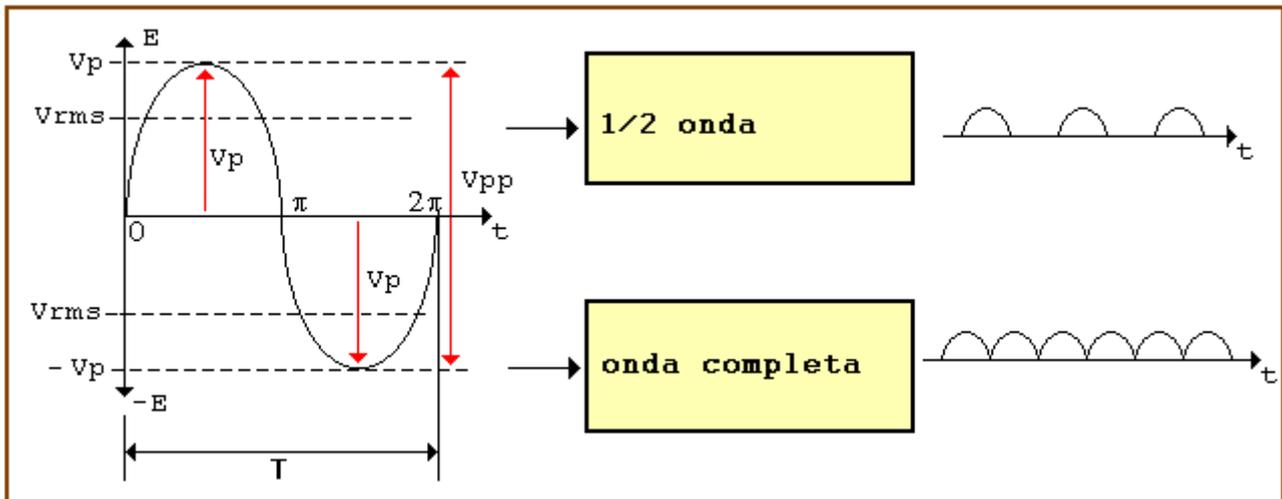


CIRCUITOS RETIFICADORES

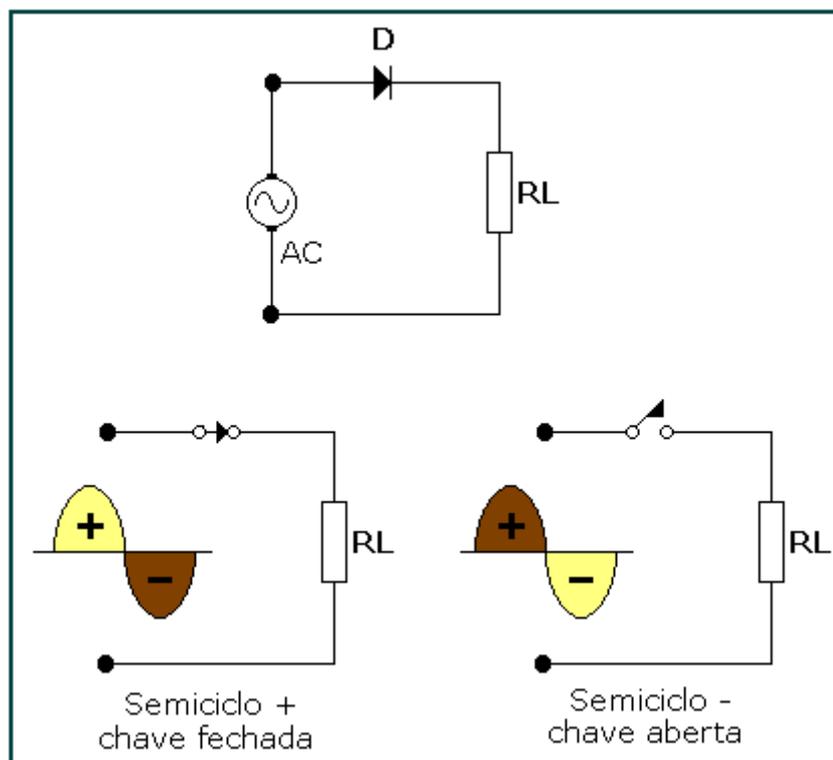
Basicamente, um retificador tem a finalidade de converter uma tensão alternada em uma tensão contínua.

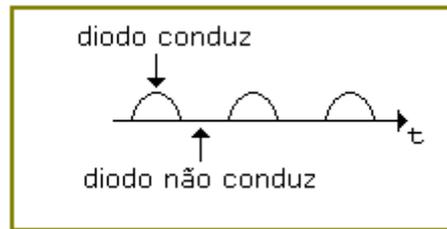
Classificam-se em: retificadores de "meia onda" e retificadores de "onda completa".

O pré-requisito básico para entender o funcionamento dos retificadores é o conhecimento do *diodo como chave eletrônica*, assunto já abordado em aulas anteriores.



RETIFICAÇÃO DE MEIA ONDA





1) Durante o semiciclo positivo o diodo está diretamente polarizado e comporta-se como uma chave eletrônica fechada, portanto, haverá corrente na carga, durante o tempo de duração do semiciclo positivo.

2) Durante o semiciclo negativo o diodo estando reversamente polarizado, comporta-se como uma chave eletrônica aberta, portanto, não haverá corrente na carga.

O valor médio da tensão na carga será calculado pela fórmula:

$$V_{RL} = (V_p - V_d) \times 0,318 \quad \text{ou} \quad (V_p - V_d) / \pi$$

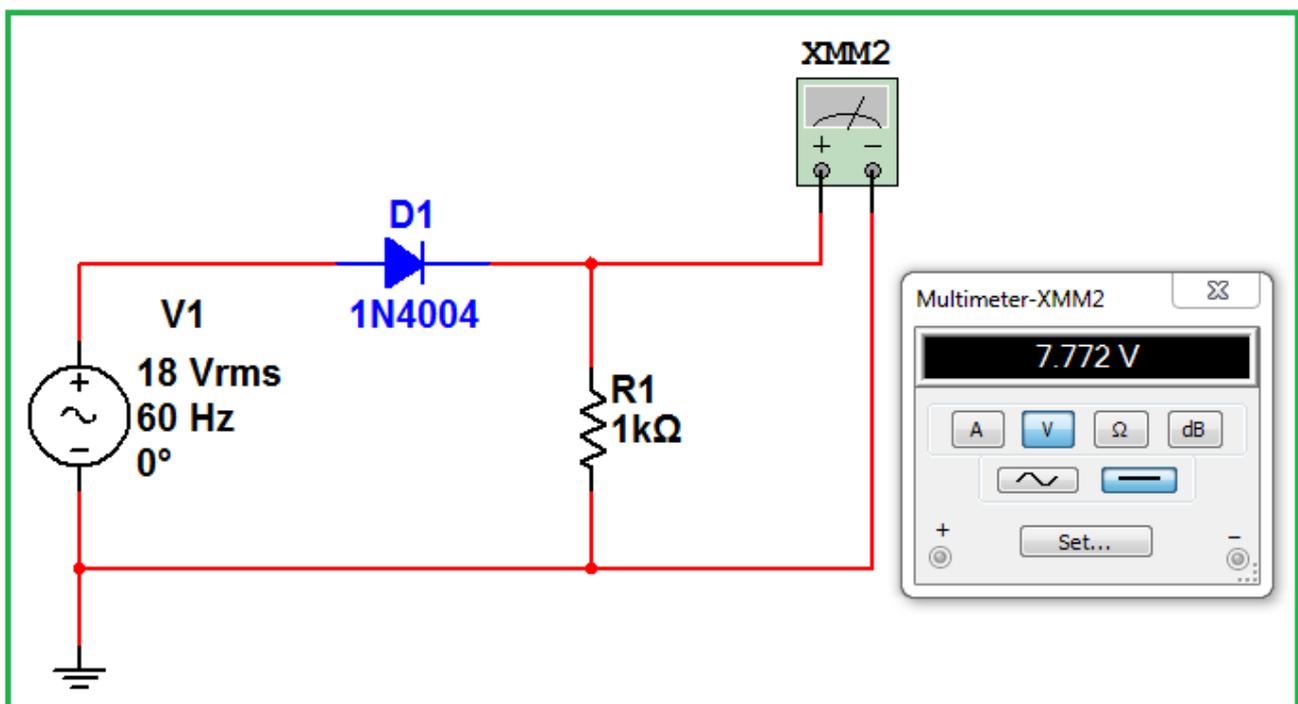
V_d é a queda de tensão no diodo quando o mesmo opera como chave eletrônica fechada (valor típico para cálculos = 0,7 volts)

Supondo uma tensão de 18Vrms a ser retificada, teremos:

$$V_p = 18 \times 1,414 = 25,38 \text{ volts}$$

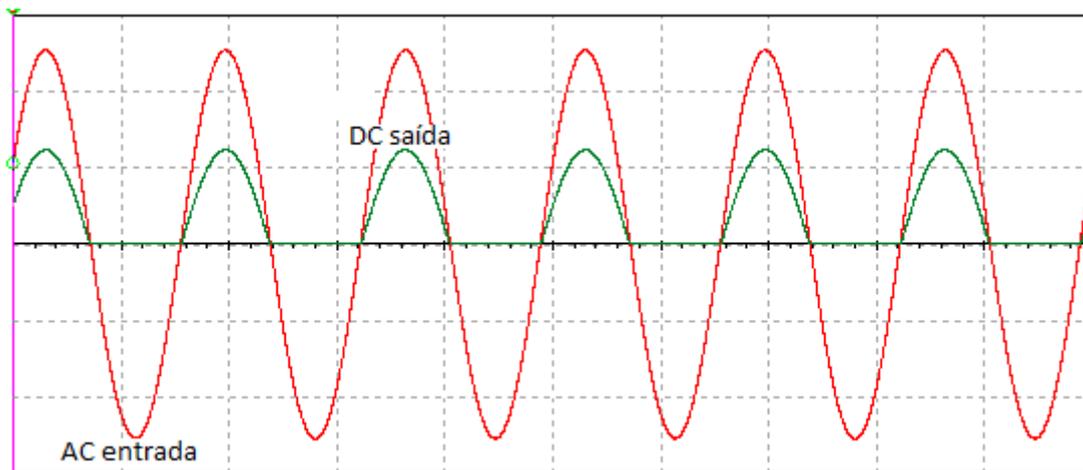
$$25,38 - 0,7 = 24,68 \text{ volts}$$

$$24,68 \times 0,318 = 7,84 \text{ volts}$$



A figura a seguir mostra as formas de onda vistas no osciloscópio. Observe que a tensão DC na saída só ocorre quando D1 está diretamente polarizado.

Durante o semiciclo negativo não há tensão na saída, devido o diodo estar operando como uma chave eletrônica aberta.



As tensões mostradas estão calibradas em amplitude:

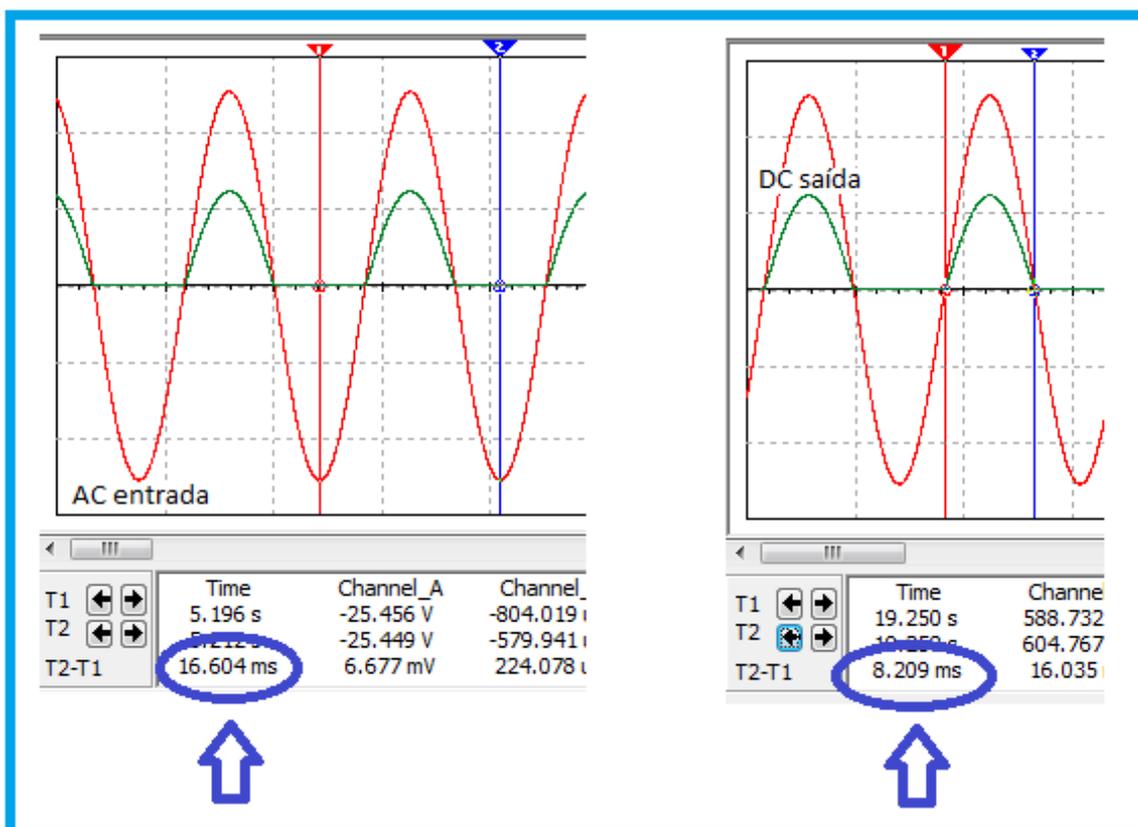
Tensão de entrada (Vpp) – calibração 10V/div

Tensão DC saída (Vp) – calibração 20V/div

A figura abaixo mostra o período da tensão a ser retificada e a tensão DC na saída.

Observe que o diodo conduz somente durante meio período da frequência de 60Hz (chave eletrônica fechada).

Logo, durante o mesmo tempo o diodo estará operando como chave eletrônica aberta.



Calculando a frequência da tensão de entrada (AC): $1/16,604\text{ms} \approx 60\text{Hz}$

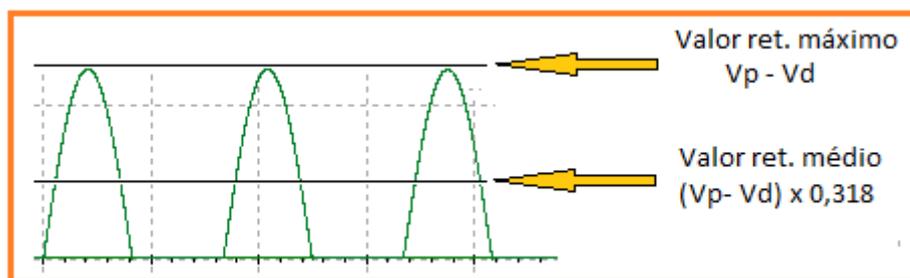
CIRCUITO DE FILTRO

Vimos que a tensão na saída retificada presente na carga é uma tensão contínua, porém flutuante, ou seja, não é uma tensão contínua pura.

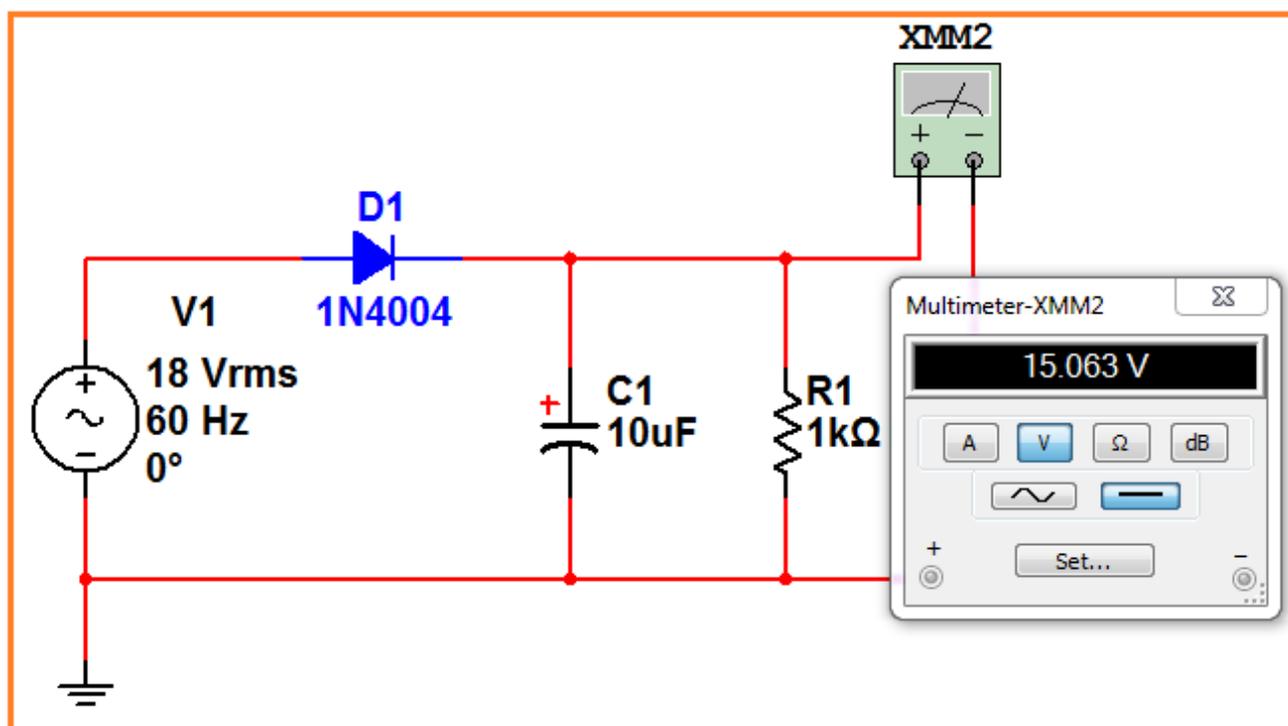
A maioria das aplicações exige tensão contínua pura, ou pelo menos, bem próxima da tensão contínua pura.

Essa é a função do circuito de filtro, normalmente composto de apenas um capacitor para aplicações mais comuns. Em aplicações mais sofisticadas, como computadores, a filtragem é feita por circuitos eletrônicos.

A figura abaixo mostra a tensão DC média obtida na saída de um retificador de 1/2 onda sem filtro.



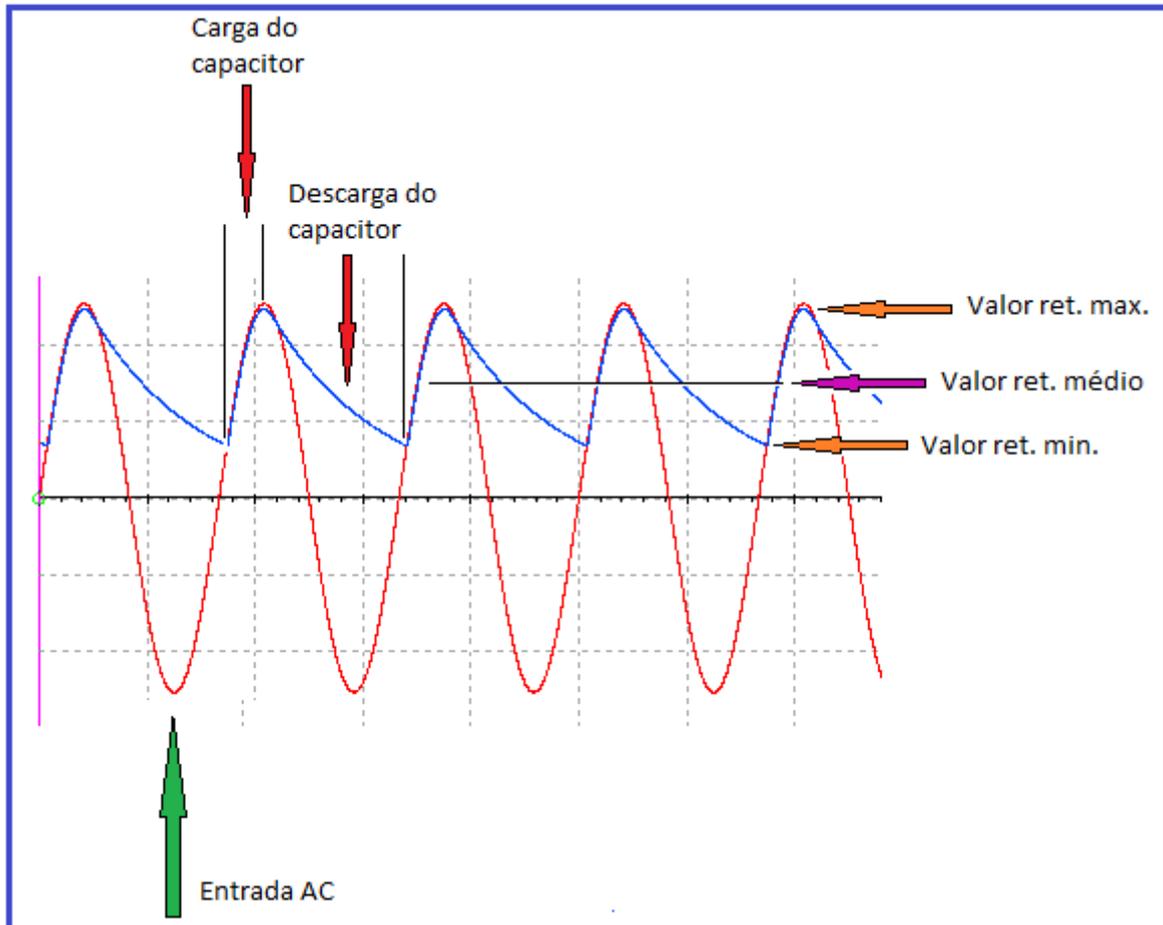
A ação do filtro:



Observe que o capacitor de 10uF atua como um filtro. Com isso a tensão disponível na carga tende a subir e aproximar-se do valor de pico da tensão de entrada.

O capacitor forma então em conjunto com a carga uma constante de tempo RC. No valor de pico de tensão o capacitor tende a carregar-se com esse valor e no semiciclo em que o diodo está despolarizado, não havendo tensão, o capacitor tende a descarregar-se através da carga.

Veja a figura a seguir:



A diferença entre as amplitudes do valor retificado máximo e o valor retificado mínimo é denominada "tensão de ripple".

Com boa aproximação podemos calcular o valor da tensão média retificada, que é a tensão que estará disponível na carga.

$$\text{Valor ret. médio} = (\text{valor ret. max.} + \text{valor ret. mínimo}) / 2$$

EFEITO DO CAPACITOR DE FILTRO NA TENSÃO DE RIPPLE

Como foi dito anteriormente, o capacitor e a carga formam uma constante de tempo que deve ser levada em conta principalmente durante o processo de descarga do capacitor, quando da ausência da tensão em virtude da polarização reversa do diodo.

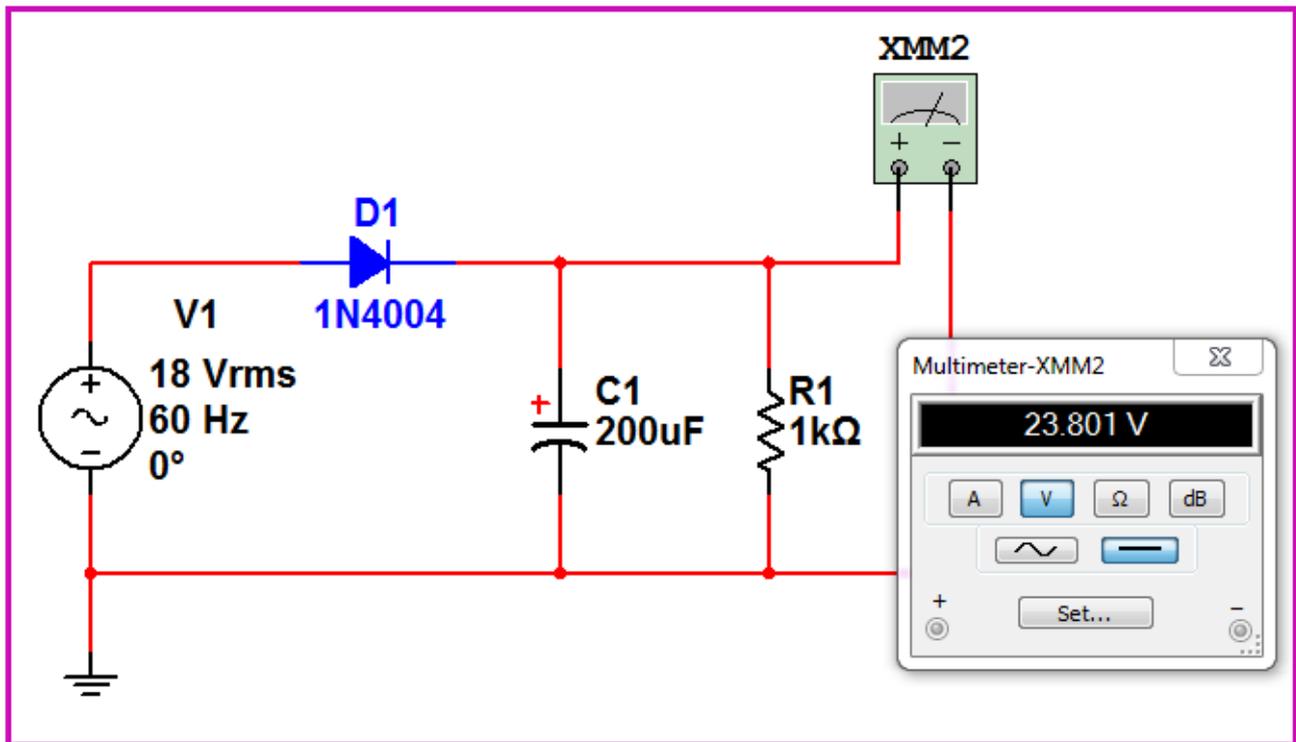
Ao aumentar o valor do capacitor de filtro, a tendência é o valor retificado mínimo aumentar e com isso aumentar também o valor retificado médio, que estará presente na carga.

Como o capacitor carrega-se no valor máximo da tensão, então esse valor não se altera.

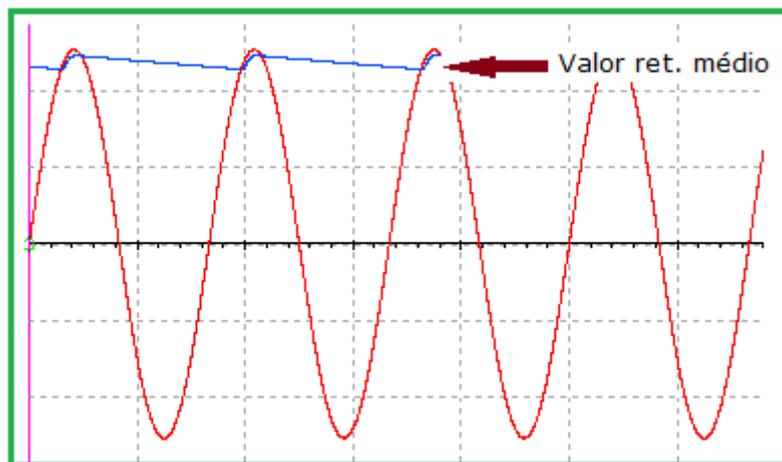
Veja a figura a seguir, onde o valor do capacitor de filtro foi aumentado para 200uF, em relação ao circuito anterior.

Observe que a tensão na carga também sofreu um aumento, isto porque o valor médio retificado também aumentou.

Compare os dois circuitos e os dois gráficos das formas de onda.



Observe que houve uma acentuada diminuição da tensão de ripple.



É importante salientar que o inverso também é verdadeiro, ou seja, diminuição do valor do resistor de carga (equivale dizer aumentar a carga).

A diminuição do resistor de carga implica também na diminuição da constante de tempo entre o capacitor e a carga, aumentando a tensão de ripple a diminuindo em consequência a tensão disponível na carga.

Assim:

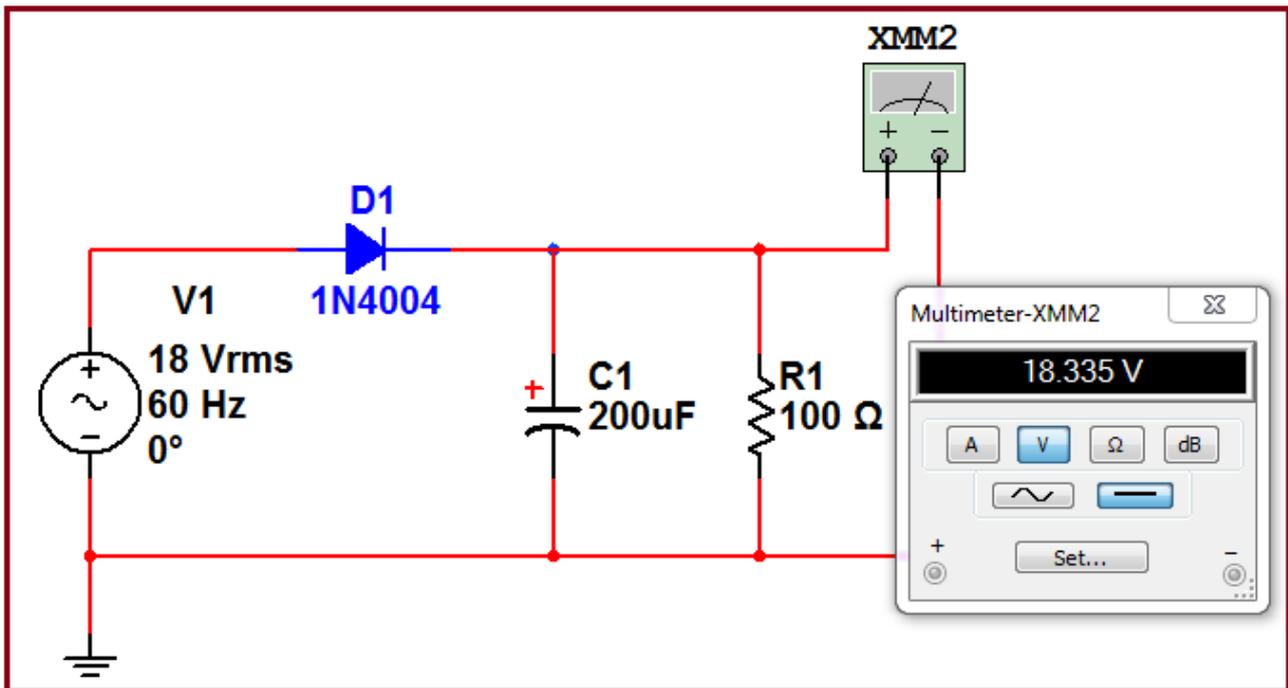
Aumento do capacitor de filtro:

Aumenta a constante de tempo --> diminui a tensão de ripple

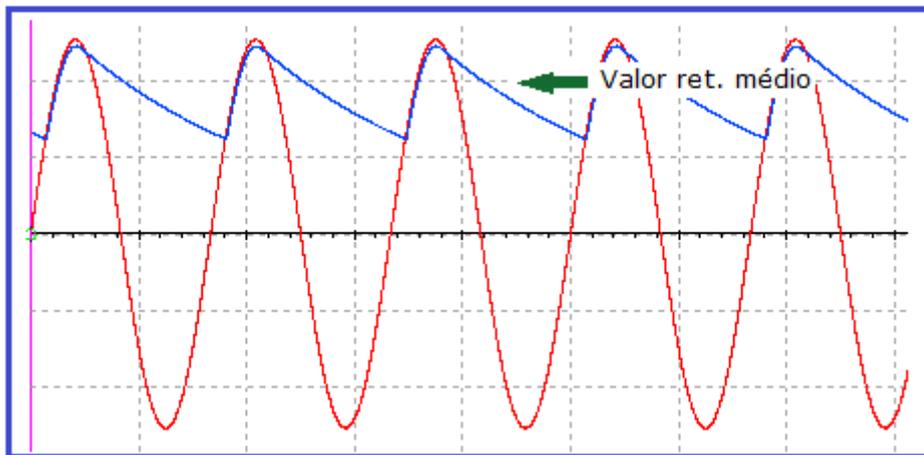
Diminuição do valor do resistor de carga:

Diminui a constante de tempo --> aumenta a tensão de ripple

Veja nas figuras a seguir o mesmo circuito com seu resistor de carga diminuído de 1k para 100 ohms



Observe que houve um aumento da tensão de ripple acarretando portanto, uma diminuição da tensão na carga.



Daí então, podemos concluir:

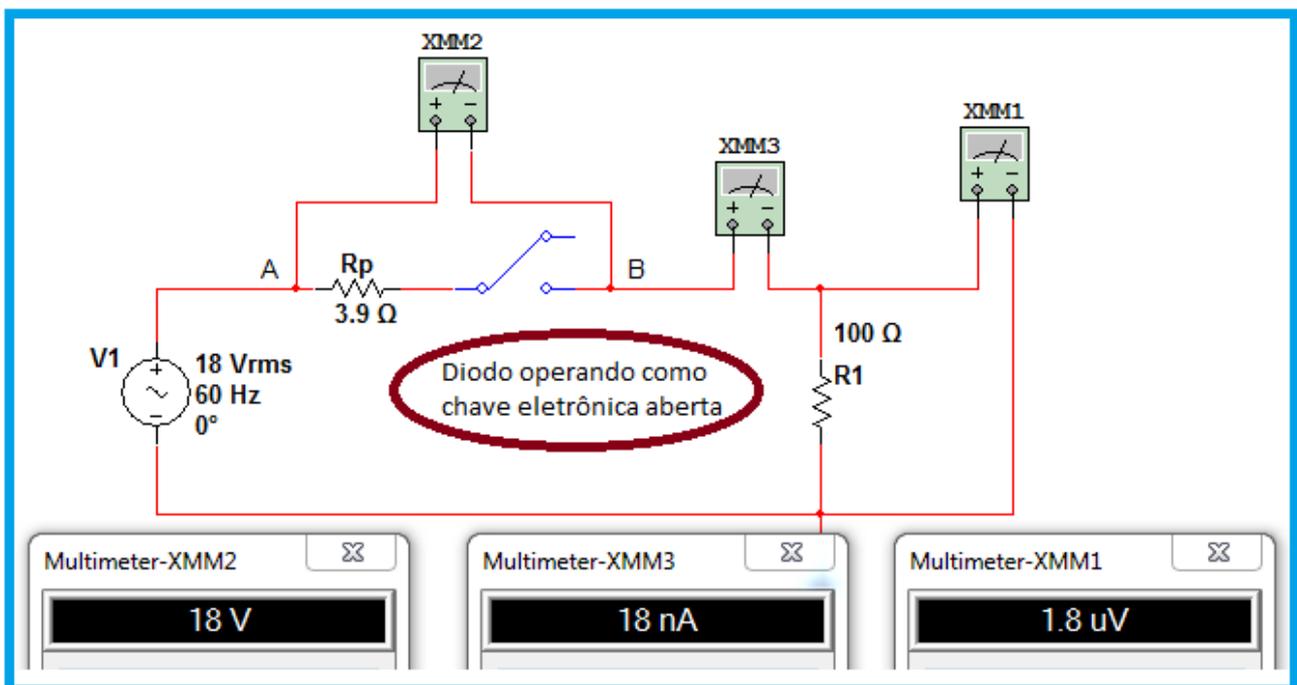
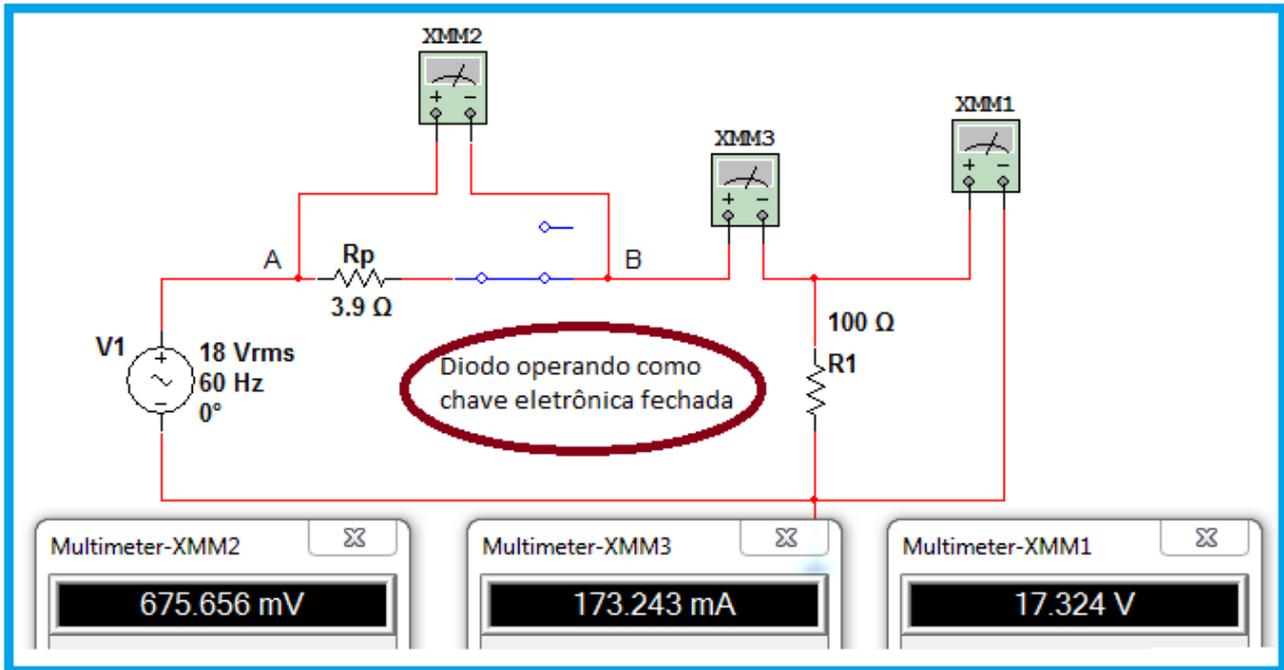
Esse tipo de retificador é eficaz quando desejamos alimentar uma carga que tenha um valor constante.

Para cargas variáveis como por exemplo, amplificadores de áudio de grande potência, um retificador de onda completa é mais eficiente.

Podemos afirmar que ao diminuir o valor do resistor de carga (aumento da carga), a corrente exigida do retificador será maior. Daí então é preciso tomar os devidos cuidados para que não sejam ultrapassados os parâmetros dos componentes, principalmente do diodo retificador no que diz respeito a corrente que o mesmo pode suportar, bem como a tensão sobre o mesmo (*tensão de trabalho*) quando o mesmo está reversamente polarizado.

Na retificação de 1/2 onda o diodo tem que suportar toda a corrente que a carga exigir, quando polarizado diretamente (chave eletrônica fechada).

Quando polarizado reversamente, deve suportar em seus terminais o valor de pico da tensão de entrada, visto que opera como chave eletrônica aberta. Veja as ilustrações a seguir:



Observe que quando o diodo opera como uma chave eletrônica aberta, entre os terminais A e B (circuito equivalente do diodo) teremos a tensão de entrada.

Como a tensão na entrada é 18 volts (RMS), então a tensão de pico entre as extremidades A e B será: $18 \times 1,41 = 25,38$ volts.

Observe atentamente as tensões e correntes nos instrumentos (figuras acima).

Se quisermos construir um retificador de 1/2 onda a partir da rede doméstica de 110 volts, a tensão de trabalho desse diodo deverá ser de no mínimo: $110 \times 1,41 = 155,1$ volts.

Para melhor entender, suponhamos que queiramos alimentar uma carga de 40 ohms com uma tensão contínua de 40 volts, através de um retificador de 1/2 onda sem filtro.

1. corrente que será exigida do diodo:

$$I_d = 40 \text{ volts} / 40 \text{ ohms} = 1 \text{ ampère}$$

2. para calcular a tensão de entrada:

$$\text{Valor retificado médio} = (V_p - V_d) \times 0,318$$

$$40 = 0,318V_p - 0,318V_d$$

Supondo $V_d = 0,7$ volts, então:

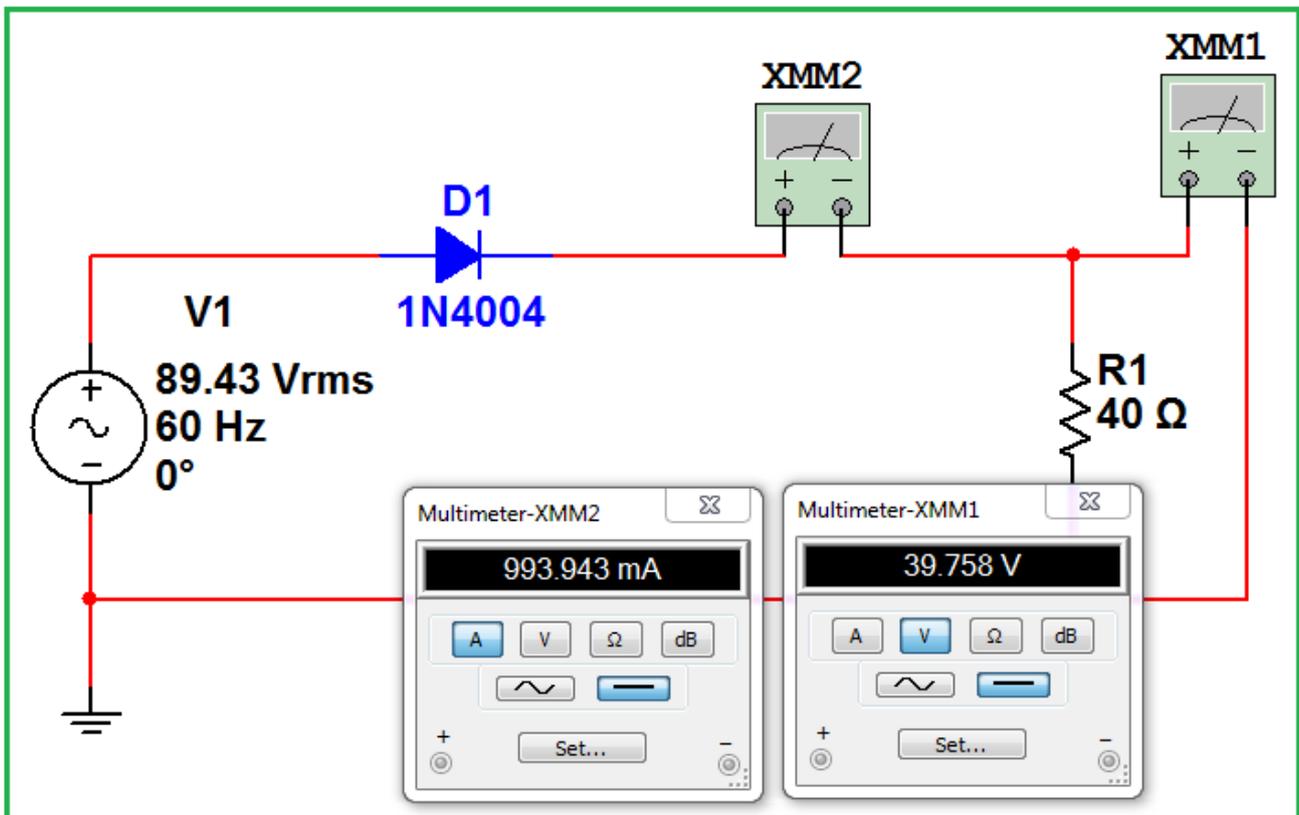
$$40 = 0,318V_p - 0,318 \times (0,7)$$

$$40 = 0,318V_p - 0,223 \text{ volts}$$

$$40,223 \text{ volts} = 0,318V_p$$

$$V_p = 40,223 / 0,318 = 126,49 \text{ volts}$$

Então, o diodo deve suportar uma tensão de trabalho de 126,49 volts e uma corrente de 1 ampère.



O valor de pico de 126,49 volts, corresponde a 89,43 volts RMS

$$126,49 V_p \times 0,707 = 89,43 V_{rms}$$

As informações sobre as características elétricas de um diodo, são fornecidas pelo fabricante através de uma folha de dados (*data-sheet*).

O diodo 1N4004, por exemplo, possui as seguintes características:

tensão reversa de pico: 400 volts

tensão DC reversa: 400 volts

tensão direta: 0,5 a 1,1 volts (depende da temperatura)

corrente DC média: 1A

corrente DC reversa: 5 a 10uA (depende da temperatura)

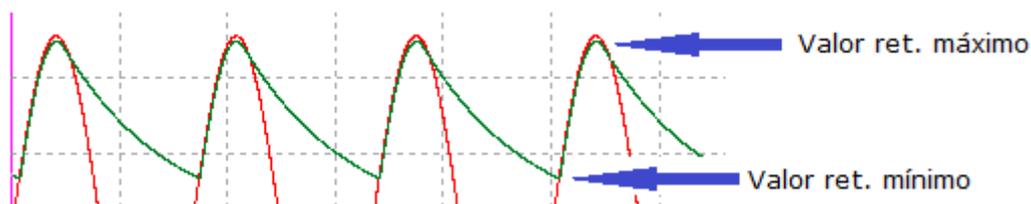
Isto significa que o mesmo pode ser utilizado para retificar uma tensão alternada cujo valor não ultrapasse 400 volts de pico e alimente uma carga cuja corrente não ultrapasse 1 ampère.

EXERCÍCIO RESOLVIDO:

Na saída de um retificador foi obtida a leitura através de um osciloscópio:

Valor ret. máximo = 115,8 volts

Valor ret. mínimo = 106,8 volts



Esse retificador deve alimentar uma carga de 200 ohms.

Calcular:

- 1) a corrente na carga
- 2) a potência desenvolvida na carga

CORRENTE NA CARGA:

Teremos na carga uma tensão que corresponde ao valor retificado médio

$$V_{ret \text{ médio}} = (\text{valor ret. máximo} + \text{valor ret. mínimo}) / 2$$

$$115,8 + 106,8 = 222,6 \text{ volts}$$

$$222,6 / 2 = 111,3 \text{ volts}$$

A corrente na carga será de 556,5mA

POTÊNCIA NA CARGA:

$$P = R \cdot I^2 = 200 \times (556,5\text{mA})^2$$

$$61,94 \text{ watts}$$

A potência na carga será: 61,94 watts

RETIFICAÇÃO DE ONDA COMPLETA

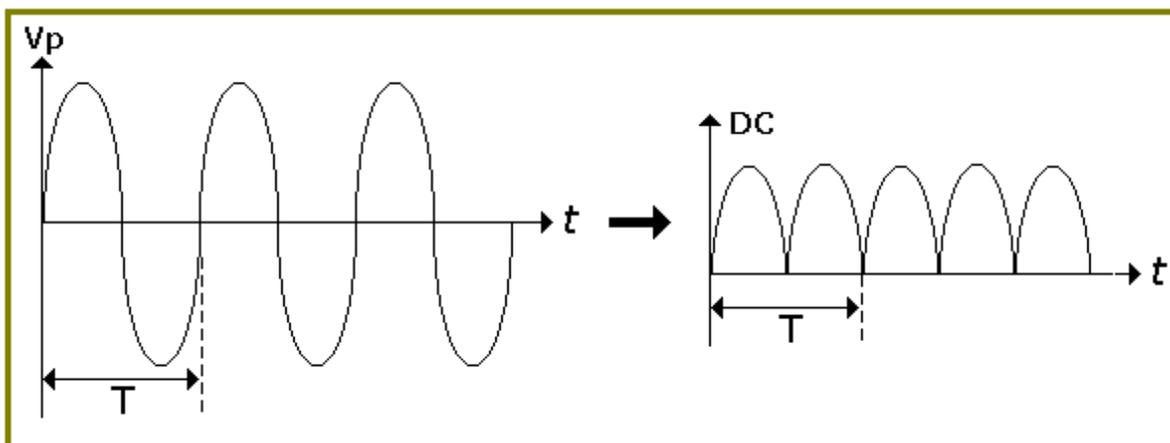
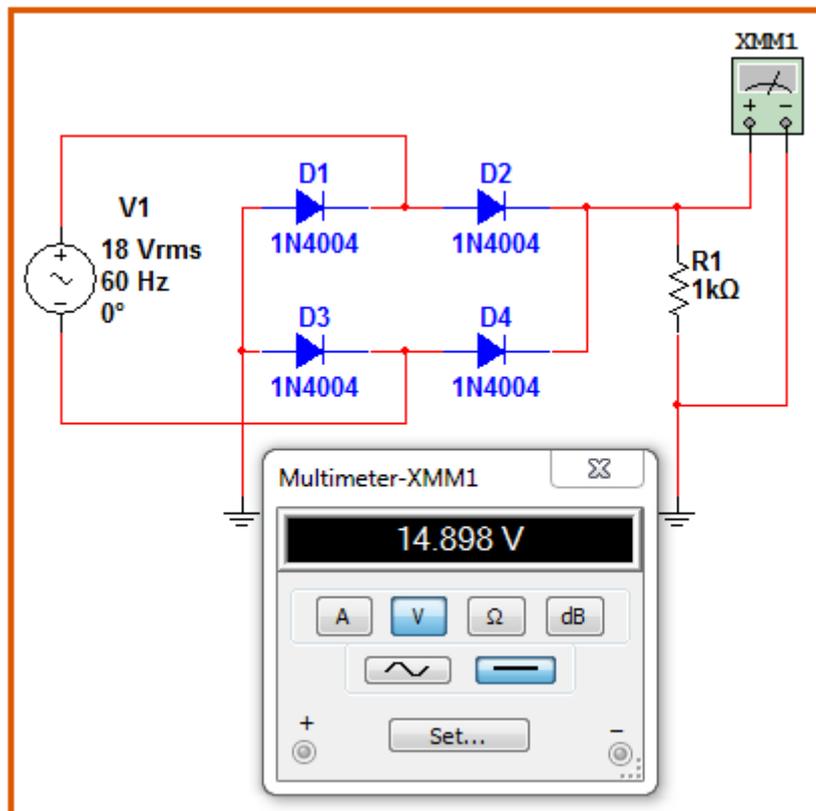
No retificador de onda completa são aproveitados os dois semiciclos da tensão alternada. Dois tipos de circuitos retificadores mais usados:

- retificador de onda completa em ponte
- retificador de onda completa com ponto de neutro

São mais eficientes do que os retificadores de 1/2 onda no que diz respeito à estabilidade.

RETIFICADOR EM PONTE:

Composto de 4 diodos, onde a cada um dos semiciclos dois diodos são polarizados diretamente e dois reversamente.



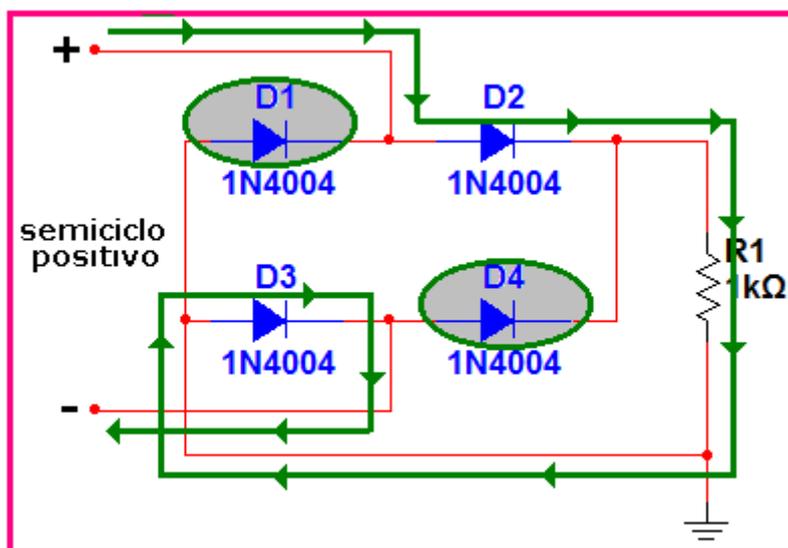
Isto significa que os dois semiciclos da tensão alternada serão utilizados no processo de retificação, daí a denominação de *retificação de onda completa*.

Isto faz com que a tensão entregue na saída (valor retificado médio) seja maior, comparando-se com o retificador de 1/2 onda.

COMO FUNCIONA?

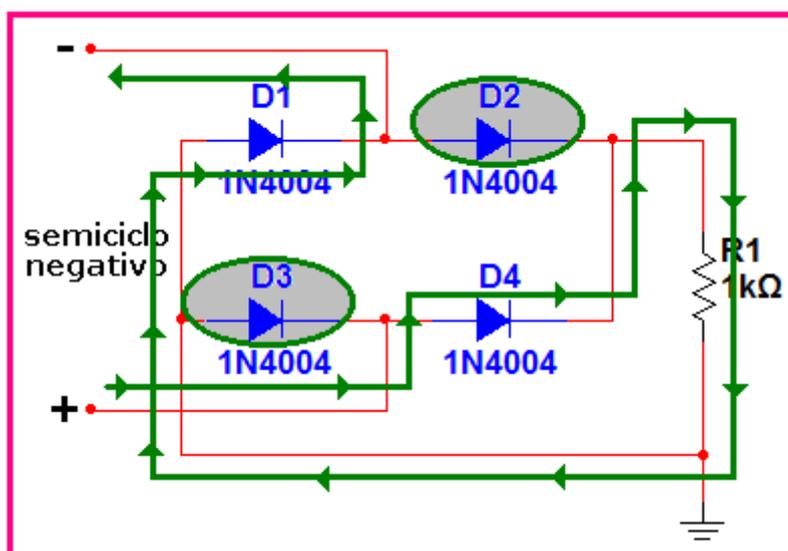
Durante o semiciclo positivo, D2 e D3 estarão polarizados diretamente e, portanto, operando como chave eletrônica fechada.

polo (+) --- D2 --- carga --- D3 --- polo (-)



Durante o semiciclo negativo, D1 e D4 estarão polarizados diretamente e, portanto, operando como chave eletrônica fechada.

polo (+) --- D4 --- carga --- D1 --- polo (-)



Observe que durante os dois semiciclos o sentido da corrente na carga é o mesmo (sentido convencional da corrente).

Observe ainda que, a cada semiciclo dois diodos estão polarizados diretamente.

Como estão ligados em série então para efeito de cálculo do valor médio da tensão retificada na carga, o valor da tensão quando da polarização direta (V_d) deverá ser sobrado. Assim:

$$\text{Valor ret. médio na carga} = (V_p - 2V_d) \times 0,636$$

ou

$$\text{Valor ret. médio na carga} = (V_p - 2V_d) \times (2/\pi)$$

Considerando a tensão de entrada 18Vrms, então a tensão retificada média na carga será:

$$V_p = 18 \times 1,41 = 25,38 \text{ volts}$$

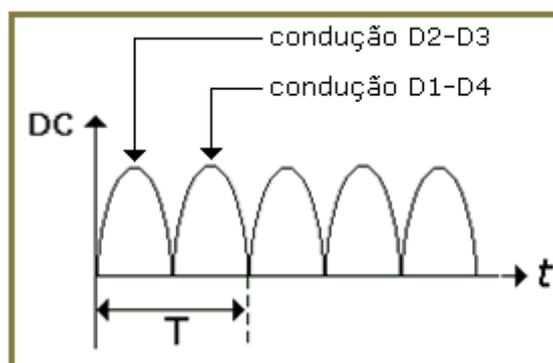
$$V_p - 2V_d = 25,38 - 1,4 = 23,98 \text{ volts}$$

$$23,98 \times 0,636 = 15,25 \text{ volts}$$

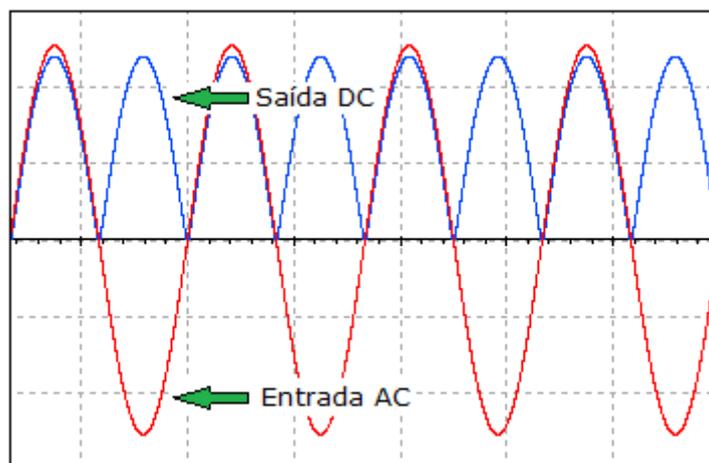
Ao comparar esse valor com o calculado anteriormente no retificador de 1/2 onda, podemos verificar que aumentou consideravelmente (podemos dizer que dobrou).

7,84 volts (calculado para 1/2 onda)

15,25 volts (calculado para onda completa)



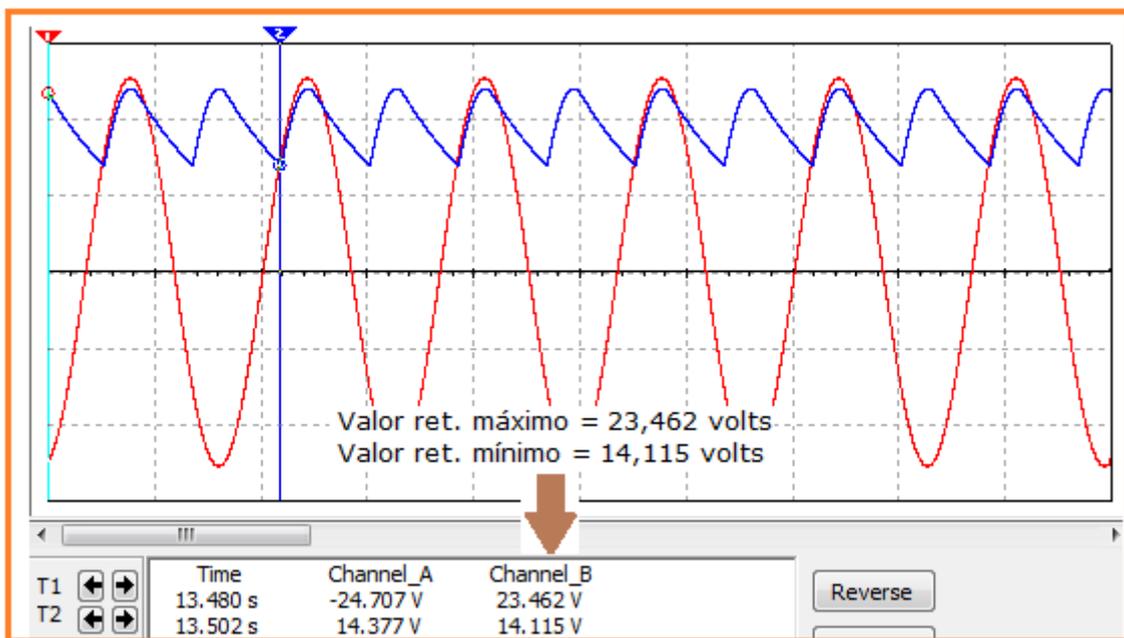
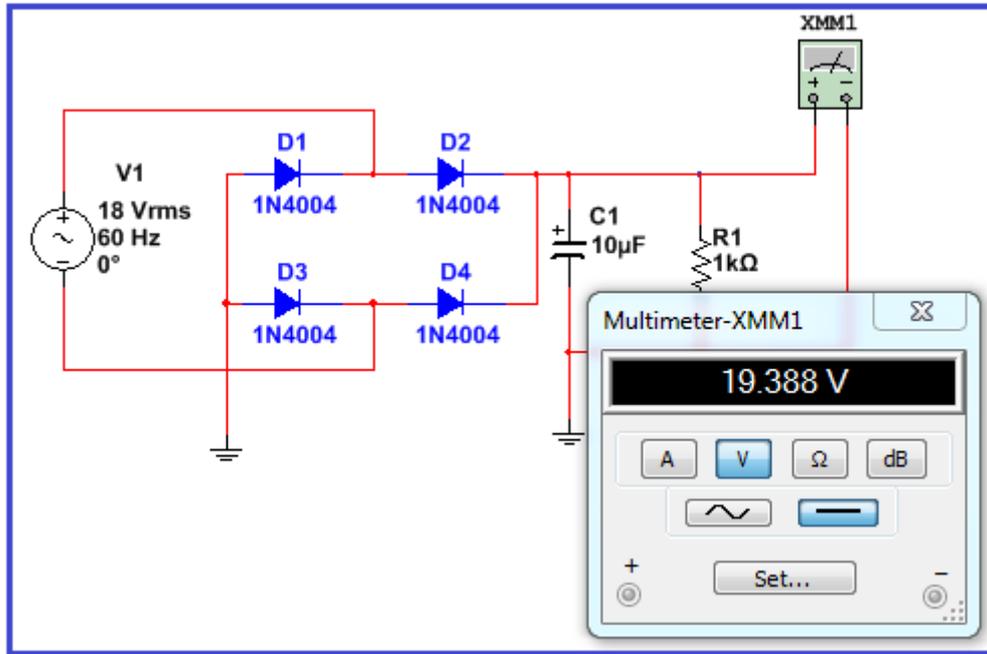
Tensões de entrada e saída vistas no osciloscópio:



EFEITO DO CAPACITOR DE FILTRO:

Da mesma forma como no retificador de 1/2 onda, o capacitor forma uma constante de tempo RC com a carga.

Analisando o funcionamento do retificador com um capacitor de filtro de 10uF.



A partir das medidas efetuadas no osciloscópio podemos calcular com boa aproximação, o valor retificado médio presente na carga:

$$V_m = (\text{valor ret. max.} + \text{valor ret. min.}) / 2$$

$$V_m = 23,462 + 14,115 = 37,577 / 2$$

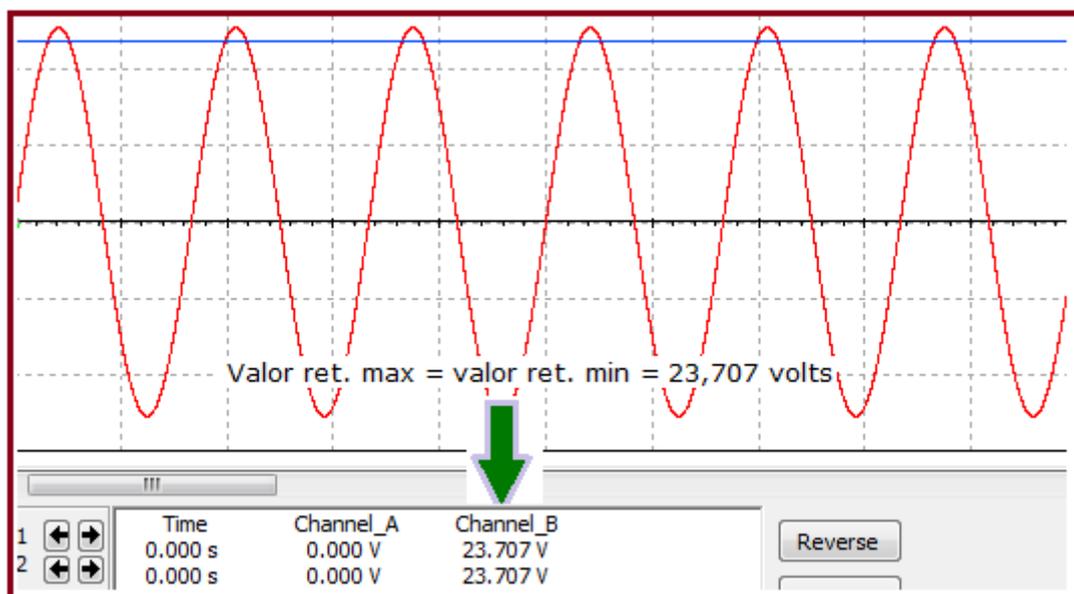
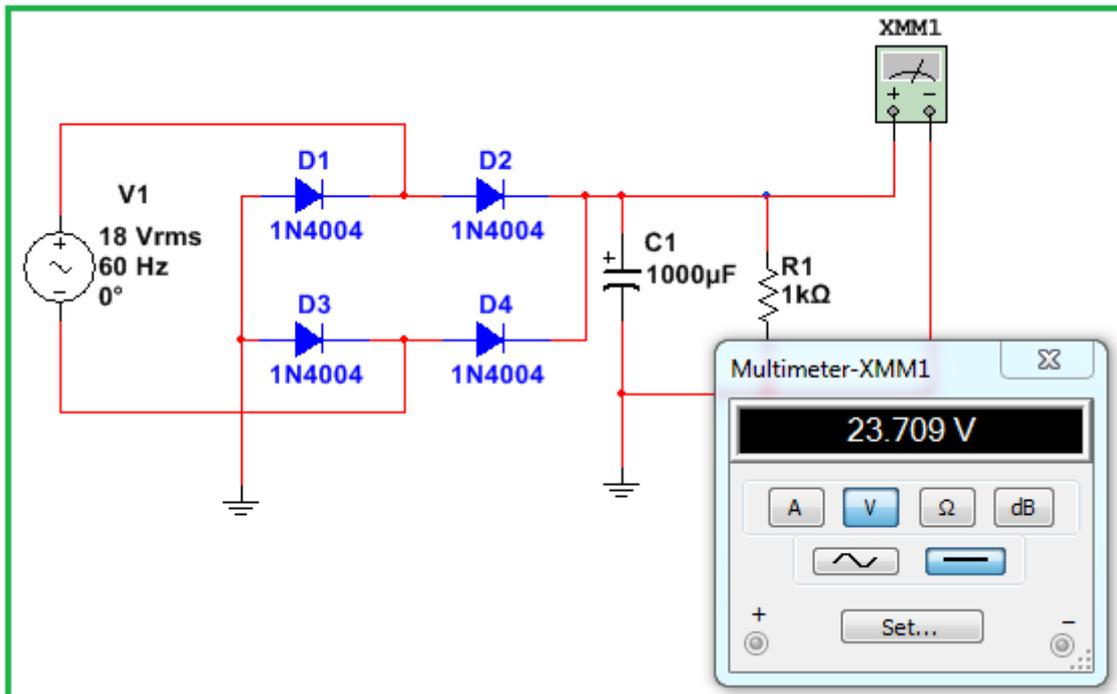
$$V_m = 18,789 \text{ volts}$$

Diferença entre valor medido e calculado: $19,388 - 18,789 = 599\text{mV}$

Percentual: 3,089% (ótima aproximação)

Como vimos anteriormente, a diferença entre os valores retificados máximo e mínimo denomina-se *tensão de ripple*.

Ao diminuir a tensão de ripple, aumenta o valor retificado médio na carga e isto pode ser feito aumentando-se o valor do capacitor de filtro. Veja na figura abaixo a simulação do mesmo circuito, porém com o capacitor de filtro alterado para 1.000uF.



Observe que a tensão de ripple é desprezível. Assim, podemos efetuar o cálculo do valor retificado médio na saída, desprezando a tensão de ripple:

$$V_m = V_p - 2V_d$$

$$V_m = (18 \times 1,41) - 1,4$$

$$V_m = 25,38 - 1,4 = 23,98 \text{ volts}$$

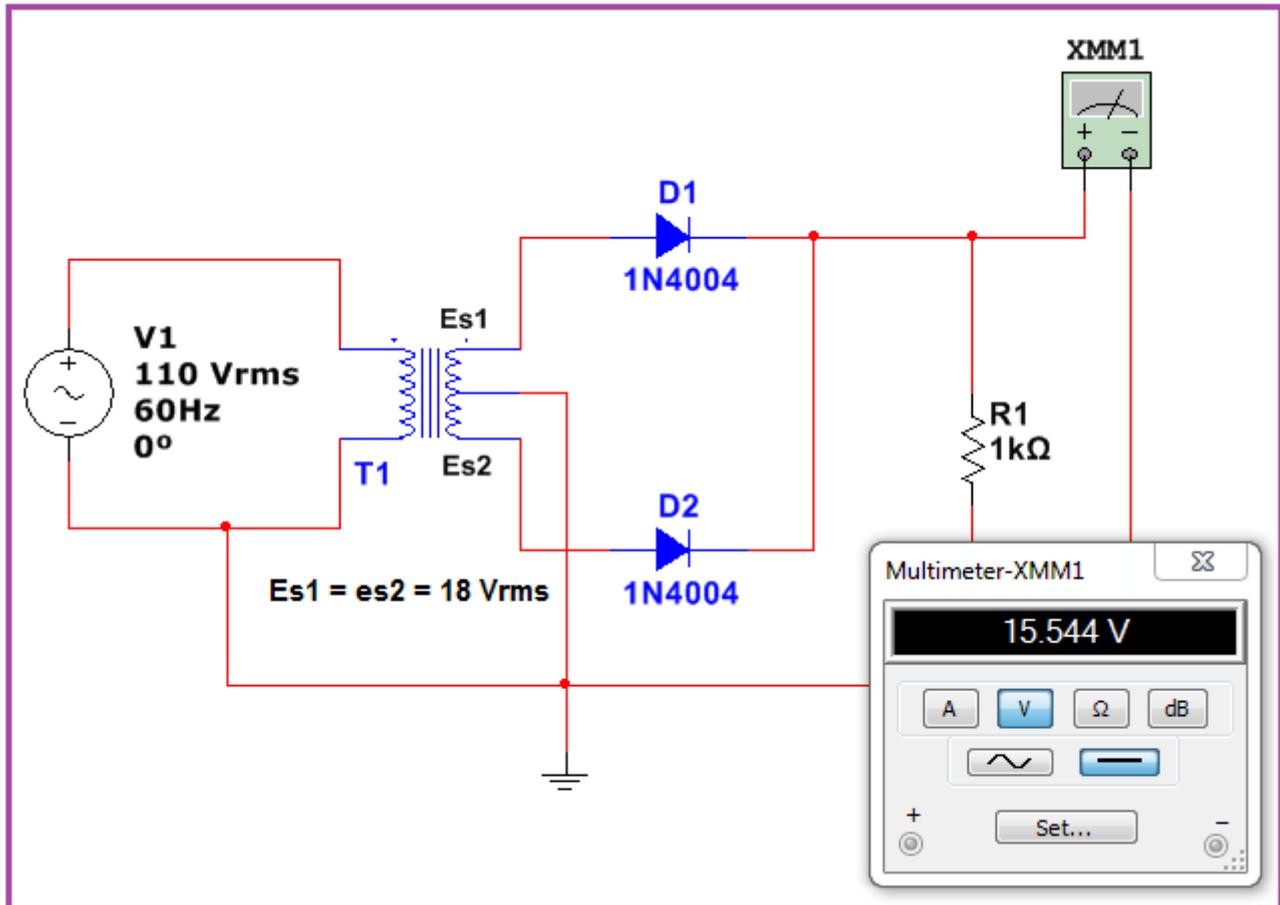
A diferença de 2mV encontrada nas medidas entre o voltímetro e o osciloscópio é devida a própria tolerância (impedâncias de entrada) dos instrumentos.

23,709 V (voltímetro) e 23,707 (osciloscópio)

RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA COM PONTO DE NEUTRO (CT):

Veja a seguir um circuito típico, que utiliza transformador com secundário dividido por uma derivação central (CT).

Em virtude dessa derivação, podemos dividir o secundário em duas partes sendo que em cada secundário as tensões são defasadas 180 graus entre si.



$$Es_1 = Es_2 = 18 \text{ Vrms}$$

Para calcular a tensão na carga, usamos a fórmula:

$$V_m = (V_p - V_d) \times 0,636$$

$$V_p = 18 \times 1,41 = 25,38 \text{ volts}$$

$$V_p - V_d = 25,38 - 0,7 = 24,68 \text{ volts}$$

$$V_m = 24,68 \times 0,636 = 15,696 \text{ volts}$$

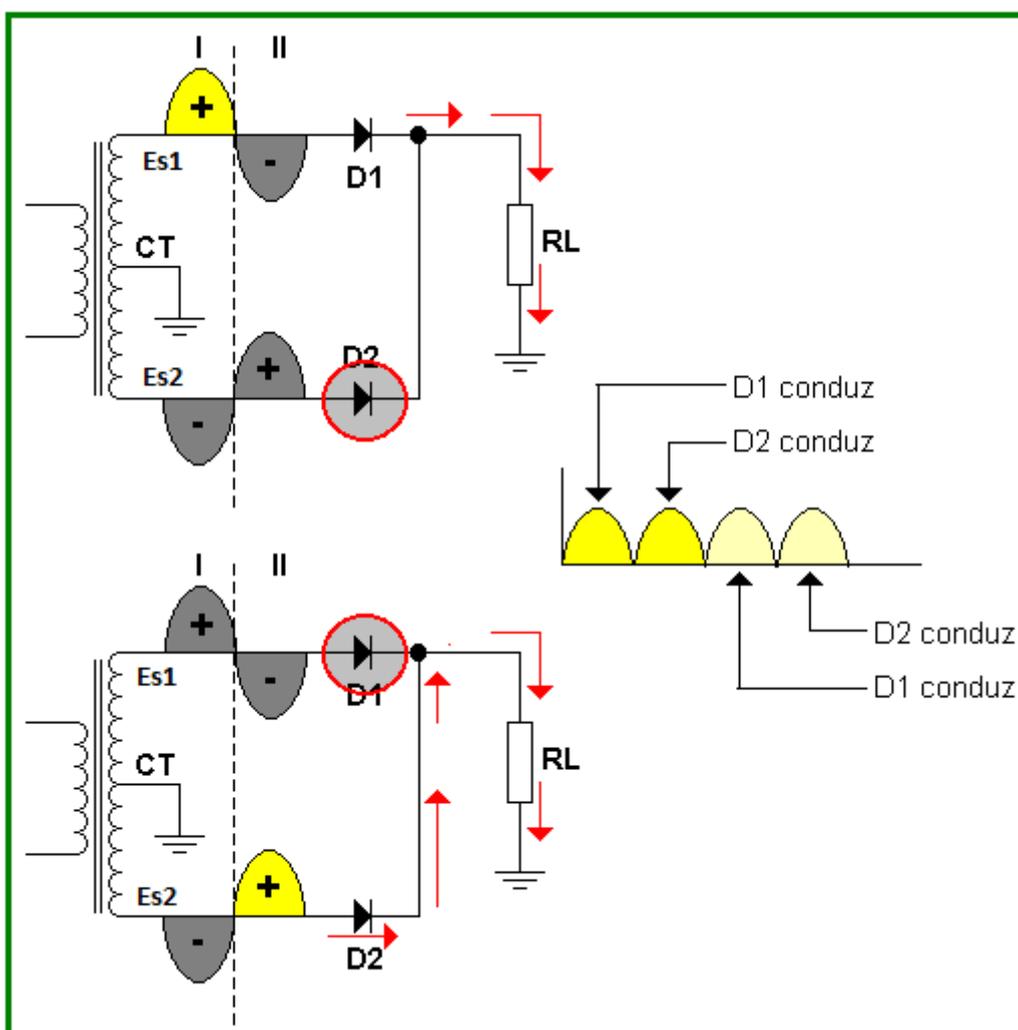
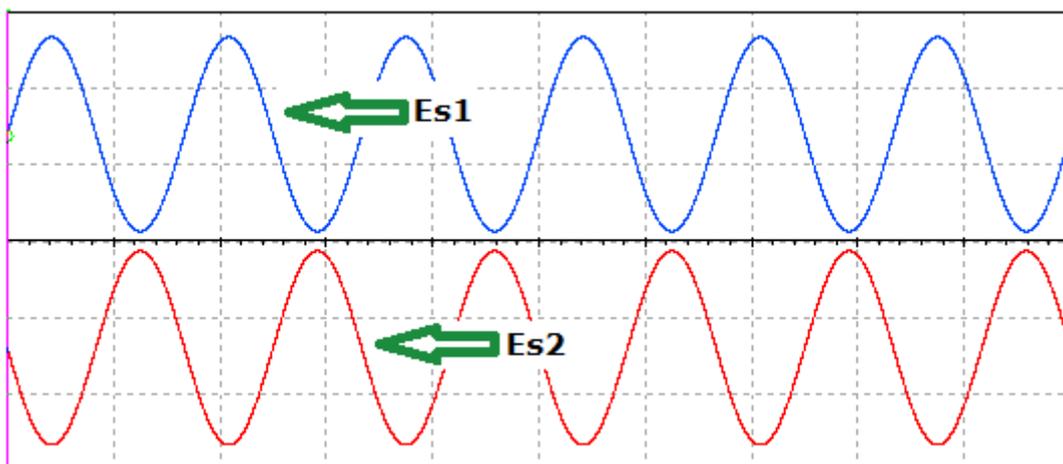
COMO FUNCIONA?

Como as tensões nos secundários Es_1 e Es_2 estão defasadas 180 graus, cada diodo será polarizado diretamente a cada meio período de um ciclo.

Resumindo: enquanto D_1 conduz, D_2 não conduz; quando D_1 não conduz, D_2 conduzirá.

Com isto em cada semiciclo um dos diodos sempre conduzirá, e o resultado será uma tensão contínua na carga durante os dois semiciclos.

Veja na figura abaixo a defasagem de 180° entre as tensões dos secundários E_{s1} e E_{s2} , mostradas no osciloscópio.

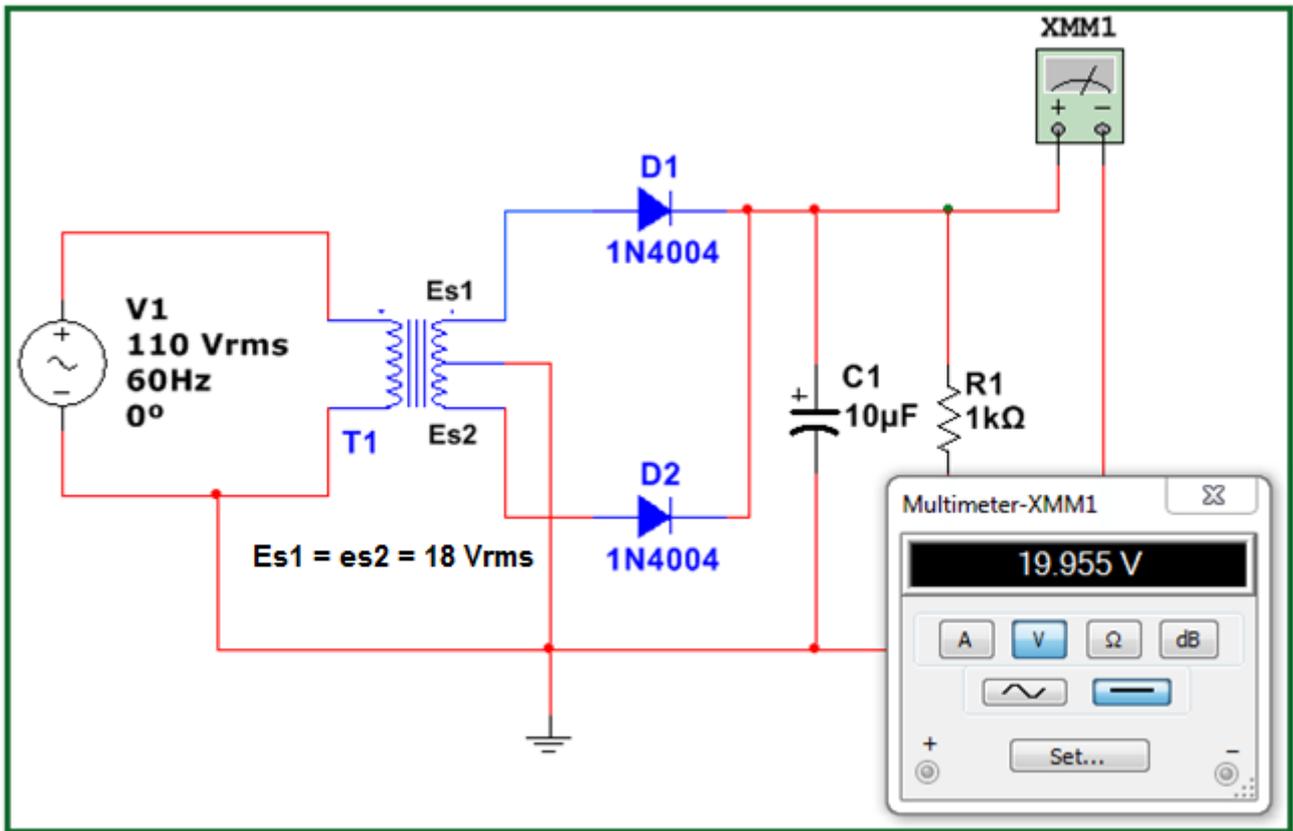


Instante I – somente D1 conduz

Instante II – somente D2 conduz

EFEITO DO CAPACITOR DE FILTRO NA TENSÃO DE SAÍDA:

Tem o efeito análogo ao visto nos retificadores anteriores.

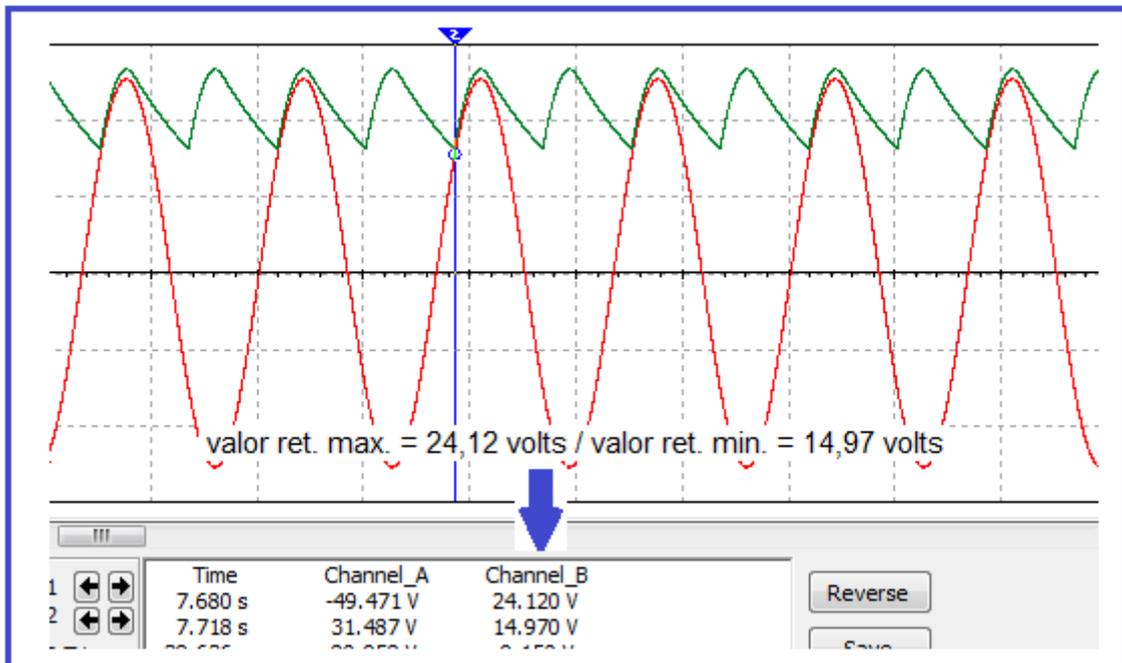


Calculando o valor retificado médio na carga (medidas obtidas no osciloscópio):

$$V_m = (\text{valor ret. máximo} + \text{valor ret. mínimo}) / 2$$

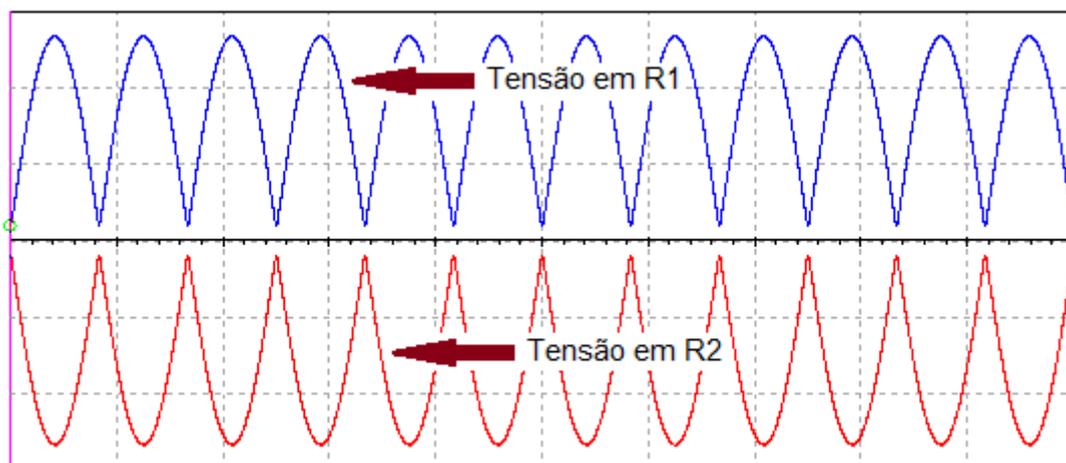
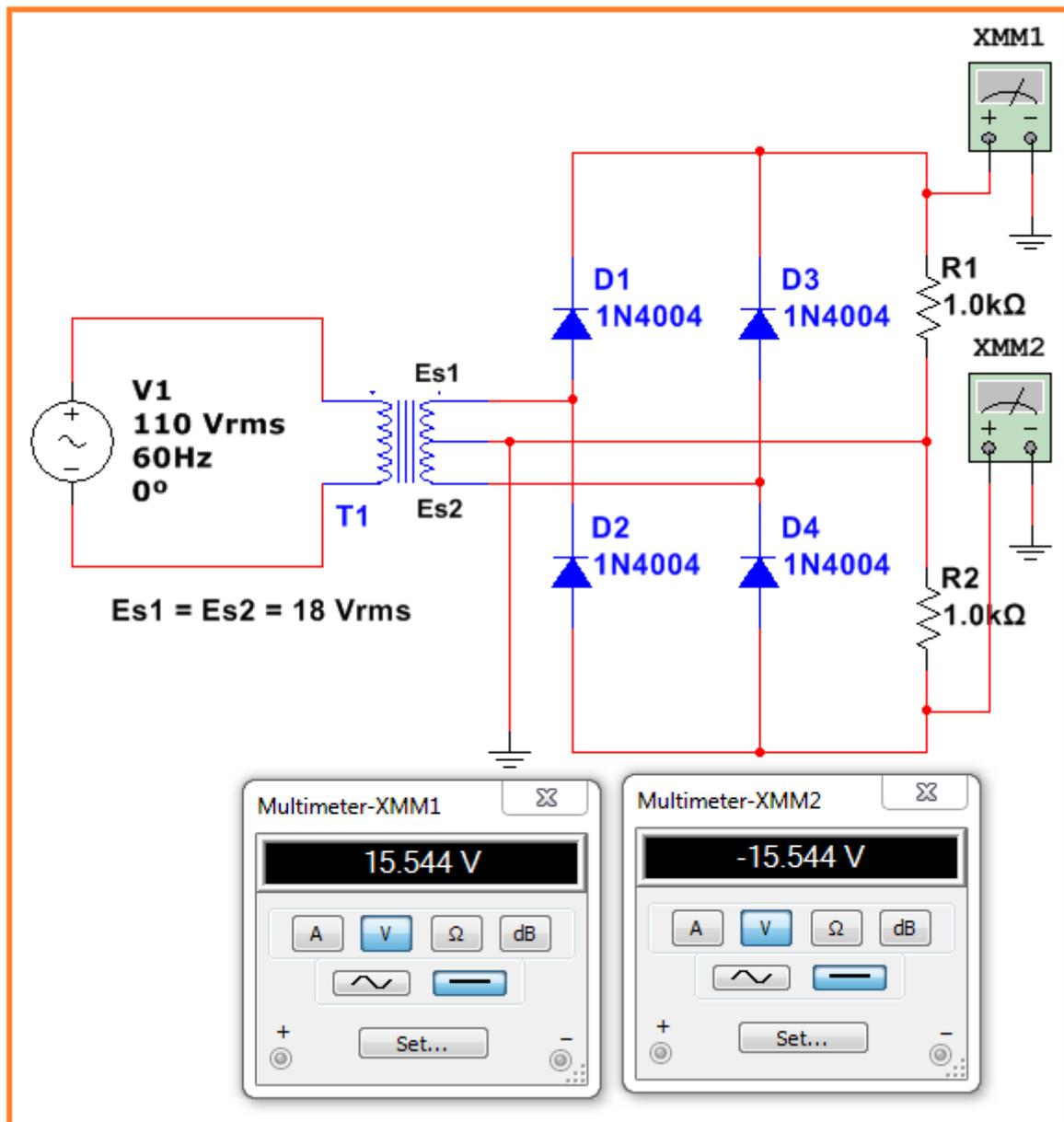
$$V_m = (24,12 + 14,97) / 2$$

$$V_m = 19,545 \text{ volts}$$



RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA SIMÉTRICO:

O retificador simétrico fornece duas tensões com polaridades opostas



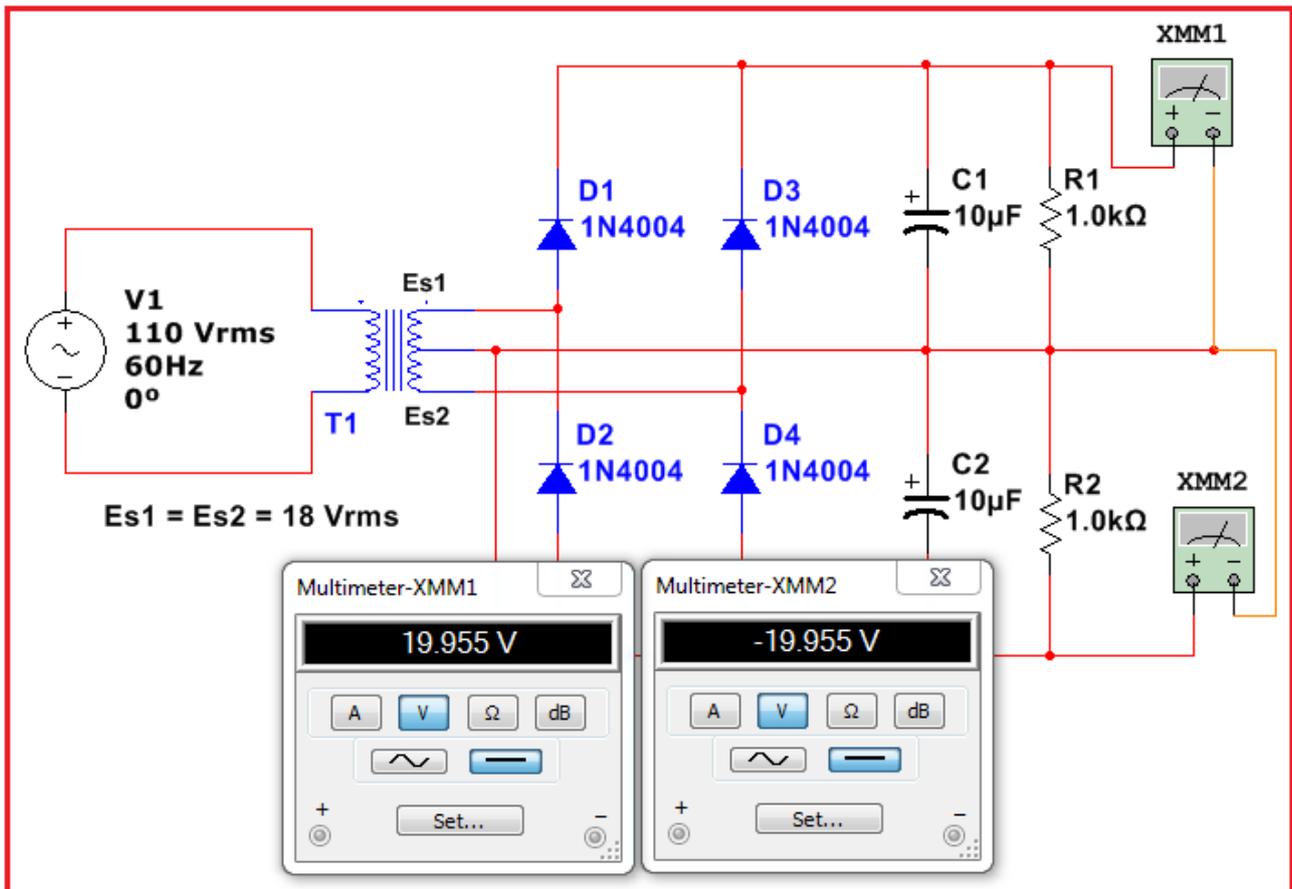
É denominado simétrico porque na maioria das vezes oferece duas tensões de valores iguais, porém com polaridades opostas.

Observe também que a retificação é de onda completa, daí o cálculo pode ser feito da mesma forma que em um retificador de onda completa com ponto de neutro.

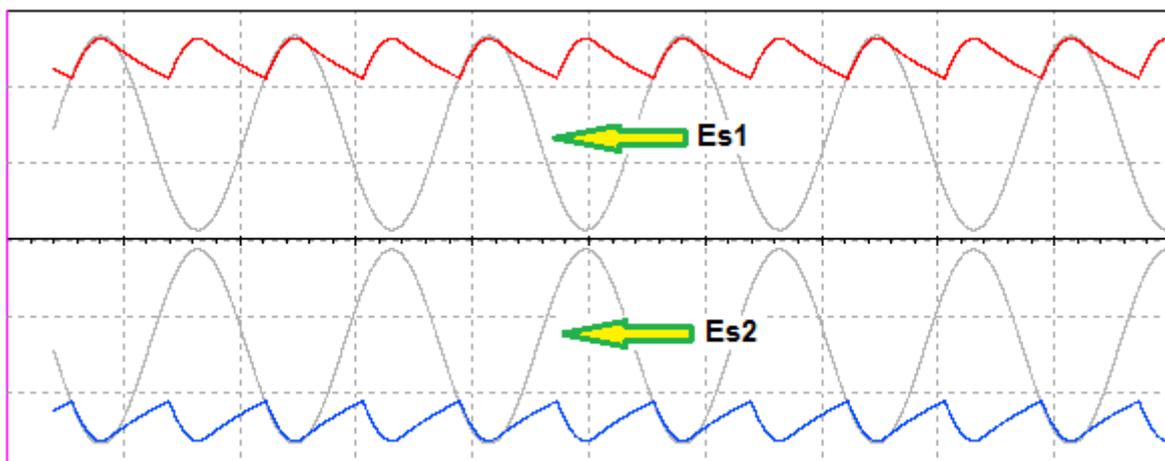
$$V_m = (V_p - V_d) \times 0,636$$

$$V_m = 15,696 \text{ volts e } -15,696 \text{ volts (pois } E_{s1} = E_{s2})$$

A figura a seguir mostra o mesmo circuito com a adição de um capacitor de filtro de 10uF. Observe atentamente as polaridades dos capacitores eletrolíticos.

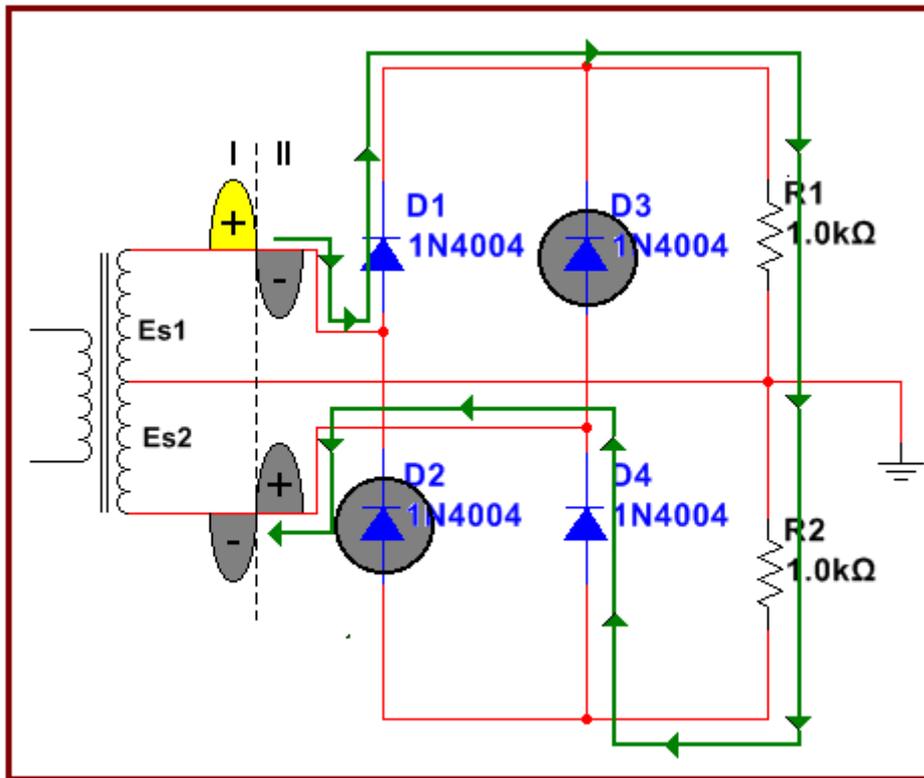


A figura abaixo mostra as tensões de *ripple* para as duas cargas.

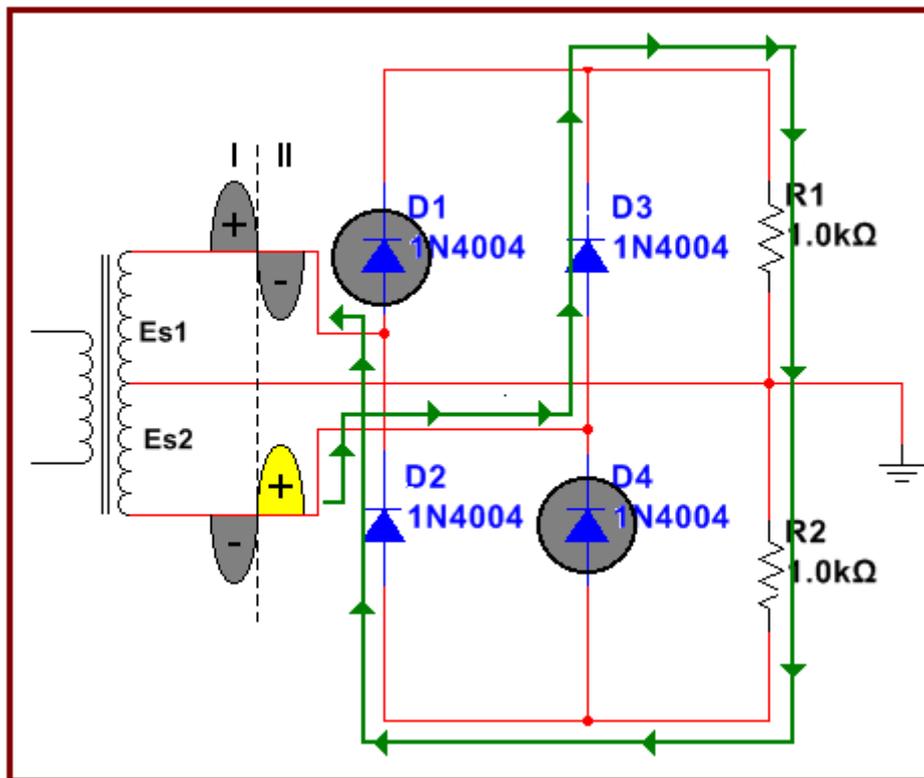


COMO FUNCIONA? A análise de funcionamento é idêntica a do retificador em ponte.

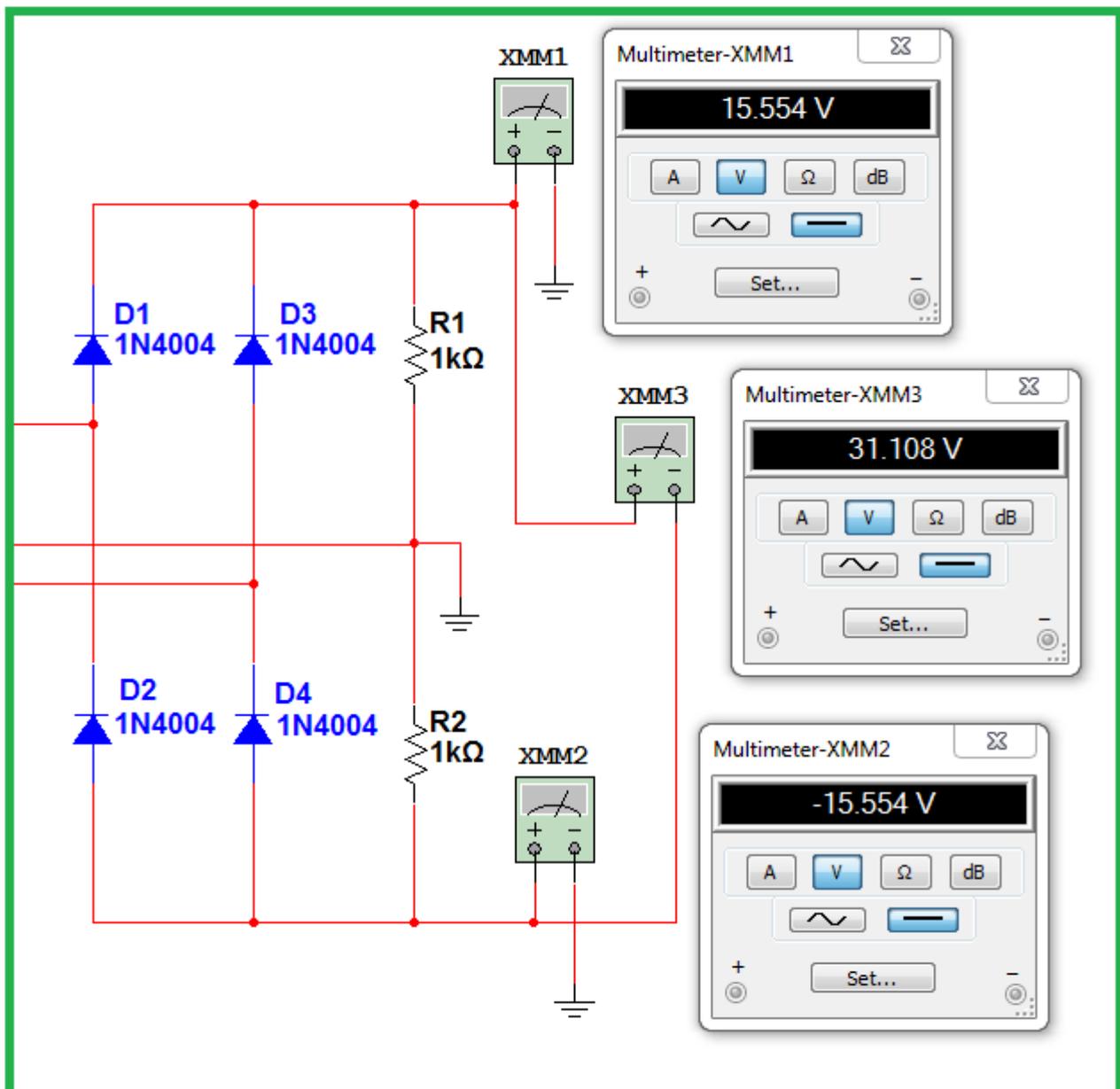
Instante I = (+) --- D1 --- R1 --- R2 --- D4 --- (-)



Instante II = (+) --- D3 --- R1 --- R2 --- D2 --- (-)



Observa-se pelas ilustrações acima, que as duas cargas estão em série, formando um divisor de tensão, tendo como referência o terra (GND).



Nos extremos R1 e R2 temos a soma das tensões (veja a ilustração) assim, o valor retificado médio na carga sem filtro, também poderá ser calculado da seguinte forma:

$$V_m = \{ [(E_{s1} + E_{s2}) \times 1,41 - 2V_d] \times 0,636 \} / 2$$

$$V_m = 36 \times 1,41 = 50,76 \text{ volts}$$

$$V_m = 50,76 - 1,4 = 49,36$$

$$V_m = 49,36 \times 0,636 = 31,39 \text{ volts}$$

$$V_m = 31,39 / 2 = 15,696 \text{ volts}$$

Resultado igual ao obtido anteriormente, quando o cálculo foi feito seguindo o mesmo raciocínio de um retificador de onda completa com ponto de neutro.

É importante salientar que os cálculos acima são válidos somente quando $E_{s1} = E_{s2}$.

EXERCÍCIO RESOLVIDO:

Um retificador simétrico deve alimentar duas cargas de 500 ohms, sabendo-se que o secundário do transformador com CT fornece duas tensões simétricas de 25 volts RMS (com derivação central).

A porcentagem de ripple nessas cargas é de 4%.

Calcular:

- valor retificado máximo
- valor retificado mínimo
- valor médio retificado na carga
- corrente que circula em cada uma das cargas
- potência desenvolvida em cada uma das cargas

Resolvendo:

- Calculando o valor ret. máximo:

$$25 \times 1,41 - V_d = 35,25 \text{ volts}$$

$$35,25 - 0,7 = 34,55 \text{ volts}$$

$$4\% \text{ de } 34,55 \text{ volts} = 1,382 \text{ volts}$$

- partindo da fórmula: $V_m = (\text{valor ret. máximo} + \text{valor ret. mínimo}) / 2$

$$\text{Valor ret. mínimo} = 34,55 - 1,382 = 33,168 \text{ volts}$$

assim, valor retificado médio na carga será:

$$(34,55 + 33,168) / 2 = 33,859 \text{ volts} \approx 33,86 \text{ volts}$$

- como as cargas estão em série, a corrente é a mesma para ambas:

$$33,86 / 500 = 67,72\text{mA}$$

$$I_{R1} = I_{R2} = 67,72\text{mA}$$

- cada carga consumirá:

$$P = R \cdot I^2$$

$$P = 500 \times (67,72\text{mA})^2 = 2,293 \text{ watts}$$