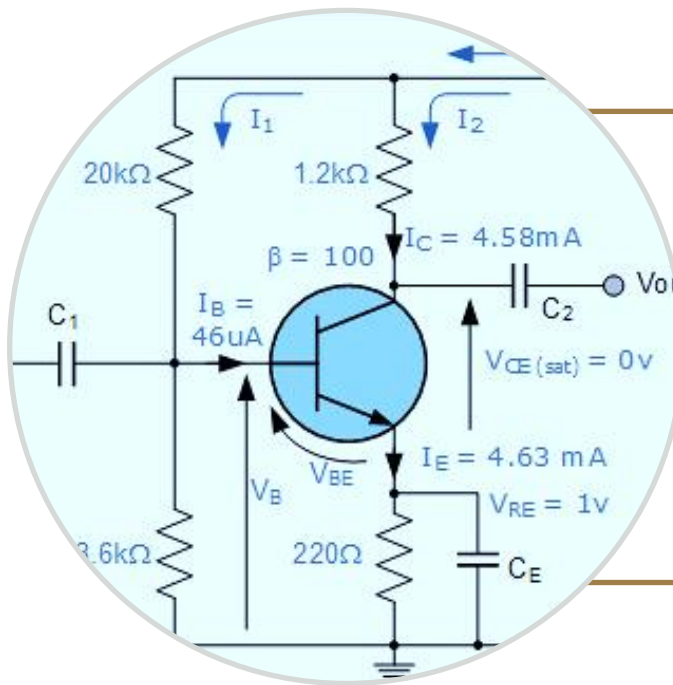


# ELETRÔNICA ANALÓGICA

## CEL099

Prof. Pedro S. Almeida  
pedro.almeida@ufjf.edu.br



# Circuitos de Aplicação de Diodos

# Conteúdo

- Circuitos Retificadores
- Retificador de Meia-Onda
- Retificador de Onda-Completa a Dois Diodos
- Retificador de Onda-Completa em Ponte
- O Retificador com Filtro Capacitivo
- Circuitos Limitadores
- Circuitos Grampeadores
- Circuitos Multiplicadores de Tensão

# Circuitos Retificadores

- Uma das mais importantes aplicações dos diodos.
- Usados para converter uma tensão CA (50 ou 60 Hz) em CC não regulada.
- Em conjunto com outros elementos e circuitos básicos pode constituir uma fonte de alimentação CC linear (*dc linear power supply*):

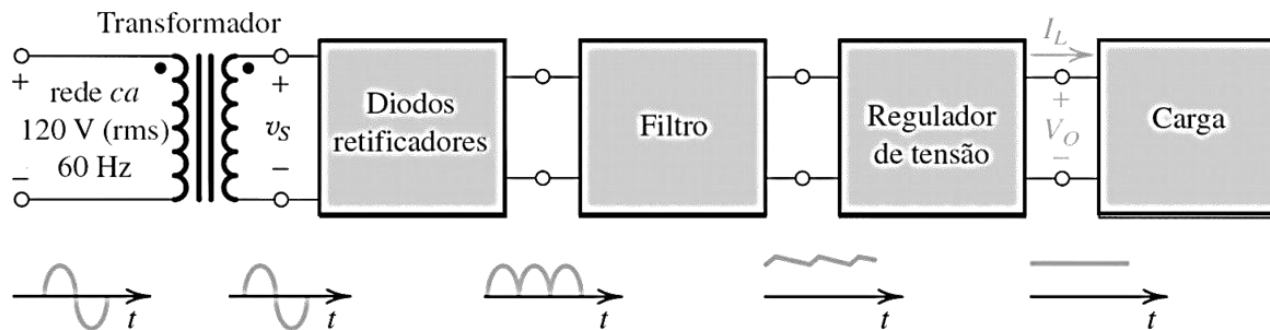
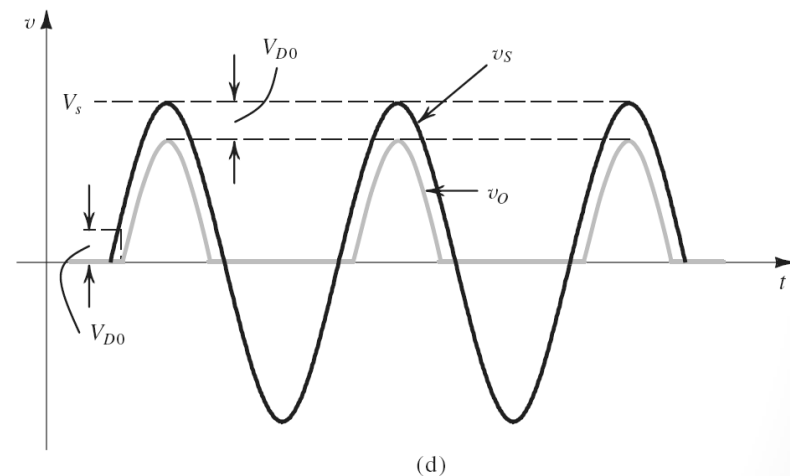
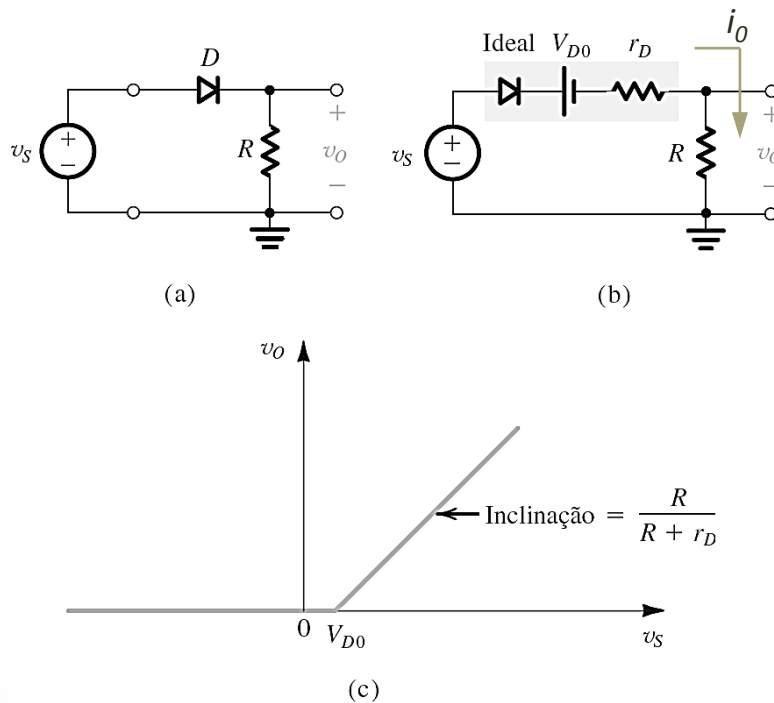


Figura 3.24 Diagrama de blocos de uma fonte de alimentação cc.

# O Retificador de Meia-Onda

- Se  $v_S > V_{D0}$ ,  $D$  conduz e  $i_O = v_S - V_{D0}/(r_D + R)$ . Se  $v_S < V_{D0}$ ,  $i_O = v_O = 0$ .
- Logo,  $v_O = [R/(R+r_D)]v_S - [R/(R+r_D)]V_{D0}$  (quando  $D$  conduz).
- Se  $r_D \ll R$ , então  $v_O \approx v_S - V_{D0}$ .



**Figura 3.25** (a) O retificador de meia onda. (b) Circuito equivalente do retificador de meia onda com o diodo substituído pelo modelo de segmentos lineares (bateria mais resistência). (c) Característica de transferência do circuito retificador. (d) Formas de onda de entrada e saída, supondo  $r_D \ll R$ .

# Retificador de Meia-Onda

- O diodo costuma ser especificado em função de quanto precisa suportar em termos de **corrente média** e **tensão inversa de pico** (PIV, do inglês, *peak inverse voltage*). Também é preciso avaliar a máxima corrente pulsante, máxima tensão pulsante e máxima potência.

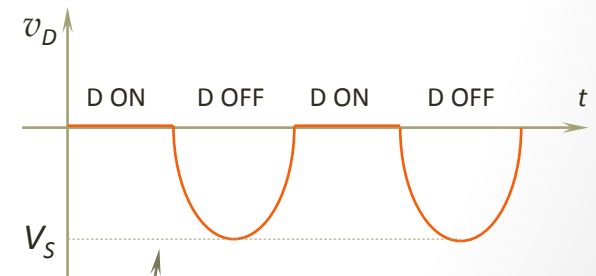
$$i_0(\text{média}) = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} \frac{V_s \text{sen}(\omega t) - V_{D0}}{R} d(\omega t) \cong \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{V_s \text{sen}(\omega t)}{R} d(\omega t) = \frac{V_s}{\pi R}$$

Sendo

$$v_s = V_s \text{sen}(\omega t) \quad e \quad \omega = 2\pi f$$

$$\alpha = \text{sen}^{-1}(V_{D0} / V_s)$$

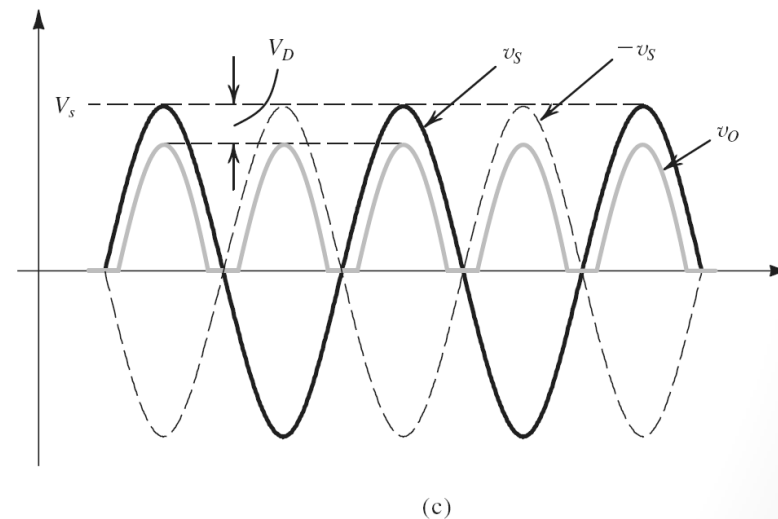
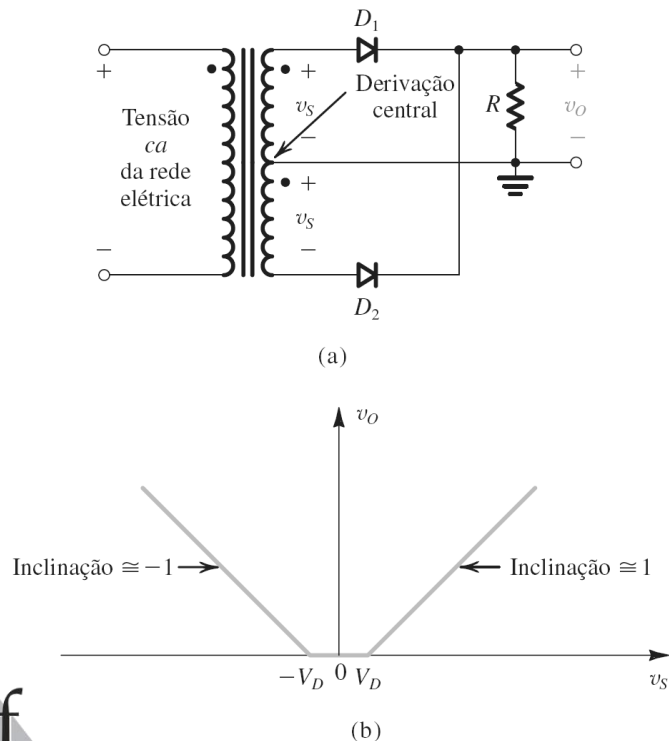
$$\beta = \pi - \alpha$$



PIV =  $V_s$  (tensão de pico do sinal alternado).

# O Retificador de Onda Completa a Dois Diodos

- O Circuito também é conhecido como retificador em antifase, devido ao posicionamento dos pontos em relação à derivação central, no secundário do transformador.
- Cada diodo conduz durante um dos semiciclos da rede elétrica, conforme seja a tensão positiva de seu secundário.



**Figura 3.26** Circuito retificador de onda completa utilizando um transformador com o enrolamento secundário com tomada central. (a) Circuito. (b) Característica de transferência supondo o modelo de queda de tensão constante para os diodos. (c) Formas de onda de entrada e saída.

# Retificador a Dois Diodos

$$i_0(\text{média}) = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\beta} \frac{V_s \text{sen}(\omega t) - V_{D0}}{R} d(\omega t) \cong \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{V_s \text{sen}(\omega t)}{R} d(\omega t) = \frac{2V_s}{\pi R}$$

*Sendo*

$$v_s = V_s \text{sen}(\omega t) \quad e \quad \omega = 2\pi f$$

$$\alpha = \text{sen}^{-1}(V_{D0} / V_s)$$

$$\beta = \pi - \alpha$$

PIV =  $2V_s$  (dobro da tensão do sinal alternado).



# O Retificador em Ponte

- Variação do retificador de onda completa que emprega quatro diodos.
- Também conhecido como retificador em ponte de Gräetz (devido a Leo Gräetz, físico alemão, 1856 - 1941).
- A PIV dos diodos é igual a  $V_s$ .

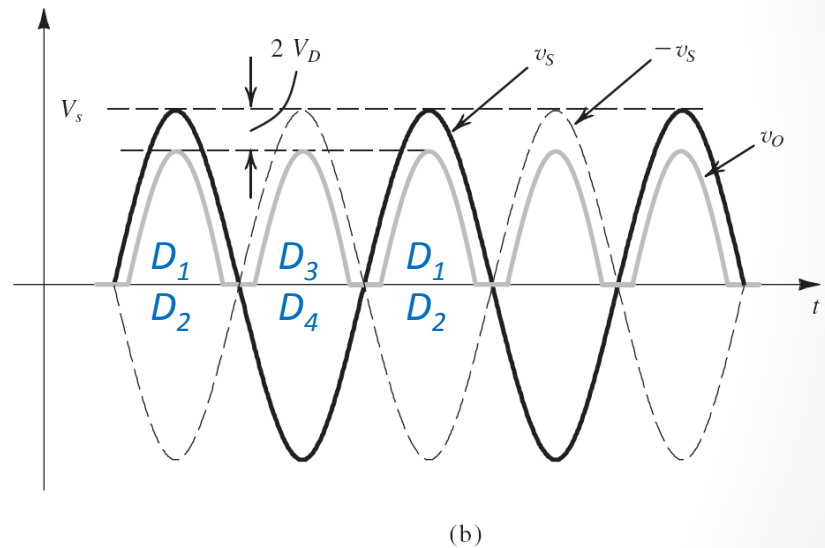
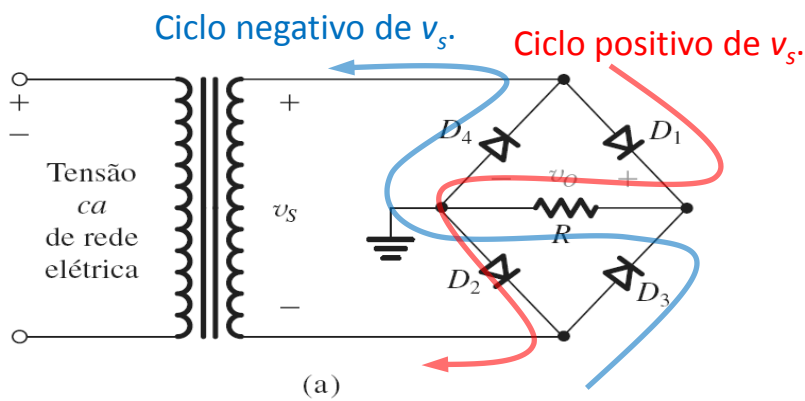
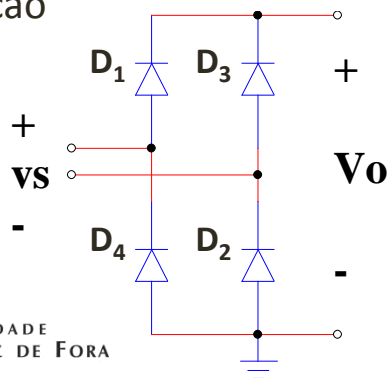


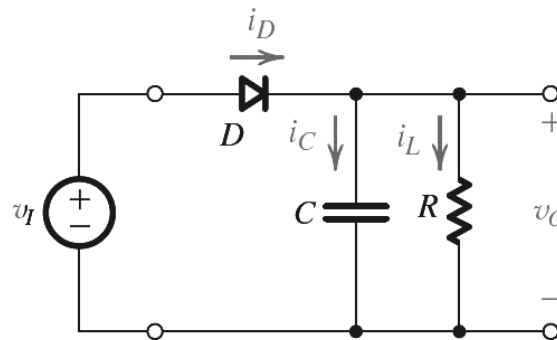
Figura 3.27 O retificador em ponte: (a) circuito e (b) formas de onda de entrada e de saída.

Representação alternativa:



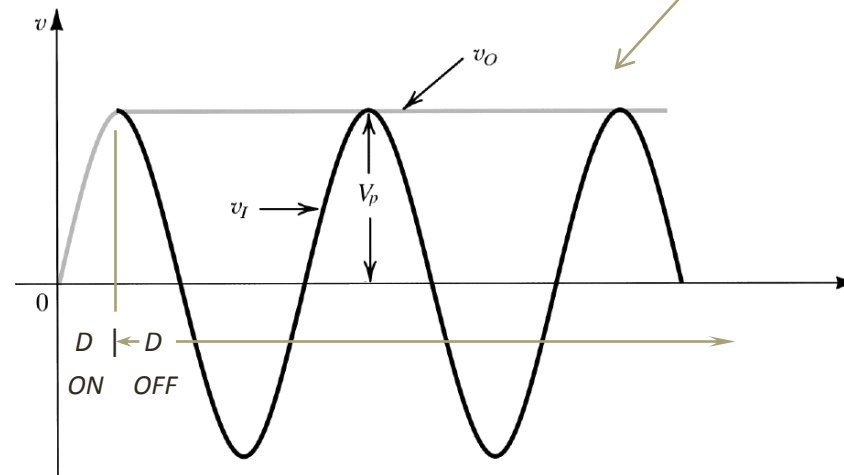
2 diodos conduzem por semiciclo = maior queda  
 $PIV = V_s$  (tensão de pico do sinal alternado).

# O Retificador de Meia-Onda com Capacitor de Filtro



Funciona como um **detector de pico**  
(ex. detecção de AM)

Funcionamento  
sem Carga ( $R=\infty$ ):



# Retificador com Filtro (cont.)

Operando com Carga:

**FUNCIONAMENTO:**  
 O Capacitor se carrega próximo ao pico da rede e impede a condução do diodo durante o tempo em que transfere energia à carga.

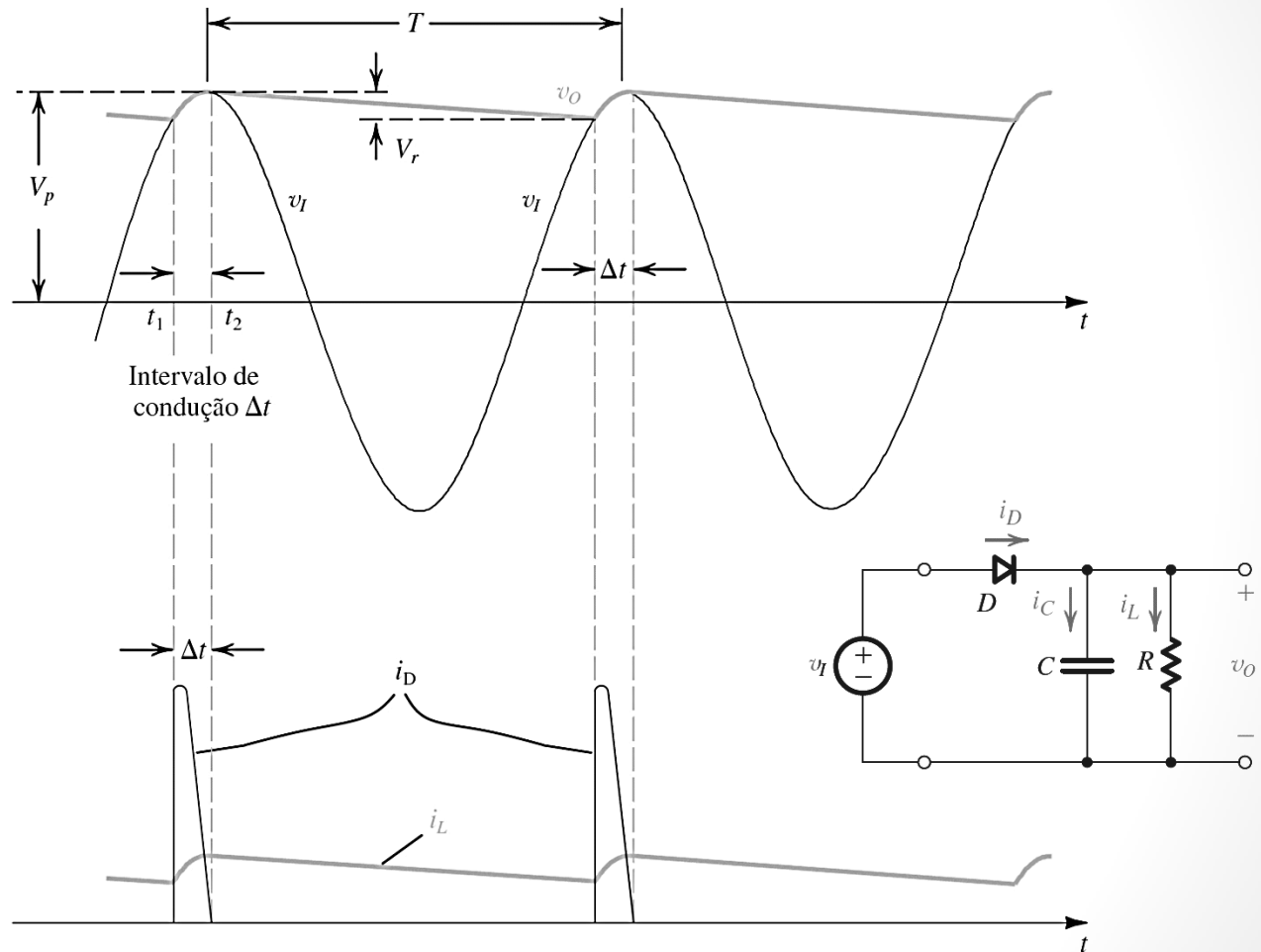


Fig. 3.29

# Retificador com Filtro (cont.)

Equacionamento "rigoroso":

$$i_L = \frac{v_0}{R} [ \quad ]$$

Para  $v_I > v_0$  (D ON):

$$i_D = i_C + i_L$$

$$i_C = C \frac{dv_I}{dt} = C V_p \omega \cos(\omega t)$$

Para " $i \leq 0$ " D se bloqueia.

Logo:

$$-i_C = i_R \text{ (descarga exponencial)}$$

Equacionamento simplificado:

$$i_L \approx I_L \approx \frac{V_0}{R} \quad \text{Obs.: } V_0 = v_{o,med}$$

$$\text{Com } V_0 = V_p - \frac{1}{2} V_r$$

Sabe-se que

$$i_C = C \frac{dv_0}{dt}$$

Com a abordagem linear se pode escrever:

$$I_L = \frac{C V_r}{T} = C V_r f. \text{ Logo:}$$

$$V_r = \frac{I_L}{f C}. \text{ Sabe-se, contudo, que:}$$

Eq. 3.29

$$V_p - V_p \text{sen}(\omega t_1) \approx V_r, \text{ ou seja, } V_p \text{sen}(\omega t_1) \approx V_p - V_r$$

Mas, da Fig. 3.29,  $\omega t_1 + \omega \Delta t \approx \pi / 2$ , de modo que:

$$\omega t_1 \approx \pi / 2 - \omega \Delta t$$

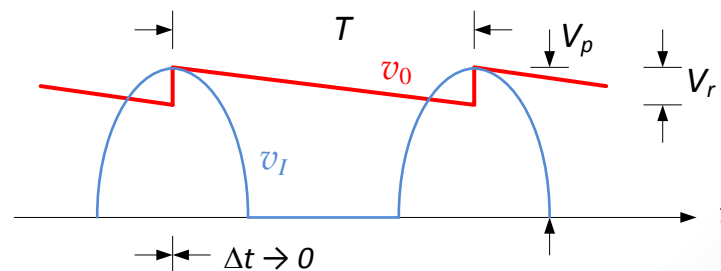
Assim, usando uma identidade trigonométrica:

$$V_p \cos(\omega \Delta t) \approx V_p - V_r$$

Mas, da Série de Taylor,  $\cos(\omega \Delta t) \approx 1 - \frac{1}{2}(\omega \Delta t)^2$

Assim:

$$\omega \Delta t \approx \sqrt{2V_r / V_p} \text{ (admitindo } \Delta t \rightarrow 0)$$



# Exemplo 3.9

## EXEMPLO 3.9

Considere um retificador de pico alimentado por uma senóide de 60 Hz tendo um valor de pico de  $V_p = 100$  V. Suponha uma resistência de carga  $R = 10$  k $\Omega$ . Calcule o valor da capacitância  $C$  que resultará em uma ondulação de pico a pico de 2 V. Calcule também a fração do ciclo durante a qual o diodo conduz, além do valor médio e de pico da corrente no diodo.

### Solução

Pela Equação 3.29a, obtemos o valor de  $C$  como

$$C = \frac{V_p}{V_r f R} = \frac{100}{2 \times 60 \times 10 \times 10^3} = 83,3 \mu F$$

O ângulo de condução  $\omega\Delta t$  é obtido pela Equação 3.30 como

$$\omega\Delta t = \sqrt{2 \times 2/100} = 0,2 \text{ rad}$$

Logo, o diodo conduz por  $(0,2/2\pi) \times 100 = 3,18\%$  do ciclo. A corrente média no diodo é obtida pela Equação 3.31, em que  $I_L = 100/10 = 10$  mA,

$$i_{D,med} = 10(1 + \pi\sqrt{2 \times 100/2}) = 324 \text{ mA}$$

A corrente de pico no diodo é encontrada usando a Equação 3.32,

$$i_{D,máx} = 10(1 + 2\pi\sqrt{2 \times 100/2}) = 638 \text{ mA}$$

**Cálculo equivocado do Sedra!**

*Cálculo da Corrente Média no Diodo:*

*A corrente em D existe durante  $\Delta t$  e vale:*

$$i_D = i_C + i_L$$

*Mas  $i_C = V_p C \omega \cos(\omega t)$ , cujo pico é:*

$$I_{cp} = V_p C \omega \cos(\omega t_1) = V_p C \omega \cos\left(\frac{\pi}{2} - \omega\Delta t\right) = V_p C \omega \text{sen}(\omega\Delta t).$$

*É possível dizer que  $i_{D,med} \approx \left(\frac{I_{cp}}{2} + I_L\right) \frac{\Delta t}{T}$ .*

*Usando a expressão de  $I_{cp}$  e as expressões do Sedra é possível obter:*

$$i_{D,med} = I_L \left( \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{V_r}{2V_p}} + 1 \right). (*)$$

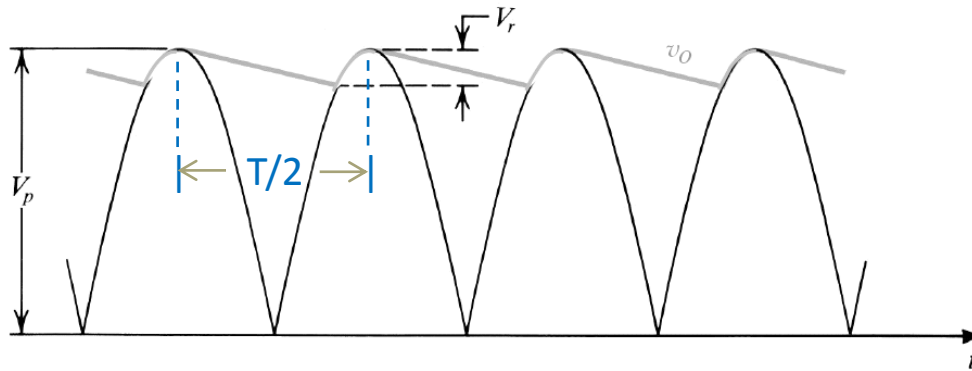
*Demonstre!*

Refazendo o cálculo, encontra-se

**$i_{D,med} = 10,3 \text{ mA}$** , o que coincide com simulações.

(\*) Neste cálculo, se empregou  $\text{sen}(\omega\Delta t) = \omega\Delta t$ , visto que  $\omega\Delta t$  é, usualmente, pequeno.

# Retificador com Filtro - Onda Completa



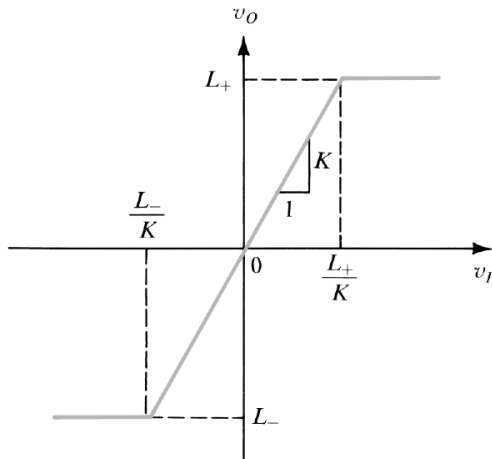
**Figura 3.30** Formas de onda no retificador de pico de onda completa.

Neste caso, as exigências de filtragem capacitiva são reduzidas à metade, em comparação com o retificador de meia-onda.

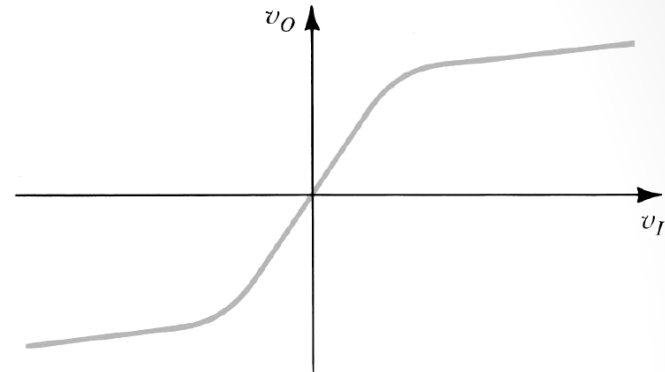
Ou seja:

$$C = \frac{V_p}{2f V_r R}$$

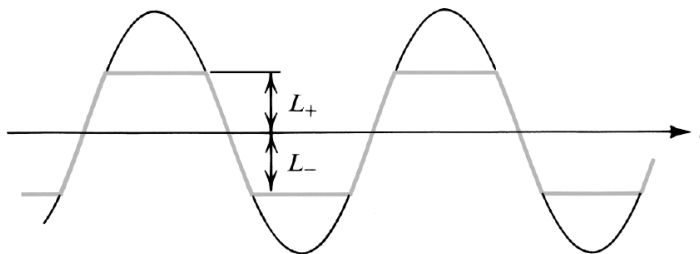
# Circuitos Limitadores



**Figura 3.32** Característica de transferência genérica para um circuito limitador.



**Figura 3.34** Limitador suave.



**Figura 3.33** Aplicação de uma senóide em um limitador pode resultar no ceifamento de seus dois picos.

## Aplicações:

- Processamento de Sinais.
- Proteção de entrada de amplificadores operacionais.
- Proteção de circuitos sensíveis à excesso de tensão.

Exemplos de Circuitos Limitadores

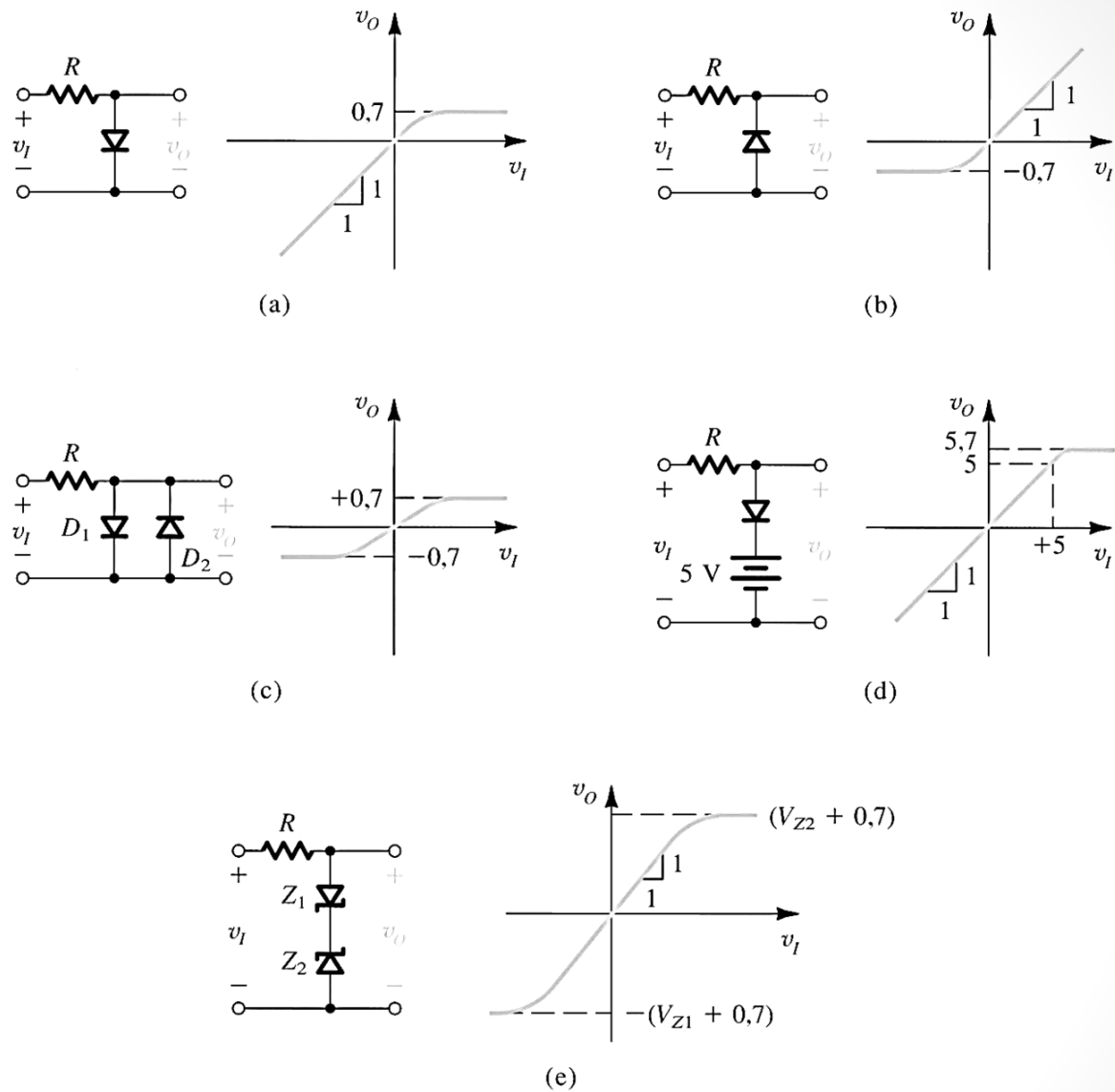
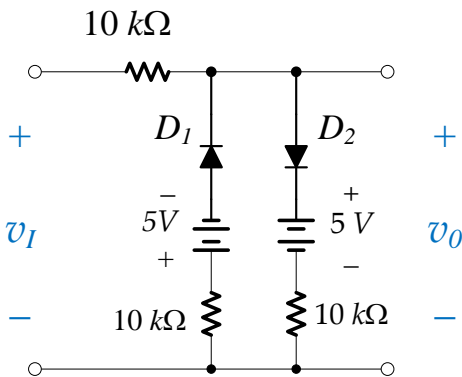


Figura 3.35 Uma variedade de circuitos limitadores básicos.

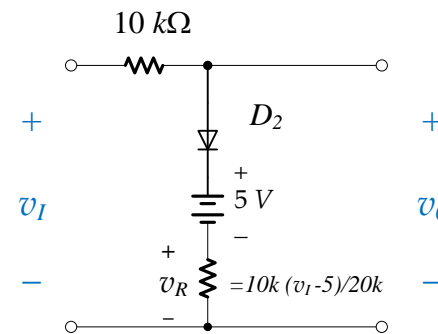


# Exercício 3.27

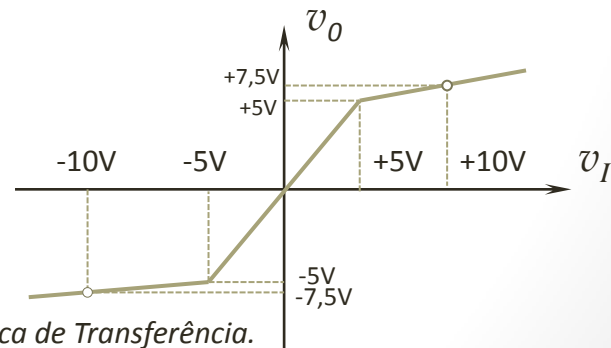
- **Descreva a característica de transferência do circuito abaixo, admitindo diodos ideais.**
- Solução:
- Admite-se inicialmente que nenhum diodo conduz e  $R_0 \gg 10\text{k}\Omega$ . Neste caso,  $v_0 = v_I$ .
- Se, por outro lado,  $v_I > 5\text{V}$  percebe-se que  $D_2$  conduz. Mas, se  $v_I < -5\text{V}$ , quem conduz é  $D_1$ .
- Para  $v_I > 5\text{V}$  ( $D_2$  ON), tem-se  $v_0 = 5 + \frac{1}{2}(v_I - 5) = \frac{1}{2}v_I + 2,5\text{V}$ .
- Para  $v_I < -5\text{V}$  ( $D_1$  ON), tem-se  $v_0 = -5 + \frac{1}{2}(v_I + 5) = \frac{1}{2}v_I - 2,5\text{V}$ .



Circ. equivalente  $D_2$  ON:

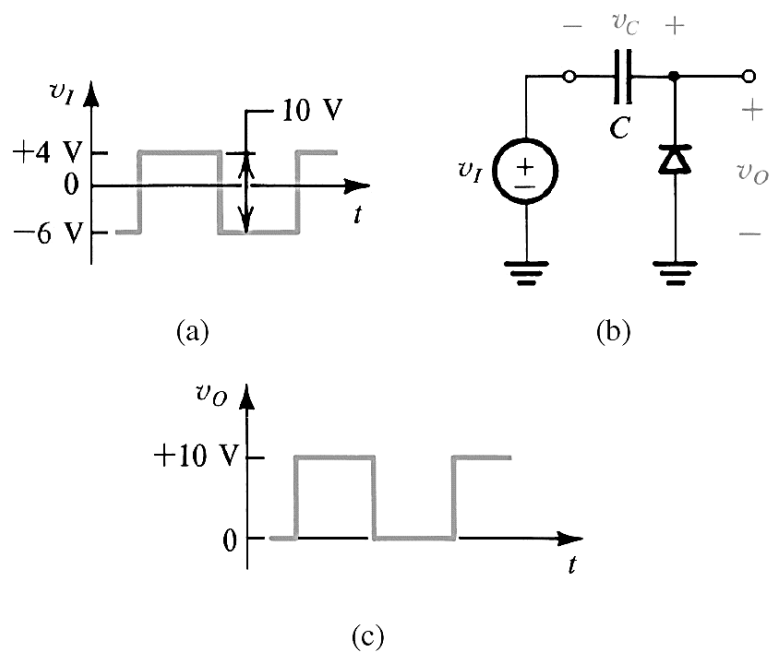


Obs.: Supõe-se que a carga ligada na saída tenha impedância  $\gg 10\text{k}\Omega$ .

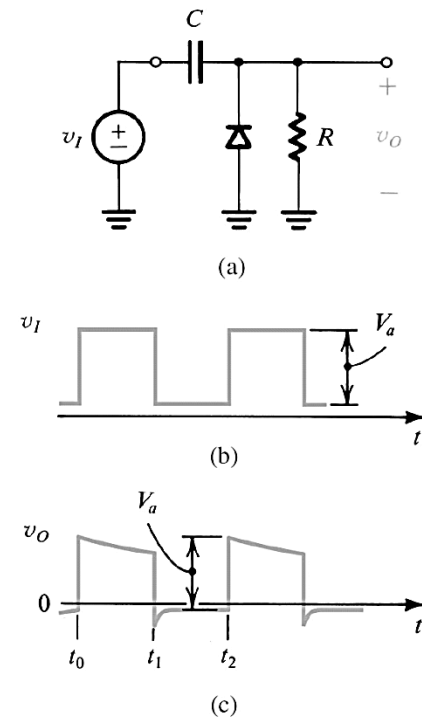


Característica de Transferência.

# Circuitos Grampeadores (Restaurador de CC)

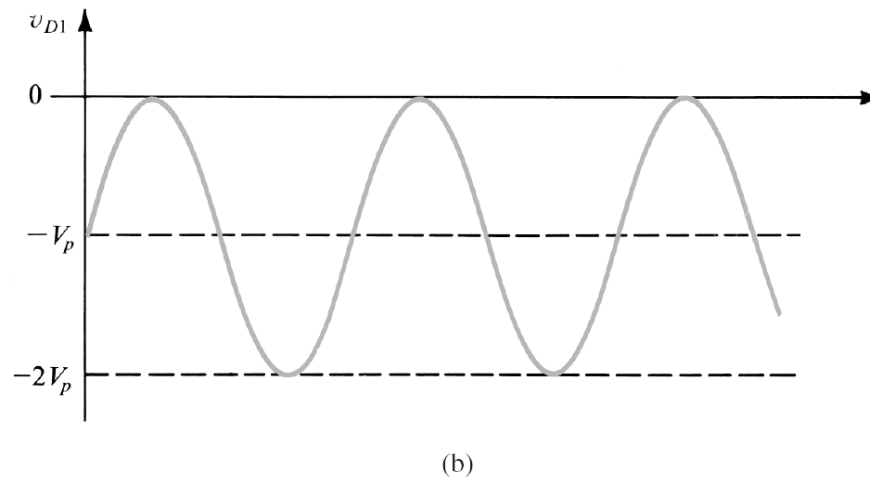
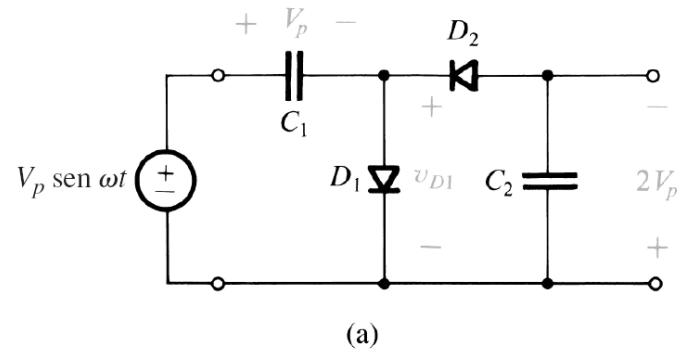


**Figura 3.36** O capacitor grampeado ou restaurador de *cc* com uma onda quadrada na entrada e sem carga.



**Figura 3.37** O capacitor grampeado com uma resistência de carga *R*.

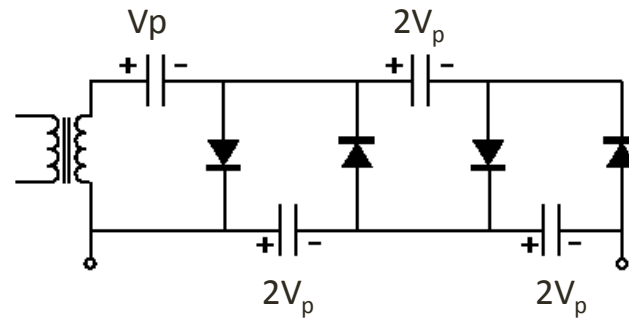
# Multiplicadores de Tensão



**Figura 3.38** O dobrador de tensão: (a) circuito; (b) forma de onda da tensão em  $D_1$ .

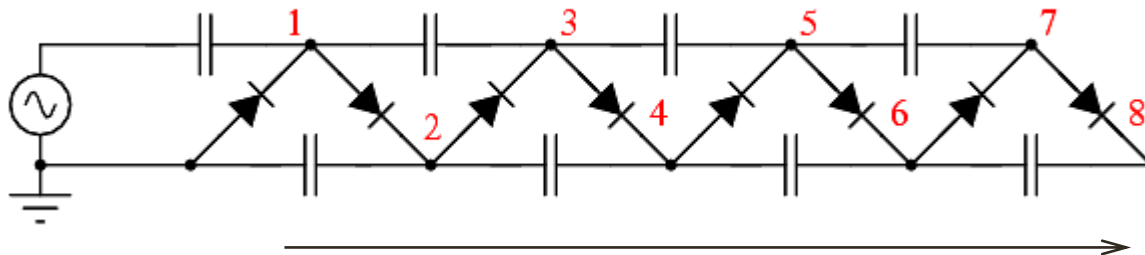
# Outros Multiplicadores de Tensão

- Dobrador, Triplicador, Quadruplicador:



Sugestão:  
Simule estes circuitos  
(PSIM ou Multisim) ou  
monte em laboratório,  
com tensões de  
entrada de  $5V_p$ , 1kHz.

- Circuito Cockroft-Walton (até 8x a tensão de pico de entrada):

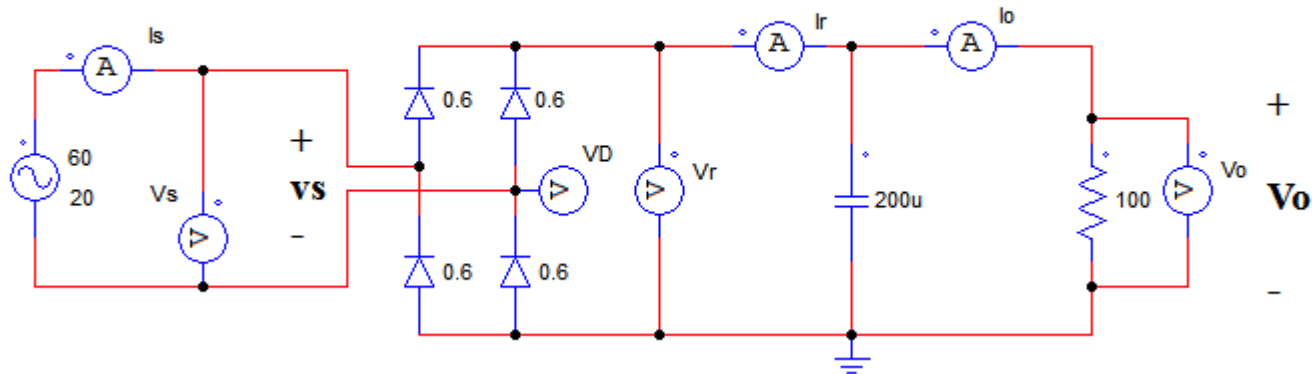


$8V_p$

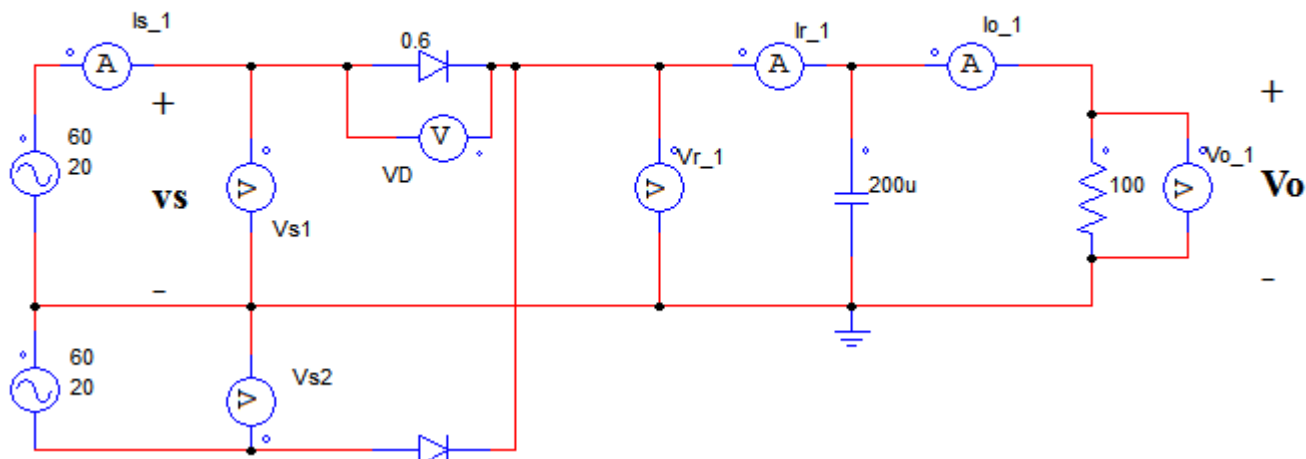
Obs.: Lembrar que há  
quedas nos diodos reais.

# Simulações – PSIM

Retificador em Ponte (c/ e s/ filtro)

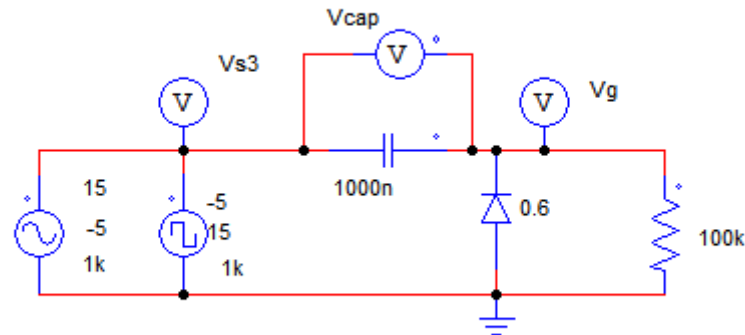
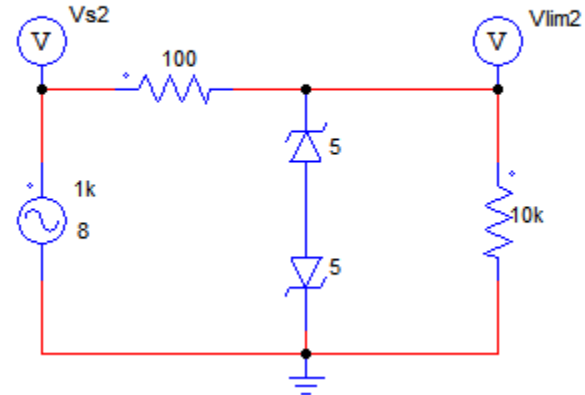
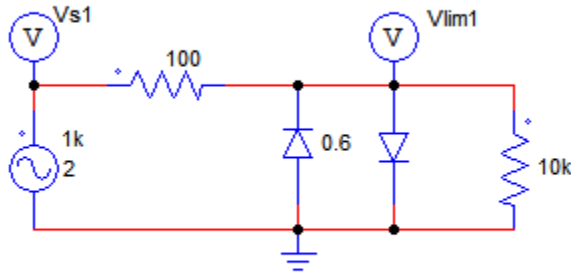


Retificador com tap central (c/ e s/ filtro)



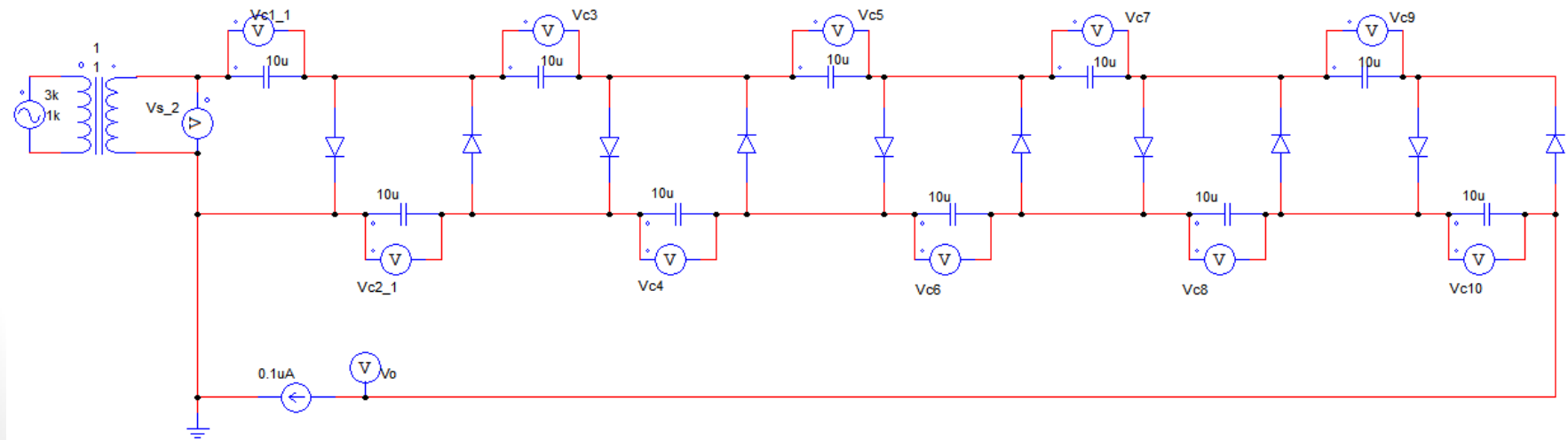
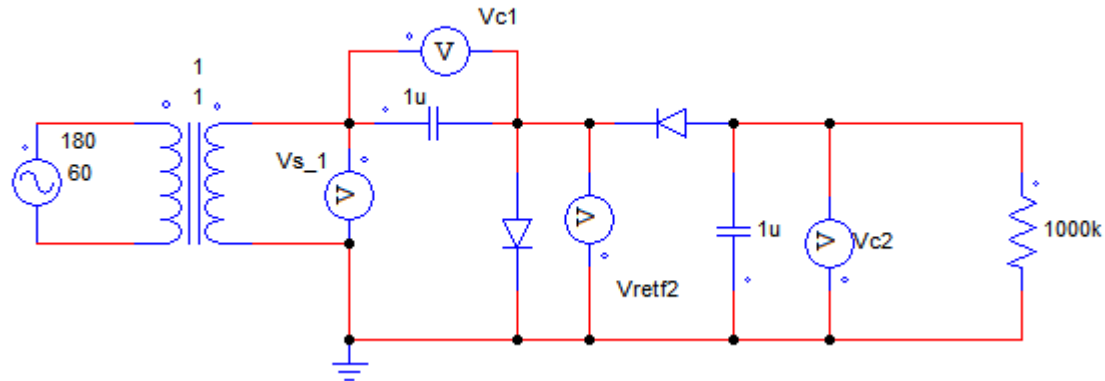
# Simulações – PSIM

## Circuitos limitadores/grampeadores



# Simulações – PSIM

## Circuitos multiplicadores de tensão

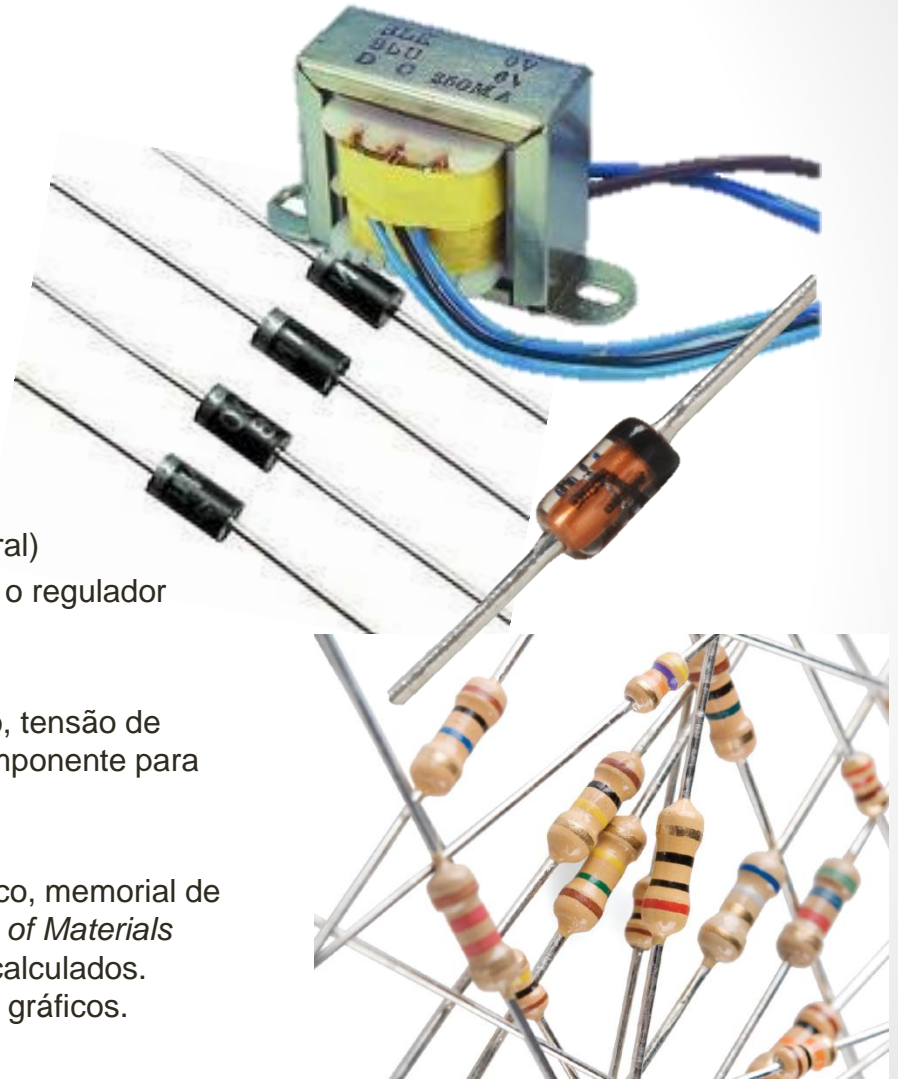


# Projeto eletrônico – fonte linear

- **Mathcad**
- Mathematica
- MATLAB & Simulink
- **PSIM**
- PSPICE
  
- **Especificações:**
  - **Entrada:** 127 V (RMS), 60 Hz
  - **Saída:** 15 VDC, regulada; 200 mA máx.
  - **Barramento:** máx. 10% ondulação
  - **Trafo:** 127-15+15 V (RMS), 250 mA (c/ tap central)
  - Especificar os diodos, o capacitor de filtragem e o regulador shunt (diodo zener + resistor)

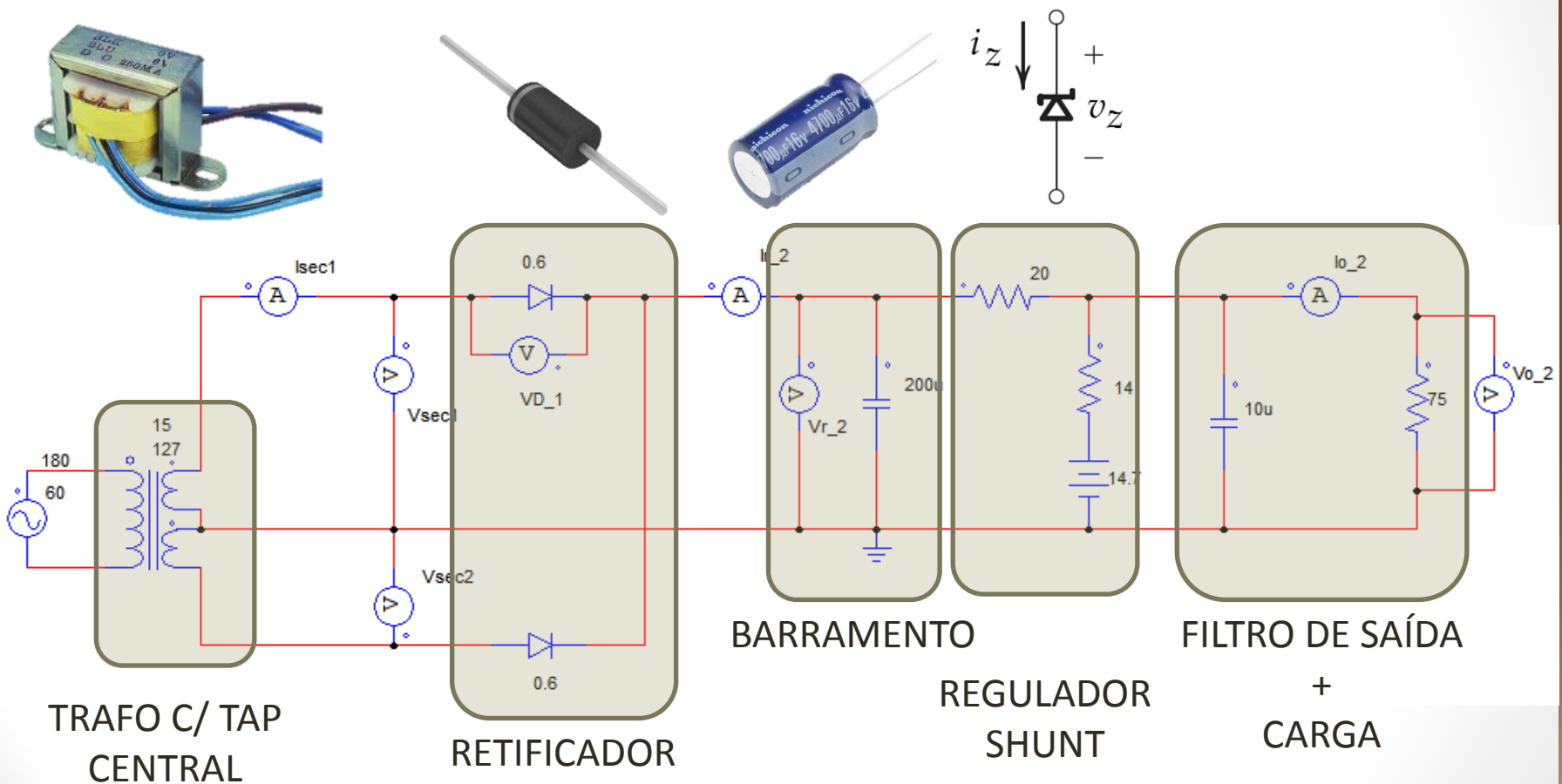
Calcular corrente RMS/média, ondulação de tensão, tensão de bloqueio máxima e potência dissipada em cada componente para fins de dimensionamento.

**Compilem em relatório:** especificações, esquemático, memorial de cálculo, resultados de cálculo e simulação e um *Bill of Materials* (BOM) com valores comerciais para os elementos calculados. Resultados experimentais/simulação relevantes em gráficos.



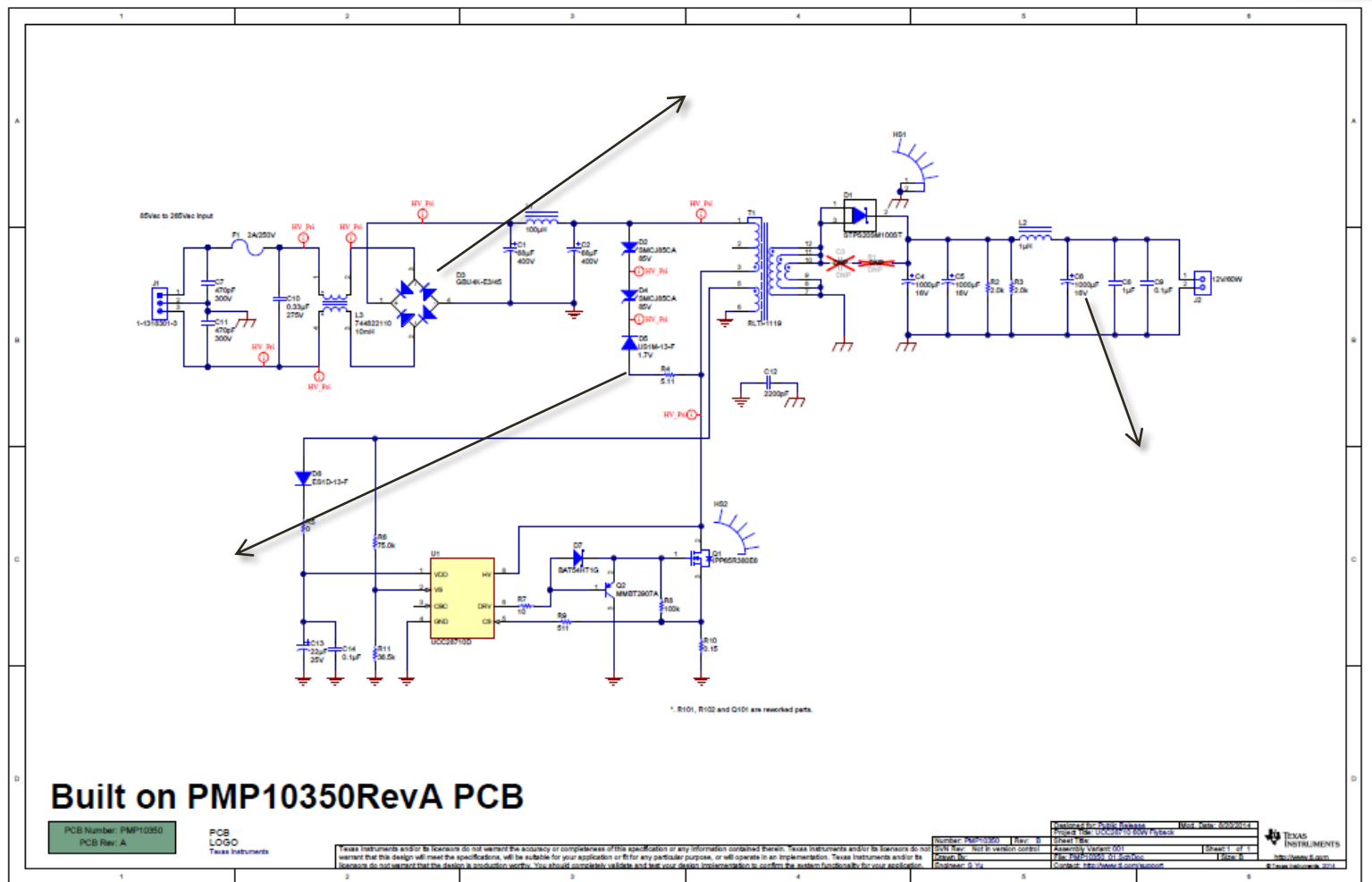


# Projeto eletrônico – fonte linear



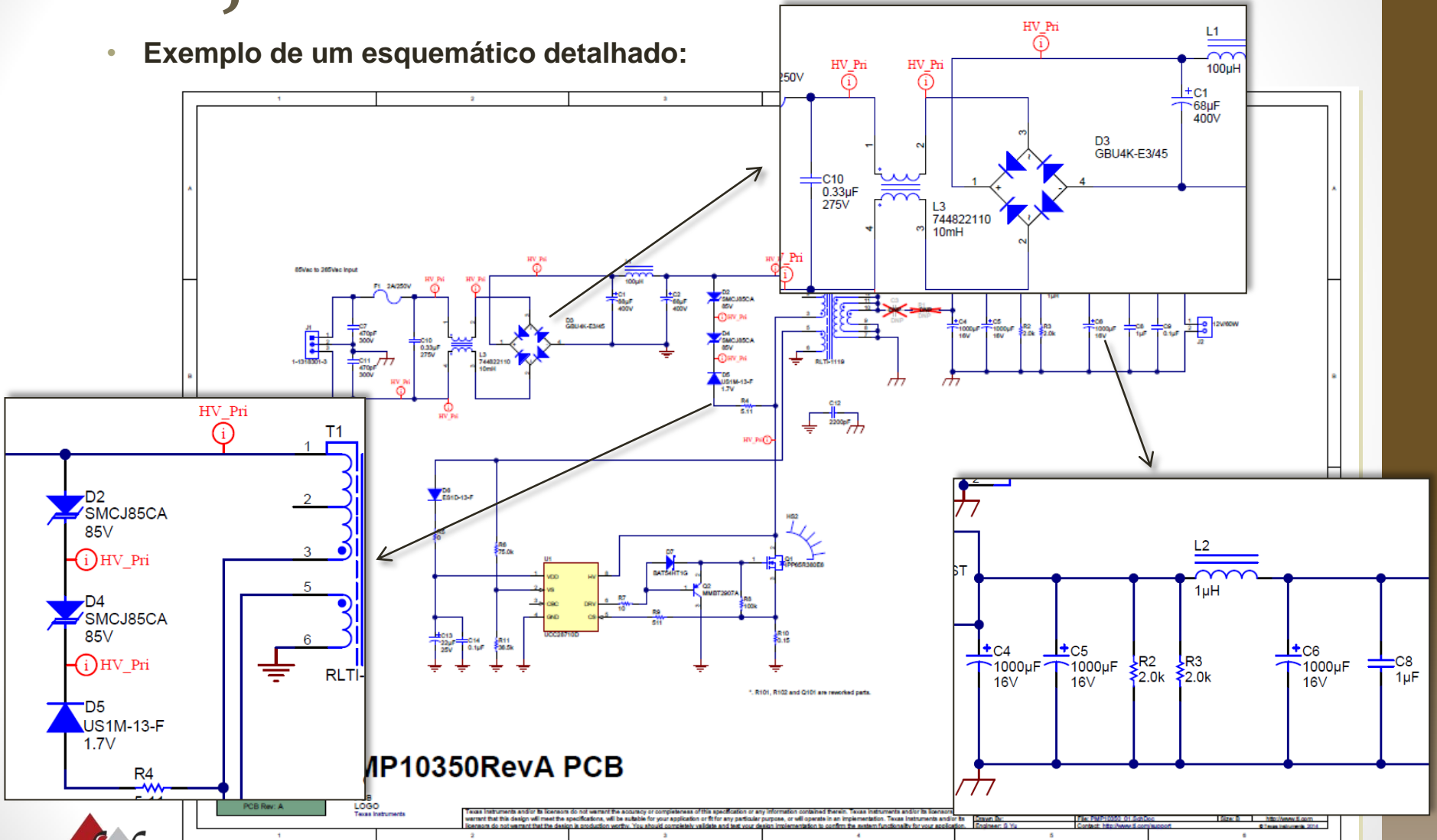
# Projeto eletrônico – fonte linear

- Exemplo de um esquemático detalhado:



# Projeto eletrônico – fonte linear

- Exemplo de um esquemático detalhado:



# Projeto eletrônico – fonte linear

- Exemplo de um Bill of Materials (BOM)

## UCC28710 60W Flyback

Encapsulamento (dimensões / código)

Nome de acordo com o fabricante (“part number”)

Designator	Quantity	Value	Description	PackageReference	PartNumber	Manufacturer	A
IPCB1	1		Printed Circuit Board		PMP10350	Any	
C1, C2	2	68uF	CAP ALUM 68UF 400V 20% RADIAL	18x20mm	400BXW68MEFC18X20	Rubycon	
C4, C5, C6	3	1000uF	CAP, AL, 1000uF, 16V, +/-20%, TH	CAPPR5-10x16	16ZLJ1000MCE10X16	Rubycon	
C7, C11	2	470pF	CAP, CERM, 470pF, 300V, +/-10%, VY2, 5x7.5 mm	5x7.5 mm	VY2471K29Y5SS63V7	Vishay-Bccomponents	
C8	1	1uF	CAP, CERM, 1 uF, 16 V, +/- 10%, X5R, 0603	0603	C0603C105K4PACTU	Kemet	
C9	1	0.1uF	CAP, CERM, 0.1uF, 25V, +/-10%, X7R, 0805	0805	08053C104KAT2A	AVX	
C10	1	0.33uF	CAP, Film, 0.33uF, 275V, +/-20%, TH	RCAP, 17.5x17.5x9.5mm	ECQ-U2A334ML	Panasonic	
C12	1	2200pF	CAP, CERM, 0.022uF, 300V, +/-20%, Y5U, CAPRD500W60D900H1200	CAPRD500W60D900H1200	VY2222M35Y5US6UV5	Vishay-Bccomponents	
C13	1	22uF	CAP, AL, 22uF, 25V, +/-20%, TH	RCAP, 5x5mm	25ML22MEFC5X5	Rubycon	
C14	1	0.1uF	CAP, CERM, 0.1uF, 50V, +/-10%, X7R, 0603	0603	06035C104KAT2A	AVX	
D1	1	100V	DIODE SCHOTTKY 100V 20A TO220AB	TO-220AB	STPS20SM100ST	ST Microelectronics	
D2, D4	2	85V	TVS DIODE 85VWM 137VC SMC	SMC	SMCJ85CA	Littelfuse	
D3	1	800V	Diode, Switching-Bridge, 800V, 4A, TH	GBU	GBU4K-E3/45	Vishay-Semiconductor	
D5	1	1.7V	Diode, Ultrafast, 1000V, 1A, SMA	SMA	US1M-13-F	Diodes Inc.	
D6	1	200V	Diode, Ultrafast, 200V, 1A, SMA	SMA	ES1D-13-F	Diodes Inc.	
D7	1	30V	Diode, Schottky, 30V, 0.2A, SOD-323	SOD-323	BAT54HT1G	ON Semiconductor	
F1	1		FUSE FAST 250VAC 2A RADIAL	TR5 fuse 8.5mm DIA	37012000410	Littelfuse	
HS1	1		BOARD LEVEL HEATSINK .5" TO-220	12.70x50.80x34.92 mm	513002B02500G	Aavid	
HS2	1		Heat Sink, TO-220, TH	TO-220 Heat Sink	576012B00000G	Aavid	
J1	1		HEADER, .312 VERT 3POS	19.7x10.7 x8.5 mm	1-1318301-3	TE Connectivity	
J2	1	2x1	Conn Term Block, 2POS, 5.08mm, TH	PhoenixContact_1715721	1715721	Phoenix Contact	

↑ Descrição física/paramétrica do componente & outros detalhes relevantes (tensão, corrente, tolerância, formato, temperatura, encapsulamento, etc.)

— Valor do componente (capacitância, indutância, tensão, corrente, potência, etc.)

— Quantidade de componentes (de mesma especificação)

— Designador do componente no esquemático

# Projeto eletrônico – fonte linear

- Exemplo de curvas e resultados relevantes:

Vin=120V<sub>AC</sub>/60Hz

Vin(ac)	Iin(A)	Pin(W)	Vout(V)	Iout(A)	Pout(W)	Eff. (%)
120.25	0.103	3.78	12.23	0.252	3.08	81.53%
120.24	0.179	7.46	12.27	0.500	6.14	82.24%
120.23	0.318	14.71	12.28	1.000	12.28	83.48%
120.23	0.437	21.67	12.27	1.512	18.55	85.61%
120.22	0.55	28.76	12.27	2.000	24.54	85.33%
120.22	0.659	36.00	12.28	2.491	30.59	84.97%
120.21	0.757	42.91	12.30	2.956	36.36	84.73%
120.32	0.863	50.51	12.32	3.474	42.80	84.74%
120.19	0.964	58.15	12.33	3.980	49.07	84.39%
120.18	1.057	65.09	12.34	4.442	54.81	84.21%
120.17	1.143	71.74	12.36	4.894	60.49	84.32%

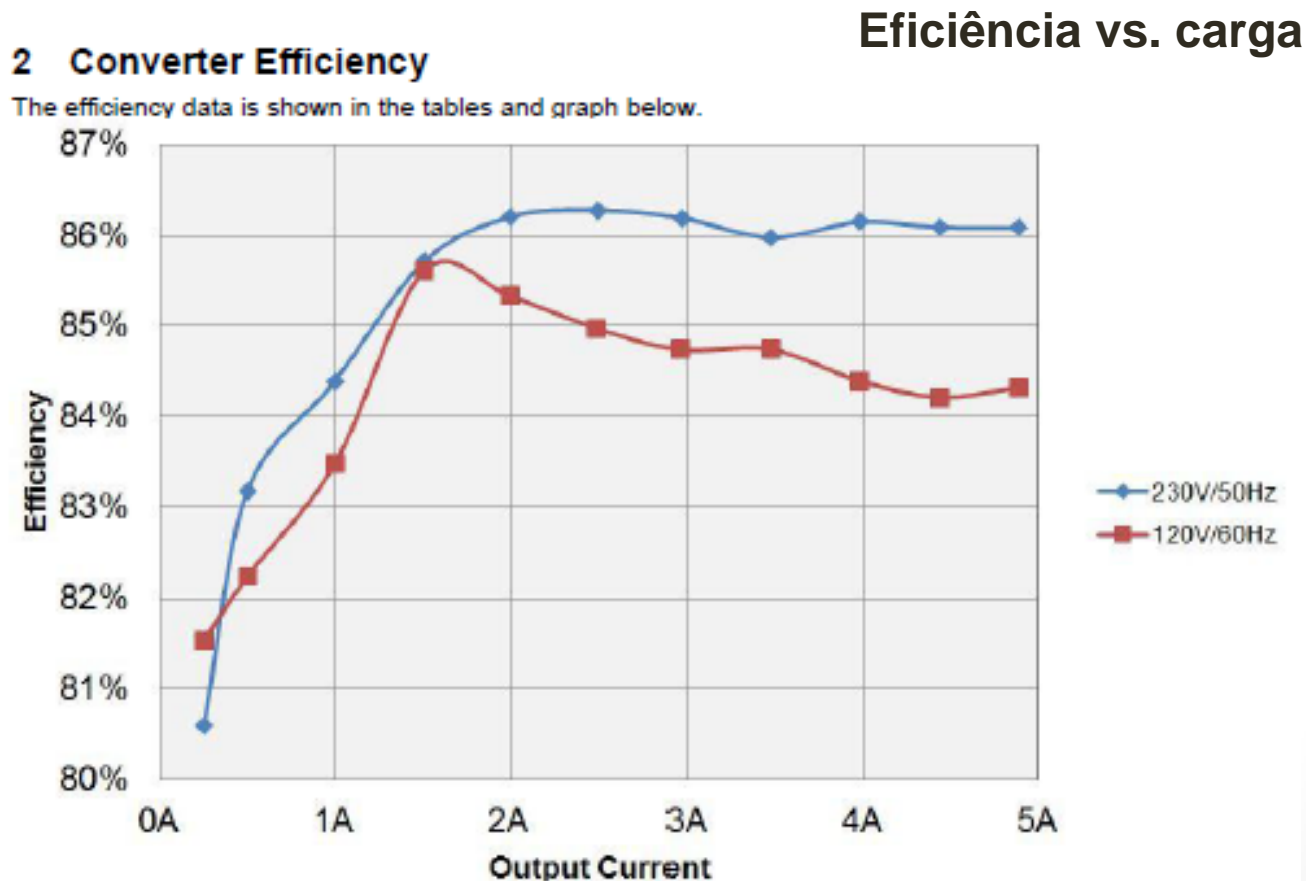
Tabela de dados de entrada e saída

Vin=230V<sub>AC</sub>/50Hz

Vin(ac)	Iin(A)	Pin(W)	Vo1(V)	Io1(A)	Pout(W)	Eff. (%)
230.2	0.081	3.83	12.25	0.252	3.09	80.60%
230.2	0.119	7.37	12.26	0.500	6.13	83.18%
230.2	0.198	14.54	12.27	1.000	12.27	84.39%
230.2	0.275	21.64	12.26	1.513	18.55	85.72%
230.2	0.348	28.49	12.28	2.000	24.56	86.21%
230.2	0.422	35.54	12.28	2.497	30.66	86.28%
230.2	0.49	42.29	12.29	2.966	36.45	86.20%
230.2	0.565	49.74	12.3	3.477	42.77	85.98%
230.2	0.635	56.99	12.33	3.982	49.10	86.15%
230.2	0.699	63.64	12.34	4.440	54.79	86.09%
230.2	0.761	70.25	12.36	4.893	60.48	86.09%

# Projeto eletrônico – fonte linear

- Exemplo de curvas e resultados relevantes:



# Projeto eletrônico – fonte linear

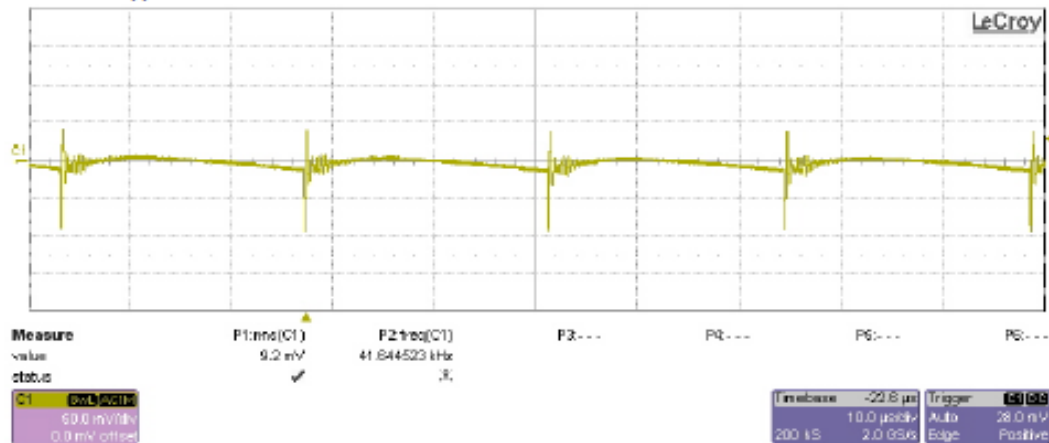
- Exemplo de formas de onda relevantes:

Ondulação de barramento ou saída

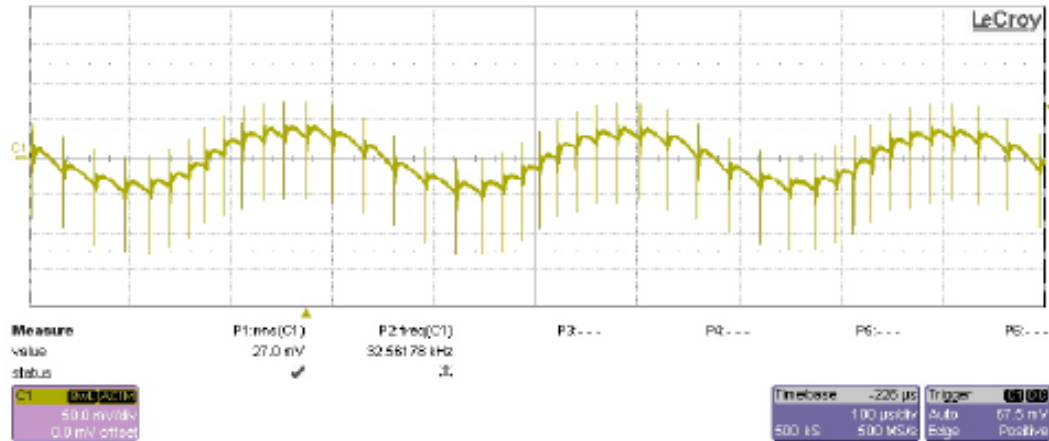
## 5 Output Ripple Voltages

The output ripple voltage is shown in the plots below at 12V/5A full load.

### 5.1 $12V_{ripple}$ at $120V_{AC}/60Hz$



### 5.2 $12V_{ripple}$ at $230V_{AC}/50Hz$



# Projeto eletrônico – fonte linear

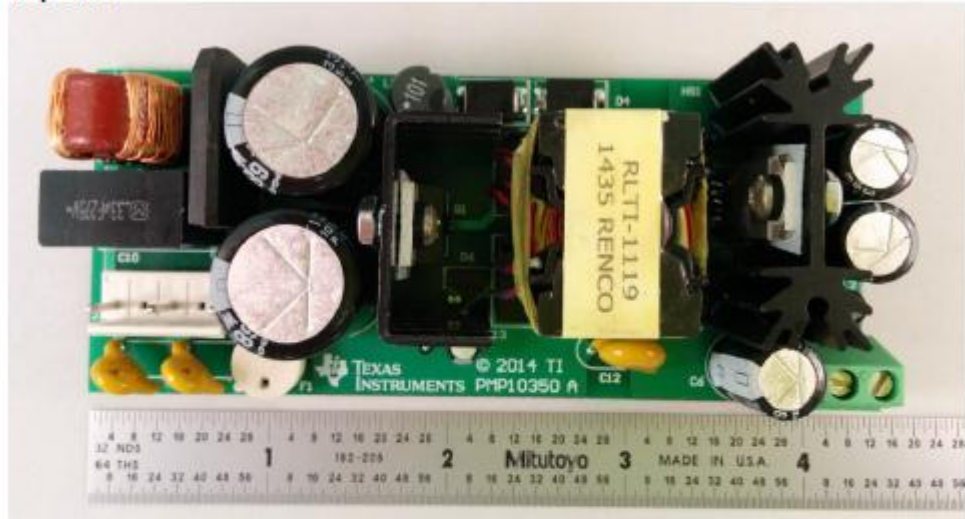
- Exemplo de figuras relevantes:

Foto de placa  
(top/bottom)

## 1 Photo

The photographs below show the PMP10350 Rev B assembly. This circuit was built on a PMP10350 Rev A PCB.

Top side



Bottom side

