

MATERIAL AUXILIAR ETAPAS DO PROJETO DE FONTES LINEARES

1 INTRODUÇÃO

Este material tem o objetivo de auxiliar no projeto da fonte linear de tensão, apresentando um exemplo para permitir que os estudantes realizem o projeto de sua fonte.

Os objetivos deste material são:

- Apresentar as etapas de projeto de uma fonte linear de tensão;
- Realizar, a título de exemplo, o projeto de uma fonte linear com transistor e diodo zener;
- Auxiliar os estudantes no projeto de sua fonte linear.

2 ETAPAS PARA PROJETO DE FONTES LINEARES

As principais etapas para o projeto de uma fonte linear de tensão são:

1. Definir as especificações da carga (V_o e $I_o > P_o$);
2. Escolher a topologia do regulador de tensão;
3. Dimensionar os componentes do circuito regulador de tensão;
4. Determinar o capacitor de filtro;
5. Dimensionar os diodos retificadores;
6. Dimensionar o transformador de entrada;
7. Determinar os dissipadores de calor;
8. Determinar os elementos do circuito de sinalização;
9. Dimensionar os elementos de proteção.

3 CIRCUITO PROJETADO

O circuito a ser projetado está mostrado na figura a seguir.

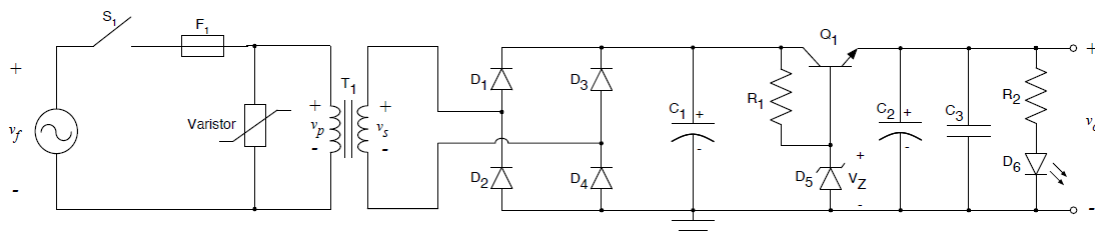


Figura 1 – Circuito da fonte linear a ser projetada.

4 ETAPA 1 - DEFINIR AS ESPECIFICAÇÕES DA CARGA

Inicialmente devem ser especificadas as tensões e correntes de saída da fonte linear, para então se calcular a potência da mesma.

Assim, neste exemplo se tem:

$$V_o = 12 \text{ V};$$

$$I_o = 1 \text{ A}.$$

Assim, a potência na saída será:

$$P_o = V_o \cdot I_o = 12 \cdot 1 = 12 \text{ W}$$

5 ETAPA 2 - ESCOLHER A TOPOLOGIA DO REGULADOR DE TENSÃO

Este exemplo de projeto utiliza o regulador de tensão com transistor e diodo zener, conforme mostrado na figura 1.

Para uma tensão de saída de 12 V e 1 A, seria possível utilizar um regulador integrado, como por exemplo, o LM7812. No entanto, o objetivo deste projeto é a explicação detalhada dos cálculos quando se utiliza transistor e diodo zener. De todo modo, esta metodologia pode ser facilmente ajustada para o projeto com reguladores de tensão integrados.

6 ETAPA 3 - ESCOLHER A TOPOLOGIA DO REGULADOR DE TENSÃO

Este exemplo de projeto utiliza o regulador de tensão com transistor e diodo zener, conforme mostrado na figura 1.

Os elementos a serem projetados são:

- Diodo zener (D_5);
- Resistor série (R_1);
- Transistor de potência (Q_1).

A tensão no diodo zener (D_5) será determinada a partir da tensão de saída somada com a tensão entre base-emissor do transistor (Q_1), então:

$$V_z = V_o + V_{BE} = 12 + 0,7 = 12,7 \text{ V}$$

O diodo zener comercial mais próximo será de 13 V, sendo então:

- 1N4743A, 13 V e 1 W.

A corrente no coletor pode ser considerada igual a corrente de emissor, desprezando-se neste caso a corrente do diodo emissor de luz (D_6), da ordem de 10 mA, comparada com a corrente de saída que é de 1 A.

Assim:

$$I_C = I_o = 1 \text{ A}$$

A tensão máxima entre coletor e emissor do transistor Q_1 pode ser estimada a partir da tensão de saída (V_o) e da queda de tensão (V_{CE}), sendo:

$$V_{CE(o)} = 1,5 \cdot (V_o + 3) \cdot \sqrt{2} = 1,5 \cdot (12 + 3) \cdot \sqrt{2} = 31,82 \text{ V}$$

Assim, escolhe-se um transistor para corrente superior a 1 A e tensão superior a 32 V:

- BD135G, 45 V e 1,5 A.

O resistor R_1 será escolhido posteriormente, após o dimensionamento do transformador.

Os capacitores C_2 e C_3 tem a finalidade de eliminar ruídos, atuando como filtro de saída da fonte e podem ter valores típicos, como:

- C_2 - Capacitor eletrolítico de 10 μF e 50 V;
- C_3 - Capacitor cerâmico de 100 nF e 50 V.

7 ETAPA 4 - DIMENSIONAR O CAPACITOR DE FILTRO

O capacitor de filtro C_1 será eletrolítico e de alto valor, para que se tenha uma ondulação baixa na tensão da fonte linear.

A tensão mínima necessária para o correto funcionamento do regulador de tensão, isto é, para que a saída seja de 12 V deve ser:

$$V_{C1(min)} = V_o + V_{CE} = 12 + 3 = 15 \text{ V}$$

O valor de 3 V para a tensão sobre o transistor é um valor típico para reguladores de tensão lineares.

A ondulação de tensão sobre o capacitor de filtro (C_1), para este exemplo, será de 10%:

$$\Delta V = 10\%$$

Definindo a ondulação (*ripple*) em função da tensão máxima, se tem:

$$V_{C1(min)} = V_{C1(max)} - \Delta V \cdot V_{C1(max)} = V_{C1(max)} \cdot (1 - \Delta V)$$

Então se tem como tensão máxima no capacitor:

$$V_{C1(max)} = \frac{V_{C1(min)}}{1 - \Delta V} = \frac{15}{1 - 0,1} = 16,67 \text{ V}$$

O capacitor C_1 deverá fornecer energia para todos os circuitos após o mesmo. Desta forma, além da potência da saída, também se deve levar em conta a potência dissipada no transistor. Esta potência será inicialmente estimada como sendo:

$$P_{Q1} = V_{CE} \cdot I_C = 3 \cdot 1 = 3 \text{ W}$$

Agora se pode determinar o capacitor C_1 :

$$C_1 = \frac{P_o + P_{Q1}}{F_r \cdot (V_{C1(max)}^2 - V_{C1(min)}^2)} = \frac{12 + 3}{60 \cdot (16,67^2 - 15^2)} = 0,0047 \text{ F} = 4700 \mu\text{F}$$

Assim, escolhe-se o valor comercial mais próximo:

- Capacitor eletrolítico de 4700 μF x 50 V.

8 ETAPA 5 - DIMENSIONAR OS DIODOS RETIFICADORES

Os diodos retificadores (D_1 a D_4) serão determinados a partir da corrente média nos mesmos e de sua tensão máxima reversa.

A tensão máxima reversa nos diodos pode ser estimada à semelhança ao que foi feito para o transistor Q_1 , sendo:

$$V_{RRM} = 1,5 \cdot (V_o + 3) \cdot \sqrt{2} = 1,5 \cdot (12 + 3) \cdot \sqrt{2} = 31,82 \text{ V}$$

Por sua vez, a corrente média nos diodos, desconsiderando-se a corrente no resistor R_1 , diodo zener (D_5) e base do transistor Q_1 ($I_{B(Q1)}$), será:

$$I_D = \frac{I_o}{2} = \frac{1}{2} = 0,5 \text{ A}$$

Assim, escolhe-se o valor comercial mais próximo:

- 1N4001, 50 V e 1 A.

9 ETAPA 6 - DIMENSIONAR O TRANSFORMADOR

A tensão máxima (de pico) no secundário do transformador T_1 poderá ser determinada a partir da tensão máxima no capacitor C_1 e levando em conta que se tem queda de tensão em dois diodos, no caso do retificador onda completa em ponte.

Assim:

$$V_{s(min)} = V_{C1(max)} + 2 \cdot V_D = 16,67 + 2 \cdot 1,1 = 18,87 \text{ V}$$

Então a tensão eficaz no secundário do transformador será:

$$V_s = \frac{V_{s(min)}}{\sqrt{2}} = \frac{18,87}{\sqrt{2}} = 13,34 \text{ V}$$

O transformador comercial mais próximo de 13 V será de 15 V, podendo se escolher um transformador com secundário em derivação central com 7,5 V + 7,5 V, ou secundário simples de 15 V.

A potência ativa que o transformador deverá entregar ao circuito será:

$$P_{T1} = P_o + P_{Q1} + P_D$$

A potência dissipada nos quatro diodos retificadores será:

$$P_D = 4 \cdot V_D \cdot I_D = 4 \cdot 1,1 \cdot 0,5 = 2,2 \text{ W}$$

Assim:

$$P_{T1} = 12 + 3 + 2,2 = 17,2 \text{ W}$$

O fator de potência típico de circuitos retificadores com filtro capacitivo é da ordem de 50%.

A figura 2 apresenta uma curva do fator de potência em função da ondulação de tensão no capacitor de filtro, onde se nota que o valor está próximo de 0,5.

Assim, a potência aparente no transformador T_1 será:

$$S_{T1} = \frac{P_{T1}}{FP} = \frac{17,2}{0,5} = 34,4 \text{ VA}$$

Portanto, a corrente eficaz no secundário do transformador será:

$$I_S = \frac{S_{T1}}{V_s} = \frac{34,4}{15} = 2,3 \text{ A}$$

Assim, pode-se escolher um transformador comercial:

- Transformador de (7,5 V + 7,5 V) ou 15 V x 2,5 ou 3 A.

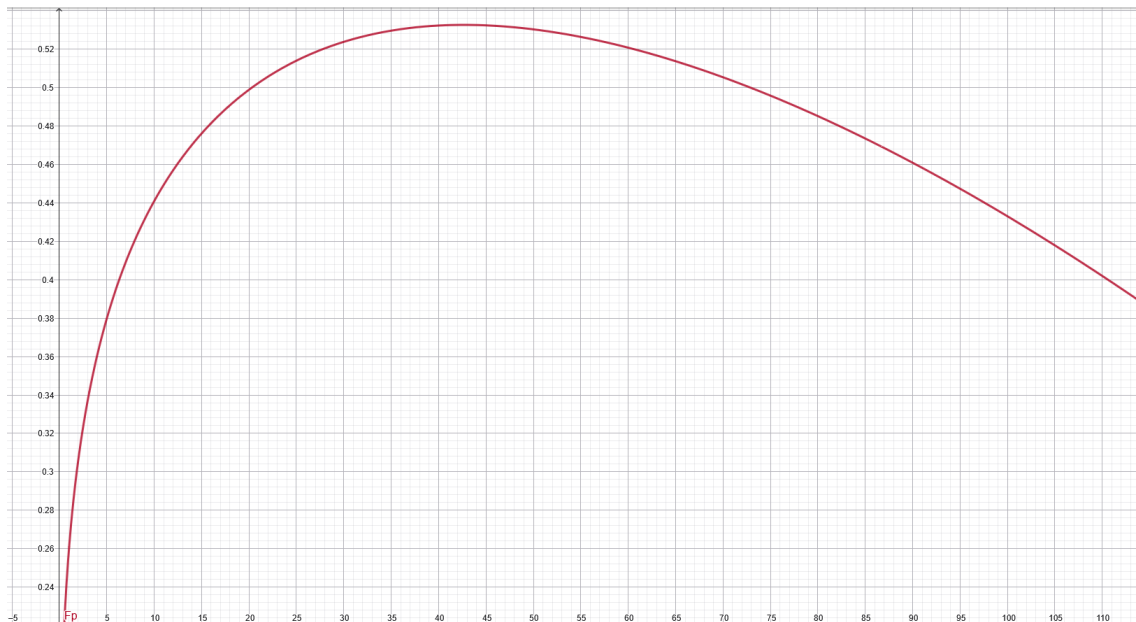


Figura 02 – Fator de potência em função da ondulação de tensão no capacitor de filtro.

10 ETAPA 7 - DETERMINAR OS ELEMENTOS DO CIRCUITO DE SINALIZAÇÃO

Os componentes de sinalização de funcionamento da fonte de tensão são:

- Diodo emissor de luz (D₆);
- Resistor série (R₂).

O diodo emissor de luz (LED) (D₆) pode ser vermelho, de 5 mm:

- V_{LED} = 2 V e I_{LED} = 10 mA.

O resistor R₂ será determinado como:

$$R_2 = \frac{V_o - V_{LED}}{I_{LED}} = \frac{(13-0,7)-2}{10 \cdot 10^{-3}} = 1,03 \text{ k}\Omega$$

A potência do resistor R₂ será:

$$P_{R2} = R_2 \cdot I_{R2}^2 = 1 \text{ k} \cdot (10 \text{ m})^2 = 100 \text{ mW}$$

Pode-se usar um resistor de 1 kΩ x 1/4 W.

11 ETAPA 8 - DETERMINAR OS ELEMENTOS DO CIRCUITO DE PROTEÇÃO

Os componentes de proteção da fonte de tensão são:

- Varistor;

- Fusível (F_1).

O varistor pode ser para 250 V, modelo 20D391K.

A corrente no primário do transformador será calculada a partir de sua corrente no secundário. Assim, é necessário calcular a relação de transformação do transformador T_1 , que será:

$$RT = \frac{V_p}{V_s} = \frac{220}{15} = 14,67$$

Então a corrente no primário será:

$$I_P = \frac{I_S}{RT} = \frac{2,3}{14,67} \approx 157 \text{ mA}$$

O fusível pode ser para 500 mA.

12 ETAPA 9 - DIMENSIONAR OS COMPONENTES DO CIRCUITO REGULADOR DE TENSÃO

Os componentes do circuito regulador de tensão são:

- Diodo zener (D_5);
- Resistor série (R_1);
- Transistor de potência (Q_1).

O diodo zener (D_5) e o transistor de potência Q_1 foram determinados anteriormente na etapa 3.

Agora será possível calcular o resistor série R_1 , sendo necessário se determinar as tensões efetivas no capacitor de filtro C_1 a partir do transformador escolhido.

A tensão máxima no capacitor C_1 será:

$$V_{s(max)} = \sqrt{2} \cdot V_s = \sqrt{2} \cdot 15 = 21,2 \text{ V}$$

$$V_{C1(max)} = V_{s(max)} - 2 \cdot V_D = 21,2 - 2 \cdot 1,1 = 19 \text{ V}$$

Por sua vez, a tensão mínima no capacitor C_1 será:

$$V_{C1(min)} = V_{C1(max)} - \Delta V \cdot V_{C1(max)} = 19 - 0,1 \cdot 19 = 17,1 \text{ V}$$

A corrente máxima no diodo zener (D_5) será:

$$I_{D5(max)} = \frac{P_{D5}}{V_{D5}} = \frac{P_Z}{V_Z} = \frac{1}{13} \approx 77 \text{ mA}$$

Assim, a resistência mínima que o resistor R_1 deve possuir para que o diodo zener opere abaixo de sua potência máxima será:

$$R_{1(min)} = \frac{V_{C1(max)} - V_Z}{I_{D5(max)}} = \frac{19 - 13}{77 \text{ m}} = 77,9 \Omega$$

Por outro lado, a corrente mínima no diodo zener para que este funcione na região da curva zener será da ordem de 10% de sua corrente máxima:

$$I_{D5(min)} = I_{Z(min)} = 0,1 \cdot I_{Z(max)} = 0,1 \cdot 77 \text{ m} = 7,7 \text{ mA}$$

A corrente na base do transistor será:

$$I_{B(Q1)} = \frac{I_{C(Q1)}}{\beta_{Q1}} = \frac{1}{100} = 10 \text{ mA}$$

Assim, a resistência máxima do resistor R_1 será:

$$R_{1(max)} = \frac{V_{C1(min)} - V_Z}{I_{Z(min)} + I_{B(Q1)}} = \frac{17,1 - 13}{7,7 \text{ m} + 10 \text{ m}} = 231,6 \Omega$$

A tensão média no capacitor C_1 será:

$$V_{C1(med)} = \frac{V_{C1(max)} + V_{C1(min)}}{2} = \frac{19 + 17,01}{2} = 18 \text{ V}$$

A potência no resistor R_1 pode ser obtida por:

$$P_{R1} = \frac{V_{R1}^2}{R_1} = \frac{(V_{C1(med)} - V_Z)^2}{R_1} = \frac{(18 - 13)^2}{120} = 208,3 \text{ mW}$$

O resistor pode ser de $120 \Omega \times 1/4 \text{ W}$.

Agora é possível calcular a potência dissipada no transistor Q_1 , que será:

$$P_{Q1} = V_{CE} \cdot I_C = (V_{C1(med)} - V_o) \cdot I_o = (18 - 12,3) \cdot 1 = 5,7 \text{ W}$$

A resistência térmica entre junção e ambiente para o transistor escolhido é da ordem de $100 \text{ }^\circ\text{C/W}$.

Assim, pode-se calcular a temperatura na junção do transistor caso não seja utilizado dissipador de calor, como sendo:

$$T_j = T_a + R_{ja} \cdot P_{Q1} = 30 + 100 \cdot 5,7 = 600 \text{ }^\circ\text{C}$$

Esta temperatura é muito superior àquela suportada pelo transistor, que é da ordem de $150 \text{ }^\circ\text{C}$.

Assim, será necessário utilizar dissipador de calor.

A resistência térmica máxima entre junção e ambiente pode ser calculada por:

$$R_{ja} = \frac{T_j - T_a}{P_{Q1}} = \frac{150 - 30}{5,7} = 21,05 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

A resistência térmica entre junção e cápsula para o transistor escolhido é de $10 \text{ }^\circ\text{C/W}$, enquanto a resistência térmica entre cápsula e dissipador pode ser estimada como sendo $1 \text{ }^\circ\text{C/W}$.

Assim, a resistência térmica do dissipador de calor será:

$$R_{da} = R_{ja} - R_{jc} - R_{cd} = 21,05 - 10 - 1 = 10,05 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

Um dissipador típico com resistência térmica da ordem de $10 \text{ }^\circ\text{C/W}$, do fabricante HS Dissipadores, é mostrado na figura 3, tendo o código HS 2315 e altura de 4", ou seja, de 10 cm. Pode ser escolhido um dissipador diferente e que tenha menor altura, como o HS 2816 ou HS 3512, por exemplo.

A escolha do transistor com encapsulamento de plástico poderia ser revista, visando melhorar o projeto realizado, visto que este tipo de encapsulamento prejudica a dissipação térmica.

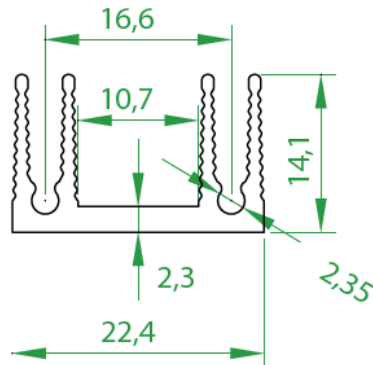


Figura 03 – Dissipador de calor para o transistor Q_1 .

13 COMPONENTES ESCOLHIDOS

A figura 4 apresenta uma tabela com o custo aproximado para os componentes escolhidos para este exemplo de projeto de uma fonte linear de tensão. Pode-se notar que o custo do transformador é elevado comparado com os demais componentes da fonte.

Número	Componente	Identificação	Valor
1	Diodo emissor de luz (LED)	D_6	R\$ 0,19
2	Resistores de 1/4 W	R_1 e R_2	R\$ 0,2
3	Capacitor cerâmico de 100 nF	C_3	R\$ 0,27
4	Capacitor eletrolítico de 10 μ F x 50 V	C_2	R\$ 0,27
5	Capacitor eletrolítico de 4700 μ F x 50 V	C_1	R\$ 11,64
6	Transistor de potência BD135	Q_1	R\$ 1,80
7	Diodo Zener de 13 V x 1 W, 1N 4743	D_5	R\$ 0,30
8	Diodos retificadores de 1 A x 50 V, 1N4001	D_1 a D_4	R\$ 0,52
9	Transformador 220 V / 15 V x 3 A	T_1	R\$ 85,83
10	Varistor	V_1	R\$ 4,31
11	Fusível de 500 mA	F_1	R\$ 0,29
12	Chave liga-desliga	S_1	R\$ 2,92
Total			R\$ 108,54

Figura 04 – Custo dos componentes escolhidos para a fonte de tensão projetada.

O custo do dissipador de calor e de outros elementos necessários (cabo, placa, conectores, etc.) não foi levado em conta na elaboração da tabela anterior, que tem por objetivo apenas uma estimativa inicial do custo total para a implementação da fonte projetada.

Na figura 5 se mostra uma imagem com os componentes escolhidos, junto ao circuito da fonte projetada.

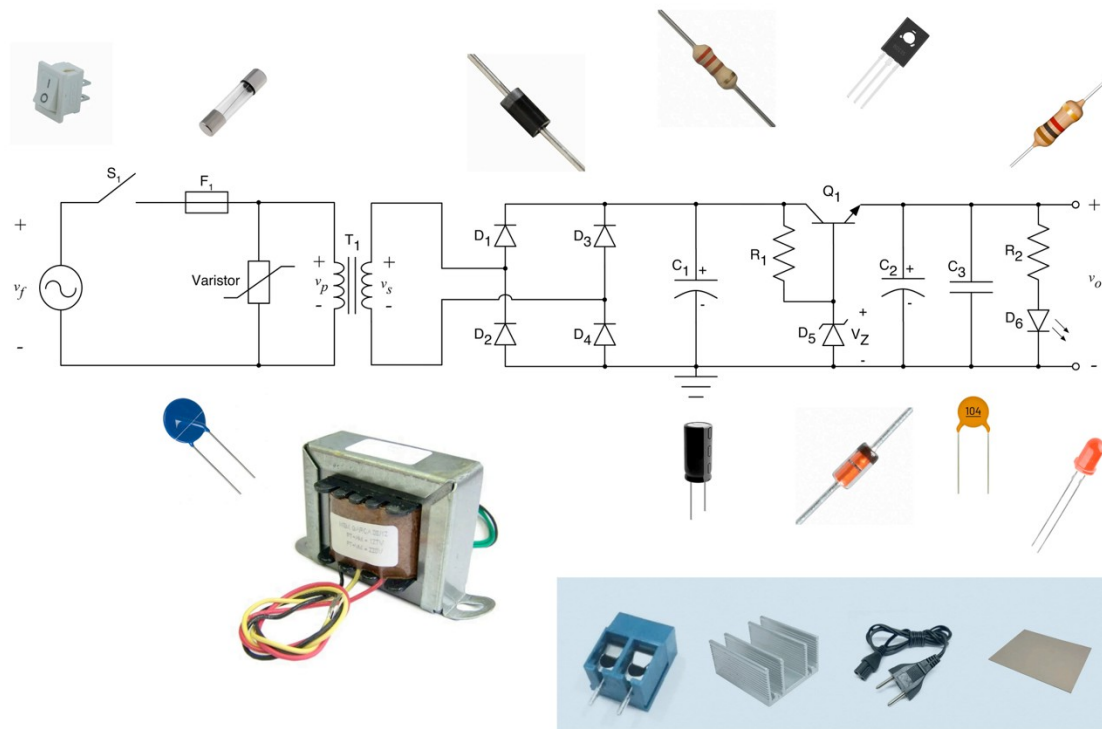


Figura 05 – Componentes escolhidos para a fonte de alimentação.

14 CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROJETO REALIZADO

Por fim, podem ser feitas algumas considerações sobre o projeto realizado:

- A tensão de saída, quando utilizamos diodo zener, pode ficar um pouco diferente daquela desejada;
- Pode ser interessante utilizar transistores Darlington (alto ganho);
- É importante que o transistor tenha encapsulamento adequado para boa dissipação de calor;
- A ondulação pode ser da ordem de 15 a 25%, tipicamente em torno de 20%;
- É comum entre os profissionais da área o uso de uma regra prática, resultando em $1000 \mu\text{F}$ para cada 1 A na saída da fonte. Neste caso teríamos para C_1 a capacitância de $1000 \mu\text{F}$, o que implicaria uma ondulação da ordem de 14%;
- A escolha do transformador é crítica, pois este elemento tem alto custo.