

Objetivos

Integração dos blocos de uma fonte linear

Introdução

Neste roteiro iremos integrar os circuitos estudados anteriormente, para isso, revise os conceitos de reguladores LDO.

Parte 01: Entendendo um regulador linear

Conceitos importantes:

- **Princípios de regulação de tensão;**

Os reguladores de tensão estabilizam a tensão de alimentação de um circuito, ou seja, eles são responsáveis por manter uma alimentação regulada e "limpa" em cargas variáveis.

- **Tensão de saída e tensão de *ripple*;**

A tensão de saída depois de retificada deve ser contínua ao longo do tempo. Já a tensão de ripple é a tensão retificada e filtrada por um capacitor.

- **Regulação de linha;**

É a variação da tensão de saída dividida pela variação da tensão de entrada.

- **Regulação de Carga;**

Variação da tensão de saída dividida pela variação da corrente.

- **Conceito de LDO – *Low Dropout Voltage***

LDO é a variação mínima que se pode ter entre as tensões de entrada e saída, mantendo o funcionamento da regulação do circuito.

Considerando o circuito da figura 01 que representa uma fonte linear com regulador MOSFET, temos o seguinte problema: Qual relação entre a tensão de alimentação do ampop e a tensão de saída? O que devemos considerar para esse circuito operar como um LDO? Como obter as tensões de alimentação para o AmpOp (VCC e VEE)?

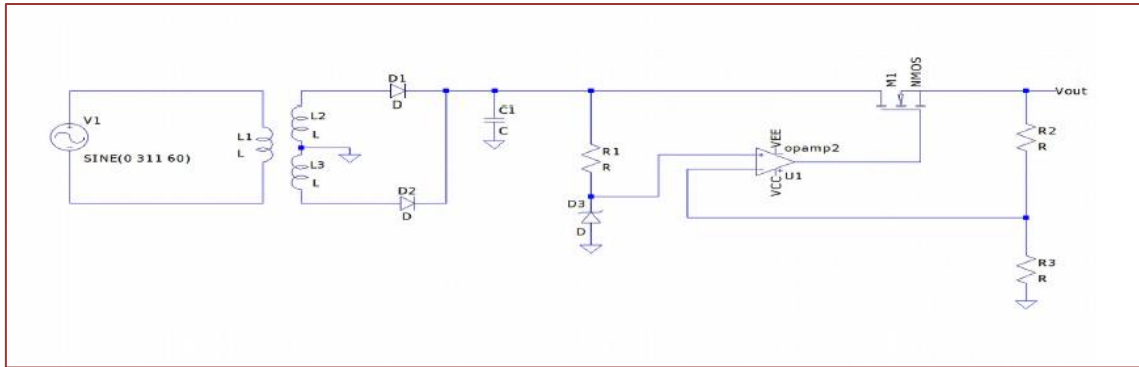


Figura 01- fonte linear com regulador MOSFET.

- ✓ A tensão de saída do ampop será aproximadamente a tensão de alimentação (V_{CC}).
- ✓ O diodo zener conectado à entrada não inversora do amplificador limita o sinal de entrada. Para o sinal de saída, os limites estão sujeitos à própria alimentação do amplificador.
- ✓ Este circuito pode ser alimentado com uma tensão maior que a tensão solicitada de saída do regulador somada a queda de tensão de $V_{DS} * V_{CC} = V_{OUT} + V_{DS}$

Utilizando o circuito dobrador de tensão, qual valor de V_{CC} você obtém para um sinal V_{in+} de 12Vrms? Quais problemas apresentam esse circuito? Podemos melhorar?

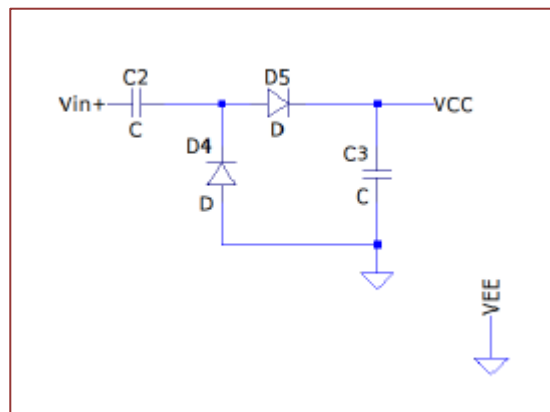


Figura 02- Circuito dobrador de tensão.

Para o calculo do V_{CC} será considerado a queda da tensão dos dois diodos (D_4 e D_5) 0,7 V. Logo:

$$V_{CC} = 2 * V_{in} * \sqrt{2} - V_{D4} - V_{D5} = 32,54 V$$

A desvantagem deste circuito é o ripple de saída, já que a forma de onda de entrada é uma senóide. O capacitor C3 teria que ter um valor próximo ou igual ao capacitor usado para a retificação. Como sugestão de melhoria é a adicionar um regulador linear para eliminar possíveis ruídos.

Vamos projetar esse circuito de alimentação do AmpOp?

Considere: AmpOp LM324, MOSFET IRF540, $V_{OUT} = 15V$, $I_{OUT} = 1A$, $v_{in+} = 12V_{rms}$, $v_{ripple_pós_retificador} = 1V$, considere as quedas de tensão nos diodos de $0,7V$.

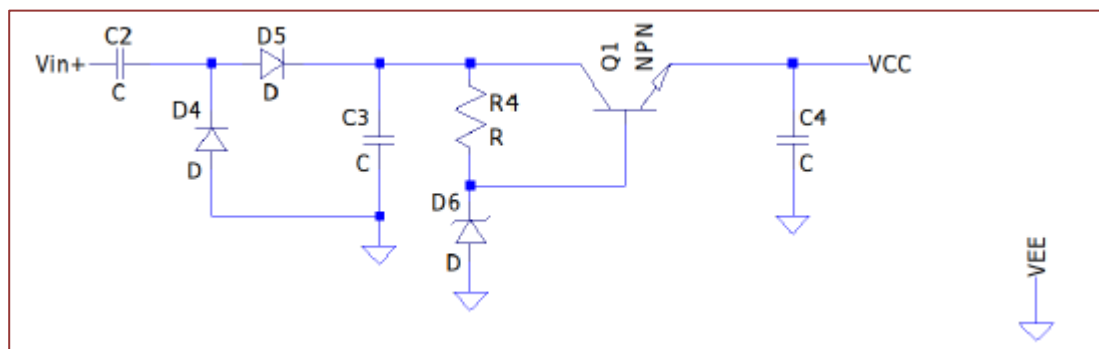
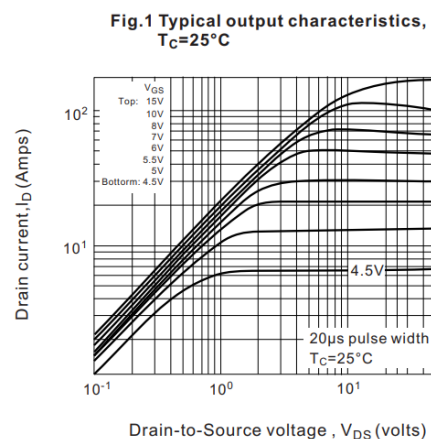


Figura 03- Circuito de alimentação do Amp-op.

Pontos Importantes para iniciar o projeto responda justificando as escolhas.

• **Qual a Tensão VGS? Descreva como obter o valor.**

É possível obter este valor no datasheet do MOSFET.



Analisando o gráfico, a tensão VGS pode ser considerada $4,5V$.

• **Qual a corrente de alimentação do AmpOp?**

De acordo com o datasheet do Amp op $I_{TYP} = 1.5mA$ e $I_{max} = 3.0mA$.

- **Qual a tensão de alimentação do AmpOP?**

De acordo com o datasheet do Amp op $V_{\max} = 32V$

- **Qual fator deve considerar para escolher o transistor Q1?**

O valor de beta precisa ser grande.

- **Qual valor da tensão do diodo zener D6?**

A tensão no diodo Zener precisa ser maior que a tensão de entrada V_O . Logo:

$$V_O = V_{OUT} + V_{GS}$$

Sendo:

$$V_{GS} = 4,5 \text{ V}$$

$$V_{OUT} = 15 \text{ V}$$

$$\text{Portanto } V_O = 19,5 \text{ V}$$

- **Como escolher o diodo zener D6, maximizando a eficiência energética e minimizando os ruídos no circuito?**

O Zener escolhido dever ter a menor impedância possível para evitar oscilações na corrente.

- **Considere que, por alterações futuras no circuito, o AmpOp poderá ter uma aumento de 10mA na corrente de alimentação, o circuito proposto continuará funcionando?**

Visto que a corrente de alimentação é maior que a mínima corrente de alimentação o Amp op então funcionará.

Parte 02

Calculando e dimensionando os componentes

- a) Para o primeiro bloco (D1, D2 e C1) considere $v_{in+} = 12V_{rms}$, $v_{ripple_pós_retificador} = 1V$ e $I_{carga} = 1,1A$. Justifique a escolha dos componentes.

Para dimensionamento dos diodos devem levar em consideração a tensão reversa (V_D) e a corrente média (i_D med) e a corrente máxima (i_D máx) que estes diodos irão suportar. A tensão reversa é dada pela formula:

$$V_D = 2 * V_p$$
$$V_D = 2 * V_{in} * \sqrt{2}$$

Substituindo os valores temos:

$$V_D = 2 * 12 * \sqrt{2} = 33,94 V$$

A corrente media é dada pela formula:

$$i_{Dmed} = I_L * (1 + \pi * \sqrt{V_p/2V_r})$$
$$i_{Dmed} = 1,1 * (1 + \pi * \sqrt{\frac{12 * \sqrt{2}}{2 * 1}}) = 11,17 A$$

A seguir a formula necessária para calcular a corrente máxima:

$$i_{Dmax} = I_L * (1 + 2\pi * \sqrt{V_p/2V_r})$$
$$i_{Dmax} = 1,1 * (1 + 2 * \pi * \sqrt{\frac{12 * \sqrt{2}}{2 * 1}}) = 21,23 A$$

Também é possível calcular o intervalo de condução dos diodos:

$$\omega\Delta t = \sqrt{\frac{2 * V_{ripple}}{V_p}}$$
$$\omega\Delta t = \sqrt{\frac{2 * 1}{12 * \sqrt{2}}} = 0.3433 \text{ rad}$$

Logo, o diodo conduz por $(0,3433/2 \pi)*100 = 5,46 \%$ do ciclo.

Diante disso foi escolhido o diodo 1N4007 que possui como característica tensão de pico inversa de 1000 V e corrente média de 1A. Os diodos que formam a ponte retificadora são feitos de silício, ou seja, cada elemento gera uma queda de aproximadamente 0,7 V, sua tensão de saturação é próxima de 0,2 V e suas perdas térmicas variam entre 25 e 50 °C/W.

A capacitância necessária para este circuito é facilmente calculado pela formula:

$$C = \frac{I_L}{V_{\text{Ripple}} * 2 * f}$$

Sendo:

I_L = a corrente da carga

f = frequência da fonte

logo:

$$C = \frac{1,1}{1 * 2 * 60} = 9,16\text{mF}$$

b) Circuito referência de tensão zener (R1 e D3):

- **Quais fatores devem considerar para escolher o diodo zener para essa aplicação?**

A escolha do diodo zener para esta aplicação tem-se uma flexibilidade uma vez que é possível dimensionar R_2 e R_3 no ganho para compensar a tensão de saída. No entanto para esta aplicação deve-se escolher um diodo zener que tenha menos ruído de regulação de linha.

- **Qual a influência da regulação de linha e da regulação de carga para este circuito?**

Para este circuito não tem influencia de regulação de carga porque o diodo zener esta ligada a saída não inversora do amp op e por esta não passa corrente. No entanto este circuito tem influencia de regulação de linha já que a tensão de entrada pode sofrer oscilações, neste caso o diodo zener tende a manter a tensão de saída constante. Sendo assim, aumenta ou diminui a queda de tensão sobre o resistor R_1 , o qual tem a função principal de limitar a corrente do zener

• **Qual o impacto da regulação linha / carga do circuito com o diodo zener na tensão de saída do regulador linear?**

Tudo que variar no diodo zener será multiplicado pelo ganho e refletirá na saída (V_{out}).

Dimensionamento:

Dentre dos parâmetros já citado foi escolhido o diodo zener 1N750A. Sabendo o diodo que será usado, foi possível determinar R1, para isso utilizou-se o datasheet do mesmo e viu-se que a tensão é de 4,7 V a corrente de teste (I_z) para que o diodo apresente a tensão nominal foi de 20 mA. Desta forma, analisou-se o circuito e obteve-se a seguinte equação:

$$R1 = \frac{V_i - V_z}{I_z}$$

Onde:

V_i é tensão de entrada do regulador.

V_i é obtido pela seguinte relação:

$$V_i = V_{in} - 2 * V_D$$

Onde:

V_D = a queda de tensão nos diodos (1N4007).

Com isso tem-se um $R1 = 543,53 \Omega$

Podemos melhorar esse circuito? Quais problemas podem identificar nesta topologia? Sugestão de melhoria:

Eliminar os fatores que causaria variações das tensões (regulação de linha). Como sugestão de melhoria pode inserir uma fonte de corrente para manter constante a corrente sobre o diodo zener. Se não variar corrente não varia tensão sobre o resistor do zener (R_z), logo a tensão no diodo se manterá mais constante possível.

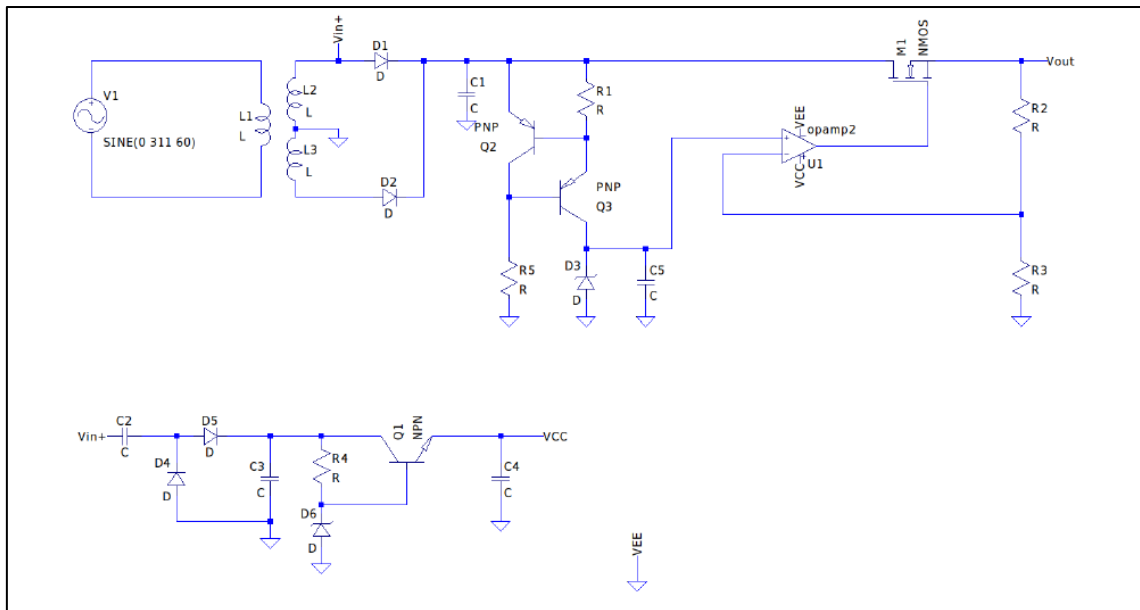


Figura 01- Fonte linear.

No qual o circuito com R1, R5, Q2 e Q3 é uma fonte de corrente constante para polarizar o diodo zener D3. Vamos projetar?

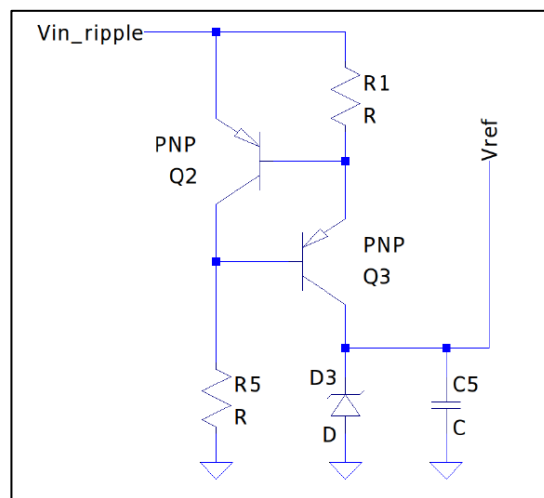


Figura 02- Fonte de corrente

O transistor Q2 limita a tensão sobre o resistor R1, estes dois definem a corrente de saída da fonte de forma independente a tensão de alimentação. O resistor R5 causa a queda de tensão entre o coletor de Q2 e o terra, enquanto o transistor Q3 mantém o a tensão coletor-emissor de Q2 estável, o que reduz variações secundárias da corrente de saída com a tensão de alimentação. Para esta aplicação foi escolhido o transistor BC557B. O R1 já foi dimensionado anteriormente e o R5 deve obedecer:

$$R5 < (VIN - 2 * VBE) / (IE / hFE)$$

No entanto V_{in} é menor que $2V_{BE}$ por isso R_5 admitiria um valor negativo. Diante disso $R_5 = 20k\Omega$. Foi escolhido este valor para R_5 ter uma corrente mínima.

Podemos melhorar ainda? Que tal deixar essa fonte com valor ajustável? Como fazer isso?

Inserindo um potenciômetro com valor elevado entre o V_{ref} e o terra.

c)Escolhendo o transistor M1 e calculando R_2 e R_3

• **Qual a corrente contínua necessária?**

A mesma corrente da fonte que no caso é 1 A.

• **Quais os limites de tensão para este circuito?**

Esta limitada ao valor da Tensão de entrada ou seja próximo aos 15 V.

Ao escolher o transistor obtenha:

Foi escolhido o Mosfet IRF540

Quais o parâmetros L , W , U_o , C_{ox} , V_A e V_t ?

De acordo com o arquivo Spice:

$$L = 100 \mu m$$

$$W = 100 \mu m$$

$$\mu_o = 600 \text{ cm}^2/Vs$$

$$+V_{to} = V_t = 3.56362 \text{ V}$$

Os parâmetros C_{ox} e V_A devem ser calculados:

$$C_{ox} = \frac{K_p}{\mu_o}$$

Sendo:

$$k_p: 25.0081$$

Substituindo na formula acima tem-se $C_{ox} = 41,68017 \text{ mF}$.

$$V_A = \frac{1}{\text{LAMBDA}}$$

Sendo:

$$\text{LAMBDA} = 0,00291031$$

Substituindo na formula acima tem-se $V_A = 343,60 \text{ V}^{-1}$

Calcule o valor de R_{DS} para as tensões V_{GS} de 2V, 3V, 4V, 5V e 10V

De acordo com o Sedra o R_{DS} é obtida pela formula:

$$\text{Para } v_{DS} \ll 2(v_{GS} - V_t) \Leftrightarrow v_{DS} \ll 2v_{OV}$$

$$r_{DS} = \frac{v_{DS}}{i_D} = 1 / \left[\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t) \right]$$

Com o auxilio Smath Studio obteve-se os valores de R_{DS} .

```

+
Calculo do RDS:

L := 100 · 10-6
W := 100 · 10-6
u0 := 600
Vt := 3,56362
Cox := 41,68017 · 10-3
VA := 343,60

x :=  $\frac{W}{L} = 1$ 

RDS (VGS) :=  $\frac{1}{u0 \cdot Cox \cdot x \cdot (VGS - Vt)}$ 

VGS1 := 2   VGS2 := 3   VGS3 := 4   VGS4 := 5   VGS5 := 10

RDS (VGS1) = - 0,0256
RDS (VGS2) = - 0,0709
RDS (VGS3) = 0,0916
RDS (VGS4) = 0,0278
RDS (VGS5) = 0,0062

```

Quais as tensões máximas de operação deste componente?

$V_{GS} = \pm 20 \text{ V}$

$V_{DS} = 100 \text{ V}$

Obtenha as curvas I_D x V_{DS} para esse componente para as tensões V_{GS} de 2V, 3V, 4V, 5V e 10V e compare os resultados com as curvas presentes no Datasheet.

Utilizando a curva I_D x V_{DS} obtenha os valores R_{DS} e compare com os valores teóricos.

Qual o valor da capacitância de gate?

De acordo com o datasheet 1700 pF.

Justifique a escolha dos resistores R2 e R3.

R3 deve ser um valor muito grande para que passe o mínimo de corrente possível por isso $R3 = 20 \text{ k}\Omega$. O valor de R2 é facilmente calculado utilizando a formula do ganho de um circuito não inversor:

$$\frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R2}{R3}$$

Neste caso o V_i é a queda de tensão no diodo zener ($V_z = 3,3 \text{ V}$) e V_o foi estipulado pelo projeto, logo $R2 = 70 \text{ k}\Omega$.

Parte 03

Adicionando um circuito de proteção de sobre corrente ao regulador linear.

Primeiramente reflita e pesquise sobre o que é sobrecorrente? Quais os impactos neste circuito?

Sobrecorrente é circulação de excesso de corrente no circuito, ou seja, a corrente excedeu o valor nominal projetado. Pode causar a queima de componentes do circuito, e um ruim funcionamento.

É importante lembrar que dentro dessa categoria, há dois tipos de sobrecorrentes: o curto-circuito e a sobrecarga. Entenda melhor suas características!

O curto-circuito pode ser direcionado à classe de “Falta”, isto é, uma condição não programada e indesejada que ocorre em circuitos elétricos em razão da ocorrência de defeitos, falhas ou erros. Em geral, tal situação conduz para a parada instantânea do equipamento, visto que todos os elementos interligados ao sistema sofrem com uma súbita elevação da tensão ou da corrente.

Sendo assim, o curto-circuito pode ser percebido quando a resistência elétrica no circuito diminui drasticamente — a ponto de a corrente elétrica que o atravessa chegar a uma grande intensidade — e a tensão na rede cai e se aproxima de zero.

Já a sobrecarga é um problema também comum e se revela quando a carga que passa por uma rede elétrica é superior àquela para qual ela foi projetada inicialmente. Essa situação sobrecarrega o sistema e causa quedas de tensão intermitentes pela entrada das proteções.

Enquanto no curto-circuito é preciso um aumento repentino e de grande intensidade, na sobrecarga o problema pode se configurar até mesmo com um leve aumento, desde que não suportado pelo sistema.

Fonte: <https://eletrorede.eng.br/blog/2019/09/06/protecao-contrasobrecorrente/>

O que deve fazer um circuito de proteção de sobrecorrente?

Proteger os equipamentos do circuito, quando ocorrer a sobrecorrente.

O que é a proteção foldback?

O circuito com proteção de foldback em caso de sobrecorrente diminui a tensão e a corrente dos componentes a fim de diminuir a potência dissipada e evitar danos ao circuito.

Pesquise as topologias disponíveis, caso deseja-se fazer um circuito LDO, o o que devemos levar em consideração para o regulador?

Circuitos LDO sofrem com correntes elevadas, podendo causar danos aos componentes do circuito, e aumento no consumo de energia. Como proteção para este problema utilizam-se circuitos de proteção de sobrecorrente como o foldback e a proteção brick-wall.

Exemplo de circuito: (Vide roteiro 01)

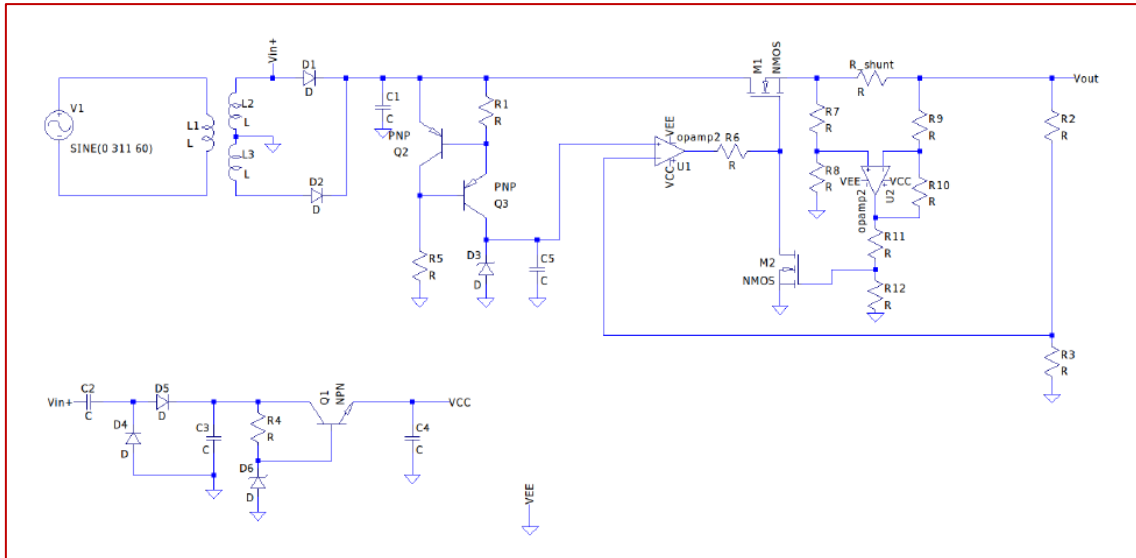


Figura 01- Fonte linear.

Dimensionando o circuito de proteção de sobre corrente ao regulador linear

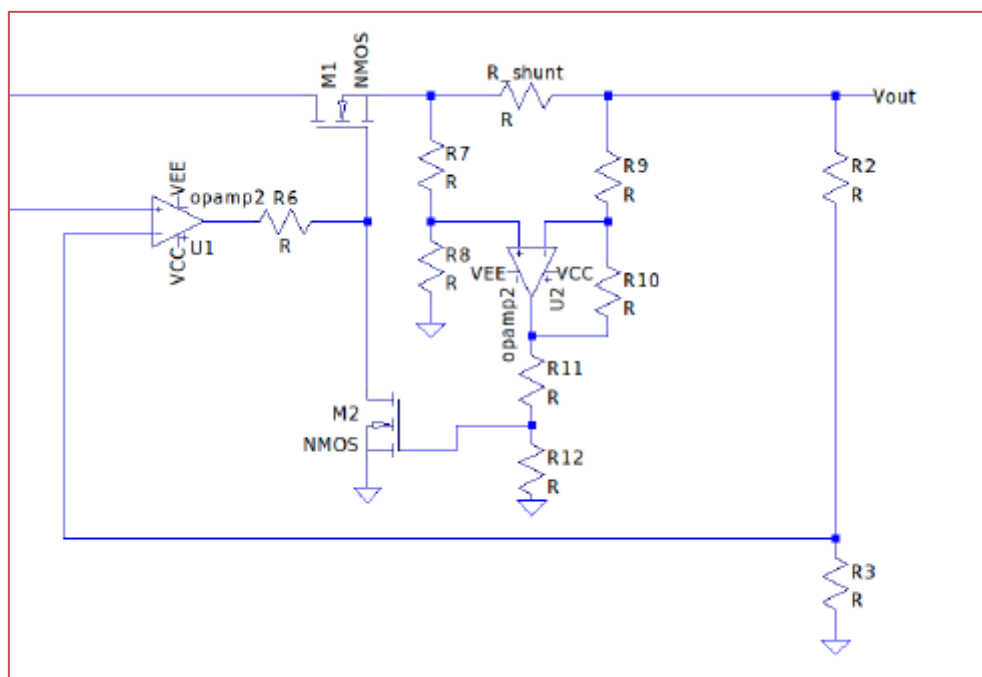


Figura 02- Circuito de sobrecorrente.

Dimensionando o R6:

Idealmente a saída do Amp Op deve ser próximo ao valor do V_{CC} , no entanto existe uma queda de tensão dentro do Amp Op que diminui o seu valor. Na simulação obtemos $V_{CC}=23.627058V$ e considerando queda de tensão dentro do Amp Op de 1,5 V temos que:

$$V_{R6} = V_{CC} - 1,5 = 22,127058 V$$

Sabe-se que a corrente na saída do Amp Op deve ser baixa supondo uma corrente entre 1mA a 10mA é possível obter o valor de R6 uma vez que a tensão é conhecida.

$$R6 = \frac{V_{R6}}{5mA}$$

Obtém-se um valor de $R6 = 4425,41 \Omega$.

Dimensionando NMOS M2:

O Transistor escolhido deve ser um que suporte pequenas correntes por isso foi escolhido o 2N7002. Como o dreno está como chave a tensão varia entre 0 e a tensão máxima que chega nele neste caso V_G . Para o transistor conduzir $V_{GS} > V_T$, para valor de V_T pode ser considerado o $V_{gs(th)}$ que é achado no datasheet é 2.1 V. Como V_S está no gnd o precisa ser maior V_T pra acionar a chave. Então como tensão na saída e para cálculos futuros adotaremos 3V.

Dimensionando R_{11} e R_{12}

Adotaremos $R_{11} = R_{12} = 20k\Omega$

Dimensionando R_{shunt}

O valor do resistor shunt deve ser pequeno para que a queda de tensão seja mínima logo adotaremos $R_{shunt} = 100m\Omega$

Dimensionando o circuito Subtrator

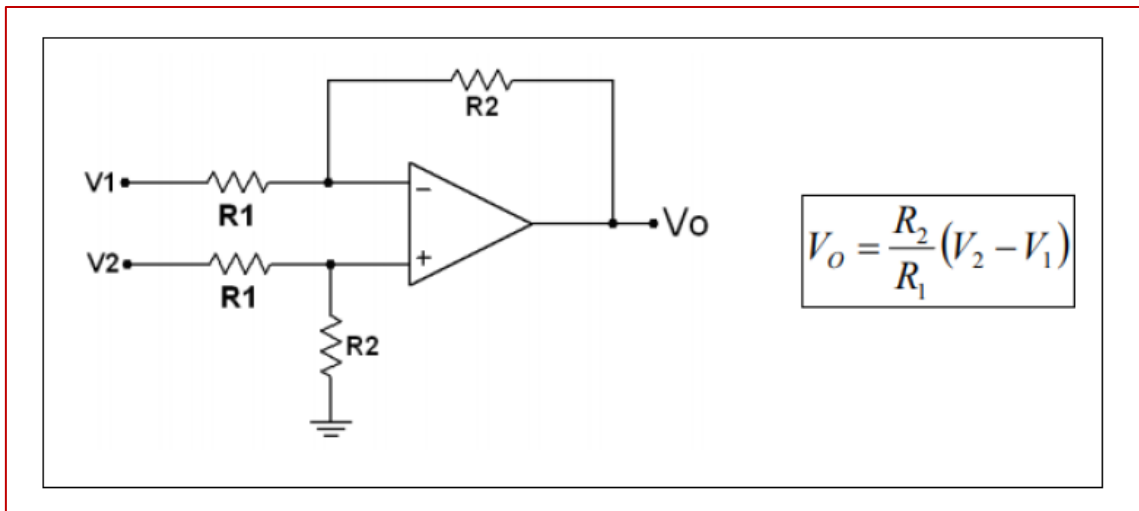
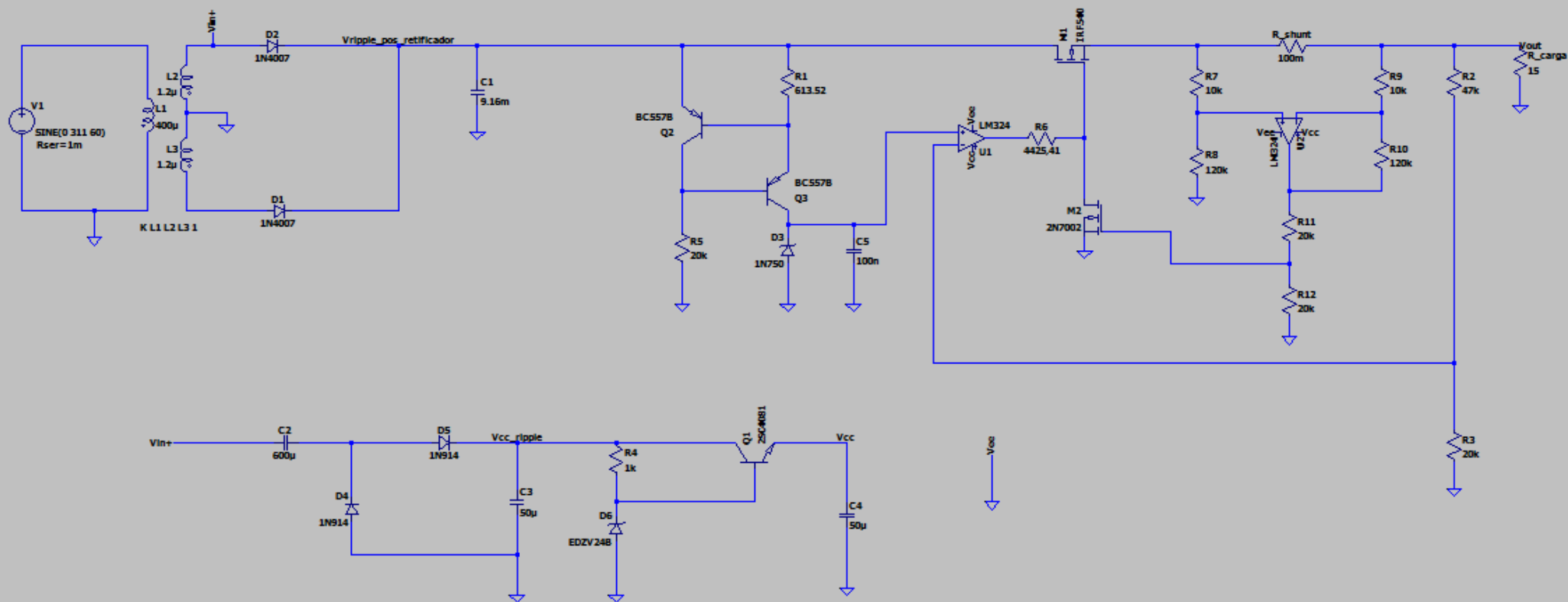


Figura 03- Circuito subtrator.

A queda de tensão ($V_2 - V_1$) é a tensão sobre o resistor shunt. Vamos projetar um circuito que suporte 5 A de corrente logo esta queda de tensão é :

$$V_2 - V_1 = 5 * 100m = 0,5V$$

A tensão na saída é o divisor de tensão do R11 e R12, logo $V_o = 6V$. Considerando $R_7 = R_9 = 10k\Omega$ e como ganho é 12, logo $R_8 = R_{10} = 120k\Omega$



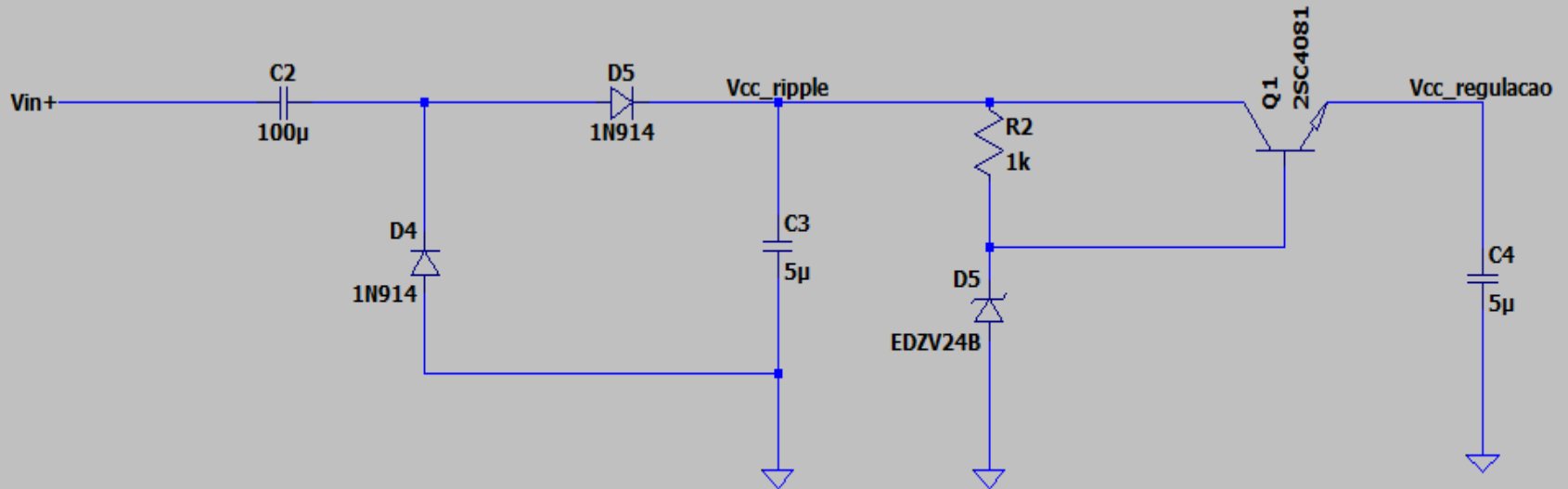
Projeto final

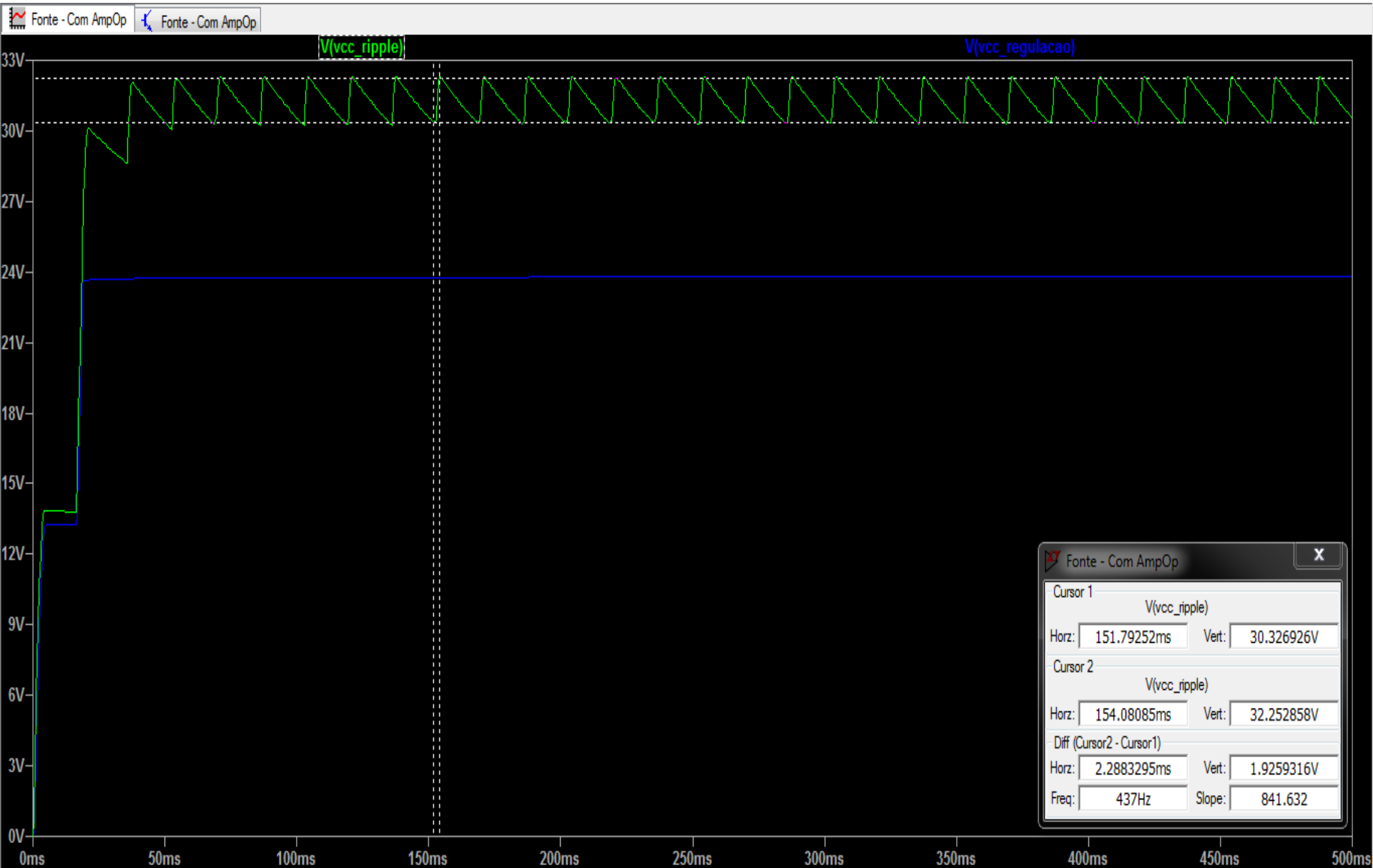
SIMULAÇÕES

ARIENE MACIEL



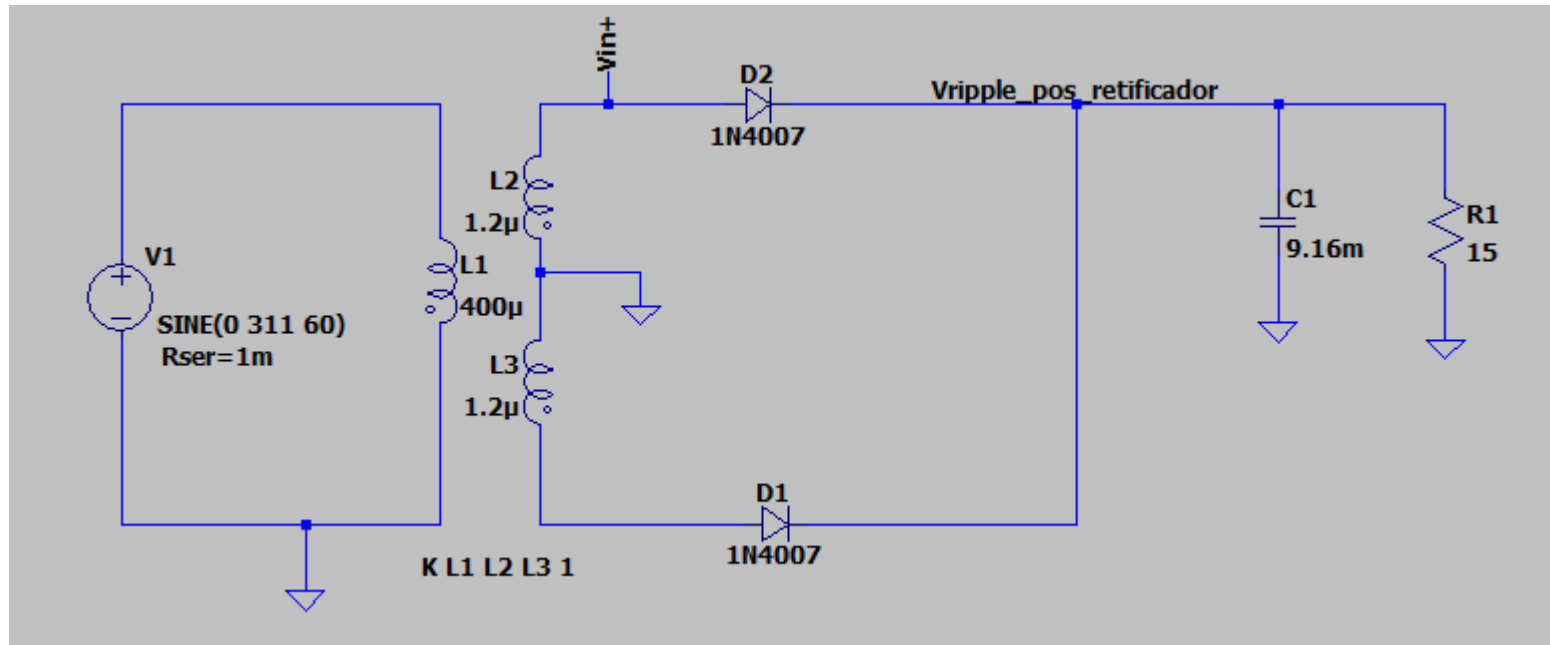
Circuito de Alimentação



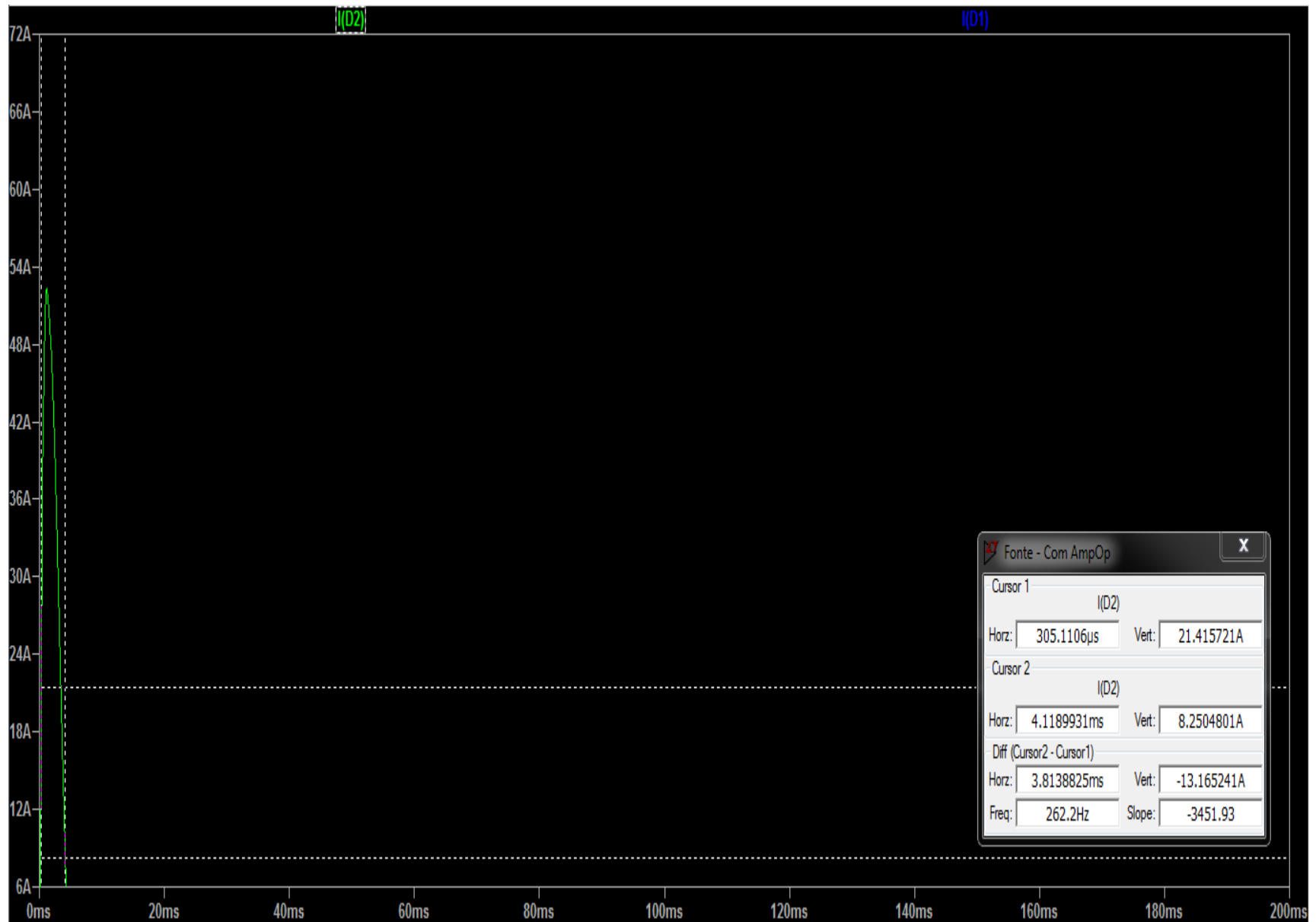


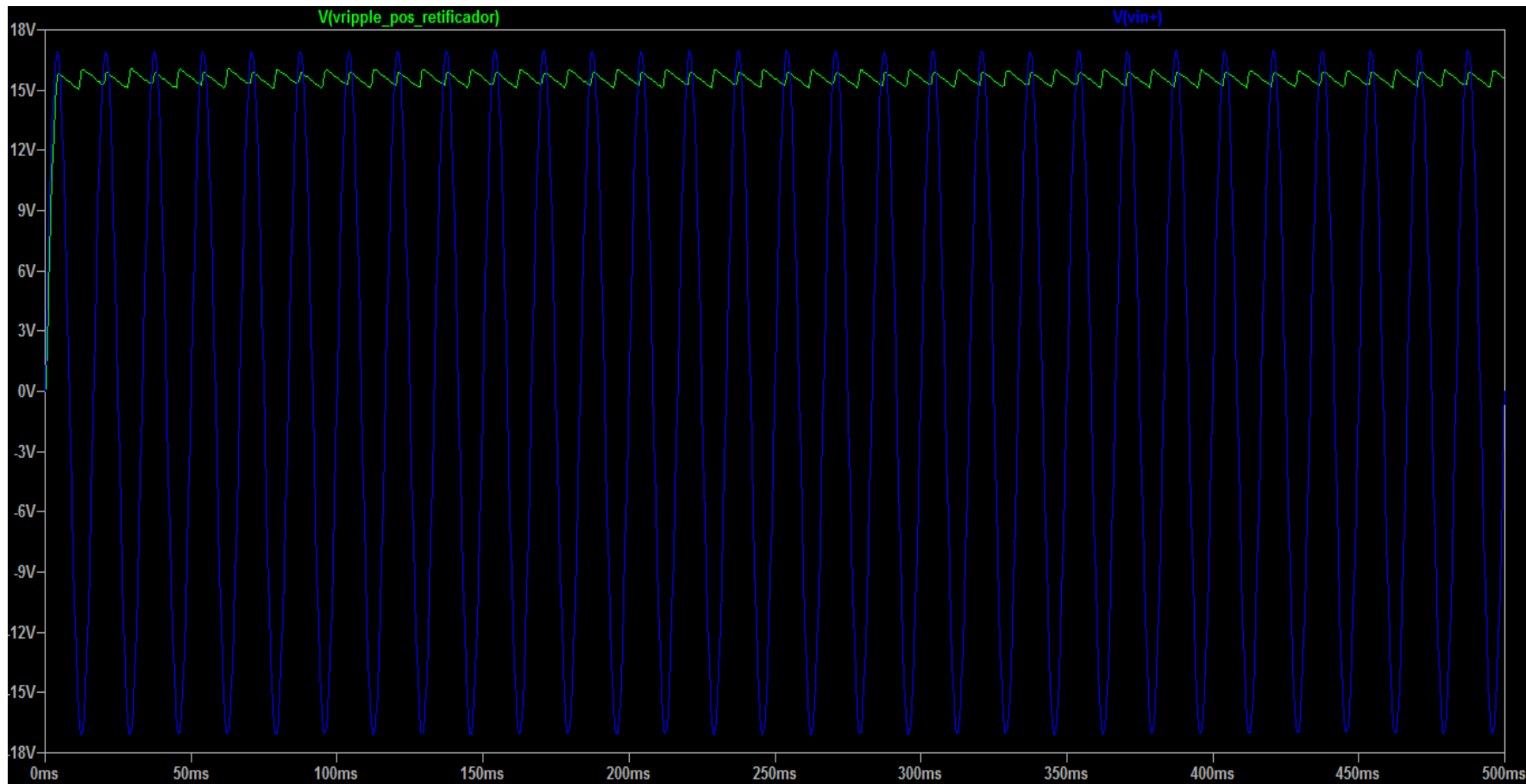
Right-Click to manually enter Left Vertical Axis Limits [V]

Simulação D1, D2 e C1

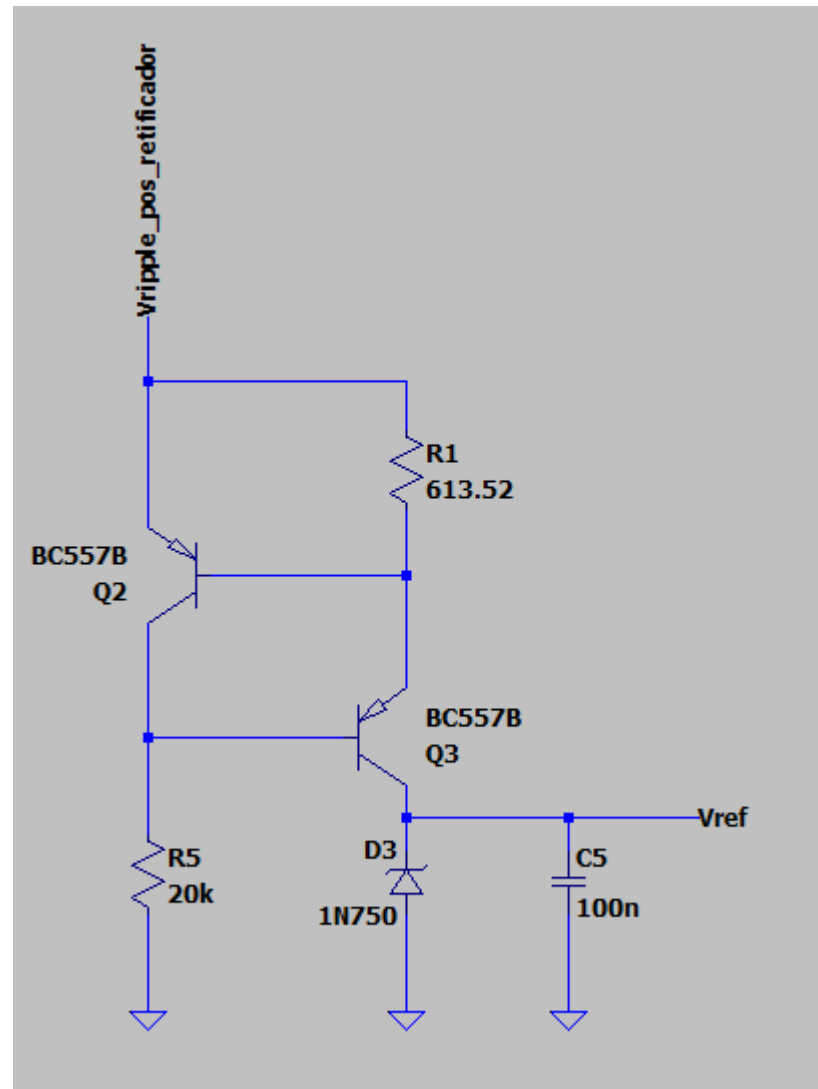


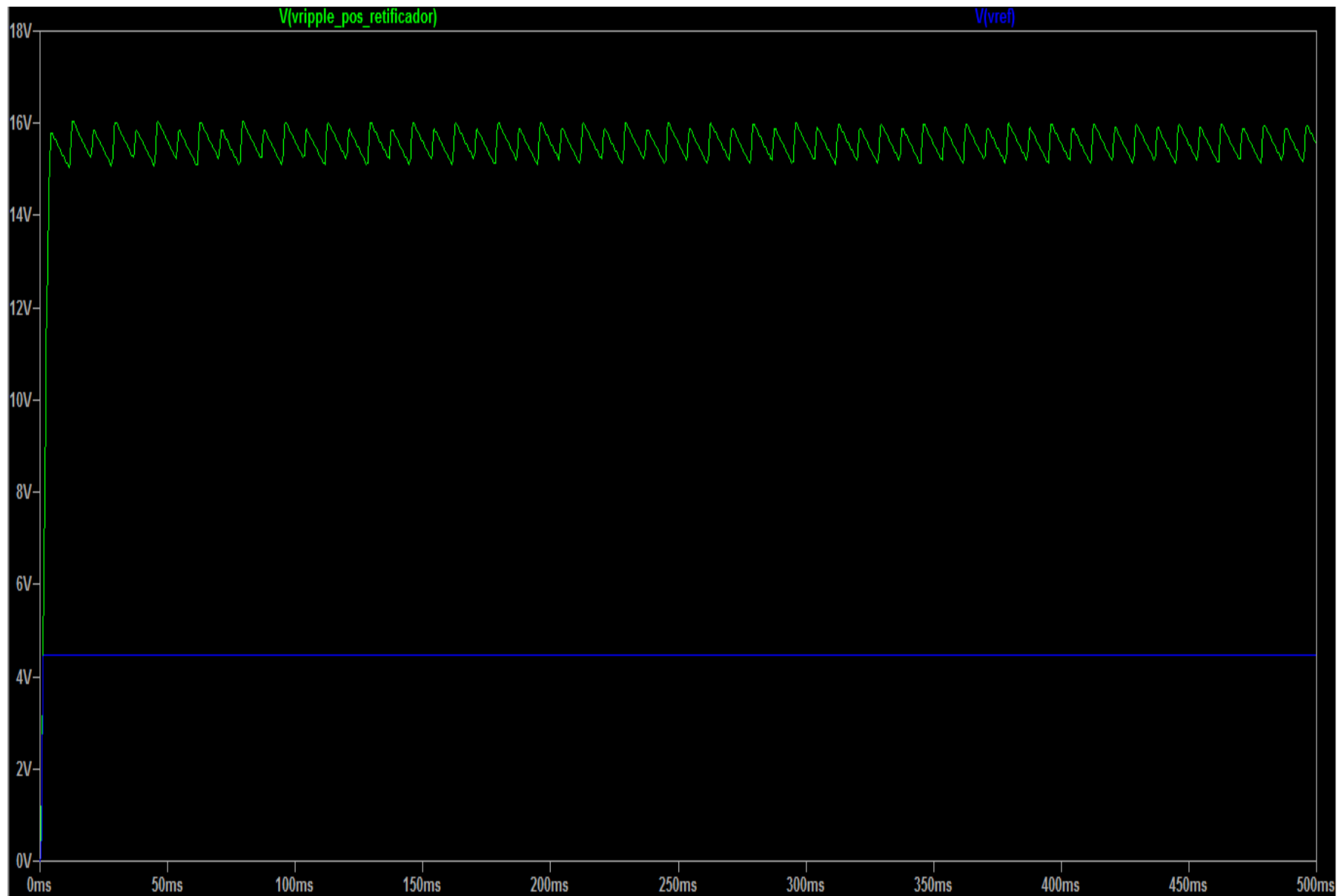
Tempo de condução dos diodos



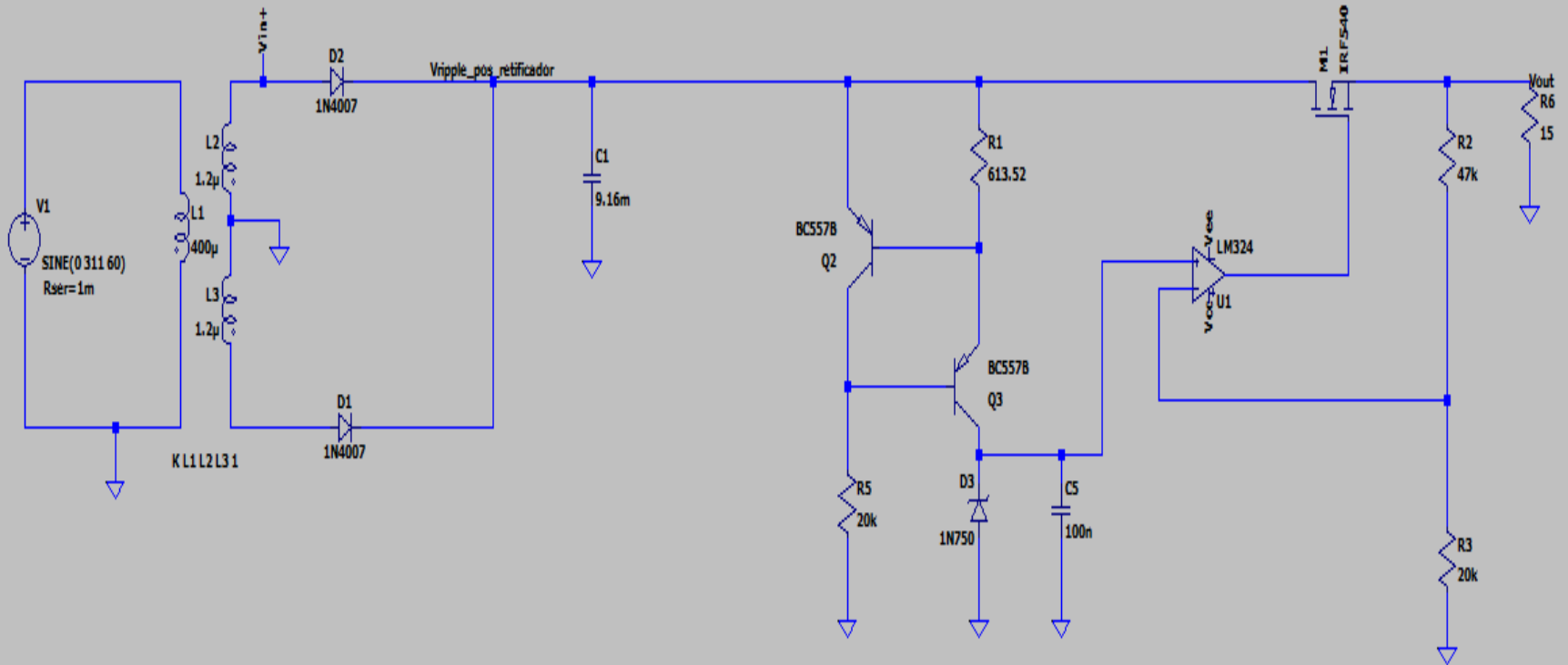


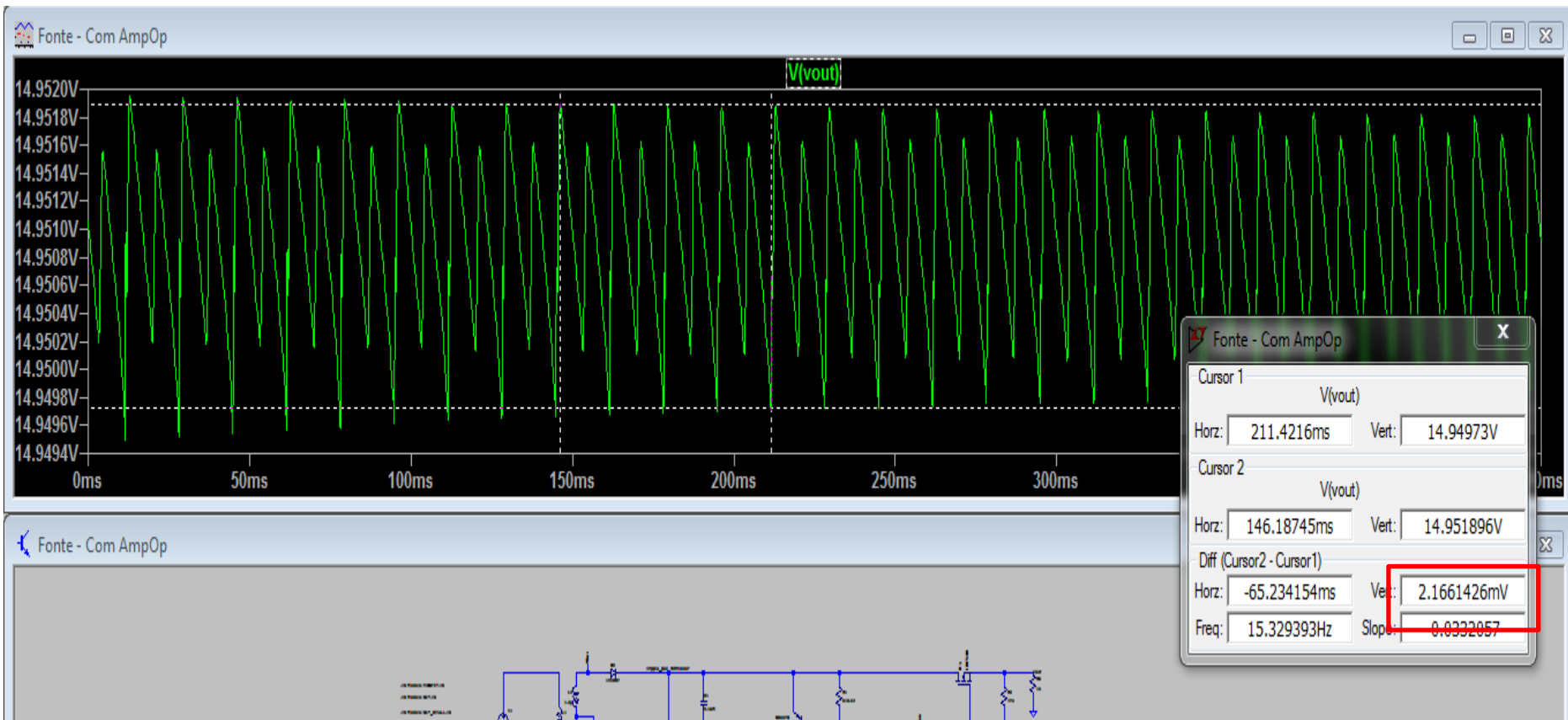
Simulação da fonte de corrente



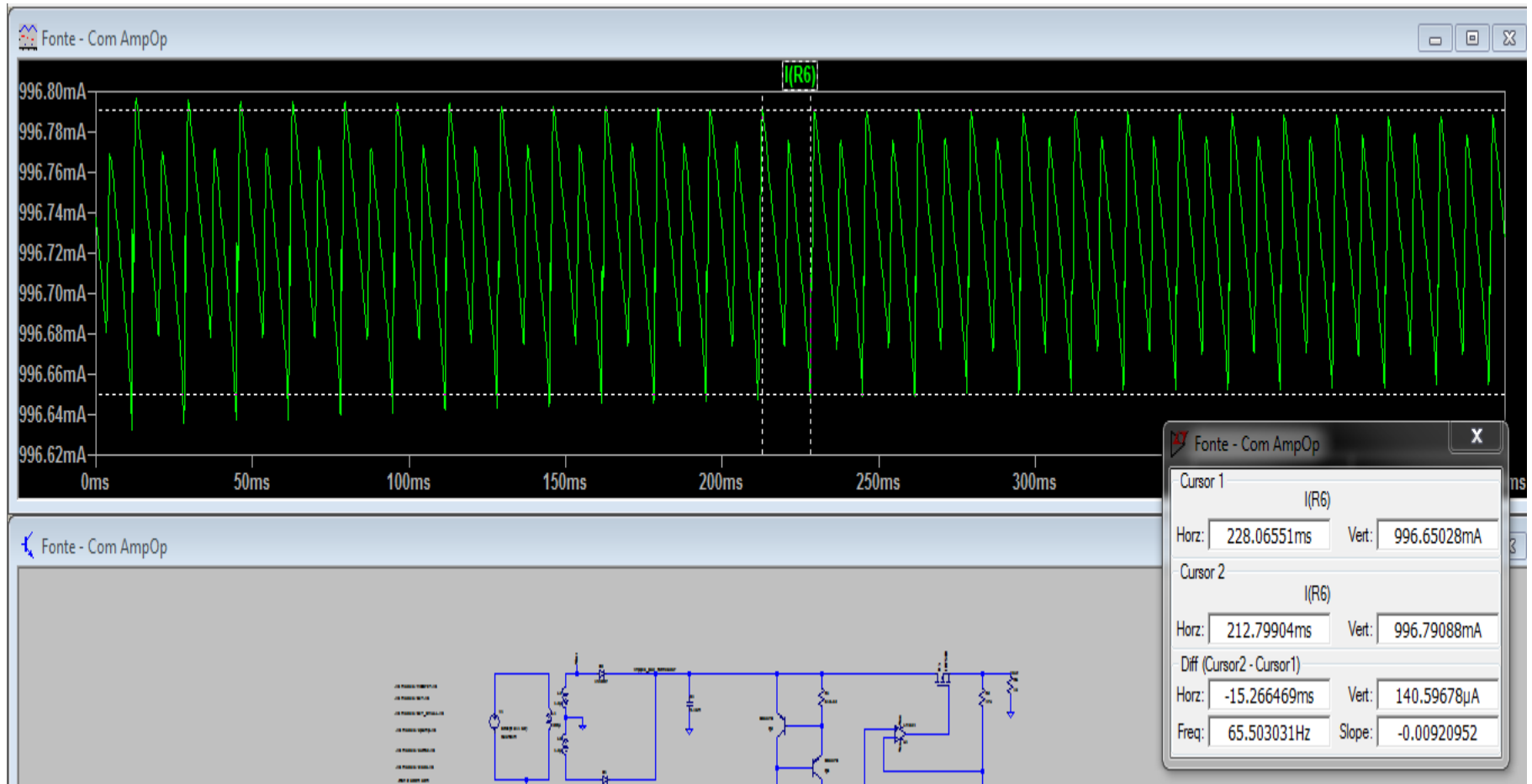


Simulação do circuito sem proteção de sobrecorrente

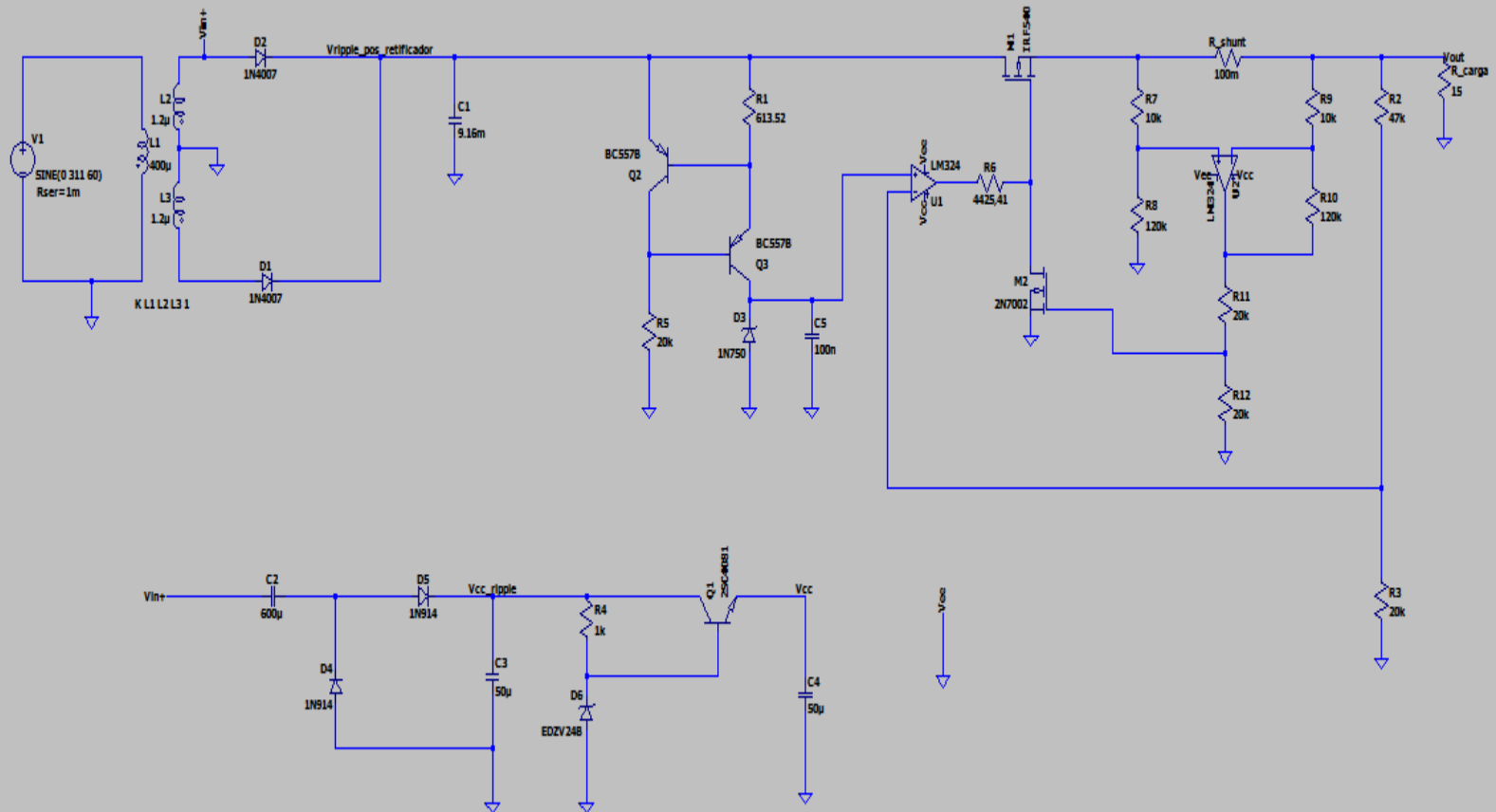


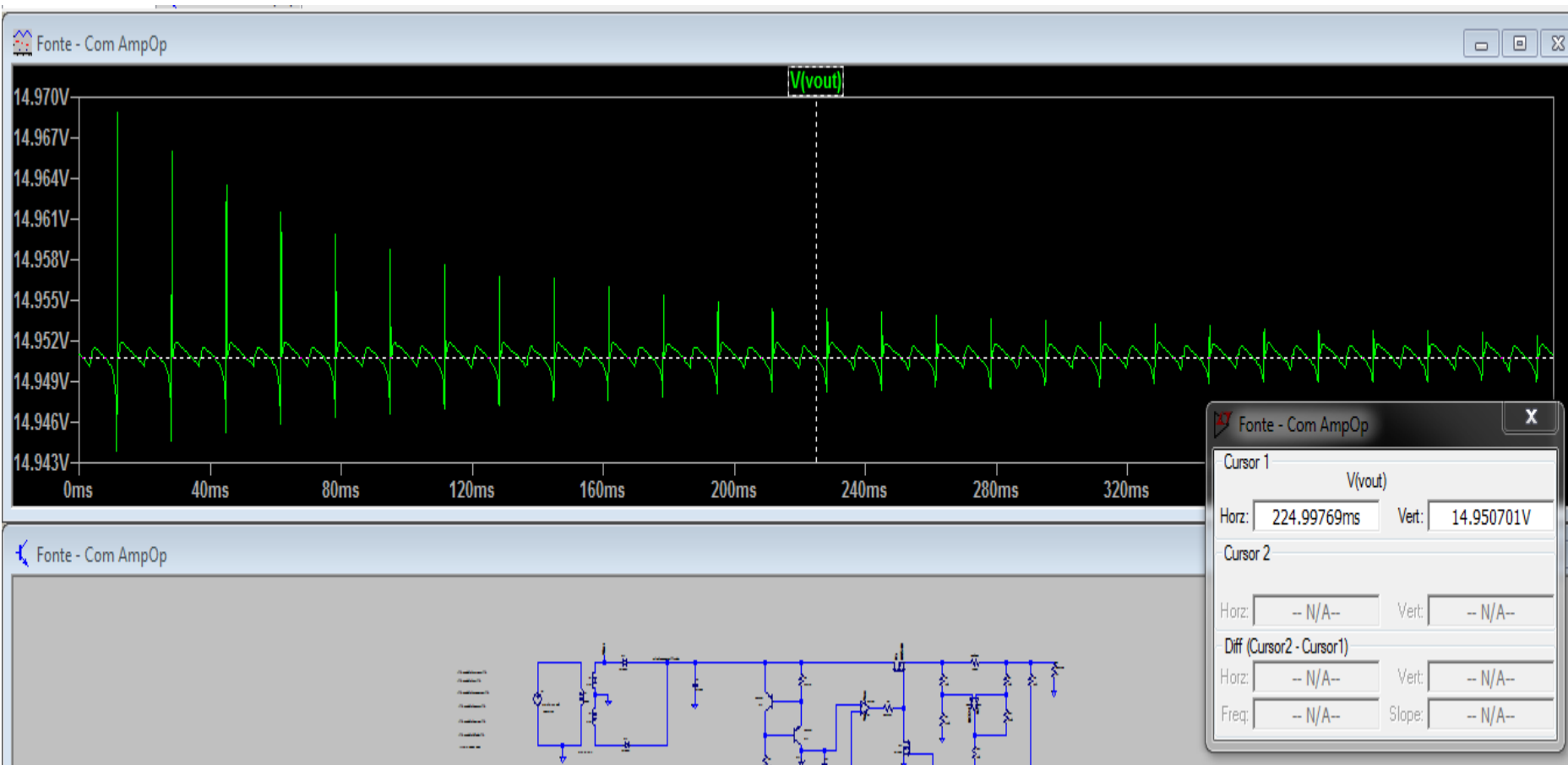


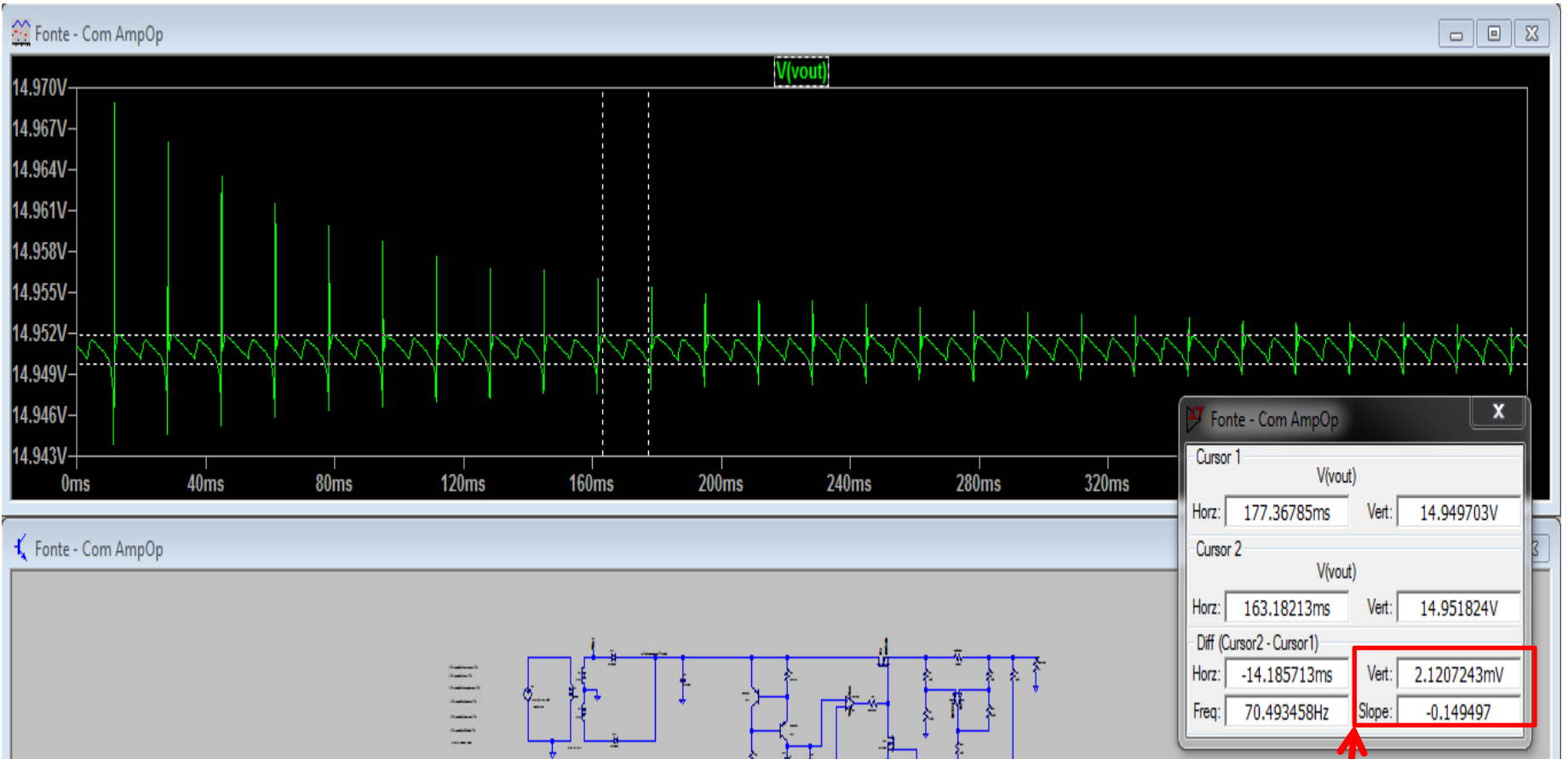
Corrente sobre a carga R6



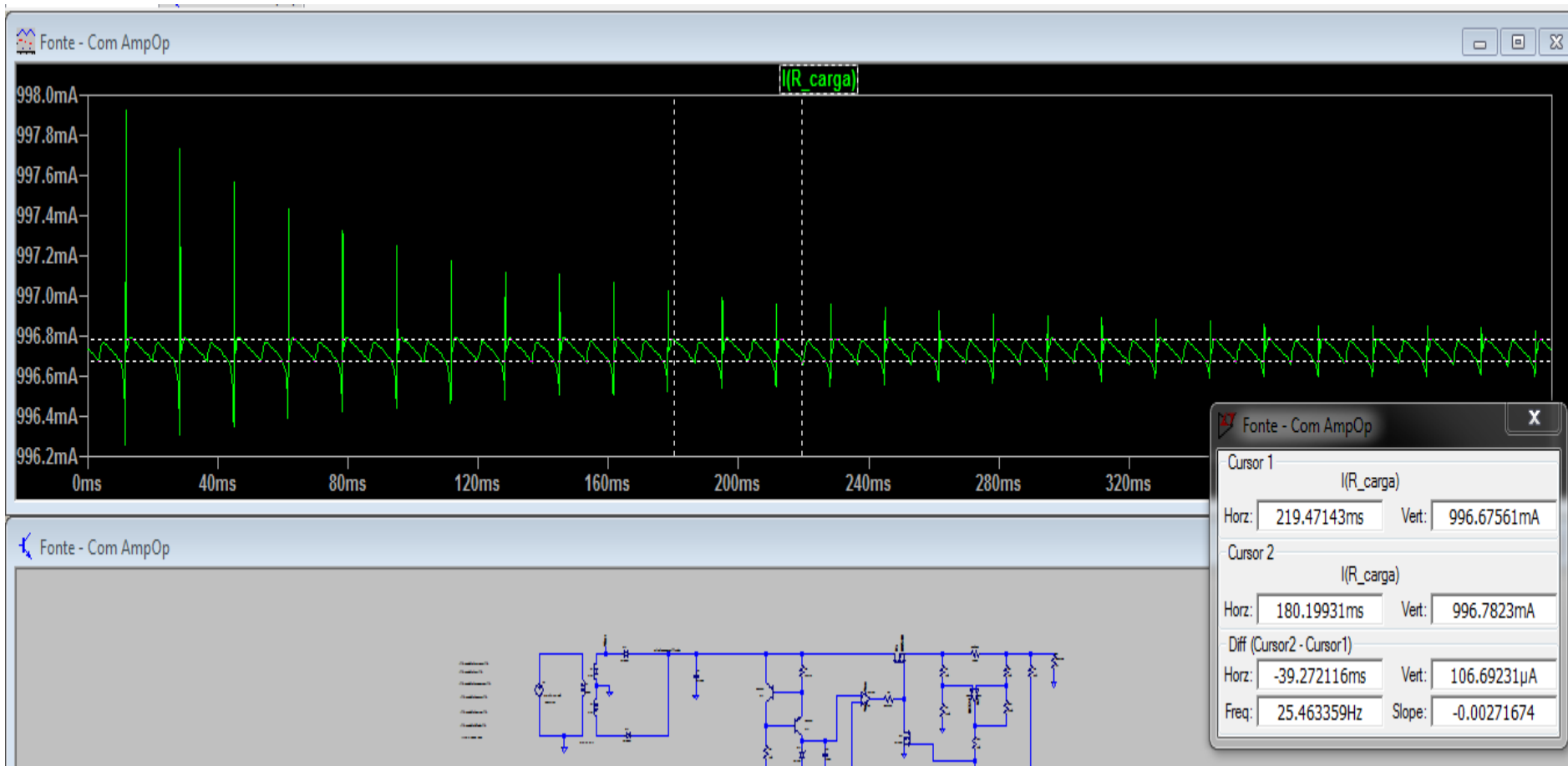
Simulação do circuito com proteção de sobrecorrente







Ripple



Corrente na carga