

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

Departamento Acadêmico de Eletrônica

Pós-Graduação em Desenvolvimento de Produtos Eletrônicos

Conversores Estáticos e Fontes Chaveadas

PROJETO DE FONTE CHAVEADA COM CONVERSOR FLYBACK

Alunos:

Daniel Dezan de Bona

Luís Fernando Garcia

Roberto Philippi Füllgraf

Professor:

Clóvis Antônio Petry, Dr. Eng.

Florianópolis, 31 de maio de 2010

Sumário

1. INTRODUÇÃO	3
1.1 CONVERSOR FLYBACK.....	3
2. DESENVOLVIMENTO.....	5
2.1 REQUISITOS DE PROJETO	5
2.2 METODOLOGIA	5
2.3 SIMULAÇÃO DO CIRCUITO EM MALHA ABERTA.....	6
2.4 PROJETO EM MALHA FECHADA.....	10
2.5 SIMULAÇÃO EM MALHA FECHADA.....	22
3. MONTAGEM DA FONTE.....	31
4. CONCLUSÃO	35
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36

1. Introdução

Vamos tratar neste trabalho do projeto de uma fonte chaveada, com conversor Flyback, em malha fechada, que utilizará o componente FSQ500L como elemento de chaveamento. A fonte possuirá entrada universal de tensão (85 a 265V em 60Hz) e saída de 5,1V e 0,4A.

Para entendermos melhor o projeto, vamos começar com uma explanação sobre conversores CC-CC, depois passaremos por uma simulação de fonte chaveada em malha aberta, seguindo depois pelos cálculos de projeto, simulação em malha fechada e finalizando com a montagem e testes em bancada da fonte.

1.1 Conversor Flyback

Segundo Barbi e Martins (2000), o conversor CC-CC pode ser conceituado como um sistema, formado por semicondutores de potência operando como interruptores, e por elementos passivos, normalmente indutores e capacitores, que tem por função controlar o fluxo de potência elétrica da fonte de entrada para a fonte de saída.

Flyback é um tipo de conversor que pode ser utilizado em conversão AC-CC e CC-CC, e possui uma arquitetura equivalente ao conversor Buck-Boost, porém, com a vantagem de ser isolado galvanicamente, pois utiliza um transformador entre a entrada e a saída.

A figura 1 apresenta a arquitetura básica de um conversor flyback.

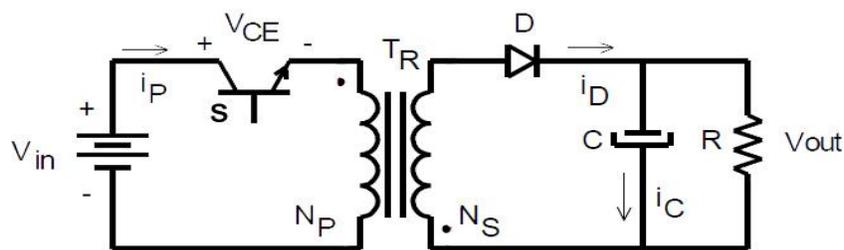


FIGURA 1 - DIAGRAMA ELÉTRICO DO CONVERSOR FLYBACK

Seu funcionamento se dá da seguinte forma: quando a chave S está fechada, o primário do transformador está ligado diretamente à fonte de tensão de entrada, resultando em um aumento do fluxo magnético do transformador. Por consequência o diodo é polarizado inversamente, e assim o capacitor C é quem fornece energia para a carga.

Quando a chave S é aberta, a energia armazenada no transformador é transferida para a saída do conversor. O diodo D é polarizado diretamente e o capacitor C é carregado. A figura 2 demonstra a passagem de corrente pelo circuito com a chave fechada.

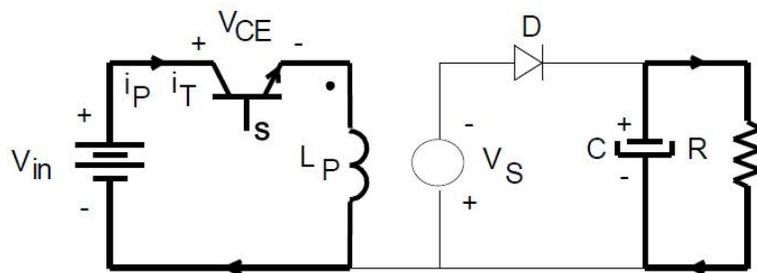


FIGURA 2 - CONVERSOR FLYBACK - FUNCIONAMENTO COM A CHAVE FECHADA

A figura 3 demonstra a passagem de corrente com a chave aberta.

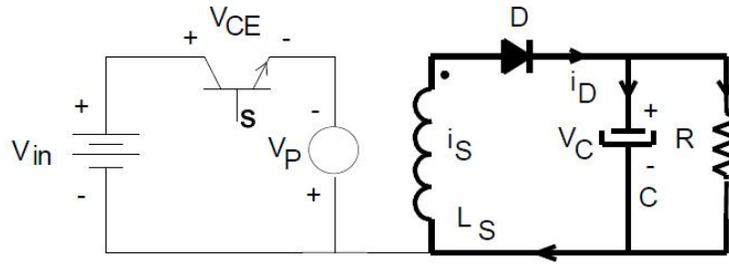


FIGURA 3 - CONVERSOR FLYBACK - FUNCIONAMENTO COM A CHAVE ABERTA

A figura 4 apresenta as formas de onda da saída, com o chaveamento da tensão de entrada.

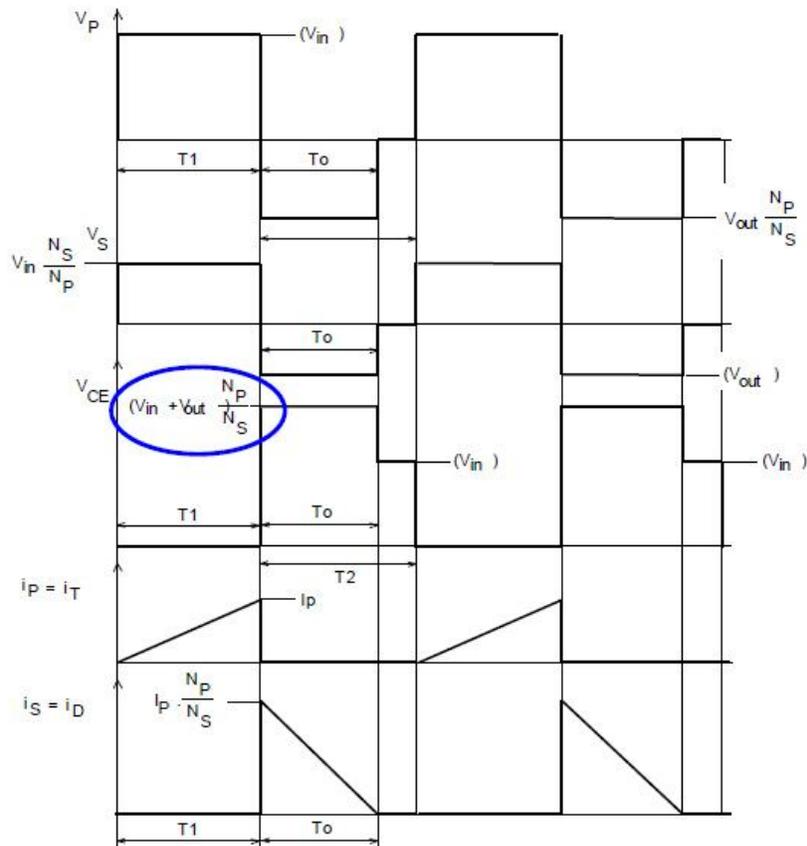


FIGURA 4 - FORMAS DE ONDA NA SAÍDA DO CONVERSOR COM A CHAVE ABERTA E FECHADA

O conversor flyback possibilita uma montagem com múltiplas saídas de tensão, dividindo-se apenas os secundários do transformador, como mostrado na figura 5.

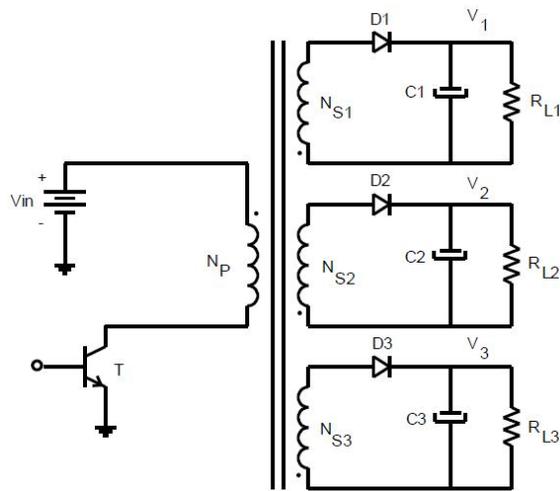


FIGURA 5 - CONVERSOR FLYBACK COM MÚLTIPLAS SAÍDAS

Basicamente, os conversores flyback possuem essa característica. Porém existem alguns circuitos que são agregados a configuração básica, conhecidos como *snubber* ou *grameadores*. Esse circuito é responsável pelo controle das reatâncias no primário do transformador devido à frequência de chaveamento.

2. Desenvolvimento

Damos início agora ao desenvolvimento do projeto: primeiramente em malha aberta e depois em malha fechada.

2.1 Requisitos de Projeto

A fim de validar os conhecimentos obtidos na disciplina de conversores estáticos, foi sugerido o projeto e implementação de uma fonte chaveada utilizando um conversor flyback como parte de sua arquitetura.

O projeto da fonte foi feito utilizando o software *SMATHStudio Desktop* na realização dos cálculos e também o software *PSIM 6.0* para simulação do *hardware*.

O projeto da fonte partiu dos seguintes requisitos básicos: O primeiro foi a utilização de um circuito integrado (CI) responsável pela etapa de chaveamento da tensão no primário e também o controle da tensão de saída. Trata-se do FSQ500L fabricado pela FAIRCHILD *Semiconductor*. É um CI capaz de trabalhar com tensão de entrada *full-range* (85 – 265 V_{ac}) e até 10 V_{CC} como tensão de saída, sendo sua potência máxima limitada em 2 W.

O projeto da fonte foi baseado na folha de dados do componente e mais duas notas de aplicações disponibilizadas pelo fabricante, sendo a primeira AN-6075 e a segunda a AN-4147.

A nota AN-6075 relata a utilização do FSQ500L sendo utilizado em uma fonte com potência de 2,04W (5,1 V_{CC} / 400 mA), entrada de tensão alternada *full range*, frequência da rede elétrica 60 Hz e rendimento superior a 50%.

2.2 Metodologia

O projeto seguiu a seguinte metodologia:

- Definição de arquitetura;
- Cálculos utilizando o SMATH Studio para definir os componentes e grandezas do circuito;

- Simulação do circuito em malha aberta no PSIM 6.0;
- Simulação do circuito em malha fechada no PSIM 6.0 utilizando um modelo do FSQ500L;
- Desenvolvimento de *layout*;
- Confecção de PCI e montagem do circuito experimental;
- Testes e validações práticas em bancada.

2.3 Simulação do circuito em malha aberta

A fim de validar a arquitetura primária da fonte utilizando conversor flyback, e os valores dos componentes obtidos nos cálculos com o SMATH Studio (apresentados mais adiante), foi utilizado o simulador eletrônico PSIM 6.0 que contém componentes ideais, porém com a opção de modificá-los para se obter uma simulação mais próxima de um circuito real.

A figura apresentada a seguir, separa os blocos da fonte em cinco partes para serem melhor explicados.

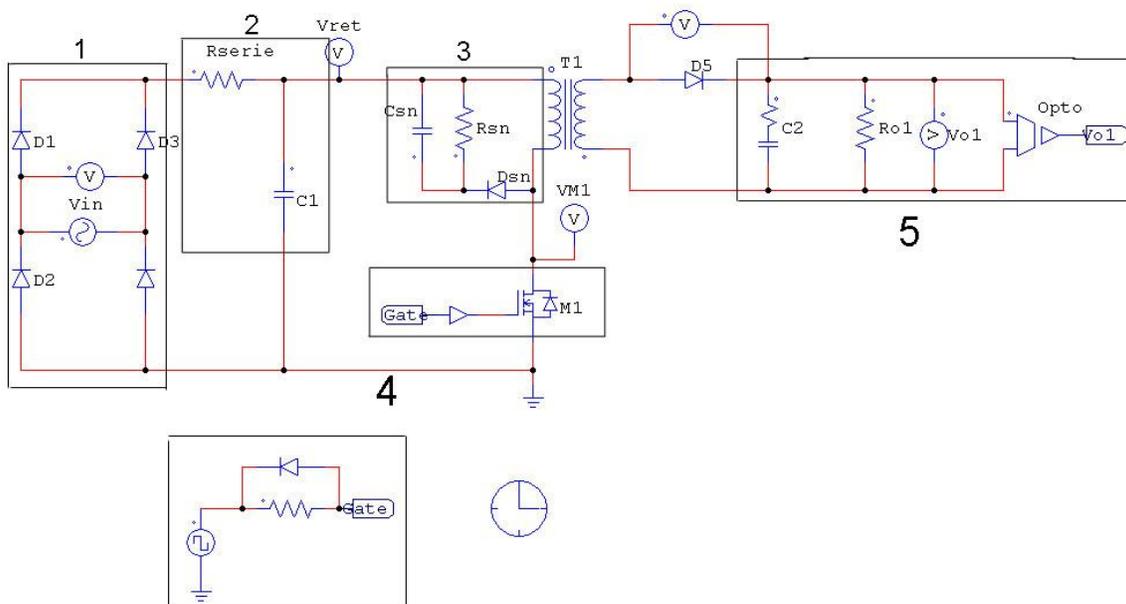


FIGURA 6 – ESQUEMA ELÉTRICO DA FONTE EM MALHA ABERTA

- 1 - Fonte de tensão alternada externa conectada a uma ponte de diodos para torná-la contínua pulsante.
- 2 - R_{serie} é um resistor conectado em série com o circuito que possui a função de limitar a corrente de carga do capacitor na partida do circuito, pois se trata de uma corrente acima do que os diodos suportam. R_{serie} gera algumas perdas que foram calculadas e demonstradas mais a frente. $C1$ é o capacitor de filtragem responsável por tornar a tensão retificada pelos diodos o mais próximo de uma tensão puramente contínua.
- 3 - Circuito *snubber*, responsável pelo controle das reatâncias do primário do transformador.
- 4 - Mosfet sendo chaveado por um circuito auxiliar a uma frequência de 130 KHz. No circuito em malha fechada, esse mosfet e o circuito de chaveamento serão substituídos pelo modelo do componente FSQ500L.
- 5 - $C2$ é um novo capacitor de filtragem que leva em conta o cálculo da RSE (resistência série equivalente) contida nos capacitores. Dependendo desse valor, o cálculo de capacitância precisa ser alterado para se adequar a RSE. R_{o1} é a carga do circuito. Opto é o optoacoplador que será conectado a entrada do FSQ500L para fechar a malha do circuito.

A seguir, serão demonstradas algumas formas de onda extraídas do PSIM.

A primeira é a tensão V_{in} em vermelho e a tensão V_{ret} (retificada) em azul. Nota-se na imagem que as mesmas estão com um pico de aproximadamente 120 Vac, que é quando o circuito necessita de mais corrente (pior caso).

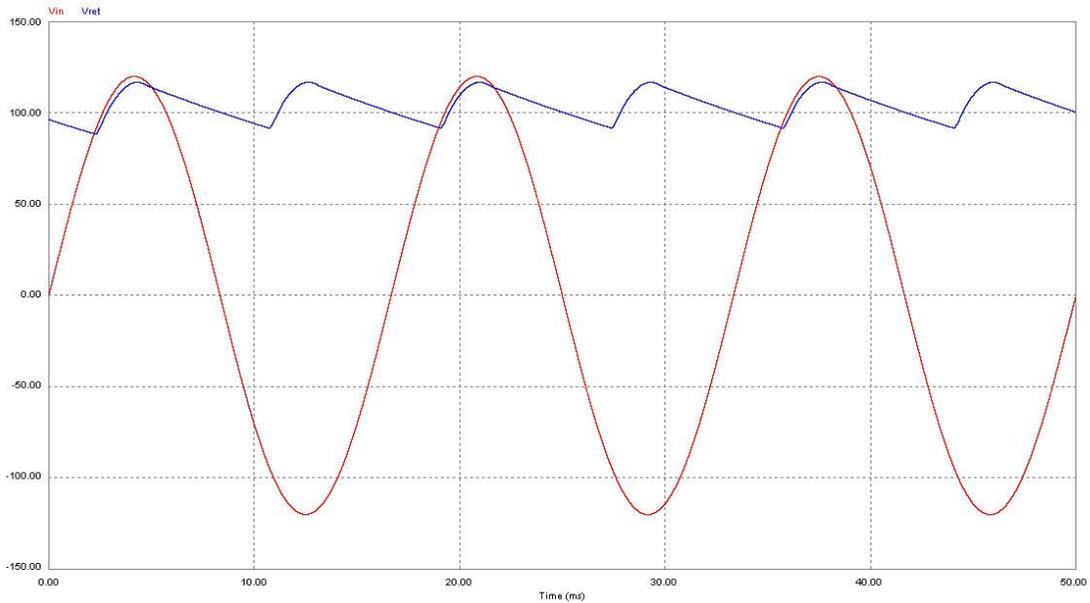


FIGURA 7 – $V_{in} = 120$ Vpp e V_{ret}

A seguir é apresentado o mosfet chaveando a uma frequência de 130 KHz.

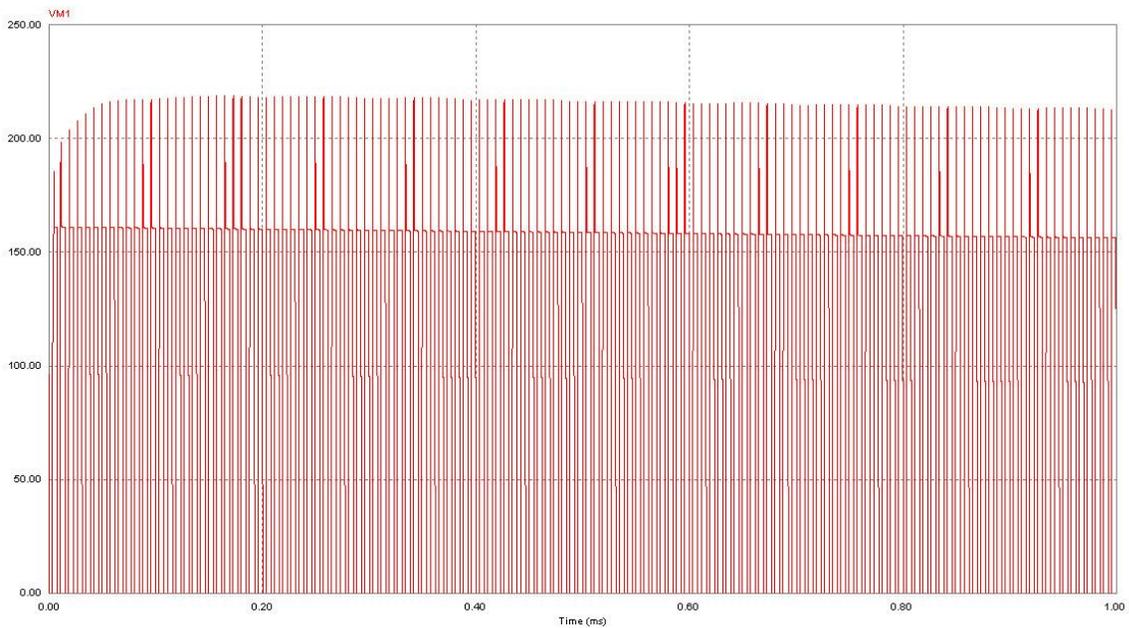


FIGURA 8 – CHAVEAMENTO DO INTERRUPTOR

A tensão de saída do circuito é apresentada na figura abaixo, sendo que há uma variação na tensão de 5,1V até aproximadamente 5,9V, que será corrigida quando fecharmos a malha.

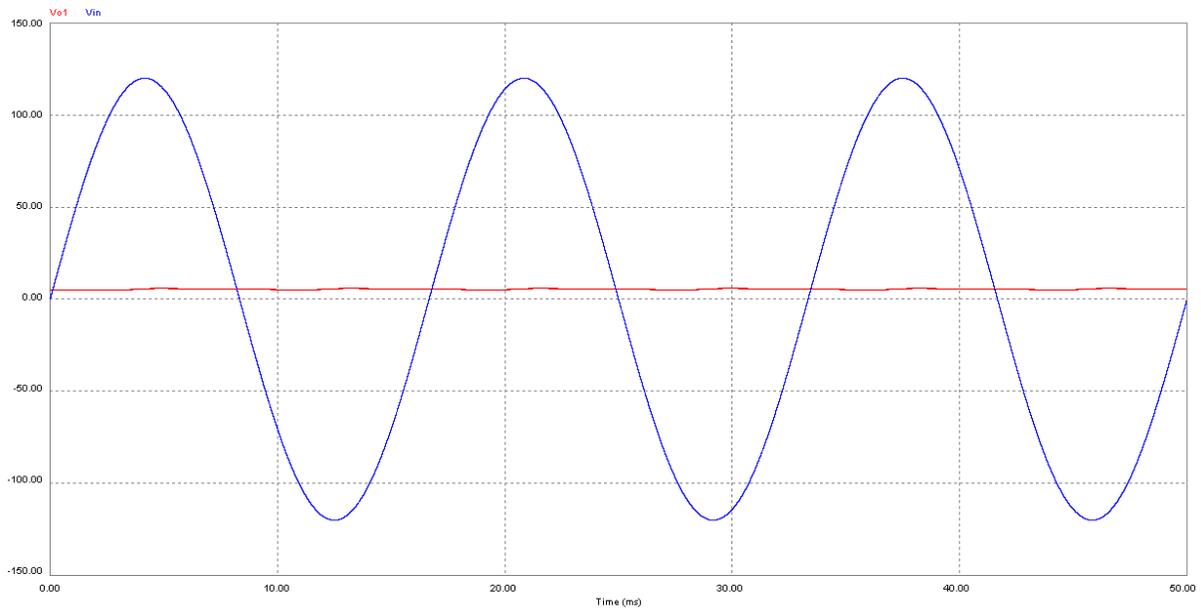


FIGURA 9 – ENTRADA 120 Vpp (AZUL) X SAÍDA 5,1 V (VERMELHO)

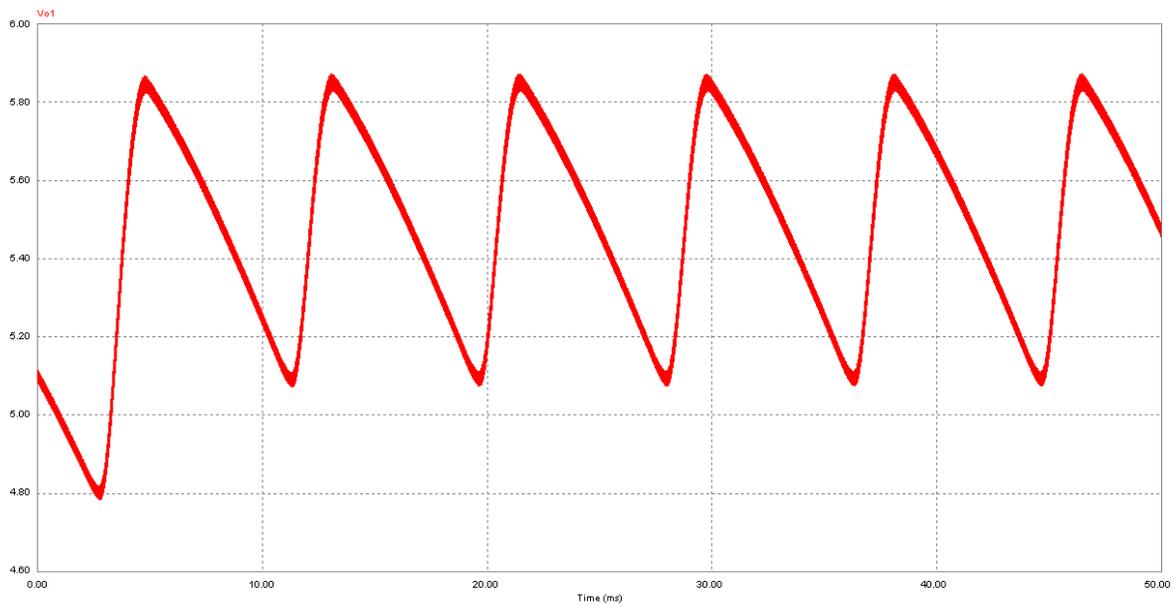


FIGURA 10 – VARIAÇÃO NA TENSÃO DE SAÍDA (ZOOM)

Agora ao aumentarmos a tensão de entrada de 120 Vpp para 311 Vpp, podemos notar que a saída assume valores entre 14 e 17 V, bem acima da especificação da fonte, mostrando a necessidade de fechar a malha de controle.

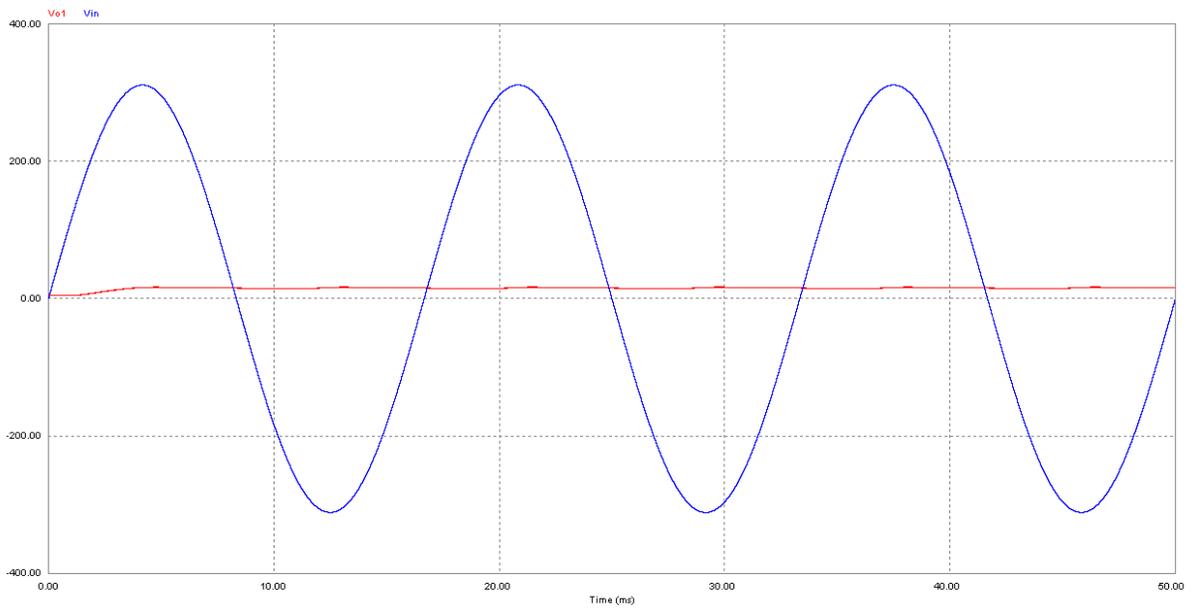


FIGURA 11 – ENTRADA 311 Vpp (AZUL) X SAÍDA 15 V (VERMELHO)

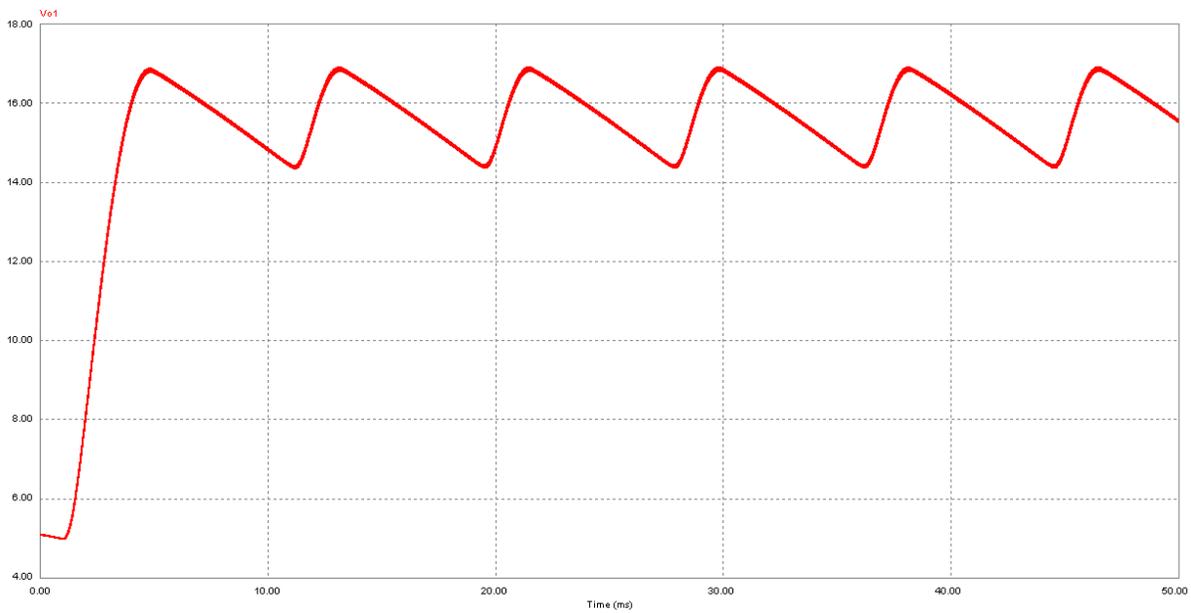


FIGURA 12 – VARIAÇÃO NA TENSÃO DE SAÍDA (ZOOM)

2.4 Projeto em Malha Fechada

A partir deste ponto, damos início ao projeto da fonte chaveada, com conversor Flyback, em malha fechada, que utilizará o componente FSQ500L como elemento de chaveamento.

Os principais dados de entrada podem ser observados abaixo:

Dados de entrada:				
EntMin:=85	EntMax:=265	$V_{ac} := \frac{(EntMax - EntMin)}{2} + EntMin$	Vac=175 V	# Tensão média da entrada
$\Delta V_{ac} := 0,514$				
Fr:=60 Hz				
$\eta_{ret} := 0,9$	# Rendimento do retificador			
$\eta_{con} := 0,7$	# Rendimento do conversor			
Vo1:=5,1 V	# Tensão de saída			
$\Delta V_{cret} := 0,37$	# Ondulação na tensão do capacitor do retificador			
Io1:=0,4 A	# Corrente de saída			
$\Delta V_{co} := 0,01$	# Ondulação no capacitor de saída			
Vd:=1 V	# Queda de tensão estimada nos diodos			
Dmax:=0,4	# Razão cíclica máxima			
Fcon:=130000 Hz				
Jmax:=450	$\frac{A}{cm^2}$	# Máxima densidade de corrente		
$\Delta B := 0,25$ T				
$\mu_0 := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$	$\frac{H}{m}$			
Kp:=0,5				
Kw:=0,4	# Fator de ocupação do cobre dentro do carretel			

Destacamos a frequência de 130KHz de chaveamento, rendimento de 90% do retificador e 70% do conversor. A potência máxima da fonte é de 2,04W e a maior carga (ou menor resistência) é de 12,75 Ω .

Como a tensão de entrada varia de 85 a 265 Vac, temos uma tensão de pico na entrada do retificador de 120 a 375 V.

Cálculos iniciais:				
Po1:=Vo1·Io1	Po1=2,04 W			
$R_{o1} := \frac{V_{o1}}{I_{o1}}$	Ro1=12,75 Ω			
Pcon:=Po1	Pcon=2,04 W			
$V_{acmin} := V_{ac} \cdot (1 - \Delta V_{ac})$	Vacmin=85,05	V	$PicoMin := V_{acmin} \cdot \sqrt{2}$	PicoMin=120,2789 V
$V_{acmax} := V_{ac} \cdot (1 + \Delta V_{ac})$	Vacmax=264,95	V	$PicoMax := V_{acmax} \cdot \sqrt{2}$	PicoMax=374,6959 V

Respeitando os parâmetros de rendimento a potencia entregue pelo retificador será de 3,24 W, enquanto a potencia de saída do conversor será de 2,92 W, como e mostrado nos cálculos abaixo.

Determinação da potência de saída e de entrada:

$$P_{out} = \frac{P_{con}}{\eta_{con}} \quad P_{out} = 2,9143 \quad W \quad \# \text{ Potência de saída do conversor}$$

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta_{ret}} \quad P_{in} = 3,2381 \quad W \quad \# \text{ Potência de entrada do conversor ou seja, potência de saída do retificador}$$

O cálculo do capacitor de filtragem, que é inserido na saída do retificador, apontou o valor de 5,7 µF que não é um valor comercial, então optamos por utilizar uma associação em paralelo de dois capacitores, 4,7 + 1 µF, por 400 V (superior ao pico máximo calculado anteriormente).

Cálculo do Capacitor de filtragem:

$$V_{pk} = \sqrt{2} \cdot V_{acmin} - 2 \cdot V_d \quad V_{pk} = 118,2789 \quad V$$

$$V_{cmin} = (\sqrt{2} \cdot V_{acmin} - 2 \cdot V_d) \cdot (1 - \Delta V_{cret}) \quad V_{cmin} = 74,5157 \quad V$$

$$\Delta V = V_{pk} - V_{cmin} \quad \Delta V = 43,7632 \quad V$$

$$C_{ret} = \frac{P_{out}}{F_r \cdot (V_{pk}^2 - V_{cmin}^2)} \quad C_{ret} = 5,7567 \cdot 10^{-6} \quad F$$

$$C_{micro} = C_{ret} \cdot 10^6 \quad C_{micro} = 5,7567 \quad \mu F$$

Capacitor escolhido: 4,7 uF x 400 V mais 1 uF x 400 V (podem ser de 450 V).

Após a filtragem a tensão média na saída do retificador, varia de 96,4 a 303,7 V, enquanto a corrente de pico chega a 0,1068 A e a eficaz a 0,0481 A.

Tensões médias na saída do retificador:

$$V_{inmin} = (\sqrt{2} \cdot V_{acmin} - 2 \cdot V_d) \cdot \left(1 - \frac{\Delta V_{cret}}{2}\right) \quad V_{inmin} = 96,3973 \quad V$$

$$V_{inmax} = (\sqrt{2} \cdot V_{acmax} - 2 \cdot V_d) \cdot \left(1 - \frac{\Delta V_{cret}}{2}\right) \quad V_{inmax} = 303,7471 \quad V$$

Corrente de pico na saída do retificador:

$$t_c = \frac{\arccos\left(\frac{V_{cmin}}{V_{pk}}\right)}{2 \cdot n \cdot F_r} \quad t_c = 0,0024 \quad s$$

$$I_p = \frac{C_{ret} \cdot \Delta V}{t_c} \quad I_p = 0,1068 \quad A$$

Valor eficaz da corrente na saída do retificador:

$$I_{ef} = I_p \cdot \sqrt{2 \cdot t_c \cdot F_r - (2 \cdot t_c \cdot F_r)^2} \quad I_{ef} = 0,0481 \quad A$$

Apresentamos a seguir a corrente média e eficaz no capacitor de filtragem.

Corrente média fornecida pelo capacitor ao conversor:

$$I_{md} = \frac{P_{in}}{V_{cmin}} \quad I_{md} = 0,0435 \text{ A}$$

Corrente total no capacitor de filtragem:

$$I_{cef} = \sqrt{I_{ef}^2 + I_{md}^2} \quad I_{cef} = 0,0648 \text{ A}$$

Os diodos retificadores devem suportar uma corrente de pico de 0,2136 A e tensão máxima de 375 V, desta forma, o diodo encolhido foi o 1N4004 / 400V.

Correntes nos diodos retificadores:

$$I_{def} = I_p \cdot \sqrt{t_c \cdot F_r} \quad I_{def} = 0,0402 \text{ A}$$

$$I_{dmd} = \frac{P_{in}}{2 \cdot V_{cmin}} \quad I_{dmd} = 0,0217 \text{ A}$$

$$I_{dp} = I_p \cdot 2 \quad I_{dp} = 0,2136 \text{ A}$$

$$V_{dmax} = \sqrt{2} \cdot V_{acmax} \quad V_{dmax} = 374,6959 \text{ V}$$

Podem ser usados diodos de 1 A x 400 V (1N4004) devido à corrente de pico na partida.

$$P_{dret} = I_{dmd} \cdot V_d \cdot 4 \quad P_{dret} = 0,0869 \text{ W}$$

Necessitamos limitar a corrente de partida (carga do capacitor) colocando um resistor em série com a saída do retificador. Idealmente, este resistor poderia ser um termistor que diminua sua resistência com o aumento da temperatura, assim teríamos um valor alto na partida a frio, e um valor baixo em funcionamento normal, melhorando o rendimento do retificador. Mas também pode ser um resistor comum calculado conforme mostrado abaixo:

Controle da corrente de partida:

$$I_{dmax} = 30 \text{ A para o diodo 1N4004}$$

$$R_{serie} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{acmax}}{I_{dmax}} \quad R_{serie} = 12,4899 \Omega$$

$$P_{rserie} = R_{serie} \cdot I_{ef}^2 \quad P_{rserie} = 0,0289 \text{ W}$$

O valor encontrado foi de 12,5 Ω por 0,0289 W. Porém vamos utilizar o valor prático de 18 Ω indicado no *application notes* AN-6075.

$R_{serie}=18 \ \Omega$		
$P_{serie}=R_{serie} \cdot I_{ef}^2$	$P_{serie}=0,0417 \ W$	
$\Delta V_{rserie}=R_{serie} \cdot I_{dp}$	$\Delta V_{rserie}=3,845 \ V$	Queda de tensão no resistor série, na corrente de pico.

Cálculo dos tempos envolvidos:

$$T_s = \frac{1}{F_{con}} \quad T_s = 7,6923 \cdot 10^{-6} \ s$$

$$T_{on} = D_{max} \cdot T_s$$

$$T_{on} = 3,0769 \cdot 10^{-6} \ s$$

$$T_{off} = T_s - T_{on}$$

$$T_{off} = 4,6154 \cdot 10^{-6} \ s$$

Corrente de pico no primário:

$$I_{pri} = \frac{2 \cdot P_{con}}{\eta_{con} \cdot V_{inmin} \cdot D_{max}} \quad I_{pri} = 0,1512 \ A$$

Neste ponto damos início aos cálculos do transformador:

Escolha do núcleo:			
$A_e A_w = \frac{1,1 \cdot P_{con} \cdot 10^4}{K_p \cdot K_w \cdot J_{max} \cdot \Delta B \cdot F_{con}}$	$A_e A_w = 0,0077 \ cm^4$		
Núcleo E-20/10 Este núcleo foi utilizado por facilidades de aquisição.			
$A_e = 0,312 \ cm^2$	$A_w = 0,26 \ cm^2$	$l_t = 3,8 \ cm$	$V_e = 1,34 \ cm^3$
$A_e \cdot A_w = 0,0811 \ cm^4$			

O valor encontrado de $A_e A_w$ foi $0,0077 \ cm^4$, porém o menor núcleo comercial que conseguimos comprar (conforme tabela abaixo) foi o núcleo E-20/10, com $A_e A_w$ de $0,08 \ cm^4$.

NÚCLEOS DE FERRITE TIPO E

Tabela 2

Núcleo	A_e (cm ²)	A_w (cm ²)	l_e (cm)	l_t (cm)	v_e (cm ³)	$A_e A_w$ (cm ⁴)
E-20	0,312	0,26	4,28	3,8	1,34	0,08
E-30/7	0,60	0,80	6,7	5,6	4,00	0,48
E-30/14	1,20	0,85	6,7	6,7	8,00	1,02
E-42/15	1,81	1,57	9,7	8,7	17,10	2,84
E-42/20	2,40	1,57	9,7	10,5	23,30	3,77
E-55	3,54	2,50	11,2	11,6	42,50	8,85

A determinação do entreferro segue os cálculos abaixo:

Determinação do entreferro:

$$\Delta W := \frac{P_{con}}{\eta_{con} \cdot F_{con}} \quad \Delta W = 2,2418 \cdot 10^{-5} \text{ J}$$

$$\delta := \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot \Delta W}{\Delta B^2 \cdot A_e \cdot 10^{-4}} \quad \delta = 2,8893 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

$$lg := \frac{\delta}{2} \cdot 10^3 \quad lg = 0,0144 \text{ mm}$$

O número calculado de espiras do primário foi de 38 espiras, porém para seguir o exemplo prático da nota AN-6075, vamos utilizar 53 espiras no primário e 5 espiras no secundário.

Número de espiras do primário:

$$N_p := \frac{\Delta B \cdot \delta}{\mu_0 \cdot I_{pri}} \quad N_p = 38,0265 \text{ espiras}$$

$N_p = 53$ espiras Reajustado para coincidir com a nota de aplicação AN-6075.

Número de espiras dos secundários:

$$N_{s1} := N_p \cdot \frac{(V_{o1} + V_d)}{V_{inmin}} \cdot \frac{(1 - D_{max})}{D_{max}} \quad N_{s1} = 5,0307 \text{ espiras}$$

$N_{s1} = 5$ espiras Reajustado para coincidir com a nota de aplicação AN-6075.

Relação de transformação:

$$n = \frac{N_p}{N_{s1}} \quad n = 10,6$$

O interruptor (chave) FSQ500L suporta uma tensão máxima de 700V. Como a tensão calculada (440 V) ficou entre 60% e 80% da tensão máxima do interruptor, podemos utilizar o componente FSQ500L neste projeto.

Verificando a tensão sobre o interruptor e sobre o diodo:

$$V_{chmax} = \sqrt{2} \cdot V_{acmax} + (V_{o1} + V_d) \cdot \frac{N_p}{N_{s1}} \quad V_{chmax} = 439,3559 \text{ V} \quad \text{Tensão máxima sobre o interruptor.}$$

Deve estar entre 60 a 80% da tensão máxima suportada pelo interruptor: $0,6 \cdot 700 = 420 \text{ V}$ até $0,8 \cdot 700 = 560 \text{ V}$.

$$V_{dlmax} = V_{o1} + \sqrt{2} \cdot V_{acmax} \cdot \frac{N_{s1}}{N_p} \quad V_{dlmax} = 40,4487 \text{ V} \quad \text{Tensão máxima sobre o diodo.}$$

A tensão máxima sobre o diodo retificador do secundário do transformador é de 40,45 V.

Verificando a razão cíclica mínima:

$$D_{min} = \frac{1}{\frac{V_{inmax}}{n \cdot (V_d + V_{o1})} + 1} \quad D_{min} = 0,1755$$

Correntes envolvidas:

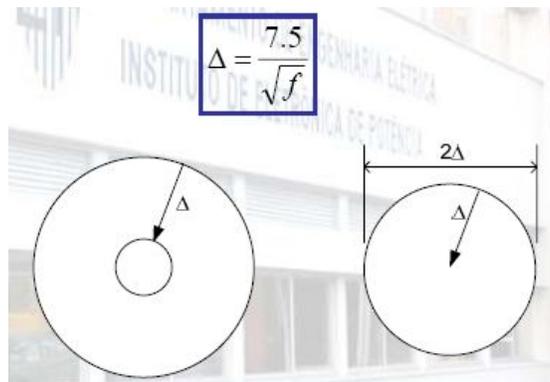
$$I_{pef} = I_{pri} \cdot \sqrt{\frac{D_{max}}{3}} \quad I_{pef} = 0,0552 \text{ A}$$

$$I_{po1} = \frac{2 \cdot P_{o1}}{\eta_{con} \cdot V_{inmin} \cdot D_{max}} \quad I_{po1} = 0,1512 \text{ A}$$

$$I_{s1} = I_{po1} \cdot \frac{N_p}{N_{s1}} \quad I_{s1} = 1,6023 \text{ A}$$

$$I_{s1ef} = I_{s1} \cdot \sqrt{\frac{(1 - D_{max})}{3}} \quad I_{s1ef} = 0,7166 \text{ A}$$

Calculando a profundidade de penetração para 130K Hz, encontramos o diâmetro do cobre de 0,0416 cm, sendo assim, devemos utilizar um condutor com diâmetro um pouco abaixo do calculado, pois se utilizarmos um diâmetro maior, vamos estar desperdiçando cobre. Comparando com a tabela de fios, chegamos ao condutor 26 AWG.



$$\Delta = \frac{7.5}{\sqrt{f}}$$

Profundidade de penetração:

$$\Delta = \frac{2 \cdot 7,5}{\sqrt{f \cdot \rho_{con}}} \quad \Delta = 0,0416 \text{ cm}$$

Da tabela fio: 26 AWG

$$A_{26} = 0,001287 \text{ cm}^2 \quad \rho_{26} = 0,001789 \frac{\Omega}{\text{cm}} \quad S_{26} = 0,001671 \text{ cm}^2$$

AWG	Diâmetro Cobre (cm)	Área Cobre (cm ²)	Diâmetro Isolamento (cm)	Área Isolamento (cm ²)	OHMS/CM 20 °C	OHMS/CM 100 °C	AMP. para 450A/cm ²
22	0,064	0,003255	0,071	0,004013	0,000530	0,000708	1,465
23	0,057	0,002582	0,064	0,003221	0,000668	0,000892	1,162
24	0,051	0,002047	0,057	0,002586	0,000842	0,001125	0,921
25	0,045	0,001624	0,051	0,002078	0,001062	0,001419	0,731
26	0,040	0,001287	0,046	0,001671	0,001339	0,001789	0,579
27	0,036	0,001021	0,041	0,001344	0,001689	0,002256	0,459

AWG	Diâmetro Cobre (cm)	Área Cobre (cm ²)	Diâmetro Isolamento (cm)	Área Isolamento (cm ²)	OHMS/CM 20 °C	OHMS/CM 100 °C	AMP. para 450A/cm ²
28	0,032	0,000810	0,037	0,001083	0,002129	0,002845	0,364
29	0,029	0,000642	0,033	0,000872	0,002685	0,003587	0,289
30	0,025	0,000509	0,030	0,000704	0,003386	0,004523	0,229
31	0,023	0,000404	0,027	0,000568	0,004269	0,005704	0,182
32	0,020	0,000320	0,024	0,000459	0,005384	0,007192	0,144
33	0,018	0,000254	0,022	0,000371	0,006789	0,009070	0,114

Calculando a área do condutor do primário obtemos 0,00012266 cm², porém por facilidade de aquisição, vamos utilizar o fio 28 AWG que possui área de 0,000810 cm². Para este condutor 1 fio já é suficiente para conduzir a corrente do primário.

Área dos condutores do primário:

$$S_{p nec} := \frac{I_{p ef}}{J_{max}} \quad S_{p nec} = 1,2266 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2 \quad \text{Fio 28 AWG}$$

$$A_p = 0,000810 \text{ cm}^2 \quad \rho_p = 0,002845 \frac{\Omega}{\text{cm}} \quad S_p = 0,001083 \text{ cm}^2$$

$$N_{fiosp} := \frac{S_{p nec}}{A_p} \quad N_{fiosp} = 0,1514 \text{ fios} \quad N_{fiosp} = 1 \text{ fios}$$

Já para o secundário a área encontrada foi de 0,0016 cm², apontando para o fio 25 AWG, mas novamente por facilidade de aquisição, vamos utilizar 2 fios 28 AWG.

Área dos condutores do secundário 1:

$$S_{s1 nec} := \frac{I_{s1 ef}}{J_{max}} \quad S_{s1 nec} = 0,0016 \text{ cm}^2 \quad \text{Fio 25 AWG}$$

Então usa-se o fio 28 AWG:

$$A_{s1} = 0,000810 \text{ cm}^2 \quad \rho_{s1} = 0,002845 \frac{\Omega}{\text{cm}} \quad S_{s1} = 0,001083 \text{ cm}^2$$

$$N_{fiosS1} := \frac{S_{s1 nec}}{A_{s1}} \quad N_{fiosS1} = 1,9659 \text{ fios} \quad N_{fiosS1} = 2 \text{ fios}$$

Podemos acompanhar abaixo os cálculos das perdas no transformador:

Cálculo das perdas no transformador:

$$L_{fio p} := l_t \cdot N_p \quad L_{fio p} = 201,4 \text{ cm}$$

$$L_{fios1} := l_t \cdot N_{s1} \cdot N_{fiosS1} \quad L_{fios1} = 38 \text{ cm}$$

$$V_{fio p} := A_p \cdot L_{fio p} \quad V_{fio p} = 0,1631 \text{ cm}^3$$

$$V_{fios1} := A_{s1} \cdot L_{fios1} \quad V_{fios1} = 0,0308 \text{ cm}^3$$

$$P_{esofio} := 8,96 \cdot (V_{fio p} + V_{fios1}) \quad P_{esofio} = 1,7375 \text{ g}$$

$$K_1 := 4 \cdot 10^{-5} \quad K_2 := 4 \cdot 10^{-10}$$

$$P_{nuc} := (\Delta B)^{2,4} \cdot (K_1 \cdot F_{con} + K_2 \cdot F_{con}^2) \cdot V_e \quad P_{nuc} = 0,5753 \text{ W}$$

$R_{pri} = N_p \cdot \frac{\rho_p}{N_{fiosp}} \cdot l_t$	$R_{pri} = 0,573$	Ω
$P_{cpri} = R_{pri} \cdot I_{pef}^2$	$P_{cpri} = 0,0017$	W
$R_{s1} = N_{s1} \cdot \frac{\rho_{s1}}{N_{fiosS1}} \cdot l_t$	$R_{s1} = 0,027$	Ω
$P_{cs1} = R_{s1} \cdot I_{s1ef}^2$	$P_{cs1} = 0,0139$	W
$P_{t1} = P_{cpri} + P_{cs1} + P_{nuc}$	$P_{t1} = 0,5909$	W
$R_t = 23 \cdot (\Delta_e \cdot \Delta_w)^{-0,37}$	$R_t = 58,2573$	$^{\circ} C/W$
$\Delta t = P_{t1} \cdot R_t$	$\Delta t = 34,4254$	graus

O fator de ocupação do núcleo E-20/10 ficou em 37,49%, ou seja, bastante baixo, mostrando que estamos utilizando um núcleo muito grande. Idealmente seria interessante utilizar um fator de ocupação próximo de 100%.

Cálculo do fator de ocupação:		
$\Delta_{wn} := \frac{N_p \cdot S_p \cdot N_{fiosp} + N_{s1} \cdot S_{s1} \cdot N_{fiosS1}}{0,7}$	$\Delta_{wn} = 0,0975$	cm^2
$K := \frac{\Delta_{wn}}{\Delta_w}$	$K = 0,3749$	

O cálculo dos capacitores de saída apontam para um capacitor de 24 μF e RSE de 0,0318 Ω , mas para trabalharmos com uma certa folga, vamos utilizar um capacitor de 1000 μF por 35V.

Determinação dos capacitores da saída:		
$T_o = \frac{L_{ms1} \cdot I_{s1}}{V_{o1} + V_d}$	$T_o = 6,3934 \cdot 10^{-6}$	s
$\Delta V_{o1} = V_{o1} \cdot \Delta V_{co}$	$\Delta V_{o1} = 0,051$	V
$C_{o1} = \frac{I_{o1} \cdot D_{max}}{F_{con} \cdot \Delta V_{o1}}$	$C_{o1} = 2,4133 \cdot 10^{-5}$	F
$RSE1 = \frac{\Delta V_{o1}}{I_{s1}}$	$RSE1 = 0,0318$	Ω
Escolhe-se um capacitor de: 1000 μF x 35 V		

A corrente de pico na chave ficou abaixo do limite do componente FSQ500L, assim como a tensão máxima.

Verificação dos limites de operação do interruptor:

$$I_{ch} = I_{pri} \quad I_{ch} = 0,1512 \text{ A} \quad \text{Corrente de pico na chave.}$$

O limite dado pela folha de dados do FSQ500L é $I_{lim} = 0,28 \text{ A}$.

$$I_{chef} = \frac{V_{inmin}}{F_{con} \cdot L_{mp}} \sqrt{\frac{D_{max}^3}{3}} \quad I_{chef} = 0,0396 \text{ A} \quad \text{Corrente eficaz na chave.}$$

$$I_{chmd} = \frac{V_{inmin} \cdot D_{max}^2}{2 \cdot F_{con} \cdot L_{mp}} \quad I_{chmd} = 0,0217 \text{ A} \quad \text{Corrente média na chave.}$$

$$V_{chmax} = \sqrt{2} \cdot V_{acmax} + (V_{o1} + V_d) \cdot \frac{N_p}{N_{s1}} \quad V_{chmax} = 439,3559 \text{ V} \quad \text{Tensão máxima sobre o interruptor.}$$

O limite dado pelo datasheet do FSQ500L é $V_{dsmax} = 700 \text{ V}$.

O cálculo de dissipação térmica do interruptor apresentou $R_{ja} > R_{jmax}$, indicando a necessidade de utilização de dissipador ou ventilação forçada.

$$T_a = 45 \text{ } ^\circ\text{C} \quad R_{Dson} = 35 \text{ } \Omega \quad T_r = 100 \cdot 10^{-9} \text{ s} \quad \# T_a: \text{ Temperatura Ambiente}$$

$$R_{ja} = 160 \frac{\text{C}}{\text{W}} \quad T_j = 150 \text{ } ^\circ\text{C} \quad T_f = 50 \cdot 10^{-9} \text{ s} \quad \# T_j: \text{ Temperatura da Junção}$$

$$P_{scond} = R_{Dson} \cdot I_{chef}^2 \quad P_{scond} = 0,0549 \text{ W}$$

$$P_{scom} = \frac{F_{con}}{2} \cdot (T_r + T_f) \cdot I_{ch} \cdot V_{chmax} \quad P_{scom} = 0,6475 \text{ W}$$

$$P_{stot} = P_{scond} + P_{scom} \quad P_{stot} = 0,7024 \text{ W}$$

$$R_{jamax} = \frac{T_j - T_a}{P_{stot}} \quad R_{jamax} = 149,4834 \frac{\text{C}}{\text{W}} \quad \text{Resistência térmica máxima permitida entre junção e ambiente.}$$

Precisa dissipador ou ventilação forçada, pois $R_{ja} > R_{jamax}$.

Já os cálculos da dissipação térmica no diodo mostram que não será necessário dissipador.

Determinação do diodo1:		
$Id1 = Is1$	$Id1 = 1,6023 \text{ A}$	Corrente de pico no diodo.
$Id1ef = Is1 \cdot \sqrt{\frac{T_o}{3 \cdot T_s}}$	$Id1ef = 0,8434 \text{ A}$	Corrente eficaz no diodo.
$Id1md = \frac{Is1 \cdot T_o}{2 \cdot T_s}$	$Id1md = 0,6659 \text{ A}$	Corrente média no diodo.
$Vd1max = Vo1 + \sqrt{2} \cdot Vacmax \cdot \frac{Ns1}{Np}$	$Vd1max = 40,4487 \text{ V}$	Tensão máxima sobre o diodo.
Escolhe-se o diodo SB260 de 2 A x 60 V. Será usado o 1N4936 por disponibilidade no laboratório.		
$Rja = 50 \frac{C}{W}$	$Tj = 150 C$	$Vf = 1,2 \text{ V}$
$Pd1 = Id1md \cdot Vf$	$Pd1 = 0,799 \text{ W}$	
$Rjmax = \frac{Tj - Ta}{Pd1}$	$Rjmax = 131,4064 \frac{C}{W}$	Resistência térmica máxima permitida entre junção e ambiente.
Não precisa dissipador ou ventilação forçada, pois $Rja < Rjmax$.		

Utilizando a metodologia da nota de aplicação da Fairchild, encontramos um valor de 44,3 K Ω para o resistor Rsn do grameador. Porém para reduzir a potência perdida no resistor, vamos aumentar o seu valor para 82 K Ω , e assim ficando dentro da faixa recomendada pelo fabricante.

O valor do capacitor do grameador (Csn) ficou em 1,8 nF por 630 V.

Grameador, metodologia Fairchild (nota de aplicação AN-6075):		
$Ld = 150 \cdot 10^{-6}$	H	Indutância de dispersão medida no transformador.
$Vmlmax = 450$	V	Tensão máxima permitida sobre a chave.
$Ipri = 0,1512$	A	
$n \cdot Vo1 \cdot 2 = 108,12$	V	Tensão referida ao primário quando o interruptor está bloqueado X 2
$Vsn = 130$	V	Tensão no capacitor do snubber.
$Rsn = \frac{Vsn^2}{\frac{1}{2} \cdot Ld \cdot Ipri^2 \cdot Fcon \cdot \frac{Vsn}{Vsn - n \cdot Vo1}}$	$Rsn = 44313,3486$	Ω
$Rsn = 82000$	Ω	# Valor recomendado deve ficar entre 47K a 200K
$Psn = \frac{Vsn^2}{Rsn}$	$Psn = 0,2061$	W
Então pode-se usar um resistor de 82k x 1 W.		
$Csn = \frac{Vsn}{\frac{5}{100} \cdot Vsn \cdot Rsn \cdot Fcon}$	$Csn = 1,8762 \cdot 10^{-9}$	F
Então pode-se usar um capacitor de 1,8 nF x 630 V.		

Mostramos a seguir que o rendimento total da fonte ficou em 54,56%, um tanto baixo, mas levando em conta as limitações que tivemos na aquisição/especificação dos componentes, ficamos satisfeitos com o resultado.

Rendimento da estrutura de potência:		
$P_{dret} = 0,0869$	W	
$P_{rserie} = 0,0417$	W	
$P_{t1} = 0,5909$	W	
$P_{stot} = 0,7024$	W	
$P_{d1} = 0,799$	W	
$P_{sn} = 0,2061$	W	
$P_{fonte} := P_{dret} + P_{rserie} + P_{t1} + P_{stot} + P_{d1} + P_{sn} + P_{out}$		
$P_{fonte} = 5,3414$	W	
$\eta_{fonte} := \frac{P_{out}}{P_{fonte}} \cdot 100$		$\eta_{fonte} = 54,5608$

2.5 Simulação em Malha Fechada

Partimos agora para a próxima etapa, que foi simular no software PSIM, o projeto da fonte Flyback com utilização do componente FSQ500L em controle de malha fechada. Na figura abaixo, podemos observar o diagrama esquemático da fonte.

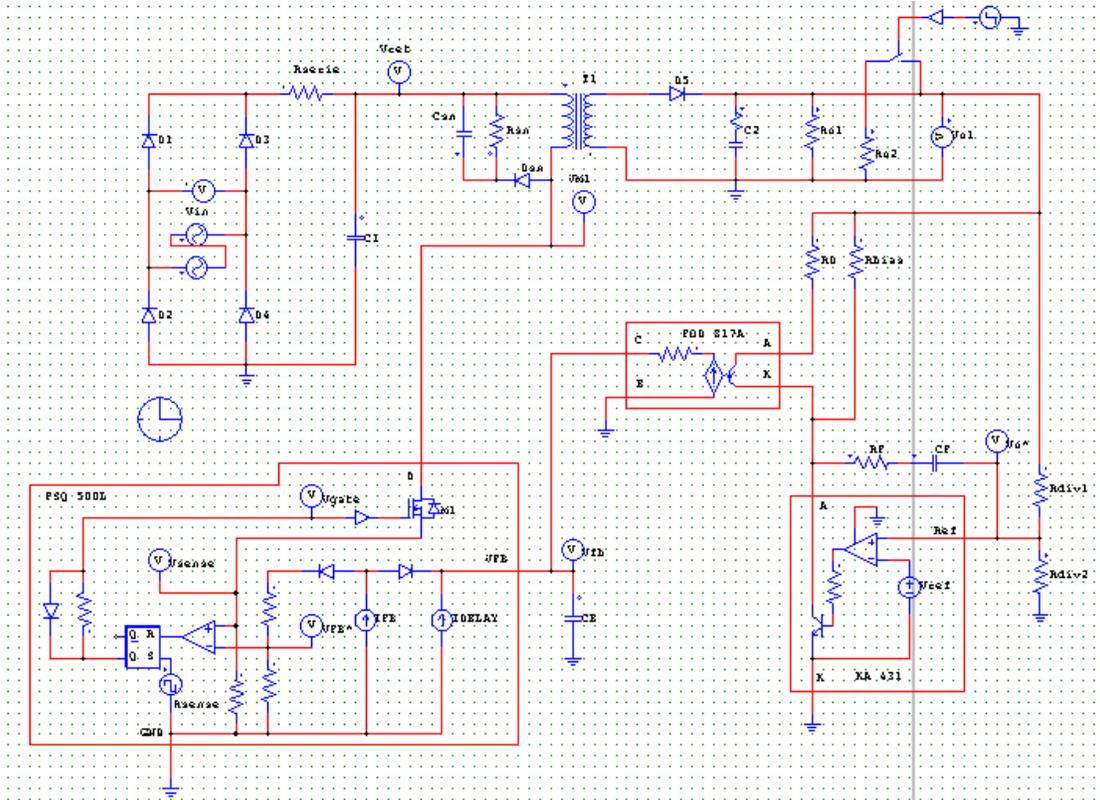


FIGURA 13 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA FONTE CHAVEADA EM MALHA FECHADA

A seguir vamos mostrar as formas de onda do circuito para várias simulações de tensão de entrada e carga.

- a) Entrada mínima (120 Vpp) e carga máxima (12,75 Ω).

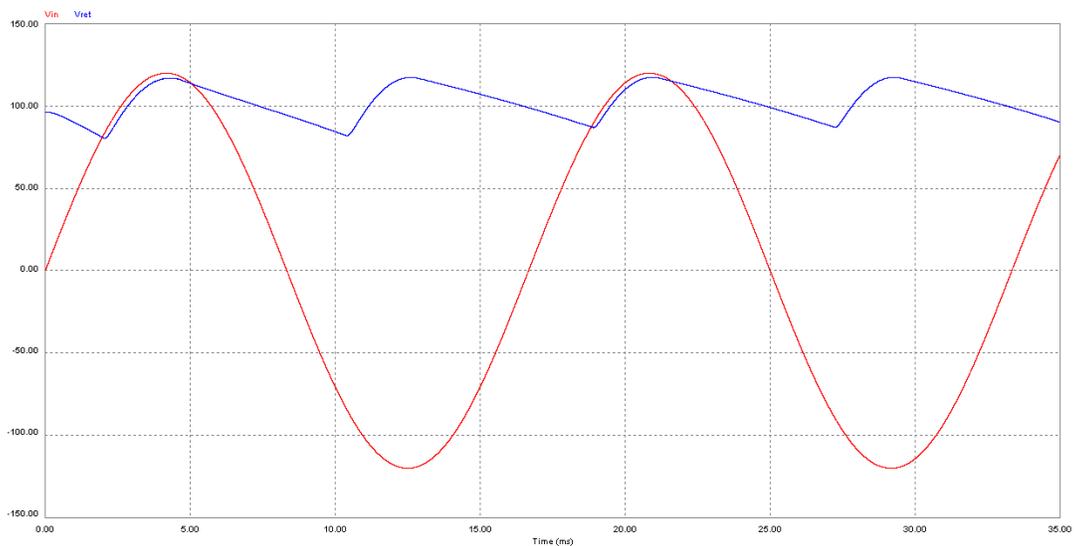


FIGURA 14 – Vin (VERMELHO) E Vret (AZUL)

Podemos verificar certa ondulação na saída do retificar, porém a saída da fonte fica bastante estável em torno de 5,2 V.

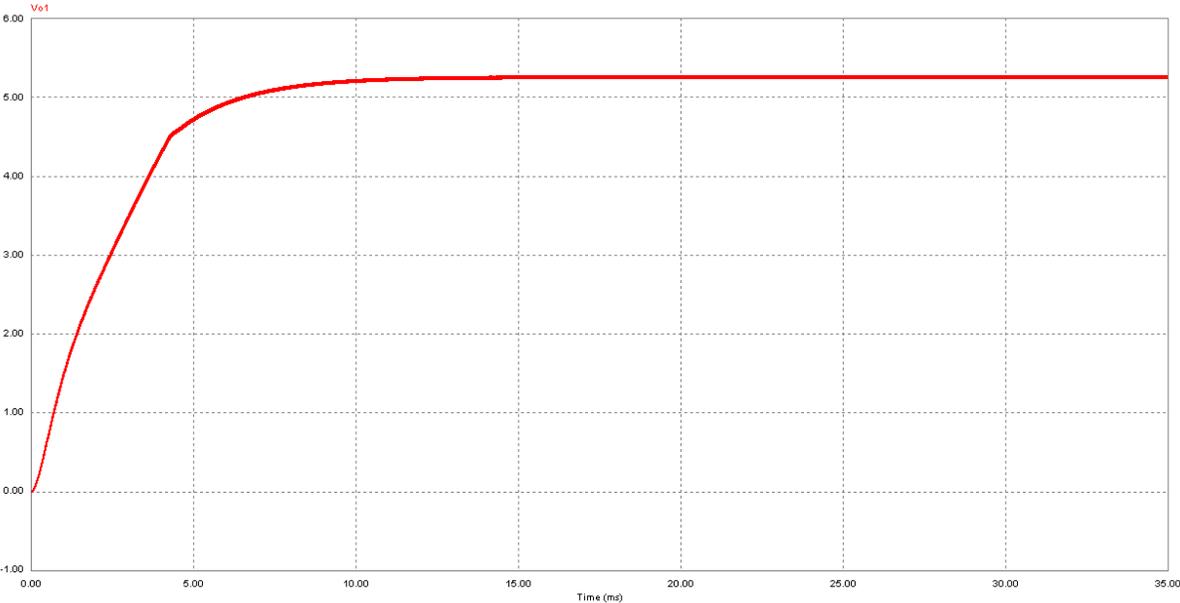


FIGURA 15 – SAÍDA DA FONTE CHAVEADA

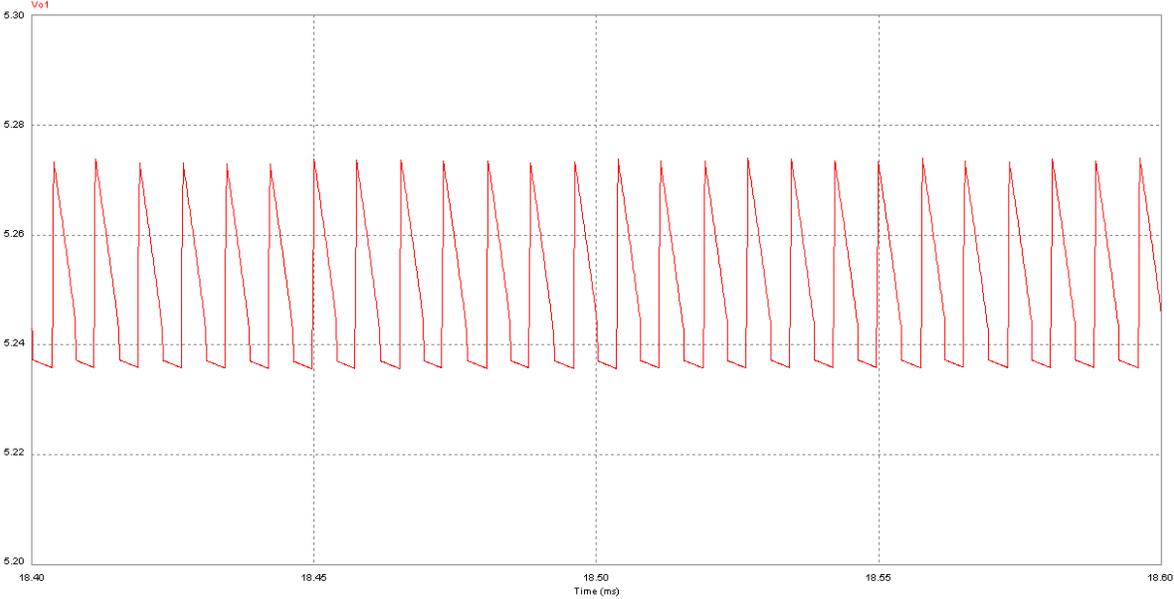


FIGURA 16 – VARIACÃO NA TENSÃO DE SAÍDA (ZOOM)

Já na próxima figura, é traçado a forma de onda da tensão em cima do interruptor.

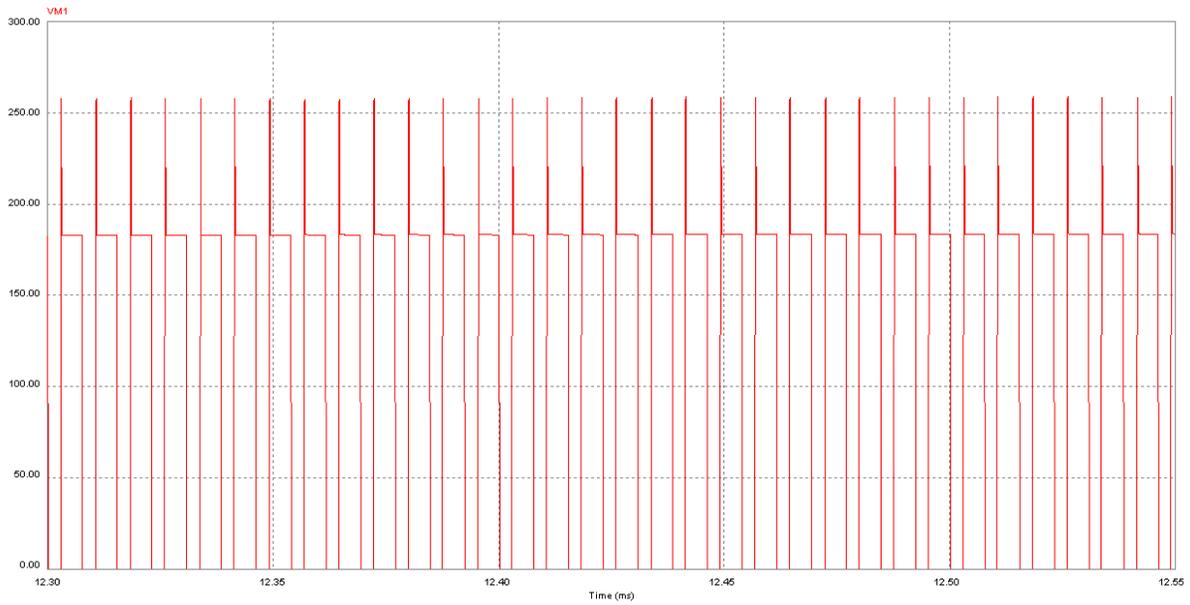


FIGURA 17 – TENSÃO NO INTERRUPTOR (ZOOM)

b) Entrada de 311 Vpp e carga máxima (12,75 Ω).

Nesta configuração, com tensão de entrada maior, verificamos uma ondulação menor na saída do retificador.

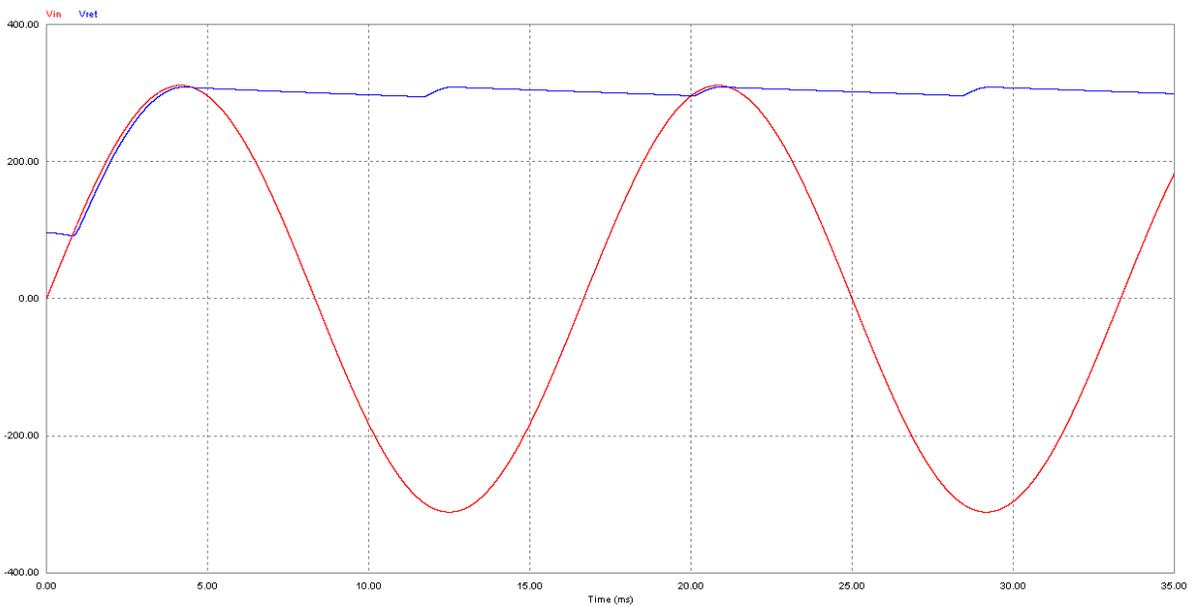


FIGURA 18 – Vin (VERMELHO) E Vret (AZUL)

A tensão de saída se mantém bastante estável em torno dos 5,22 V.

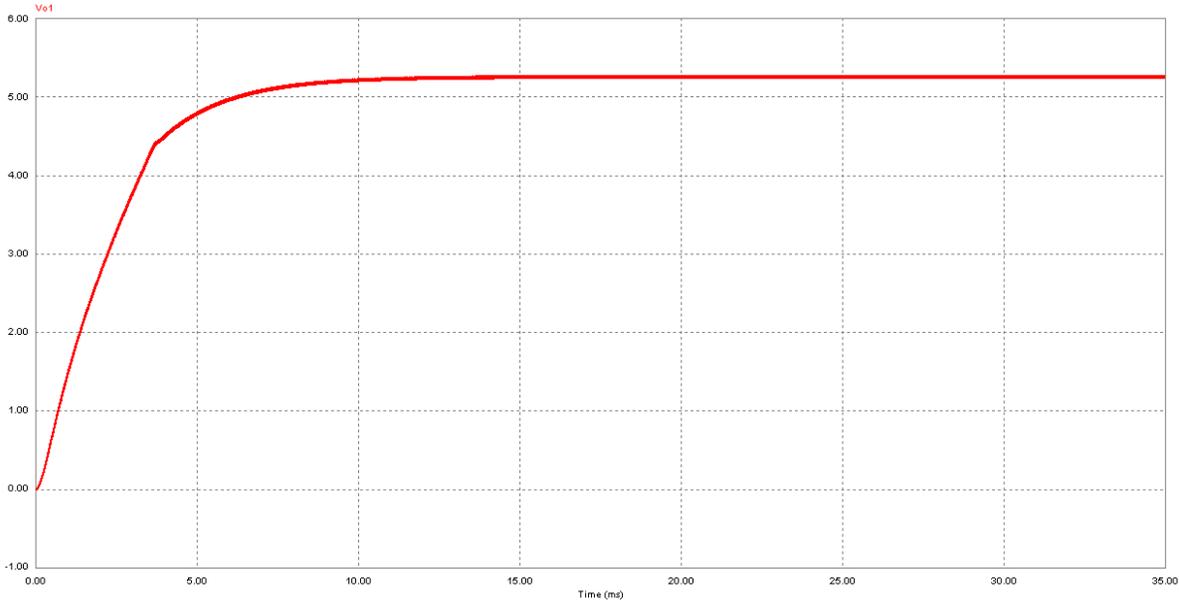


FIGURA 19 – SAÍDA DA FONTE CHAVEADA

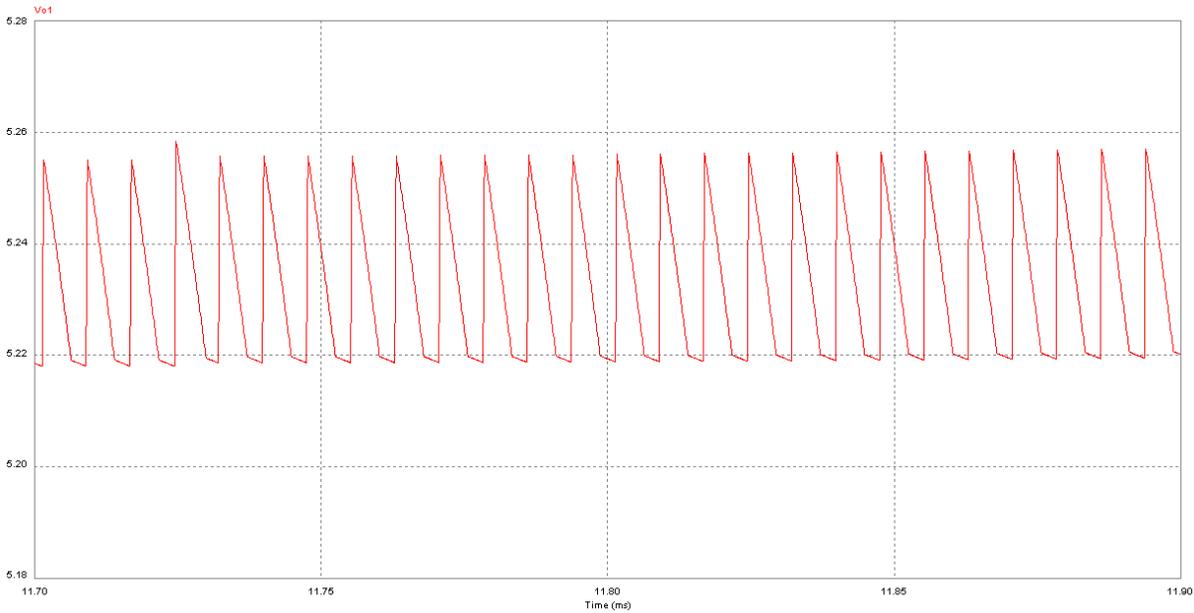


FIGURA 20 – VARIACÃO NA TENSÃO DE SAÍDA (ZOOM)

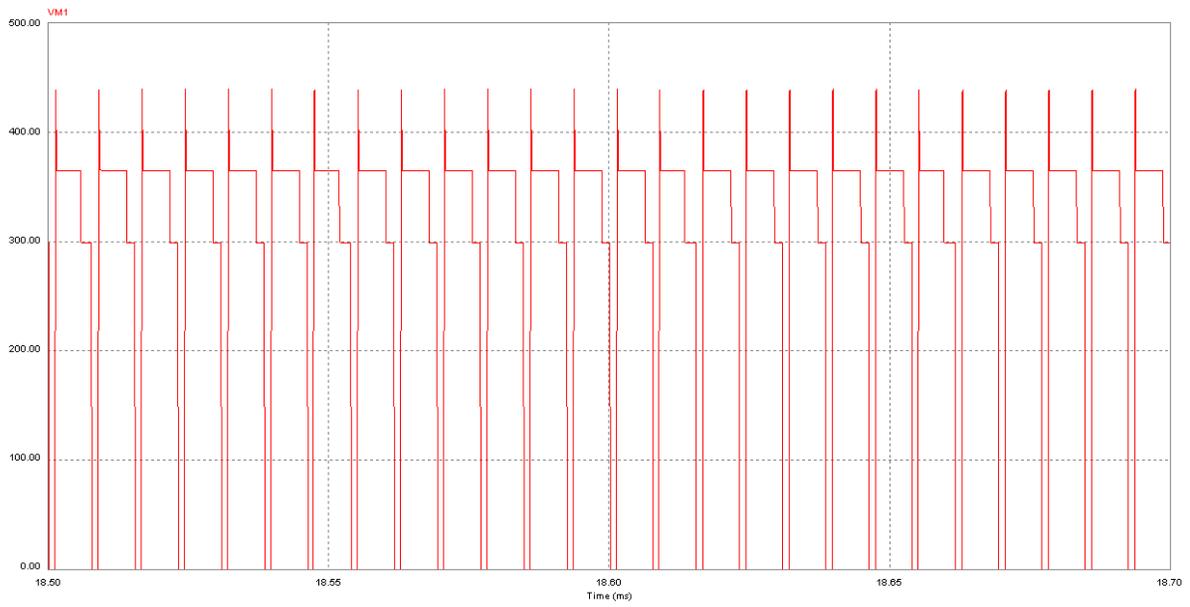


FIGURA 21 – TENSÃO NO INTERRUPTOR (ZOOM)

c) Entrada mínima (120Vpp) e carga de 1K Ω .

Com o aumento do resistor de carga, ou seja, diminuição da carga da fonte; a ondulação do retificador tende a diminuir, pois o consumo da corrente é menor, descarregando mais devagar o capacitor de filtragem.

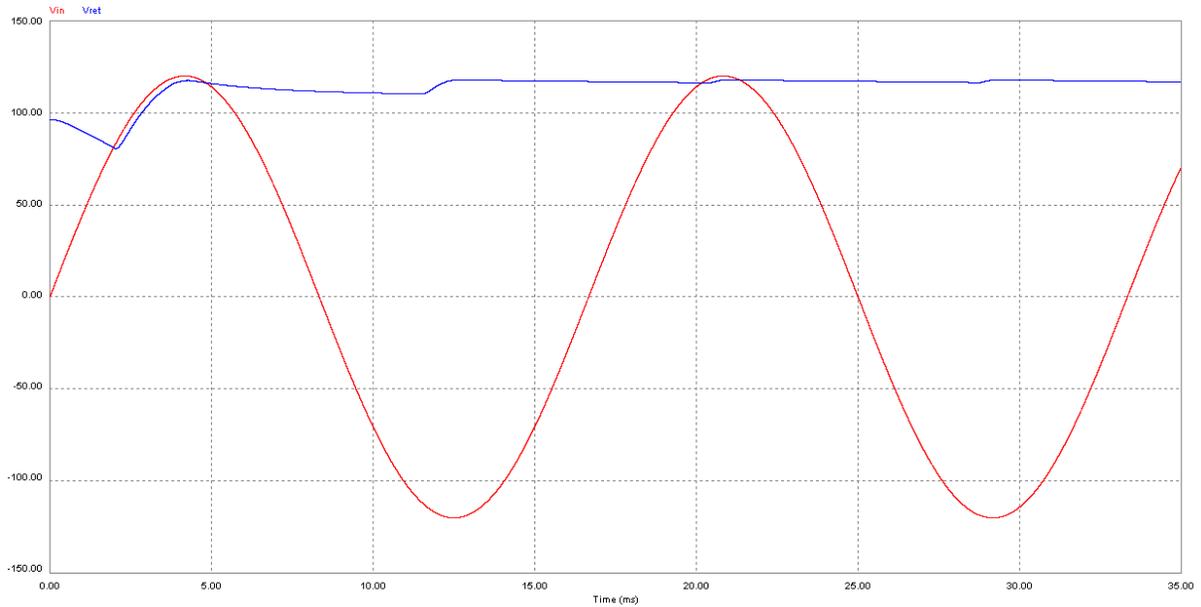


FIGURA 22 – Vin (VERMELHO) E Vret (AZUL)

O mesmo efeito de diminuição da corrente de carga, faz com que a tensão de saída fique mais estável, podendo ser melhor observada na figura em zoom.

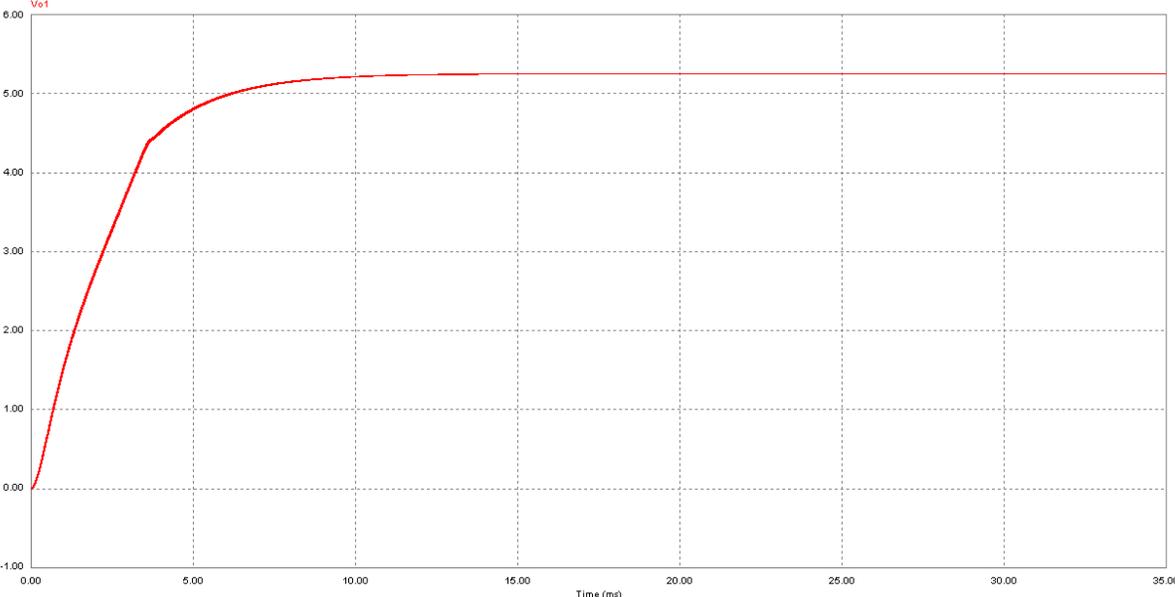


FIGURA 23 – SAÍDA DA FONTE CHAVEADA

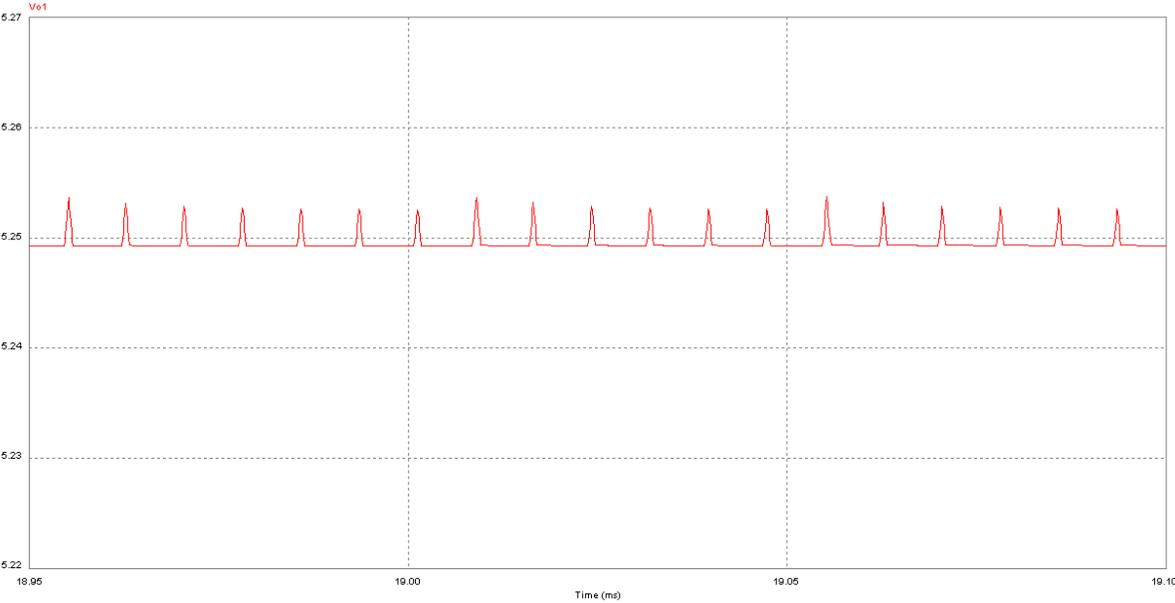


FIGURA 24 – VARIAÇÃO NA TENSÃO DE SAÍDA (ZOOM)

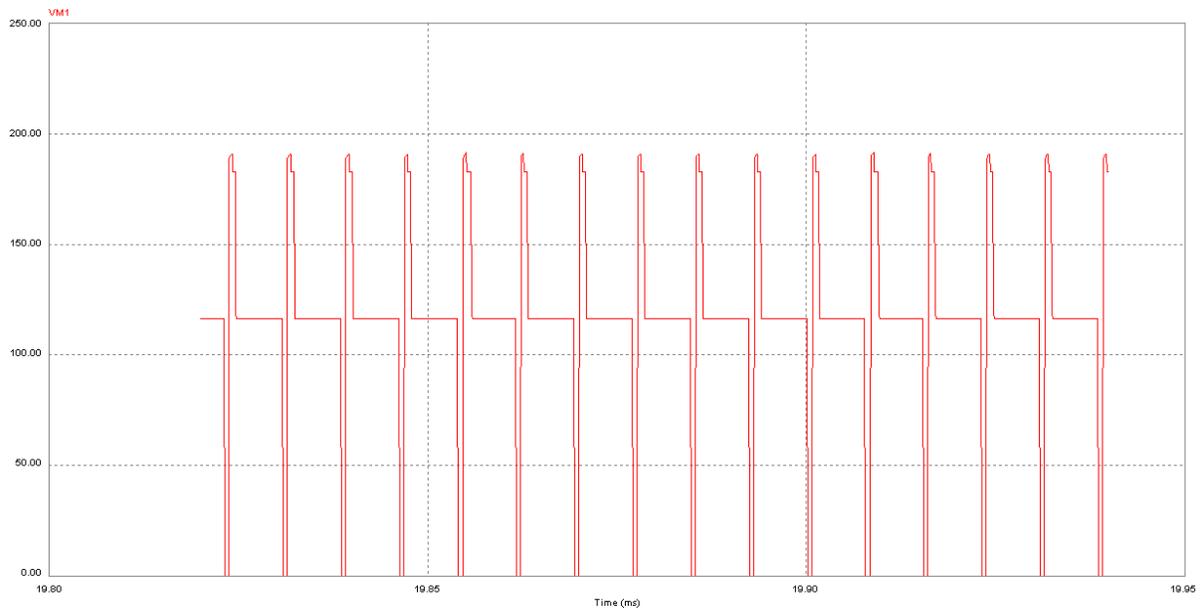


FIGURA 25 – TENSÃO NO INTERRUPTOR (ZOOM)

d) Entrada de 311Vpp e carga de 1KΩ.

Com o aumento da tensão de saída e diminuição da carga da fonte, fazemos com que a ondulação da tensão de saída do retificador praticamente desapareça.

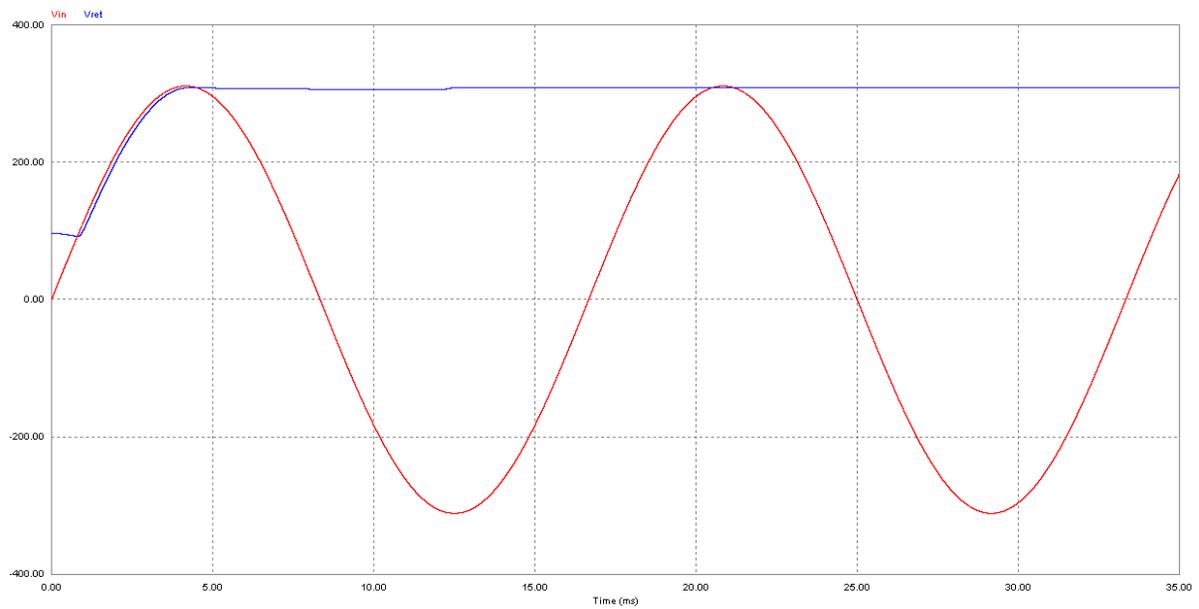


FIGURA 26 – Vin (VERMELHO) E Vret (AZUL)

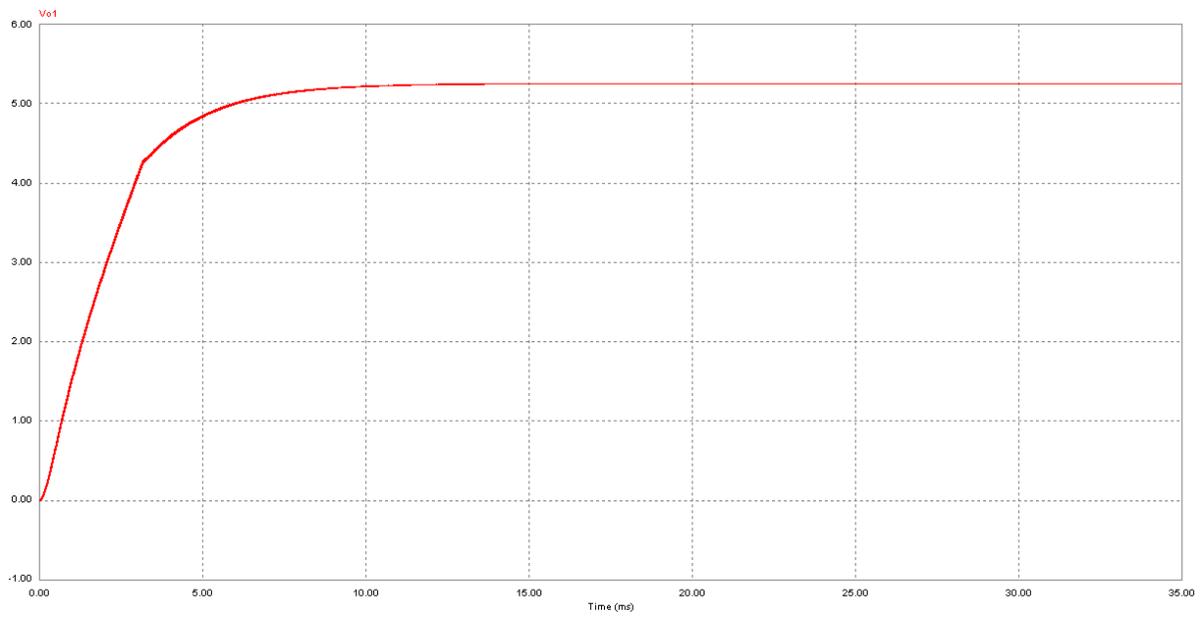


FIGURA 27 – SAÍDA DA FONTE CHAVEADA

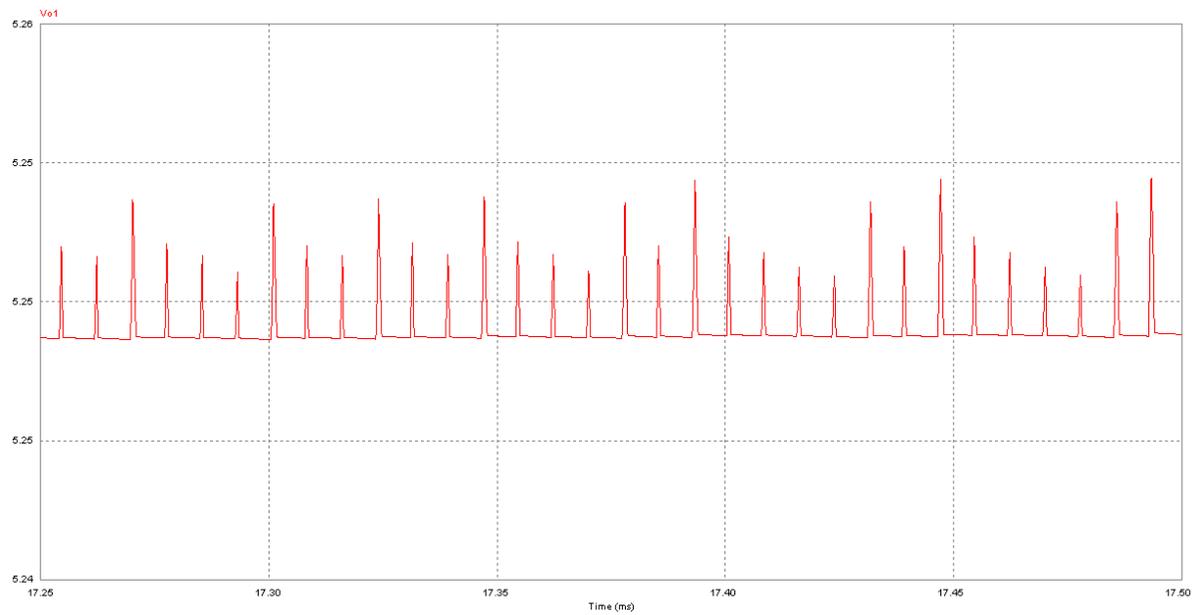


FIGURA 28 – VARIAÇÃO NA TENSÃO DE SAÍDA (ZOOM)

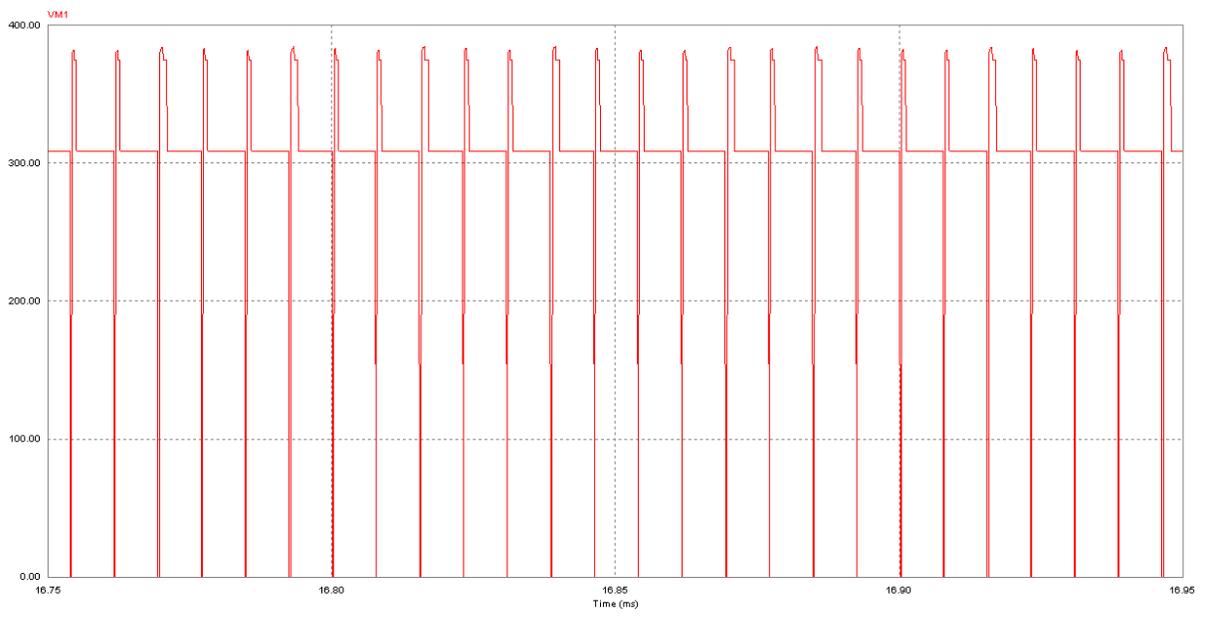


FIGURA 29 – TENSÃO NO INTERRUPTOR (ZOOM)

3. Montagem da Fonte

Podemos observar as partes componentes do diagrama esquemático subdivididas por funcionalidades na figura 30.

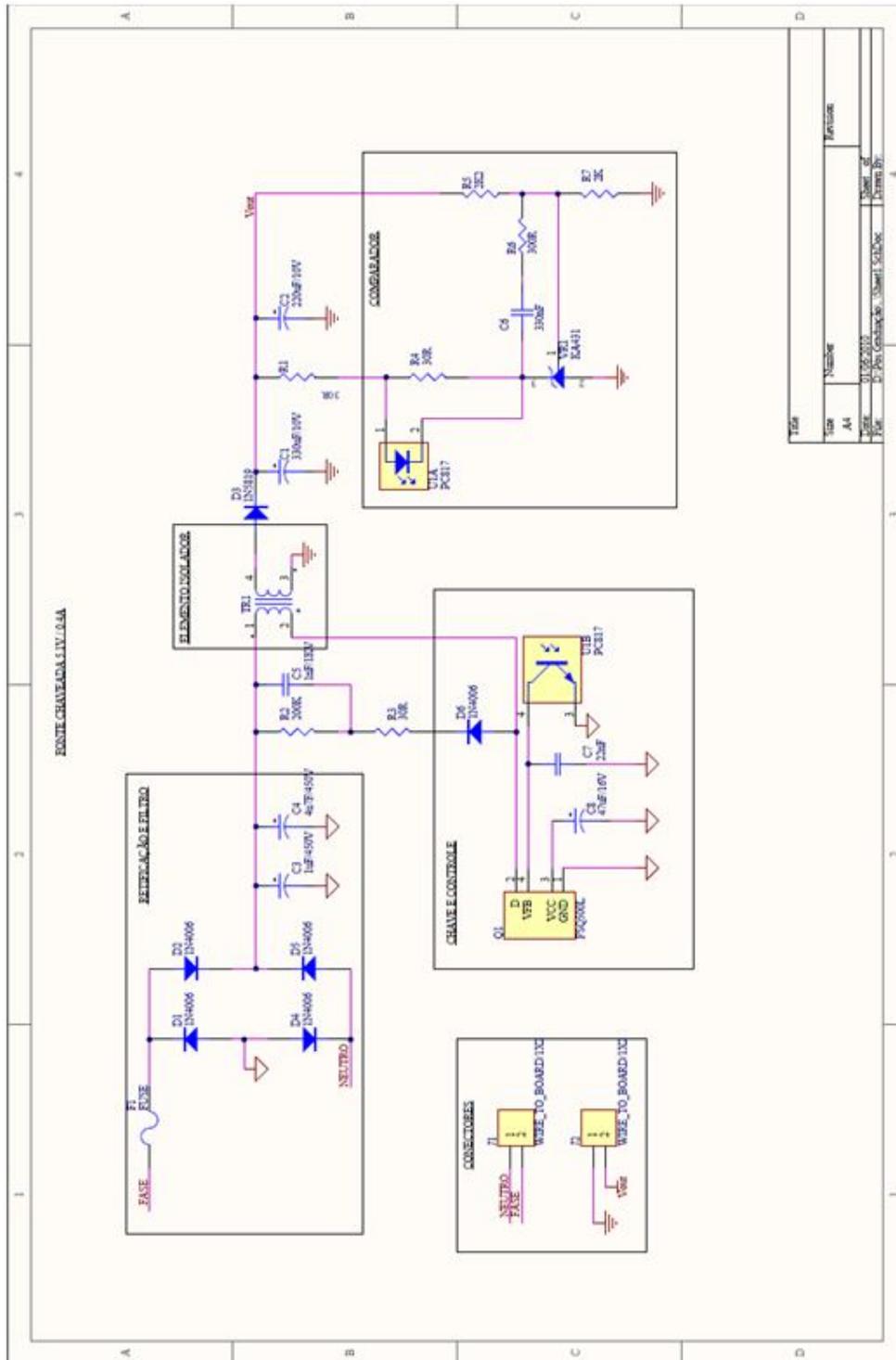


FIGURA 30 – ESQUEMÁTICO DA MONTAGEM

O layout da placa foi implementado seguindo uma sugestão de implementação do fabricante *Power Integration* para o componente TNY263-268, por ser uma solução semelhante.

Os circuitos primário e secundário são isolados galvanicamente com o uso de um transformador de alta frequência e um opto isolador na realimentação, pois possuem malhas de sinal negativo diferentes, fazendo-se necessária a separação física dessas malhas (SGND e GND).

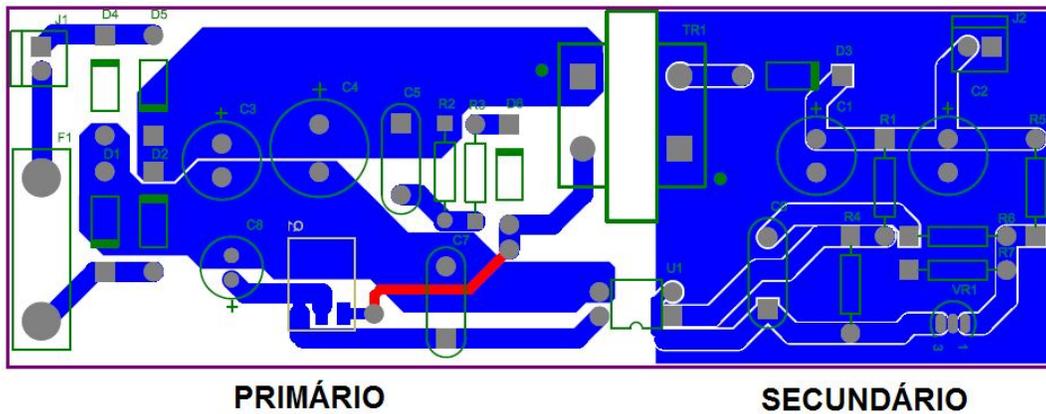


FIGURA 31 – LAYOUT

O transformador de alta frequência foi montado utilizando os dados de projeto comentado acima (*SMath*), cujo número de voltas do enrolamento primário é 53 e do secundário 5. Ainda de acordo com o projeto, fez-se necessário o ajuste da indutância do transformador através do afastamento ou aproximação das partes componentes do núcleo.

Verificou-se que não era necessário o uso de entreferro, pois somente o ajuste com aplicação de maior pressão na fita de fixação que circunda o núcleo foi suficiente para atingir o valor de 0,27mH projetado.

Durante o enrolamento das bobinas foi importante atentar para o sentido do enrolamento, seguindo um padrão para que se tenha o resultado esperado, com as tensões nas polaridades corretas.

A seguir apresentamos as vistas; superior e inferior da fonte montada.



FIGURA 32 – VISTA SUPERIOR DA MONTAGEM

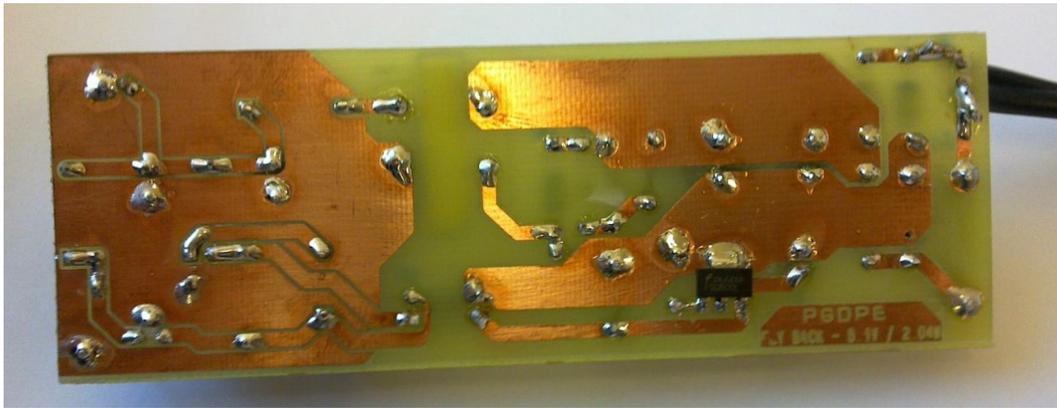


FIGURA 33 – VISTA INFERIOR DA MONTAGEM

Após a montagem e verificação da placa, iniciou-se o processo de testes e medições do funcionamento do circuito. O primeiro passo foi energização da fonte pela rede elétrica 220V, sem carga (a vazio), e a medição da tensão de saída com um multímetro. O resultado foi a verificação de uma tensão de 5.2V DC.

Em seguida, inseriu-se um osciloscópio no processo para a verificação das formas de onda do circuito, ainda a vazio. O registro da tela do osciloscópio é mostrado na figura 34.

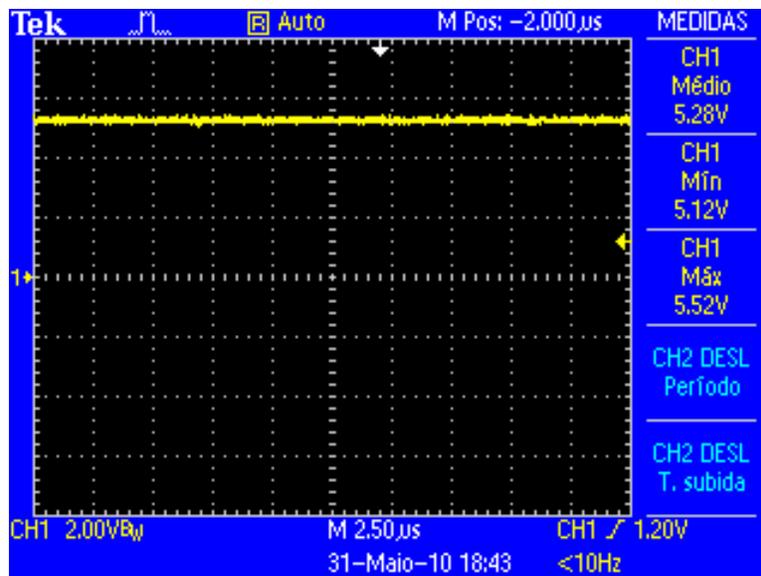


FIGURA 34 – TENSÃO DE SAÍDA A VAZIO

Observa-se uma variação entre o valor máximo (5.52VDC) e o valor mínimo (5.12VDC), muito parecido com as formas de onda mostradas nas simulações.

Na sequência dos testes foi inserida uma carga de 18Ω que se aproxima da carga máxima suportada pelo circuito. Desta forma, observou-se a forma de onda da Figura 35, onde praticamente não há variação de valores de tensão se comparado com circuito a vazio. A corrente medida através de um amperímetro foi de 0.20A.

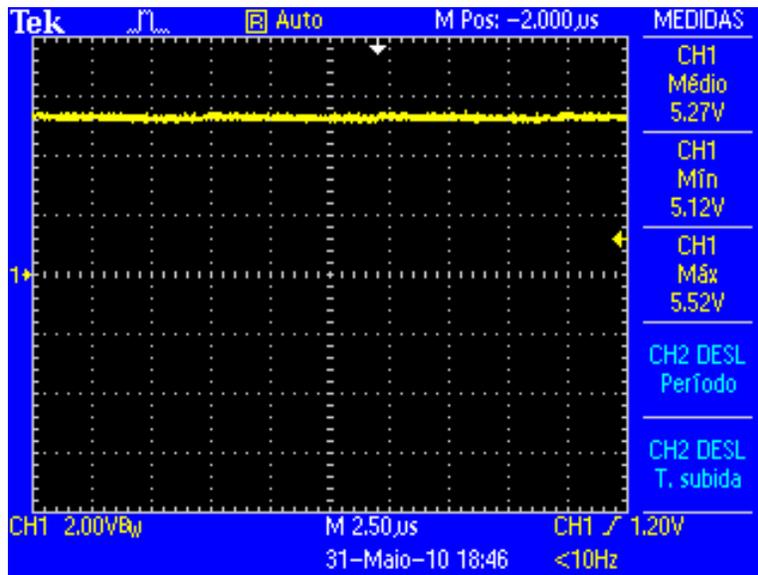


FIGURA 35 – TENSÃO DE SAÍDA COM CARGA DE 18Ω

Por fim, aplicou-se uma carga de 15Ω por não haver valor de resistência de 12,75Ω (carga máxima). Com essa carga notou-se uma pequena variação no valor mínimo da tensão de saída obtida anteriormente. Nesta configuração a corrente medida foi de 0.34A.

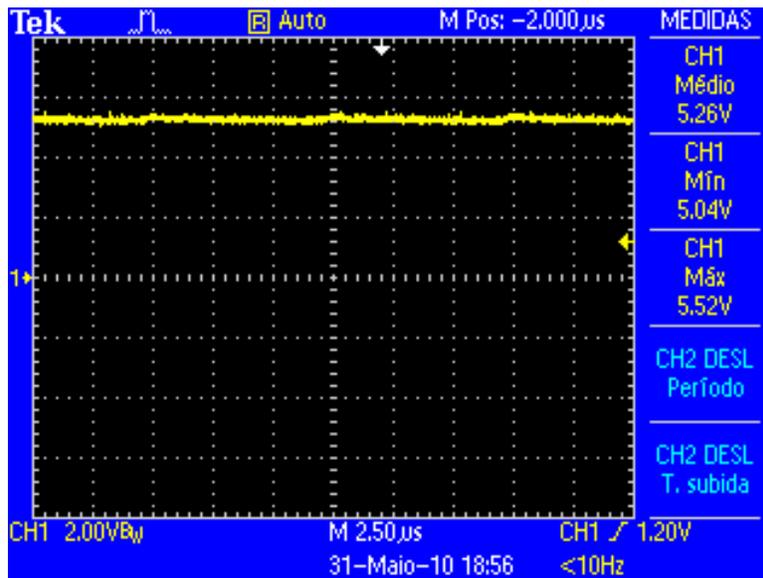


FIGURA 36 – TENSÃO DE SAÍDA COM CARGA DE 15Ω

A última aquisição de forma de onda realizada foi a referência de saída, que é responsável pelo acionamento do regulador shunt (KA431), que podemos observar na figura 37.

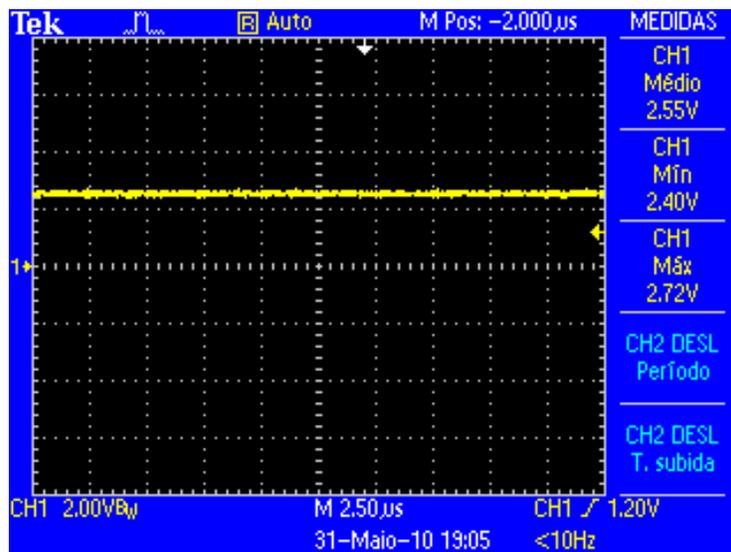


FIGURA 37 – REFERENCIA DE SAÍDA (KA431)

As formas de onda do chaveamento no componente FSQ500L e de referência não puderam ser obtidas devido a dificuldade encontrada na medição das mesmas.

4. Conclusão

Após os cálculos, simulações, montagem e testes de funcionamento podemos concluir que tanto o projeto quanto as simulações no PSIM, se mostraram bastantes próximas da realidade, pois conseguimos comprovar o correto funcionamento da fonte na prática e dentro das especificações de entrada.

Um refinamento para o projeto seria um melhor aproveitamento do núcleo do transformador, assim como alguns ajustes nos valores de componentes para aumentar a eficiência da fonte.

Como ferramenta de estudo, este projeto foi muito enriquecedor, pois nos deu subsídios para projetar outras fontes chaveadas de tamanhos e características diversas.

5. Referências Bibliográficas

AN-6075. Compact Green-Mode Adapter Using FSQ500L for Low Cost. FAIRCHILD Semiconductor. 2008. Disponível em <<http://www.fairchildsemi.tv/an/AN/AN-6075.pdf>>. Acesso: 26 maio 2010 às 22:15.

FSQ500L. Compact, Green Mode, Fairchild Power Switch. FAIRCHILD Semiconductor. 2009. Disponível em <<http://www.fairchildsemi.com/ds/FS/FSQ500L.pdf>>. Acesso 26 maio 2010 às 22:07.

BARBI, Ivo; MARTINS, Denizar Cruz. Eletrônica de potência: conversores CC-CC básicos não isolados. Florianópolis: Ed. dos Autores, 2000. vii, 377 p. ISBN 859010463X.