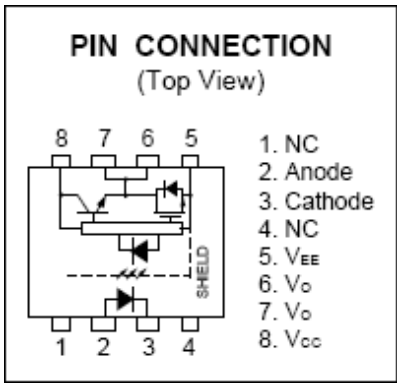

FIGURA 5.3 – PINAGEM DO PS9552.
FONTE: ALL DATASHEET [16].

5.1.4 – 7805

O 7805 é um regulador de tensão linear, que pode vir encapsulado de várias formas, fornecido por vários fabricantes como a Fairchild, por exemplo.

Para corrente de saída de até 1ª, existem dois encapsulamentos: TO-220 (vertical) e D-PAK (horizontal). Em alguns modelos a corrente pode ser até maior.

Com um dissipador de calor apropriado, a série LM78XX pode fornecer até mais que 1A de corrente. Ele também possui proteção contra sobre-temperatura e curto-circuito. A Figura 5.4 ilustra os dois tipos de reguladores.

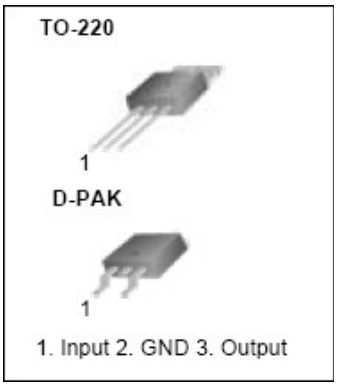

FIGURA 5.4 – REGULADOR DE TENSÃO 7805.
FONTE: DATASHEET CATALOG [17].

5.1.5 – ULN2803A

Fabricado pela empresa SGS Thomson Microelectronics, o 2803 é uma matriz de transistores Darlington (dispositivo semicondutor que combina dois transistores bi-polares no mesmo encapsulamento).

Esses circuitos integrados (*CI's*) podem controlar correntes de até 500mA e tensões de até 50V. Estão prontos para serem usados em interfaces que necessitem controlar motores de passos, solenóides, relés, motores *DC* e outros dispositivos. A Figura 5.5 mostra o seu diagrama esquemático, enquanto que a Figura 5.6 a sua pinagem.

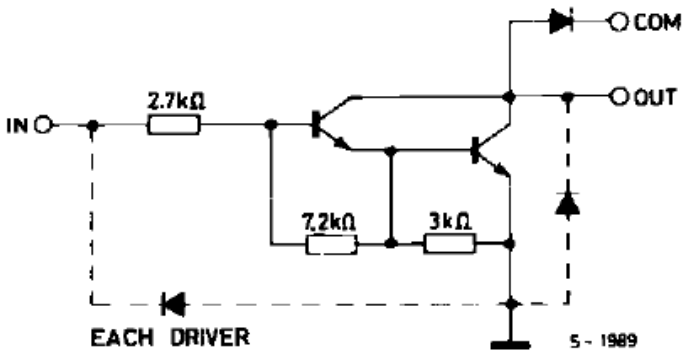

FIGURA 5.5 – ESQUEMA DO 2803.
FONTE: DATASHEET CATALOG [14].

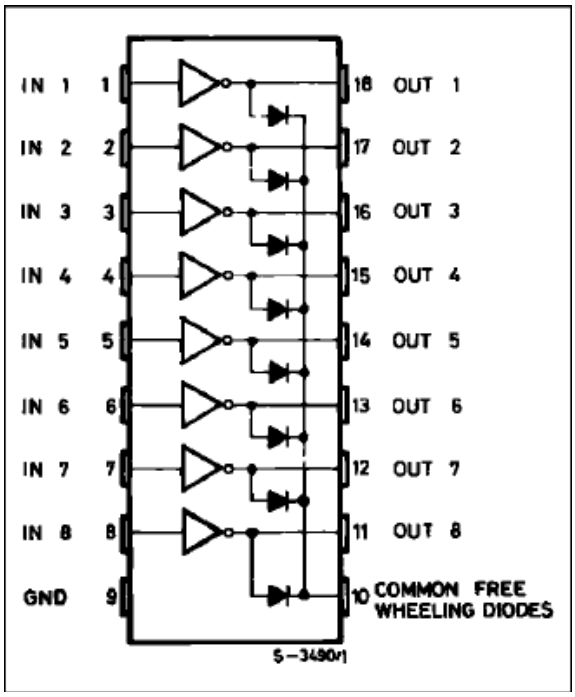

FIGURA 5.6 – DIAGRAMA DO 2803.
FONTE: DATASHEET CATALOG [14].

5.1.6 – BU2520DX

Transistor de potência npn, de alta velocidade com um diodo "amortecedor" integrado, fabricado pela Philips Semiconductors. Eles são destinados à utilização nos circuitos de recepção das cores os televisores. A Figura 5.7 mostra a configuração de sua pinagem.

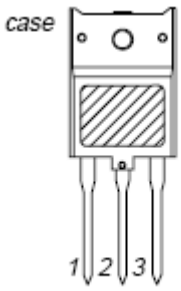

FIGURA 5.7 – ESQUEMA DO 2520.
FONTE: DATASHEET CATALOG [19].

5.1.7 – Bobina de alta tensão

As bobinas de ignição automotivas são bobinas de Ruhmkorff numa montagem mais compacta e robusta. Elas são usadas para fornecer alta tensão às velas do motor, para que essas provoquem faíscas que causam a combustão da gasolina.

Existem basicamente em duas versões: com isolante sólido ou embebido em óleo. Estas bobinas isoladas em óleo perdem o calor mais facilmente que as bobinas normais. Na Figura 5.8 apresentam-se o aspecto de seu interior e a bobina em corte.

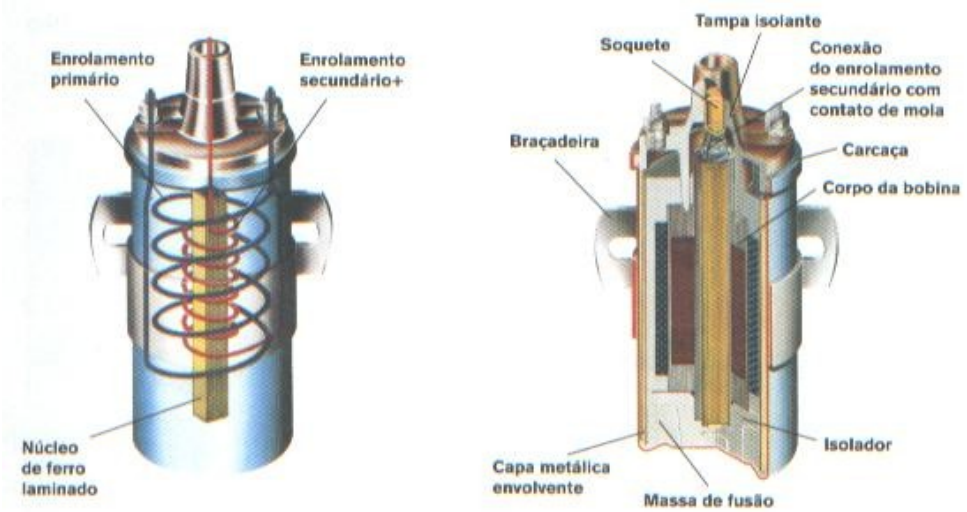

FIGURA 5.8 – BOBINA DE IGNIÇÃO.
FONTE: DELARA [20].

O óleo tem um papel de isolar devidamente as diferentes partes elétricas, mas também serve como refrigeração, pois quando os enrolamentos constituintes da bobina aquecem, o óleo movimenta-se de tal forma que cria um circuito de refrigeração, passando através das espiras dos enrolamentos diminuindo sua temperatura.

O comprimento dos cabos que ligam as velas deve ser reduzido ao máximo, de maneira que se consiga retirar o maior rendimento da corrente de alta tensão gerada pela bobina.

Estes tipos de bobinas não devem ser montadas em locais de contato com a chapa aquecida ou com o bloco do motor. Deve-se achar um lugar no automóvel que permita à bobina uma refrigeração permanente (correntes de ar fresco, distantes destas partes quentes).

O enrolamento secundário consiste numa série de espiras de fio de cobre muito fino, com uma enorme quantidade de voltas que podem se estabelecer entre 10.000 a 15.000 espiras, todas elas isoladas entre si através de um verniz que envolve toda a superfície condutora.

O enrolamento primário é formado por um conjunto de espiras de um fio, também de cobre, com seção superior ao secundário e com um total de 250 a 300 espiras. Este enrolamento é sujeito à tensão da bateria.

O funcionamento se estabelece do seguinte modo: um núcleo laminado de ferro é usado para garantir maior tensão no enrolamento secundário como se apresenta na Figura 5.9.

Esse núcleo é rodeado por um conjunto de espiras que constituem o enrolamento primário. Passando uma corrente elétrica por este enrolamento, um fluxo magnético é criado através do núcleo, semelhante a um ímã.

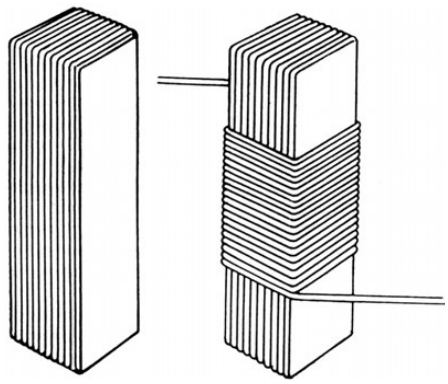

FIGURA 5.9 – NÚCLEO DE FERRO DA BOBINA.
FONTE: CEPRA [10].

Supondo que, sobre o enrolamento, é aplicado um novo enrolamento de fio com seção mais reduzida, fazendo a montagem da Figura 5.10, quando passar uma corrente elétrica e se produzir o fluxo magnético já dito anteriormente, as linhas do campo magnético estariam obrigadas a cortar todas as espiras do enrolamento secundário.

O valor das correntes induzidas está ligado com a quantidade de espiras que cruza o fluxo magnético gerado no primário e que é aproveitado pelo secundário, e também com o número de linhas de campo magnético sem contar as características do núcleo de ferro.

Qualquer variação que se der na corrente que circular pelo primário, estabelecerá uma variação das linhas de campo e induzirá sobre as espiras do secundário uma indução na corrente elétrica.

O número de espiras do secundário determinará a tensão obtida, ou seja, quanto maior for a quantidade de espiras do enrolamento secundário, maior será a tensão obtida nos terminais do mesmo [10].

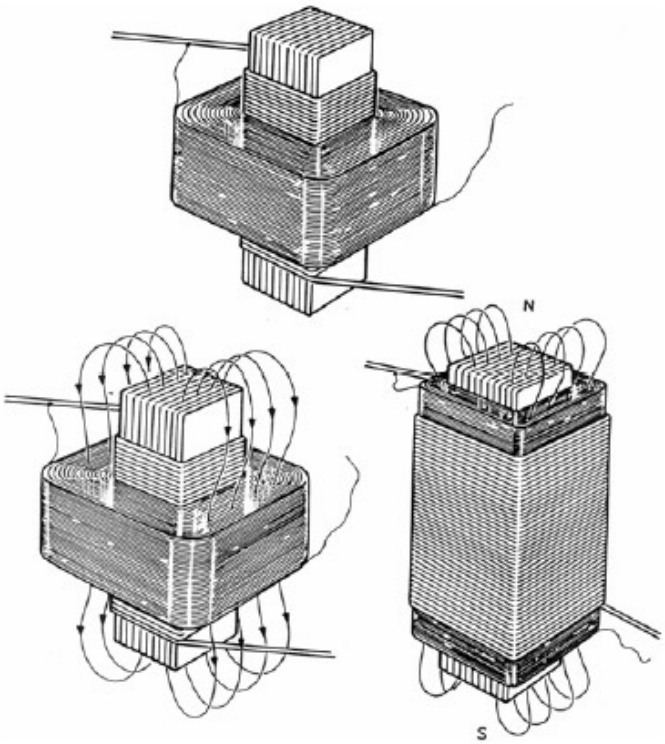

FIGURA 5.10 – INDUÇÃO MAGNÉTICA DA BOBINA.
FONTE: CEPRA [10].

5.2 – Análise dos componentes

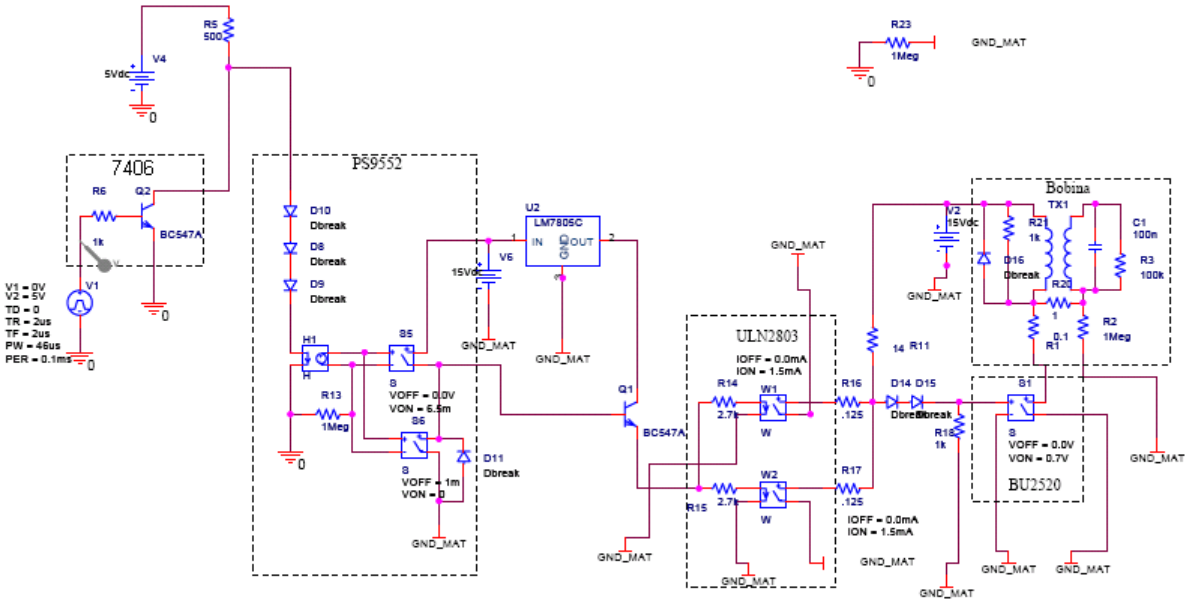

FIGURA 5.11 – DIAGRAMA DE ANÁLISE DOS COMPONENTES.

A análise do circuito começa pelo *PIC*, componente que gera o sinal *PWM*, fundamental para o funcionamento da fonte. Ele funciona cedendo corrente para o 7407. Porém, o máximo que esse microcontrolador pode ceder por pino é 25mA [13], desde que seja respeitada a potência máxima do integrado.

A corrente na saída do 7407 pode ser calculada através da Equação (5.1), quando o transistor estiver em modo saturado e Equação (5.2) para transistor em corte.

$$\frac{V_{cc} - V_{cesat}}{R_5} = I$$

(5.1)

$$\frac{V_{cc} - V_{led}}{R_5} = I_2$$

(5.2)

O 7407 é feito para trabalhar em modo saturado, quando em condições de operação recomendadas pelo *datasheet*. Essas condições foram respeitadas alimentando o 7407 com V_{cc} = 5V e tensão em sua entrada, sendo a onda *PWM* do *PIC*. Para mais informações sobre condições recomendadas ver referência [13].

Quando a tensão da onda quadrada do integrado está em 0V, o transistor do 7407 está saturado e com isso V_{cesat} é próxima de 0V. Calculou-se R_5 = 500Ω para se obter corrente próxima de 10mA passando pelo mesmo.

Quando o sinal de tensão *PWM* do *PIC* está em 5V, o transistor do 7407 está em corte e com isso a corrente drenada da fonte irá para o PS9552. Esta corrente será calculada através da Equação (5.2), como já dito.

Sabe-se que V_{cc} possui 5V e V_{led} varia de 1,3V a 2,1V [16]. Com isso calcula-se a corrente drenada, sendo próxima de 7mA.

O PS9552 funciona da seguinte forma: quando chega corrente no led, este emite luz para o fotodiodo, o qual transforma luz incidente em uma corrente elétrica, que por sua vez é amplificada por um circuito interno do PS9552, Figura 5.12. Esse circuito está ligado a um mosfet e um transistor bipolar, os quais formam a etapa de saída do dispositivo em questão.

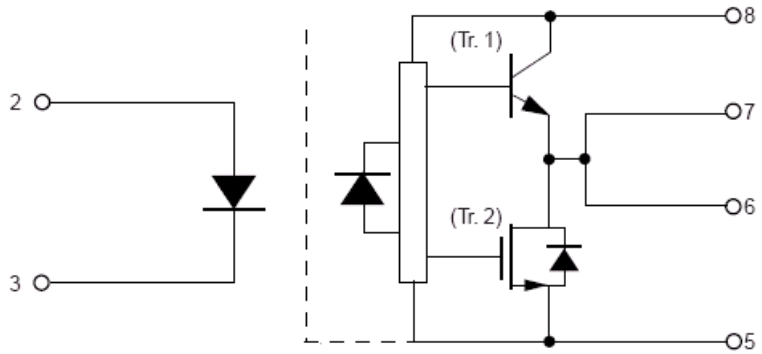

FIGURA 5.12 – DIAGRAMA FUNCIONAL DO PS9552.
FONTE: ALL DATASHEET [16].

A função principal do 9552, neste caso, é desacoplar o bloco de controle do bloco de potência.

A corrente de saída do PS9552 entra na base do transistor bc547. Quanto maior a corrente na base do transistor, maior a corrente no coletor até o ponto em que ele entra em modo saturado.

No projeto o transistor bc547 pode estar em modo saturado, pois a corrente que chega nele está na faixa de mA, a qual, conforme seu datasheet, é suficiente para saturá-lo bem como em corte, pois a corrente de saída do 9552 também é chaveada.

A função do bc547 é interfacear o circuito de 15V (PS9552) e o circuito de 5V (ULN2803). Para isso deve-se fixar 5V na entrada do 2803. Para essa finalidade é utilizado um regulador de tensão, o LM7805, cuja única função é baixar a tensão de 15V para 5V. Com esse regulador, a tensão no coletor do bc547 será de 5V e como ele está saturado a tensão no emissor também o será e, portanto, essa tensão será a de entrada do 2803.

As tensões de entrada e de saída do ULN2803 respeitam, então, especificação do seu datasheet, já que a saída está ligada em uma fonte de 15V, que é menor que o limite de 50V e a entrada possui 5V em modo saturado.

Quanto à corrente de saída do ULN2803, o valor desejado é de 1A, o qual, segundo o datasheet, satura o transitor BU2520DX. Para obter esta corrente, os pinos de saída dos dois ULN2803 foram ligados na base do transistor de potência BU2520DX e no resistor de 14Ω, que está ligado em fonte de 15V, ver Figura 5.11. Percebe-se que o valor de resistência foi calculado para se obter corrente de 1A (mais tarde a análise dessa resistência será melhor explicada).

Para analisar-se a corrente que passa por este resistor deve-se proceder da seguinte forma: quando a tensão nas entradas está em nível alto, os transistores do ULN2803 drenam corrente da fonte uniformemente, pois todas as saídas têm a mesma resistência de equalização (1Ω).

O cálculo da corrente é dado pela Equação (5.3). Porém, não é necessário calculá-la, pois a corrente se divide em 16 e, então, é drenada para referência de terra pelo ULN2803.

$$\frac{V_{cc} - V_{cesatULN2803}}{R_{11}} = I \tag{5.3}$$

Quando a entrada está em 0V, os transistores do 2803 estarão em corte. Neste caso o cálculo é feito através da Equação (5.4).

$$\frac{V_{cc} - V_{beBU2520} - 0,7 - 0,7}{R_{11}} = I \tag{5.4}$$

Os parâmetros são os seguintes: V_{cc} = 15V, $V_{beBU2520}$ = 0,7V, R_{11} = 14Ω. O resistor R_{11} foi escolhido dessa maneira para gerar corrente de aproximadamente 1A, necessária para saturar o BU2520DX.

Outra análise importante a se fazer é da potência necessária para suportar corrente de 1A, que pode ser calculada pela Equação (5.5).

$$P_{ot} = VI = RI^2 = 14 \times 1^2 = 14W \tag{5.5}$$

Percebe-se, pela análise feita acima, que quando o ULN2803 drena corrente, o transistor de potência está em corte e quando o ULN2803 está em corte, o BU2520DX drena para sua base corrente de aproximadamente 1A da fonte.

O funcionamento do BU2520DX trabalha como chave: ora em corte, ora em saturação. Quando a corrente de base é 1A, conforme seu datasheet, a corrente de coletor drenada deveria ser 6A. Porém a corrente de coletor é limitada pela impedância da bobina de ignição, a qual está ligada a seu coletor.

Essa corrente chaveada já é suficiente para a geração de tensão na faixa de kV na saída da bobina automotiva.

Os diodos existentes na base do transistor de potência têm função de não deixar passar corrente para o BU2520DX quando a mesma é drenada para referência de terra pelo ULN2803, já que neste instante aparece uma tensão representada pela soma do V_{cesat} do ULN2803 com a tensão sobre os resistores de equalização. Caso não existissem os diodos, o BU2520DX poderia operar em modo ativo ao invés de estar em corte.

Em relação ao sinal de saída da bobina algumas análises são necessárias: primeiramente deve-se observar o sinal de corrente na base do BU2520DX, o qual é chaveado, como já analisado acima. Sendo o sinal na base uma onda quadrada, o sinal de corrente no coletor também o será e com isso o do indutor no primário da bobina também. Para se obter o sinal aproximado da tensão no primário da bobina deve-se usar a seguinte fórmula:

$$V = L\frac{di}{dt} \tag{5.6}$$

A partir desta fórmula pode-se visualizar como será o sinal de tensão. A onda quadrada se transformará em impulsos ora positivos, ora negativos. Como a indutância não é ideal, existem capacitâncias parasitas e esses impulsos tendem a se alargarem um pouco.

Outra observação importante é a variação da influência dos capacitores parasitas quando se altera a freqüência. Essa análise é feita pela seguinte fórmula:

$$X_c = \frac{1}{2\pi\ fC}$$

(5.7)

Percebe-se que quanto maior a freqüência maior a influência de capacitâncias parasitas, já que X_c apresenta caminho de baixa impedância para altas frequências e com isso a energia das ondas em alta freqüência é dissipada sobre esses capacitores, o que resulta em alargamentos nos impulsos.

A partir do sinal do primário se obtém o do secundário, com um ganho em sua amplitude dado pela relação de espiras.

5.3 – Resultados de simulação

Na Figura 5.13 é apresentado o diagrama esquemático da fonte.

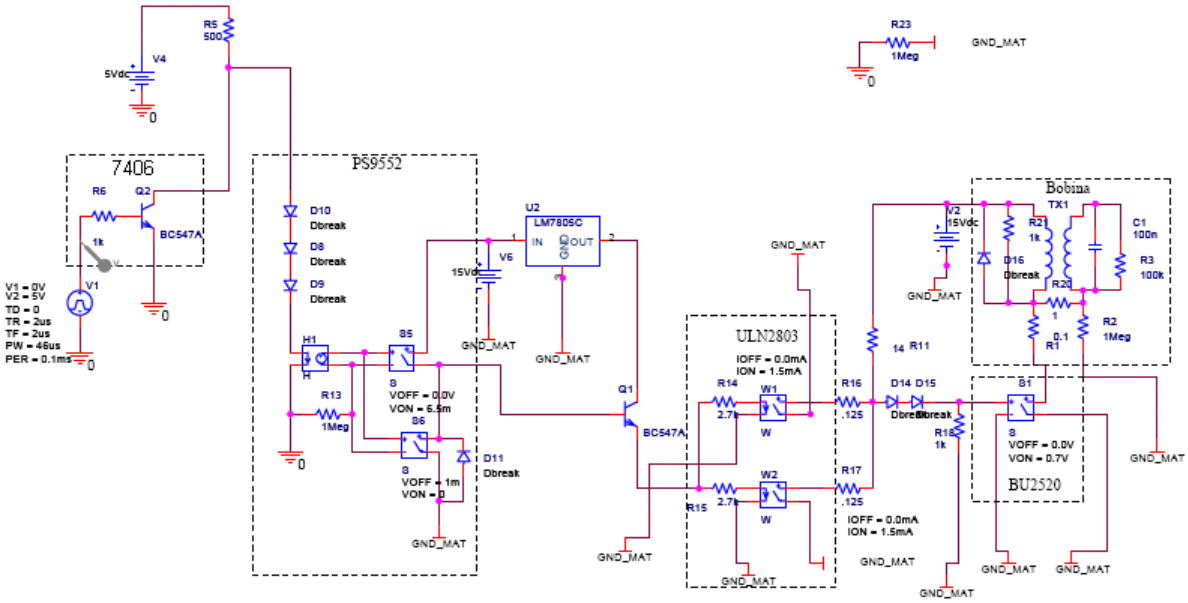

FIGURA 5.13 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA FONTE.

Foi através da simulação, realizada no PSpice, que se obtiveram os primeiros resultados sobre o funcionamento do circuito. Constatou-se a inexistência de alguns modelos e complicações de certos dispositivos, como por exemplo o 7406, que quando presente no esquemático produzia problemas de convergência, já que inseria um elemento digital em uma simulação onde todos os outros componentes eram analógicos. A solução adotada foi, em vez de introduzir o componente, simular sua função.

A fonte V_{pulse} V1 faz o papel do microcontrolador, que possui os seguintes parâmetros:

- *TD* (*time delay* – tempo de atraso) = 0µs;
- *TR* (*time rise* – tempo subida) = 2µs;
- *TF* (*time fall* – tempo de queda) = 2µs;
- *PW* (*pulse width* – largura do pulso) = 46µs;
- *PER* (*period* – período) = 100µs.

Os ULN2803 foram substituídos por duas chaves controladas por corrente (W_1 e W_2), onde R_{16} e R_{17} fazem o papel da associação dos resistores de equalização de 1Ω.

A substituição tornou o procedimento de simulação mais simples e não interferiu para a compreenssão do circuito e sua conseqüente implementação na bancada. Assim, cada componente foi substituído pela associação de outros destacados na Figura 5.12, acima.

5.3.1 – Análise dos resultados

A Figura 5.14 mostra a medição na saída do 7406 e com tensão de pico de 2,1V, resultado que será comprovado mais a frente.

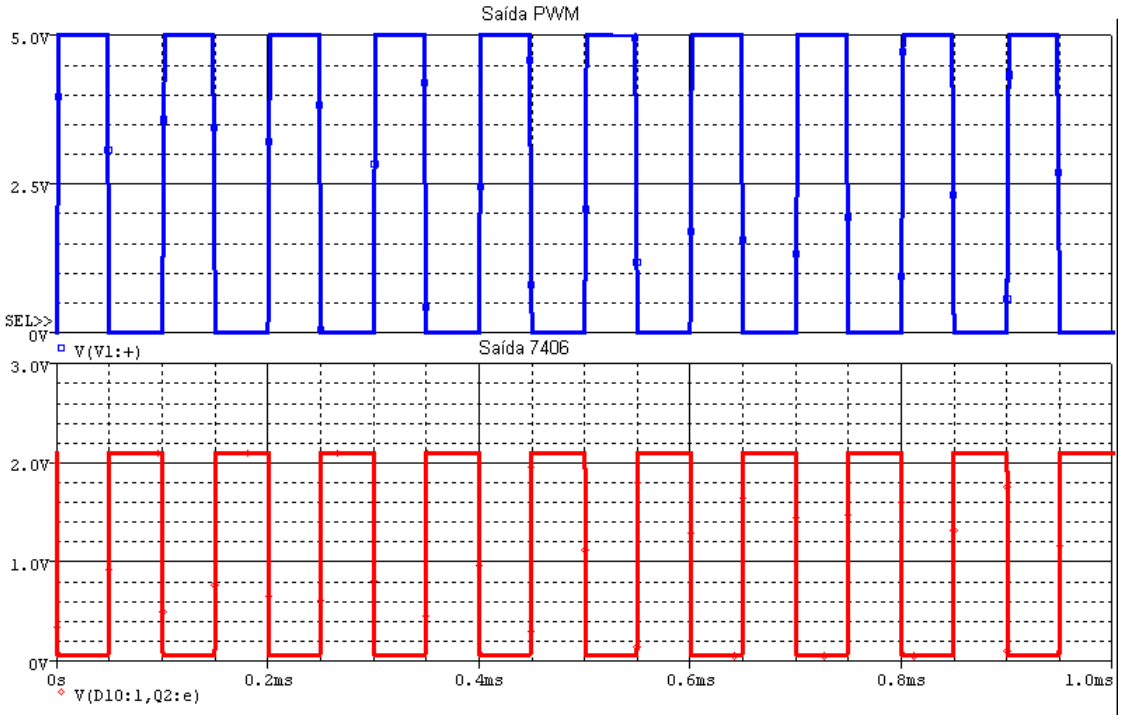

FIGURA 5.14 – SAÍDA DO 7406.

Na Figura 5.15, mostra a forma de onda na saída de alta tensão para uma freqüência de 10kHz, mostrando assim, o fim da etapa de simulação e indicando o inicio da montagem do protótipo do circuito de bancada.

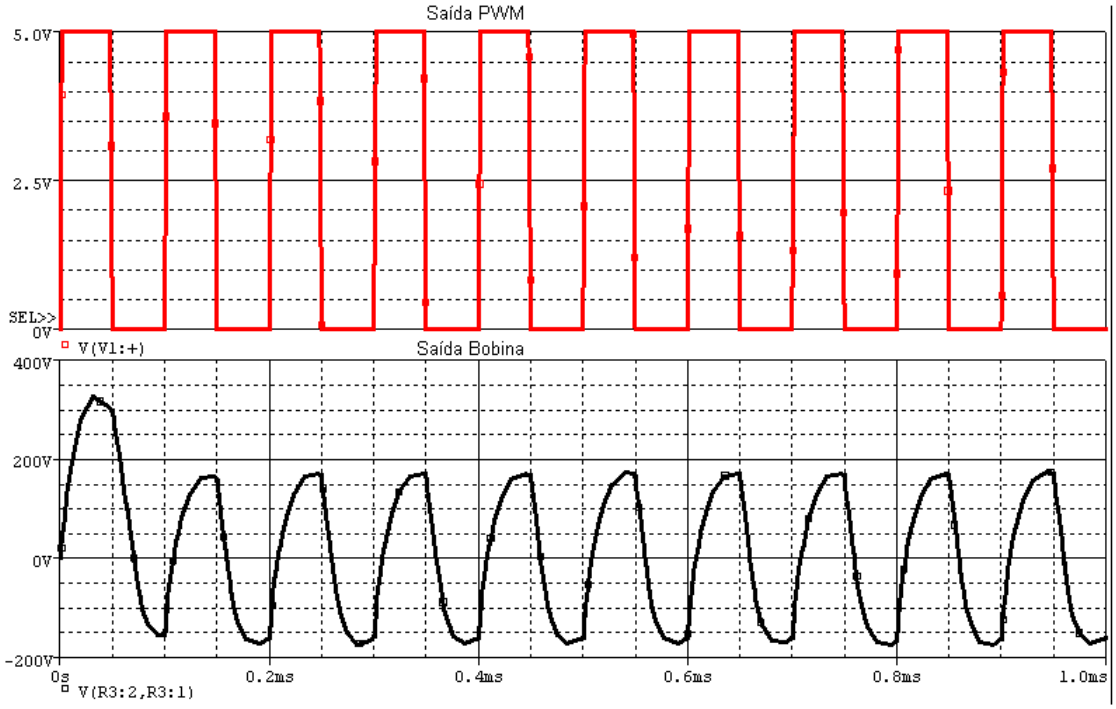

FIGURA 5.15 – SAÍDA DE ALTA TENSÃO.

A pequena diferença com relação às formas de onda se deve pelo fato do circuito simulado se comportar como ideal e o circuito de bancada possuir alguns ruídos, mesmo tendo separado os blocos de controle e potência utilizando cabos blindados para interligá-los.

Capítulo 6

A Engenharia da Fonte de Média Tensão

Nesse capítulo é mostrado o processo de construção do protótipo, sua verificação através da medição, o circuito de condicionamento e, por fim, a confecção do layout de placa.

6.1 – Projeto do circuito

A metodologia utilizada no projeto da fonte consiste em construir em seqüência os vários módulos, de modo que ao final do desenvolvimento de cada um deles, tem-se dados necessários para projetar o sistema e implementar o seu protótipo.

A representação da fonte está na Figura 6.1 e a descrição de cada bloco é detalhada ao longo do capítulo.

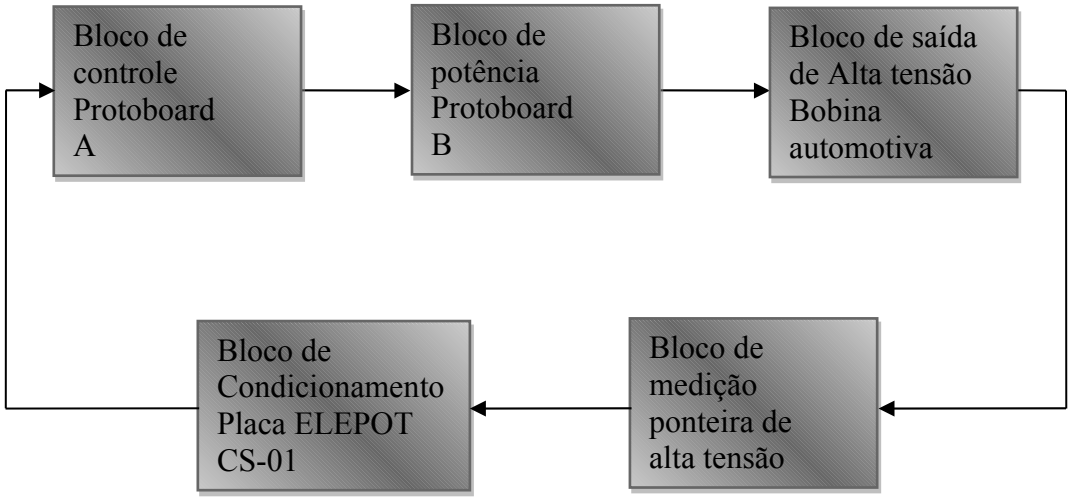

FIGURA 6.1 – DIAGRAMA DE BLOCOS DA FONTE.

6.1.1 – Montagem do protótipo da fonte

Em uma primeira análise, com intuito de introduzir apenas algumas informações sobre a montagem, o circuito foi dividido em duas protoboards para que a parte de controle ficasse isolada do bloco de potência.

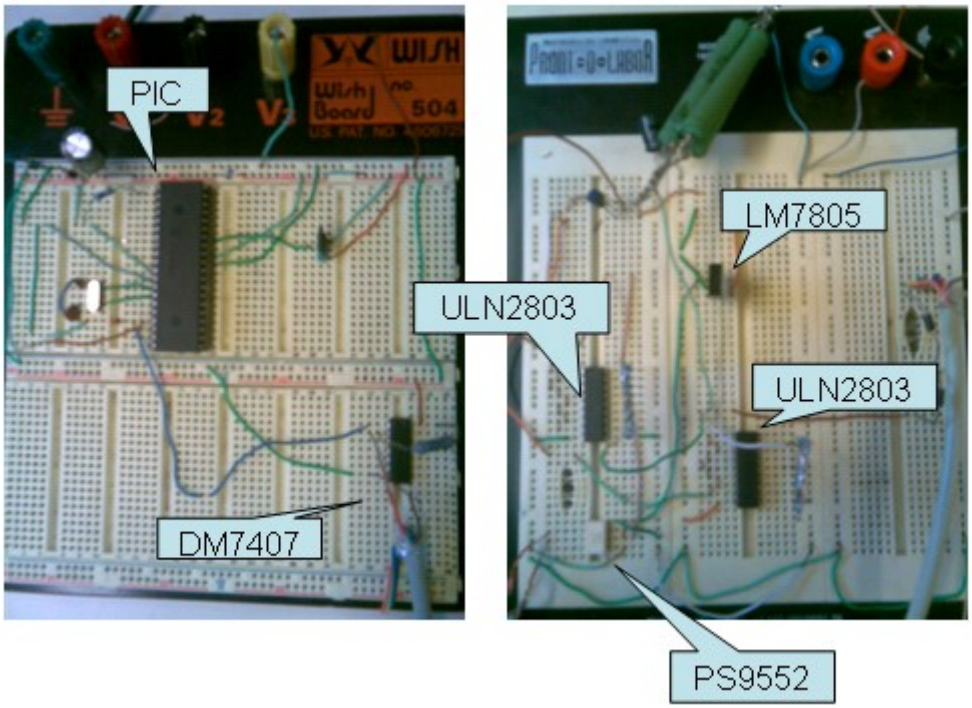

FIGURA 6.2 – PROTOBOARD DOS CIRCUITOS DE CONTROLE (A) E POTÊNCIA (B).

A isolação aumentou ainda mais quando o transistor de potência e a bobina ficaram, também, em local à parte. Isso permitiu que o controle ficasse imune à interferência eletromagnética e a ruídos. Posteriormente essa proteção se intensificou devido à introdução do componente PS9552.

Outro fator que colabora com a isolação dos circuitos é a inclusão, para interligar os blocos, de cabos blindados. A Figura 6.2 mostra o circuito e os seus componentes, que tiveram as seguintes funções:

- *PIC*: Gerar a onda quadrada (*PWM*) de 10kHz e 50% de *duty cycle* e ler sinais provenientes da placa de condicionamento de sinais (PCS);
- 7407: Proporcionar ganho à corrente que vem do microcontrolador;
- PS9552: Desacoplar o bloco de controle do bloco de potência;
- BC547: Proporcionar ganho de corrente que vem do PS9552 para o ULN2803 e fixar 5V na entrada do ULN2803;
- LM7805: Baixar a tensão de 15V para 5V;
- ULN2803: Fornecer corrente à base do transistor de potência;
- BU2520: Fornecer corrente de $6A_{pp}$ à bobina automotiva.

6.1.2 – Medição

Após a fase de análise e simulação deve-se medir os valores de tensão e corrente e observar as discrepâncias.

A fonte da protoboard A está em 5,5V, a da protoboard B em 15V e a da gaiola em 15,2V,ver Figura 6.2.

Mediu-se a tensão na saída do 7407, não foi usado o 7406 (buffer inversor) pois não havia no laboratório mas ambos são buffer. O valor encontrado foi $1{,}9V_{pp}$ em fase com o sinal de saída do *PIC*, como mostrado na Figura 6.3, indicando que o sinal condiz com o resultado simulado, já que o 7407 é um buffer não inversor.

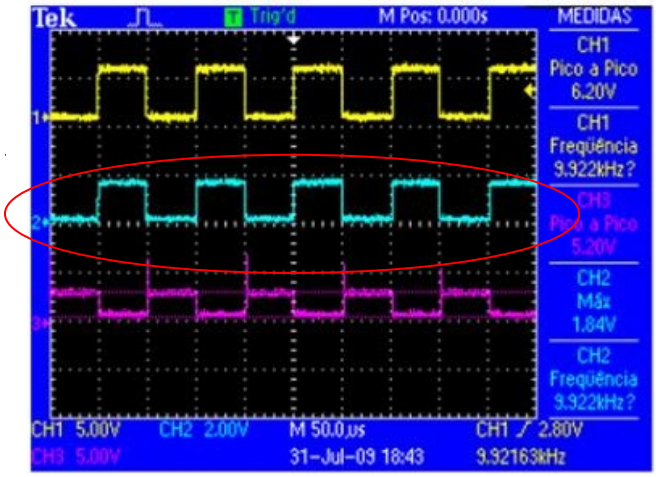

FIGURA 6.3 – SINAL DE SAÍDA DO 7407.

A forma de onda acima indica que ora corrente segue para o PS9552, ora não, conforme esperado pela análise feita anteriormente. O valor de 1,9V corresponde à tensão sobre o led do 9552 e está condizente com seu datasheet (1,3V a 2,1V).

A corrente pode ser calculada pela Equação (5.8).

$$\frac{5{,}5 - 1{,}9}{487} = 7{,}4mA \tag{5.8}$$

O valor aproxima-se do calculado, as pequenas diferenças devem-se ao fato dos valores dos componentes reais não correpoderem exatamente aos dos usados na simulação.

Outro valor medido foi a tensão no resistor de 14Ω na saída do ULN2803, mostrado na Figura 6.4.

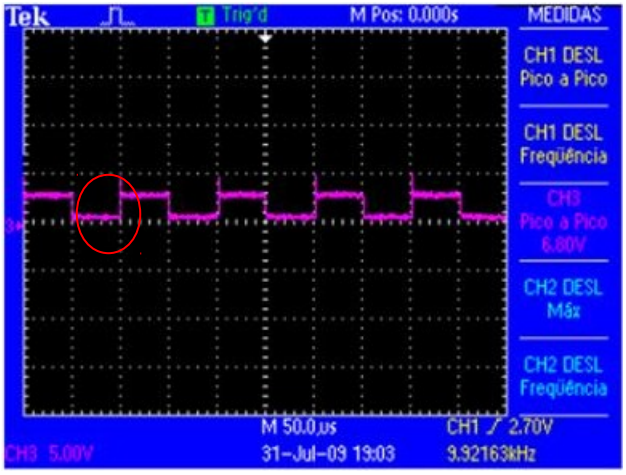

FIGURA 6.4 – SINAL NO RESISTOR 14 Ω NA SAÍDA DO ULN2803.

No osciloscópio aparece 6,8V_{pp}, devido à elevação na borda de subida do sinal, destacado na Figura 6.4. O sinal pico a pico real é de 2,2V_{pp}.

Além disso, sabe-se que o sinal de tensão de 2,2V_{pp} na saída do ULN2803 é próximo daquele sobre o resistor de 14Ω, pois entre eles existe apenas o resistor de 1Ω. Esse sinal de 2,2V_{pp} está invertido em relação ao sinal do *PIC*, como pode ser comprovado pela Figura 6.5. Para o entendimento da inversão, deve-se observar que quando a corrente na base dos transistores está em nível alto, a tensão na saída do ULN2803 é 0V, já que o mesmo está em modo saturado.

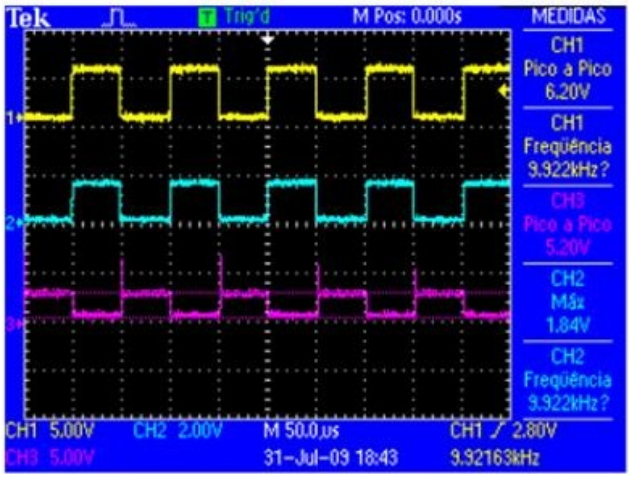

FIGURA 6.5 – SINAIS DO PIC, RESISTOR E ULN2803.

Quando a corrente na base dos transistores está em baixa, os transistores do ULN2803 estarão em corte e a tensão nas suas saídas será 2,2V. Esta tensão é dada por $V_{diodo} + V_{diodo} + V_{be}$. Este V_{be} será do transistor de potência.

A corrente que passa pelo resistor de 14Ω neste caso será dada por:

$$\frac{15 - 2,2}{14} = 0,91A$$

Esta corrente chega à base do transistor de potência e está próxima do medido.

Quanto ao sinal de tensão no secundário da bobina, obtiveram sinais semelhantes aos calculados no Capítulo 5.

Quando a freqüência de saída do microcontrolador encontrava-se em 10kHz o sinal obtido foi o da Figura 6.6. Esse sinal possui freqüência de 5kHz, para se chegar a uma conclusão satisfatória sobre essa variação da freqüência e da forma desse sinal deve-se fazer uma análise mais apurada do modelo da bobina e dos harmônicos que compõem o sinal.Quando se diminui a freqüência de saída do *PIC* para 2kHz a saída da bobina muda para a forma de onda da Figura 6.7.

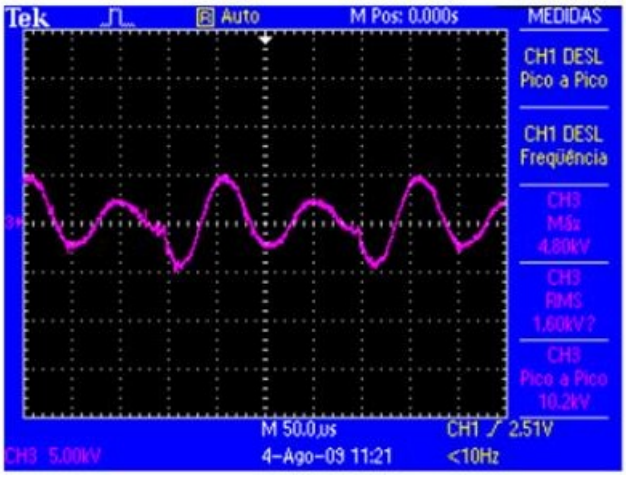

FIGURA 6.6 – SINAL DA SAÍDA DA BOBINA EM 5KHZ

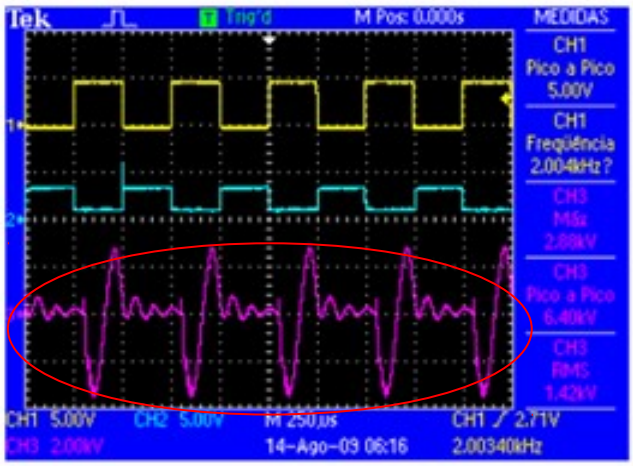

FIGURA 6.7 – SINAL NA SAÍDA DA BOBINA EM 2KHZ.

Com a diminuição da freqüência, a influência de capacitâncias parasitas diminui e com isso o sinal se parece mais com um trem de impulsos alternados. Os impulsos foram levemente alargados pelas capacitâncias.

O sinal em azul é de tensão na saída do 2803. Este sinal possui a mesma forma da corrente que chega à base e por conseqüência ao coletor do transistor de potência. Percebe-se que derivando esse sinal obter-se-ia um trem de impulsos alternados, como já explicado no Capítulo 5.

O sinal envolto pelo círculo aproxima-se desse trem de impulsos, porém os impulsos foram alargados pelos capacitores parasitas que são acumuladores.

6.1.3 – Ponta de prova para alta tensão

Para fazer a medição na saída da bobina, foi utilizada uma ponteira própria para alta tensão.

Por se tratar de um experimento que apresenta elevadas tensões e quantidades de energia, sua medição foi feita com total segurança e sempre com a presença dos responsáveis do Laboratório, que são as pessoas com o conhecimento adequado, evitando assim eventuais acidentes durante o projeto de graduação.

O KV - 40, fabricado pela ICEL Manaus, é uma ponteira projetada para evitar choques elétricos no usuário e para permitir a medição de tensões que são impossíveis de se medir com um multímetro comum. Ela possui as seguintes especificações:

- Impedância de entrada: 1000 Mega ohms, aproximadamente;
- Proporção de medida: 1000 : 1.
  Ou seja, é uma ponteira x1000, que multiplica a escala do instrumento por esse valor;
- Tensão Máxima em *DC* que pode ser medida: 40kV;
- Tensão Máxima em *AC*: $28kV_{rms}$;
- Exatidão: *DC*: ±1% (1 kV até 20 kV) e ±2% (20 kV até 40 kV);
  AC: 5% em 60 Hz;
- Coeficiente de temperatura: Menor que 200 ppm / ºC;
- Temperatura de Operação: 0 ºC a +50 º C.

Para um melhor entendimento, faremos uma breve explicação de como deve ser o funcionamento da ponta de prova.

Basicamente, a ponteira de alta tensão é um circuito divisor resistivo, permitindo que uma determinada porcentagem da tensão possa ser medida pelo voltímetro ou multímetro de uso comum. A Figura 6.8 ilustra a ponteira e um esquemático do divisor resistivo.

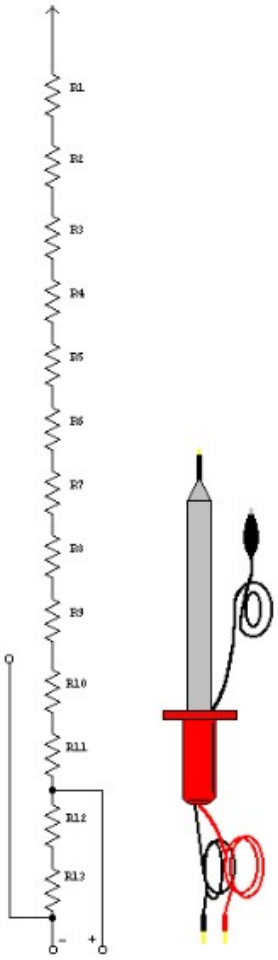

FIGURA 6.8 – DIVISOR RESISTIVO E A PONTEIRA DE ALTA TENSÃO.
FONTE: COMUNIDAD ELECTRONICOS [15].

6.2 – Sistema de condicionamento

Neste trabalho foi utilizada a placa ELEPOT CS-01, do laboratório LEMT, tendo que somente redimensionar os parâmetros necessários para o projeto da fonte.

A placa de condicionamento, Figura 6.9, é formada por 3 estágios, sendo eles o filtro diferencial (que tem como finalidade eliminar os ruídos de modo comum). Amplificador inversor com offset (que insere o nível *DC* necessário ao

microcontrolador) e o circuito de proteção do *AD* (que impede que sinais elevados danifiquem o microcontrolador).

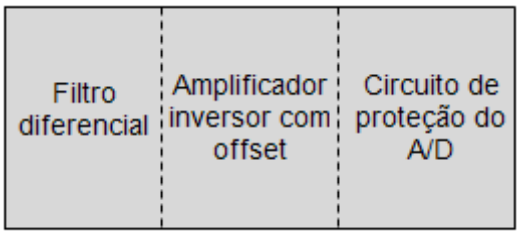

FIGURA 6.9 – DIAGRAMA DA PLACA DE CONDICIONAMENTO.
FONTE: FRANÇA, B. W. [21].

6.3 – Projeto do layout da placa

Nesta etapa do projeto foi feito o processo de confecção do layout da placa de circuito impresso. Ele foi desenhado no OrCAD, numa folha A4, e roteado numa placa de 172x107cm.

Optou-se por um circuito de dupla face e, após várias revisões, se obtém a versão definitiva do circuito em que será feito o layout das faces com as respectivas trilhas e ilhas. Figura 6.10 – Face Top da placa, Figura 6.11 – Face Bottom da placa.

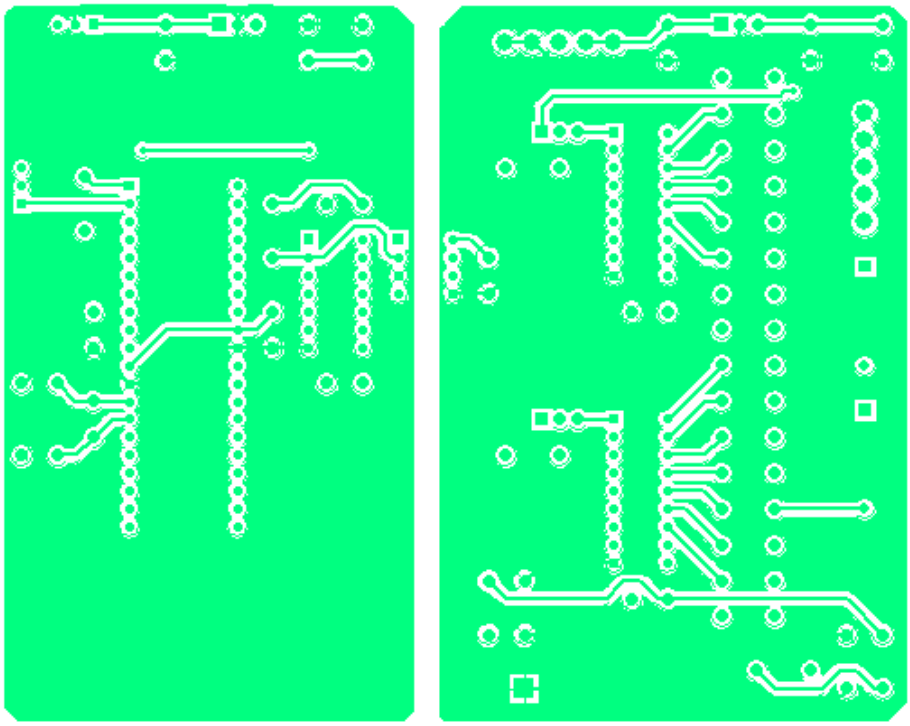

FIGURA 6.10 – FACE TOP DA PLACA.

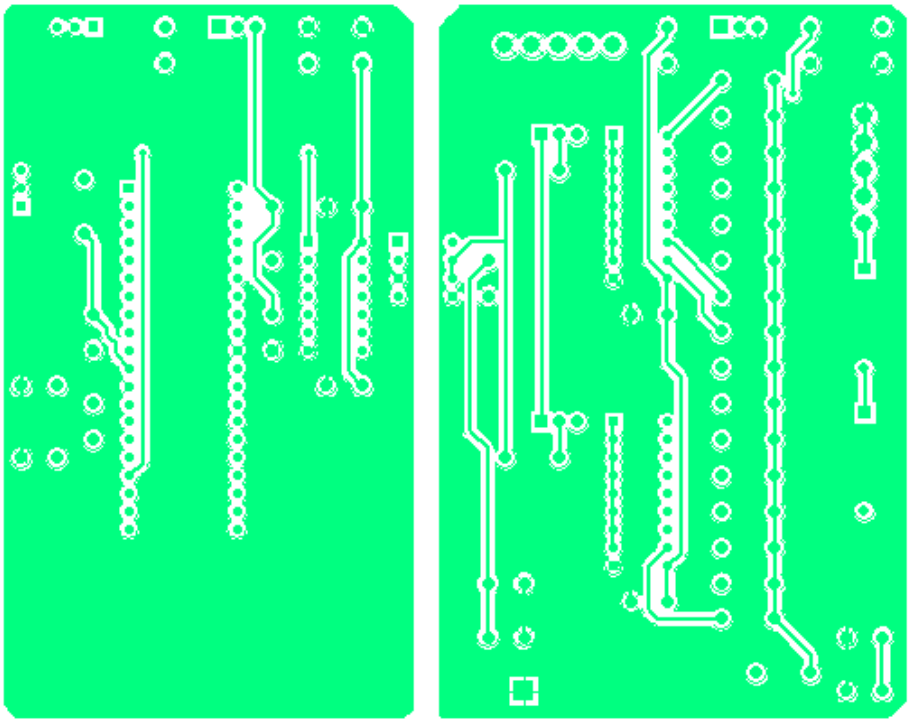

FIGURA 6.11 – FACE BOTTOM DA PLACA.

Capítulo 7

Conclusão

Foi apresentado o estudo sobre fonte chaveada de média tensão passando pela concepção e modelagem do circuito, pela simulação do mesmo e por fim pela montagem de protótipo de bancada, condicionamento e verificação de resultados.

Pode-se considerar que o trabalho foi concluído com êxito, já que as etapas de vital importância: modelagem, simulação e bancada, obtiveram resultados coerentes e satisfatórios.

Nota-se, também, que os valores calculados na etapa de modelagem foram corretos, sendo gerada uma simulação próxima do resultado esperado, o que levou à etapa de montagem do protótipo de bancada.

Esta etapa foi, sem dúvida nenhuma, a mais exaustiva e instrutiva, pois ocorreram diversos problemas típicos de bancada, que envolve: mau contato, fonte desregulada, queima de componentes, interferências, falhas de conexões elétricas entre as protobords e sensibilidade a variações de temperatura. Estas falhas provocam ruídos e informações incorretas. Porém, no final, o objetivo foi alcançado com a obtenção de formas de ondas corretas e bem próximas do que se tinha calculado e simulado.

A complexidade do circuito ficou restrita ao mínimo indispensável, onde utilizou-se a maioria dos componentes populares e de baixo custo, de modo que a manutenção do equipamento seja também fácil e rápida.

Pode-se concluir que a fonte de média tensão desenvolvida neste trabalho apresenta características satisfatórias, podendo ser utilizada tanto no âmbito da pesquisa fundamental quanto didático.

Trabalhos Futuros

A título de perspectiva, este projeto pode ser aprimorado com pequenas melhorias que podem ser feitas na fonte com o objetivo de explorar melhor as potencialidades do equipamento tornando-o mais versátil, como por exemplo:

- Processo da confecção das placas de circuito impresso; esta etapa é a que está mais próxima de acontecer, visto que o layout já está pronto;
- Criação de um circuito de controle;
- Introdução de um display, tornando a fonte de fácil leitura;
- Tentativa da implementação do circuito do Fly-back;
- Criação de interface com o computador para o monitoramento das leituras das tensões e correntes de entrada e saída.

Bibliografia

[1] AZZI, G. L. **Desenvolvimento de uma Fonte de Alta Tensão Chaveada para Tubos Fotomultiplicadores (Tese de Mestrado).** Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas. 2006.

[2] IEC Publication 60: **High-voltage test techniques. Part 1: General Definitions and test requirements, Second Edition,** 1989-11**. Part 2: Measuring Systems, 2nd Edition.** 1994-11.

[3] PESENTE, J. R. **Fundamentos de técnicas de alta tensão. (Atividade extracurricular).** UNIOESTE, Foz do Iguaçu. 2004.

[4] E. KUFFEL, W.S. ZAENGL e J. KUFFEL. **High Voltage Engineering – Fundamentals. 2nd Edition.** Great Britain. 2000.

[5] IEEE Std 4-1995: **IEEE Standard Techniques for High-voltage Testing.**

[6] IEC Publication 52: **Recommendations for Voltage Measurements by Means of Sphere-gaps (one sphere earthed). 2nd Edition,** 1960.

[7] Wikipedia: **Conversor buck - definição e usos**
Disponível em <http://pt.wikipedia.org/wiki/Conversor_buck>
Acesso em 23 de Julho de 2009.

[8] POMILIO, J.A: **Apostila de Eletrônica de Potência**
UNICAMP, Campinas. 2000.

[9] MOHAN, UNDERLAND and HOBBIN: **Power Electronics, Converters, Applications and Design. 2nd Edition.**
John Wiley and Sons, Inc. 1995.

[10] CEPRA – Departamento Técnico Pedagógico: **Sistemas de Ignição Coleção Formação Modular Automóvel.** Portugal, Lisboa. 2000.

[11] MICROCHIP: **PIC18F2420/2520/4420/4520 – Data Sheet**
Disponível em
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39631D.pdf>
Acesso em 25 de Julho de 2009.

[12] Wikipedia: **Resistores pull-up**
Disponível em <http://pt.wikipedia.org/wiki/Resistores_pull-up>
Acesso em 25 de Julho de 2009.

[13] ALLDATASHEET: **DM7407 – Data Sheet**
Disponível em
<http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/50893/FAIRCHILD/7407.html
Acesso em 25 de Julho de 2009.

[14] DATASHEET CATALOG: **ULN2803A – Data Sheet**

Disponível em
<http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/U/L/N/2/ULN2803A.shtml>.
Acesso em 25 de Julho de 2009.

[15] COMUNIDAD ELECTRONICOS: **Sonda para Medición de Alto Voltage**
Disponível em
<http://www.comunidadelectronicos.com/proyectos/sonda-AV.htm>
Acesso em 25 de Julho de 2009.

[16] ALLDATASHEET: **PS9552 – Data Sheet**
Disponível em
<http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/206727/CEL/PS9552.html>
Acesso em 27 de julho de 2009.

[17] DATASHEET CATALOG: **LM7805 – Data Sheet**
Disponível em
<http://www.datasheetcatalog.com/datasheet _pdf/L/M/7/8/LM7805.shtml>
Acesso em 27 de Julho de 2009.

[18] EMILIO: **HERTZ - Segunda Parte**
Disponível em
<http://www.emilio.com.mx/index.php?entry=entry071014-062500>
Acesso em 27 de Julho de 2009.

[19] DATASHEET CATALOG: **BU2520DX – Data Sheet**
Disponível em
< http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/B/U/2/5/BU2520DX.shtml >
Acesso em 31 de Julho de 2009.

[20] DELARA: **Literatura Técnica**
Disponível em < http://www.dellara.com.br/literatura.html>
Acesso em 01 de Agosto de 2009.

[21] FRANÇA, B. W. **Relatório de Estágio Supervisionado.**
UFRJ, Rio de Janeiro. 2008

[22] SANTOS, R. B. **Circuito Retificador de Meia Onda.**
Disponível em
< http://www.bairrospd.kit.net/#apostila>
Acesso em 03 de Agosto de 2009.

[23] C. L. WADHWA. **High Voltage Engineering.**
2nd Edition. New Delhi. 2007.

Apêndice A

Projeto do fly-back

No começo do projeto final de graduação, a idéia inicial era de implementar a fonte utilizando a topologia do fly-back.

O circuito pensado inicialmente foi modelado segundo o esquemático da Figura A-1.

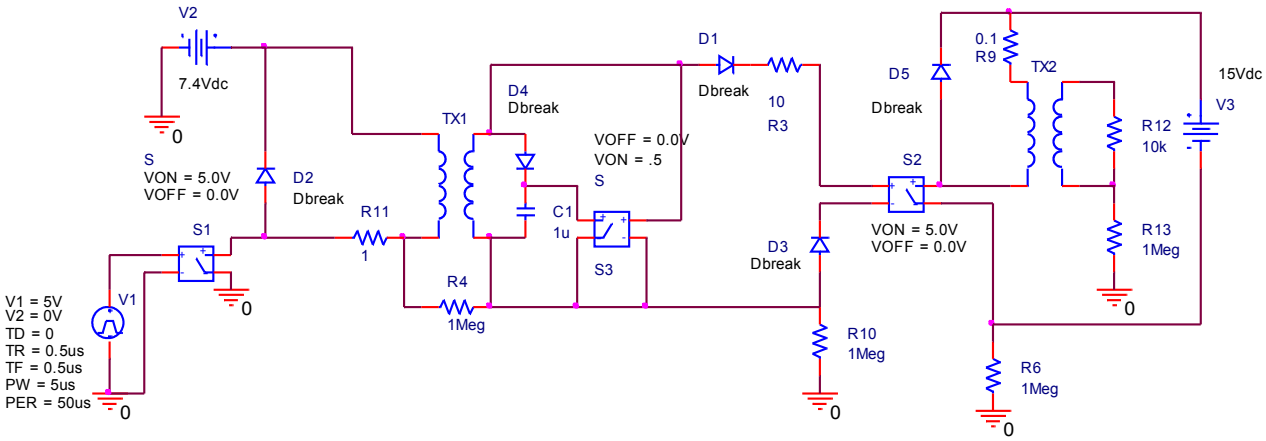

FIGURA A.1 – ESQUEMÁTICO USANDO FLY-BACK.

Segundo este modelo, todas as etapas de bancada estavam ocorrendo conforme as simulações, ou seja:

- V_1 (PIC) - Gerava a onda quadrada (PWM) inicialmente com 10% de ciclo ativo e posteriormente com 90%;
- Chave S_1 (ULN2803A) - Dava o ganho de corrente;
- TX_1 (Transformador de Pulso) - Dava ganho de corrente e desacoplava o bloco de controle do bloco de potência;
- Chave S_2 (BU2520DX) - O sinal que saía do coletor desse transistor era uma das entradas do fly-back.

Os transformadores de pulso utilizados nesse projeto são usados no acoplamento, isolando o circuito de controle (de baixa tensão e potência) dos transistores (chaves semicondutoras), além de isolarem um transistor do outro.

No projeto aplicou-se com o intuito de isolar o circuito de controle do circuito de potência. Esses transformadores são usualmente do tipo 1:1, um secundário, ou 1:1:1, dois secundários. Em geral são fabricados com núcleo de ferrite e invólucro plástico (até mesmo, a critério do cliente).

Um dos problemas encontrados foi no momento de se fazer a análise do sinal de tensão na protoboard. O sinal se encontrava invertido na saída do Transformador de Pulso. O outro foi quando se teve que acoplar o fly-back ao circuito.

O fly-back utilizado foi comprado em loja de televisores, próprio para altas tensões. A dificuldade se focava na falta de informações sobre as especificações do mesmo como pinagem ou até de um datasheet disponível.

Uma solução adotada foi desmontar um monitor de computador e utilizar o seu fly-back. Mais uma vez esbarra-se na complexidade da quantidade de entradas e da falta de um esquemático para utilizar como apoio.

A falta de tempo para se fazer uma engenharia reversa no fly-back do monitor também foi um fator complicador, visto que o cronograma não comportava mais tempo para estudos de base mais elaborados.

Infelizmente, o projeto inicial teve que ser repensado e adequado para a bobina de alta tensão, que mostrou ser mais fácil de trabalhar e possuí um maior acervo de informações sobre suas especificações.

Apêndice B

Amplificadores Operacionais

O Amplificador Operacional (Amp Op) é um bloco de extrema importância na Eletrônica, são amplificadores que utilizam realimentação para controle de suas características, possuem um ganho muito alto e duas entradas: uma inversora (-) e outra não inversora (+).

Os Amplificadores Ideais são aqueles que devem ter ganho de tensão e resistência de entrada infinitos e resistência de saída igual a zero. A Figura B.2 mostra o símbolo elétrico do Amp Op.

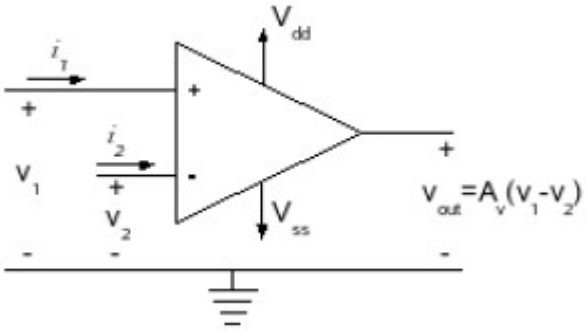

FIGURA B.2 – SÍMBOLO DE UM AMP OP.
FONTE: BELFORT, D. R. [16].

As propriedades de um circuito amplificador operacional ideal são:

- Ganho de tensão diferencial infinito;
- Ganho de tensão de modo comum igual a zero;
- Tensão de saída nula para tensão de entrada igual a zero;
- Impedância de entrada infinita;
- Impedância de saída igual à zero;
- Deslocamento de fase igual à zero.

Para o Amp Op não ideal, temos que o seu ganho de tensão, normalmente chamado de ganho de malha aberta, medido em corrente contínua (*CC*, ou em baixas freqüências), é definido como a relação da variação da tensão de saída para uma dada variação da tensão de entrada, ou seja, a tensão de saída V_{out} é a diferença entre as entradas V_1 e V_2, multiplicado pelo ganho em malha aberta: $V_{out} = (V_1 - V_2)\ A_v$.

A tensão de offset do Amp Op real, devido a um casamento imperfeito dos dispositivos de entrada, e normalmente diferencial. A saída pode ser diferente de zero quando ambas as entradas estão no potencial zero, o que significa dizer que há uma tensão *CC* equivalente, na entrada, chamada de tensão de offset.

Com relação às correntes de polarização, o Amplificador Real apresenta essas correntes, devido às correntes de base dos transistores bipolares de entrada do operacional ou ainda correntes de fuga da porta do transistor de efeito de campo em amplificadores dotados de *FET*s (*field efect transistor*) à entrada.

Como, na prática, os dispositivos simétricos de entrada não são absolutamente iguais, as duas correntes de entrada são sempre ligeiramente diferentes. A diferença dessas correntes é chamada de corrente de offset.

Apêndice C

Bobinas de Ruhmkorff

A bobina de indução, ou bobina de Ruhmkorff, é um aparelho que produz baixa intensidade de corrente sob elevada tensão. Ela é considerada um transformador de circuito magnético aberto.

Forma as sucessoras das máquinas eletrostáticas na maior parte dos experimentos de laboratórios no final do século 19. Elas eram as formas de obter a alta tensão de maneira independente das condições ambientais.

As bobinas de ignição automotivas são bobinas de Ruhmkorff, que nos carros mais antigos usavam um obturador mecânico chamado de platinado e hoje, nos mais modernos, tem um transistor de chaveamento.

A bobina de Ruhmkorff é formada por um núcleo magnético composto por fios de ferro, envolvido por um cilindro de cartão e em torno do qual estão enroladas duas bobinas de fio de cobre isolado.

O primeiro fio, que forma o circuito indutor, está ligado a uma pilha. Sobreposta àquela primeira bobina está outra de cobre mais fino, formando um circuito induzido. As extremidades desta bobina estão ligadas a terminais colocados em pequenas colunas de vidro.

Um dos condutores de entrada do circuito indutor passa em um interruptor rotativo e a outra extremidade fecha-se por um interruptor vibrante destinado a provocar abertura e o fechamento brusco desse circuito. Essa bobina pode ser vista na Figura D.3

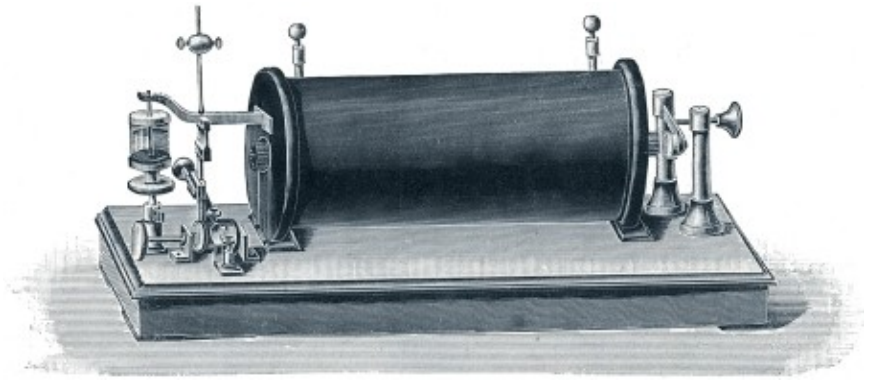

FIGURA D.3 – BOBINA DE RUHMKORFF.
FONTE: EMÍLIO [18].

Anexo A

Programa no PIC para geração de um pulso quadrado de tensão

```
/*
  TEMA: programa principal para gerar o sinal PWM.
  AUTOR: Rodrigo Cesar Almeida de Carvalho.
*/

#include"C:\DocumentsandSettings\Rodrigo\Meusdocumentos\rodrigo\proj_fina
l\pwmteste2\teste2.h"
#int_EXT fast // desabilita timer2
void EXT_isr()
{
  //desabilita timer2
  setup_timer_2(T2_DISABLED,0,1);
  //Limpa a interrupção EXT1
  //clear_interrupt(INT_EXT1);
}
#int_EXT1 //habilita o timer2
void EXT1_isr()
{
    //habilita timer2 com freq de 10kz
    setup_timer_2(T2_DIV_BY_4,125,1);
   //para configurar o duty cicle com 10% do ciclo ativo,duty = 25
   //configura o duty cicle com 90% do ciclo ativo,duty = 225
  //duty em 50%
  set_pwm1_duty(62);
  //Habilita interrupção de desabilitaçao do timer2
 //enable_interrupts(INT_EXT);
}
```

```
void main()
{
  //configura CCP1 para modo PWM
  setup_ccp1(ccp_pwm);
  set_pwm1_duty(0);
  //Interrupção reconhecida na subida de LOW para HIGH
  ext_int_edge (L_TO_H);
  //Habilita inicialmente só a interrupção de habilitar o timer2 e a global
  //disable_interrupts(INT_EXT);
  enable_interrupts(INT_EXT1);
  enable_interrupts(GLOBAL);
while(true)
//for(;;);
  {
  //setup_timer_2(T2_DIV_BY_4,248,1);
  }
}
```