



ALEXANDRU BOTNARI

Licenciado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

**DIMENSIONAMENTO E IMPLEMENTAÇÃO
DE FONTES DE TENSÃO PARA LENTES
ELETROSTÁTICAS DE MONOCROMADOR
TROCOIDAL DE ELETRÕES**

MESTRADO EM ENGENHARIA ELETROTÉCNICA E DE COMPUTADORES

Universidade NOVA de Lisboa
setembro, 2022



DIMENSIONAMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE FONTES DE TENSÃO PARA LENTES ELETROSTÁTICAS DE MONOCROMADOR TROCOIDAL DE ELETRÕES

ALEXANDRU BOTNARI

Licenciado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Doutor João Carlos Palma Goes

Professor Catedrático, DEEC FCT-NOVA

Coorientador: Doutor Filipe Ferreira da Silva

Professor Auxiliar com Agregação, DF FCT-NOVA

Júri

Presidente: Doutora Anabela Monteiro Gonçalves Pronto

Professora Auxiliar, DEEC FCT-NOVA

Arguente: Doutor Pedro Miguel Ribeiro Pereira

Professor Auxiliar, DEEC FCT-NOVA

Vogal: Doutor João Carlos Palma Goes

Professor Catedrático, DEEC FCT-NOVA

Dimensionamento e implementação de fontes de tensão para lentes eletrostáticas de monocromador trocoidal de elétrons

Copyright © Alexandru Botnari, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Quero exprimir a minha maior gratidão ao meu co-orientador, Professor Doutor Filipe Ferreira da Silva, sem o qual a realização deste trabalho não teria sido possível. Agradeço imenso todo seu apoio, disponibilidade e confiança. As suas palavras de encorajo fizeram-me crescer como pessoa e incentivaram-me a fazer mais e melhor.

Ao meu orientador Professor Doutor João Palma Goes, estou muito grato pela sua orientação, disponibilidade e auxílio na resolução dos mais diversos problemas. O seu conhecimento foi indispensável para realização deste projeto.

A todos os envolvidos no grupo LCAM, o meu agradecimento profundo pela companhia e toda colaboração durante este tempo. Desde o início que fizeram-me sentir bem vindo e disponibilizaram-se sempre para me ajudar no que fosse necessário.

Um agradecimento muito especial ao Sr. Afonso Moutinho, mostrou-se sempre disponível para prestar o seu apoio e partilhar a sua vasta experiência. Os seus conhecimentos culminaram o meu gosto pela eletrónica.

Quero agradecer ao Rodrigo Rodrigues, que desde o início depositou uma enorme confiança em mim e que me ajudou imenso a chegar neste ponto. Estou muito grato por todo o apoio, bons momentos, pelos sábios ensinamentos e valiosos conselhos que me tornaram uma pessoa melhor.

Aos meus amigos e colegas Miguel Pacheco, Filipe Velasques e Tiago Rodrigues, que me acompanharam nesta jornada durante os últimos cinco anos, obrigado por todo o apoio, confiança, incentivo e por todos os bons momentos vivenciados juntos. Vocês proporcionaram-me as melhores experiências da minha vida.

Por fim, quero agradecer à minha família e amigos por todo o apoio e motivação que me prestaram e por acreditarem sempre em mim, principalmente nos momentos mais difíceis e de maior dúvida.

*«Life is not about waiting for the storm to pass. It's
about learning to dance in the rain.» (Vivian
Greene)*

Resumo

Este trabalho está assente na melhoria de um equipamento experimental existente no departamento de Física, no grupo de física atômica e molecular, liderado pelo professor Filipe Ferreira da Silva, pertencente ao Centro de Física e Investigação Tecnológica (CEFITEC) desta faculdade.

O propósito do equipamento no qual vai ser alvo de reformulações no âmbito deste trabalho, tem como finalidade o estudo de interações entre elétrons de baixa energia (LEE) e alvos moleculares no estado gasoso. Sendo um equipamento composto por diversas partes sendo algumas delas com tecnologia proveniente da década de 60, é o intuito deste trabalho proceder à sua renovação e reestruturação, sendo esta enquadrada com o conteúdo aplicável a uma tese de mestrado em engenharia eletrotécnica e de computadores.

Através da aplicação de tecnologia mais recente, adicionando funcionalidades e aumentando a eficiência do mesmo, será possível após a conclusão deste trabalho, o equipamento experimental proporcionar uma sensibilidade e valências adicionais, fundamentais para a produtividade de investigação científica nos dias correntes.

Particularizando, o equipamento é composto entre outros, por fontes de tensão independentes que alimentam um monocromador trocoidal de elétrons (TEM) para produção de um feixe de partículas elementares. É de interesse primordial que as estabilidades dos potenciais aplicados sejam garantidas, assim como o isolamento galvânico entre as diversas fontes de alimentação seja maximizado e o ruído eletromagnético minimizado.

No âmbito deste trabalho a substituição das placas existentes produzidas manualmente por novos circuitos otimizados projetados considerando a utilização de componentes com tecnologia de montagem superficial (SMD) e fabricados em placas de circuito impresso (PCB), irão permitir atingir uma estabilidade, sensibilidade e resolução em energia do sistema experimental superiores aos anteriores.

Palavras-chave: Fontes de alimentação, Monocromador Trocoidal de Elétrons, Estabilidade, Ruído eletromagnético, Placas de circuito impresso, SMD

Abstract

This work is based on the improvement of an existing experimental setup located in the physics department, belonging to the atomic and molecular physics group, led by Professor Filipe Ferreira da Silva, part of the Physics and Technological Research Centre (CEFITEC) of this faculty.

The purpose of the equipment in which it will be redesign in the scope of this work is the study of interactions between low energy electrons (LEE) and molecular targets in the gaseous phase. Being an equipment composed of several parts, some of them with technology from the 60's, it is the commitment of this work to proceed with its redesign, which is enclosed with the content applicable to a master's thesis in electrical and computer engineering.

Using the latest technology in existence, adding functionalities, and increasing its efficiency, it will be possible after the conclusion of this work, for the experimental equipment to provide additional sensitivity and valences, fundamental for the productivity of scientific research nowadays.

Particularly, the equipment is comprised, among others, by independent voltage power supplies that feed a trochoidal electron monochromator (TEM) to produce an electron beam. It is of primary interest that the stabilities of the applied potentials are guaranteed, as well as the galvanic insulation between the several power supplies is maximized and the electromagnetic noise minimized.

In the scope of this work, the replacement of the existing boards produced manually by new optimized circuits designed considering new surface mount components (SMD) and manufactured in printed circuit boards (PCB), will allow additional stability, sensitivity, and energy resolution of the experimental system to be greater than the previous ones.

Keywords: Power supply, Trochoidal Electron Monochromator (TEM), Stability, Electromagnetic noise, SMD, PCB

Índice

Índice de Figuras	xv
Índice de Tabelas	xxi
Siglas	xxv
1 Contextualização	1
2 Estado da Arte	3
2.1 Fontes de Alimentação	3
2.2 Fontes Lineares	4
2.2.1 Transformadores	4
2.2.2 Retificadores	6
2.2.3 Filtros Passivos	15
2.2.4 Reguladores de Tensão	17
2.3 Fontes Comutadas	22
2.3.1 Modo de Operação	22
2.3.2 Conversor " <i>Buck</i> "	23
2.3.3 Conversor " <i>Boost</i> "	25
2.3.4 Arquitetura típica de uma SMPS	27
3 Descrição Elétrica do Equipamento	29
3.1 Sistema de Alimentação do Monocromador	30
3.1.1 Bloco de Alimentação	37
3.1.2 Potenciômetro	38
3.1.3 Bloco de Regulação e Controlo	42
3.1.4 Inversor de Polaridade e Voltímetro	44
4 Desenvolvimento Prático	47
4.1 Dimensionamento	47

4.1.1	Fonte de 10 V	48
4.1.2	Fonte de 2 V	51
4.1.3	Fonte de 150 V	52
4.1.4	Circuito de Isolamento	55
4.2	Desenho das PCBs e Prototipagem	57
4.3	Montagem e Testes	59
4.3.1	Medições fontes de 2V e 10 V	61
4.3.2	Medições fonte de 150 V	62
4.4	Análise de Resultados	63
5	Conclusões e Trabalho Futuro	65
5.1	Trabalho Futuro	66
	Bibliografia	67
	Apêndices	
A	Appendix 1	71

Índice de Figuras

2.1	Representação em diagrama de blocos do funcionamento de uma fonte de tensão linear.	4
2.2	Esquema representativo de um transformador, adaptado de [10]	5
2.3	Esquema genérico de um retificador.	7
2.4	Estrutura de retificador de meia onda monofásico e de sentido único, adaptado de [17].	8
2.5	Gráfico de onda dos sinais de um retificador de meia onda monofásico e de sentido único. O sinal azul representa a tensão do secundário (v_S) e o sinal vermelho representa a corrente na carga (i_L).	9
2.6	Estrutura de retificador de onda completa monofásico e sentido único, adaptado de [17].	10
2.7	Gráfico de onda dos sinais de um retificador de onda completa monofásico e de sentido único. Os sinais azul e amarelo representam as tensões do secundário e o sinal vermelho representa a corrente na carga (i_L).	11
2.8	Estrutura de retificador de onda completa com ponte de díodos, monofásico e duplo sentido, adaptado de [17].	12
2.9	Gráfico de onda de um retificador de onda completa em ponte de díodos monofásico e de duplo sentido.	12
2.10	Estrutura de retificador de onda completa com dupla tensão, com positivo e negativo em relação à massa, utilizando um transformador com tomada central, adaptado de [17].	13
2.11	Gráficos de onda das tensões à saída do retificador de onda completa com dupla tensão. Sinal vermelho representa a tensão aplicada à carga L e sinal azul representa a tensão na carga L1.	13
2.12	Estrutura de retificador de onda completa com dupla tensão, com positivo e negativo em relação à massa, utilizando uma ponte de díodos adicional. . .	14
2.13	Circuito retificador de onda completa com filtro capacitivo, adaptado de [17].	15
2.14	Gráficos de onda das tensões à saída do retificador de onda completa sem filtro (V1) e com filtro capacitivo (V2).	15

2.15	Filtro com configuração em " π " ou filtro C-L-C.	16
2.16	Esquema representativo de um simples regulador de tensão utilizando um diodo de <i>Zener</i> , adaptado de [22].	18
2.17	Esquema representativo de um regulador de tensão linear em série, adaptado de [22].	18
2.18	Esquema representativo de um regulador de tensão linear em paralelo, adaptado de [22].	19
2.19	Aplicação típica de um regulador da série LM78LXX, retirado de [25].	21
2.20	Aplicação simplificada do regulador de tensão variável LM317L, retirado de [28].	21
2.21	Circuito básico de um conversor do tipo " <i>buck</i> ", adaptado de [31].	23
2.22	Formas de onda da tensão no diodo e da corrente na bobine durante os ciclos do interruptor, num conversor do tipo " <i>buck</i> ", adaptado de [31].	24
2.23	Circuito básico de um conversor do tipo " <i>boost</i> ", adaptado de [31].	25
2.24	Formas de onda da tensão no interruptor e a corrente na bobine num conversor do tipo " <i>boost</i> " em modo descontínuo, adaptado de [31].	26
2.25	Formas de onda da tensão no interruptor e a corrente na bobine num conversor do tipo " <i>boost</i> " em modo contínuo, adaptado de [31].	27
2.26	Diagrama funcional de uma típica fonte comutada.	27
3.1	Esquemático do monocromador trocoidal de elétrons com indicação da localização de todas as lentes eletrostáticas do sistema. FP representa a gaiola de Faraday do TEM, adaptado de [34].	29
3.2	Esquema elétrico completo da alimentação das lentes eletrostáticas do TEM.	30
3.3	Fotografia dos painéis frontais dos chassis 1 (em cima) e 2 (em baixo) e da placa de aquisição de dados da <i>National Instruments</i> PCIe-6321 por baixo dos chassis, montados na <i>rack</i> metálica e com as alimentações ligadas,	31
3.4	Fotografia do interior do chassis 1, visto de cima, com a tampa aberta e placas montadas e respetivos transformadores.	32
3.5	Fotografia do interior do chassis 2, visto de cima, com a tampa aberta e placas montadas.	32
3.6	Fotografia da placa nº 4 do chassis 2, que contém as fontes U7 e U8 de 2 V e 10 V respetivamente. Lado esquerdo: plano frontal; lado direito: plano traseiro.	34
3.7	Fotografia da placa nº 2 do chassis 2, que contém duas fontes de 150 V. Lado esquerdo: plano frontal; lado direito: plano traseiro.	34
3.8	Fotografia da placa nº 1 do chassis 2, que contém a fonte de corrente que define a corrente no filamento. A tensão que alimenta este circuito é fornecida por um transformador de potência localizado na parte inferior do chassis. Lado esquerdo: plano frontal, lado direito: plano traseiro.	35

3.9	Fotografia da placa nº 8 do chassis 2, que contém as fontes que alimentam um conjunto de voltímetros. Lado esquerdo: plano frontal, lado direito: plano traseiro.	35
3.10	Conectores DIN 41417, 31 pinos, ficha (lado esquerdo) e tomada (lado direito), que permitem a troca de sinais entre o circuito de cada placa e o exterior.	36
3.11	Diagrama de blocos do circuito de uma fonte de tensão genérica do TEM representando a conexão ao potenciômetro digital (MAX5451) e ao respetivo voltímetro, adaptado de [35].	37
3.12	Esquemático do bloco de alimentação principal de uma fonte de 2 V/10 V que fornece tensões iguais a 15 V e -15 V, com a representação do fusível, transformador, retificador, condensadores e reguladores.	38
3.13	Esquemático do bloco de alimentação principal de uma fonte de 150 V que fornece tensões iguais a 15 V e -15 V, com a representação do retificador, condensadores e regulador de <i>Zener</i>	38
3.14	Esquema elétrico do regulador LM723 alimentado a 15 V e configurado para fornecer 10 V fixos.	39
3.15	Esquema equivalente de um potenciômetro analógico, na forma de um divisor de tensão. H, L e W são os três pinos do potenciômetro. R_t representa a resistência total do potenciômetro ($R_1 + R_2$). a é um parâmetro entre 0 e 1, cujo valor depende da posição do eixo do potenciômetro.	39
3.16	Esquema elétrico de um potenciômetro analógico P1, anteriormente implementado no aparelho.	40
3.17	Fotografias da placa de um potenciômetro digital, retirado de [35].	41
3.18	Esquema elétrico simplificado do potenciômetro digital implementado. O componente MAX541 encontra-se ligado a um circuito somador, constituído pelo AmpOp TLV2370. Este está dimensionado para somar as duas saídas dos potenciômetros do MAX5451, produzindo uma tensão máxima de 10 V no Output. O AmpOp é alimentado pela tensão de 10 V produzida pela fonte de alimentação. A e B são as saídas do rotary encoder, retirado de [35].	41
3.19	Esquema elétrico simplificado do regulador de tensão do potenciômetro utilizado numa fonte de 10 V.	43
3.20	Esquema elétrico completo do circuito do regulador de tensão do potenciômetro utilizado numa fonte de 10 V, com utilização de um AmpOp LM741.	44
3.21	Esquema elétrico completo do circuito do regulador de tensão do potenciômetro utilizado numa fonte de 2 V, com utilização de um AmpOp LM741.	45
3.22	Esquema elétrico completo do circuito do regulador de tensão do potenciômetro utilizado numa fonte de 150 V, com utilização de um AmpOp LM741.	45

3.23	Representação simbólica do interruptor e das ligações entre os respetivos pinos, retirado de [35].	46
3.24	Esquemático de duas fontes de alimentação de voltímetros que fornecem tensões iguais a 9 V, com a representação dos retificadores, condensadores e reguladores de Zener.	46
4.1	Aplicação típica do regulador linear integrado LT3042, com resistência R_{SET} que ajusta a tensão de saída e R_{IOUT} que define o limite de corrente à saída, adaptado de [37].	49
4.2	Esquema elétrico do novo bloco de alimentação, com transformador, ponte de díodos, condensadores eletrolíticos e de cerâmica e reguladores de tensão, desenhado com o <i>software</i> EasyEDA.	50
4.3	Esquema elétrico do novo bloco de controlo, com representação do regulador LT3042 e das respetivas ligações elétricas, desenhado com o <i>software</i> EasyEDA.	51
4.4	Simulação elétrica realizada no <i>software</i> LTspice XVII do novo circuito proposto para a fonte de 10 V quando a tensão do potenciómetro se encontra a 5 V. V_{out} - tensão à saída do LT3042 e da fonte, V_{pot} - tensão do potenciómetro, V_{in} - tensão de entrada do LT3042.	51
4.5	Esquemático elétrico do divisor de tensão mais seguidor de tensão implementado entre o pino de entrada do conector da placa que contém a tensão do potenciómetro e o pino SET do LT3042. V_{pot} - tensão do potenciómetro; V_{set} - tensão de entrada do pino SET do LT3042, desenhado no <i>software</i> EasyEDA.	52
4.6	Simulação elétrica realizada no <i>software</i> LTspice XVII do novo circuito proposto para a fonte de 2 V. Quando a tensão do potenciómetro se encontra a 10 V a tensão do pino SET do LT3042 encontra-se a uma tensão de 2 V. V_{out} - tensão à saída do LT3042 e da fonte, V_{in} - tensão de entrada do LT3042, V_{pot} - tensão do potenciómetro, V_{set} - tensão do pino SET do LT3042.	53
4.7	Simulação elétrica realizada no <i>software</i> LTspice XVII do circuito do bloco de controlo da fonte de 150 V quando o potenciómetro indica a tensão mínima (88 mV). V_o - tensão de saída da fonte, V_{+} - tensão na entrada positiva do LM741, V_{pot} - tensão do potenciómetro, V_{R6} - tensão na resistência R6 e no coletor do transistor Q1, $V_{R6,Q3}$ - Queda de tensão na resistência R6, I_{R6} - Corrente na resistência R6, I_{CQ3} - Corrente no coletor de Q3, I_{CQ2} - Corrente no coletor de Q2.	54
4.8	Esquemático do novo bloco de controlo para a fonte de 150 V, desenhado utilizando o <i>software</i> EasyEDA.	54
4.9	Esquemático do novo bloco de alimentação para a fonte de 150 V, desenhado utilizando o <i>software</i> EasyEDA.	55
4.10	Esquemático do circuito de isolamento que incorpora o fotoacoplador IL300, implementado no circuito das fontes para isolar o sinal de saída das mesmas, adaptado de [39].	56

4.11	<i>Footprint</i> do conector 101E10119X CONEC desenhado utilizando o <i>software</i> EasyEDA, com indicação dos valores essenciais para o seu dimensionamento, retirados da ficha técnica do componente [40].	58
4.12	Visualização tridimensional da placa que contém as fontes de 2 V e 10 V, com representação dos respetivos componentes, pistas e planos de massa, no <i>software</i> EasyEDA. Lado esquerdo: plano frontal; Lado direito: plano traseiro.	60
4.13	Visualização tridimensional da placa que contém as fontes de 150 V, com representação dos respetivos componentes, pistas e planos de massa, no <i>software</i> EasyEDA. Lado esquerdo: plano frontal; Lado direito: plano traseiro.	60
4.14	Fotografias de ambos os lados do protótipo da PCB com as fontes de 2V e 10 V.	61
4.15	Fotografias de ambos os lados do protótipo da PCB com as fontes de 150 V.	61
4.16	Fotografia da montagem experimental realizada para se obterem medições à fonte de 150 V. Com a representação dos multímetros, potenciómetro digital (canto inferior esquerdo), transformador MYRRA 44202 de 15 VAC e a fonte de tensão CC PLH250-P que fornece a tensão de alimentação de 150 VDC e indica o valor de corrente em tempo real consumida pelo protótipo.	62

Índice de Tabelas

3.1	Placas montadas no chassis 1, com indicação do nome de cada fonte a tensão máxima fornecida pela mesma e a lente correspondente que alimenta. . . .	33
3.2	Placas montadas no chassis 2, com indicação do nome de cada fonte a tensão máxima fornecida pela mesma e a lente correspondente que alimenta. . . .	33
4.1	Valores de tensão e corrente dos componentes de potência do bloco de controle da fonte de 150 V registados após as simulações para três valores de tensão do potenciômetro, e respectivas potências dissipadas calculadas.	53
4.2	Valores das resistências que constituem o divisor de entrada do circuito de isolamento, para cada fonte de alimentação.	57
4.3	Valores experimentais da fonte de 150 V medidos e calculados em função da tensão do potenciômetro	63
A.1	Descrição das funcionalidades de cada pino dos conectores das placas de 2 V / 10 V e 150 V, com indicação das entradas (IN) e saídas (OUT).	71
A.1	Descrição das funcionalidades de cada pino dos conectores das placas de 2 V / 10 V e 150 V, com indicação das entradas (IN) e saídas (OUT).	72

Siglas

AmpOp	Amplificador Operacional
BNC	<i>Bayonet Neill-Concelman</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CEFITEC	Centro de Física e Investigação Tecnológica
CMOS	<i>Complementary Type Metal-oxide Semiconductor</i>
DPDT	<i>Double Pole Double Throw</i>
DRC	<i>Design Rule Check</i>
EE	<i>Electron Energy</i>
EMF	<i>Eletromotive Force</i>
FF	Fator de Forma
FP	<i>Faraday Plate</i>
FR	Fator de <i>Ripple</i>
FUT	Fator de Utilização do Transformador
FWHM	<i>Full Width at Half Maximum</i>
IC	<i>Integrated Circuit</i>
IE	<i>Ion Energy</i>
IEM	Interferências Eletromagnéticas
LCAM	Laboratório de Colisões Atômicas e Moleculares
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
LDO	<i>Low Dropage Output)</i>
LED	<i>Light-emitting Diode</i>

LEE	<i>Low Energy Electrons</i>
NMOS	<i>N-type Metal-oxide Semiconductor</i>
OReToFMS	<i>Orthogonal reflectron time-of-flight mass spectrometer</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PMOS	<i>P-type Metal-oxide Semiconductor</i>
PSSR	<i>Power Supply Rejection Ratio</i>
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i>
RF	<i>Rádio Frequências</i>
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>
SMD	<i>Surface Mount Device</i>
SMPS	<i>Switched Mode Power Supply</i>
TEM	<i>Trochoidal Electron Monochromator</i>
TIA	<i>Transimpedance Amplifier</i>
VAC	<i>Voltage of Alternate Current</i>

Contextualização

Elétrons de baixa energia (LEEs) (< 100 eV) desempenham um papel fundamental em diversos fenómenos observados na natureza, bem como em variados processos industriais. Deste modo, nas últimas décadas assistiu-se a um interesse crescente na investigação científica dedicada à melhor compreensão dos mecanismos de interação eletrão-molécula nesta gama de energias, e suas aplicações em áreas tão diversas como nanotecnologia, saúde, astrofísica e química [2][3].

Tendo como objetivo estudar a interação de LEEs com moléculas isoladas em estado gasoso, o Laboratório de Colisões Atómicas e Moleculares (LCAM) pertencente ao centro de investigação CEFITEC da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, liderado pelo professor Filipe Ferreira da Silva, dispõe de um aparelho de feixes cruzados de eletrão-molécula. Este equipamento é constituído por um monocromador trocoidal de eletrões (TEM) acoplado a um espectrómetro de massa do tipo tempo de voo refletor ortogonal (OReToFMS). O TEM é um canhão de eletrões que gera um feixe de eletrões de baixa energia, cruzado ortogonalmente com um feixe molecular de interesse, no estado gasoso. Os iões resultantes desta reação (aniões ou catiões) são extraídos por aplicação de um campo elétrico e são analisados por espetrometria de massa utilizando o OReToFMS [4].

No TEM, os eletrões são gerados por um filamento de tungsténio e guiados por um conjunto de lentes eletrostáticas, até à zona de dispersão. Nesta zona, por ação de um campo magnético origem externo e de um campo elétrico cruzados ortogonalmente, os eletrões adquirem um movimento trocoidal com sentido igual à força resultante entre as duas componentes (força de Lorentz)[5], [6]. De seguida, os eletrões são focalizados por mais um conjunto de lentes eletrostáticas criando um feixe de eletrões que vai interagir com o feixe molecular na zona de colisão. A resolução em energia do feixe é definida pela largura a meia altura (*Full Width at Half Maximum (FWHM)*), e depende essencialmente da intensidade dos campos aplicados dos potenciais aplicados em cada lente.

Encontram-se implementadas atualmente vinte fontes de alimentação independentes, cada uma responsável pela alimentação de uma lente individual do monocromador. A tensão de saída de cada fonte é ajustada por um potenciómetro digital que faz o controlo

de forma discreta e como uma precisão de 20 mV por incremento de energia.

Estas fontes de alimentação, originalmente controladas por potenciômetros analógicos, foram desenvolvidas nos anos 60 do século passado e utilizadas pela primeira vez numa montagem experimental na Universidade de Innsbruck, Áustria.

Com o objetivo de melhorar a precisão da tensão aplicada às lentes, os potenciômetros analógicos foram, no âmbito de uma dissertação de mestrado em Física, substituídos por potenciômetros digitais.

Dado a idade das fontes de tensão, o nível de desgaste que estas apresentam, os possíveis ruídos que induzem no sistema e os avanços tecnológicos até aos dias de hoje, pretende-se com esta dissertação a substituição das mesmas e a implementação de novas fontes de alimentação em placas de circuito impresso (PCB). Tendo como objetivo, e em conjunto com os potenciômetros digitais já implementados, modernizar o sistema, diminuir o ruído elétrico nos circuitos, aumentar a precisão da tensão aplicada aos terminais das lentes eletrostáticas e consequentemente melhorar a resolução do monocromador e obter melhores resultados experimentais.

Estado da Arte

Reconhecida a necessidade de alimentar as lentes eletrostáticas com diferentes níveis de tensão, é de enorme importância e, no contexto desta dissertação, conhecer os diferentes tipos de fontes de alimentação existentes, entender como estas são constituídas e saber avaliar as vantagens e desvantagens das várias montagens elétricas possíveis para os seus componentes.

2.1 Fontes de Alimentação

A fonte de alimentação assume um papel único num dado dispositivo. Providencia energia de forma consistente e repetitiva aos seus circuitos. Para além disso, esta deve oferecer proteção ao sistema contra falhas de energia externas ou criadas pela própria fonte [7].

Uma fonte de alimentação consiste em um circuito que a partir da tensão elétrica disponível (alternada ou contínua) fornece tensão contínua (ou alternada) na forma requerida pelo circuito alimentado. O tipo mais comum de fonte de alimentação é a que converte a tensão alternada da rede de energia (230 V na Europa @ 50 Hz) em baixas tensões contínuas.

No entanto, existem também fontes especiais que convertem uma tensão contínua mais baixa para uma tensão contínua mais elevada para alimentar um circuito. Tais fontes são denominadas por conversores CC/CC (tensões de corrente contínua para tensões de corrente contínua), enquanto existem ainda os conversores CC/CA ou inversores que convertem as tensões de correntes contínuas em alternadas.

As fontes de alimentação podem operar, basicamente, segundo duas tecnologias. Podem ser lineares, que são as mais comuns ou, em alternativa, podem ser comutadas mais conhecidas por "*Switched-Mode Power Supplies*" ou SMPS [8].

As SMPS são mais complexas de se construir do que as fontes lineares, mas têm como vantagens serem tipicamente mais compactas e mais leves, podendo funcionar a potências elevadas e se forem dimensionadas corretamente podem ter uma eficiência acima dos 80 %. No entanto, para além da complexidade dos seus circuitos, as fontes comutadas são mais ruidosas a nível sonoro e trabalham com frequências elevadas (na ordem dos

kHz), pelo que, encontram-se sujeitas a interferências causadas pelas radiofrequências (RF). Este ruído pode interferir com outros circuitos, mesmo que a fonte esteja bem dimensionada e protegida [7], [9].

As fontes lineares são as mais comuns na maioria das aplicações e apresentam um funcionamento simples e de fácil compreensão.

2.2 Fontes Lineares

No diagrama de blocos da Figura 2.1 é possível observar a estrutura básica de uma fonte linear. A principal finalidade desta fonte é reduzir a tensão em modo de corrente alternada (CA) e mudá-la para uma tensão em modo de corrente contínua (CC) estabilizada. Para o efeito, recorre-se a um transformador para reduzir a tensão para o valor desejado, de seguida utiliza-se um retificador para eliminar a componente negativa (ou positiva) do sinal e um filtro capacitivo, que tem a função de aplanar os semiciclos positivos (ou negativos), atenuando a flutuação da tensão "ripple" e criando assim um sinal mais estável. É também importante a implementação de um regulador de tensão para estabilizar o sinal na tensão desejada e eliminar por completo o efeito de "ripple".



Figura 2.1: Representação em diagrama de blocos do funcionamento de uma fonte de tensão linear.

2.2.1 Transformadores

Normalmente, o primeiro bloco de todas as fontes lineares é o transformador. Este é responsável por transformar uma tensão em CA para um valor que possa ser utilizado nos circuitos seguintes. Além disso, também é responsável por isolar galvanicamente o sistema da rede, protegendo os circuitos contra eventuais curto-circuitos ou outras falhas externas.

Os transformadores podem ser elevadores ou redutores de tensão, e ter um secundário com enrolamento simples ou duplo. Os transformadores utilizados nas fontes lineares são redutores de tensão, e operam a uma frequência baixa igual à rede elétrica, pelo que, o ruído causado pelas radiofrequências é praticamente nulo. Estes são maiores e mais pesados do que os utilizados pelas fontes comutadas e, durante a conversão de tensão, grande parte da energia é dissipada em forma de calor, o que conseqüentemente torna estas fontes pouco eficientes [9].

2.2.1.1 Funcionamento de um Transformador

A estrutura básica de um transformador consiste em dois enrolamentos de fios condutores e que se encontram enrolados à volta de um núcleo de ferro. Estes enrolamentos formam o primário e o secundário e não se encontram eletricamente conectados um ao outro (Figura 2.2). Quando uma tensão alternada (u_1) é aplicada ao enrolamento do primário, a corrente (i_1) que flui neste, induz um campo magnético no núcleo de ferro. A intensidade deste campo varia consoante a intensidade de i_1 e o número de espiras no primário (N_1). O campo magnético cria um fluxo magnético (ϕ) variante no tempo que percorre o núcleo de ferro. Este ao passar pelo enrolamento do secundário, induz uma corrente (i_2) e tensão (u_2) alternadas com frequências iguais às do sinal aplicado à entrada. Os valores de i_2 e u_2 dependem essencialmente do número de espiras do secundário (N_2) e da intensidade do fluxo magnético.

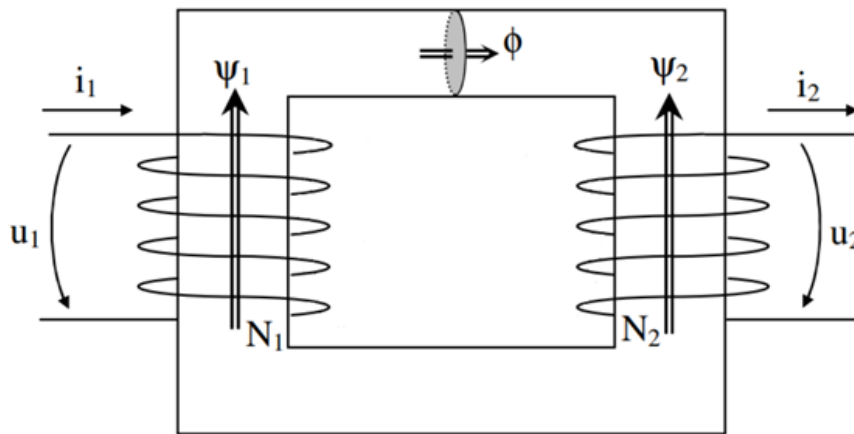


Figura 2.2: Esquema representativo de um transformador, adaptado de [10]

Considerando um transformador ideal, desprezando as resistências dos condutores do primário e secundário, a ligação magnética e a relutância magnética do núcleo [10], temos que:

$$u_1 = N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (2.1)$$

$$u_2 = N_2 \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (2.2)$$

Tomando as equações anteriores, pode-se dividir uma pela outra:

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt}}{N_2 \cdot \frac{d\phi}{dt}} \quad (2.3)$$

Vem então que:

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.4)$$

Da mesma forma, as correntes i_1 e i_2 também dependem da relação entre o número de espiras do primário e secundário, mas de modo inverso, assim:

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (2.5)$$

Num transformador ideal, não existem perdas, uma vez que toda a potência da entrada é igual à potência da saída.

Tal como foi visto, a quantidade de energia que é transferida ao secundário do transformador, está diretamente relacionada ao fluxo do campo magnético criado no seu núcleo. Portanto, quanto maior for a potência do transformador, maior deverá ser o seu núcleo. O que torna estes transformadores pouco práticos para potências elevadas, devido à sua dimensão e peso.

2.2.2 Retificadores

Os díodos são a unidade básica dos retificadores e são utilizados na maioria das fontes de alimentação.

Existem também montagens que utilizam tirístores como objeto de retificação, por exemplo em aplicações onde são necessárias correntes elevadas e tensões baixas [11]. É possível também combinar o melhor das duas tecnologias, fazendo montagens híbridas utilizando pontes retificadoras de díodos e tirístores para realizar uma retificação eficiente da corrente alternada de motores trifásicos [12]. Contudo, neste capítulo irão apenas ser estudados os retificadores utilizados em montagens monofásicas.

Os díodos podem também ser substituídos por transístores NMOS e PMOS, permitindo assim uma montagem retificadora utilizando a tecnologia integrada CMOS. Uma ponte retificadora de díodos distorce a tensão, pelo que na saída do retificador, a tensão é reduzida significativamente. O retificador implementado em tecnologia CMOS reduz substancialmente a queda de tensão com melhorias de até 69,65% em comparação com a tradicional ponte de díodos [13]. No entanto, esta tecnologia é utilizada em aplicações como implantes biomédicos ou em sistemas de identificação por radiofrequências (RFID), onde as frequências de trabalho dos sinais são na escala das RF e com tensões baixas (< 5V) [14].

Nas fontes de alimentação comuns faz-se geralmente uso de um dos tipos de retificação seguintes:

- Meia-onda (Figura 2.4);
- Onda-completa (Figura 2.6);
- Em ponte (Figura 2.8);
- Dupla tensão, com positivo e negativo em relação à massa (Figuras 2.10 e 2.12).

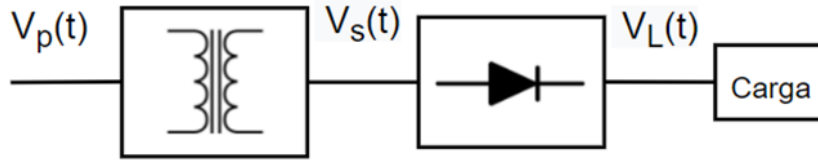


Figura 2.3: Esquema genérico de um retificador.

Por forma a podermos analisar as diferentes estruturas existentes, serão considerados díodos ideais, com tempos de resposta nulos e resistência de condução nula e uma carga resistiva pura. Na Figura 2.3 encontra-se representado um esquema genérico de um retificador. À entrada do mesmo, encontra-se uma tensão CA proveniente do secundário do transformador (V_S) e na saída existe também uma tensão variante no tempo que vai atuar na carga (V_L).

Assume-se que todos os sinais à entrada dos retificadores têm forma sinusoidal com período $T = 20ms$ (correspondente a uma frequência $f = 50Hz$). Através da definição

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (2.6)$$

a expressão genérica para um sinal sinusoidal é:

$$v(t) = V \sin(\omega t) \quad (2.7)$$

A tensão contínua na carga é a média da tensão à saída do retificador ao longo do período T :

$$V_{CC} = \frac{1}{T} \int_0^T v_L(t) dt \quad (2.8)$$

De uma forma similar, a tensão eficaz na carga é dada por:

$$V_{CC} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_L^2(t) dt} \quad (2.9)$$

O rácio entre as duas últimas tensões chama-se Fator de Forma (FF) e é um parâmetro importante que define a eficiência do processo de retificação [15]:

$$FF = \frac{V_L}{V_{CC}} \quad (2.10)$$

Uma vez que foi assumido uma carga ideal, a corrente pode ser definida das seguintes formas:

$$i_L(t) = \frac{v_L(t)}{R_L} \quad (2.11)$$

$$i_{CC} = \frac{v_{CC}}{R_L} \quad (2.12)$$

$$i_L = \frac{v_L}{R_L} \quad (2.13)$$

Uma vez que se assumiu um diodo ideal e sem perdas, a eficiência de retificação (η) pode ser expressa como [15]:

$$\eta = \left(\frac{v_{CC}}{V_L} \right)^2 = \left(\frac{1}{FF} \right)^2 \quad (2.14)$$

Outro parâmetro importante que descreve a qualidade da retificação é o Fator de Ripple (FR). Este representa a suavidade do sinal à saída do retificador. Quanto mais baixo for este valor, melhor é a qualidade de retificação, pois o sinal apresenta menor variações de tensão. Dito isto, o FR é dado por [15]:

$$FR = \frac{\sqrt{V_L^2 - V_{CC}^2}}{V_{CC}} = \sqrt{FF^2 - 1} \quad (2.15)$$

Um parâmetro que relaciona a qualidade do retificador e as características do transformador é o Fator de Utilização do Transformador (FUT). Este é dado pelo rácio entre a potência CC na saída do retificador e a potência aparente (P_S) do transformador, sendo esta última dado pela média das potências aparentes do primário (P_{Sp}) e do secundário (P_{Ss}) do transformador [15], [16]. O FUT pode ser calculado da seguinte forma:

$$FUT = \frac{P_{CC}}{P_S} = \frac{P_{CC}}{\frac{P_{Sp} + P_{Ss}}{2}} \quad (2.16)$$

O Fator de Utilização do Transformador é uma indicação quantitativa da utilização da potência aparente do transformador. Quanto maior for o valor de FUT, menor é a P_S requerida ao transformador e vice-versa [16].

2.2.2.1 Retificador de Meia-onda

Esta topologia é a estrutura mais básica de um retificador, onde apenas um diodo é utilizado na saída de uma das extremidades do secundário do transformador, enquanto a outra é ligada à massa como se pode observar na Figura 2.4.

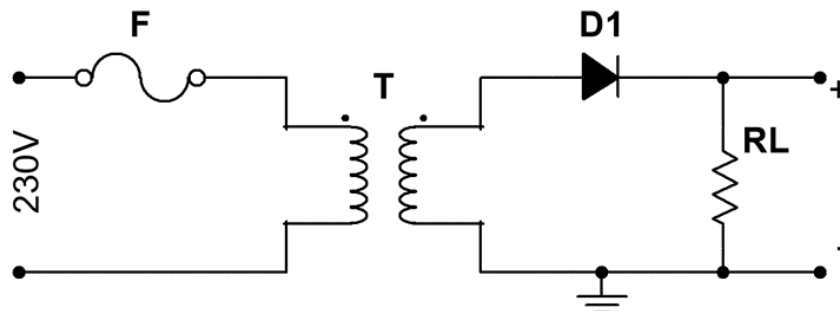


Figura 2.4: Estrutura de retificador de meia onda monofásico e de sentido único, adaptado de [17].

Na Figura 2.5 encontra-se representado graficamente o sinal à saída do secundário e a corrente na carga, sendo que a tensão na carga é proporcional à corrente na mesma.

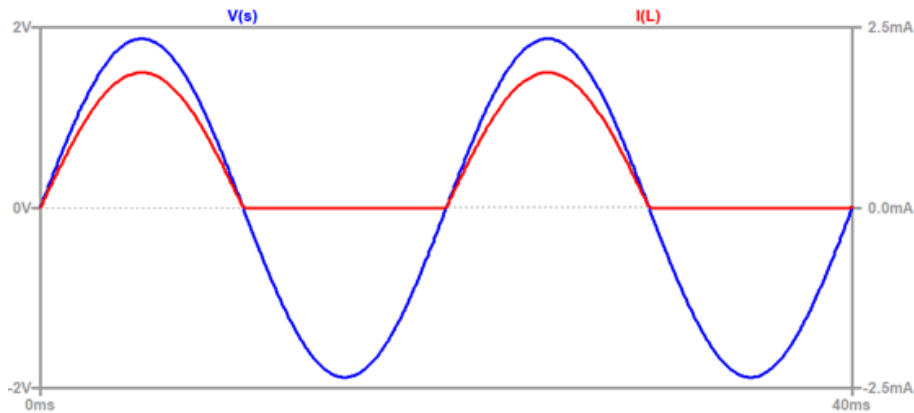


Figura 2.5: Gráfico de onda dos sinais de um retificador de meia onda monofásico e de sentido único. O sinal azul representa a tensão do secundário (v_S) e o sinal vermelho representa a corrente na carga (i_L).

Durante os semiciclos positivos do sinal, o diodo encontra-se polarizado diretamente e conduz corrente para a carga, a tensão aplicada nesta é igual à tensão no secundário v_S (considerando resistência direta do diodo nula). Durante os semiciclos negativos, o diodo é polarizado de forma inversa e não conduz corrente, sendo a tensão aplicada à carga igual a zero. Esta topologia é de sentido único uma vez que a corrente no secundário do transformador conduz sempre no mesmo sentido. Recorrendo às fórmulas definidas na secção anterior, obtêm-se os seguintes resultados[15]:

$$V_{CC} = \frac{V_S}{\pi} \quad (2.17)$$

$$V_L = \frac{V_S}{2} \quad (2.18)$$

$$I_{CC} = \frac{V_S}{\pi \cdot R_L} \quad (2.19)$$

$$I_L = \frac{V_S}{2 \cdot R_L} \quad (2.20)$$

A corrente do secundário apenas flui quando o diodo se encontra a conduzir, pelo que esta é igual à corrente na carga.

Seguem-se então os restantes resultados:

$$FF = \frac{\pi}{2} \quad (2.21)$$

$$\eta = \frac{4}{\pi^2} = 0.405 \quad (2.22)$$

$$FR = 1.21 \quad (2.23)$$

Para além dos resultados anteriores, a pobre performance deste retificador é ainda confirmada pelo FUT que de acordo com [15], tem o valor de:

$$FUT = 0.323 \quad (2.24)$$

2.2.2.2 Retificador de Onda Completa

A retificação de onda completa faz uso de dois díodos, e um transformador com tomada central (duplo enrolamento no secundário), criando um trajeto de retorno para a corrente (Figura 2.6).

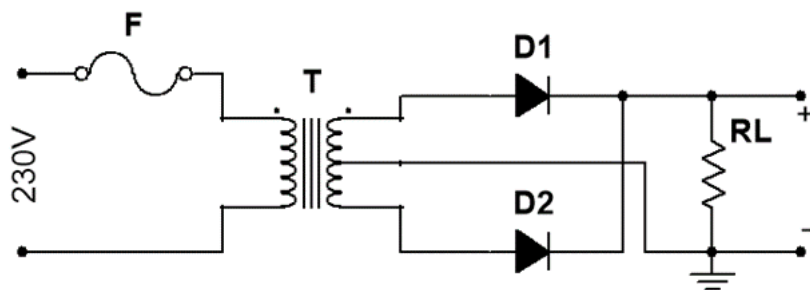


Figura 2.6: Estrutura de retificador de onda completa monofásico e sentido único, adaptado de [17].

O díodo D1 conduz durante o meio período positivo do sinal alternado, e o díodo D2 conduz durante o semiciclo negativo. A corrente flui do ponto comum dos díodos, passa pela carga e retorna ao ponto intermédio do secundário do transformador, pelo que, a corrente tem um sentido único nesta estrutura [15].

Como se pode observar na Figura 2.7, a retificação ocorre durante o período completo do sinal.

Utilizando as mesmas expressões da secção anterior, obtemos os seguintes resultados para este retificador de acordo com [15]:

$$V_{CC} = \frac{2 \cdot V_S}{\pi} \quad (2.25)$$

$$V_L = \frac{V_S}{\sqrt{2}} \quad (2.26)$$

$$I_{CC} = \frac{2 \cdot V_S}{\pi \cdot R_L} \quad (2.27)$$

$$I_L = \frac{V_S}{\sqrt{2} \cdot R_L} \quad (2.28)$$

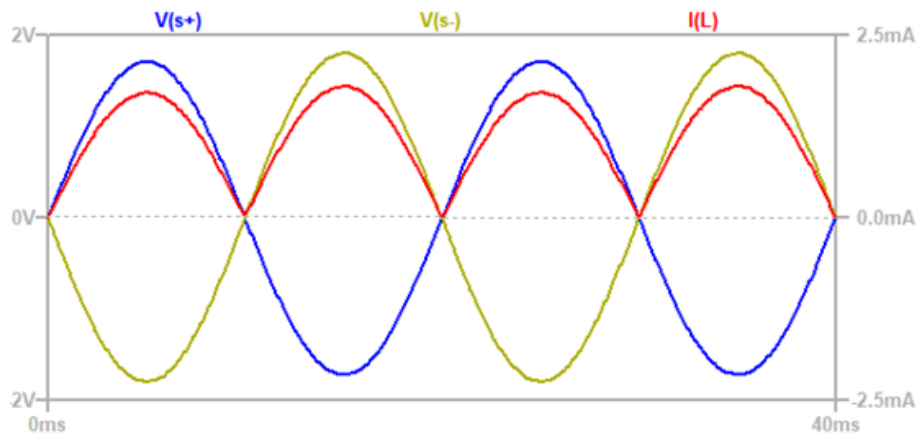


Figura 2.7: Gráfico de onda dos sinais de um retificador de onda completa monofásico e de sentido único. Os sinais azul e amarelo representam as tensões do secundário e o sinal vermelho representa a corrente na carga (i_L).

$$FF = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1.11 \quad (2.29)$$

$$\eta = 0.81 \quad (2.30)$$

$$FR = 0.483 \quad (2.31)$$

$$FUT = 0.671 \quad (2.32)$$

Como esta estrutura é de sentido único, a corrente em cada enrolamento no secundário flui de forma alternada, isto é, quando o sinal do primário se encontra no semiciclo positivo, a tensão é positiva no enrolamento superior e negativa no enrolamento inferior e vice-versa quando o sinal de entrada se encontra no semiciclo negativo. E, apesar do transformador ser mais bem aproveitado do que na topologia anterior, comparando com a estrutura ponte retificadora, continua a ter um FUT relativamente baixo, tal como veremos a seguir.

2.2.2.3 Ponte Retificadora de Díodos

A ponte de díodos constitui o retificador mais eficiente. Com a adição de apenas 2 díodos, são obtidas várias vantagens. É um retificador de onda completa, mas utiliza um transformador simples, com apenas um enrolamento no secundário, o que o torna mais leve e menos volumoso do que a estrutura anterior (Figura 2.8).

Nesta estrutura, um par de díodos conduz durante o meio-período positivo enquanto o outro par conduz no meio-período negativo do sinal. A corrente flui em ambos os sentidos no secundário, mas apenas num sentido na carga, pelo que, esta estrutura é de duplo sentido.

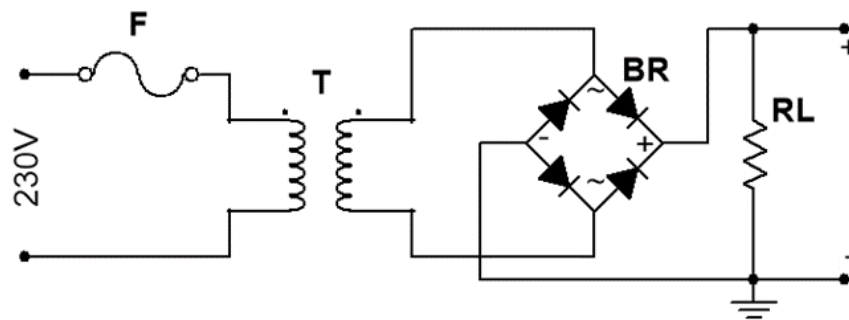


Figura 2.8: Estrutura de retificador de onda completa com ponte de díodos, monofásico e duplo sentido, adaptado de [17].

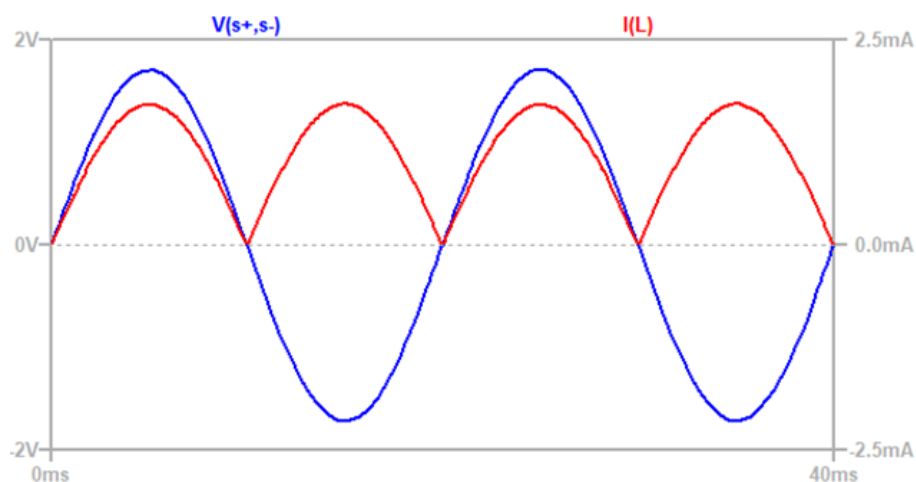


Figura 2.9: Gráfico de onda de um retificador de onda completa em ponte de díodos monofásico e de duplo sentido.

A queda de tensão da extremidade superior do secundário para a extremidade inferior pode ser descrita como uma onda sinusoidal centrada em zero tal como se encontra representado na Figura 2.9. Mas como o secundário não se encontra ligado à massa, a tensão em cada extremidade do secundário é sempre igual ou superior a zero em relação à massa, pelo que, os díodos conduzem sempre corrente positiva e a retificação ocorre durante todos os semiciclos do sinal.

Uma vez que se trata de uma topologia retificadora de onda completa, os resultados das equações (2.25)-(2.31) continuam a ser válidos, mas o Fator de Utilização do Transformador é diferente. Esta estrutura apresenta um melhor aproveitamento do transformador apresentando [15]:

$$FUT = 0.813 \quad (2.33)$$

Dados os resultados anteriores, concluímos que a ponte de díodos constitui o retificador mais eficiente. No entanto, as estruturas vistas até agora apenas são capazes de alimentar uma dada carga com uma só tensão positiva ou negativa, dependendo da forma

como o circuito é implementado.

2.2.2.4 Retificador de onda completa com dupla tensão

Caso se pretenda que a fonte de alimentação seja capaz de produzir duas tensões simétricas, pode-se adaptar o circuito anterior, acrescentando uma tomada central ao secundário do transformador e ligá-la à massa (Figura 2.10). Desta forma, existirão no secundário dois sinais sinusoidais desfasados de 180° , tal como acontece no retificador de onda completa com tomada central (Figura 2.6).

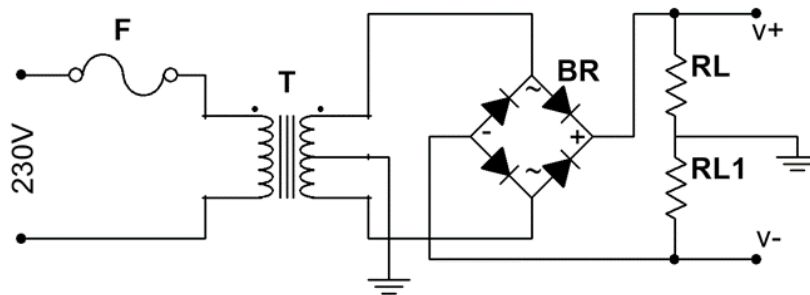


Figura 2.10: Estrutura de retificador de onda completa com dupla tensão, com positivo e negativo em relação à massa, utilizando um transformador com tomada central, adaptado de [17].

Nesta estrutura, um par de díodos conduz apenas corrente positiva enquanto o outro par conduz apenas corrente negativa. Assim, este retificador apresenta na saída dois sinais retificados e simétricos em relação à massa. Na Figura 2.11 é possível observar as formas de onda das tensões retificadas aplicadas a duas cargas distintas L e L1.

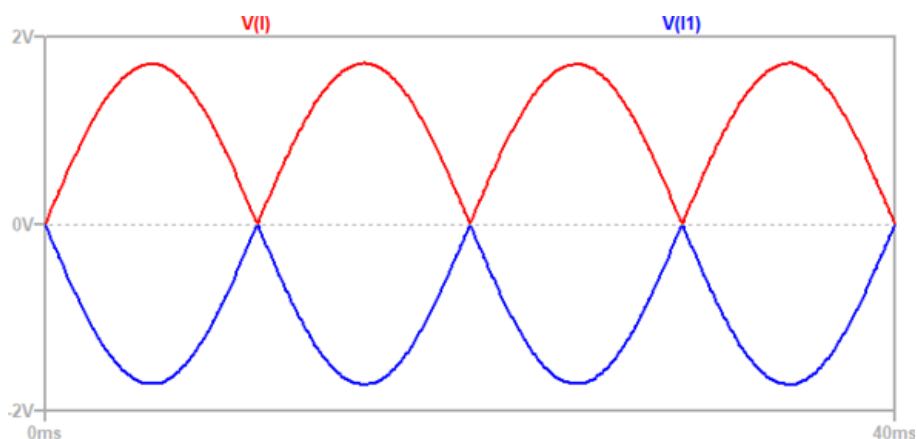


Figura 2.11: Gráficos de onda das tensões à saída do retificador de onda completa com dupla tensão. Sinal vermelho representa a tensão aplicada à carga L e sinal azul representa a tensão na carga L1.

No entanto, como esta montagem utiliza um transformador com enrolamento duplo no secundário, acaba por tornar o mesmo mais volumoso, pesado e também mais caro.

Desta forma, pode-se atingir o mesmo efeito que a estrutura anterior, adicionando à montagem da Figura 2.8 uma segunda ponte de díodos e trocando os terminais de alimentação da carga tal como demonstrado na Figura 2.12.

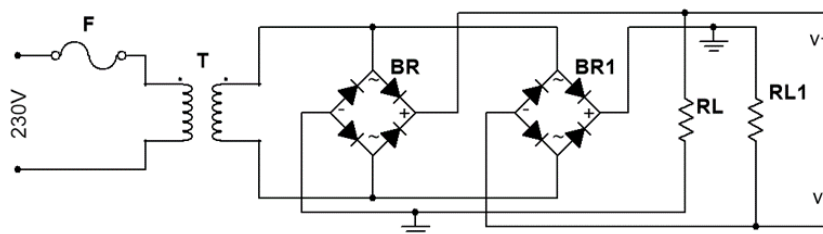


Figura 2.12: Estrutura de retificador de onda completa com dupla tensão, com positivo e negativo em relação à massa, utilizando uma ponte de díodos adicional.

2.2.2.5 Especificações dos Díodos

Os díodos retificadores de silício apresentam uma queda de tensão na ordem dos 0,7 V, quando conduzem.

No circuito de onda completa com tomada central, cada semiciclo passa apenas por um diodo pelo que a queda de tensão é de apenas 0,7 V. Todavia, no circuito em ponte, cada semiciclo passa por dois díodos, pelo que a queda de tensão será à volta de 1,4 V.

Em fontes de tensão elevada, essa queda de tensão não demonstra muita importância, mas em circuitos de baixas tensões esta já deve entrar em consideração no dimensionamento do circuito.

É comum, em certos casos, usarem-se díodos do tipo *Schottky*, que se caracterizam por apresentarem uma queda de tensão no sentido direto muito baixa, menos de 0,1 V [8], não interferindo assim no funcionamento do circuito.

Existem três especificações importantes a ter em conta na escolha dos díodos:

- Tensão de condução;
- Corrente direta;
- Tensão de rutura.

A tensão de condução, como nome indica, é a tensão que é necessário ser aplicada ao terminal ânodo do diodo para que este comece a conduzir corrente. Da mesma forma, a corrente direta representa o máximo de corrente que o diodo pode conduzir quando este é polarizado no sentido direto.

Quando é aplicada uma tensão negativa ou inferior à tensão de condução, o diodo comporta-se como um circuito aberto, no entanto, quando essa tensão atinge um certo valor, denominado de tensão de rutura, o diodo começa a conduzir no sentido inverso, podendo danificar o mesmo.

Estes parâmetros dependem do tipo de diodo e do fabricante e são indicados no *datasheet* do componente.

2.2.3 Filtros Passivos

A tensão obtida após o sistema retificador, resulta numa corrente contínua com pulsações e não em uma CC pura.

No entanto, para as aplicações práticas, é necessário aplicar à carga uma tensão que seja o mais estável possível e livre de quaisquer variações. Fazendo com que na carga circule uma corrente contínua pura.

A filtragem nas fontes de alimentação lineares pode ser realizada de diversas formas. O modo mais simples é o que faz uso de um condensador como se observa na Figura 2.13.

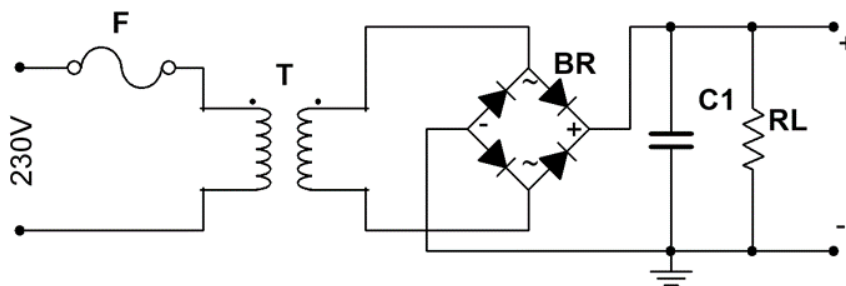


Figura 2.13: Circuito retificador de onda completa com filtro capacitivo, adaptado de [17].

Supondo que se usa um condensador de capacidade suficientemente elevada, quando os díodos conduzem, este carrega com a tensão de pico do secundário (V_m) (desprezando as quedas de tensão dos díodos). Quando o semiciclo começa a sua queda, o condensador começa a descarregar lentamente até o próximo semiciclo elevar de volta a tensão e carregar de novo o condensador.

Na Figura 2.14 encontram-se representados os sinais à saída de um retificador de onda completa, um com condensador e outro sem, onde é possível verificar o efeito do mesmo.

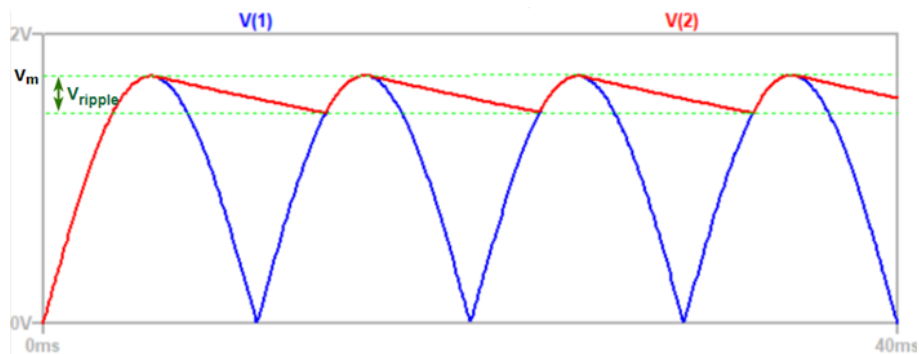


Figura 2.14: Gráficos de onda das tensões à saída do retificador de onda completa sem filtro (V1) e com filtro capacitivo (V2).

Observa-se que o circuito que utiliza filtro tem na sua saída um sinal mais estável e, por sua vez é mais parecido a um sinal de corrente contínua. No entanto, este ainda apresenta pequenas variações de tensão denominadas tensão de *ripple* (V_{ripple}). Como o objetivo é obter um sinal CC o mais puro possível e com o mínimo de variações, é necessário eliminar ou diminuir ao máximo esta tensão. A tensão de *ripple* é dada por:

$$V_{ripple} = \frac{V_m}{f \cdot C \cdot R_L} \quad (2.34)$$

Onde V_m representa o valor máximo de tensão do sinal.

Quanto maior for o condensador, mais lentamente este descarregará entre os semiciclos e menor será o *ripple*. No entanto, quanto maior for a corrente exigida pela carga, o contrário acontece. Pelo que, existe uma relação entre o valor do condensador, a tensão da fonte e a corrente na carga.

Os filtros de capacidades elevadas são bastante volumosos e podem dificultar a montagem e a estética dos aparelhos. Então, pode ser preferível, em vez de utilizar um só desses condensadores, usar dois condensadores cada um deles com metade da capacidade do valor total, ou três condensadores cada um com 1/3 da capacidade exigida e assim sucessivamente [17].

Podem, no entanto, ser utilizados circuitos de filtragem mais eficientes. Uma montagem conhecida é a configuração em " π " (Pi).

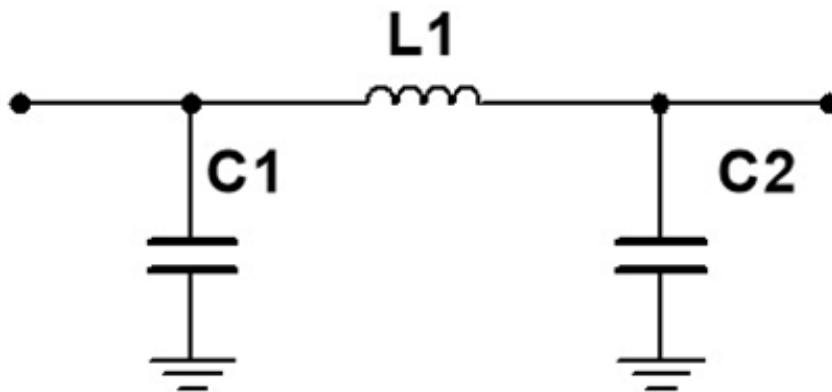


Figura 2.15: Filtro com configuração em " π " ou filtro C-L-C.

Nesta configuração, são utilizados dois condensadores (C1 e C2) e uma bobine (L1). Estes componentes são arranjados em forma da letra grega " π ", tal como se encontra representado na Figura 2.15, sendo esta a principal razão do seu nome. Este filtro permite uma atenuação mais elevada do *ripple*, contudo, oferece uma má regulação da tensão quando a corrente exigida pela carga é variável [18–20].

Algumas fontes de alimentação, utilizam um condensador de poliéster ou de cerâmica na ordem dos 10 – 100 nF, ligado em paralelo com um condensador eletrolítico ($\geq 1 \mu F$). Este conjunto funciona como uma bobine de baixa indutância, eliminando ou suprimindo

todas as frequências parasitárias muito altas que possam surgir no circuito, criando desta forma um filtro de RF sem afetar as características do circuito [8], [17].

2.2.4 Reguladores de Tensão

Utilizando um transformador, retificador e um filtro, já é possível obter uma tensão contínua que pode alimentar certas cargas. Porém, a tensão na carga irá variar conforme esta exija mais ou menos corrente.

Para se obter uma tensão constante sobre a carga, independente da corrente consumida por esta, é necessário também a implementação de um regulador de tensão.

Existem diversas configurações que podem ser utilizadas para regular a tensão. Algumas são bastante simples utilizando componentes básicos e outras mais sofisticadas, implementados em circuitos integrados complexos.

Estes baseiam-se em duas tecnologias diferentes: reguladores de tensão comutados e reguladores lineares. Os reguladores comutados são utilizados em aplicações onde a eficiência é mais importante enquanto os lineares têm maior aplicabilidade em circuitos onde é necessário baixo ruído e onde a baixa eficiência não tenha grande impacto no sistema. Além disso, estes reguladores são mais acessíveis, têm melhor custo-benefício e são mais fáceis de implementar [21].

A forma mais simples de se fazer um regulador é utilizando um diodo de *Zener*. A diferença entre este e o diodo convencional é o facto de o primeiro se encontrar preparado para conduzir corrente quando polarizado de forma inversa, isto é, quando a tensão ultrapassa um determinado valor negativo, denominado tensão de *Zener* (tensão de rutura no diodo convencional), este começa a conduzir mantendo o valor de tensão constante. Desta forma, conectando este tipo de diodo em paralelo com a carga, é possível limitar a tensão aplicada à mesma ao valor da tensão de *Zener*.

Na Figura 2.16 encontra-se representado um circuito de uma montagem reguladora utilizando esta configuração. A resistência R_S limita a corrente, para que esta não ultrapasse o valor máximo suportado pelo diodo. Quando a tensão de entrada V_{in} ultrapassa o valor da tensão de *Zener* V_Z , este começa a operar na zona de rutura e mantém uma tensão constante aos terminais da carga R_L . O diodo mantém a queda de tensão aos seus terminais constante mesmo existindo variações de corrente na carga ou variações de tensão na entrada [22].

Como os diodos de *Zener* são limitados a correntes baixas, este tipo de configuração nem sempre é a melhor solução [8]. No entanto, pode-se aproveitar as características elétricas deste componente para se elaborarem circuitos mais eficientes.

Os reguladores de tensão lineares baseiam-se essencialmente segundo dois tipos de configuração: em série e em paralelo.

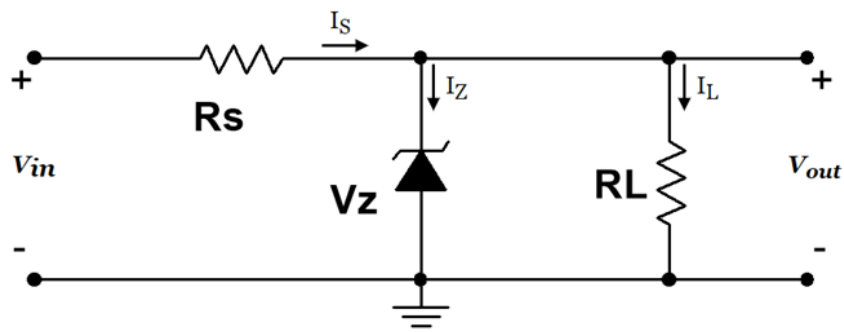


Figura 2.16: Esquema representativo de um simples regulador de tensão utilizando um diodo de *Zener*, adaptado de [22].

2.2.4.1 Regulador em Série

A configuração mais básica deste regulador utiliza um transistor NPN ligado em série com a carga e que funciona como uma resistência variável. Também fazem parte deste circuito uma resistência limitadora de corrente e um diodo de *Zener* que impõe uma tensão de referência à base do transistor. A Figura 2.17 mostra uma montagem deste circuito.

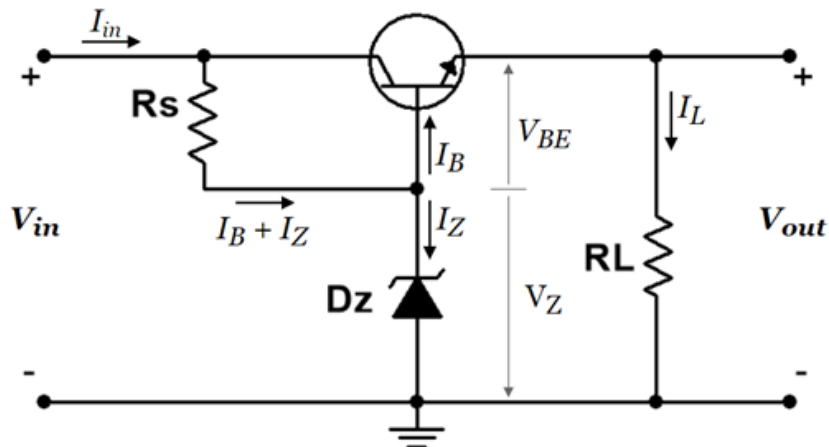


Figura 2.17: Esquema representativo de um regulador de tensão linear em série, adaptado de [22].

Sabendo que a tensão de *Zener* V_Z é constante, quaisquer variações provenientes da entrada ou da saída, vão provocar alterações na corrente da base do transistor (I_B), o que também vai afetar a tensão da base para o emissor (V_{BE}) e conseqüentemente, a tensão de saída V_{out} . Observando o circuito, a tensão na carga pode ser descrita como:

$$V_{out} = V_Z - V_{BE} \quad (2.35)$$

Quando a tensão de entrada V_{in} aumenta, a tensão na carga V_{out} também aumenta. Isto produz uma redução da tensão da base para o emissor do transistor. Conseqüentemente, esta diminuição no V_{BE} faz aumentar a resistência interna do transistor e diminuir

a condução de corrente no coletor, ou seja, a corrente requerida pela fonte diminui, logo a tensão de saída baixa e permanece constante. Este processo acontece de forma similar quando a tensão de entrada diminui [23].

No caso em que a carga altera a sua resistência, esta vai consumir mais ou menos corrente, ou seja, o valor de I_L altera e a tensão de saída também. A partir daqui o processo referido anteriormente atua de forma idêntica.

Assim, quando existem alterações no V_{BE} , o transistor altera o valor da sua resistência interna como forma de diminuir ou aumentar a corrente na entrada, então, a tensão V_{BE} volta ao valor normal e a tensão na saída permanece constante [22].

Neste regulador, o circuito de Zener (D_Z e R_S) apenas necessita fornecer a corrente para a base do transistor, e o máximo de corrente na carga (I_L) é o máximo de corrente que o emissor do transistor permite passar. Pelo que, este regulador é significativamente mais eficiente do que o regulador de Zener [24].

2.2.4.2 Regulador em Paralelo

Este regulador, utiliza os mesmos componentes que a montagem anterior, mas com a diferença de que o transistor neste circuito se encontra conectado em paralelo com a carga, tal como representado na Figura 2.18.

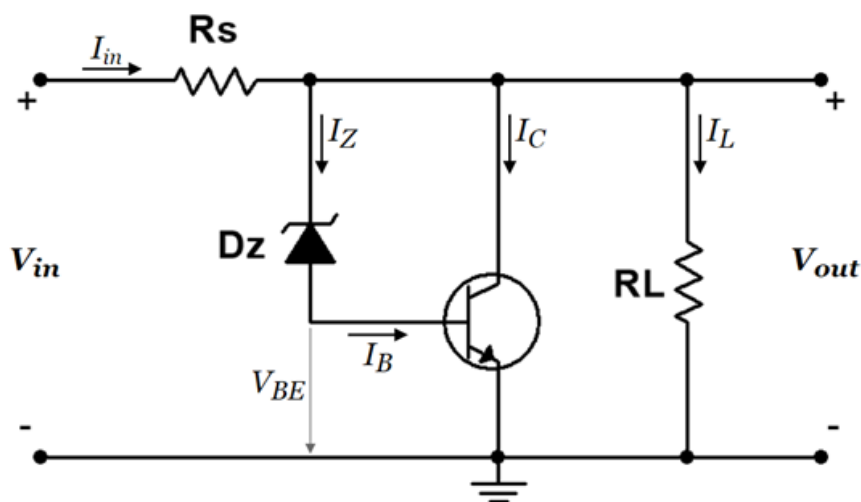


Figura 2.18: Esquema representativo de um regulador de tensão linear em paralelo, adaptado de [22].

Analisando o circuito acima, pode-se observar que a tensão na carga depende da queda de tensão no diodo e da queda de tensão da base para o emissor do transistor, pelo que:

$$V_{out} = V_Z + V_{BE} \quad (2.36)$$

Ou:

$$V_{out} = V_{in} - I_{in} \cdot R_S \quad (2.37)$$

A tensão de saída permanece aproximadamente sempre constante uma vez que os valores de V_Z e V_{BE} são também quase sempre constantes. Quando a tensão de entrada aumenta, as tensões V_{out} e V_{BE} também aumentam, tal como a corrente na base do transístor, o que por sua vez causa um aumento da corrente no coletor do transístor, uma vez que:

$$I_C = \beta I_B \quad (2.38)$$

Com o aumento da corrente I_C , a queda de tensão na resistência R_S também aumenta, fazendo diminuir a tensão de saída para o seu valor anterior. Este processo ocorre de forma inversa quando a tensão de entrada diminui.

Quando a resistência da carga diminui, a corrente nesta vai aumentar uma vez que ambas as correntes na base do transístor e no coletor irão diminuir. Então, a queda de tensão na resistência R_S permanece constante, bem como a tensão de saída V_{out} [23].

Este regulador é menos eficiente do que o regulador em série, uma vez que existe uma enorme dissipação de energia na resistência R_S , e também porque grande parte da corrente consumida flui pelo transístor e não pela carga.

2.2.4.3 Reguladores Lineares de Tensão Constante

Os reguladores lineares são conhecidos pela sua fraca eficiência. Isto deve-se ao facto de necessitarem uma tensão à entrada mais elevada do que a tensão regulada à saída, com quedas de pelo menos 2 V [21]. Em aplicações onde seja necessário a partir de tensão elevada, reduzir e estabilizar a mesma para um valor mais baixo, por exemplo de 15 V de uma fonte para 10 V estabilizados, utilizar um regulador linear pode ser útil.

Atualmente, maioritariamente dos reguladores de tensão são implementados em circuitos integrados (IC). Estes, para além de fazerem uma ótima regulação da tensão, também oferecem proteções térmicas e contra curto-circuitos, que fazem parte das características do componente [22].

A série LM78LXX são reguladores lineares monolíticos integrados que oferecem uma ampla variedade de tensões reguladas à saída que variam desde os 5 V e os 24 V, com tensões de entrada que podem chegar aos 40V e uma corrente de saída com um máximo de 100 mA. Estes reguladores oferecem uma ótima rejeição de *ripple* baixo ruído na saída [25]. Uma aplicação típica deste regulador encontra-se representado na Figura 2.19.

Caso se pretendam correntes mais elevadas, pode-se recorrer a um componente da série LM78XX ou 78XX, que disponibilizam correntes até 1 A [26, 27].

O número '78' destas séries de reguladores simboliza uma regulação de tensão positiva. Caso seja necessário regular uma tensão contrária, pode-se escolher um componente da mesma série, mas com o número '79'.

O termo 'XX', indica o valor de tensão a ser regularizada, por exemplo, o componente LM7805 representa um regulador de 5 V, enquanto o LM7815 regula uma tensão a 15 V.

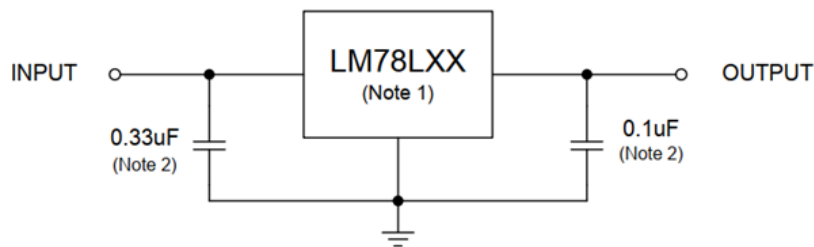


Figura 2.19: Aplicação típica de um regulador da série LM78LXX, retirado de [25].

2.2.4.4 Reguladores Lineares de Tensão variável

Os componentes descritos até agora, apresentam um valor de tensão fixo à saída, e sempre que se deseje alterar esse valor, é necessário usar um componente diferente. Para evitar esta alteração, existem reguladores capazes de fazer variar a tensão de saída para um valor à escolha do utilizador. Tais componentes são chamados de reguladores de tensão variável, em que, através de resistências externas, é possível controlar a tensão de saída do mesmo.

Um exemplo de um regulador de tensão variável é o LM317L, que é capaz de transmitir tensões entre 1.2 V a 37 V regulados, com uma corrente máxima de 100 mA e uma rejeição do *ripple* de 80 dB [28]. Um exemplo de aplicação deste regulador encontra-se representado na Figura 2.20.

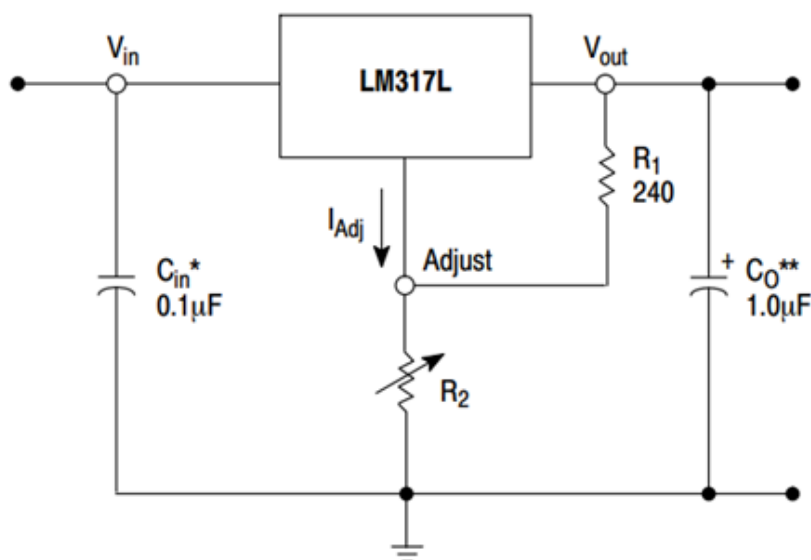


Figura 2.20: Aplicação simplificada do regulador de tensão variável LM317L, retirado de [28].

Onde o valor de V_{out} é dado por [28]:

$$V_{out} = 1.25 \cdot V_{in} \cdot \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) \quad (2.39)$$

2.2.4.5 Reguladores Lineares LDO

Os LDOs (Low Dropage Output), ou reguladores com baixa queda de tensão, são reguladores lineares mais eficientes, uma vez que, não necessitam de uma tensão à entrada muito acima do valor a ser regulado à saída.

Um exemplo de um LDO é o TPS7A24, onde a diferença máxima entre a tensão de entrada e saída é de apenas 250 mV para uma corrente máxima de 200 mA. Este componente, oferece uma regulação para valores fixos de tensão (1.25 V, 1.8 V, 2.5 V, 3 V, 3.3 V, 3.6 V e 5 V), ou de um valor ajustável até 17.75 V com uma rejeição do *ripple* de até 75 dB [29].

A escolha deste tipo de reguladores foca-se em aplicações onde seja necessário uma eficiência alta e ruído baixo.

2.3 Fontes Comutadas

As fontes lineares vistas anteriormente, apesar de apresentarem um bom funcionamento prático e serem utilizadas em diversas aplicações, apresentam algumas limitações importantes. Uma vez que empregam reguladores de tensão que utilizam transístores de potência como elementos reguladores, estes dissipam grandes quantidades de energia sob a forma de calor, tornando estas fontes relativamente pouco eficientes.

Outra limitação é o facto de estas fontes necessitarem transformadores, em que o tamanho, peso e preço destes são proporcionais à potência das fontes. Ou seja, fontes com potências elevadas empregam transformadores bastante pesados e volumosos. Então, devido ao seu tamanho, e uma vez que um transformador destes é constituído por um núcleo de ferro, também pode apresentar um preço elevado.

As fontes comutadas ou SMPS, são fontes mais eficientes, mais pequenas e mais leves do que as fontes lineares. No entanto, estas têm um funcionamento mais complexo, são mais difíceis de dimensionar e além disso, irradiam maior ruído eletromagnético (IEM) que pode interferir com circuitos adjacentes.

2.3.1 Modo de Operação

Tal como o nome indica, as fontes comutadas são fontes que controlam a tensão numa carga, abrindo e fechando um circuito comutador como forma a manter, pelo tempo de abertura e fecho deste circuito, a tensão desejada.

Um transístor de potência é utilizado como interruptor que controla a tensão contínua aplicada no circuito da carga. Este circuito encontra-se ligado a um circuito controlador

que determina a largura dos pulsos (*duty-cycle*) gerados por um oscilador de sinal retangular, que por sua vez controla o transistor de potência.

Caso a tensão na carga varie, o circuito controlador detecta a alteração e atua sobre o oscilador, aumentando ou diminuindo a largura do pulso como forma de manter a tensão na saída. Este processo de controlo é denominado PWM (*Pulse Width Modulation*) ou Modulação por Largura de Pulso [30].

Portanto, e ao contrário dos reguladores das fontes lineares que operam o transistor de potência apenas na zona linear, os SMPS operam os transistores de potência nas zonas de saturação e de corte. Logo, este ou encontra-se desligado (corrente baixa e tensão alta) ou ligado e saturado (corrente baixa e tensão alta). Então, o produto Volt-Ampere no transistor mantém sempre um valor baixo, ou seja, a dissipação de calor é quase nula.

Nestas fontes, a tensão sinusoidal de entrada é retificada e filtrada antes de ser convertida em CA de novo pelo circuito comutador. Após este processo, pode-se utilizar um transformador para aumentar ou diminuir a tensão para esta ser retificada e filtrada de novo antes de chegar à carga.

Existem dois tipos principais de conversores SMPS: conversor "Buck" e conversor "Boost". Apesar destas duas topologias serem constituídas pelos mesmos componentes, estes encontram-se configurados de maneiras distintas e apresentam resultados diferentes.

2.3.2 Conversor "Buck"

O regulador comutador "Buck" é um conversor CC-CC redutor de tensão. Este é constituído por um filtro L-C presente após o interruptor de potência (transistor). Um circuito básico desta topologia pode ser observado na Figura 2.21.

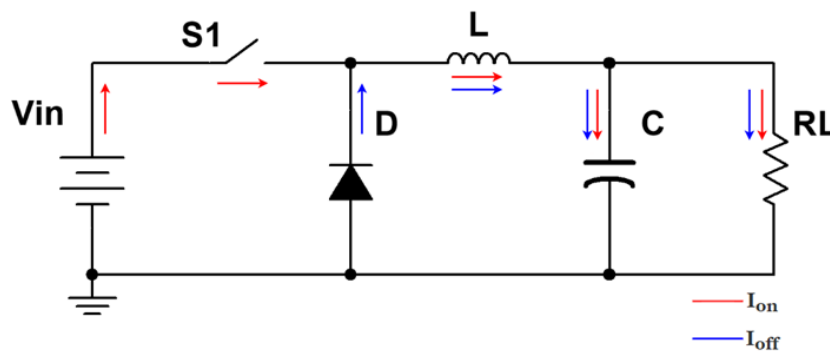


Figura 2.21: Circuito básico de um conversor do tipo "buck", adaptado de [31].

A cada pulso do sinal alternado de onda quadrada vindo do circuito comutador, é acumulada energia no filtro L-C. Considerando V_{in} a tensão de entrada, " t_{ON} " e " t_{OFF} " os tempos em que o transistor se encontra e ligado e desligado respetivamente, então a tensão de saída V_{out} pode ser descrita por [31]:

$$V_{out} = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \cdot V_{in} = D \cdot V_{in} \quad (2.40)$$

Sendo D o *duty-cycle* do sinal de entrada, ou o tempo de trabalho em relação ao período. Assim, a saída é controlada pelo controlador fazendo variar apenas o *duty-cycle*. O modo de operação deste conversor pode ser dividido em dois períodos. Quando o transistor interruptor se encontra a conduzir, a tensão de entrada encontra-se aos terminais do filtro L-C e a corrente na bobine aumenta de forma linear. Esta pode ser descrita pela seguinte equação [31]:

$$i_L(t_{on}) = \frac{(V_{in} - V_{out}) \cdot t_{on}}{L} + i_{min} \quad (2.41)$$

A energia armazenada na bobine durante este período é dada por [31]:

$$E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot (i_{max} - i_{min})^2 \quad (2.42)$$

Quando o interruptor é desligado, a tensão de entrada torna-se negativa e o diodo fica polarizado diretamente, o condensador descarrega e a corrente retorna para a bobine através do diodo e continua a fornecer corrente à carga. A corrente na bobine durante este período é dada por [31]:

$$i_L(t_{off}) = i_{max} - \frac{V_{out} \cdot t_{off}}{L} \quad (2.43)$$

Desta vez, a corrente decresce linearmente e tem a forma de uma reta com declive negativo igual a $-\frac{V_{out}}{L}$. Assim que o interruptor é ligado mais uma vez, o diodo desliga-se e a corrente flui de novo até à bobine diretamente a partir da entrada. A corrente na bobine no momento antes de o interruptor ligar é a corrente mínima neste (i_{min}) e é a corrente inicial que o interruptor deixa passar. As formas de onda da corrente e da tensão no diodo durante os ciclos do interruptor encontram-se representados na Figura 2.22.

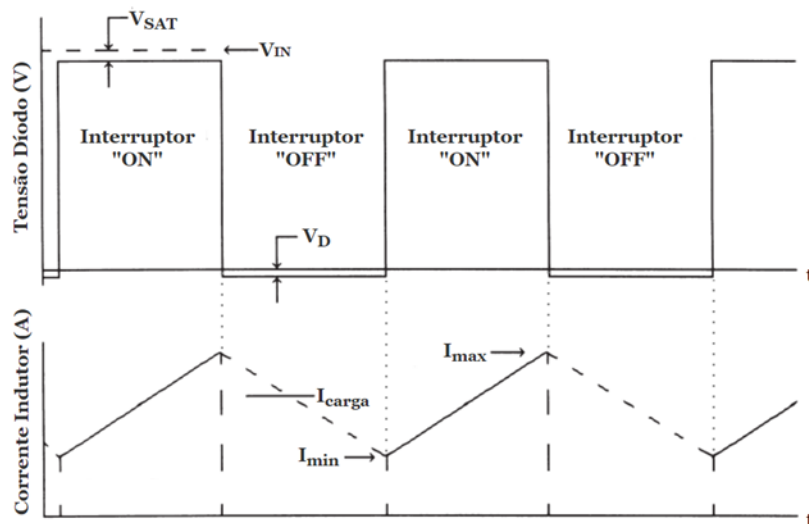


Figura 2.22: Formas de onda da tensão no diodo e da corrente na bobine durante os ciclos do interruptor, num conversor do tipo "buck", adaptado de [31].

A corrente contínua na carga tem um valor entre os valores de pico e mínimo da corrente da bobine. Em aplicações típicas, a corrente máxima na bobine é 150 % da corrente contínua na carga, enquanto a corrente mínima é de apenas 50 % [31].

Um transformador de ferrite pode ser colocado entre o transistor de potência e o filtro L-C e pode ser utilizado para reduzir ou aumentar a tensão enquanto fornece um isolamento galvânico entre a entrada e a saída protegendo o utilizador de possíveis descargas elétricas vindas da rede.

2.3.3 Conversor "Boost"

A segunda principal família de conversores comutados são os denominados "boost-mode converters". Estes, ao contrário dos conversores "buck", são elevadores de tensão, ou seja, as suas tensões de saída são mais elevadas do que as de entrada. Na Figura 2.23 encontra-se representado um circuito básico deste conversor.

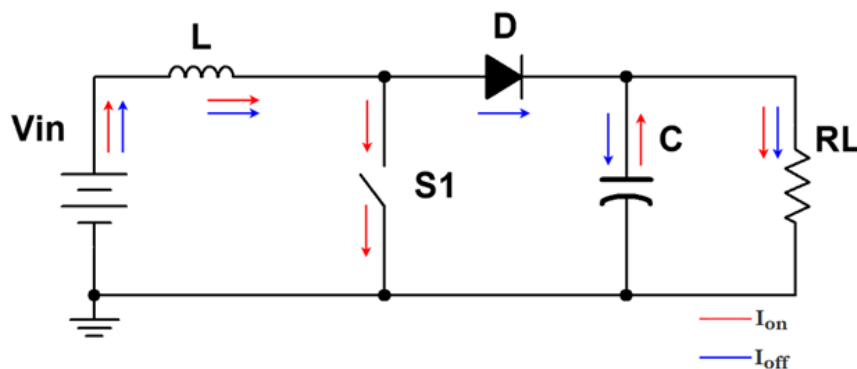


Figura 2.23: Circuito básico de um conversor do tipo "boost", adaptado de [31].

Como se pode observar, esta topologia utiliza os mesmos componentes que o conversor "buck", mas são interligados de maneira diferente. Este novo rearranjo dos componentes nesta topologia tem como consequência um modo de operação totalmente diferente. Desta vez, quando o interruptor está ligado, é criado um circuito fechado para a corrente que inclui apenas a bobine, o transistor interruptor e a fonte de tensão de entrada, uma vez que, o diodo neste período encontra-se inversamente polarizado. Assim, a corrente na bobine tem a forma de uma reta com declive positivo e é descrita pela seguinte expressão [31]:

$$i_L(t_{on}) = \frac{V_{in} \cdot t_{on}}{L} \quad (2.44)$$

Assim, durante este período, a bobine armazena energia enquanto o condensador descarrega energia acumulada no ciclo anterior para a carga, mantendo a tensão de saída constante.

Quando o transistor é desligado, a fonte de entrada é diretamente ligada à saída através da bobine e do diodo que agora se encontra diretamente polarizado. A energia armazenada na bobine durante o período anterior descarrega por encargo de V_{in} e é

"empurrada" para a saída. Isto resulta numa inversão da tensão dos terminais de L, aumentando a tensão de saída, sendo esta agora igual a $V_{in} + V_L$ [32]. A tensão de saída do conversor "boost" é então dada por [32]:

$$V_{out} = \frac{1}{1-D} \cdot V_{in} \quad (2.45)$$

Tal como no conversor anterior, V_{out} depende apenas da tensão de entrada e do *duty-cycle*. Portanto, controlando o *duty-cycle*, é possível alcançar uma regulação estável da tensão à saída.

A corrente na bobine durante o período em que o interruptor se encontra desligado é dada por [31]:

$$i_L(t_{off}) = i_{max} - \frac{(V_{out} - V_{in}) \cdot t_{off}}{L} \quad (2.46)$$

As formas de onda da tensão no interruptor e da corrente na bobine durante os pulsos de atividade do transístor são possíveis de observar na Figura 2.24.

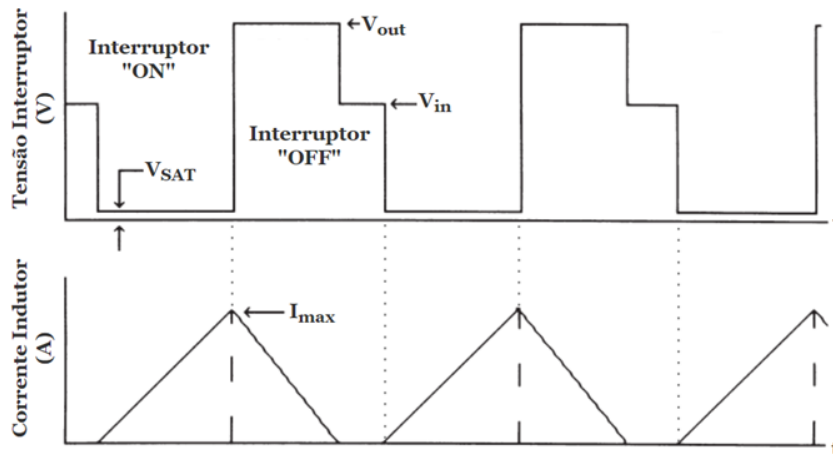


Figura 2.24: Formas de onda da tensão no interruptor e a corrente na bobine num conversor do tipo "boost" em modo descontínuo, adaptado de [31].

Quando a energia acumulada no núcleo da bobine descarrega por completo antes de o interruptor ligar novamente, diz-se que o conversor está a operar no modo descontínuo. De forma oposta, quando ainda existe energia acumulada na bobine durante o momento em que o transístor volta a conduzir, então, o conversor opera em modo contínuo. Este modo de operação encontra-se representado na Figura 2.25. A maioria dos conversores "boost" operam no modo descontínuo dado que ocorrem maiores problemas de instabilidade quando estes operam em modo contrário [31].

A energia máxima acumulada na bobine num conversor do tipo "boost" em modo descontínuo é dada por:

$$E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot (i_{max})^2 \quad (2.47)$$

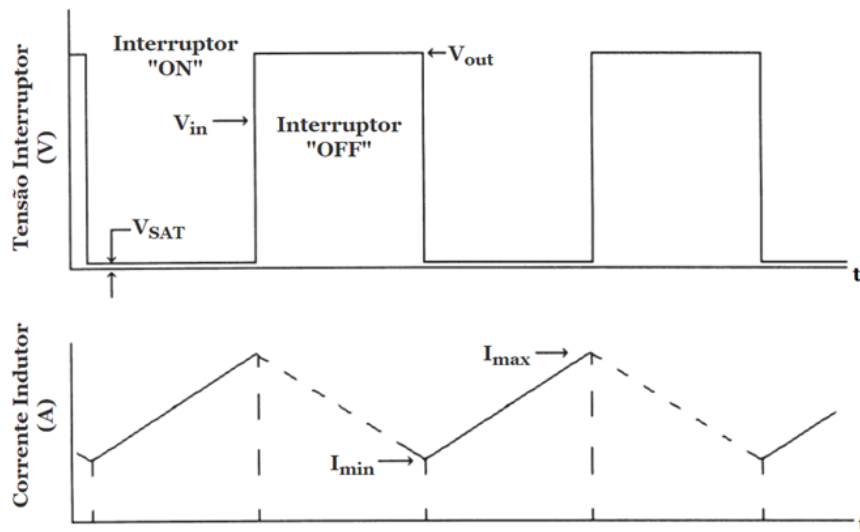


Figura 2.25: Formas de onda da tensão no interruptor e a corrente na bobine num conversor do tipo "boost" em modo contínuo, adaptado de [31].

Esta energia deve ser suficientemente elevada para que a potência fornecida à carga vá de encontro com as necessidades da mesma. Ou seja, a corrente máxima na bobine durante o período em que o interruptor está ligado deve ser suficiente para satisfazer a seguinte equação [31]:

$$P_{carga} < P_{out} = f_{op} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot L \cdot (i_{max})^2 \right] \quad (2.48)$$

onde f_{op} representa a frequência da operação do interruptor.

2.3.4 Arquitetura típica de uma SMPS

Na Figura 2.26 encontra-se representado em diagrama de blocos o funcionamento típico de uma fonte comutada.

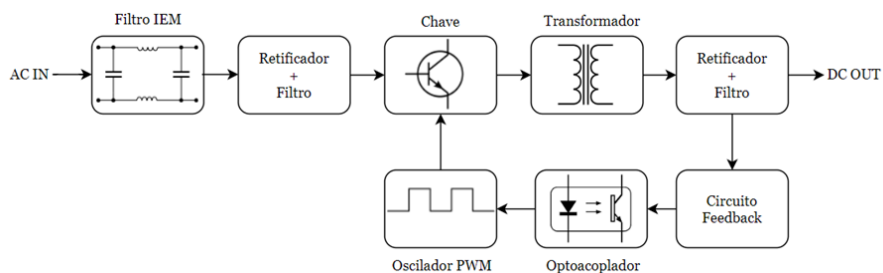


Figura 2.26: Diagrama funcional de uma típica fonte comutada.

Devido às altas frequências do circuito oscilador, que pode operar desde os 20 kHz até aos 500 kHz, são emitidas interferências eletromagnéticas (IEM) que podem interferir com circuitos vizinhos. Por essa razão, é essencial utilizar à entrada um filtro IEM, destinado a atenuar estes ruídos e impedir os mesmos que retornem para a fonte de entrada [33].

Este filtro é tipicamente constituído por dois condensadores e duas bobines numa montagem equivalente à representada no bloco inicial da Figura 2.26.

Após a filtragem, o sinal CA é transformado num sinal CC através do uso de um retificador de onda completa e um filtro para atenuar o *ripple*. O sinal de corrente contínua é então "cortado" pelo circuito comutador e transformado novamente num sinal de corrente alternada retificado de onda quadrada, com amplitude igual ao sinal de entrada e frequência igual ao oscilador PWM.

De seguida, é utilizado um transformador, que dependendo da relação entre o número de espiras do primário e o secundário, serve para aumentar ou reduzir a tensão do sinal, bem como oferecer isolamento entre o sinal de entrada e saída, protegendo o circuito e o utilizador de possíveis descargas elétricas vindas da rede.

Este transformador, é mais leve e pequeno, apresenta menos perdas e é mais eficiente do que o implementado nas fontes lineares. Isto deve-se ao facto deste circuito trabalhar com frequências elevadas. A área de material constituinte do núcleo do transformador é inversamente proporcional à frequência, para a mesma força eletromotriz induzida (EMF) [10]. Além disso, o núcleo deste transformador é formado por ferrite, um material significativamente mais leve do que o ferro.

O sinal no secundário do transformador vai ser um sinal CA de onda retangular e com parte negativa, portanto, é necessário mais uma vez retificar e filtrar este sinal.

Obtém-se, portanto, um sinal CC à saída que já pode alimentar certas cargas. No entanto, variações na tensão de entrada, ou na corrente exigida pela carga, irão fazer variar a tensão de saída. Portanto, o sinal da saída é constantemente monitorizado por um circuito controlador que compara a tensão V_{out} com uma tensão de referência e transmite os ajustes necessários ao circuito oscilador, alterando o *duty-cycle* do sinal PWM como forma de compensar as variações ocorridas e manter a saída constante. Como o sinal de entrada encontra-se galvanicamente isolado da saída através do transformador, o circuito de *feedback* também necessita de ser isolado, utilizando para isso um optoacoplador.

Descrição Elétrica do Equipamento

O estudo de interações de elétrons de baixa energia são realizadas em meio laboratorial utilizando um aparelho de feixes cruzados pertencentes ao laboratório LCAM. Este aparelho consiste num monocromador trocoidal de elétrons (TEM) acoplado a um espectrômetro do tipo tempo-de-voo refletor ortogonal (OReToFMS). O TEM é constituído por três conjuntos de lentes eletrostáticas (Figura 3.1): lentes M do monocromador, lentes C para a zona de colisão e lentes F para a zona de focagem dos iões. As lentes M englobam 8 elétrodos, M1 a M8. Sendo a lente M1 conectada ao centro de um filamento de tungsténio montado em forma de alfinete que liberta elétrons. M5 e M6 são lentes de dispersão que aplicam um campo elétrico ortogonal a um campo magnético externo. Este último tem uma intensidade de ~ 4 mT, criado por um par de bobinas *Helmholtz* montadas no exterior da câmara de vácuo. Após a zona de dispersão, as lentes M7 e M8 são responsáveis por

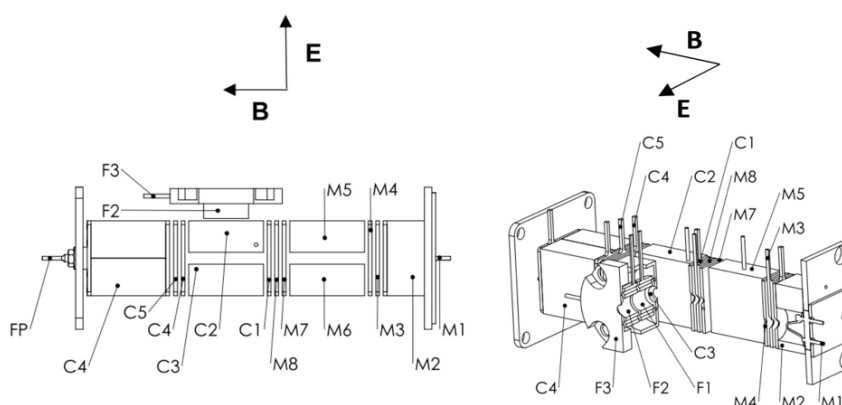


Figura 3.1: Esquemático do monocromador trocoidal de elétrons com indicação da localização de todas as lentes eletrostáticas do sistema. FP representa a gaiola de Faraday do TEM, adaptado de [34].

focar os elétrons para a zona de interação através do elétrodo C1. Os elétrodos C2 e C3 são responsáveis por aplicar um pequeno campo elétrico que extrai os iões para a zona de focalização. C4 e C5 são responsáveis por focar os elétrons restantes para a placa de

Faraday. Por fim, existem três lentes de focagem, F1, F2 e F3, bem como um conjunto de lentes de deflexão que guiam os iões da zona de extração do monocromador para o OReToFMS [34].

3.1 Sistema de Alimentação do Monocromador

O esquema elétrico atualmente implementado no sistema e que torna o trabalho experimental possível, encontra-se representado na Figura 3.2. O potencial das lentes M2-M8 flutua sobre o potencial da M1, que por sua vez flutua em relação à zona de colisão, estabelecendo uma energia do feixe de eletrões. Esta energia é ajustada pelo potencial da fonte U7, também chamada de *Electron Energy* (EE). A referência do conjunto das lentes C's encontra-se a um potencial fixo de normalmente $\pm 4V$ estabelecido pela fonte U10, também denominada *ion energy* (IE) [34]. Tal como o nome indica, esta fonte define a energia cinética ótima dos iões positivos (+4 V) ou negativos (-4 V) que entram no OReToFMS. O potencial do bloco das lentes F tem como referência a massa do sistema. A energia dos eletrões é rampeada, rampeando o potencial do bloco dos elétrodos M em relação ao potencial do bloco dos elétrodos C, utilizando uma placa de aquisição de dados da *National Instruments* PCIe-6321 que permite controlar a tensão de uma fonte de 250 V (*Escaan*) através do computador, utilizando um software de aquisição de dados. Esta fonte permite ainda isolar galvanicamente o sinal da PCIe-6321 que se encontra ligada à terra do sistema. Como esta fonte tem uma resolução de 10 bits (1024 intervalos de tensões), mais baixa do que a PCIe-6321 (16 bits), encontra-se implementado um divisor de tensão à sua saída que baixa a tensão máxima para aproximadamente 150 V, uma vez que não são necessários valores mais elevados e aumentando assim a resolução da fonte para esse intervalo (apesar da fonte permanecer com uma resolução de 10 bits, o valor de tensão por intervalo de incremento ou decremento torna-se mais baixo).

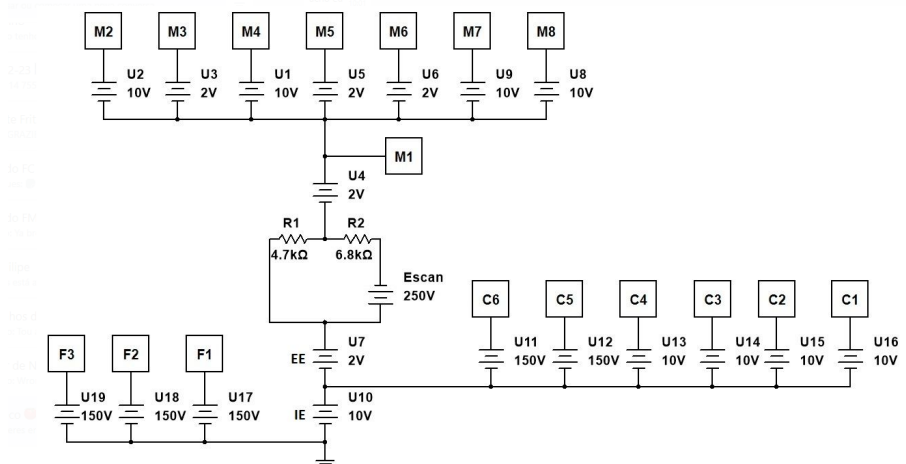


Figura 3.2: Esquema elétrico completo da alimentação das lentes eletrostáticas do TEM.

Tal como é possível observar no esquemático da Figura 3.2, o sistema de alimentação

3.1. SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DO MONOCROMADOR

das lentes eletrostáticas do monocromador, é composto por 20 fontes de tensão ajustáveis por potenciômetros digitais, distribuídas por 10 placas, com exceção da fonte *Esca*n que se encontra separada das restantes. Cada placa contém duas fontes (A e B) separadas uma da outra e 31 pinos de entrada ou saída. Estas placas encontram-se equipadas dentro de dois chassis metálicos (1 e 2) montados um cima do outro numa *rack* metálica, tal como demonstrado na Figura 3.3. Os painéis frontais dos chassis permitem ao utilizador visualizar e controlar as tensões das respetivas fontes. Nas Figuras 3.4 e 3.5 podem-se observar o interior de ambos os chassis com as placas montadas.

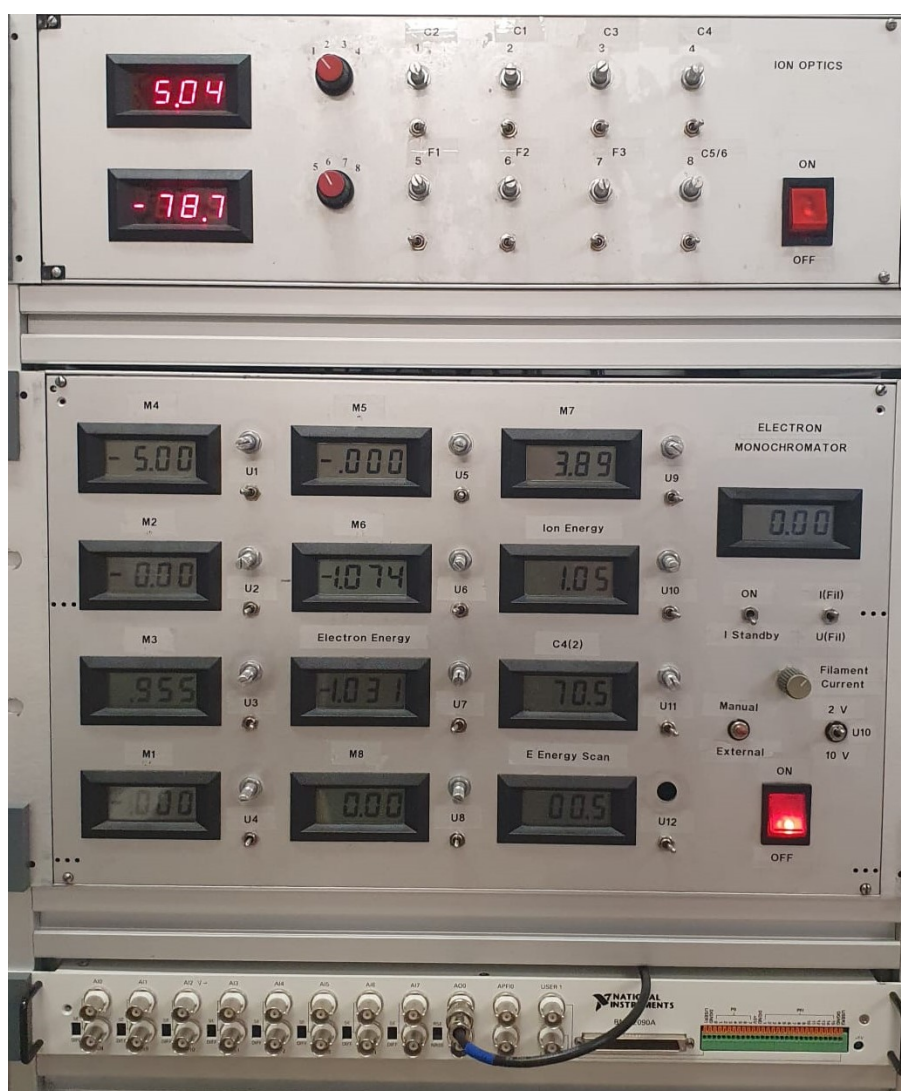


Figura 3.3: Fotografia dos painéis frontais dos chassis 1 (em cima) e 2 (em baixo) e da placa de aquisição de dados da *National Instruments* PCIe-6321 por baixo dos chassis, montados na *rack* metálica e com as alimentações ligadas, .

Cada fonte alimenta uma única lente e, embora as suas características variem de acordo com a tensão máxima que é capaz de fornecer, todas as fontes seguem o mesmo princípio geral de funcionamento. Existem, ainda, três placas dedicadas à alimentação dos voltímetros das fontes, cujos ecrãs se encontram nos painéis frontais dos chassis, bem

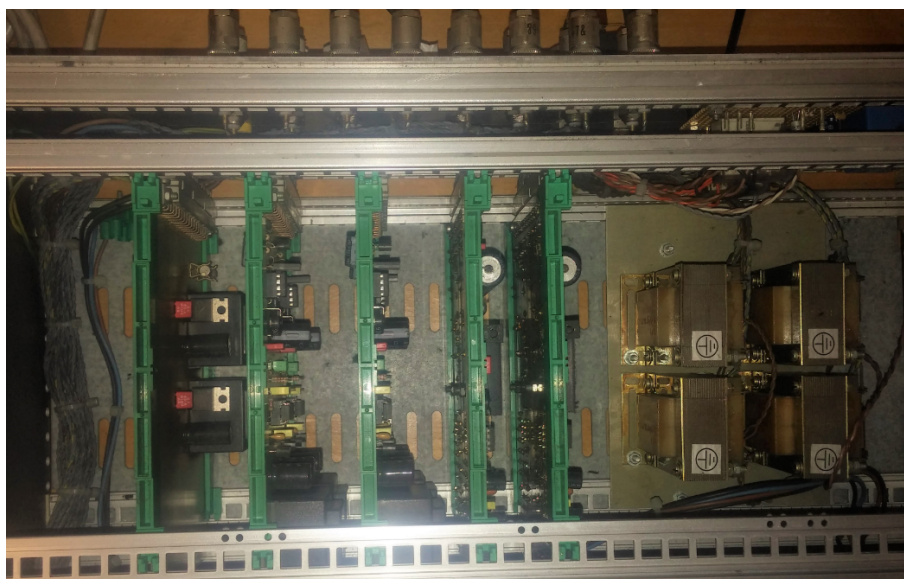


Figura 3.4: Fotografia do interior do chassi 1, visto de cima, com a tampa aberta e placas montadas e respectivos transformadores.

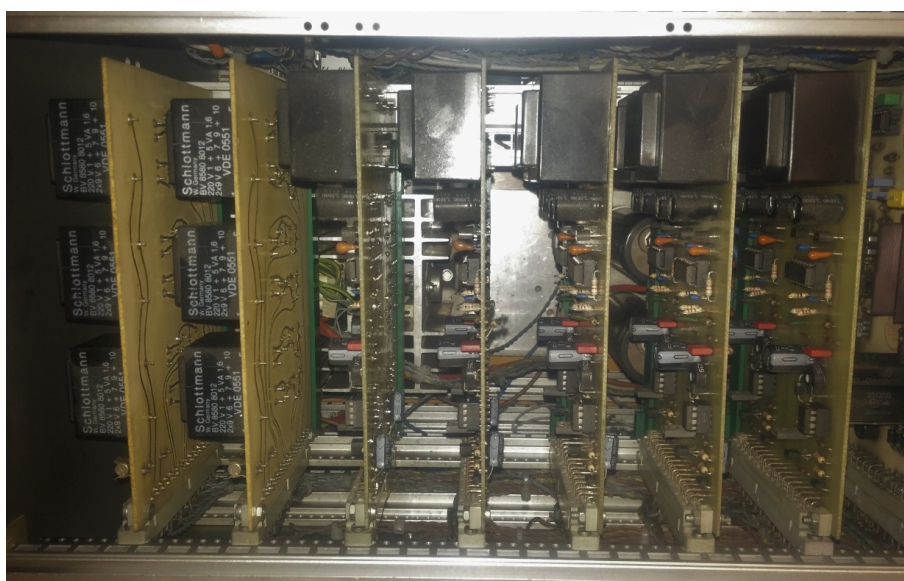


Figura 3.5: Fotografia do interior do chassi 2, visto de cima, com a tampa aberta e placas montadas.

como uma placa responsável pelo controlo e ajuste da corrente do filamento. O funcionamento desta fonte não será analisado neste trabalho, uma vez que, o foco é apenas a substituição das fontes que compõem o sistema de alimentação das lentes presentes no esquemático da Figura 3.2. Nas Tabelas 3.1 e 3.2 encontram-se listadas as placas equipadas no chassi 1 e 2, respetivamente, com indicação dos nomes das fontes, as tensões máximas das mesmas e as lentes correspondentes a cada uma delas, quando aplicável. As Figuras 3.6, 3.7, 3.8 e 3.9 mostram as 4 tipologias diferentes de placas existentes, com fotografias frente e verso das mesmas.

3.1. SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DO MONOCROMADOR

Tabela 3.1: Placas montadas no chassis 1, com indicação do nome de cada fonte a tensão máxima fornecida pela mesma e a lente correspondente que alimenta.

Nº Placa	Fonte	Lado	Lente	Tensão Máx (V)	Notas
1	-	-	-	5	Alimentação dos voltímetros (2 × 5V)
2	U14	A	C3	10	-
	U13	B	C4	10	-
3	U15	A	C2	10	-
	U16	B	C1	10	-
4	U19	A	F3	150	Transformadores fora das placas
	U12	B	C5	150	
5	U17	A	F1	150	Transformadores fora das placas
	U18	B	F2	150	

Tabela 3.2: Placas montadas no chassis 2, com indicação do nome de cada fonte a tensão máxima fornecida pela mesma e a lente correspondente que alimenta.

Nº Placa	Fonte	Lado	Lente	Tensão Máx (V)	Notas
1	-	-	-	5	Corrente de filamento + voltímetro
2	U11	A	C6	150	Tranformadores fora da placa E Energy Scan (Fonte fora de uso)
	U12	B	-	150	
3	U9	A	M7	10	- Ion Energy
	U10	B	-	10	
4	U7	A	-	2	Electron Energy -
	U8	B	M8	10	
5	U5	A	M5	2	- -
	U6	B	M6	2	
6	U3	A	M3	2	- -
	U4	B	M1	2	
7	U1	A	M4	10	- -
	U2	B	M2	10	
8	-	-	-	9	Voltímetros U7-U12 (6 × 9V)
9	-	-	-	9	Voltímetros U1-U6 (6 × 9V)

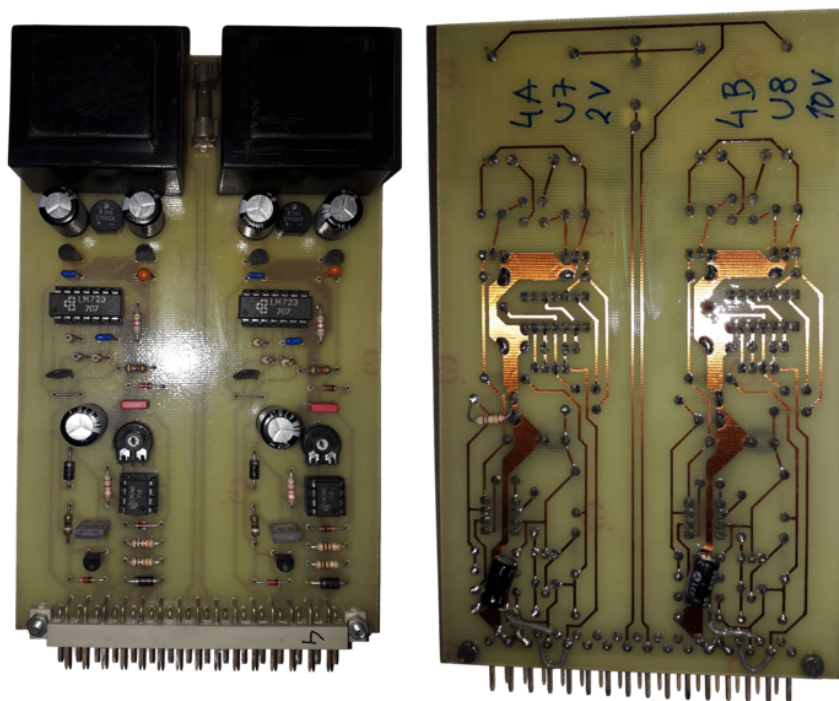


Figura 3.6: Fotografia da placa nº 4 do chassis 2, que contém as fontes U7 e U8 de 2 V e 10 V respetivamente. Lado esquerdo: plano frontal; lado direito: plano traseiro.

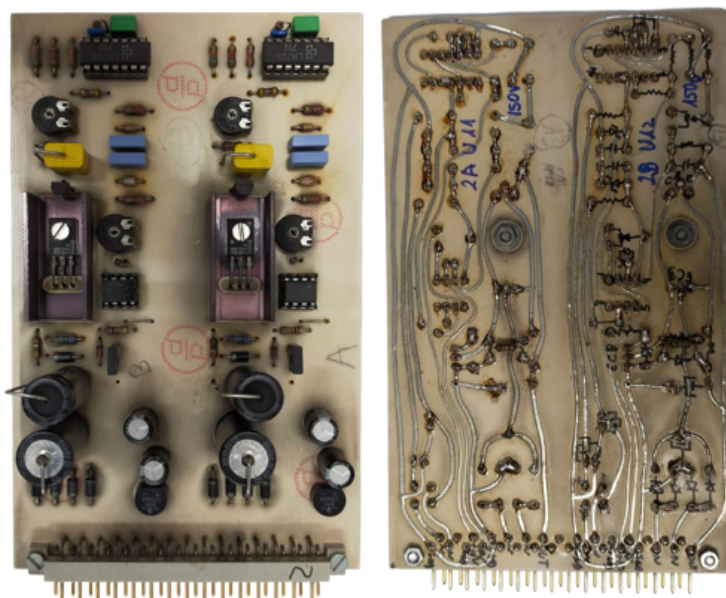


Figura 3.7: Fotografia da placa nº 2 do chassis 2, que contém duas fontes de 150 V. Lado esquerdo: plano frontal; lado direito: plano traseiro.

Apenas por observação das imagens, é possível compreender as razões que levam à necessidade destas serem substituídas. Tal como referido anteriormente, estas placas foram criadas na década de 60 do século XX, o que é compreensível que apresentem

3.1. SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DO MONOCROMADOR

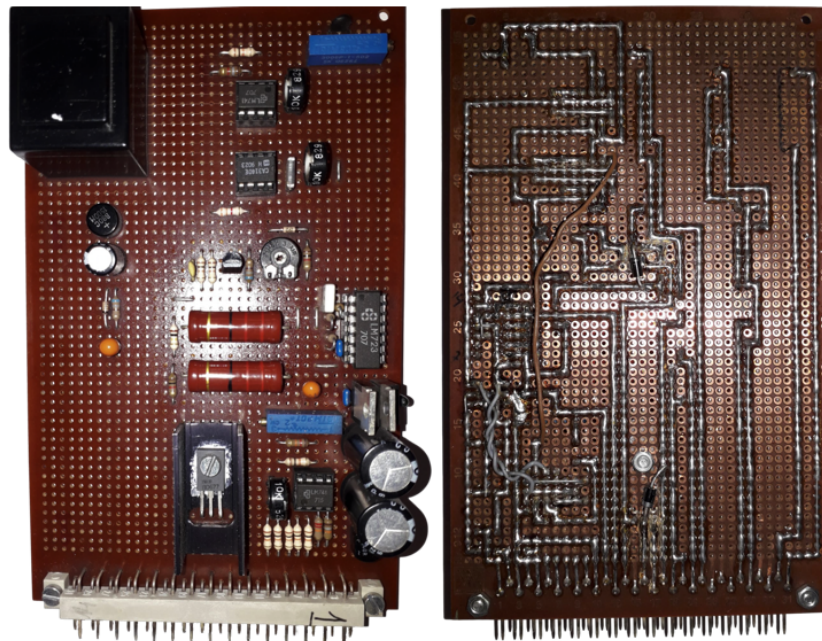


Figura 3.8: Fotografia da placa nº 1 do chassis 2, que contém a fonte de corrente que define a corrente no filamento. A tensão que alimenta este circuito é fornecida por um transformador de potência localizado na parte inferior do chassis. Lado esquerdo: plano frontal, lado direito: plano traseiro.



Figura 3.9: Fotografia da placa nº 8 do chassis 2, que contém as fontes que alimentam um conjunto de voltímetros. Lado esquerdo: plano frontal, lado direito: plano traseiro.

níveis de desgaste visíveis, até nos próprios componentes. Estes, dado o seu tempo de

uso, podem ter perdido algumas das suas características elétricas, nomeadamente os condensadores eletrolíticos que dado à sua natureza, têm um número limitado de horas que conseguem manter a sua capacidade nominal. As fontes de 10 V e 2 V, são as únicas que estão contidas em placas com a tecnologia de circuito impresso, enquanto que as restantes, especialmente as placas das fontes de 150 V, possuem as pistas que conectam os diferentes componentes produzidas manualmente.

Todas as placas possuem dimensões idênticas e têm cerca de 10 cm de largura e 16 cm de comprimento. A troca de sinais entre cada placa e o exterior é realizada através de 2 conectores (ficha e tomada) DIN 41617 com 31 pinos de entrada e/ou saída. As fichas encontram-se localizadas numa das extremidades das placas, os seus pinos possuem uma curvatura de 90° graus, sendo que as extremidades de um lado são soldadas na placa enquanto as do lado oposto encaixam nos respetivos pinos dos conectores fêmea que se encontram montados nas *racks* metálicas. Nas Figuras 3.6-3.9 ilustradas acima é possível observar a montagem das fichas e as respetivas ligações com os circuitos das respetivas placas. Na Figura 3.10 são demonstradas imagens dos dois tipos de conectores.

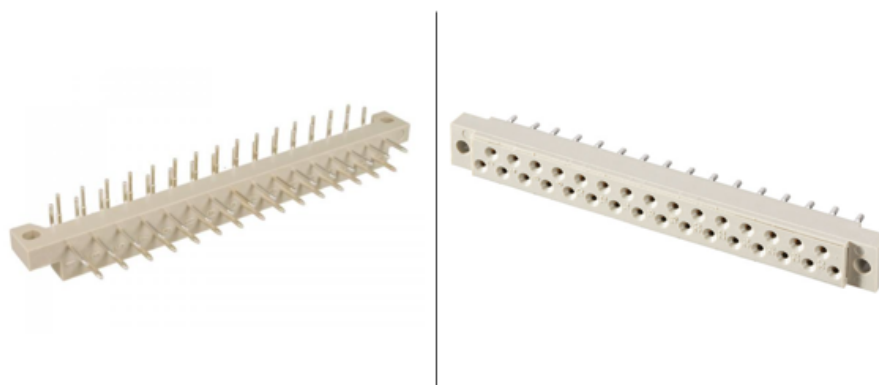


Figura 3.10: Conectores DIN 41617, 31 pinos, ficha (lado esquerdo) e tomada (lado direito), que permitem a troca de sinais entre o circuito de cada placa e o exterior.

Uma vez que o foco do presente trabalho é apenas a reformulação e substituição das fontes de 2 V, 10 V e 150 V, de modo a facilitar a compreensão do funcionamento destas, os seus circuitos foram divididos em blocos, cada um com funções diferentes. Todas as fontes apresentam uma arquitetura de funcionamento semelhante com algumas diferenças em alguns dos blocos que serão mencionadas. O diagrama da Figura 3.11 esquematiza o funcionamento genérico de uma das fontes de tensão descritas acima.

Analisando a Figura 3.11, pode delinear-se 5 conjuntos de blocos distintos: alimentação, potenciómetro, controlo e regulação da tensão de saída, inversor de polaridade e voltímetro. O primeiro bloco, constituído pelo transformador, retificador, filtros e reguladores são responsáveis por fornecer energia ao resto do circuito. O potenciómetro, que se

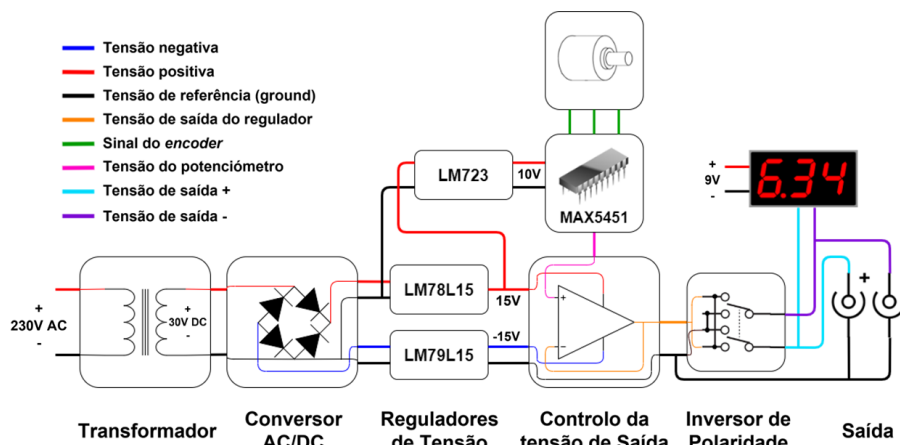


Figura 3.11: Diagrama de blocos do circuito de uma fonte de tensão genérica do TEM representando a conexão ao potenciômetro digital (MAX5451) e ao respetivo voltímetro, adaptado de [35].

encontra fora da placa, é alimentado por 10 V e tem na sua saída uma tensão variável de 0-10 V que retorna para o circuito dentro da placa para ser novamente regulada e ajustada à tensão correspondente a essa fonte (0-2 V/ 0-10 V/ 0-150 V). Uma vez regulada, a tensão passa por um interruptor que dependendo da sua posição inverte a polaridade da tensão de saída, permitindo assim à fonte fornecer tensões negativas sempre que necessário. A partir deste ponto, a tensão segue para o voltímetro para ser visualizada no painel frontal do chassis e para as BNC's para alimentar a respetiva lente, ou servir de referência para outra fonte, dependendo da fonte em questão.

3.1.1 Bloco de Alimentação

Este bloco é responsável por fornecer energia aos restantes circuitos da fonte e é constituído pelo transformador, retificador, filtros e reguladores. O primário do transformador está ligado à rede elétrica (230 VAC), e contém um fusível de 100 mA, oferecendo proteção ao circuito que opera com correntes significativamente mais baixas. O secundário tem uma tensão de 15 VAC (tensão eficaz) que é retificada por uma ponte de díodos e posteriormente regulada por dois reguladores monolíticos LM78L15 e LM79L15 ou díodos de *Zener* (no caso das fontes de 150 V) de polaridades opostas, produzindo duas tensões CC de 15 V e -15 V. Uma diferença importante entre as diferentes fontes, é que os transformadores das fontes de 150 V, encontram-se fora das respetivas placas. Uma razão possível para isto é o facto das placas terem sido todas dimensionadas para terem o mesmo tamanho, e uma vez que as fontes de 150 V utilizam componentes de potência, razoavelmente maiores do que os componentes das outras fontes e como cada placa contém duas fontes, não foi possível incluir estes transformadores nas mesmas por falta de espaço. No entanto, a placa recebe os 15 VAC do transformador através de 2 pinos de entrada que ligam diretamente ao retificador. As Figuras 3.12 e 3.13 ilustram a implementação deste bloco para as fontes de 2 V/ 10 V e para as de 150 V, respetivamente.

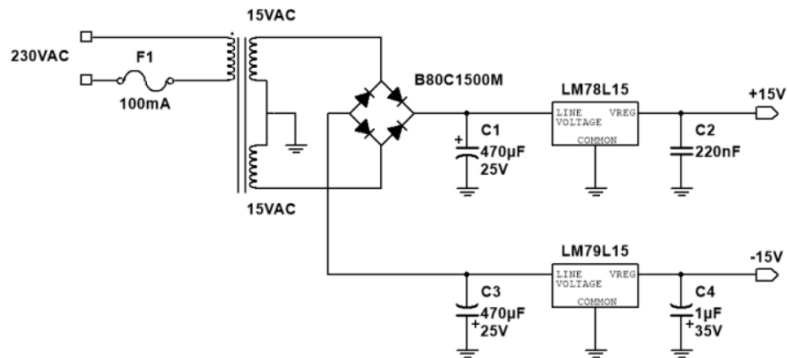


Figura 3.12: Esquemático do bloco de alimentação principal de uma fonte de 2 V/10 V que fornece tensões iguais a 15 V e -15 V, com a representação do fusível, transformador, retificador, condensadores e reguladores.

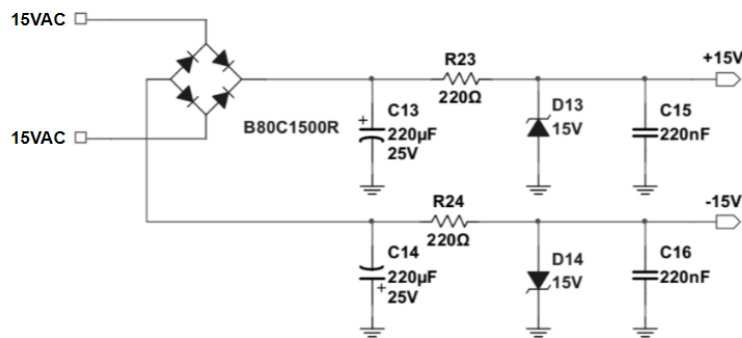


Figura 3.13: Esquemático do bloco de alimentação principal de uma fonte de 150 V que fornece tensões iguais a 15 V e -15 V, com a representação do retificador, condensadores e regulador de Zener.

A tensão de saída de 15 V deste circuito alimenta um segundo circuito regulador constituído pelo integrado LM723, que consiste num regulador monolítico ajustável. O circuito foi dimensionado para que a tensão de saída do mesmo seja 10 V. Esta tensão produzida pelo IC, é fornecida a um dos pinos de saída da placa, donde segue via fio elétrico para um potenciómetro digital montado no painel do chassi. O circuito do LM723 encontra-se esquematizado na Figura 3.14 e pode-se confirmar a sua tensão de saída através da seguinte expressão fornecida pelo *datasheet* do componente [36]:

$$V_{out} = 7.15 \times \frac{R1 + R2}{R1} = 7.15 \times \frac{3.3k + 8.2k}{8.2k} = 10.02V \quad (3.1)$$

3.1.2 Potenciómetro

Tal como referido no primeiro capítulo, numa fase inicial do funcionamento do aparelho, as tensões de cada fonte eram ajustadas utilizando potenciómetros analógicos montados

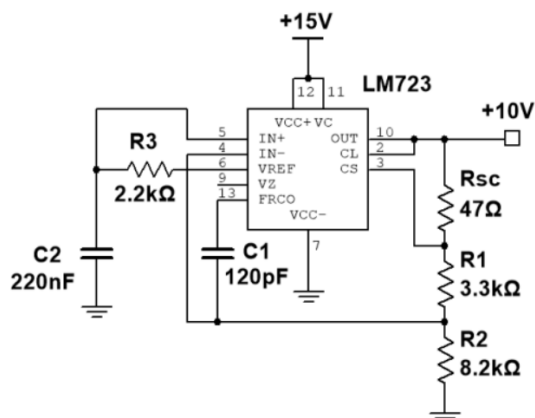


Figura 3.14: Esquema elétrico do regulador LM723 alimentado a 15 V e configurado para fornecer 10 V fixos.

nos painéis frontais dos chassis, junto dos respetivos interruptores e voltímetros.

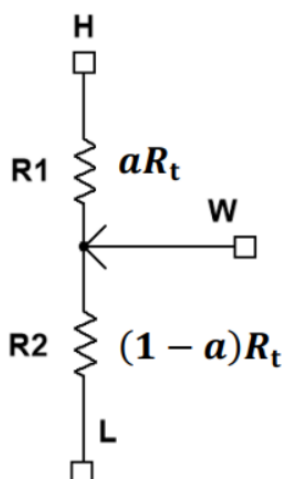


Figura 3.15: Esquema equivalente de um potenciómetro analógico, na forma de um divisor de tensão. H, L e W são os três pinos do potenciómetro. R_t representa a resistência total do potenciómetro ($R_1 + R_2$). a é um parâmetro entre 0 e 1, cujo valor depende da posição do eixo do potenciómetro.

O funcionamento de um potenciómetro analógico pode ser representado pelo divisor de tensão na Figura 3.15, onde H (*high*), L (*low*) e W (*wiper*) representam os três pinos do potenciómetro. A tensão de saída no *wiper* é dada pela seguinte expressão (divisor de tensão):

$$V_W = (V_H - V_L) \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_1} \quad (3.2)$$

Substituindo R_1 e R_2 pelos valores da Figura 3.15, obtemos a expressão para a tensão

de W em função da posição do eixo do potenciômetro:

$$V_W = (V_H - V_L) \cdot \frac{(1-a)R_t}{R_t} = (V_H - V_L)(1-a) \quad (3.3)$$

onde a é um parâmetro que varia entre 0 e 1 consoante a rotação do eixo do potenciômetro e R_t é a resistência total do mesmo. A tensão V_W tem sempre um valor entre V_H e V_L consoante a posição do *wiper*.

Na Figura 3.16 encontra-se representado o esquema elétrico de um potenciômetro analógico anteriormente implementado no TEM. Nesta configuração, o pino H encontra-se ligado à tensão de 10 V, e o pino L ao *ground* provenientes da respetiva fonte. A tensão no pino W varia entre 0 V e 10 V, de acordo com a posição do eixo do potenciômetro.

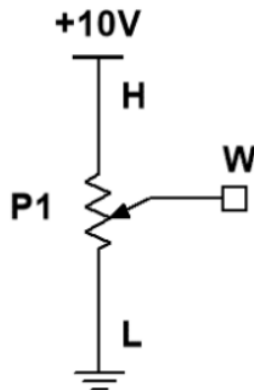


Figura 3.16: Esquema elétrico de um potenciômetro analógico P1, anteriormente implementado no aparelho.

Estes potenciômetros, no entanto, apresentavam diversos problemas que afetavam a otimização do feixe eletrónico. Em particular, o desgaste mecânico dos enrolamentos comprometia a reprodutibilidade, precisão e estabilidade das tensões fornecidas às lentes eletrostáticas [35]. Portanto, no âmbito de uma dissertação de mestrado em Engenharia Física do ano de 2021, foram implementados novos potenciômetros digitais em tecnologia de circuito impresso que funcionam como substitutos diretos aos anteriores, utilizando as mesmas entradas e saídas das fontes e fornecendo o mesmo intervalo de tensões (0-10 V).

A Figura 3.17 mostra fotografias de um potenciômetro digital atualmente implementado e o circuito base do seu funcionamento encontra-se representado na Figura 3.18. O modelo MAX5451 utilizado é um componente CMOS que integra dois potenciômetros digitais independentes, com controlo *Up/Down*. A resistência total entre os pinos H e L de cada potenciômetro tem o valor de 10 k Ω , com 256 valores possíveis para o pino W (resolução de 8 bits). Uma das limitações deste IC é que não possui capacidade de memória, ou seja, os valores dos pinos W são iniciados no ponto intermédio da respetiva escala (posição 127) quando a alimentação é ligada. Adicionalmente, a alimentação do

componente não pode exceder 5.5 V e a tensão de saída mínima deste medida é de 88 mV, o que equivale à tensão de saída mínima da fonte.

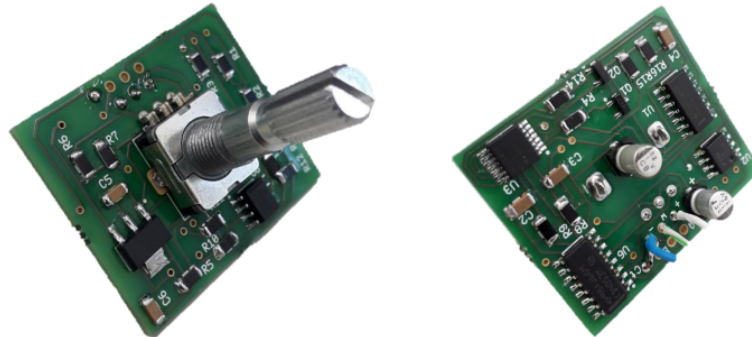


Figura 3.17: Fotografias da placa de um potenciômetro digital, retirado de [35].

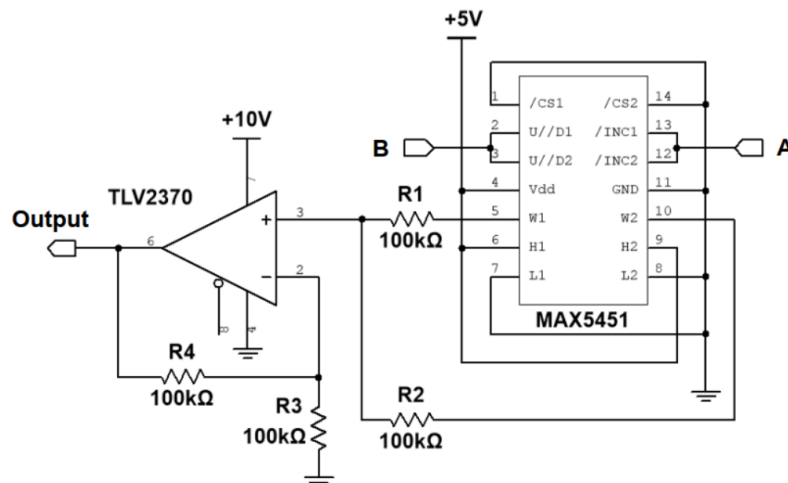


Figura 3.18: Esquema elétrico simplificado do potenciômetro digital implementado. O componente MAX5451 encontra-se ligado a um circuito somador, constituído pelo AmpOp TLV2370. Este está dimensionado para somar as duas saídas dos potenciômetros do MAX5451, produzindo uma tensão máxima de 10 V no Output. O AmpOp é alimentado pela tensão de 10 V produzida pela fonte de alimentação. A e B são as saídas do rotary encoder, retirado de [35].

Visto que o circuito dispõe de uma tensão de 10 V proveniente da fonte de alimentação, é utilizado um regulador LM7805 para transformar essa tensão para 5 V de forma a alimentar o MAX5451. Assim, cada potenciômetro interno consegue apenas fornecer uma tensão máxima de 5 V, equivalente a metade do valor pretendido. Como forma a se conseguir produzir uma tensão de 10 V, são utilizados os dois potenciômetros internos em simultâneo e as tensões de saída de cada um deles são somadas utilizando um circuito somador composto pelo amplificador operacional TLV2370, tal como representado no esquema.

As entradas A e B são comandos de incremento/decremento e são fornecidos por um

rotary encoder incremental que codifica a rotação de um eixo analógico em sinais elétricos.

Esta montagem, apenas como está representada, produz uma tensão entre 0V e 10 V, variando em passos de $10\text{ V}/256 \approx 40\text{ mV}$. No entanto, o circuito do potenciômetro digital completo, contém eletrônica adicional que permite controlar os dois potenciômetros do MAX5451 separadamente utilizando apenas um *rotary encoder*, alternando os comandos de incremento/decremento entre ambos e duplicando assim o número de intervalos possíveis para 512, logo a tensão passa a variar com o valor mínimo de 20 mV.

3.1.3 Bloco de Regulação e Controlo

Tendo em conta que as fontes foram projetadas para serem controladas por potenciômetros analógicos, estes por si só não fornecem nenhum tipo de regulação da tensão nas suas saídas. Dado que as resistências totais dos potenciômetros utilizados assumiam valores de 2 k Ω , 5 k Ω e 10 k Ω dependendo da fonte, no caso destes alimentarem uma carga que possa consumir corrente, a tensão de saída baixa automaticamente, porque neste caso, o divisor de tensão da Figura 3.15 vai ter uma resistência adicional em paralelo com R_2 , e quanto menor for essa resistência, mais baixa será a resistência equivalente das duas, e pela equação 3.2, a tensão de saída torna-se mais baixa.

Para evitar esta situação, existe um circuito que "separa" a tensão de saída do potenciômetro da saída da fonte, funcionando como um regulador de tensão em que a tensão de referência é imposta pelo próprio potenciômetro. Para melhor evidenciar este mecanismo, a Figura 3.19 apresenta uma versão simplificada do esquemático deste circuito, para uma fonte de 10 V.

Este circuito, assemelha-se a um regulador de tensão em série que utiliza um AmpOp. Este tipo de reguladores apresentam normalmente um diodo de *Zener* à entrada positiva do amplificador que impõe uma tensão de referência a manter à saída e a tensão de entrada a ser regulada é aplicada ao coletor do transístor. Na situação atual, a tensão de referência (V_{Ref}) é dada pelo potenciômetro, que é variável, e a tensão de entrada é dada pela tensão de alimentação do LM78L15. O AmpOp funciona como um comparador que compara a tensão de referência com a tensão de saída (V_{Out}) que é realimentada na entrada negativa do mesmo, sendo a tensão na sua saída (V_{Op}) uma função entre ($V_{Ref} - V_{Out}$). No caso de V_{Out} aumentar, V_{Op} diminui baixando a corrente conduzida pelo transístor Q_1 . Se V_{Out} se tornar superior a V_{Ref} , então V_{Op} vai ser negativo e o transístor Q_1 fica ao corte, o condensador C_3 que se encontrava anteriormente carregado, é descarregado por R_5 e conseqüentemente, a tensão de saída volta a baixar. Por outro lado, no caso de V_{Out} diminuir, o resultado de $V_{Ref} - V_{Out}$ aumenta, bem como V_{Op} . A tensão na base de Q_1 aumenta fazendo este conduzir mais corrente, carregando C_3 e aumentando a tensão de saída. Eventualmente, em ambos os casos, o op-amp irá estabilizar num estado tal que a diferença entre as tensões de entrada e saída seja pequena o suficiente para que Q_1 esteja a conduzir, e a corrente no seu emissor seja igual (em módulo) à corrente que percorre R_5 mantendo a tensão de C_3 estável.

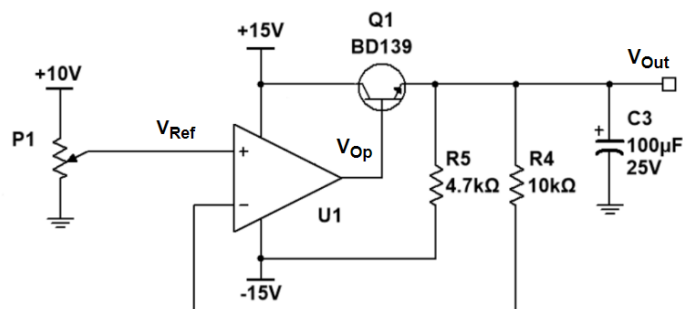


Figura 3.19: Esquema elétrico simplificado do regulador de tensão do potenciômetro utilizado numa fonte de 10 V.

No entanto, para além da regulação de tensão, este circuito inclui ainda alguns mecanismos de proteção contra inversões de polarização e curto-circuitos, bem como um limitador de corrente. O esquema elétrico do circuito completo deste bloco encontra-se representado na Figura 3.20. A resistência R_1 em conjunto com o condensador C_1 formam um filtro RC com uma frequência de corte de $1/(2\pi \times 10 \text{ k}\Omega \times 100 \text{ nF}) \approx 160 \text{ Hz}$, o que atenua pequenas variações súbitas de tensão e ruído provenientes do potenciômetro. Os pares de díodos D_1, D_4 e D_2, D_5 conduzem para tensões superiores a 15.7 V e inferiores a -0.7 V, respetivamente, desviando picos de tensão para a alimentação e inversões de polaridade para a massa. A resistência R_2 atua como um sensor de corrente, isto é, se a corrente na carga ultrapassar o valor de $0.6 \text{ V}/38 \Omega = 16 \text{ mA}$, o transistor Q_2 começa a conduzir (assumindo um V_{BE} igual a 0.6 V quando este se encontra na zona ativa), o que força uma passagem de corrente na resistência R_3 , aumentando a queda de tensão nos seus terminais, o que diminui a tensão na base de Q_1 e conseqüentemente, a corrente que este conduz para a saída. Caso exista algum escoamento de corrente em sentido inverso vindo da carga, esta corrente vai ser conduzida pelo diodo D_3 , protegendo ambos os transistores. C_2 é um condensador eletrolítico de desacoplamento, que filtra ruído alternado vindo da alimentação e atenua ainda mais o *ripple* existente. Por fim, o potenciômetro P_2 encontra-se ligado aos terminais de anulamento de *offset* do amplificador e é ajustado de forma a que a saída do AmpOp seja o mais próxima de zero possível, quando ambas as entradas estiverem à mesma tensão.

O circuito descrito acima, é específico para uma fonte de 10 V, em que a entrada do mesmo é igual à saída. No entanto, existem fontes que necessitam de fornecer 2 V e 150 V à saída, sendo todas estas controladas por potenciômetros alimentados a 10 V. Portanto, os circuitos de regulação destas fontes, apresentam algumas diferenças, sendo estas mais notáveis nas fontes de 150 V. Na Figura 3.21 pode observar-se o circuito de regulação completo para uma fonte de 2 V. A única diferença entre este circuito e o anterior, é a adição da resistência R_2 que forma um divisor de tensão à entrada não inversora do

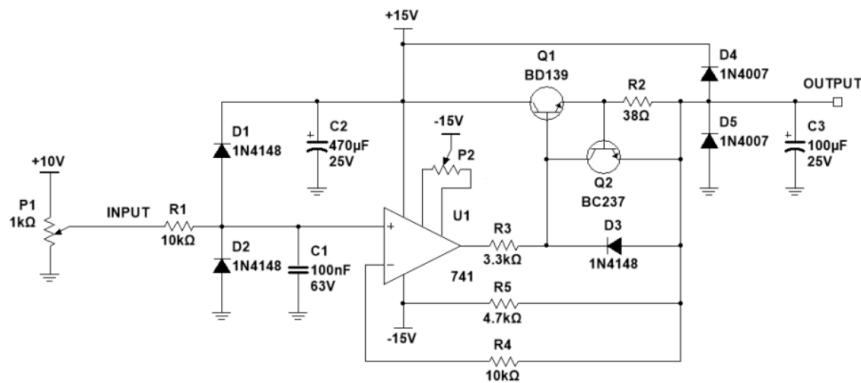


Figura 3.20: Esquema elétrico completo do circuito do regulador de tensão do potenciômetro utilizado numa fonte de 10 V, com utilização de um AmpOp LM741.

amplificador e que transforma a tensão de 0-10 V vinda do potenciômetro em uma tensão de 0-2 V. Devido à realimentação do AmpOp, a saída fica também limitada a 2 V.

Na Figura 3.22 está esquematizado o circuito elétrico completo do bloco de regulação de uma fonte de 150 V. Neste regulador, a tensão de entrada que vai ser regulada é fornecida por um transformador que se encontra fora da placa e que produz uma tensão no secundário de 110 VAC, que é retificada por uma ponte de diodos e filtrada pelo condensador C_2 , resultando numa tensão CC ligeiramente superior a 150 V e que é aplicada ao coletor do transistor de potência Q_1 . A tensão de referência (V_{Ref}) é introduzida pelo divisor de tensão criado pelas resistências R_3 , R_4 e o potenciômetro P_3 , que é ajustado para que a tensão aplicada à entrada não inversora do LM741 seja sempre 15 vezes inferior à tensão de saída (V_{Out}), para que esta seja igual à tensão aplicada à entrada inversora pelo potenciômetro. A tensão de saída do amplificador V_{Op} , varia consoante as diferenças de tensão nas suas entradas. Quando a tensão do potenciômetro diminui, V_{Op} aumenta, aumentando a tensão na base de Q_3 fazendo-o conduzir mais corrente, o que por sua vez aumenta a queda de tensão na resistência R_6 , baixando assim a tensão à saída e equilibrando de novo as entradas do AmpOp. Quando a tensão do potenciômetro aumenta, o circuito reage de forma inversa, mantendo sempre a saída estável e de acordo com a seguinte equação:

$$V_{Out} = 15 \cdot V_{Pot} \quad (3.4)$$

Os transístores BD232 utilizados, são transístores de potência que são capazes de operar a tensões de até 300 V, bem como a resistência R_6 e os condensadores C_2 e C_3 .

3.1.4 Inversor de Polaridade e Voltímetro

O inversor de Polaridade trata-se de um interruptor do tipo *double-pole double-throw* (DPDT), com seis pinos de entrada/saída e três posições possíveis. Estes interruptores encontram-se nos painéis frontais dos chassis e permitem comutar a tensão criada pelas fontes de alimentação para criar tensões negativas sempre que necessário. Na Figura

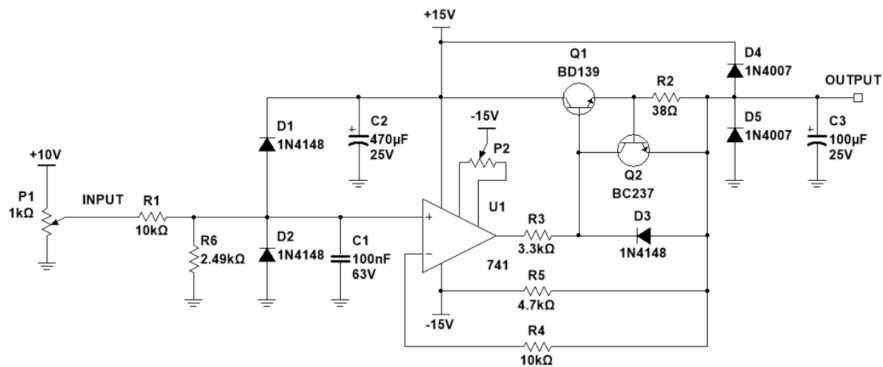


Figura 3.21: Esquema elétrico completo do circuito do regulador de tensão do potenciômetro utilizado numa fonte de 2 V, com utilização de um AmpOp LM741.

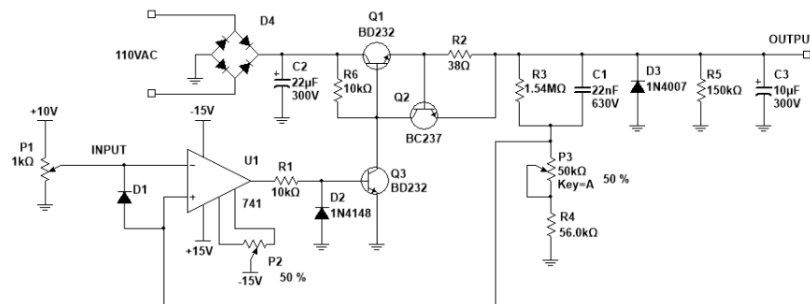


Figura 3.22: Esquema elétrico completo do circuito do regulador de tensão do potenciômetro utilizado numa fonte de 150 V, com utilização de um AmpOp LM741.

3.23 encontra-se uma representação simbólica do interruptor, com as ligações entre os diferentes pinos do mesmo. A saída da fonte (*OUTPUT*) está conectada aos pinos 1 e 6 do interruptor, enquanto que o *ground* da mesma (*GND*) está conectada aos pinos 3 e 4. A BNC que conduz tensão positiva (*BNC UP*) e a entrada positiva do voltímetro (*VOLT HI*) ligam-se ao pino 2, enquanto que a BNC negativa (*BNC DOWN*) e a entrada negativa do voltímetro (*VOLT LO*) estão ligados ao pino 5 do interruptor. Quando este se encontra na primeira posição, a tensão de saída é direcionada para o BNC superior, e a terra para o BNC inferior; assim, a tensão na lente é igual à tensão da saída da fonte. Na segunda posição, ambos os conectores BNC encontram-se desligados, pelo que a lente fica a flutuar. Na terceira e última posição, o BNC superior está ligado à terra, enquanto o BNC inferior está ligado à saída, e a tensão na lente e no voltímetro são iguais em módulo à tensão da fonte.

Os voltímetros de cada fonte estão localizados também nos painéis do chassis junto aos potenciômetros e interruptores. São voltímetros digitais, constituídos por mostradores LCD de 3 1/2 dígitos e um IC montados numa PCB. Uma vez que os voltímetros estão

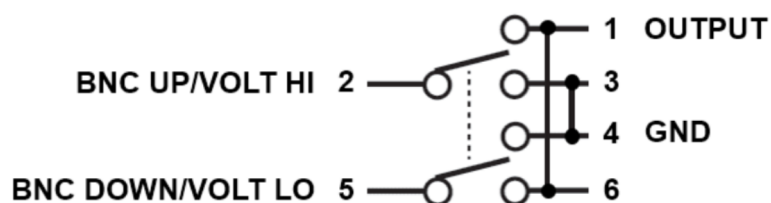


Figura 3.23: Representação simbólica do interruptor e das ligações entre os respectivos pinos, retirado de [35].

conectados às entradas das BNC's, os mostradores também mostram as mudanças de sinais causadas pelo interruptor. Quando este se encontra na segunda posição, o mostrador indica uma tensão de 0 V.

O circuito de alimentação de uma das placas dos voltmímetros encontra-se esquematizado na Figura 3.24.

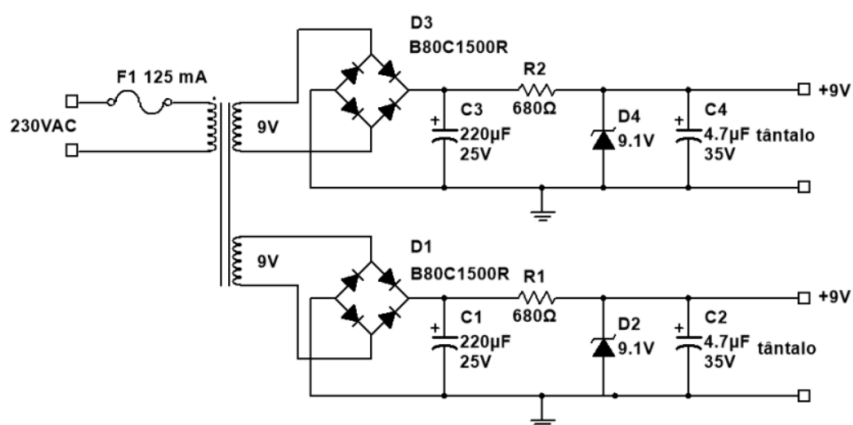


Figura 3.24: Esquemático de duas fontes de alimentação de voltmímetros que fornecem tensões iguais a 9 V, com a representação dos retificadores, condensadores e reguladores de Zener.

Desenvolvimento Prático

Conforme observado no Capítulo 3, as placas das fontes de alimentação utilizadas no equipamento de feixes cruzados do TEM, apresentam diversos problemas que comprometem a otimização do feixe de elétrons. Nomeadamente, os desgastes físicos visíveis dos componentes utilizados e a deficiente organização das pistas que conectam os diversos componentes, introduzem ruídos indesejados no sistema que afetam a precisão e estabilidade da tensão que produzem, refletindo as limitações da tecnologia da altura em que estas foram desenvolvidas. Dado estas limitações, pretendeu-se desenhar e implementar novas fontes de alimentação recorrendo à tecnologia PCB mais recente e de alta qualidade. Estas novas placas devem ser substitutos diretos das placas anteriores tanto em termos de montagem como de operação e manter as mesmas entradas e saídas.

No entanto, aproveitando a existência de pinos inutilizados nos conectores das placas, decidiu-se complementar as mesmas com um circuito extra que isola galvanicamente o sinal da saída da fonte utilizando um opto-acoplador, para que este sinal possa ser lido mais tarde por um *software* de aquisição de dados no computador.

Neste capítulo serão discutidas todas as propostas de alteração aos circuitos já existentes, vão ser realizadas e analisadas simulações aos novos circuitos, e por fim, será demonstrado o processo para o projeto de protótipos das novas placas em PCB e a respetiva análise de resultados.

4.1 Dimensionamento

Concluída a análise dos esquemáticos das fontes existentes, foi possível deduzir-se algumas alterações pertinentes aos seus circuitos. No dimensionamento dos novos circuitos, teve-se como objetivos a redução do número de componentes utilizados sempre que possível e a substituição dos componentes discretos por equivalentes em SMD, de modo a economizar-se espaço e facilitar o desenho das PCBs, minimizando assim o ruído total produzido pelos componentes.

4.1.1 Fonte de 10 V

Observando o bloco de controlo das fontes de 10 V (Figura 3.20), este, tal como referido no capítulo anterior, representa um regulador em série em que a sua tensão de referência é dada pela tensão de saída do potenciómetro digital e a tensão de entrada é a tensão de alimentação. Assim, foi posta a hipótese de substituir este circuito completo por apenas um regulador de tensão integrado ajustável e que realize as mesmas funções que o bloco de controlo. No entanto, existem alguns requisitos importantes para a escolha do mesmo. Nomeadamente, a tensão mínima de saída do regulador necessita de ser menor ou igual à tensão mínima de saída do potenciómetro (88 mV), e a tensão de referência deve poder ser ajustada diretamente ou indiretamente através do potenciómetro digital.

O candidato escolhido para a função é o LT3042. É um regulador linear de alta performance com ruído eficaz muito baixo (cerca de $0.8 \mu V_{RMS}$ para frequências dos 10 Hz - 100 kHz) e uma rejeição de *ripple* (PSSR) bastante alta (110 dB @ 50 Hz), além disso, fornece ótimas regulações de linha e de carga, sendo ideal para aplicações de instrumentação de baixo ruído, fontes de alimentação de precisão, etc. Este dispositivo, é capaz de fornecer uma corrente de até 200 mA, possui uma queda de tensão típica de 350 mV entre a entrada e a saída e tem um consumo de 2 mA quando se encontra ativo. O LT3042 regula tensões de entrada que podem variar entre os 1.8 V até aos 20 V e pode fornecer tensões entre 0 V a 15 V regulados, mantendo sempre ganho unitário e providenciando um ruído baixo, rejeição de *ripple*, largura de banda e regulação de carga constantes. Adicionalmente, o regulador possui um limitador de corrente programável, bem como proteção integrada contra inversões de polaridade [37]. Uma aplicação típica deste regulador fornecida pelo *datasheet* do componente pode ser observada na Figura 4.1.

Como se pode observar na imagem fornecida pelo *datasheet* do componente, o LT3042 incorpora uma fonte de corrente que faz fluir $100 \mu A$ (I_{SET}) pela saída do pino SET, o que por sua vez também se encontra ligado à entrada inversora do amplificador operacional de erro. Conectar uma resistência (R_{SET}) entre o pino SET e o GND gera uma tensão de referência V_{SET} para o amplificador de erro. Assim, a tensão de saída do LT3042 ($V_{OUT} = V_{SET}$) é definida através da seguinte expressão [37]:

$$V_{OUT} = R_{SET} \cdot I_{SET} \quad (4.1)$$

Adicionalmente, é utilizado um condensador de *bypass* conectado em paralelo com R_{SET} para reduzir o ruído e melhorar o PSSR.

É possível limitar a corrente fornecida pelo regulador conectando uma resistência (R_{IOUT}) entre o pino ILIM e GND. O limite de corrente (I_{LIM}) é dado pela seguinte expressão [37]:

$$I_{LIM} = \frac{125 \text{ mA} \cdot \text{k}\Omega}{R_{IOUT}} \quad (4.2)$$

Assim, de modo a se obter por exemplo uma tensão de 10 V à saída com uma corrente máxima na carga de 125 mA, é necessário conectar uma resistência de 150 k Ω ao pino

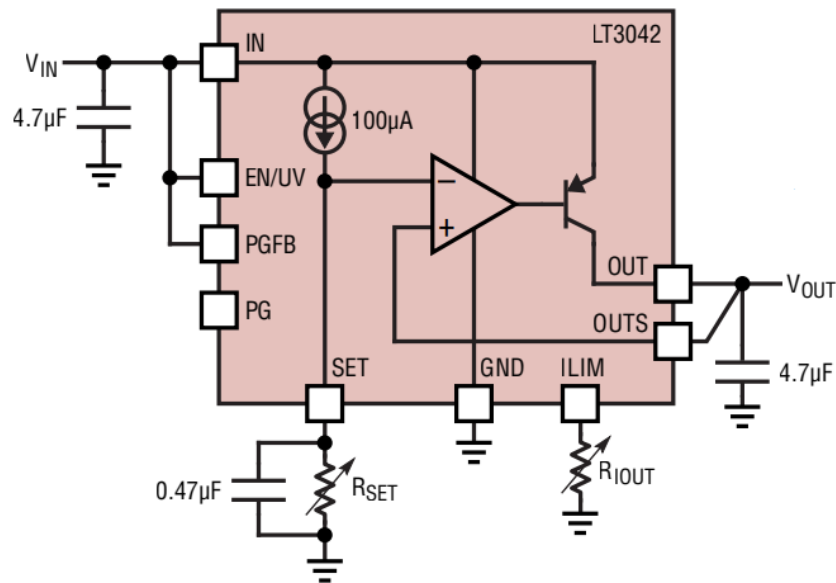


Figura 4.1: Aplicação típica do regulador linear integrado LT3042, com resistência R_{SET} que ajusta a tensão de saída e R_{IOUT} que define o limite de corrente à saída, adaptado de [37].

SET e uma resistência de 1 k Ω ao pino ILIM e ter uma tensão aplicada à entrada superior a 10.35 V.

Por outro lado, é referido também no *datasheet* do componente, que para aplicações que requerem uma precisão mais elevada ou uma tensão à saída ajustável, pode ser aplicada uma tensão de referência diretamente no pino SET fornecida por uma fonte de tensão que seja capaz de absorver os 100 μ A. Adicionalmente, conectar uma tensão de referência diretamente ao pino SET elimina erros presentes na tensão de saída devido à corrente de referência e às tolerâncias da resistência do pino SET [37].

Tendo em conta o esquemático do potenciômetro digital da Figura 3.18, o *Output* do mesmo encontra-se à saída do AmpOp TLV2370, e sabendo que este componente pode conduzir uma corrente de até 100 mA no sentido inverso e tem uma impedância de saída muito próxima de zero [38], o potenciômetro digital comporta-se como uma fonte de tensão ajustável. Portanto, é possível conectar a saída do potenciômetro digital ao pino SET do LT3042 e fornecer diretamente a tensão de referência ao componente.

Ao contrário do circuito do bloco de controlo que é alimentado por ± 15 V, o LT3042 necessita apenas de uma tensão positiva ligeiramente superior à tensão a regular. Assim, e tendo em conta que no circuito do potenciômetro digital encontra-se implementado um LM7805 que regula a tensão de alimentação para 5 V para alimentar o MAX5451, decidiu-se utilizar apenas um regulador de 12 V que alimenta diretamente o potenciômetro e o LT3042, deixando de ser necessário o regulador LM723. No entanto, o circuito isolador, tal como será visto mais adiante, é alimentado com duas tensões de ± 5 V, assim

foi escolhido um transformador com duplo enrolamento no secundário capaz de fornecer duas tensões diferentes e foram implementados os reguladores integrados L78L05 e L79L05 que fornecem as tensões reguladas de +5 V e -5 V respectivamente. O novo bloco de alimentação para a fonte de 10 V encontra-se esquematizado na Figura 4.2. O circuito foi desenhado utilizando o *software* EasyEDA, ferramenta também utilizada no projeto dos PCBs.

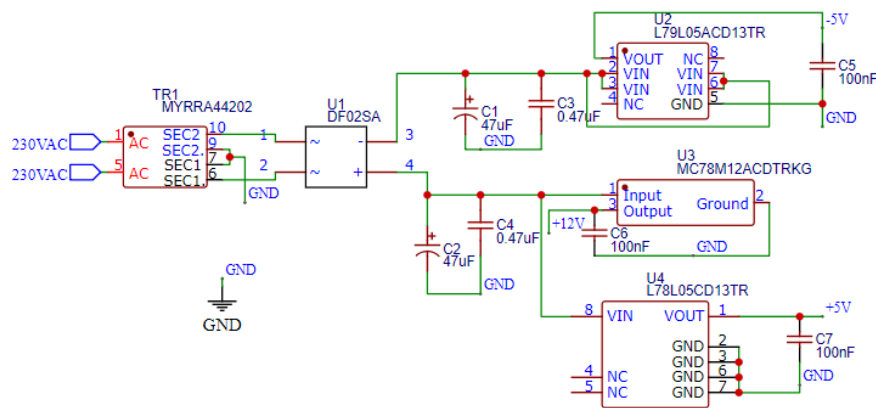


Figura 4.2: Esquema elétrico do novo bloco de alimentação, com transformador, ponte de diodos, condensadores eletrolíticos e de cerâmica e reguladores de tensão, desenhado com o *software* EasyEDA.

O componente utilizado para regular os 12 V é o integrado MC78M12, que apresenta uma rejeição de ripple de 80 dB em condições normais de funcionamento. O transformador escolhido (MYRRA44202) apresenta duplo enrolamento no secundário com respectivas tensões de 15 VAC e uma potência de 3.2 VA podendo fornecer uma corrente de até 107 mA em cada enrolamento. Foram utilizados condensadores eletrolíticos de 47 μF à saída da ponte de diodos (DF02SA) para a rejeição de ripple e, tal como recomendado nos *datasheets* dos componentes foram implementados condensadores de cerâmica de *bypass* na entrada e saída de cada regulador que eliminam possíveis ruídos presentes.

Por fim, na Figura 4.3 encontram-se esquematizadas as ligações elétricas ao LT3042, como tensão de entrada, o componente recebe os 12 V regulados anteriormente, e tem na saída V_{out} a tensão regulada dada como referência ao pino SET diretamente a tensão do potenciômetro digital. Adicionalmente, foi conectada uma resistência (R1) de 12.4 k Ω ao pino ILIM que de acordo com a equação 4.2 limita a corrente à saída para 10 mA, oferecendo proteção à respectiva lente eletrostática contra correntes mais elevadas. De acordo com a aplicação típica fornecida pelo *datasheet* do LT3042 da Figura 4.1, foram implementados condensadores de *bypass* de 4,7 μF na entrada e saída do regulador para atenuar ruídos e oferecer estabilidade.

De forma a validar o funcionamento dos circuitos demonstrados acima, o conjunto foi simulado utilizando o *software* LTspice XVII. Este *software* possui uma vasta lista de componentes reais e simuláveis e apresenta resultados próximos aos valores reais. Assim, a Figura 4.4 ilustra a simulação realizada, onde é possível observar a competência deste

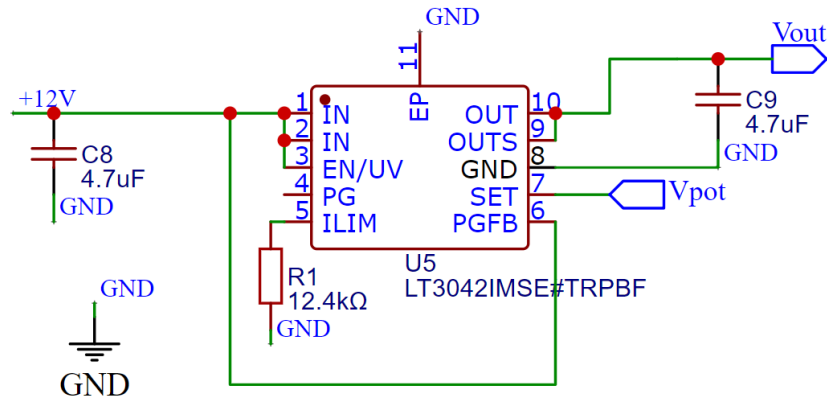


Figura 4.3: Esquema elétrico do novo bloco de controlo, com representação do regulador LT3042 e das respetivas ligações elétricas, desenhado com o *software* EasyEDA.

circuito e do LT3042 quando a tensão do potenciômetro se encontra a 5 V.

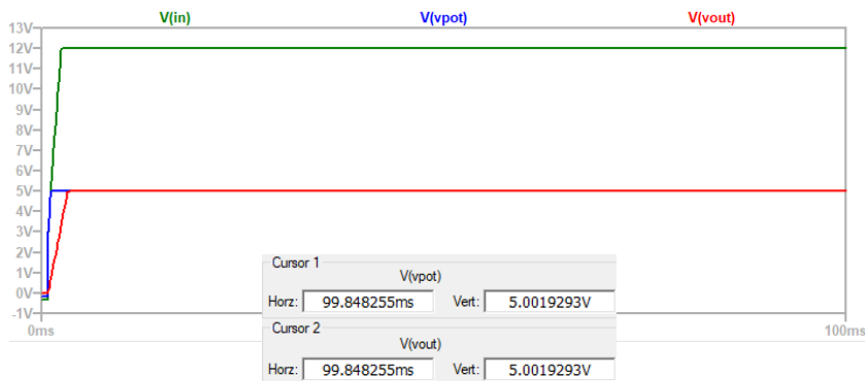


Figura 4.4: Simulação elétrica realizada no *software* LTspice XVII do novo circuito proposto para a fonte de 10 V quando a tensão do potenciômetro se encontra a 5 V. V_{out} - tensão à saída do LT3042 e da fonte, V_{pot} - tensão do potenciômetro, V_{in} - tensão de entrada do LT3042.

O circuito foi simulado com vários valores de 0-10 V para a tensão do potenciômetro, obtendo sempre uma tensão igual na saída.

4.1.2 Fonte de 2 V

Tal como descrito no capítulo anterior, a única diferença do bloco de controlo da fonte de 2 V para o bloco de controlo da fonte de 10 V é a existência de um divisor de tensão à entrada do mesmo que divide a tensão do potenciômetro por 5 para que a saída da fonte tenha assim uma tensão de 0-2 V. Para o novo circuito da fonte de 2 V, seguiu-se a mesma técnica: partindo do circuito novo para a fonte de 10 V, implementou-se um divisor de tensão entre o pino de entrada do conector da placa que contém a tensão do potenciômetro e o pino SET do LT3042. No entanto, dado a existência da corrente

constante de $100 \mu\text{A}$ que flui do pino SET, foi necessário implementar um seguidor de tensão após o divisor de tensão de modo a baixar a impedância e o AmpOp absorver essa corrente. A Figura 4.5 esquematiza a alteração proposta.

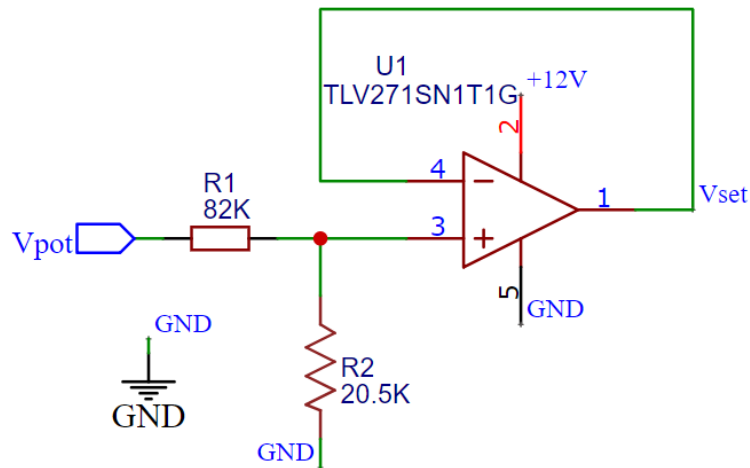


Figura 4.5: Esquemático elétrico do divisor de tensão mais seguidor de tensão implementado entre o pino de entrada do conector da placa que contém a tensão do potenciômetro e o pino SET do LT3042. Vpot- tensão do potenciômetro; Vset- tensão de entrada do pino SET do LT3042, desenhado no *software* EasyEDA.

As resistências foram dimensionadas para que a tensão à entrada positiva do amplificador seja 5 vezes inferior à tensão fornecida pelo potenciômetro, para tal é necessário que se verifique a seguinte equação: $R1 = 4R2$. Adicionalmente, a escolha do valor das resistências teve também em conta as combinações de resistências existentes em stock dos fornecedores e que seguem a equação.

Tal como no caso da fonte de 10 V , este novo circuito foi simulado no *software* LTspice XVII, e os resultados obtidos encontram-se representados na Figura 4.6. Quando a tensão do potenciômetro se encontra a 10 V a tensão do pino SET do LT3042 encontra-se a uma tensão de 2 V , e a tensão de saída é igual à tensão V_{set} .

4.1.3 Fonte de 150 V

O circuito do bloco de controlo da fonte de 150 V , tal como visto anteriormente, apresenta também semelhanças em termos de funcionamento a um regulador de tensão em série. Apesar disto, alguns dos seus componentes são componentes de potência, isto é, estão preparados para conduzir e dissipar altos níveis de energia, portanto apresentam também um tamanho maior relativamente aos restantes componentes, pelo que, não existem reguladores integrados que estejam preparados para operar com tensões tão elevadas quanto 150 V . Assim, e uma vez que o circuito atualmente implementado para o bloco de controlo da fonte de 150 V funciona corretamente, decidiu-se não se realizar alterações

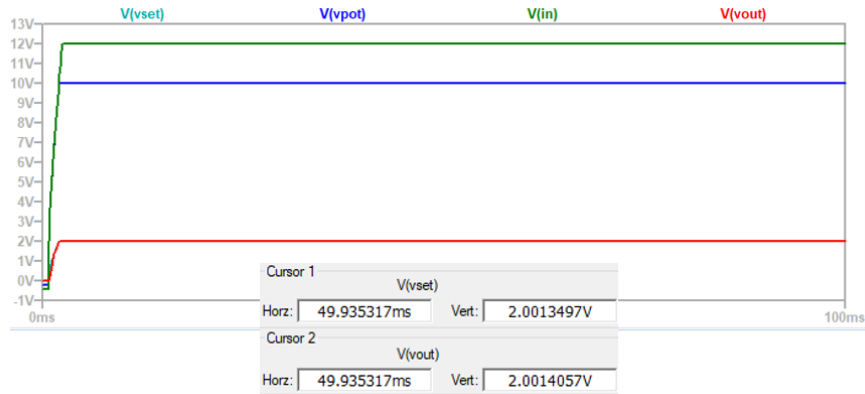


Figura 4.6: Simulação elétrica realizada no *software* LTspice XVII do novo circuito proposto para a fonte de 2 V. Quando a tensão do potenciômetro se encontra a 10 V a tensão do pino SET do LT3042 encontra-se a uma tensão de 2 V. V_{out} - tensão à saída do LT3042 e da fonte, V_{in} - tensão de entrada do LT3042, V_{pot} - tensão do potenciômetro, V_{set} - tensão do pino SET do LT3042.

Tabela 4.1: Valores de tensão e corrente dos componentes de potência do bloco de controlo da fonte de 150 V registados após as simulações para três valores de tensão do potenciômetro, e respetivas potências dissipadas calculadas.

Vpot (V)	Vo (V)	VR6	VR6,Q3 (V)	IR6 (mA)	Ic(Q2) (mA)	Pd(R6) (W)	Pd(Q2) (W)	Pd(Q3) (W)
0.088	1.314	148.903	147.078	14.708	0.008	2.163	0.001	0.027
5	74.991	148.877	73.955	7.395	0.451	0.547	0.068	0.554
10	149.619	150.453	0.129	0.013	1.286	0	0.193	0.002

significativas ao seu circuito, mas sim apenas a substituição dos seus componentes por alternativas compatíveis e em SMD sempre que possível.

Começou-se então por se simular o circuito da Figura 3.22, para que fosse possível deduzir valores de potências dissipadas máximas para os componentes de potência. Realizaram-se simulações para três valores de tensão do potenciômetro e registaram-se os valores de tensão e corrente em cada componente, o que permitiu calcular as potências máximas dissipadas por cada um. Na Figura 4.7, encontra-se representado o resultado de uma destas simulações quando a tensão do potenciômetro digital se encontra no valor mínimo de 88 mV e na Tabela 4.1 estão descritos os valores registados das simulações e as respetivas potências dissipadas em cada componente, depois de o circuito estabilizar ($t > 100$ ms), para $V_{pot} = \{0,088; 5; 10\}$ V.

Analisando estes resultados, verifica-se facilmente que o componente que dissipa maior energia é a resistência R6 (2.163 W) quando o potenciômetro marca a tensão mínima. De seguida, o transístor Q3 dissipa um máximo de 0,554 W quando o potenciômetro se encontra na posição central e o transístor Q1 dissipa no máximo 0.193 W em condições normais de funcionamento da fonte (sem nenhuma carga aplicada). Apesar disto, a fonte precisa de estar preparada para conduzir correntes mais elevadas em casos

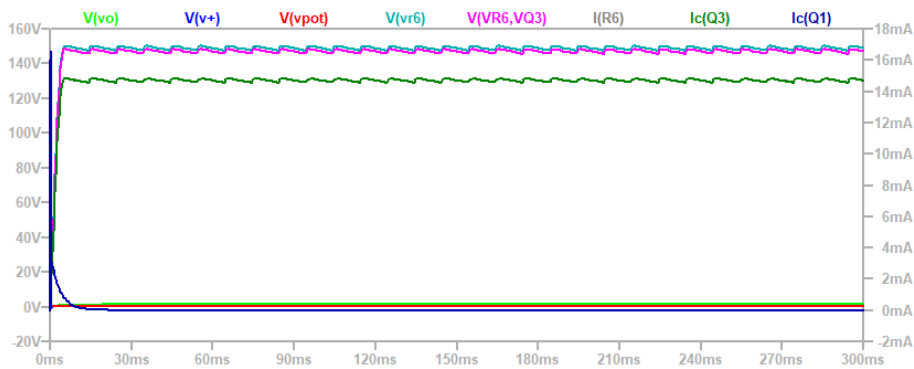


Figura 4.7: Simulação elétrica realizada no *software* LTspice XVII do circuito do bloco de controlo da fonte de 150 V quando o potenciômetro indica a tensão mínima (88 mV). V_o - tensão de saída da fonte, V_{+-} tensão na entrada positiva do LM741, V_{pot} - tensão do potenciômetro, V_{R6} - tensão na resistência R6 e no coletor do transistor Q1, $V_{R6,Q3}$ - Queda de tensão na resistência R6, I_{R6} - Corrente na resistência R6, I_{CQ3} - Corrente no coletor de Q3, I_{CQ2} - Corrente no coletor de Q2.

extraordinários sem comprometer o funcionamento do circuito e dos componentes. Assim, e uma vez que existe também um limitador de corrente implementado para 16 mA, a potência máxima que o transistor Q1 deve ser capaz de operar é no mínimo 2.4 W (150 V \times 16 mA).

Foi dimensionado e desenhado o novo circuito para a fonte de 150 V no *software* EasyEDA, que se encontra representado na Figura 4.8 , onde é possível observar os novos componentes escolhidos para substituir os anteriores. A resistência R6 e os transistores Q1 e Q3, foram substituídos por equivalentes em SMD capazes de operar a tensões superiores a 200 V e com potências máximas de 3 W.

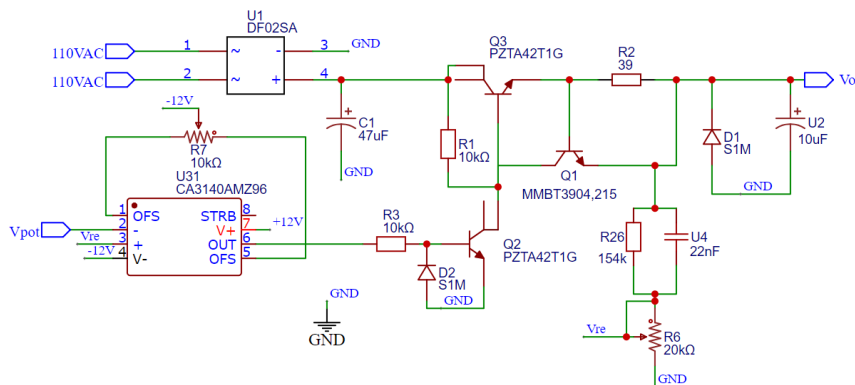


Figura 4.8: Esquemático do novo bloco de controlo para a fonte de 150 V, desenhado utilizando o *software* EasyEDA.

O LM741 foi substituído pelo equivalente em SMD CA3140A e alterou-se as tensões de alimentação para +12 V e -12 V. Assim, o bloco de alimentação também sofreu alterações e pode ser visto o seu novo circuito na Figura 4.9. A tensão de 30 VAC é fornecida à placa pelo mesmo transformador externo, através de dois pinos no conector e é processada pela

ponte de diodos DF02A. São criadas as tensões de ± 12 V e ± 5 V reguladas que alimentam o amplificador CA3140A e o circuito isolador tal como nas fontes de 2 V e 10 V.

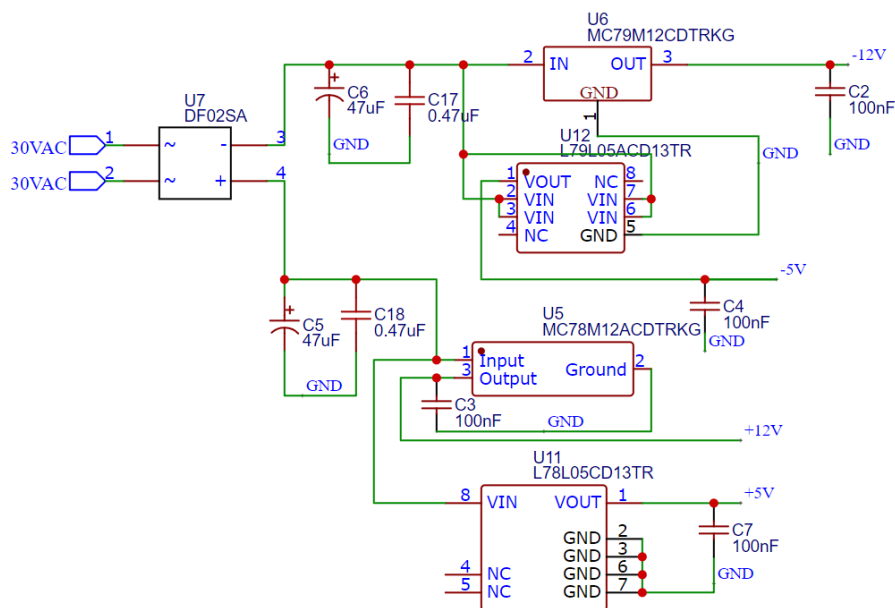


Figura 4.9: Esquemático do novo bloco de alimentação para a fonte de 150 V, desenhado utilizando o *software* EasyEDA.

4.1.4 Circuito de Isolamento

No âmbito de uma outra dissertação de mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores desenvolvida em paralelo com este trabalho no mesmo equipamento, que tem como objetivo o registo e controlo das tensões aplicadas às lentes eletrostáticas, desenvolveu-se um circuito capaz de isolar galvanicamente o sinal à saída das fontes. Dado que nem todas estas têm como referência a massa, tal como demonstrado no esquema elétrico do equipamento da Figura 3.2 e por se tratar em alguns casos de tensões relativamente elevadas (superiores a 100V), este circuito torna-se fundamental para preservar a integridade dos equipamentos a jusante utilizados na leitura das tensões das fontes.

Este circuito tem como base o foto-acoplador IL300 da *Vishay Components* que, tal como qualquer outro foto-acoplador, permite a transmissão do sinal através de um sinal óptico, convertendo a tensão do sinal de entrada através de um LED emissor e reproduzindo o mesmo sinal à saída através de um foto-díodo recetor. Desta forma, o sinal é transmitido sem recurso a qualquer contacto elétrico, garantindo-se assim a proteção contra picos de corrente. Estando a placa de aquisição de sinal ligada ao computador do equipamento e, conseqüentemente, à massa, torna-se prudente garantir este isolamento para tensões com referências distintas. Adicionalmente, o IL300 possui um segundo foto-díodo no qual é gerado um sinal de feedback que garante uma resposta linear aos sinais de entrada. O circuito completo é apresentado na Figura 4.10.

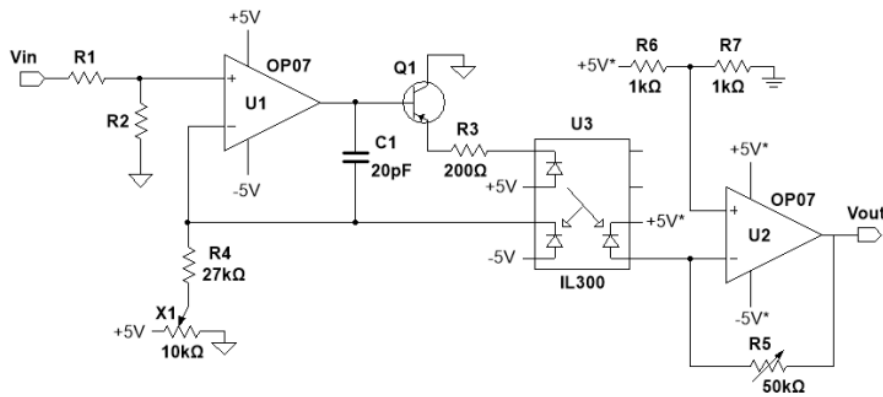


Figura 4.10: Esquemático do circuito de isolamento que incorpora o fotoacoplador IL300, implementado no circuito das fontes para isolar o sinal de saída das mesmas, adaptado de [39].

Tal como o seu propósito faz evidenciar, as alimentações da entrada e da saída do circuito são distintas, sendo a primeira proveniente da própria fonte e a segunda de uma fonte externa. Igualmente, as referências (ground) da entrada e da saída são distintas.

Na entrada do circuito encontra-se um divisor de tensão que transforma o sinal para valores entre 0-1 V ou -1-0 V (dependendo do sentido do sinal de entrada) para os quais o foto-acoplador apresenta máxima linearidade. Este divisor de tensão está ligado à entrada não inversora de um AmpOp, no qual é feita a pré polarização da entrada inversora com o sinal de feedback proveniente do segundo fotodíodo de modo a garantir a resposta a tensões negativas. Esta pré polarização é ajustável por via do potenciómetro X1 que, conseqüentemente, ajusta o offset do sinal.

A saída do foto-acoplador encontra-se ligada a um amplificador de transimpedância (TIA) que converte o sinal proveniente do fotodíodo de volta num sinal de tensão, correspondente ao sinal de saída isolado. O ganho do circuito é ajustável através de R5, também variável, e pretende-se que este seja unitário. O seu ajuste deve-se ao facto de existir no processo de fabrico dos foto-acopladores alguma variabilidade, explicitamente discriminada na ficha técnica do mesmo, o que poderá requerer compensação através do ganho para garantir a precisão necessária.

Pretendeu-se garantir um ganho unitário e um offset de 0V, bem como uma resposta aos sinais de ± 2 V, ± 10 V e ± 150 V.

Por estar ligado diretamente à saída das fontes e uma vez que estas já iriam ser atualizadas, fez sentido incluir na mesma placa também este circuito, simplificando assim a sua integração no chassis onde se encontram instaladas as fontes. Adicionalmente, a existência de pinos livres que podem ser utilizados para as entradas e saídas deste circuito facilita as restantes ligações necessárias para a implementação do sistema completo.

A integração deste circuito com as fontes é realizada através do divisor de tensão à entrada do mesmo, constituído pelas resistências R1 e R2, que converte a tensão de saída de cada fonte numa tensão de 0-1 V. As resistências apresentam valores diferentes para

Tabela 4.2: Valores das resistências que constituem o divisor de entrada do circuito de isolamento, para cada fonte de alimentação.

Fonte	R1 (Ω)	R2 (Ω)	R1/R2
2 V	2 M	2 M	1
10 V	1.8 M	200 k	9
150 V	1.1 M	7.4 k	149

cada tipo de fonte e podem ser visualizadas na Tabela 4.2.

Arbitraram-se valores para as resistências R1 com impedâncias altas ($> 1 \text{ M } \Omega$) de forma a minimizar a correntes consumidas pelas fontes e evitar alterações nas tensões de saída. A relação entre as resistências foi calculada adaptando a expressão do divisor de tensão dada em 3.2, onde V_H é dado pela saída de cada fonte, V_L é a referência de cada fonte (sempre 0), e V_W a tensão de entrada do circuito isolador.

4.2 Desenho das PCBs e Prototipagem

Tal como mencionado anteriormente, para o projeto das PCBs, foi utilizado o *software* EasyEDA. Este software de acesso gratuito, permite a criação e edição de esquemáticos, a realização de simulações SPICE de circuitos analógicos e digitais, criação e edição de *layouts* para PCBs e, opcionalmente, também oferece serviços para fabricação dos mesmos. Grande parte dos componentes utilizados nos esquemáticos, estão presentes nas vastas bibliotecas inclusas no programa, que para além dos componentes, contêm também os símbolos, as *footprints* ("pegadas") para o *layout* do PCB e modelos 3D dos mesmos, o que facilita a visualização e verificação mais realística durante a realização do projeto. Durante a elaboração dos esquemáticos, foi necessário selecionar o encapsulamento de cada componente, pois é este que dita a *footprint* do componente no *layout* da PCB. A seleção de cada componente e do respetivo modelo/encapsulamento foi baseada sempre que possível na combinação dos seguintes factores: características elétricas, encapsulamento SMD, *stock* disponível nas vendedoras online *Digi-Key* e *Farnell*, valor monetário, e existência da "pegada" desse modelo nas bibliotecas do programa EasyEDA. Nos casos onde não existiam as *footprints* de determinados componentes, foi necessário criá-las manualmente no programa, recorrendo aos *datasheets* desses modelos para verificar as dimensões recomendadas para as máscaras de soldadura ou para os furos no caso de o componente ter uma montagem do tipo *through hole*. Felizmente, o EasyEDA dispõe de uma ferramenta para criação automática de *footprints* para a maioria dos encapsulamentos, o que facilitou este processo.

Cada placa PCB enquadrrou duas fontes de tensão independentes. Para o propósito deste trabalho, foram fabricadas e testadas duas placas protótipo, a primeira contendo uma fonte de 2 V e outra de 10 V e a última terá duas fontes de 150 V idênticas. Portanto,

realizaram-se dois esquemáticos diferentes, cada um para cada conjunto de fontes.

De forma a se facilitar a montagem das novas placas nas *racks* metálicas, decidiu-se implementar os mesmos tipos de conectores machos do tipo DIN 41617 de 31 pinos atuais e seguir o mesmo mapeamento para as ligações aos pinos que as fontes anteriores. Verificou-se também que, na montagem atual, nem todos os pinos dos conectores se encontravam sob utilização, o que permitiu definir cinco novos pinos necessários aos circuitos de isolamento de cada fonte (alimentação e saídas). O esquema de ligação dos pinos e as respetivas funcionalidades para cada placa podem ser visualizados no Apêndice A.

O único conector que foi encontrado e disponível para entrega que fosse compatível com a montagem em questão é o 101E10119X do fabricante CONEC. Infelizmente, dado a raridade deste componente, as bibliotecas do EasyEDA não reconhecem a sua existência e a ferramenta para desenho de *footprints* também não possui um *template* para o seu encapsulamento. Sendo assim, teve de se criar um símbolo e a respetiva "pegada" do mesmo de modo a incluí-lo na *layout* da PCB. Para isso, recorreu-se à ficha técnica do componente de onde foram retiradas as informações necessárias para realizar o procedimento, sendo estas a sua dimensão total, a distância entre os furos e o diâmetro dos mesmos. Estes valores podem ser observados na Figura 4.11, bem como a pegada completa do componente.

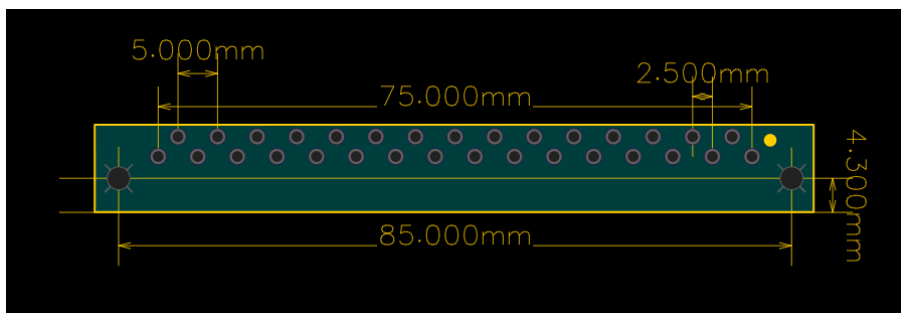


Figura 4.11: *Footprint* do conector 101E10119X CONEC desenhado utilizando o *software* EasyEDA, com indicação dos valores essenciais para o seu dimensionamento, retirados da ficha técnica do componente [40].

Concluída a escolha de todos os componentes, encomenda dos mesmos às vendedoras *online*, esquematização dos circuitos e obtenção dos *footprints*, restou apenas avançar com o desenho das PCBs. Decidiu-se que a placa teria componentes em ambos os lados, como forma a maximizar o número de objetos por unidade de área. Uma vez que se conseguiu alcançar uma redução no número e no tamanho das peças a utilizar em cada fonte, comparativamente às anteriores, permitiu definir-se uma nova dimensão às placas mais reduzida e compacta. Assim, analisando os *footprints* dos objetos preveu-se que estes poderiam acomodar-se facilmente numa área de $10 \times 8 \text{ cm}^2$, diminuindo assim o comprimento das placas para metade, sendo que a largura destas está limitada ao comprimento do conector que tem sensivelmente 10 cm, não sendo alvo de alterações. Com

os componentes e as dimensões da placa configurados, restou definir os parâmetros das pistas (*traces*), que estabelecem as ligações entre os pinos dos componentes. De especial relevância foi a escolha da largura das pistas: este parâmetro deve depender da corrente que percorre o circuito e temperatura de operação do mesmo [41]. Dado a baixa potência dos circuitos das fontes, e dimensões dos pinos dos componentes, optou-se pelo valor típico de 0.3 mm.

Apesar de o *software* EasyEDA incluir uma ferramenta de *autorouting*, esta funcionalidade apenas faz as ligações entre os componentes quando estes já se encontram dentro dos limites definidos para a placa e nem sempre apresenta a melhor solução, assim, todos os componentes, pistas e vias (furos) foram colocados manualmente, sendo que as suas posições foram alteradas inúmeras vezes até se chegar a uma solução plausível. Para facilitar a organização, alguns componentes de grupos similares tais como condensadores eletrolíticos, retificadores, reguladores de tensão e outros ICs foram mantidos juntos e do mesmo lado da placa para ambas as fontes. Na placa das fontes de 2 V e 10 V, os transformadores foram colocados na extremidade oposta ao conector e no mesmo plano da placa. No *layout* das fontes de 150 V, os componentes de potência foram mantidos ligeiramente separados uns dos outros, bem como dos restantes componentes, prevendo um aumento de temperatura aquando do seu funcionamento na região onde estes serão soldados. Os condensadores de cerâmica de *bypass* que fornecem uma otimização na estabilidade e resposta transiente dos reguladores, foram colocados o mais perto possível das entradas/saídas dos respetivos reguladores de tensão, seguindo as recomendações descritas nas suas fichas técnicas. No final, foram introduzidos planos de cobre para a massa (*Ground Planes*) para cada fonte da placa e que ocupam as áreas totais dos circuitos em ambos os lados nas regiões onde não existem pistas nem vias. A ligação entre os planos de massa entre as camadas da placa foi realizada adicionando vias¹. Os modelos 3D de cada placa podem ser visualizados nas Figuras 4.12 e 4.13.

Concluído o projeto das PCBs, realizaram-se testes DRC para verificar se as regras de *design* foram cumpridas, e após a correção de todas as falhas existentes e a devida aprovação do sistema, adquiriram-se os arquivos de fabricação das PCBs (*Gerber Files*, fornecidas pelo próprio *software* e que foram devidamente transmitidas para fabricação e envio. Estes arquivos contêm todas as indicações acerca do projeto necessárias à fabricação das placas.

4.3 Montagem e Testes

Após a chegada de todo o material, procedeu-se à montagem dos protótipos. Os componentes foram soldados nas placas utilizando maioritariamente apenas um ferro de ponta fina, fios de estanho com 0,5 mm e 1 mm de diâmetro e fluxo para solda. Utilizou-se

¹O próprio *software* realiza este processo de forma automática, sendo apenas preciso dar como parâmetros o diâmetro desejado para as vias e o espaçamento mínimo entre estas e as pistas.

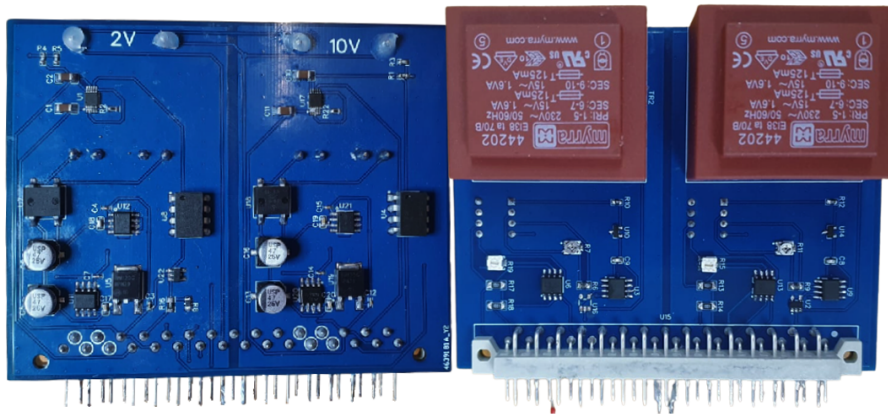


Figura 4.14: Fotografias de ambos os lados do protótipo da PCB com as fontes de 2V e 10 V.

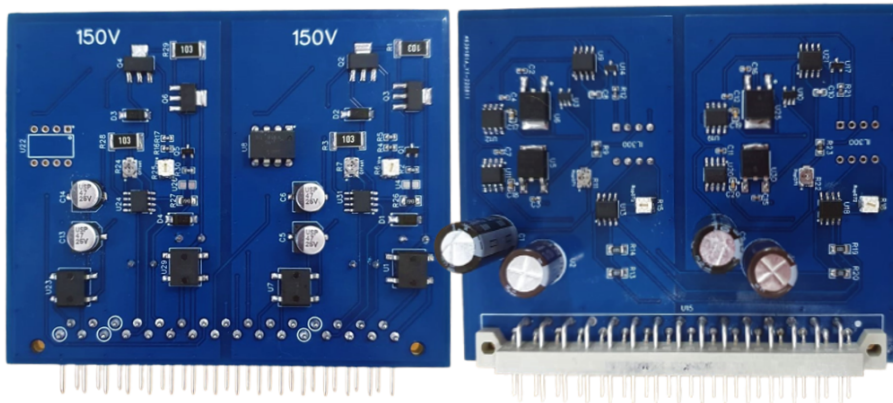


Figura 4.15: Fotografias de ambos os lados do protótipo da PCB com as fontes de 150 V.

4.3.1 Medições fontes de 2V e 10 V

A primeira fonte que foi medida foi a de 2 V. Começou-se por se soldar aos pinos 15 e 17 do conector um cabo de alimentação que fornece 230 VAC a ambos os transformadores da placa. De seguida, soldaram-se três fios que fazem a ligação do potenciômetro digital aos respetivos pinos do conector. Com a alimentação ligada e através de um multímetro, mediram-se as tensões à saída do potenciômetro e da fonte enquanto se variava o *rotary encoder* do potenciômetro. Verificou-se que a saída apresentava sempre uma tensão cinco vezes inferior à tensão do potenciômetro e variava a sua tensão em *steps* de 4 mV conforme rotação do manípulo, tal como esperado. As tensões mínima e máxima de saída apresentaram valores iguais aos da fonte anteriormente implementada: 17.6 mV e 2.002 V respetivamente, ocorrendo apenas melhorias notáveis na estabilidade, onde não se observou nenhuma oscilação na tensão de saída enquanto o *rotary encoder* permanecia imóvel, comportamento que as fontes com o circuito anterior por vezes não apresentavam.

O processo foi repetido para a fonte de 10 V, resoldou-se os fios do potenciômetro aos pinos correspondentes da nova fonte e realizaram-se mais uma vez novas medições

utilizando um multímetro. Verificou-se que o valor da saída da placa coincidia perfeitamente com a saída do potenciômetro para qualquer valor de tensão, e mais uma vez, não apresentava quaisquer oscilações indesejadas à saída.

4.3.2 Medições fonte de 150 V

Sabendo que estas fontes foram preparadas para receber tensões de alimentação provenientes de transformadores externos de 110 VAC e de 30 VAC, encontrando-se estes montados por baixo de todas as fontes dentro dos chassis e são de difícil acesso. Então, de forma a não se desmontar o equipamento, o laboratório LCAM disponibilizou a fonte de tensão CC PLH250-P, capaz de fornecer uma tensão de saída de 0-250 V e uma corrente máxima de até 375 mA. A fonte integra um limitador de corrente ajustável, e para além de possuir um indicador da tensão de saída, também apresenta um amperímetro que indica a corrente consumida pela carga. Esta fonte substituiu o transformador de 110 VAC externo e forneceu diretamente 150 VDC ao circuito durante as medições. Para a segunda tensão de alimentação, utilizou-se um dos transformadores MYRRA 44202 de 15 VAC disponíveis para as novas fontes de 2 V e de 10 V e soldaram-se assim os cabos necessários para alimentar o transformador, bem como os fios que ligam a tensão de saída do mesmo aos respetivos pinos do conector de uma das fontes. Após a ligação do potenciômetro digital ao circuito, conectaram-se dois multímetros às tensões de saída do potenciômetro e da fonte e ligaram-se as alimentações. Na Figura 4.16 observa-se uma fotografia desta montagem experimental. Adicionalmente, foi utilizado um termómetro digital RS PRO 1313 para medir os valores de temperatura dos componentes de potência para diferentes valores de tensão do potenciômetro.

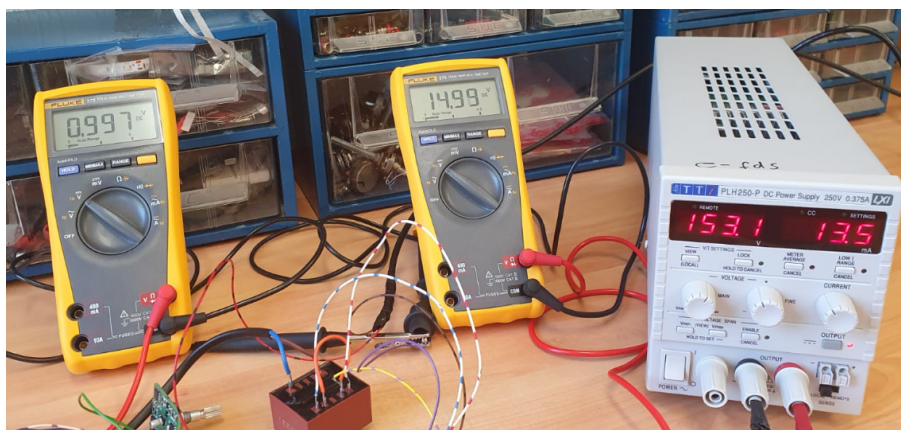


Figura 4.16: Fotografia da montagem experimental realizada para se obterem medições à fonte de 150 V. Com a representação dos multímetros, potenciômetro digital (canto inferior esquerdo), transformador MYRRA 44202 de 15 VAC e a fonte de tensão CC PLH250-P que fornece a tensão de alimentação de 150 VDC e indica o valor de corrente em tempo real consumida pelo protótipo.

De seguida, mediram-se os valores da tensão de saída, corrente consumida pela fonte e a temperatura da Resistência R1 e dos transístores Q2 e Q3 em função de diversos valores

Tabela 4.3: Valores experimentais da fonte de 150 V medidos e calculados em função da tensão do potenciômetro

V _{pot} (V)	V _o (V)	I (mA)	Pd(R1) (W)	Pd(Q2) (W)	TR1 (°C)	TQ2 (°C)	TQ3 (°C)
0.088	0.310	14.900	2.270	0.020	170	65	65
4.784	74.700	7.700	0.578	0.578	70	65	55
9.600	138.300	1.400	0.018	0.181	-	-	-

para a tensão do potenciômetro. Calcularam-se também potências dissipadas para estes componentes nas diferentes situações. Os resultados experimentais obtidos encontram-se descritos na Tabela 4.3.

Tendo em conta que a obtenção de valores de tensão próximos de zero são uma mais valia para estas fontes porque permitem alcançar uma melhor otimização do feixe de elétrons e, uma vez que as tensões mínimas e máximas atingidas pelas fontes atuais são de 1.3 V e 140.2 V [35], conseguiu-se uma redução de 76 % ao valor mínimo com a nova configuração e uma diminuição de 1.36% ao valor máximo. Este resultado obteve-se ajustando o potenciômetro R6 do divisor de tensão responsável pela realimentação, bem como os potenciais de offset do CA3140A, através do potenciômetro R7.

Observou-se que a tensão na saída apresentou algumas oscilações na ordem dos 15 mV quando a tensão do potenciômetro era mínima.

4.4 Análise de Resultados

Ambas as fontes de 2 V e de 10 V apresentaram resultados dentro dos esperados, demonstrando que o dimensionamento e a montagem dos seus circuitos foram realizados com sucesso.

Um dos componentes de potência da fonte de 150 V, precisamente a resistência R1, apresentou um aumento de temperatura alto, à medida que se diminuía a tensão do potenciômetro, alcançando um valor máximo de 170 °C a uma potência dissipada de 2.4 W. De acordo com a ficha técnica do componente, este apenas garante o seu bom funcionamento até à temperatura de 155 °C [42], ou seja, caso permaneça neste estado por longos períodos de tempo, podem ser causados danos irreversíveis à resistência e até aos restantes componentes do circuito. Felizmente, os componentes que se encontravam mais próximos da fonte de calor, apresentaram valores máximos de temperatura de 75 °C, valor que se encontra dentro das normas de bom funcionamento descrito nos *datasheets* da maioria dos componentes. Acredita-se que este acréscimo na temperatura possa ser uma das causas de instabilidade para quando a tensão de saída é mínima. A solução para este problema será a implementação de dissipadores de calor para componentes SMD, nomeadamente para os componentes de potência deste circuito, que serão instalados nas versões finais das PCBs. Também serão substituídos os componentes de potência por

alternativas preparadas para potências mais elevadas, de modo a garantir que os seus valores máximos nunca sejam alcançados.

Os circuitos de isolamento não foram testados, uma vez que as suas tensões de entrada diferenciavam dos valores dimensionados através dos divisores de tensão, não apresentando valores dentro do intervalo de $[0,1]$ V. Adicionalmente, este circuito está preparado para receber também sinais de entrada negativos, e deve obter resposta para quando exista uma mudança de polaridade. No entanto, as fontes apenas produzem tensões positivas e a troca de polaridade é realizada por um interruptor externo à placa. Devido a um equívoco ocorrido no ato do dimensionamento deste circuito, não se precaveu para esta situação. Assim, numa próxima fase de dimensionamento para estes circuitos, serão primeiramente adicionados potenciômetros aos divisores de entrada de cada circuito isolador, e a tensão de entrada será dada por um pino no conector, com o valor de tensão dado de acordo com a posição do inversor de polaridade.

Conclusões e Trabalho Futuro

Para a realização deste trabalho, foi realizado um estudo prévio ao funcionamento do sistema de feixe cruzados existente a esta data no laboratório 123 do ed. I do Departamento Física desta faculdade. Foi estudado o funcionamento das diversas partes que compõem o sistema experimental, nomeadamente o propósito e os princípios físicos fundamentais que tornam a investigação científica realizada com este uma realidade. Foi usada literatura de teses anteriores resultantes aquando da construção do sistema experimental entre outra, para colmatar o desconhecimento até então do funcionamento do mesmo, fora do âmbito da engenharia eletrotécnica.

Posteriormente a entender o enquadramento geral do problema, foi identificada a necessidade de obter a melhor resolução em energia possível do feixe incidente, um dos parâmetros mensuráveis no funcionamento do sistema. Considerando conhecimentos prévios que a alimentação das lentes electrostáticas são um dos fatores críticos para uma boa resolução em energia, tornou-se imperativo proporcionar estabilidade aos valores de tensão na qual são alimentadas as lentes electrostáticas do monocromador trocoidal de elétrões. Existindo três tipos distintos de fontes de alimentação usadas pelo sistema experimental (2V, 10V e 150V), foi possível reformular, redimensionar e projetar novas fontes de alimentação, resultando no fabrico de três protótipos funcionais distintos.

Inicialmente foi feito um trabalho exaustivo de identificação e modo de funcionamento nas placas existentes a substituir e projetar alterações compatíveis com PCB. Para a realização dos protótipos foi tida em consideração na escolha dos componentes diversos fatores, como características elétricas necessárias, valor monetário, disponibilidade para entrega, preferencialmente usando tecnologia SMD e adicionalmente que o footprint para o layout das PCB estivessem disponíveis no software usado (EasyEDA). Nos protótipos de 2V e 10V de tensão de saída, observou-se valores de tensão similares no intervalo de funcionamento às das fontes existentes. No protótipo de fonte alimentação regulável entre 0-150V, foi observado (através de ajuste) uma diminuição do valor de tensão no intervalo inferior, comparativamente com as fontes existentes, melhoria esta ajustada às necessidades do sistema. Neste protótipo foi observada a necessidade de adicionar dissipadores de calor nos componentes de potência devido a temperaturas elevadas aquando

na regulação de valores de tensão perto do intervalo inferior.

Todos os três protótipos de fontes de alimentação apresentaram um intervalo de regulação de acordo com o expectável, com exceção entre a saída da fonte e o circuito de isolamento galvânico, sendo necessário efetuar alterações adicionando um potenciômetro de ajuste no divisor de tensão de entrada no circuito de isolamento galvânico presente em todos os protótipos.

Uma alteração notável foi a redução física das Placas das novas fontes de alimentação, com sensivelmente metade do tamanho físico final comparativamente com as existentes. Isto irá permitir futuramente caso necessário, reduzir o tamanho geral de toda a parte alimentação do sistema, atualmente ocupando seis unidades *rack* standard (6U).

Considerando que foram fabricados um protótipo de cada tipo de fonte de alimentação (três no total), não foi tecnicamente possível nesta data, concluir sobre a resolução em energia do sistema completo, devido à inexistência de fontes novas adicionais para completar a montagem do TEM (vinte necessárias no total). Foi dada primazia à demonstração tecnológica em detrimento da produção em "série" das fontes alimentação. Contudo, sem ser possível quantificar uma montagem completa com a totalidade de fontes de alimentação, com os resultados experimentais obtidos nos três protótipos, é possível concluir que seguramente irá existir um benefício não desprezável na resolução em energia do sistema experimental.

Apesar de os objetivos inicialmente propostos não terem sido alcançados plenamente, os ensaios realizados com os protótipos desenvolvidos tiveram um desempenho enquadrado nas expectativas e a implementação das placas finais no equipamento passará por breves alterações nos seus circuitos, de forma a garantir o correto funcionamento do sistema e cumprir assim, todos os objetivos inicialmente definidos para este trabalho.

5.1 Trabalho Futuro

De futuro, diretamente relacionado com este trabalho, produzir as restantes fontes de alimentação de forma a completar as necessárias, para aplicação no equipamento de feixe cruzados. Deste modo, será necessário o fornecimento dos restantes componentes e placas para fabrico.

O fator limitante na resolução das tensões de saída das fontes são os potenciômetros. Porventura será possível reduzir os 20mV de *step* energético aplicável às lentes eletrostáticas com o uso de potenciômetros digitais com melhor resolução.

O sistema trabalha com partículas elementares, muito sensíveis a interferências externas, nomeadamente eletromagnéticas. Com o uso de novas fontes de alimentação estas estão minimizadas, mas existem outros componentes externos que poderão e deverão ser melhorados de forma a reduzir o ruído, nomeadamente a blindagem dos cabos de conexão, que seguramente irão tornar-se predominantemente causadores de ruído externo.

Bibliografia

- [1] J. M. Lourenço. *The NOVAthesis L^AT_EX Template User's Manual*. NOVA University Lisbon. 2021. URL: <https://github.com/joaomlourenco/novathesis/raw/master/template.pdf> (ver p. iii).
- [2] O. Ingólfsson. *Low-Energy Electrons: Fundamentals and Applications*. 1^a ed. CRC Press, 2019. ISBN: 0429608284 (ver p. 1).
- [3] R. M. Thorman et al. «The role of low-energy electrons in focused electron beam induced deposition: four case studies of representative precursors». Em: *Beilstein J. Nanotechnol* 6 (2015), pp. 1904–1926. DOI: 10.3762/bjnano.6.194 (ver p. 1).
- [4] R. Rodrigues. «Desenho de sistema de aquisição de dados para aparelho de interacção electrónica». 2019 (ver p. 1).
- [5] «Characteristics of the trochoidal electron monochromator». Em: *Review of Scientific Instruments* 41 (3 1970), pp. 423–427. ISSN: 00346748. DOI: 10.1063/1.1684534 (ver p. 1).
- [6] D. Guyomarc'h e J. Layet. «A Trochoidal Monochromator to Measure Electron Beam Energy Distribution in Axial Magnetic Field». Em: *Journal de Physique IV Proceedings (C6 1995)*, p. 5. DOI: 10.1051/jp4:1995617. URL: <http://dx.doi.org/10.1051/jp4:1995617> (ver p. 1).
- [7] M. Brown. *Power supply cookbook*. 2^a ed. Newnes, 2001, pp. 1–10. ISBN: 075067329X (ver pp. 3, 4).
- [8] N. C. Braga. *Fontes de Alimentação*. Editora Saber, pp. 13–23. ISBN: 9788565051200 (ver pp. 3, 14, 17).
- [9] W. E. Inc. «AN-LDTC03: Power Supply Basics». Em: (2021). URL: www.teamWavelength.com (ver p. 4).
- [10] V. Neves. *Apontamentos sobre o Transformador: Esquema Equivalente de Steinmetz do Transformador*. FCT UNL (ver pp. 5, 28).

- [11] P. E. Aqueveque, E. P. Wiechmann e R. P. Burgos. «On the efficiency and reliability of high-current rectifiers». Em: vol. 3. 2006, pp. 1290–1297. ISBN: 1424403642. DOI: 10.1109/IAS.2006.256697 (ver p. 6).
- [12] G. Oriti e A. L. Julian. «Hybrid rectifier using thyristors and IGBTs for low cost regenerative drives». Em: vol. 2. 2000, pp. 951–956. DOI: 10.1109/apec.2000.822804 (ver p. 6).
- [13] N. A. Wahab et al. «High efficiency CMOS rectifier for energy harvesting». Em: Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., 2017-10, pp. 123–127. ISBN: 9781509009251. DOI: 10.1109/IEACON.2016.8067367 (ver p. 6).
- [14] Q. Li et al. «A low voltage CMOS rectifier for wirelessly powered devices». Em: 2010, pp. 873–876. ISBN: 9781424453085. DOI: 10.1109/ISCAS.2010.5537419 (ver p. 6).
- [15] R. Visintini. «Rectifiers». Em: (2006). DOI: 10.5170/CERN-2006-010.133 (ver pp. 7–10, 12).
- [16] *Transformer Utilization Factor (TUF) - Electrical Concepts*. URL: <https://electricalbaba.com/transformer-utilization-factor/> (ver p. 8).
- [17] J. Caninas. *Fontes de Alimentação*. Ed. por J. Caninas. Edições Técnicas, 1960 (ver pp. 8, 10, 12, 13, 15–17).
- [18] *Pi Filter : Circuit Diagram, Working, Characteristics and Its Applications*. URL: <https://www.elprocus.com/pi-filter-circuit-working-and-its-applications/> (ver p. 16).
- [19] *Pi Filter - Overview, Working, Construction, Application and Design Tips*. URL: <https://circuitdigest.com/tutorial/pi-filter-working-application-circuit-design-tips> (ver p. 16).
- [20] *What is Pi Filter? - Working, Characteristics, Advantages, Disadvantages & Applications - Electronics Coach*. URL: <https://electronicscoach.com/pi-filter.html> (ver p. 16).
- [21] J. Williams. «High efficiency linear regulators». Em: *Linear Technology Corporation, Application Note 32* (1989) (ver pp. 17, 20).
- [22] *Electronic Circuits - Regulators*. URL: https://www.tutorialspoint.com/electronic_circuits/electronic_circuits_regulators.htm (ver pp. 17–20).
- [23] *Voltage Regulators, Circuits, Types, Working principle, Design, Applications*. URL: <https://www.circuitstoday.com/voltage-regulators> (ver pp. 19, 20).
- [24] *Transistor Series Voltage Regulator | Error Amplifier Working*. URL: <https://www.eeeguide.com/transistor-series-voltage-regulator/> (ver p. 19).
- [25] P. B. ALLDATASHEET.COM. *3-TERMINAL 0.1A POSITIVE VOLTAGE REGULATOR LM78LXX HTC*. 2012 (ver pp. 20, 21).

- [26] P. B. ALLDATASHEETCOM. *LM78XX/LM78XXA 3-Terminal 1A Positive Voltage Regulator Features*. 2008. URL: www.fairchildsemi.com (ver p. 20).
- [27] P. B. ALLDATASHEETCOM. *78XX* (ver p. 20).
- [28] O. Semiconductor. *LM317L - Voltage Regulator Adjustable Output, Positive 100 mA*. URL: www.onsemi.com (ver pp. 21, 22).
- [29] «TPS7A24 200-mA, 18-V, Ultra-Low I Q , Low-Dropout Voltage Regulator Typical Application Circuit». Em: (2022). URL: www.ti.com (ver p. 22).
- [30] N. C. Braga. *Fontes de Alimentação*, pp. 159–165 (ver p. 23).
- [31] M. Brown. *Power supply cookbook*. 2ª ed. Newnes, 2001, pp. 21–28. ISBN: 075067329X (ver pp. 23–27).
- [32] *Switch Mode Power Supply and Switching Regulators*. URL: <https://www.electronicstutorials.ws/power/switch-mode-power-supply.html> (ver p. 26).
- [33] *Understanding Switched-Mode Power Supplies (SMPS) | The Design Engineers' Guide | Avnet Abacus*. URL: <https://www.avnet.com/wps/portal/abacus/solutions/technologies/power/the-design-engineers-guide/switched-mode-power-supplies/> (ver p. 27).
- [34] J. Pereira-Da-Silva et al. «Electron Driven Reactions in Tetrafluoroethane: Positive and Negative Ion Formation». Em: *Journal of the American Society for Mass Spectrometry* 32 (6 2021-06), pp. 1459–1468. ISSN: 18791123. DOI: 10.1021/jasms.1c00057 (ver pp. 29, 30).
- [35] J. C. G. Araújo. «Dimensionamento e Implementação de Sistema de Controlo Digital de Lentes Eletrostáticas de Monocromador Trocoidal de Eletrões». 2021 (ver pp. 37, 40, 41, 46, 63).
- [36] P. B. ALLDATASHEETCOM. *LM723- High precision voltage regulator*. 2007. URL: www.st.com (ver p. 38).
- [37] A. DEVICES. *LT3042 - 20V, 200mA, Ultralow Noise, Ultrahigh PSRR RF Linear Regulator*. 2017. URL: <https://www.analog.com/en/products/lt3042.html> (ver pp. 48, 49).
- [38] T. Instruments. *TLV237x 500-µA/Ch, 3-MHz Rail-to-Rail Input and Output Operational Amplifiers With Shutdown*. 2001. URL: www.ti.com. (ver p. 49).
- [39] D. Görk e A. M. Kruck. *Designing Linear Amplifiers Using the IL300 Optocoupler*. Rel. téc. Vishay Semiconductors Application note 50. Document, 2017 (ver p. 56).
- [40] CONEC. *MALE CONNECTOR, 13pos.- 31pos. / 2.5mm, with angled solder pins*. 2006 (ver p. 58).
- [41] «IPC-2221A Generic Standard on Printed Board Design». Em: (2003) (ver p. 59).
- [42] BOURNS. *CHP Series Ultra-High Power Chip Resistors*. URL: www.bourns.com/docs/legal/disclaimer.pdf. (ver p. 63).

BIBLIOGRAFIA

Appendix 1

Tabela A.1: Descrição das funcionalidades de cada pino dos conectores das placas de 2 V / 10 V e 150 V, com indicação das entradas (IN) e saídas (OUT).

Pinos	Placa 2 V (1) / 10 V (2)	Placa 150 V (Fontes 1 e 2)
1	-	GND1 (OUT)
2	GND1 (OUT)	15 VAC1 (IN)
3	GND1 (OUT)	15 VAC1 (IN)
4	GND1 (OUT)	-
5	GND1 (OUT)	GND1 (OUT)
6	+12 V Pot1 (OUT)	GND1 (OUT)
7	Vout1 (OUT)	Vpot1 (IN)
8	Vpot1 (IN)	+12 V Pot1 (OUT)
9	+12 V Pot1 (OUT)	-
10	Vo Isol (OUT)	Vout1 (OUT)
11	Vo Isol2 (OUT)	-
12	GND Isol (IN)	110 VAC1 (IN)
13	-5 V Isol (IN)	110 VAC1 (IN)
14	+5 V Isol (IN)	Vo Isol (OUT)
15	230 VAC (IN)	Vo Isol2 (OUT)
16	-	GND Isol (IN)
17	230 VAC (IN)	-5 V Isol (IN)
18	-	+5 V Isol (IN)

Tabela A.1: Descrição das funcionalidades de cada pino dos conectores das placas de 2 V / 10 V e 150 V, com indicação das entradas (IN) e saídas (OUT).

Pinos	Placa 2 V (1) / 10 V (2)	Placa 150 V (Fontes 1 e 2)
19	-	15 VAC2 (IN)
20	-	-
21	-	15 VAC2 (IN)
22	GND2 (OUT)	-
23	GND2 (OUT)	GND2 (OUT)
24	GND2 (OUT)	GND2 (OUT)
25	GND2 (OUT)	Vpot2 (IN)
26	+12 V Pot2 (OUT)	+12 V Pot2 (OUT)
27	Vout2 (OUT)	-
28	Vpot2 (IN)	Vout2 (OUT)
29	+12 V Pot2 (OUT)	-
30	-	110 VAC2 (IN)
31	-	110 VAC2 (IN)



