



INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

UNIDADE CURRICULAR: ELETRÔNICA I

PROFESSOR: MÁRCIO S. ORTMANN

ALUNO: NATÁLIA BESEN

## Projeto de Fonte Linear de Alimentação

### 1- Aspectos gerais do trabalho:

#### 1.1-Especificações técnicas básicas:

- Corrente de saída: 1 A
- Rede Elétrica: 220 V +- 10% , 60 Hz
- Ondulação da tensão de saída a plena carga: <5 %
- Regulação da tensão de saída: <3 %
- Tensão de saída : 12V

#### 1.2-Metodologia

Uma fonte linear pode ser observada como um conjunto de blocos, cada um responsável por uma função para obter o resultado final desejado. Nesse projeto cada bloco será analisado e projetado da seguinte forma:

- Escolha da topologia utilizada
- Análise teórica
- Escolha dos componentes
- Simulação do circuito
- Comparação dos resultados

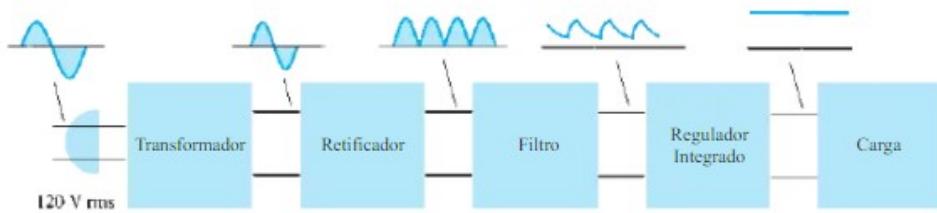
Para a etapa de simulação será utilizado o software LTspice e com o intuito de obter resultados mais realistas será adicionado o modelo spice dos componentes utilizados. Ao fim do projeto de todos os blocos a fonte será analisada como um todo e será possível concluir se o resultados desejado foi obtido e todas as especificações técnicas foram cumpridas.

### 2- Concepção geral da fonte

Uma fonte linear é composta basicamente por 4 blocos, o primeiro é o transformador que é o responsável por reduzir a tensão da rede elétrica para uma tensão mais próxima da saída da fonte desejada. O bloco seguinte é o retificador, que transforma a tensão de entrada senoidal em uma tensão contínua pulsante, para reduzir a pulsação e a ondulação da tensão de saída do retificador utiliza-se o próximo bloco, chamado filtro. Por fim, o último bloco que torna a tensão adequada para a saída da fonte linear é o regulador.

Create

**Diagrama em blocos mostrando os estágios de uma fonte de alimentação**



Fonte: Boylestad, 11º edição.

### 3-Dados de entrada

A seguir serão definidas as variáveis com os dados de entrada, as quais serão utilizadas ao longo do projeto.

$$V_p := 220 \cdot V$$

Tensão RMS nominal no primário

$$V_{pmin} := 220 \cdot (1 - 10\%) \cdot V = 198 \text{ V}$$

Tensão RMS mínima no primário

$$V_{pmax} := 220 \cdot (1 + 10\%) \cdot V = 242 \text{ V}$$

Tensão RMS máxima no primário

$$f := 60 \text{ Hz}$$

Frequência da tensão no primário

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

Tensão nominal média de saída

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

Corrente nominal de saída

### 4-Projeto dos circuitos

#### 4.1 - Especificação do transformador:

Para determinar a tensão que será necessária no secundário do transformador, soma-se a tensão de saída desejada a todas as quedas de tensão nos blocos entre secundário e saída, para o pior caso. Como ponto inicial, considera-se uma queda nominal de 4 V sobre o regulador, mais a queda do(s) diodos, mais a queda no filtro.

$$VR := 4 \text{ V}$$

Tensão nominal média sobre o regulador

$$VD := 0.7 \text{ V}$$

Tensão média sobre os diodos

$$VFac := V_o \cdot 5\% = 0.6 \text{ V}$$

Tensão ac no filtro

$$FT := 1.1$$

Fator de compensação do trafo para compensar queda de tensão quando carregado

$$V_{spico} := \left( V_o + VR + VD + \frac{VFac}{2} \right) \cdot FT = 18.7 \text{ V}$$

$$V_s := \frac{V_{spico}}{\sqrt{2}} = 13.223 \text{ V}$$

A tensão nominal do secundário é definida então com base nos valores comerciais e/ou disponíveis. Exemplo:

$$V_s := 15 \text{ V}$$

Tensão RMS nominal no secundário

$$a := \frac{V_p}{V_s} = 14.667$$

Relação de espiras

$$V_{smin} := \frac{V_{pmin}}{a} = 13.5 \text{ V}$$

Tensão RMS mínima no secundário

$$V_{smax} := \frac{V_{pmax}}{a} = 16.5 \text{ V}$$

Tensão RMS máxima no secundário

## 4.2-Projeto do retificador

O retificador de onda completa com ponto médio foi a topologia escolhida para utilização no projeto, dentre os motivos para a escolha desse retificador estão sua simplicidade de execução, menor quantidade de componentes e menor queda na tensão do secundário em relação a topologia em ponte.

Para o projeto do retificador será utilizada uma carga de 15 ohms, com corrente RMS de aproximadamente 1A em tensão nominal, para representar o circuito da fonte e a carga nominal que serão conectados no retificador posteriormente. A análise será realizada para a maior tensão de pico do primário, pois assim obtém-se os esforços elétricos e térmicos dos diodos para o pior caso.

**Retificador de onda completa com ponto médio sem filtro**



- Análise teórica:

$$V_{smax\_pico} := V_{smax} \cdot \sqrt{2} = 23.335 \text{ V}$$

Tensão de pico no secundário

$$V_{ret\_pico} := V_{smax\_pico} - VD = 22.635 \text{ V}$$

Tensão de pico na saída do retificador

$$V_{ret\_rms} := \frac{V_{ret\_pico}}{\sqrt{2}} = 16.005 \text{ V}$$

Tensão RMS na saída do retificador

$$w := 2 \cdot \pi \cdot 60$$

$$V_{ret\_med} := \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{\pi} V_{ret\_pico} \cdot \sin(wt) dwt$$

$$V_{ret\_med} = 14.41 \text{ V}$$

Tensão média na saída do retificador

$$Rl := 15 \text{ ohm}$$

$$Il_{med} := \frac{V_{ret\_med}}{Rl} = 0.961 \text{ A}$$

Corrente média na carga

$$ID_{med} := \frac{Il_{med}}{2} = 0.48 \text{ A}$$

Corrente média nos diodos

$$PIV := 2 \cdot V_{smax\_pico} - VD = 45.969 \text{ V}$$

Tensão de pico inversa nos diodos

$$PD := ID_{med} \cdot VD = 0.336 \text{ W}$$

Potência média dissipada em cada diodo

$$P_{total} := 2 \cdot PD = 0.672 \text{ W}$$

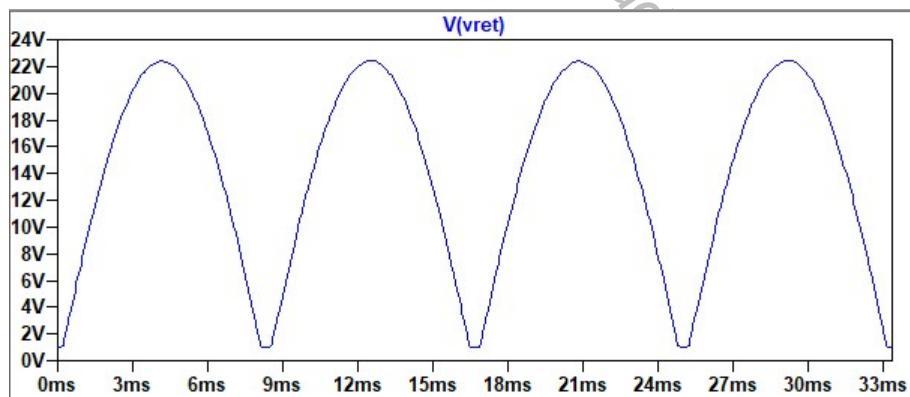
Potência média dissipada no retificador

- Escolha dos componentes:

A partir dos resultados obtidos na análise teórica é possível selecionar um modelo adequado para os diodos. O diodo escolhido foi o 1N4007, pois de acordo com seu datasheet ele suporta a tensão de pico inversa, corrente média e potência média necessárias para o funcionamento do projeto.

- Resultados da simulação:

Tensão Retificada na carga

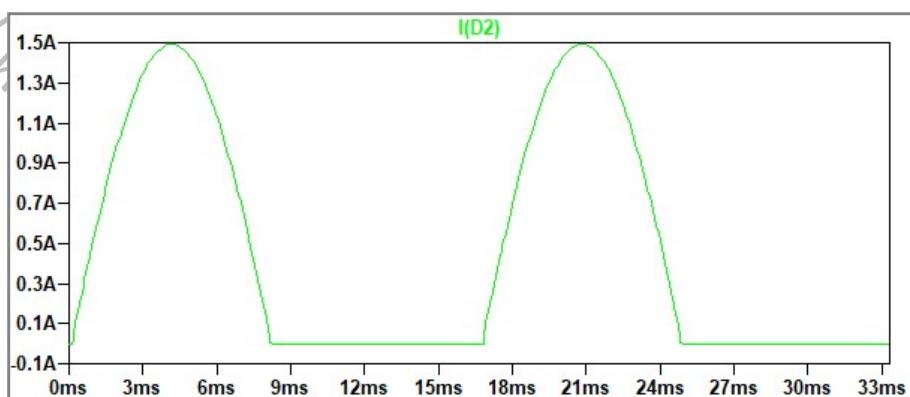


Tensão de pico na carga

Vert: 22.426554V

Created with  
CircuitLab

Corrente nos diodos



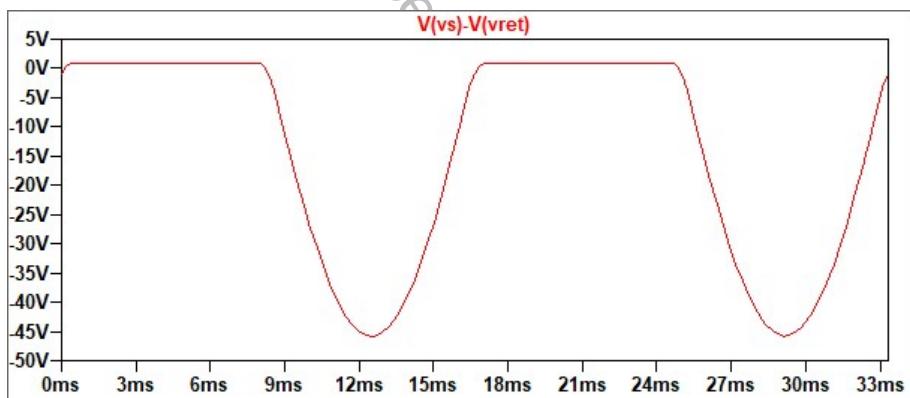
Corrente de pico nos diodos

Vert:

Corrente média nos diodos

Average:

Tensão nos diodos



Tensão de pico inversa nos diodos

Vert:

Tensão direta nos diodos

Vert:

Potência dissipada

$$ID_{med} := 465.36 \cdot 10^{-3} \text{ A}$$

$$PD := VD \cdot ID_{med} = 0.326 \text{ W}$$

$$VD := 924.91 \cdot 10^{-3} \text{ V}$$

$$P_{total} := 2 \cdot PD = 0.652 \text{ W}$$

### 4.3-Projeto do Filtro

O filtro utilizado será do tipo C, pois ele apresenta bons resultados e não gera perdas. Para essa etapa não há especificações pré-definidas para o fator de ondulação, portanto será considerado um fator de ondulação de até 10% após o filtro para o calculo da capacitância. Novamente será utilizada a tensão máxima do primário para os cálculos, pois é necessário encontrar a tensão máxima sobre o capacitor para dimensioná-lo.

- Análise teórica:

De acordo com o livro do Boylestad o fator de ondulação é:

$$\begin{aligned} r &= \frac{V_r (\text{rms})}{V_{CC}} \times 100\% \\ &= \frac{2.4I_{CC}}{CV_{CC}} \times 100\% = \frac{2.4}{R_L C} \times 100\% \end{aligned}$$

Considerando Icc em miliampéres, C em microfarads, Vcc em Volts e Rl em kilo-ohms. Portanto :

$$\begin{aligned} r &:= 10 \\ R_L &:= 15 \text{ ohm} \end{aligned} \quad C := \frac{2.4 \cdot 10^{-3}}{R_L \cdot r} \cdot 100 \left( \frac{C}{A} \right) = 0.002 \text{ F}$$

Considerando Rl em ohms e C em Farads.

Como Vcc é aproximadamente igual a Vpico, a tensão de ripple é:

$$V_{r\_rms} := \frac{Vsmax \cdot \sqrt{2} \cdot r}{100} = 2.333 \text{ V}$$

A tensão máxima sobre o capacitor será:

$$VC := Vsmax \cdot \sqrt{2} - VD = 22.41 \text{ V}$$

Vale lembrar que o aumento da capacitância de filtro propicia uma menor ondulação, porém aumenta a corrente de pico dos diodos retificadores.

- Escolha dos componentes:

O capacitância obtida na análise teórica foi 2000uF, portanto será escolhido um capacitor eletrolítico com valor comercial mais próximo e que suporte a tensão máxima obtida. Nesse caso o capacitor eletrolítico utilizado será de 2200uF e 25V.

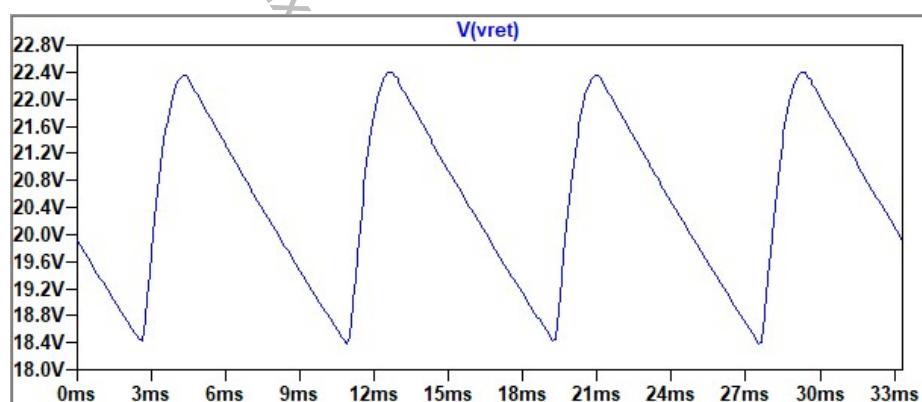
Quanto ao aumento da corrente da corrente de pico nos diodos, o modelo 1N4007 utilizado é capaz de suportar um surto de corrente de até 30A, como a corrente nos diodos não será tão elevada o modelo escolhido continua sendo adequado.

- Resultados da simulação:

### Retificador de onda completa com ponto médio com filtro capacitivo



Tensão na saída do retificador com filtro



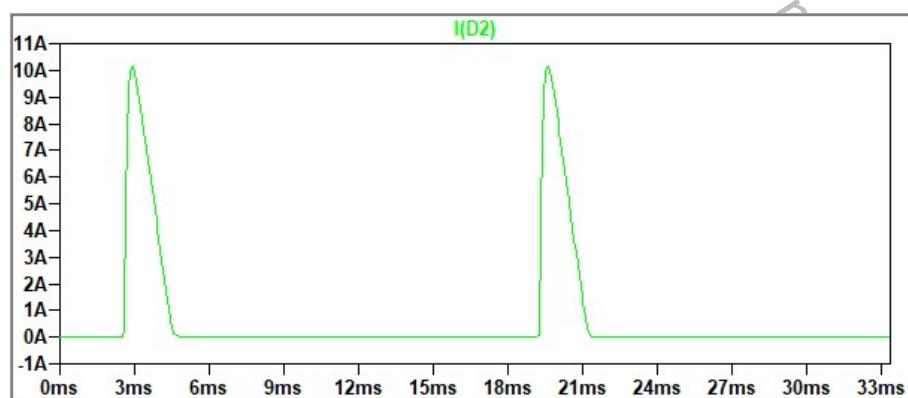
Tensão máxima no capacitor

Vert: 22.403574V

Tensão de ripple na saída do retificador

Vert: 3.9502185V

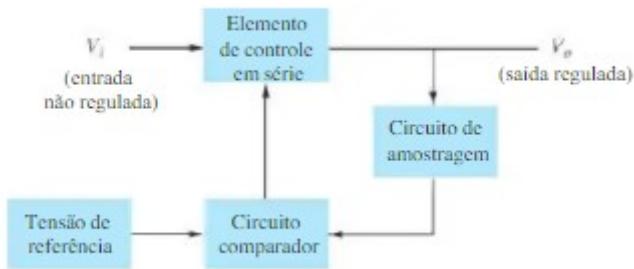
Corrente nos diodos



### Corrente de pico nos diodos

Vert:

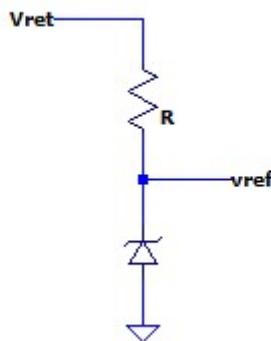
#### 4.4-Projeto do Regulador



##### 4.4.1- Circuito gerador da tensão de referência

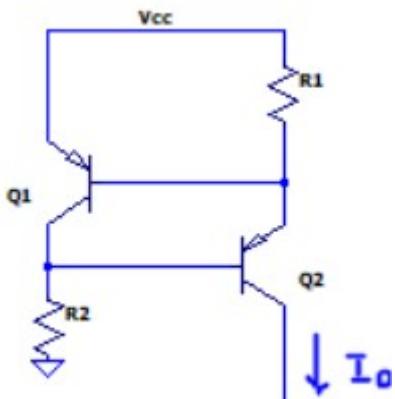
O componente responsável por gerar uma tensão de referência será o diodo zener, porém sabe-se que em um zener real possui uma resistência interna e que sua tensão varia de acordo com a corrente que passa por ele. Como a tensão no primário do transformador possui uma variação significativa um circuito comum de referência composto apenas por resistor e zener, como mostrado na figura abaixo, resultaria em uma variação na corrente do zener e consequentemente na sua tensão.

##### Círculo de tensão de referência simples



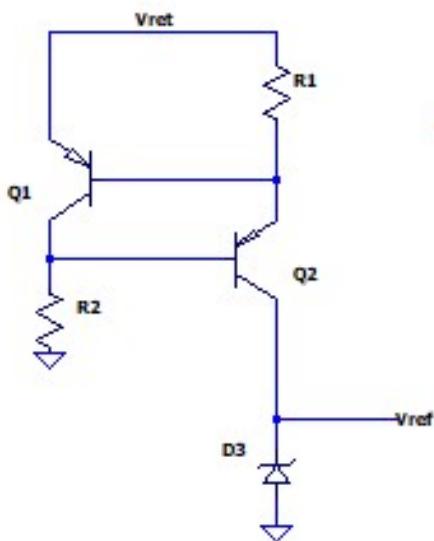
Para reduzir a variação na tensão de referência, será adicionado um circuito de fonte de corrente constante ao zener. A topologia utilizada utiliza dois transistores PNP como mostra a figura abaixo:

**Circuito de fonte de corrente melhorado**



O funcionamento da fonte de corrente é muito simples, devido a tensão VBE de Q1 a queda de tensão em  $R_1$  será sempre 0.7V independentemente de  $V_{cc}$ .  $R_2$  deve possuir resistência elevada e portanto baixa corrente, assim as tensões de base dos transistores são aproximadamente zero e a corrente em  $R_1$  é igual a corrente de saída.  
Sendo assim, o circuito completo de tensão de referência utilizado será:

**Circuito de tensão de referência completo**



- Análise teórica:

A tensão de zener nominal do diodo utilizado será 6.8V, por motivos explicados posteriormente, para esse modelo, de acordo com o datasheet, a corrente deve estar entre 0.25m e 20m. A corrente escolhida para que o zener opere adequadamente será de aproximadamente 5mA, pois quanto menor a corrente menor será a queda de tensão na resistência interna do zener.

$$Vz := 6.8 \text{ V}$$

Tensão nominal no zener

$$Iz := 5 \cdot 10^{-3} \text{ A}$$

Corrente no zener

$$Pz := Vz \cdot Iz = 0.034 \text{ W}$$

Potência dissipada no zener

$$VBE := 0.7 \text{ V}$$

Vbe dos transistores

$$R2 := 10 \cdot 10^3 \text{ ohm}$$

R2 da fonte de corrente

$$R1 := \frac{VBE}{Iz} = 140 \Omega$$

R1 da fonte de corrente

$$VCE\_Q2 := Vz - (Vsmax \cdot \sqrt{2} - VD)$$

$$VCE\_Q2 = -15.61 \text{ V}$$

Tensão VCE máxima no transistor Q2

- Escolha dos componentes:

Analizando o datasheet dos diodos zener do 1N5225 até 1N5267, o diodo 1N5235 de 6.8V foi escolhido, pois é o que possui a menor resistência interna.

#### Parte do datasheet dos diodos zener

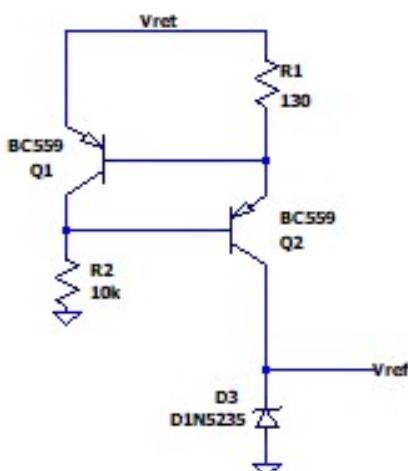
Type	Nominal Zener Voltage <sup>(3)</sup> at IzT Vz (V)	Test Current IzT (mA)	Maximum Zener impedance <sup>(1)</sup>		Typical Temperature Coefficient $\alpha_{VZ} (\%) / K$	Maximum Reverse Leakage Current		Maximum Regulator Current <sup>(2)</sup> IzM (mA)
			at IzT ZzT ( $\Omega$ )	at IzK=0.25mA ZzK ( $\Omega$ )		IR ( $\mu\text{A}$ )	VR (V)	
1N5225	3.0	20	29	1600	-0.075	50	1.0	152
1N5226	3.3	20	28	1600	-0.070	25	1.0	138
1N5227	3.6	20	24	1700	-0.065	15	1.0	126
1N5228	3.9	20	23	1900	-0.060	10	1.0	115
1N5229	4.3	20	22	2000	-0.055	5.0	1.0	106
1N5230	4.7	20	19	1900	$\pm 0.030$	5.0	2.0	97
1N5231	5.1	20	17	1600	$\pm 0.030$	5.0	2.0	89
1N5232	5.6	20	11	1600	+0.038	5.0	3.0	81
1N5233	6.0	20	7	1600	+0.038	5.0	3.5	76
1N5234	6.2	20	7	1000	+0.045	5.0	4.0	73
1N5235	6.8	20	5	750	+0.050	3.0	5.0	67
1N5236	7.5	20	6	500	+0.058	3.0	6.0	61
1N5237	8.2	20	8	500	+0.062	3.0	6.5	55
1N5238	8.7	20	8	600	+0.065	3.0	6.5	52
1N5239	9.1	20	10	600	+0.068	3.0	7.0	50
1N5240	10	20	17	600	+0.075	3.0	8.0	45
1N5241	11	20	22	600	+0.076	2.0	8.4	41
1N5242	12	20	30	600	+0.077	1.0	9.1	38

O modelo selecionado para os transistores PNP Q1 e Q2 é o BC559 que é apresenta máxima tensão de VCE maior que a necessária e possui baixa corrente de coletor de 100mA que é suficiente para a corrente utilizada no circuito.

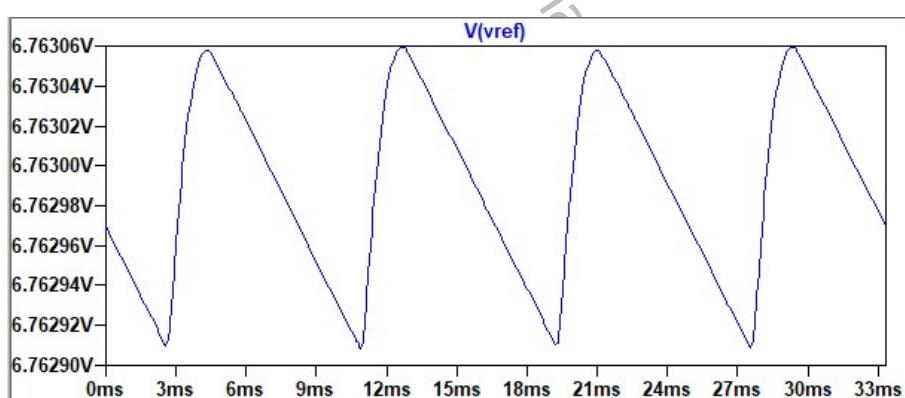
Além disso também foi escolhido um valor comercial para o resistor R1 próximo ao calculado, sua resistência será 130ohms.

- Resultado simulado:

Círculo para referência de tensão com os componentes selecionados



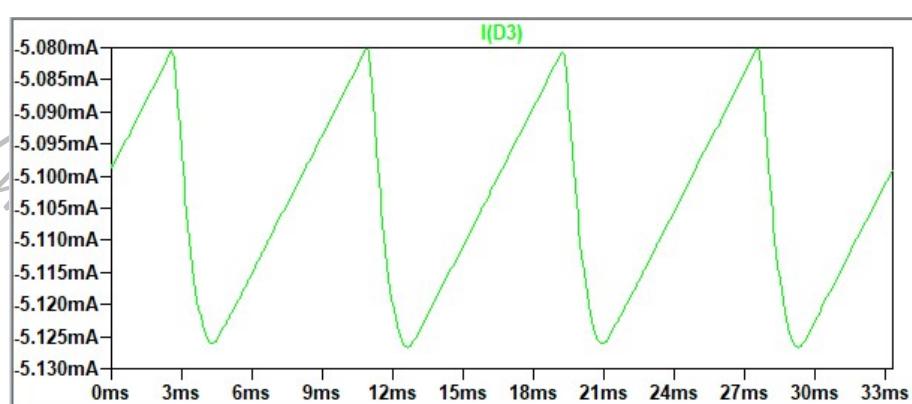
Tensão no zener para tensão mínima no primário



Tensão média no zener

Average: 6.763V

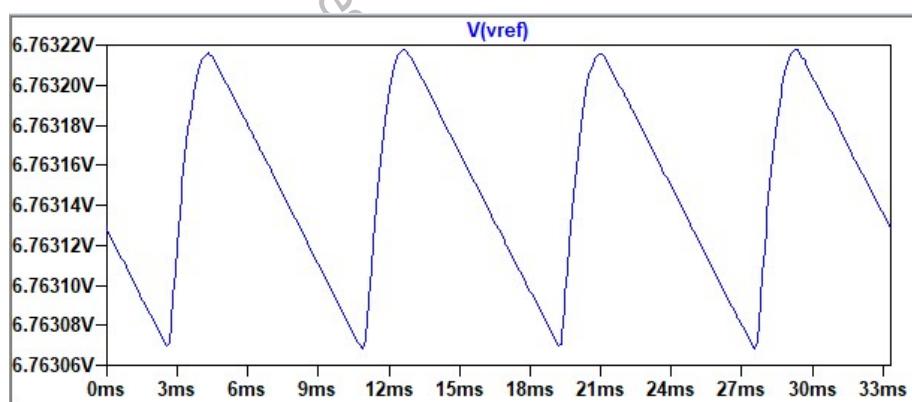
### Corrente no zener para tensão mínima no primário



### Corrente média no zener

Average: -5.105mA

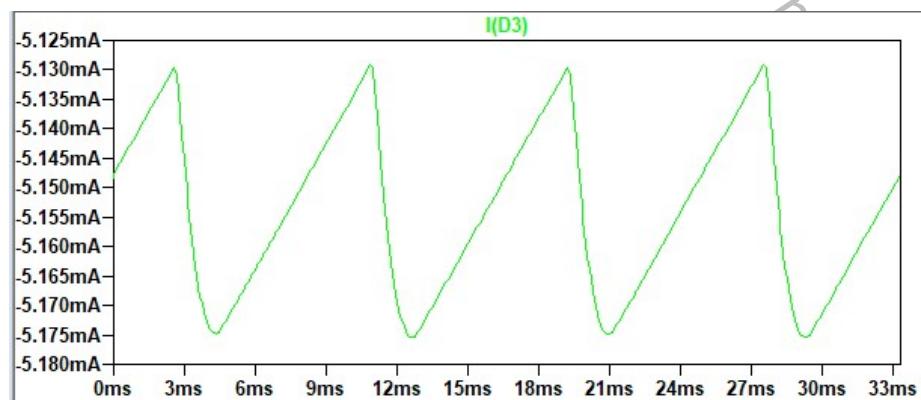
### Tensão no zener para tensão máxima no primário



### Tensão média no zener

Average: 6.7631V

### Corrente no zener para tensão máxima no primário

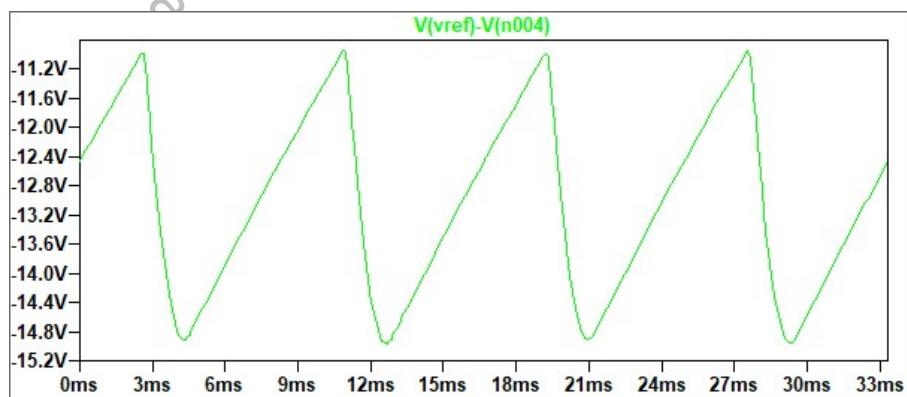


### Corrente média no zener

Average:

Como observa-se a variação na tensão e corrente de zener é muito pequena mesmo com a variação da tensão do primário do transformador.

### Tensão VCE no transistor Q2 para tensão máxima no primário

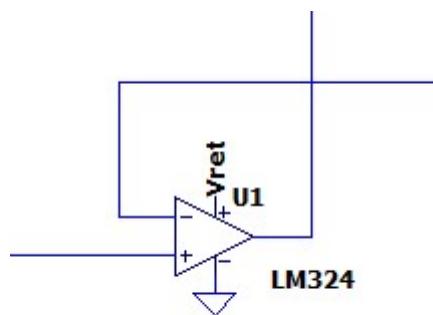


### Tensão VCE máxima no transistor Q2

Vert:

#### 4.4.2- Circuito de controle com amplificador operacional

O circuito de controle é um amplop responsável por comparar a tensão de referência do diodo Zener com a tensão de realimentação fornecida pelo circuito de amostragem. O modelo do amplop escolhido foi o LM324.



#### 4.4.3-Circuito de amostragem da tensão de saída

O circuito de amostragem é composto por dois resistores que fazem a realimentação do amp op e são responsáveis pelo ganho do mesmo.

- Análise teórica:

$$V_o := 12 \text{ V}$$
$$V_z := 6.8 \text{ V}$$

O circuito de amostragem estará conectado a entrada inversora do amp op e o zener a entrada não inversora, uma das principais características do amp op é manter sua tensão de entrada inversora e não inversora iguais, portanto:

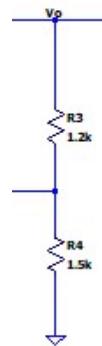
$$V_z = V_o \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Foram escolhidos os resistores R1 e R2 comerciais que melhor atenderam a equação, R1=1.2kohm e R2=1.5kohm.

$$R_1 := 1.2 \cdot 10^3 \cdot \text{ohm}$$

$$R_2 := 1.5 \cdot 10^3 \cdot \text{ohm}$$

$$V_o := V_z \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2} = 12.24 \text{ V}$$

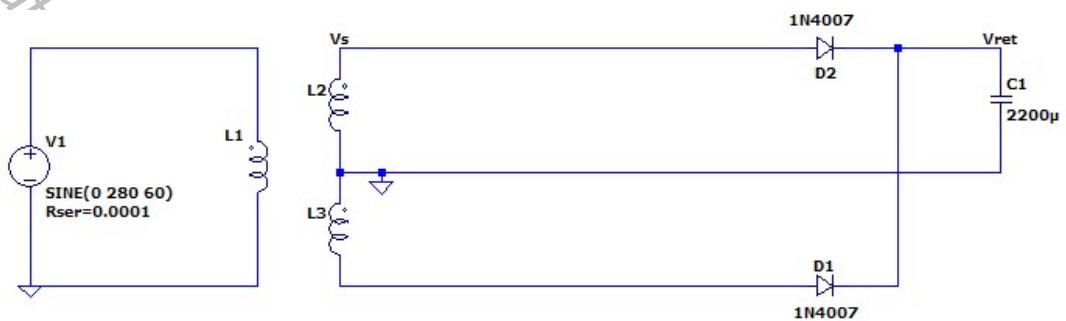


#### 4.4.4-Dispositivo de regulação

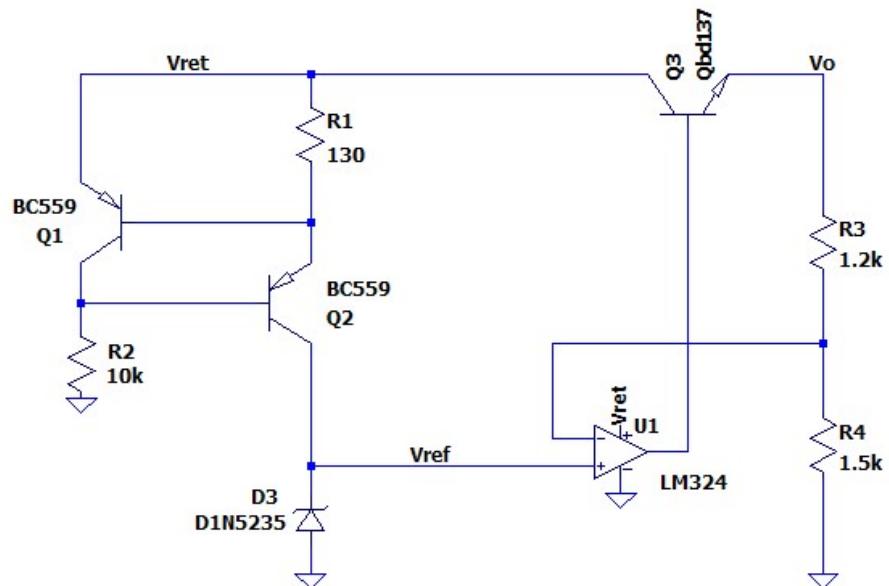
O dispositivo de regulação será um transistor NPN, quando há variação na tensão de saída ele é responsável por controlar sua condução para manter a tensão de saída constante. O transistor escolhido foi o BC137, pois ele suporta a corrente de carga de 1A sobre ele.

## 5-Análise final da fonte

Fonte concluída - Transformador, retificador e filtro

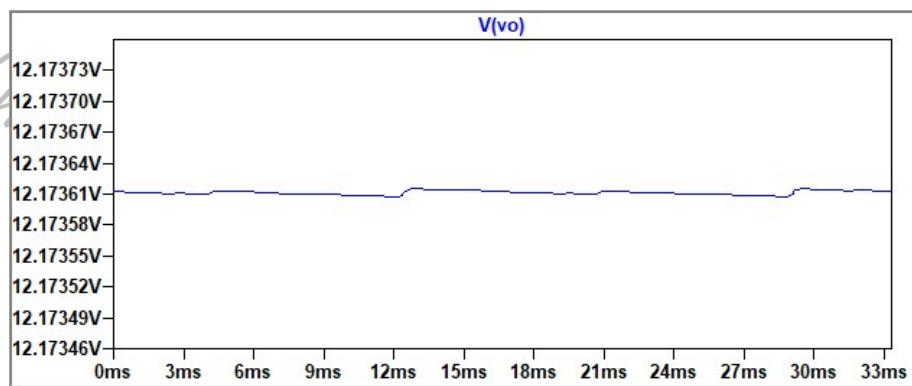


Fonte concluída - Regulador Linear



- Simulações

Saída da fonte sem carga tensão mínima no primário



Tensão de ondulação

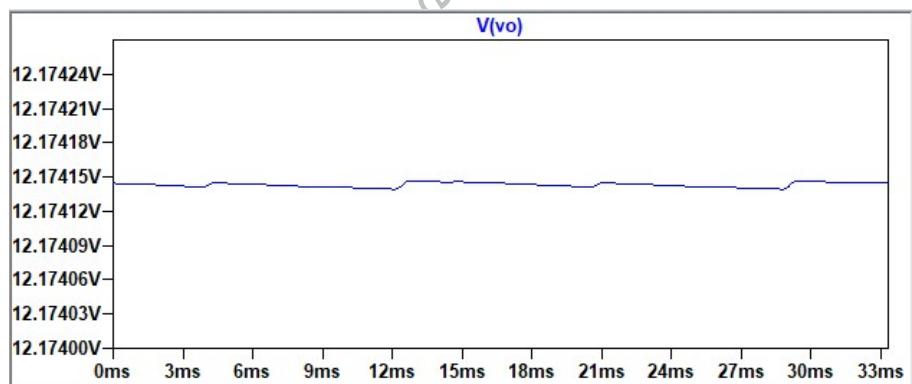
Vert:  $7.6293945\mu\text{V}$

Tensão média e RMS na saída

Average:  $12.174\text{V}$

RMS:  $12.174\text{V}$

Saída da fonte sem carga tensão máxima no primário



Tensão de ondulação

Vert:  $7.6293945\mu\text{V}$

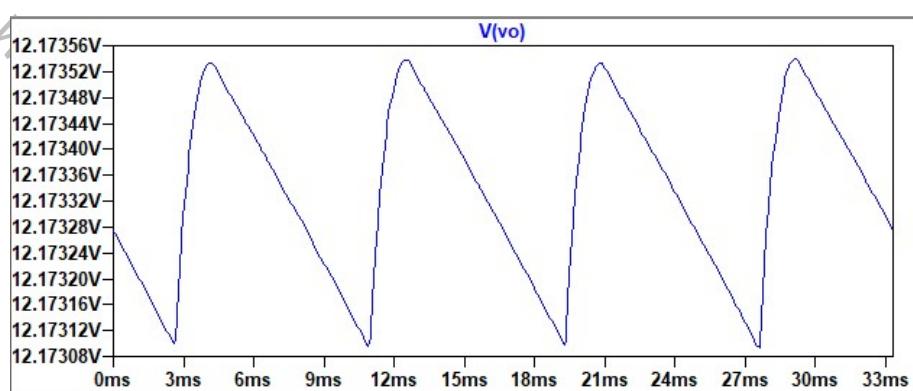
Tensão média e RMS na saída

Average:  $12.174\text{V}$

RMS:  $12.174\text{V}$

Com carga nominal de 12ohm:

Saída da fonte com carga tensão mínima no primário



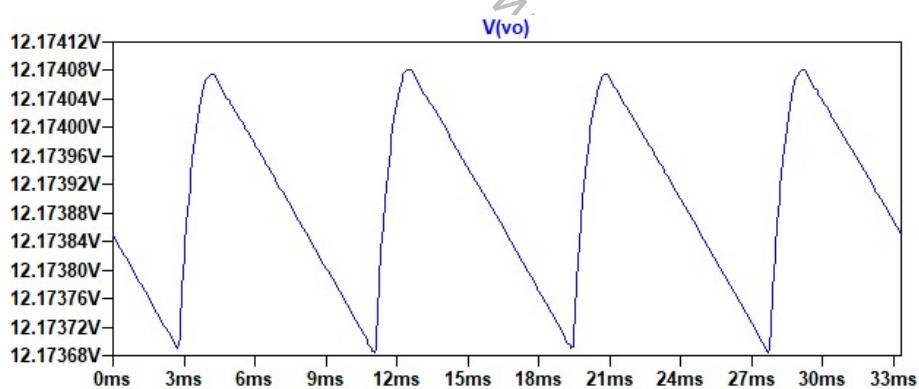
Tensão de ondulação

Vert:

Tensão média e RMS na saída

Average:   
RMS:

Saída da fonte com carga tensão máxima no primário



Tensão de ondulação

Vert:

Tensão média e RMS na saída

Average:   
RMS:

Regulação da Tensão de saída para tensão mínima de entrada:

$$Vo := 12.174 \text{ V}$$

$$Vl := 12.173 \text{ V}$$

$$Rt := \frac{Vo - Vl}{Vl} = 8.215 \cdot 10^{-5}$$

A partir da simulações conclui-se que a fonte projetada está de acordo com o desejado e cumpre as especificações, possui tensão de ondulação menor que 5% e Regulação de tensão menor que 3%.