



UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS (UNISINOS)
ESCOLA POLITÉCNICA
ELETRÔNICA ANALÓGICA

KLAUS PEREIRA BECKER
GABRIEL SILVEIRA MARQUES

PROJETO DE REGULADOR DE TENSÃO LINEAR:
Implementação de um regulador série realimentado de 3 a 15 V e 1 A

SÃO LEOPOLDO / RS

2024

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS (UNISINOS)
KLAUS PEREIRA BECKER
GABRIEL SILVEIRA MARQUES

PROJETO DE REGULADOR DE TENSÃO LINEAR:
Implementação de um regulador série realimentado de 3 a 15 V e 1 A

Atividade prática apresentada como requisito à obtenção de uma das notas parciais da disciplina de Eletrônica Analógica do curso de Engenharia da Computação da Universidade do Vale do Rio Dos Sinos.

Prof. Rubem Dreger

SÃO LEOPOLDO / RS
2024

Sumário

	Páginas
1 Introdução	4
2 Fundamentação Teórica	4
2.1 Resistor	4
2.2 Diodo	4
2.3 Diodo Zener	5
2.4 Transistor Bipolar de Junção (TBJ)	5
2.5 Fonte de Corrente Constante	5
2.6 Proteção Contra Curto-Circuito	5
3 Metodologia	5
3.1 Especificações do Projeto	6
3.2 Dimensionamento dos Componentes	6
3.2.1 Regulador de Tensão	6
3.2.2 Gerador de Corrente Constante (GCC)	8
3.2.3 Amplificador de Erro	10
3.2.4 Limitador de corrente e proteção contra curto-circuito	12
3.2.5 Monitor de Tensão	14
3.3 Simulação	20
3.4 Montagem	21
4 Resultados e discussões	23
4.1 Tensão de saída	24
4.2 Corrente máxima	24
4.3 Estabilidade	25
4.4 Regulação de carga	25
4.5 Monitor de tensão	25
5 Conclusão	26

1 Introdução

Este trabalho tem como objetivo aplicar os conhecimentos adquiridos na disciplina de Eletrônica Analógica no desenvolvimento de uma fonte de alimentação linear com realimentação de tensão. O projeto visa consolidar conceitos teóricos e práticos abordados em aula, como regulação de tensão, limitação de corrente, dissipação térmica e controle de estabilidade.

A fonte de alimentação projetada possui uma tensão de saída ajustável entre 3 e 15 V, com uma corrente máxima de 1 A. Para garantir um funcionamento seguro, inclui um circuito de limitação automática de corrente, além de LEDs indicadores que sinalizam o estado de operação em termos de tensão e corrente. Esses recursos não apenas tornam o projeto funcional, mas também permitem a visualização prática dos conceitos teóricos estudados.

O foco do trabalho é o ensino e a aplicação prática, proporcionando aos estudantes uma experiência de aprendizado baseada em problemas reais. A realimentação de tensão foi escolhida para demonstrar na prática a importância do controle e da estabilidade em circuitos eletrônicos, sendo este um tema central na disciplina. Além disso, o projeto reforça habilidades essenciais para futuros engenheiros, como análise de circuitos, dimensionamento de componentes e resolução de problemas de engenharia.

2 Fundamentação Teórica

O desenvolvimento de fontes de alimentação lineares exige o entendimento aprofundado de diversos componentes eletrônicos e seus papéis no circuito. Nesta seção, abordamos os conceitos teóricos que embasam o projeto, destacando os principais elementos utilizados e suas aplicações práticas:

2.1 Resistor

Os resistores são componentes passivos que limitam e controlam o fluxo de corrente elétrica. Em fontes de alimentação, são amplamente utilizados para polarização de transistores, divisão de tensão e proteção de circuitos contra sobrecorrentes. A resistência, medida em ohms (Ω), determina a relação entre a tensão aplicada e a corrente que atravessa o componente, conforme a Lei de Ohm ($V = R \cdot I$).

2.2 Diodo

Diodos são dispositivos semicondutores com junção PN, que permitem a passagem de corrente em apenas uma direção, bloqueando o fluxo inverso. Em fontes lineares, eles desempenham funções como a retificação de sinais AC para DC, proteção contra polaridades invertidas e estabilização de circuitos. A tensão direta típica de um diodo de silício é de 0,7 V, enquanto diodos de germânio apresentam valores menores, em torno de 0,3 V.

2.3 Diodo Zener

Diodos Zener são projetados para operar em sua região de ruptura reversa, onde mantêm uma tensão constante em seus terminais, independentemente da corrente aplicada, dentro de certos limites. Eles são essenciais em reguladores de tensão, proporcionando estabilidade e proteção contra picos de tensão. Sua tensão de ruptura é uma característica definida durante a fabricação e varia de acordo com a aplicação.

2.4 Transistor Bipolar de Junção (TBJ)

Os transistores bipolares de junção (TBJs) são dispositivos semicondutores compostos por três camadas de material dopado, formando uma estrutura NPN ou PNP. Eles atuam como amplificadores de sinal ou chaves eletrônicas em circuitos de potência. A corrente que flui entre os terminais do emissor e coletor é controlada pela corrente aplicada à base, sendo esta relação caracterizada pelo ganho de corrente (β).

2.5 Fonte de Corrente Constante

Fontes de corrente constante garantem uma corrente fixa e estável, independentemente das variações na carga conectada. Em circuitos de fontes lineares, são usadas para polarização de transistores, controle de corrente em LEDs e proteção de circuitos sensíveis. A implementação pode incluir combinações de transistores, diodos e resistores, com base nos requisitos de precisão e estabilidade.

2.6 Proteção Contra Curto-Circuito

A proteção contra curto-circuito é essencial para garantir a segurança dos usuários e a integridade dos componentes da fonte. Esta proteção pode ser realizada com fusíveis, circuitos de limitação de corrente ou transistores que atuam como interruptores automáticos. Em fontes lineares, circuitos de proteção são projetados para detectar excessos de corrente e agir imediatamente, protegendo tanto o circuito quanto os dispositivos conectados.

Os conceitos abordados são essenciais para o desenvolvimento de fontes de alimentação lineares reguladas, garantindo estabilidade, segurança e desempenho adequado. Na seção seguinte, detalharemos como esses elementos foram aplicados no projeto de uma fonte linear ajustável, capaz de fornecer tensões de saída entre 3 e 15 V e correntes de até 1 A.

3 Metodologia

O desenvolvimento de fontes de alimentação lineares exige o entendimento aprofundado de diversos componentes eletrônicos e seus papéis no circuito. Nesta seção, abordamos os

conceitos teóricos que embasam o projeto, destacando os principais elementos utilizados e suas aplicações práticas.

O projeto solicitado consiste em uma fonte de alimentação linear com realimentação de tensão, capaz de fornecer uma tensão ajustável entre 3 e 15 V, com corrente máxima de 1 A. O circuito deve incluir limitação automática de corrente, proteção contra curto-circuito e monitoramento de tensão, indicando as condições de operação.

Dessa maneira, a fim de atender às especificações, o projeto foi dividido em três etapas principais: a implementação do regulador de tensão, a proteção contra sobrecorrente e a sinalização de tensão.

3.1 Especificações do Projeto

O projeto foi desenvolvido com base nas seguintes especificações:

- Tensão de saída ajustável entre **2,4 V e 18 V**;
- Corrente máxima de **2 A**;
- Limitação automática de corrente configurada para **1,3 A**;
- Sinalização de sobrecorrente por LED indicador;
- Monitoramento de tensão com sinalização por janela:
 - **LED verde**: Tensão menor que **6 V**;
 - **LED amarelo**: Tensão entre **6 V e 10 V**;
 - **LED vermelho**: Tensão maior que **10 V**.

3.2 Dimensionamento dos Componentes

3.2.1 Regulador de Tensão

O regulador de tensão é o componente central da fonte de alimentação, responsável por manter a tensão de saída constante, independentemente das variações na carga ou na tensão de entrada. O circuito é composto por quatro elementos principais: o elemento de passagem, o gerador de corrente constante (GCC), o amplificador de erro.

Elemento de Passagem

Esse componente é responsável por fornecer a corrente necessária para a carga, ajustando-a conforme a tensão de saída. Sendo assim, o elemento de passagem deve ser capaz de suportar a corrente máxima exigida pela carga e a faixa de tensão de operação.

Dessa forma, os requisitos para o elemento de passagem são:

- Tensão de entrada: 24 V;
- Tensão de saída máxima: 18 V;
- Tensão de saída mínima: 0 V (curto-circuito);
- Corrente máxima: 2 A.

A partir desses requisitos, podemos calcular a potência máxima dissipada pelo elemento de passagem, a corrente de base necessária e a queda de tensão entre coletor e emissor.

Cálculo da potência máxima dissipada

A potência dissipada pelo elemento de passagem ocorre quando a diferença entre a tensão de entrada e a tensão de saída é máxima e a corrente fornecida à carga é máxima.

$$P_{diss} = (V_{in} - V_{out}) \cdot I_{load}$$

Substituindo os valores extremos:

$$P_{diss_max} = (24V - 0V) \cdot 2A = 48W$$

Portanto, o elemento de passagem deve ser montado em um dissipador de calor capaz de suportar pelo menos 48 W de dissipação para evitar superaquecimento.

Dessa forma, a fonte de entrada deve fornecer pelo menos 18,7 V para garantir a regulação adequada da saída.

Escolha do componente

Com base nos cálculos realizados, foi escolhido o transistor Darlington TIP142, que atende aos seguintes requisitos:

- Corrente máxima de coletor: 10 A;
- Potência máxima dissipada: 125 W;
- Ganho de corrente (β): 1000 (típico);
- Tensão máxima coletor-emissor: 100 V.

O uso do TIP142, sendo um transistor Darlington, oferece uma vantagem significativa em termos de ganho de corrente (β), reduzindo a corrente necessária na base para cerca de:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{2A}{1000} = 2mA$$

Essa característica simplifica o circuito de controle e reduz a potência exigida na etapa de acionamento. Além disso, o TIP142 suporta margens amplas de potência e tensão, tornando-o adequado para este projeto.

3.2.2 Gerador de Corrente Constante (GCC)

O gerador de corrente constante (GCC) é um elemento indispensável no regulador de tensão, sendo responsável por fornecer uma corrente estável à base do transistor de potência. Ele é constituído por um transistor PNP, um diodo Zener e resistores de polarização, garantindo o funcionamento confiável e preciso do circuito.

A corrente constante gerada pelo GCC é determinada pela tensão sobre o diodo Zener (V_Z) e a resistência conectada ao emissor (R_E), ajustando-se para compensar a queda de tensão base-emissor (V_{BE}) do transistor. A fórmula que rege esse comportamento é:

$$I_C = \frac{V_Z - V_{BE}}{R_E}$$

Onde:

- I_C : corrente de saída do GCC;
- V_Z : tensão estabilizada pelo diodo Zener;
- V_{BE} : queda de tensão base-emissor;
- R_E : resistor de limitação de corrente.

Diodo Zener

Para o projeto, foi escolhido o diodo Zener 1N4733, com $V_Z = 5,1\text{ V}$ e potência de 1 W.

Resistor de polarização

A fim de termos na base do transistor uma corrente mínima de 2 mA, foi definido um valor de 20mA para a corrente de coletor. Assim, o resistor de polarização (R_E) é calculado como:

$$R_E = \frac{V_Z - V_{BE}}{I_C} = \frac{5,1\text{ V} - 0,7\text{ V}}{20 \times 10^{-3}\text{ A}} = 220\Omega$$

$$P_{R_E} = V_{R_E}^2 / R_E = (5,1\text{ V} - 0,7\text{ V})^2 / 220\Omega = 88\text{ mW}$$

Assim, um resistor comercial de 220Ω com potência mínima de 0,25 W foi selecionado, garantindo segurança térmica.

Cálculo de R_Z

Para a devida polarização do diodo Zener, calcularemos o valor de R_Z a fim de obtermos uma corrente de 10% da corrente máxima do Zener ($I_{Z_{max}}$).

$$I_{R_Z} = (P_Z/V_Z = 1\text{ W}/5,1) * 10\% = 19,6\text{ mA}$$

A tensão no resistor R_Z é a diferença entre a tensão de alimentação (V_{CC}) e a tensão do Zener (V_Z):

$$V_{R_Z} = V_{CC} - V_Z = 24\text{ V} - 5,1\text{ V} = 18,9\text{ V}$$

Com isso, o valor de R_Z é calculado:

$$R_Z = \frac{V_{R_Z}}{I_{R_Z}} = \frac{18,9\text{ V}}{21 \times 10^{-3}\text{ A}} \approx 900\Omega$$

$$P_{R_Z} = \frac{V_{R_Z}^2}{R_Z} = \frac{18,9\text{ V}^2}{820\Omega} = 435\text{ mW}$$

Selecionamos um resistor comercial de 820Ω e potência mínima de $0,5\text{ W}$ para garantir a segurança térmica.

Transistor PNP

O transistor 2N3906 foi escolhido como o PNP para o GCC devido às suas características:

- Corrente máxima do coletor ($I_{C(max)}$): 200 mA ;
- Potência máxima dissipada: 625 mW ;
- Ganho de corrente (h_{FE}): 100 (mínimo para $I_C = 10\text{ mA}$);
- Tensão máxima coletor-emissor ($V_{CE(max)}$): 40 V .

Conclusão do GCC

Com os cálculos apresentados, os componentes do GCC foram dimensionados conforme:

- Diodo Zener: 1N4733 ($5,1\text{ V}$);
- Resistor de polarização: 820Ω , $0,5\text{ W}$;
- Transistor PNP: 2N3906.
- Resistor limitador de corrente: 220Ω , $0,25\text{ W}$.

Esse dimensionamento assegura que o GCC forneça uma corrente constante de 20 mA de forma confiável, atendendo às demandas do regulador de tensão.

3.2.3 Amplificador de Erro

O amplificador de erro é responsável por ajustar a corrente na base do transistor de potência, controlando assim a corrente que flui para a carga. Ele é composto por um transistor NPN, uma tensão de referência e um divisor de tensão, garantindo a estabilidade e a precisão do circuito.

Tensão de referência

Em virtude da necessidade de ajuste da tensão de saída entre 2,4 V e 18 V, não foi possível utilizar um diodo Zener convencional como referência. Portanto, optou-se pelo uso de dois diodos convencionais em série, que fornecem uma tensão de referência de aproximadamente 1,4 V.

Para garantir a tensão de referência estável, foram escolhidos diodos 1N4007 devido à sua ampla faixa de operação e baixo custo e especificações de tensão reversa de 1000 V e corrente média de 1 A.

Sendo assim, foi adicionado um resistor de polarização ligado aos diodos para garantir a corrente mínima necessária para a estabilidade da tensão de referência.

Segundo o datasheet do 1N4007, a corrente máxima de pico é de 30 A, e a corrente média é de 1 A. Portanto, o resistor de polarização foi calculado para fornecer uma corrente de 20 mA, garantindo a estabilidade da tensão de referência.

$$R_D = \frac{V_{CC} - V_D}{I_D} = \frac{24\text{ V} - 1,4\text{ V}}{20\text{ mA}} = 1\text{k}13\Omega$$

$$P_{R_D} = \frac{V_{R_D}^2}{R_D} = \frac{22,6\text{ V}^2}{1\text{k}2\Omega} = 426\text{ mW}$$

Portanto, um resistor comercial de 1k2Ω e potência mínima de 0,5 W foi selecionado para garantir a segurança térmica.

Divisor de tensão

A partir da tensão de referência, temos que a tensão na base do transistor NPN é:

$$V_B = V_Z + V_{BE} = 1,4\text{ V} + 0,7\text{ V} = 2,1\text{ V}$$

Sendo assim, para garantir uma tensão de saída mínima dentro do intervalo especificado, utilizamos um divisor de tensão composto por um potenciômetro de 2 kΩ e um resistor de 220 Ω. Dessa forma, a tensão de saída é:

$$V_{\text{out_min}} = \frac{V_B}{R_1 + R_{\text{pot}}} \times R_{\text{total}}$$

$$V_{\text{out_min}} = \frac{2,1 \text{ V}}{220 \Omega + 2000 \Omega} \times 2220 \Omega$$

$$V_{\text{out_min}} = 2,1 \text{ V}$$

Dessa mesma forma, a tensão de saída máxima é:

$$V_{\text{out_max}} = \frac{V_B}{R_1} \times R_{\text{total}}$$

$$V_{\text{out_min}} = \frac{2,1 \text{ V}}{220 \Omega} \times 2220 \Omega$$

$$V_{\text{out_min}} = 21,19 \text{ V}$$

Transistor NPN

O transistor NPN utilizado no amplificador de erro é o 2N2222, que atende aos seguintes requisitos:

- Corrente máxima do coletor ($I_{C(max)}$): 800 mA;
- Potência máxima dissipada: 500 mW;
- Ganho de corrente (h_{FE}): 150;
- Tensão máxima coletor-emissor ($V_{CE(max)}$): 40 V.

Conclusão do amplificador de erro

Com os cálculos apresentados, os componentes do amplificador de erro foram dimensionados conforme:

- Tensão de referência: 2 diodos 1N4007 em série (1,4 V);
- Divisor de tensão: potenciômetro de 2 kΩ e resistor de 220 Ω;
- Transistor NPN: 2N2222.

Circuito final do regulador de tensão

O circuito final do regulador de tensão é composto pelos elementos de passagem, gerador de corrente constante e amplificador de erro, conforme a figura a seguir:

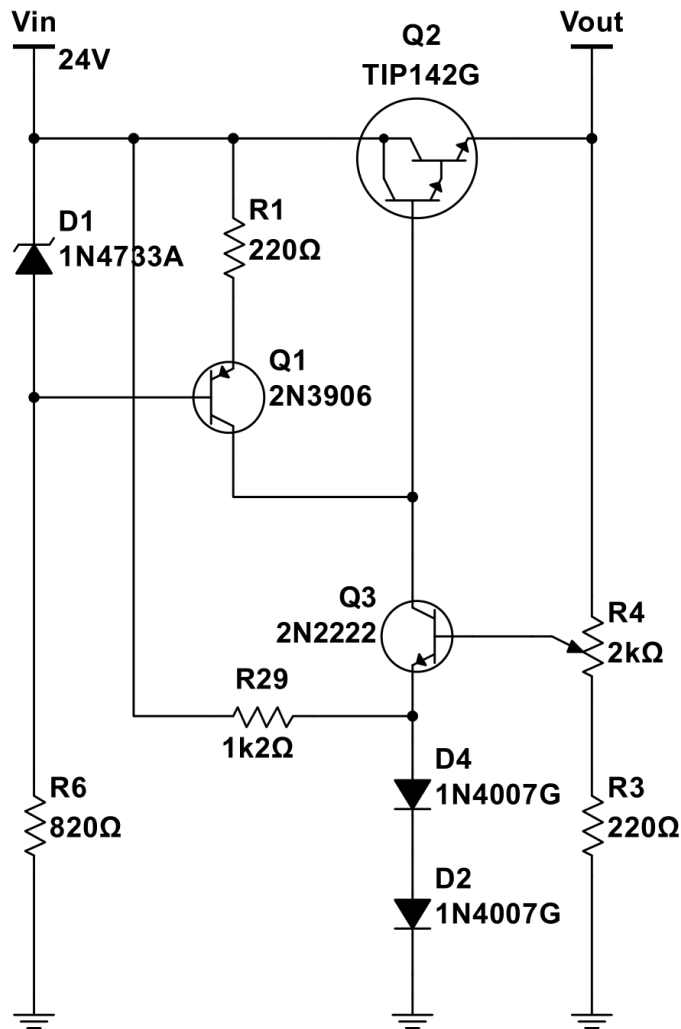


Figura 1: Circuito final do regulador de tensão

3.2.4 Limitador de corrente e proteção contra curto-circuito

A proteção contra surtos de corrente é essencial para garantir a segurança do circuito e dos dispositivos conectados. Para isso, foi implementado um circuito de limitação de corrente e proteção contra curto-circuito unidos em um único bloco. Onde, caso a corrente de saída ultrapasse o limite de 1,3 A, o circuito entra em ação, roubando a corrente excedente e protegendo o circuito de danos.

Limitador de corrente

O limitador de corrente é composto por um transistor PNP e um resistor de limitação de corrente ligado entre a base e o emissor. O transistor é acionado quando a corrente de saída ultrapassa o limite de 1,3 A, desviando o excesso de corrente que seria fornecida a base do transistor de potência.

Dessa forma, podemos calcular o valor do resistor de limitação de corrente para garantir que o transistor PNP entre em saturação quando a corrente de saída atingir 1,3 A.

$$R_{SC} = \frac{V_{BE}}{I_{o_max}} = \frac{0,7\text{ V}}{1,3\text{ A}} = 0,538\ \Omega$$

Para garantir uma corrente mínima de 1,3 A, foi escolhido o valor comercial de 0,47 Ω .

$$P_{R_{SC}} = \frac{V_{BE}^2}{R_{SC}} = \frac{(0,7\text{ V})^2}{0,47\ \Omega} = 1,04\text{ W}$$

Em virtude disso, um resistor de 0,47 Ω e potência mínima de 2 W foi selecionado para garantir a segurança térmica.

Sendo assim, agora devemos calcular a nova corrente de saída máxima, considerando a definição do resistor limitador de corrente.

$$I_{o_max} = \frac{V_{BE}}{R_{SC}} = \frac{0,7\text{ V}}{0,47\ \Omega} = 1,49\text{ A}$$

Sinalização de sobrecorrente

Para sinalizar a ocorrência de sobrecorrente, foi adicionado um outro transistor PNP, com seus terminais de base e emissor ligados ao circuito de limitação de corrente e o coletor conectado a um LED indicador. Dessa forma, quando a corrente de saída ultrapassar 1,3 A, o transistor PNP entra em saturação, acionando o LED indicador.

Para correta operação do LED, foi adicionado um resistor limitador de corrente em série, garantindo o pleno funcionamento do LED e a segurança do circuito.

$$R_{LED} = \frac{V_{CC} - V_{LED}}{I_{LED}} = \frac{24\text{ V} - 2\text{ V}}{20\text{ mA}} = 1\text{ k}\Omega$$

$$P_{R_{LED}} = \frac{V_{R_{LED}}^2}{R_{LED}} = \frac{22\text{ V}^2}{1\text{ k}\Omega} = 484\text{ mW}$$

Portanto, um resistor de 1 k Ω e potência mínima de 0,5 W foi selecionado para garantir a segurança térmica.

Conclusão do limitador de corrente

Com os cálculos apresentados, os componentes do limitador de corrente e proteção contra curto-circuito foram dimensionados conforme:

- Resistor de limitação de corrente: $0,47\ \Omega$, $2\ W$;
- Transistor PNP de sinalização: 2N2222;
- Transistor PNP de limitação de corrente: 2N2222;
- Resistor de sinalização: $1\ k\Omega$, $0,5\ W$.

Dessa forma, o circuito de limitação de corrente e proteção contra curto-circuito foi implementado com sucesso, garantindo a segurança do circuito e dos dispositivos conectados.

Circuito final do limitador de corrente

O circuito final do limitador de corrente e proteção contra curto-circuito é composto pelos elementos de limitação de corrente, sinalização de sobrecorrente e proteção contra curto-circuito, conforme a figura a seguir:

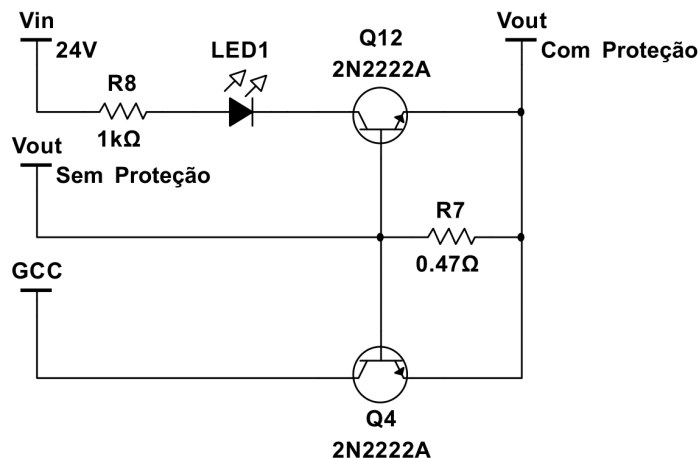


Figura 2: Circuito final do limitador de corrente

3.2.5 Monitor de Tensão

O monitor de tensão é responsável por indicar a tensão de saída do regulador de tensão, sinalizando ao usuário as condições de operação do circuito. Para isso, foram implementados LEDs indicadores de três cores, que acendem conforme a tensão de saída atinge determinados valores.

- LED verde: tensão menor que 6 V;
- LED amarelo: tensão entre 6 V e 10 V;

- LED vermelho: tensão maior que 10 V.

Dessa forma, o monitor de tensão foi implementado seguindo o conceito de lógica digital, onde cada LED é acionado conforma uma combinação de tensões de referência e a tensão de saída do regulador.

Para isso, é necessário criar um circuito que compare a tensão de saída com as tensões de referência e gere níveis lógicos para acionar os LEDs indicadores.

Comparador de tensão

Como o trabalho deve ser realizado apenas com componentes discretos, o uso de um amplificador operacional não é permitido. Portanto, foi implementado um comparador de tensão utilizando transistores NPN e PNP, que geram níveis lógicos conforme a tensão de saída do regulador.

Sendo assim, foi criado um circuito com um transistor NPN que em sua base está um diodo Zener para gerar uma tensão de referência, um divisor de tensão com trimpot em sua base para ajustar a tensão de referência e um transistor PNP que é acionado conforme a tensão de saída ultrapassa a tensão de referência. Resultando em 0 V na saída do transistor PNP quando a tensão de saída é menor que a tensão de referência e 24 V quando a tensão de saída é maior que a tensão de referência.

Foram utilizados diodos Zener 1N4733 para gerar a tensão de referência de 6 V e 1N4739 para gerar a tensão de referência de 10 V. Além disso, foi utilizado um trimpot de 100 k Ω em série com um resistor de 1 k Ω para ajustar a tensão de referência.

Como já foi calculado anteriormente o resistor de polarização do diodo Zener 1N4733, devemos apenas calcular o resistor de polarização do diodo Zener 1N4739.

Para a devida polarização do diodo Zener, calcularemos o valor de R_Z a fim de obtermos uma corrente de 10% da corrente máxima do Zener ($I_{Z_{max}}$).

$$I_{R_Z} = (P_Z / V_Z = 1 \text{ W} / 9,1) * 10\% = 10,9 \text{ mA}$$

A tensão no resistor R_Z é a diferença entre a tensão de alimentação (V_{CC}) e a tensão do Zener (V_Z):

$$V_{R_Z} = V_{CC} - V_Z = 24 \text{ V} - 5,1 \text{ V} = 14,9 \text{ V}$$

Com isso, o valor de R_Z é calculado:

$$R_Z = \frac{V_{R_Z}}{I_{R_Z}} = \frac{4,9 \text{ V}}{10,9 \times 10^{-3} \text{ A}} \approx 1355 \Omega$$

$$P_{R_Z} = \frac{V_{R_Z}^2}{R_Z} = \frac{4,9 \text{ V}^2}{1200 \Omega} = 185 \text{ mW}$$

Selecionamos um resistor comercial de $1k2\Omega$ e potência mínima de 0,5 W para garantir a segurança térmica.

Conclusão do comparador de tensão

Com os cálculos apresentados, os componentes do comparador de tensão foram dimensionados conforme:

- Diodo Zener 1N4733: 5,1 V;
- Diodo Zener 1N4739: 9,1 V;
- Trimpot: $100k\Omega$;
- Resistor do trimpot: $1k\Omega$;
- Resistor de polarização do diodo Zener 1N4739: $1,2\Omega$, 0,5 W;
- Resistor de polarização do diodo Zener 1N4733: 820Ω , 0,5 W;
- Transistor NPN: 2N2222;
- Transistor PNP: 2N3906;
- Resistores de polarização: $10k\Omega$, 0,25 W.

Circuito final do comparador de tensão

O circuito final do comparador de tensão é composto pelos elementos de comparação, tensão de referência e sinalização, alterando apenas o diodo Zener 1N4739 para 9,1 V e seu resistor de polarização, conforme a figura a seguir:

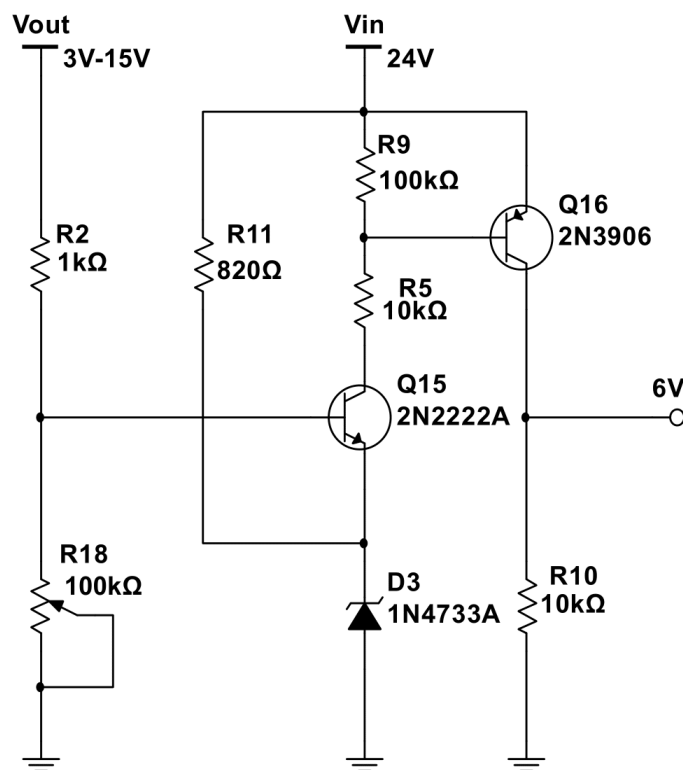


Figura 3: Circuito final do monitor de tensão

Indicador de tensão

Para indicar a tensão de saída, foram utilizados LEDs de três cores: verde, amarelo e vermelho. Cada LED é acionado conforme a tensão de saída ultrapassa determinados valores, indicando ao usuário as condições de operação do circuito.

Para isso, foi criada uma tabela verdade usando como entrada os sinais digitais gerados pelo comparador de tensão e como saída os LEDs indicadores. Dessa forma, o circuito foi implementado conforme a tabela verdade, garantindo a correta sinalização da tensão de saída.

Tabela 1: Tabela verdade do monitor de tensão

6V	10V	LED VD	LED AM	LED VM
0	0	1	0	0
0	1	0	1	0
1	1	0	0	1

Dessa forma, foi necessário implementar um circuito lógico que gerasse os sinais de saída conforme a tabela verdade, acionando os LEDs indicadores conforme a tensão de saída do regulador.

LED verde

Para acionar o LED verde, foi utilizado dois transistores NPN ligados um na base do outro, fazendo uma inversão de sinal. O primeiro transistor é acionado quando a tensão de saída

é maior que 6 V, acionando o segundo transistor e desligando o LED verde, conforme a tabela verdade. Isso ocorre porque o transistor que está ligado através do seu coletor ao LED verde é polarizado usando um resistor de PULL UP, fazendo com que o LED acenda sempre que o transistor ligado ao sinal de saída do comparador estiver desligado.

Para a polarização do circuito foram utilizados transistores 2N2222 e resistores de 10 k Ω . Além disso, foi utilizado um resistor de 1 k Ω , já calculado anteriormente, para a correta polarização do LED verde. Esse resistor está ligado diretamente ao (V_{CC}) e ao LED verde, garantindo a correta polarização do LED.

LED amarelo

Para acionar o LED amarelo, foi utilizado a mesma ligação de dois transistores NPN, porém com a diferença de que o primeiro transistor é acionado utilizando o sinal de saída do comparador de 10V e o resistor de polarização do LED amarelo está ligado ao sinal de 6V. Dessa forma, o LED amarelo é acionado quando a tensão de saída está entre 6 V e 10 V, conforme a tabela verdade.

Para a polarização do circuito foram utilizados transistores 2N2222 e resistores de 10 k Ω . Além disso, foi utilizado um resistor de 1 k Ω , já calculado anteriormente, para a correta polarização do LED amarelo.

LED vermelho

Esse LED é o mais fácil de ser implementado, pois ele é acionado quando a tensão de saída é maior que 10 V. Dessa forma, foi utilizado diretamente o sinal proveniente do comparador de 10V para acionar o LED vermelho. Para a correta polarização do LED vermelho, foi utilizado um resistor de 1 k Ω , já calculado anteriormente.

Conclusão do indicador de tensão

Com os cálculos apresentados, os componentes do indicador de tensão foram dimensionados conforme:

- LED verde: 2N2222, 10 k Ω , 1 k Ω ;
- LED amarelo: 2N2222, 10 k Ω , 1 k Ω ;
- LED vermelho: 1 k Ω .

Circuito final do indicador de tensão

O circuito final do indicador de tensão é composto pelos LEDs indicadores, transistores NPN, resistores de polarização, conforme a figura a seguir:

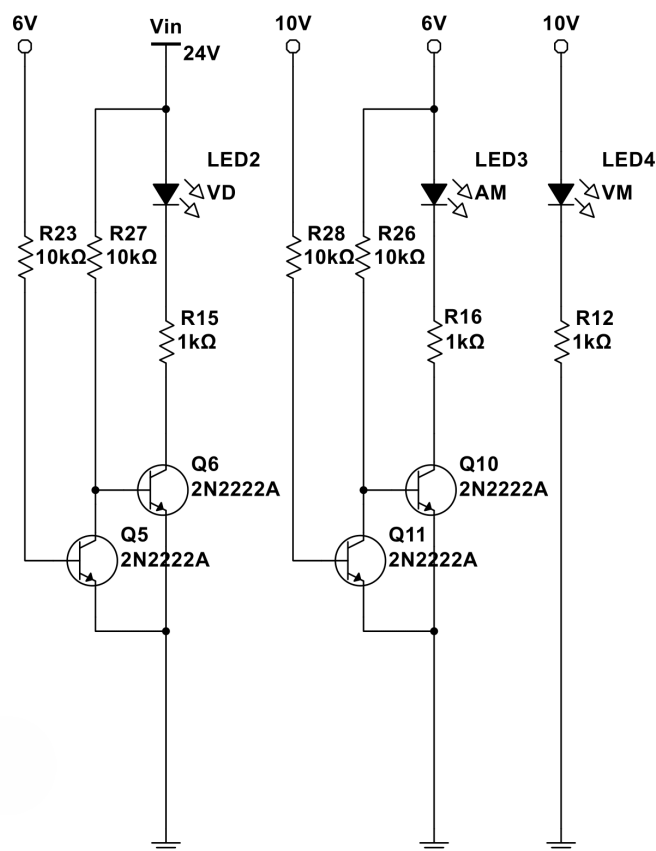


Figura 4: Circuito final do monitor de tensão

Conclusão da fonte linear

Com todos os cálculos e implementações realizados, a fonte variável foi projetada com sucesso, atendendo a todos os requisitos especificados. O circuito foi implementado com componentes discretos, garantindo a confiabilidade e a precisão do regulador de tensão, do limitador de corrente e da sinalização de tensão. Além disso, a fonte variável foi projetada para fornecer uma tensão ajustável acima do especificado, garantindo a operação segura e confiável do circuito.

Circuito final da fonte linear

O circuito final da fonte variável é composto pelos elementos de regulador de tensão, limitador de corrente, comparador de tensão e indicador de tensão, conforme a figura a seguir:

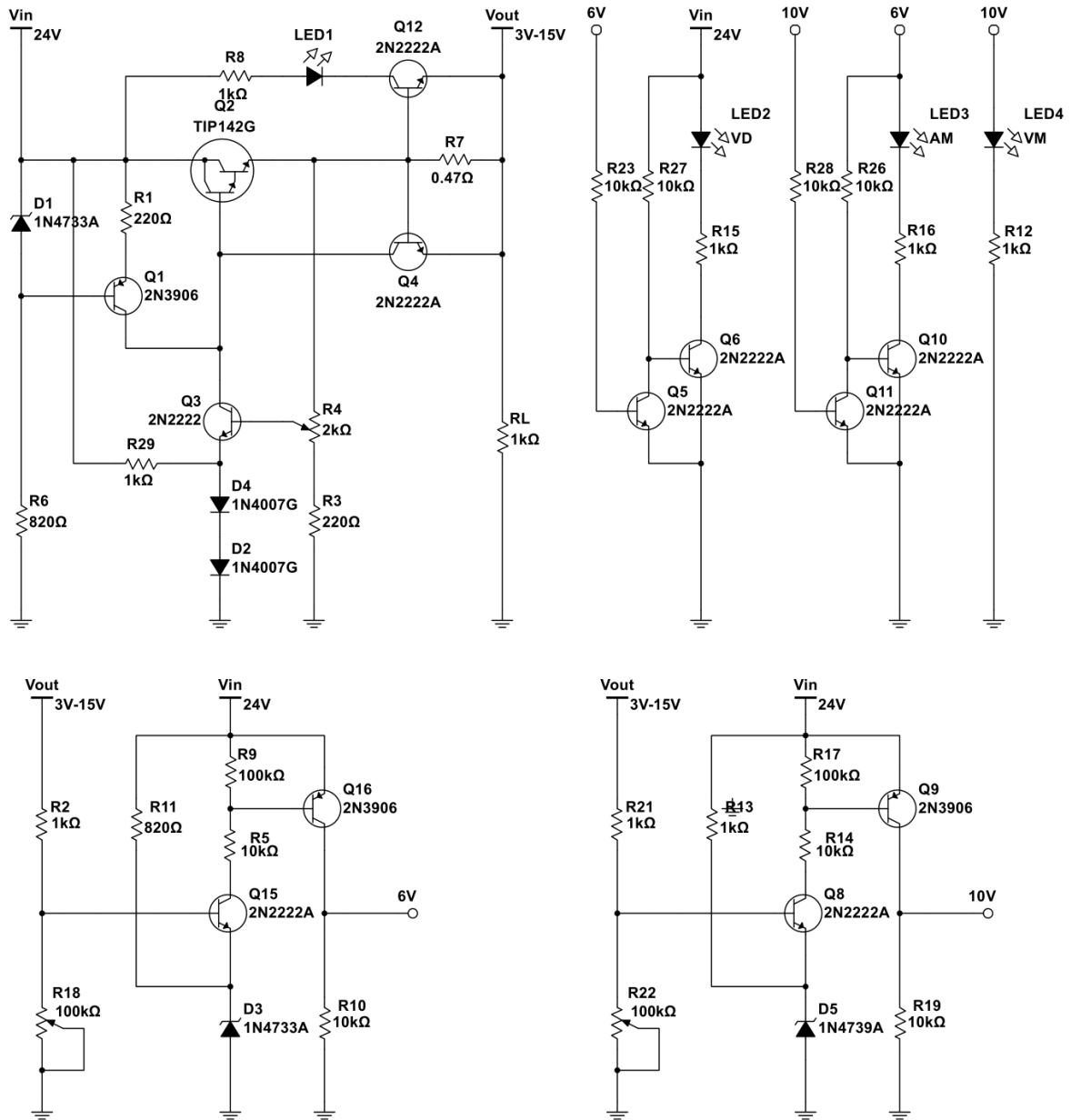


Figura 5: Circuito final da fonte linear

3.3 Simulação

O projeto da fonte de alimentação linear com realimentação de tensão foi inicialmente desenvolvido e testado no ambiente de simulação *Multisim® 14.2*, uma ferramenta amplamente utilizada para o estudo e validação de circuitos eletrônicos fornecida pela National Instruments. O uso do simulador permitiu verificar de forma eficiente o desempenho do circuito antes de sua montagem física, reduzindo os riscos de falhas e otimizando o processo de desenvolvimento.

Durante a simulação, foram realizados diversos testes abrangentes para avaliar o comportamento do circuito em diferentes condições de operação. Entre os principais testes realizados destacam-se:

- **Tensão de saída:** Verificação da estabilidade e precisão da tensão de saída em diferentes condições de carga e variações na tensão de entrada.
- **Corrente de saída:** Análise do fornecimento de corrente dentro dos limites especificados, garantindo que o circuito atendesse às exigências de carga.
- **Proteção contra sobrecorrente:** Validação do funcionamento do sistema de proteção, assegurando que o circuito interrompa o fornecimento de corrente em situações de curto-circuito ou excesso de carga.
- **Sinalização de tensão:** Teste das funcionalidades de indicação visual, como LEDs, para informar o estado do circuito (normal, sobrecarga, etc.).
- **Dissipação de potência:** Monitoramento das potências dissipadas nos principais componentes, como transistores, resistores e diodos, para garantir que operem dentro dos limites de segurança térmica especificados pelos fabricantes.

A análise detalhada de todos os dispositivos utilizados confirmou a conformidade com os requisitos de projeto, como segurança térmica e confiabilidade dos componentes, assegurando que o circuito é robusto e eficiente.

Notavelmente, o circuito não exigiu ajustes adicionais durante a fase de simulação. Todos os parâmetros de projeto foram atendidos com exatidão, e o circuito se comportou conforme o esperado em todas as condições analisadas. Essa etapa permitiu uma validação inicial eficiente, demonstrando que o circuito era funcional e atendia aos critérios de desempenho estabelecidos, garantindo maior segurança para a etapa de montagem física do protótipo.

3.4 Montagem

Após a validação do circuito por meio da simulação, o próximo passo foi a montagem física do protótipo da fonte de alimentação linear. A montagem foi realizada seguindo as diretrizes do projeto, com atenção especial à organização dos componentes, conexões elétricas e segurança do circuito.

Inicialmente, o grupo realizou a aquisição de todos os componentes necessários para a montagem, garantindo que todos os itens estivessem disponíveis antes do início do processo. Em seguida, os componentes foram organizados e separados de acordo com suas funções, facilitando a montagem e evitando erros durante o processo.

A montagem foi realizada em um protoboard de alta qualidade, que oferece uma plataforma robusta e confiável para a conexão dos componentes. O uso do protoboard permitiu uma montagem rápida e eficiente, além de facilitar a identificação de possíveis erros e a realização de ajustes durante o processo.

Para uma montagem organizada e segura, o grupo seguiu as seguintes etapas:

- **Instalação dos componentes:** Os componentes foram instalados no protoboard de acordo com o layout do circuito, garantindo que cada item estivesse conectado corretamente e em conformidade com o projeto.
- **Conexões elétricas:** As conexões elétricas foram realizadas com cuidado utilizando fio rígido de 0,5 mm² cortados na medida adequada, garantindo uma conexão sólida e confiável entre os componentes.
- **Testes de continuidade:** Após a montagem, foram realizados testes de continuidade para verificar a integridade das conexões elétricas e garantir que não houvesse interrupções ou falhas no circuito.
- **Verificação visual:** Uma verificação visual foi realizada para garantir que todos os componentes estivessem corretamente instalados e que não houvesse erros evidentes na montagem.
- **Testes preliminares:** Após a montagem, foram realizados testes preliminares para verificar o funcionamento do circuito e identificar possíveis problemas ou erros que precisassem ser corrigidos.

Durante o processo de montagem, o grupo adotou uma abordagem cuidadosa e metódica, garantindo que cada etapa fosse concluída com precisão e atenção aos detalhes. A montagem foi realizada de forma colaborativa, com os membros do grupo trabalhando juntos para garantir que o circuito fosse montado corretamente e que todos os componentes estivessem conectados de acordo com o projeto.

Além disso, foi dada atenção especial à organização dos fios e cabos, garantindo que o circuito fosse montado de forma limpa e organizada. Os fios foram cortados na medida adequada e organizados de forma a minimizar a interferência e garantir a integridade das conexões elétricas.

Por fim, um módulo voltímetro amperímetro foi adicionado a fonte de alimentação para monitorar a tensão e corrente de saída do circuito. Esse módulo foi conectado ao circuito de forma a permitir a medição precisa da tensão e corrente fornecida, garantindo o controle e monitoramento eficaz do circuito.

Conclusão da montagem

A montagem do protótipo da fonte de alimentação linear foi concluída com sucesso, atendendo a todos os requisitos de projeto e garantindo o funcionamento correto do circuito. A abordagem cuidadosa e organizada adotada durante o processo de montagem foi fundamental para o sucesso da etapa, garantindo que o circuito fosse montado de forma precisa e confiável.

Após a conclusão da montagem, o grupo realizou testes adicionais para verificar o funcionamento do circuito e garantir que todos os requisitos de projeto fossem atendidos. Os testes

incluíram a verificação da tensão de saída, a corrente fornecida, a proteção contra sobrecorrente e a sinalização de tensão, entre outros aspectos.

Fotos da montagem

Na Figura 6, é possível observar o protótipo da fonte de alimentação linear montado no protoboard, com os componentes organizados e conectados de acordo com o projeto. A montagem foi realizada de forma organizada e cuidadosa, garantindo a integridade do circuito e o correto funcionamento do circuito.

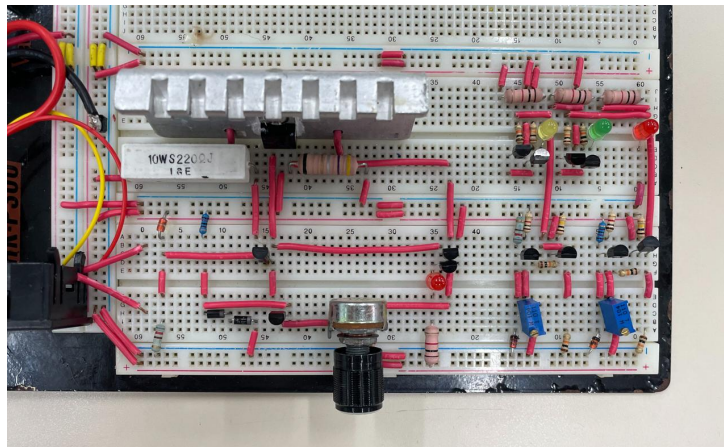


Figura 6: Montagem do protótipo da fonte de alimentação linear

Na Figura 7, é possível observar a fonte de alimentação em seu estado de funcionamento de sobre corrente, onde o LED vermelho está aceso, indicando que a corrente de saída ultrapassou o limite de 1 A. Esse estado de funcionamento demonstra a eficácia do sistema de proteção contra sobrecorrente, garantindo a segurança do circuito e dos dispositivos conectados.

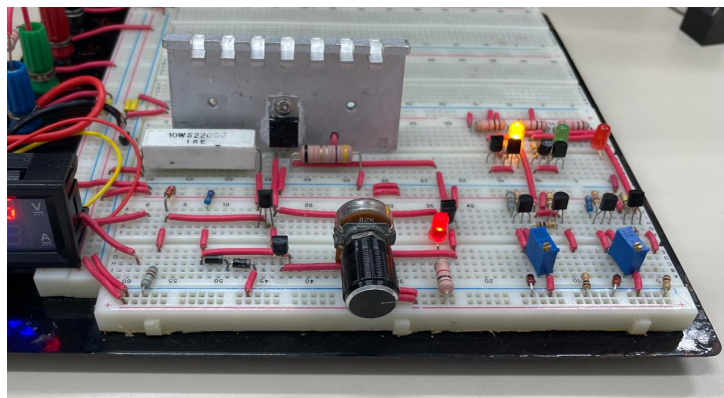


Figura 7: Funcionamento da fonte de alimentação em estado de sobre corrente

4 Resultados e discussões

O projeto da fonte de alimentação linear com realimentação de tensão foi implementado com sucesso, atendendo aos requisitos de tensão e corrente especificados. A seguir, apresen-

tamos os resultados obtidos em relação à tensão de saída, corrente máxima e estabilidade do circuito.

4.1 Tensão de saída

O circuito foi projetado a fim de fornecer uma faixa de valores maior que a especificação fornecida para esse projeto. Sendo assim, para comprová-lo, utilizando uma carga de $1\text{ k}\Omega$, foi realizado um teste de tensão de saída variando o potenciômetro a fim de obter a tensão de saída máxima e mínima. Os resultados obtidos foram comparados com os calculados e simulados, conforme a Tabela 2.

Tabela 2: Comparação entre tensões de saída calculadas, simuladas e medidas.

Tensão	Calculada (V)	Simulada (V)	Medida (V)
Mínima	2,10	2,17	2,10
Máxima	21,19	18,00	19,35

Essa diferença entre os valores calculados e simulados pode ser atribuída a variações nos componentes utilizados, como resistores e transistores, bem como a imprecisões nos modelos utilizados na simulação. A tensão de saída máxima, em particular, ficou abaixo do esperado, o que pode ser explicado pela limitação do transistor de potência e pela dissipação de calor no circuito.

De qualquer forma, a faixa de tensão de saída obtida atende aos requisitos do projeto, fornecendo uma margem de segurança para a operação do circuito.

4.2 Corrente máxima

Para verificar a corrente máxima (limitada), fornecida pela fonte de alimentação, foi realizado um teste de curto-circuito, com a tensão de saída ajustada para o valor máximo. A corrente foi medida e comparada com o valor especificado para o projeto, conforme a Tabela 3.

Tabela 3: Comparação entre corrente máxima calculada, simulada e medida.

Corrente	Calculada (A)	Simulada (A)	Medida (A)
Máxima	1,49	1,54	1,54

A diferença entre os valores calculados e medidos pode ser atribuída a variações nos componentes, bem como a imprecisões na medição da corrente, mas o maior fator é o fato da limitação de corrente estar diretamente relacionada ao V_{BE} do transistor de limitação de corrente, o qual na prática é menor que o valor teórico de $0,7\text{ V}$. Sendo assim, a corrente máxima obtida é menor que a especificada, mas ainda dentro da faixa de operação segura do circuito.

4.3 Estabilidade

A estabilidade do circuito foi avaliada em função da variação da carga, com o objetivo de verificar a capacidade de manter a tensão de saída constante. Foram realizados testes com cargas para fornecer 1 A nas tensões ajustadas de 3 V e 15 V, conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 4: Estabilidade da tensão de saída sob diferentes cargas.

Carga Ω	Tensão (V)	Atendeu?
3,3	3,00	SIM
15	15,00	SIM

Os resultados obtidos demonstram que o circuito é capaz de manter a tensão de saída estável, mesmo com variações na carga. Isso confirma a eficácia da realimentação de tensão e a robustez do projeto em relação a mudanças nas condições de operação.

4.4 Regulação de carga

A regulação de carga foi avaliada em função da tensão de saída, com o objetivo de verificar a capacidade do circuito de manter a tensão constante em diferentes condições de carga. Para realizar o teste foi a fonte foi ajustada para fornecer 10 V sem carga e após isso foi conectado uma carga de 10 Ω . A partir da variação de tensão na carga a regulação foi calculada conforme a equação a seguir:

$$\text{Regulação de carga} = \frac{V_{\text{sem carga}} - V_{\text{com carga}}}{V_{\text{sem carga}}} \times 100\% \quad (1)$$

Os resultados calculados, simulados e medidos são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Regulação de carga calculada, simulada e medida.

Regulação	Calculada (%)	Simulada (%)	Medida (%)
Regulação	0,00	4,59	4,60

Os resultados obtidos confirmam a eficácia da regulação de carga do circuito, mantendo a tensão de saída estável mesmo com variações na carga. A regulação de carga medida é próxima do valor simulado, demonstrando a precisão do projeto em relação a esse aspecto.

4.5 Monitor de tensão

O monitor de tensão foi ajustado para que o sinal de 6 V seja acionado exatamente quando a tensão de saída for de 6 V, o mesmo foi feito para o sinal de 10 V. Após isso, foi realizado um teste de tensão de saída variando o potenciômetro a fim de verificar que o monitor de tensão em janela estava funcionando conforme o esperado.

Com o comparador de tensão ajustado, foi possível constatar que o monitor em janela estava funcionando conforme o esperado e que a troca do LED verde para o amarelo ocorreu no ponto de 6 V e a troca do LED amarelo para o vermelho ocorreu no ponto de 10 V. Dessa forma, podemos concluir que o monitor de tensão em janela está funcionando conforme o esperado.

5 Conclusão

O projeto da fonte de alimentação linear com realimentação de tensão demonstrou ser funcional e eficiente, atendendo aos requisitos estabelecidos. Desde o processo de concepção, simulação, montagem até a realização dos testes, cada etapa foi crucial para validar o desempenho e a confiabilidade do circuito.

Inicialmente, os resultados mostraram que a tensão de saída foi ajustada e estabilizada dentro dos limites especificados, mesmo diante de variações de carga. Embora tenham sido observadas discrepâncias entre valores calculados, simulados e medidos, estas foram compreendidas como decorrentes de tolerâncias nos componentes e limitações práticas, como a variação do V_{BE} dos transistores e dissipação térmica. Apesar disso, o circuito se mostrou robusto e capaz de operar de maneira confiável na faixa projetada.

Os testes de corrente máxima indicaram que o circuito protege eficazmente os componentes e a carga em situações de curto-circuito. Embora a corrente medida seja ligeiramente inferior à calculada, o projeto foi validado por operar dentro de limites seguros e atender à funcionalidade desejada.

Outro aspecto relevante foi a avaliação da regulação de carga e estabilidade, que destacaram o desempenho do circuito na manutenção da tensão de saída em diferentes condições. A regulação foi confirmada com base nos resultados experimentais e simulados, validando o modelo teórico e a eficácia da realimentação de tensão.

O monitor de tensão, configurado para atuar como comparador em janela, também foi testado e demonstrou precisão no acionamento dos LEDs indicativos em pontos de tensão predefinidos. Essa funcionalidade garante maior controle e monitoramento da fonte, agregando valor ao projeto.

Por fim, este trabalho exemplifica a importância de uma abordagem metodológica completa, unindo teoria, simulação e experimentação. O projeto alcançou todos os objetivos iniciais e estabeleceu uma base sólida para futuras melhorias, como a utilização de componentes mais precisos ou a inclusão de funcionalidades adicionais, como proteção térmica ou interfaces digitais para monitoramento.

Este estudo reforça que a integração de conceitos teóricos e práticos é essencial para o desenvolvimento de circuitos confiáveis e eficientes, sendo uma excelente aplicação de conhecimentos em eletrônica e engenharia elétrica.

Referências

BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. **Eletrônica: Teoria e Aplicações**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

MALVINO, A. P.; BATES, D. J. **Eletrônica: Volume 1**. São Paulo: Makron Books, 2007.