

Circuitos retificadores

Introdução

A tensão fornecida pela concessionária de energia elétrica é alternada ao passo que os dispositivos eletrônicos operam com tensão contínua. Então é necessário retificá-la e isto é feito através dos **circuitos retificadores que convertem corrente alternada em corrente contínua**.

Temos os retificadores monofásicos para uso em aparelhos eletrônicos de um modo geral e os retificadores polifásicos para uso em circuitos industriais de alta potência.

Destacaremos neste curso os três tipos de retificadores monofásicos que são:

I – Retificador de meia onda.

II – Retificador de onda completa utilizando transformador com derivação central.

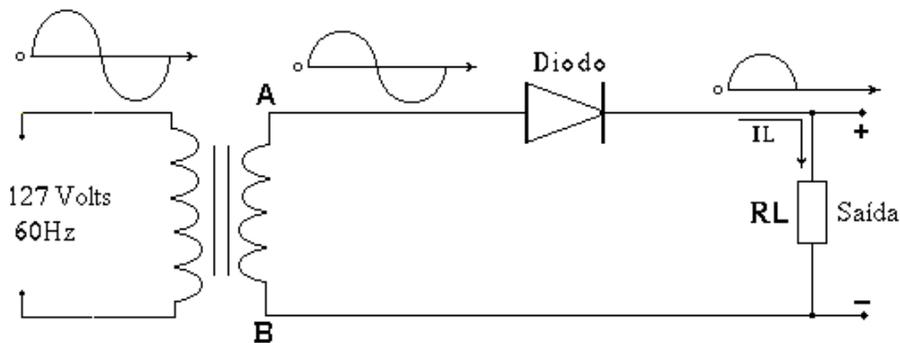
III – Retificador de onda completa em ponte.

I – Retificador de meia onda

O diodo tem a característica de conduzir corrente somente num sentido e devido a esta característica unidirecional, o mesmo é utilizado para retificar.

O diodo ideal com polarização direta comporta como uma chave fechada e com polarização reversa comporta como uma chave aberta.

O diodo tem resistência direta muito baixa e resistência reversa muito alta.



Funcionamento do circuito

Para o ponto A positivo em relação a B, o diodo está polarizado diretamente e conduz.

A corrente circula de A até B passando pelo diodo e RL.

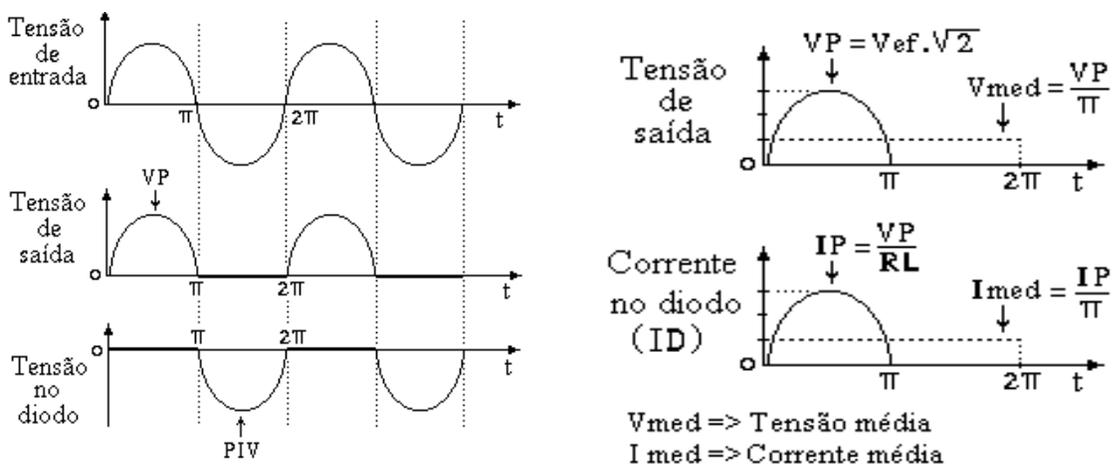
Para o ponto A negativo em relação a B, o diodo está polarizado inversamente e não conduz. Tem-se corrente em RL somente nos semiciclos positivos de entrada.

Os semiciclos positivos passam para a saída e os semiciclos negativos ficam no diodo.

A frequência de ondulação na saída é igual à frequência de entrada.

O retificador de meia onda tem baixa eficiência.

Formas de onda considerando um diodo ideal



$V_{CC} = V_P / \pi$ ou $V_{CC} = 0,45 \cdot V_{ef}$.

V_{CC} é o valor médio da tensão contínua em R_L .

V_P é o valor de pico da tensão sendo $V_P = V_{ef} \cdot \sqrt{2}$.

V_{ef} é o valor eficaz ou rms da tensão alternada de entrada.

$I_L = V_{CC} / R_L$ e $I_D = I_L$

I_L é o valor médio da corrente em R_L e I_D é o valor médio da corrente no diodo.

$I_P = V_P / R_L$ sendo I_P o valor de pico da corrente.

Tensão eficaz em $R_L = V_P / 2$ mas a tensão eficaz na entrada é $V_{ef} = V_P / \sqrt{2}$

$PIV = -V_P$ sendo PIV o pico inverso de tensão no diodo.

Nota: O diodo deve suportar uma tensão inversa maior do que PIV e uma corrente direta maior que I_D .

As especificações para o diodo 1N4007 são $I_F = 1A$ e $V_R \text{ max} = 1000V$

Este diodo suporta uma corrente direta de 1A e uma tensão reversa de 1000V.

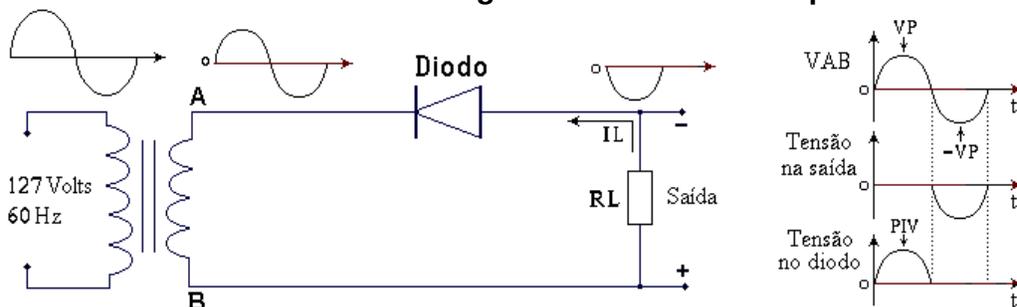


I-1) Sendo a o valor eficaz da tensão $V_{AB} = 18 V$, $R_L = 470 \text{ ohms}$, determine:

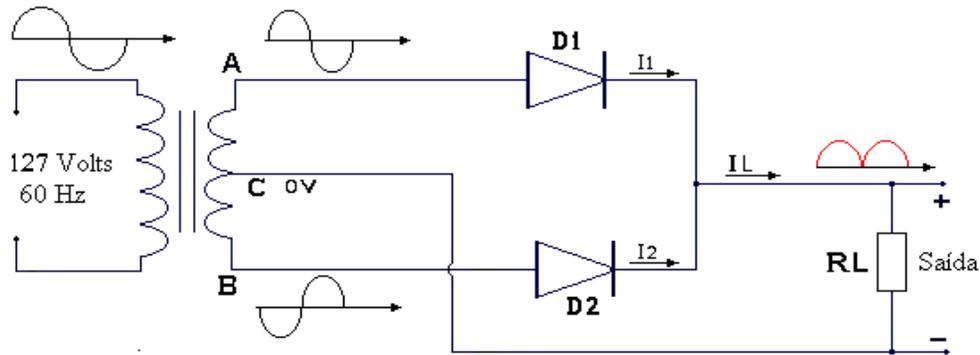
$V_{CC} = 8,1 V$ $I_L = 17,2 \text{ mA}$ $I_D = 17,2 \text{ mA}$ $I_P = 54 \text{ mA}$ $PIV = - 25,4 V$

Invertendo o diodo, a tensão de saída será negativa.

O diodo conduz os semiciclos negativos. Os semiciclos positivos ficam no diodo.



II – Retificador de onda completa utilizando transformador com derivação central.



Funcionamento do circuito.

Este circuito é também denominado de retificador de onda completa convencional.

Há uma defasagem de 180° entre as tensões de saída do transformador, VA e VB.

As tensões VA e VB são medidas em relação ao ponto C (0V).

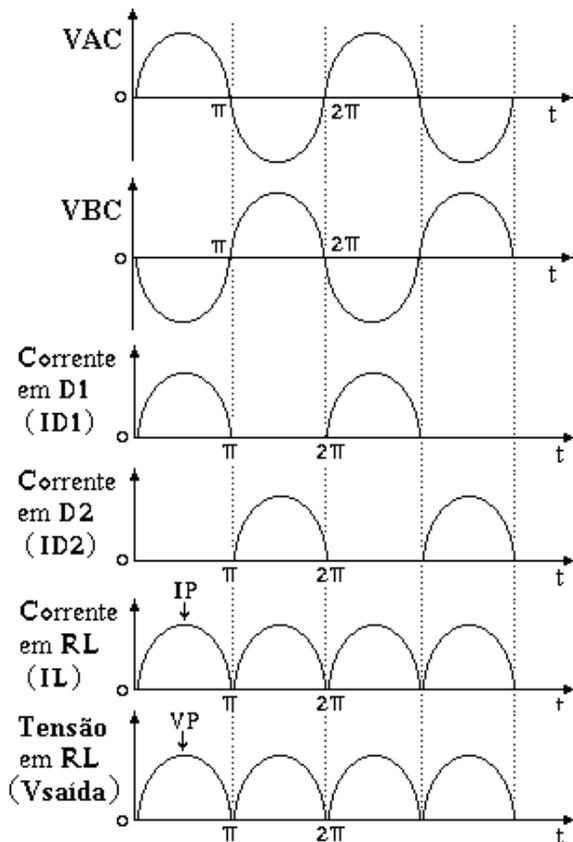
Quando A é positivo, B é negativo, a corrente sai de A passa por D1 e RL e chega ao ponto C.

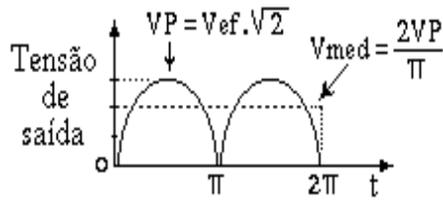
Quando A é negativo, B é positivo, a corrente sai de B passa por D2 e RL e chega ao ponto C.

Para qualquer polaridade de A ou de B a corrente I_L circula num único sentido em RL e por isto, a corrente em RL é contínua. Temos somente os semiciclos positivos na saída.

A frequência de ondulação na saída é o dobro da frequência de entrada.

Formas de onda considerando diodo ideal





$VCC = 2.VP / \pi$ ou $VCC = 0,9.Vef$

VCC é o valor médio da tensão contínua em RL .

VP é o valor de pico da tensão $VP = Vef.\sqrt{2}$.

Vef é o valor eficaz da tensão de entrada ($Vef = VAB / 2$)

$IL = VCC / RL$ e $ID = IL / 2$.

IL é o valor médio da corrente em RL e ID é o valor médio da corrente nos diodos.

$IP = VP / RL$ onde IP é o valor de pico da corrente.

Tensão eficaz de saída = Tensão eficaz de entrada = $VP / \sqrt{2}$

O PIV nos diodos é o pico negativo da tensão VAB .

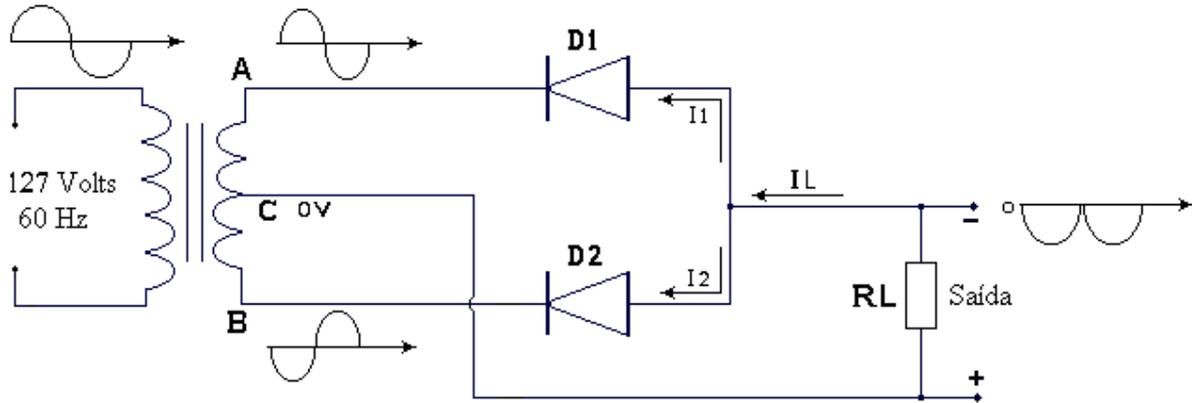
$PIV = -VAB.\sqrt{2}$

II-1) Sendo a o valor eficaz da tensão $VAB = 18 V$, $RL = 470$ ohms, determine:

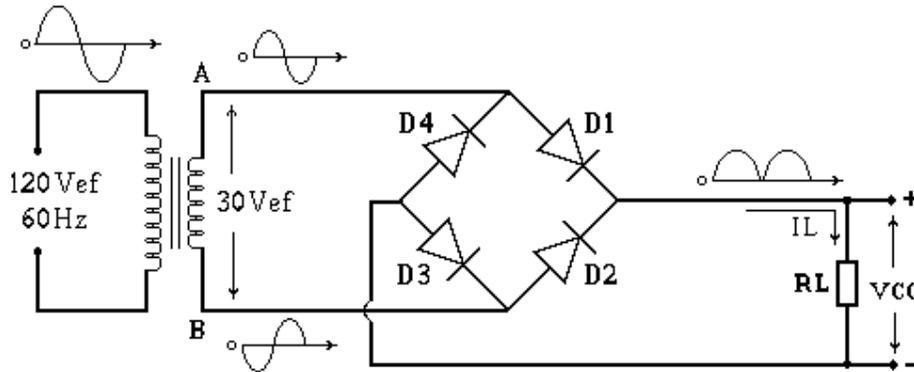
$VCC = 8,1 V$ $IL = 17,2 mA$ $ID = 8,6 mA$ $IP = 27 mA$ $PIV = - 25,4 V$

Invertendo os dois diodos, a tensão de saída será negativa.

Os diodos $D1$ e $D2$ conduzem os semiciclos negativos de A e de B para a saída.



III – Retificador em ponte



Funcionamento do circuito.

O retificador em ponte dispensa o uso do transformador com tomada central. Com isto, pode-se ter um retificador de onda completa ligado diretamente à rede elétrica. Quando A é positivo em relação a B, a corrente sai de A passa por D1, RL, D3 e chega ao ponto B.

Quando A é negativo em relação a B, a corrente sai de B passa por D2, RL, D4 e chega ao ponto A..

Conduzem somente dois diodos de cada vez.

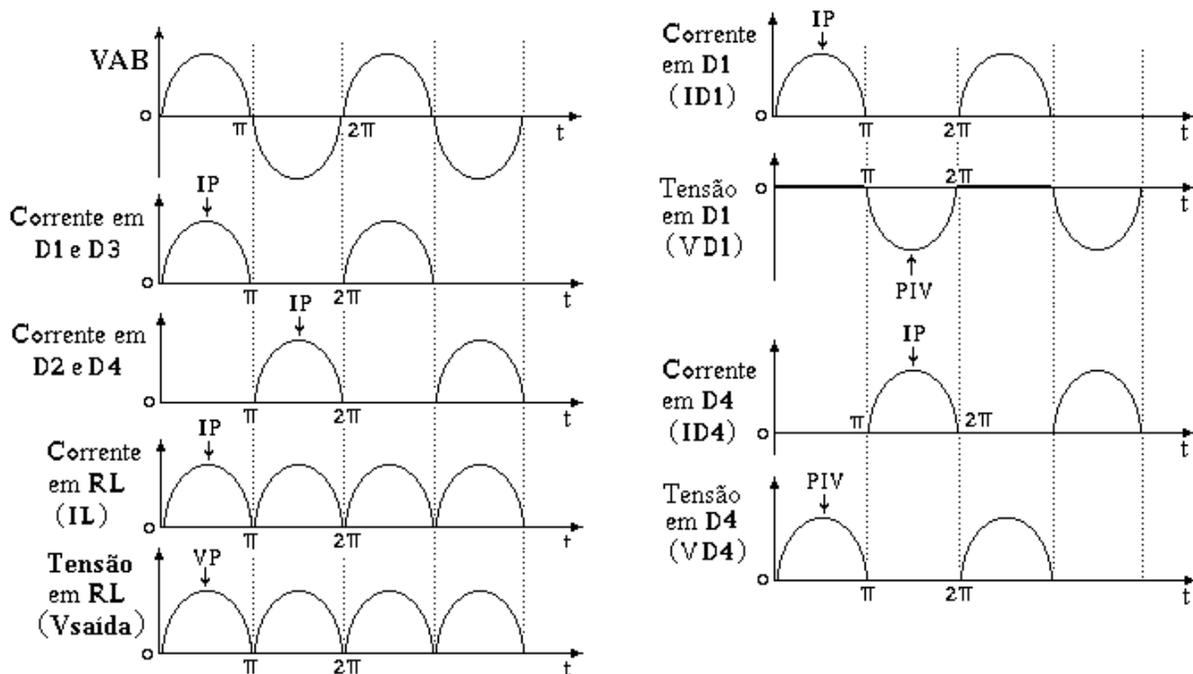
Quando o ponto A é positivo D1 e D3 conduzem.

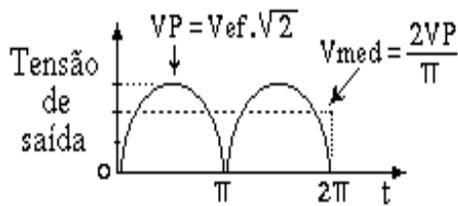
Quando o ponto A é negativo D2 e D4 conduzem.

Para qualquer polaridade de A ou de B a corrente I_L circula num único sentido em RL e por isto, a corrente em RL é contínua. Temos somente os semiciclos positivos na saída.

A frequência de ondulação na saída é o dobro da frequência de entrada

Formas de onda considerando diodo ideal





$$VCC = 2.VP / \pi \text{ ou } VCC = 0,9.Vef$$

VCC é o valor médio da tensão contínua em RL .

VP é o valor de pico da tensão e $VP = Vef.\sqrt{2}$.

Vef é o valor eficaz ou rms da tensão de entrada (VAB).

$$IL = VCC / RL \text{ e } ID = IL / 2.$$

IL é o valor médio da corrente em RL e ID é a Corrente média nos diodos.

O valor de pico da corrente $IP = VP / RL$.

Tensão eficaz de saída = Tensão eficaz de entrada = $VP / \sqrt{2}$

O PIV nos diodos é o pico da tensão VAB .

$$PIV = VAB.\sqrt{2}$$

Nota: Desprezou-se 1,4V de queda de tensão nos diodos.

Tem-se uma queda de 1,4 V visto que conduzem 2 diodos ao mesmo tempo.

III-1) Sendo a o valor eficaz da tensão $VAB = 30 V$, $RL = 820$ ohms, determine:

$$VCC = 27 V \quad IL = 33 \text{ mA} \quad ID = 16,5 \text{ mA} \quad IP = 51,6 \text{ mA} \quad PIV = 42,3 V$$

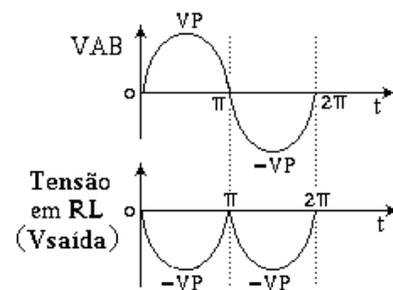
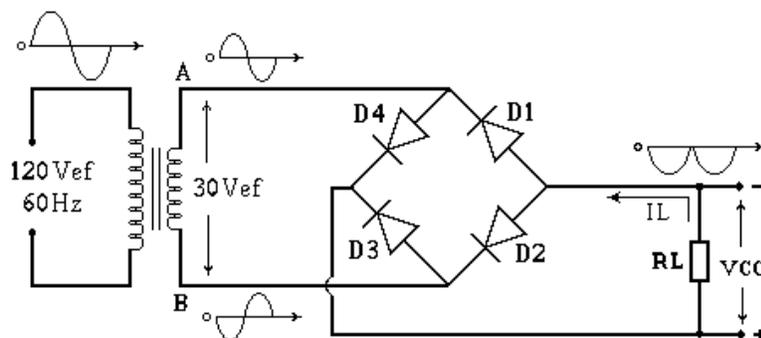
Invertendo os quatro diodos, a tensão de saída será negativa.

Quando A é positivo em relação a B, a corrente sai de A passa por D4, RL , D2 e chega ao ponto B.

Quando A é negativo em relação a B, a corrente sai de B passa por D3, RL , D1 e chega ao ponto A..

Quando o ponto A for positivo D2 e D4 conduzirão.

Quando o ponto A for negativo D1 e D3 conduzirão.



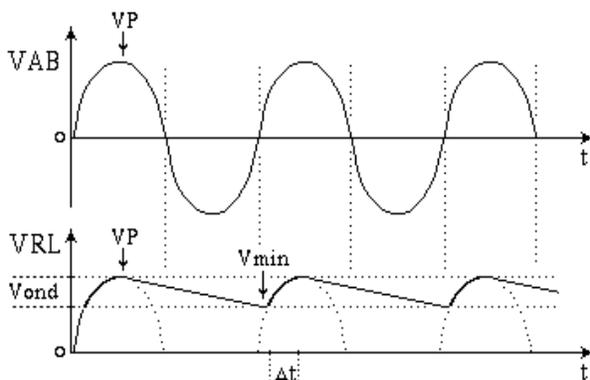
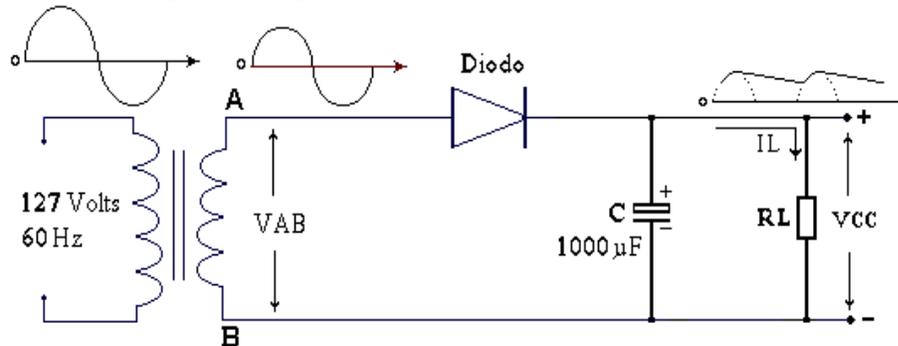
Filtros para fontes de alimentação

A ondulação na saída do circuito retificador é muito grande o que torna a tensão de saída inadequada para alimentar a maioria dos circuitos eletrônicos. É necessário fazer uma filtragem na tensão de saída do retificador. A filtragem nivela a forma de onda na saída do retificador tornando-a próxima de uma tensão contínua pura que é a tensão da bateria ou da pilha.

A maneira mais simples de efetuar a filtragem é ligar um capacitor de alta capacitância em paralelo com a carga RL e normalmente, utiliza-se um capacitor eletrolítico.

A função do capacitor é reduzir a ondulação na saída do retificador e quanto maior for o valor deste capacitor menor será a ondulação na saída da fonte.

Filtro a capacitor para retificador de meia onda.



Pode-se calcular V_{ond} de duas maneiras

1. $V_{ond} = VP - V_{min}$

V_{ond} → Tensão de ondulação ou de ripple.

VP → Tensão de pico no capacitor.

V_{min} → Tensão mínima no capacitor.

2. $V_{ond} = \frac{I_L}{f \cdot C}$

I_L → Corrente em ampères (A)

C → Capacitor em Farad (F)

f → Frequência de ondulação em Hertz (Hz)

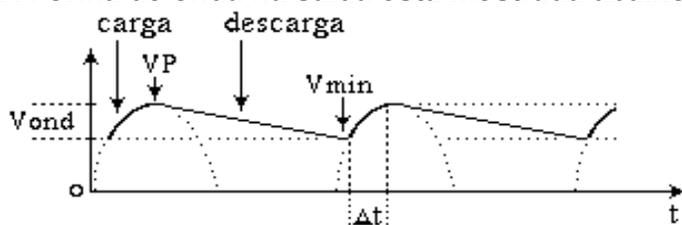
$f = 60 \text{ Hz}$ para meia onda

No semiciclo positivo o diodo conduz e carrega o capacitor com o valor de pico (VP) da tensão. Assim que a tensão de entrada cair a Zero, o diodo pára de conduzir e o capacitor mantém-se carregado e descarrega lentamente em RL. Quando a tensão de entrada fica negativa (semiciclo negativo) o diodo não conduz e o capacitor continua descarregando lentamente em RL. O capacitor recarrega 60 vezes por segundo.

O capacitor carrega de V_{min} até VP e neste intervalo de tempo (Δt) o diodo conduz.

O capacitor descarregará de VP até V_{min} e neste intervalo o diodo não conduzirá.

A Forma de onda na saída está mostrada abaixo.



O voltímetro de tensão contínua indica o valor médio da tensão medida.

Aumentando o capacitor, a tensão de ondulação (V_{ond}) diminui e VCC aumenta.

Aumentando a corrente I_L , a tensão de ondulação (V_{ond}) aumenta e VCC diminui.

Se V_{ond} tende a zero, a tensão de saída tende ao valor de pico.

$V_{CC} = V_P$ para $V_{ond} = 0V$.

Desligando RL, IL será 0A, o capacitor não descarrega e tem-se $V_{ond} = 0V$.

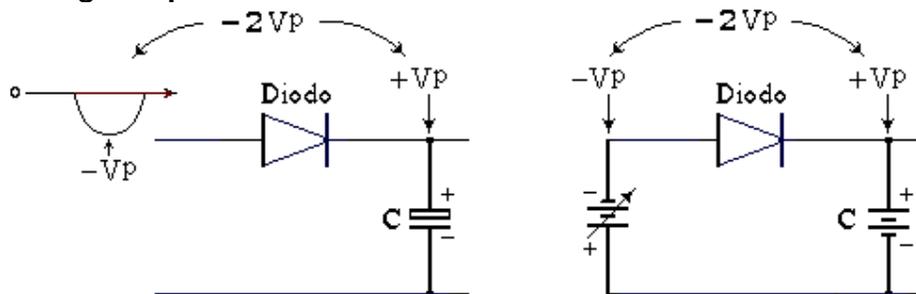
Para se ter V_{ond} com um valor baixo ao aumentar IL deve-se aumentar o valor do capacitor.

O retificador de meia onda, com filtro a capacitor, é inadequado para alimentar circuitos que exigem um valor alto de corrente, pois além de se utilizar um valor muito alto para o capacitor, o diodo fica sobrecarregado ao conduzir toda a corrente do circuito alimentado.



O pico inverso de tensão no diodo é o dobro da tensão de pico. $PIV = -2V_P$

O capacitor aumenta a tensão inversa no diodo devido a que o mesmo permanece carregado quando o diodo não estiver conduzindo.



Exercícios de fixação

1) Sendo $V_{AB} = 18V_{ef}$, $C = 1000 \mu F$, $I_L = 180 \text{ mA}$, retificador de meia onda, determine:

Resp: $V_{ond} = 3 \text{ V}$ $V_P = 25,4 \text{ V}$ $V_{min} = 22,4 \text{ V}$ $V_{CC} = 23,9 \text{ V}$ $PIV = - 50,8 \text{ V}$

$$V_{ond} = I / (f \cdot C) \Rightarrow V_{ond} = 180 \text{ mA} / (60 \text{ Hz} \cdot 1000 \mu \text{ F})$$

$$V_{ond} = 180 \cdot 10^{-3} / (60 \cdot 1000 \cdot 10^{-6}) = 180 \cdot 10^{-3} / 60 \cdot 10^{-3}$$

$$V_{ond} = 3 \text{ V}$$

$$V_P = 18 \cdot 1,41 = 25,4 \text{ V}$$

$$V_{min} = V_P - V_{ond} \Rightarrow V_{min} = 25,4 \text{ V} - 3 \text{ V}$$

$$V_{min} = 22,4 \text{ V}$$

$$V_{CC} = V_P - (V_{ond}/2) \Rightarrow V_{CC} = 25,4 \text{ V} - (3/2)$$

$$V_{CC} = 25,4 \text{ V} - 1,5 \text{ V}$$

$$V_{CC} = 23,9 \text{ V}$$

$$PIV = - 2V_P$$

$$PIV = - 50,8 \text{ V}$$

2) Sendo $VCC = 12$ Volts, $IL = 300$ mA, $Vond = 2$ V, retific. de meia onda determine:
O capacitor e o valor eficaz da tensão alternada na saída do transformador.

Resp: $C = 2500 \mu F$

$VAB = 9,2$ Vef

Solução:

$$Vond = i / (f \cdot C) \Rightarrow C = i / (f \cdot Vond) \Rightarrow C = 300mA / (60Hz \cdot 2V)$$

$$C = 300 \cdot 10^{-3} / (60 \cdot 2) \Rightarrow C = 300 \cdot 10^{-3} / 120 \Rightarrow C = 2,5 \cdot 10^{-3} F \Rightarrow C = 2500 \cdot 10^{-6} F$$

$$C = 2500 \mu F$$

$$VCC = VP - (Vond / 2)$$

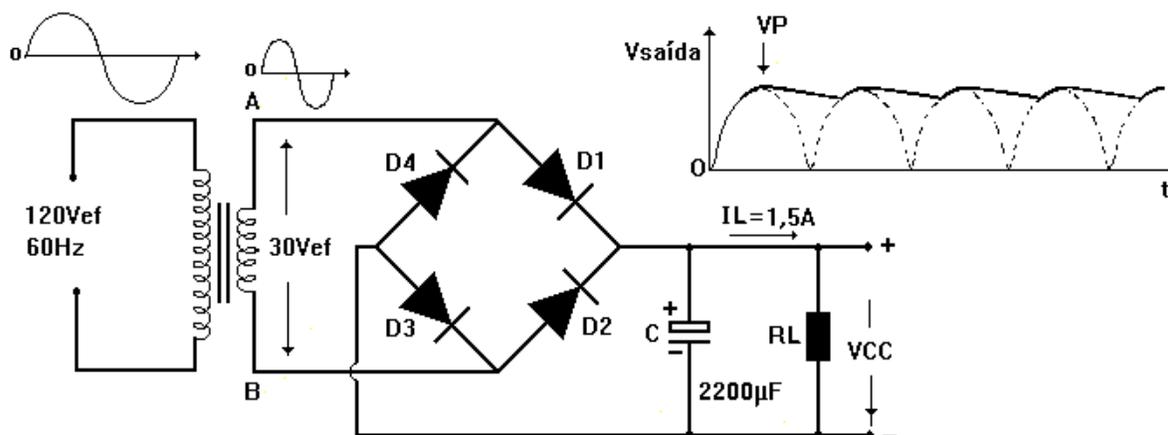
$$VP = VCC + (Vond / 2) \Rightarrow VP = 12V + 1V = 13V$$

$$Vef = VP / 1,41 \Rightarrow Vef = 13V / 1,41$$

$$Vef = 9,2 V \text{ então } VAB = 9,2 Vef$$

VAB é a tensão eficaz ou rms no secundário do transformador.

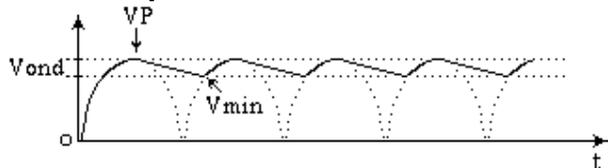
Filtro a capacitor para retificador de onda completa



Funcionamento

A filtragem para o retificador de onda completa é mais eficiente do que para o retificador de meia onda. Em onda completa o capacitor será recarregado 120 vezes por segundo. O capacitor descarrega durante um tempo menor e com isto a sua tensão permanece próxima de VP até que seja novamente recarregado.

Quando a carga RL solicita uma alta corrente é necessário que o retificador seja de onda completa.



As equações para onda completa são as mesmas utilizadas para meia onda, no entanto, a frequência de ondulação para onda completa é de 120 Hz.

$$VCC = VP - Vond / 2$$

VCC é o valor médio da tensão contínua na saída.

$$VP = Vef \cdot \sqrt{2}$$

VP é o valor de pico da tensão no capacitor (não foi considerada a queda de tensão nos diodos).

Vef é o valor eficaz da tensão de saída do transformador (VAB)

$V_{ond} = I_L / (f \cdot C)$ sendo $f = 120 \text{ Hz}$ para onda completa

V_{ond} é a tensão de ondulação ou de ripple na saída. Quanto menor V_{ond} , mais próxima de uma tensão contínua será a tensão de saída.

I_L é a corrente em RL

f é a frequência de ondulação na saída e é igual a 120 Hz para onda completa.

C é o valor do capacitor em FARADS ($2200 \mu\text{F} = 2200 \cdot 10^{-6} \text{ F}$)

Se V_{ond} tende a zero, a tensão de saída tende ao valor de pico.

$V_{CC} = V_P$ para $V_{ond} = 0V$.

Sem RL, a corrente I_L será 0A, o capacitor não descarregará e tem-se $V_{ond} = 0V$.

Exercícios

1) Sendo $I_L = 1,5 \text{ A}$, $V_{AB} = 30 \text{ Vef}$, $C = 2200 \mu\text{F}$, determine:

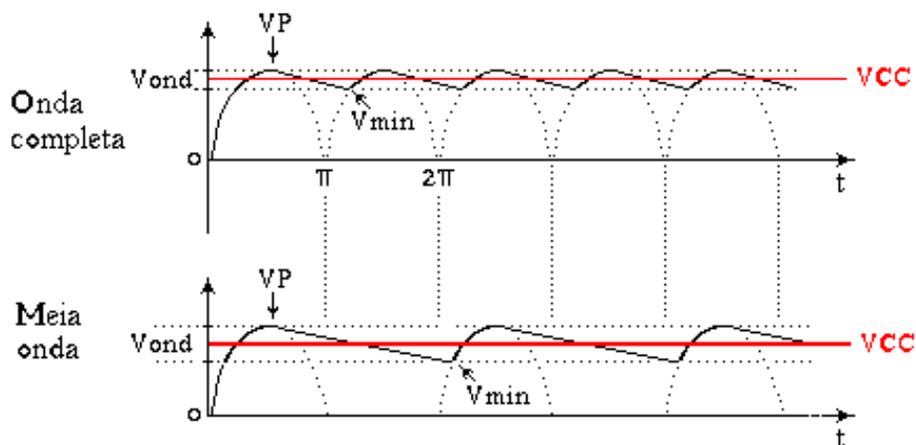
Resp: $V_{ond} = 5,7 \text{ V}$ $V_{CC} = 39,5 \text{ V}$

2) Sendo $I_L = 500 \text{ mA}$, $V_{CC} = 12V$, $V_{ond} = 2V$, determine o valor do capacitor e da tensão de saída do transformador

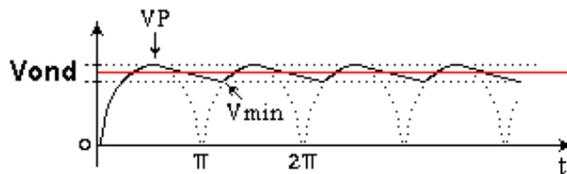
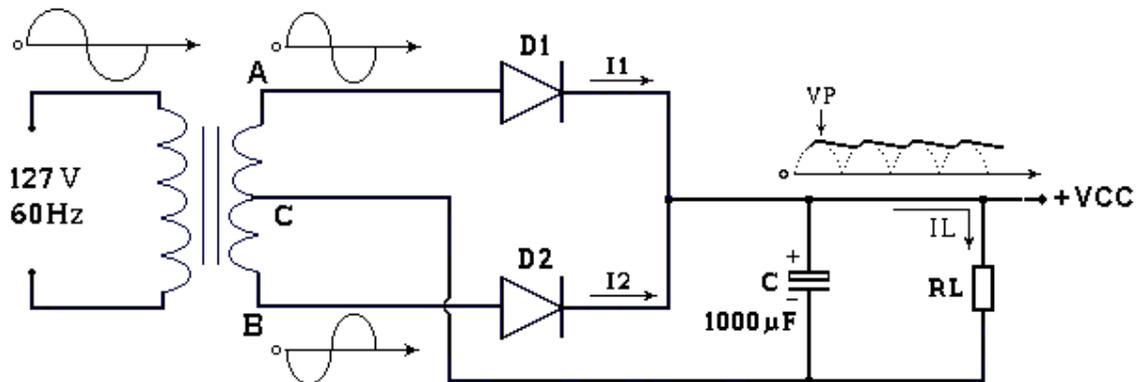
$C = 2083 \mu\text{F}$ (O valor comercializado mais próximo é de $2200\mu\text{F}$)

$V_{AB} = 9,2 \text{ Vef}$

Formas de onda na saída para uma filtragem em meia onda e em onda completa.



Filtro a capacitor para retificador de onda completa



$$f = 120\text{Hz}$$

$$V_{CC} = V_p - \frac{V_{ond}}{2}$$

$$V_{ond} = \frac{I_L}{f \cdot C}$$

$$V_p = V_{ef} \cdot \sqrt{2}$$

$$V_{ef} = \frac{V_{AB}}{2}$$

Exercícios.

1) Sendo $I_L = 600 \text{ mA}$, $C = 1000 \mu\text{F}$, $V_{AB} = 18 \text{ V}_{ef}$, determine:

Resp: $V_{ond} = 5 \text{ V}$ $V_{CC} = 10,2 \text{ V}$

2) Sendo $I_L = 300 \text{ mA}$, $V_{CC} = 20\text{V}$, $V_{ond} = 2,5 \text{ V}$, determine o valor do capacitor e da tensão de saída do transformador.

Resp: $C = 1000 \mu\text{F}$ $V_{AB} = 30 \text{ V}_{ef}$

Considerações

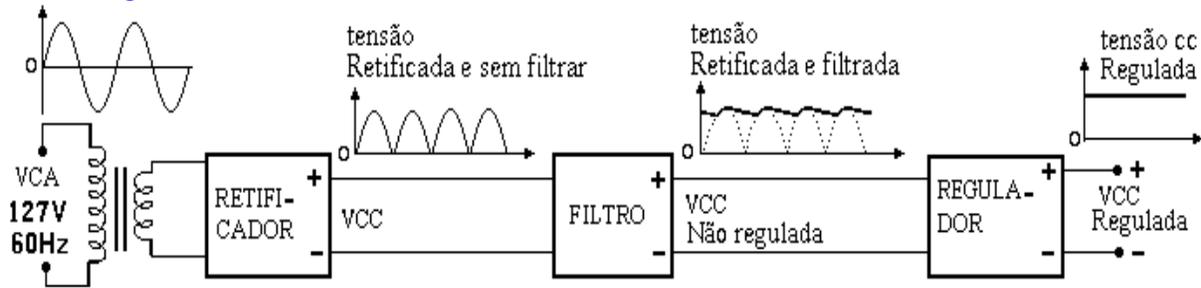
Para os circuitos retificadores com filtro a capacitor estudados desconsiderou-se a queda de tensão nos diodos que é de aproximadamente 0,7V para diodos de Silício. No retificador de meia onda e de onda completa convencional, o pico de tensão no capacitor é o pico de tensão de entrada menos 0,7V isto é, $V_p = V_{ef} \cdot \sqrt{2} - 0,7\text{V}$. Conseqüentemente o valor de V_{CC} será 0,7V abaixo do valor calculado. No retificador em ponte diminui-se 1,4V visto que dois diodos conduzem ao mesmo tempo

$V_p = V_{ef} \cdot \sqrt{2} - 1,4\text{V}$ sendo V_p a tensão de pico no capacitor de filtro.

Ivair José de Souza

Para uma tensão de ondulação muito pequena como o que é exigido pelos circuitos pré-amplificadores de áudio, transmissores de RF, circuitos digitais etc, deve-se utilizar um circuito regulador de tensão na saída do retificador com filtro.

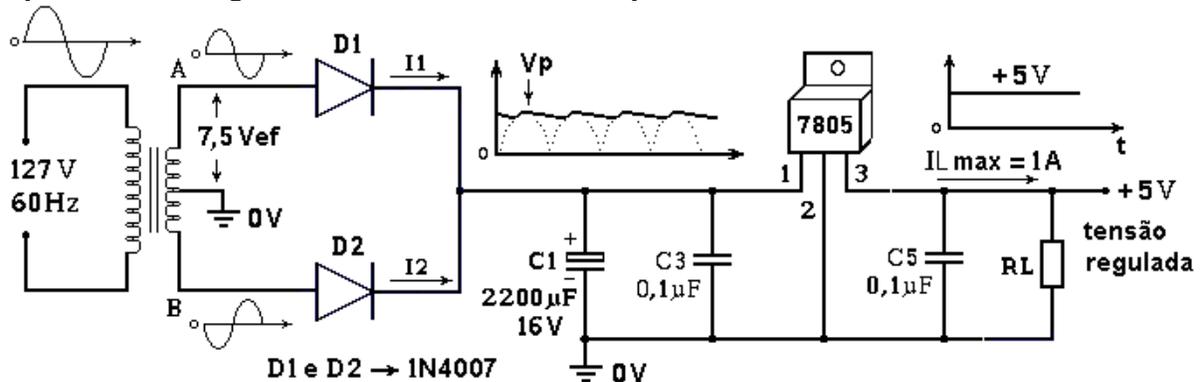
Abaixo, tem-se o diagrama em blocos de uma fonte de alimentação com tensão de saída regulada.



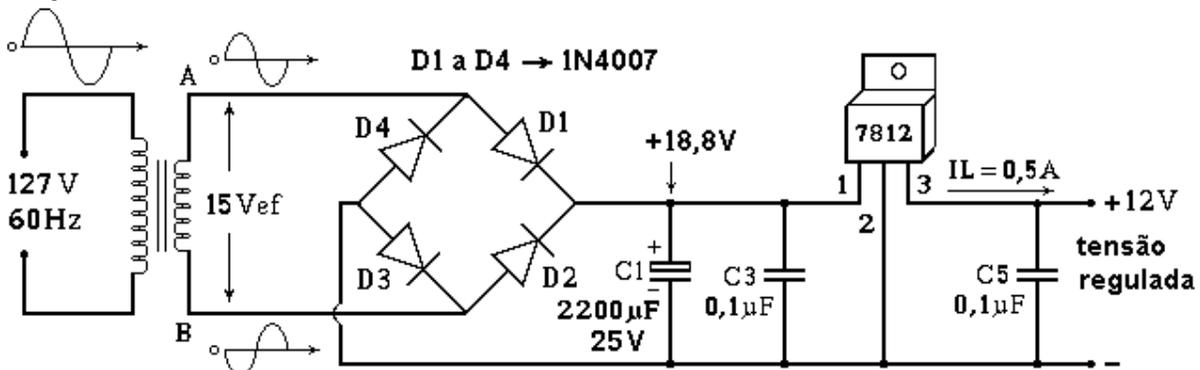
Exemplo de uma fonte regulada com uma tensão de +5V na saída.

O transformador abaixa a tensão alternada de 127V (rede elétrica) para 7,5V. Os diodos retificam esta tensão alternada de 7,5V. A saída dos diodos é uma tensão contínua pulsante. O capacitor C de 2200 μ F filtra esta tensão pulsante e a torna mais próxima de uma tensão contínua pura.

O regulador de tensão (7805) estabiliza a tensão de saída em 5V. A tensão de saída é praticamente igual a uma tensão contínua pura de 5V.



Para uma tensão de +12V na saída, troque o 7805 pelo 7812 e utilize o retificador em ponte como mostrado abaixo.



As características dos reguladores de tensão 78XX são:

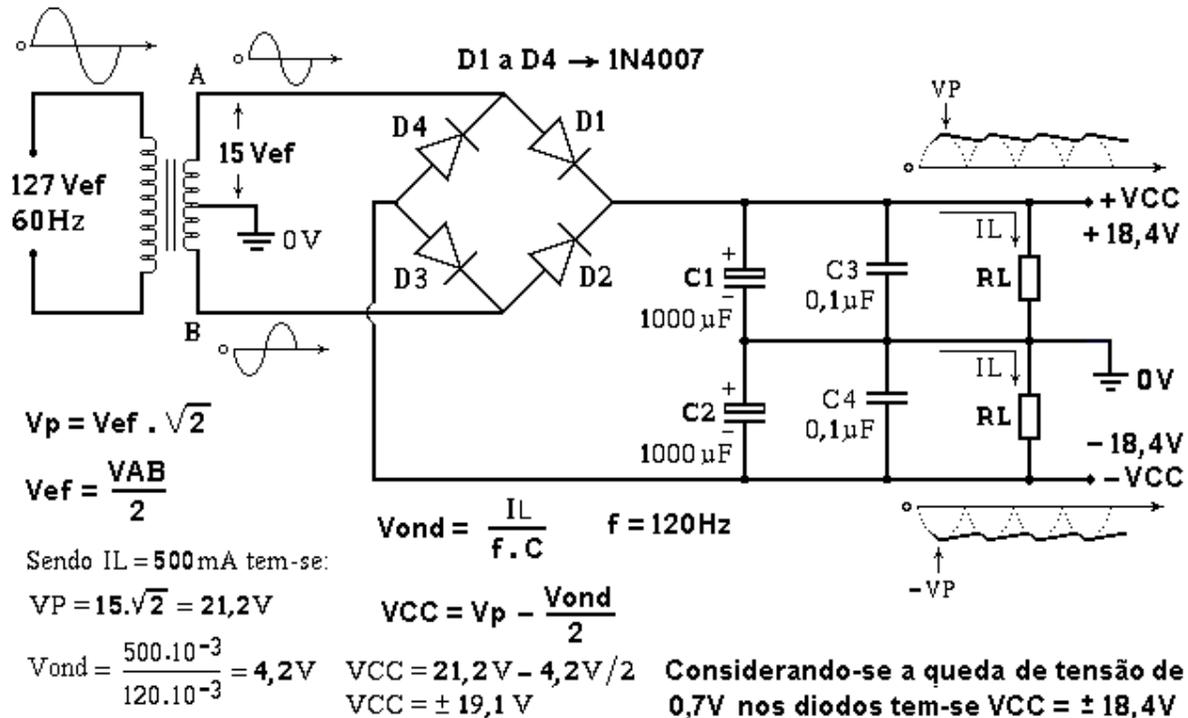
Máxima tensão de entrada = 35 V

Máxima corrente de saída = 1 A

Máxima potência dissipada = 15 W ==> $PD = (V_{ent} - V_{saída}) \cdot I_L$

Tensão mínima de entrada é de aproximadamente 3V acima da tensão de saída

Fonte simétrica com tensão de saída NÃO-REGULADA.



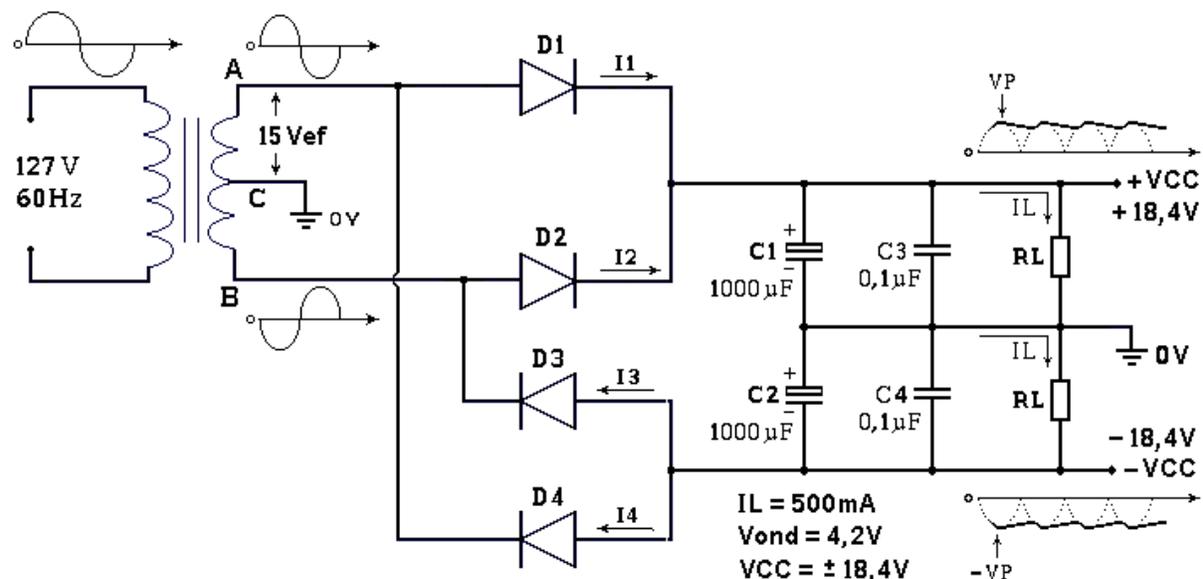
Tem-se dois diodos conduzindo simultaneamente e assim que conduzem carregam C1 e C2 com a tensão de pico $V_p = V_{ef} \cdot \sqrt{2}$.

Para A positivo em relação a B conduzem D1 e D3.

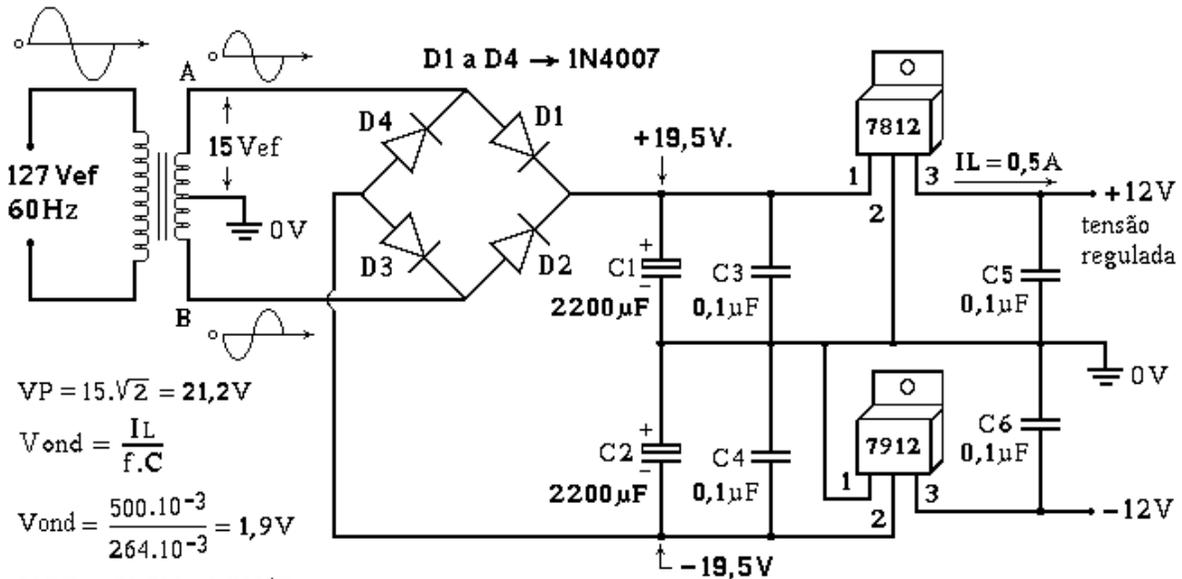
Para A negativo em relação a B conduzem D4 e D2.

C3 e C4 eliminam os ruídos de RF (radiofrequência).

Outra maneira de desenhar o circuito da fonte simétrica acima.



Fonte simétrica com tensão de saída REGULADA.



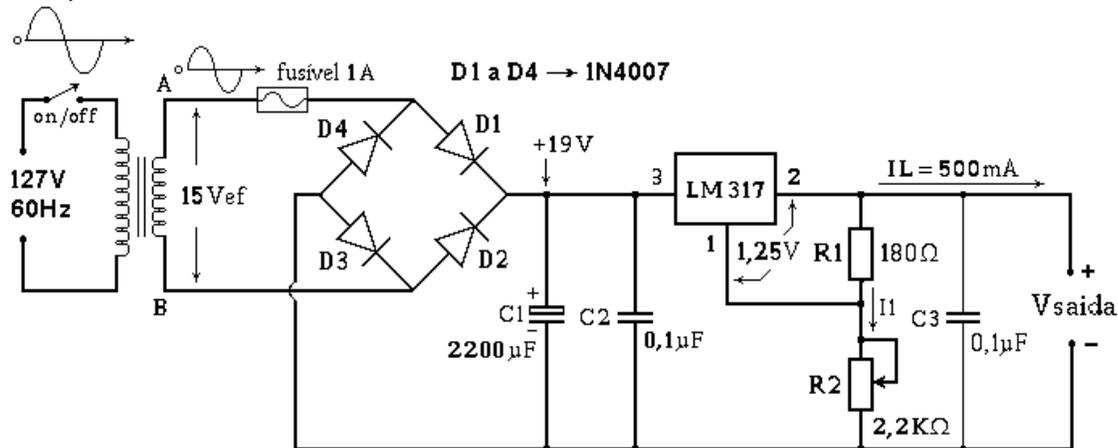
A tensão regulada é de $\pm 12V$. Para uma tensão de $\pm 15V$ utilize os reguladores 7815 e 7915.

Considerando-se a queda de tensão de $0,7V$ nos diodos tem-se $V_{CC} = \pm 19,5V$.

Nos reguladores 78XX, o pino 1 é a entrada e o pino 2 é o comum (ligado ao terra). Nos reguladores 79XX, o pino 2 é a entrada e o pino 1 é o comum (ligado ao terra). O pino 3 é a saída tanto para o 78XX quanto para o 79XX.

Fonte regulada e ajustável de 1,25V a 16,5V com o LM317

O circuito integrado regulador de tensão LM317 permite ajustar a tensão de saída de 1,25V a 37V.



$$V_{saida} = I_1 \cdot R_1 + I_1 \cdot R_2 \quad I_1 = 1,25V / R_1$$

$$V_{saida} = \frac{1,25V}{R_1} \cdot R_1 + \frac{1,25V}{R_1} \cdot R_2 = 1,25 \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

$$V_{saida} = 1,25 \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right)$$

$$V_{saida} = 1,25V \text{ a } 16,5V$$



1 → Ajuste da tensão de saída

2 → Saída de tensão regulada

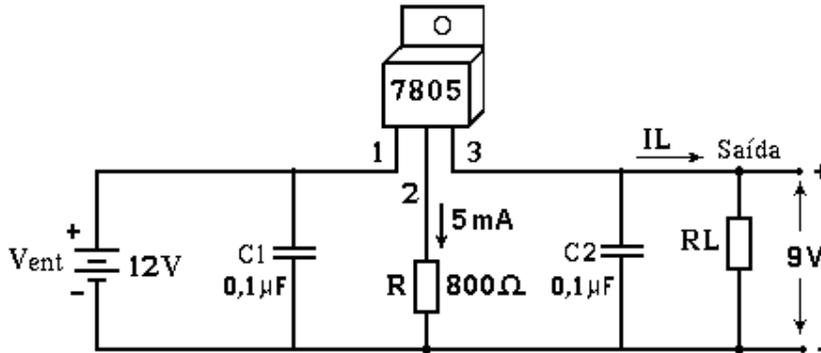
3 → Entrada de tensão → $3V \leq (V_{ent} - V_{saída}) \leq 40V$

Tensão diferencial entrada-saída máxima = 40V

Potência máxima dissipada = 15W → $PD = (V_{ent} - V_{saída}) \cdot I_L$

Corrente máxima de saída = 1,5A

Fonte regulada com uma tensão de +9V na saída utilizando o 7805.



Ligando-se um resistor R em série com o pino 2 do regulador 7805 obtém-se uma tensão regulada maior do que 5V.

A corrente no pino 2 é constante e igual a 5mA.

$$V_{saída} = 5V + V_R \Rightarrow V_{saída} = 5V + 800\Omega \cdot 5mA \Rightarrow V_{saída} = 5V + 4V = 9V.$$

Para se ter $V_{saída} = 7,5V$ o valor de R será:

$$R = (V_{saída} - 5V) / 5mA$$

$$R = (7,5V - 5V) / 5mA \Rightarrow R = 2,5V / 5mA \Rightarrow R = 500\Omega$$

Para ajustar a tensão de saída acima de 5V, utilize um resistor variável para o resistor R. A tensão mínima de entrada é de aproximadamente 3V acima da tensão de saída.

$$V_{ent}(\min) = V_{saída} + 3V$$