

**kroton**  
paixão por educar

**GRADUAÇÃO PRESENCIAL**  
**1º semestre- 2016**

**Eletrônica e Instrumentação**  
**Eng<sup>a</sup> Mecânica– 6º/ 7ºsemestres**

**Prof. Ms.Cristiano Malheiro**

[cmalheiro@anhanguera.com](mailto:cmalheiro@anhanguera.com)  
[cmalheiro@aedu.com](mailto:cmalheiro@aedu.com)

<http://cristianotm.wix.com/aulas>

1



## Aula 9

### Bibliografia Básica

Link Biblioteca:

<http://187.86.214.60/pergamum/biblioteca/index.php?id=ANHAN>

10.	Instrumentação Industrial conceitos, aplicações e análises - 7 / 2010 - ( E-book )
online	FIALHO, Arivelto Bustamante. Instrumentação industrial : conceitos, aplicações e análises. 7. São Paulo Érica 2010 1 recurso online ISBN 9788536505190.
	Exemplares   Marc

1. FIALHO, Arivelto B. **Instrumentação Industrial: conceitos, aplicações e análises**. 3ª edição. São Paulo: Érica, 2010. (E-Book)

2. CRUZ, Eduardo Cesar Alves. **Eletrônica Aplicada**. 2ª edição. Rio de Janeiro: Érica, 2013. (11 exemplares)

3. BOYLESTAD, Robert L. NASHESKY, L. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos**. 12ª edição. São Paulo: Pearson, 2013. (17 exemplares)

2

**kroton**  
paixão por educar





## Aula 9

### Circuitos Retificadores (Capítulo 2- pág. 35)

#### Definição:

Os circuitos retificadores são conversores estáticos de energia elétrica. Possuindo dois tipos de conversão:

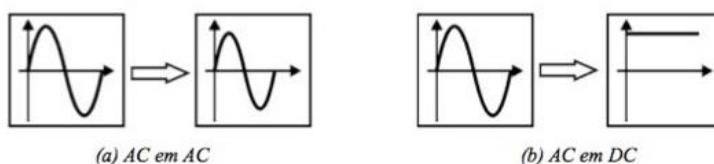


Figura 2.1 - Tipos de conversão de energia elétrica.

- (a) Transformadores: Aumenta ou reduzir a tensão.
- (b) Diodos Retificadores: AC-DC (1ª. Etapa de uma fonte de alimentação).

3



## Aula 9

### Circuitos Retificadores Valor Médio de Sinal Periódico

O valor médio de uma função variável e periódica, considerando o intervalo de tempo equivalente ao período  $T$ , é um valor constante cuja área, para o mesmo intervalo de tempo, tem o mesmo valor da área do sinal periódico.

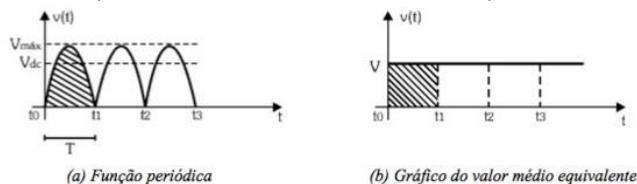


Figura 2.2 - Equivalência gráfica para valor médio.

Matematicamente, o **valor médio de uma função periódica** (tensão e corrente) pode ser obtido pelas expressões matemáticas seguintes:

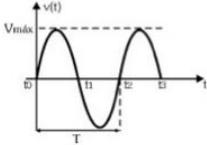
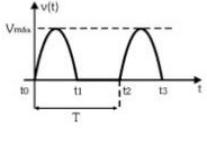
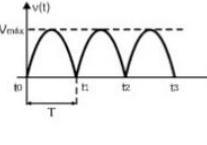
$$V_{dc} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v(t) dt \quad \text{e} \quad I_{dc} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i(t) dt$$





## Aula 9

### Circuitos Retificadores Valor Médio de Sinal Periódico

Sinal Senoidal	Sinal Retificado Meia Onda	Sinal Retificado Onda Completa
 <p>Figura 2.3</p>	 <p>Figura 2.4</p>	 <p>Figura 2.5</p>
<b>Tensões Médias</b>		
$V_{dc} = 0$	$V_{dc} = \frac{V_{máx}}{\pi}$	$V_{dc} = \frac{2 \cdot V_{máx}}{\pi}$
<b>Correntes Médias</b>		
$I_{dc} = 0$	$I_{dc} = \frac{I_{máx}}{\pi}$	$I_{dc} = \frac{2 \cdot I_{máx}}{\pi}$

5



## Aula 9

### Circuitos Retificadores Valor Eficaz de um Sinal Periódico

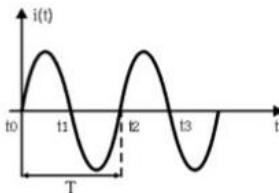


Figura 2.6 - Corrente senoidal.



Figura 2.8 - Potência P na resistência elétrica.

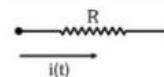


Figura 2.7 - Resistência elétrica.

O valor efetivo da corrente  $i(t)$  é denominado corrente RMS (Root Mean Square- Raiz Quadrada Média) ou simplesmente *corrente eficaz*.

6



## Aula 9

### Circuitos Retificadores Valor Eficaz de um Sinal Periódico

Matematicamente, o valor eficaz de uma função periódica (tensão e corrente) pode ser obtido pelas expressões matemáticas abaixo:

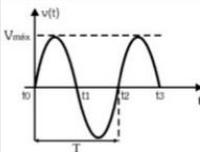
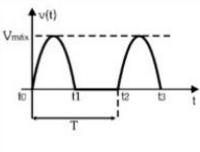
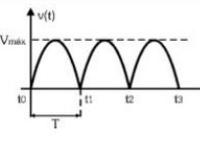
$$V_{\text{ef}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_2} v(t)^2 dt} \quad \text{e} \quad I_{\text{ef}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_2} i(t)^2 dt}$$

7



## Aula 9

### Circuitos Retificadores Valor Eficaz de um Sinal Periódico

Sinal Senoidal	Sinal Retificado Meia Onda	Sinal Retificado Onda Completa
 <p><i>Figura 2.9</i></p>	 <p><i>Figura 2.10</i></p>	 <p><i>Figura 2.11</i></p>
Tensões Eficazes		
$V_{\text{ef}} = \frac{V_{\text{máx}}}{\sqrt{2}}$	$V_{\text{ef}} = \frac{V_{\text{máx}}}{2}$	$V_{\text{ef}} = \frac{V_{\text{máx}}}{\sqrt{2}}$
Correntes Eficazes		
$I_{\text{ef}} = \frac{I_{\text{máx}}}{\sqrt{2}}$	$I_{\text{ef}} = \frac{I_{\text{máx}}}{2}$	$I_{\text{ef}} = \frac{I_{\text{máx}}}{\sqrt{2}}$

8





## Aula 9

### Circuitos Retificadores Retificador de Meia Onda

**Circuito retificador de meia onda com carga resistiva. Polarização direta.**

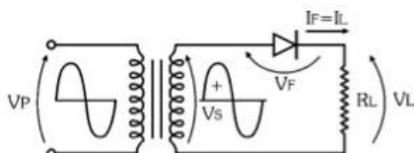


Figura 2.18 - Retificador de meia onda.

$$V_L = V_s - 0,6$$

- Durante o semiciclo, a corrente que circula pelo diodo ( $I_F$ ) é a mesma que circula pela carga ( $I_L$ ).
- O semiciclo positivo da tensão do secundário do transformador ( $V_s$ ) transfere-se para a carga ( $V_L$ ) nos intervalos de  $t_0$ ,  $t_1$ ,  $t_2$  a  $t_3$  etc.

Enquanto o diodo conduz, a queda de tensão sobre ele é da ordem de 0,6V. Assim, a tensão real na carga é:

9

kroton  
paixão por educar



## Aula 9

### Circuitos Retificadores Retificador de Meia Onda

#### Formas de Onda

- Neste caso foi desprezada a queda de tensão no diodo (0,6V).
- No semiciclo negativo, o diodo não conduz por estar reversamente polarizado, pois o seu anodo encontra-se com potencial negativo em relação ao do catodo.
- A partir disso, não há tensão na carga nem corrente circulando por ela, de modo que a tensão do secundário do transformador fica aplicada reversamente aos demais terminais do diodo.

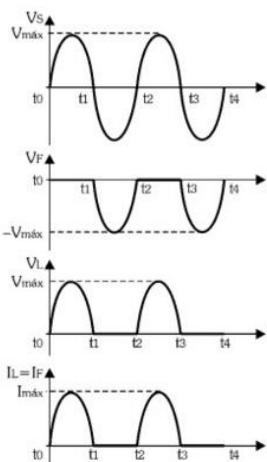


Figura 2.19 - Formas de onda no retificador de meia onda.

kroton  
paixão por educar



## Aula 9

### Circuitos Retificadores Retificador de Onda Completa

Circuito

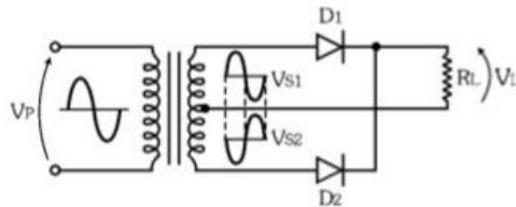


Figura 2.20 - Retificador de onda completa com ponto neutro.

11

kroton  
paixão por educar



## Aula 9

### Circuitos Retificadores Retificador de Onda Completa

Logo pode-se concluir que as formas de onda  $V_{s1}$  e  $V_{s2}$  têm o mesmo valor eficaz, mas estão sempre defasadas de  $180^\circ$  entre si.

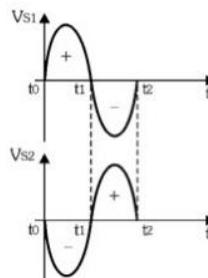


Figura 2.23 - Formas de onda no secundário do transformador com ponto neutro.

12

kroton  
paixão por educar



## Aula 9

### Circuitos Retificadores Retificador de Onda Completa

#### Análise

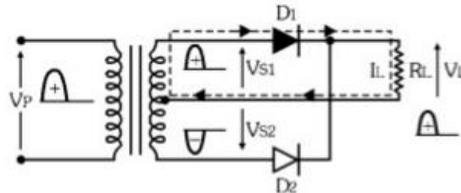


Figura 2.24 - Semiciclo positivo no primário.

Quando a tensão no primário está no semiciclo positivo, a tensão  $V_{s1}$  do secundário também está, de modo que o diodo  $D1$  tem seu anodo positivo e, assim, conduz.

Simultaneamente, a tensão  $V_{s2}$  está negativa, polarizando reversamente o diodo  $D2$ , fazendo com que ele se comporte como um CA.

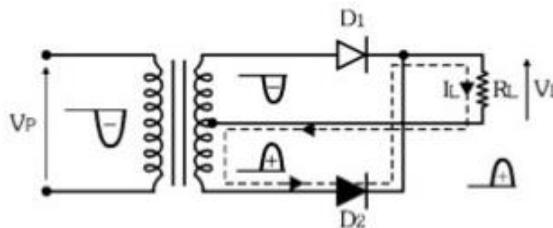
13



## Aula 9

### Circuitos Retificadores Retificador de Onda Completa

#### Análise



Quando a tensão no primário passa para o semiciclo negativo, a tensão  $V_{s1}$  do secundário também está negativa, polarizando reversamente  $D1$  e comportando-se como um CA, ou seja, não conduzindo.

Simultaneamente, a tensão  $V_{s2}$  está positiva, fazendo com que o diodo  $D2$  esteja com anodo positivo e, portanto, conduzindo.

14



## Aula 9

### Circuitos Retificadores Retificador de Onda Completa

#### Análise

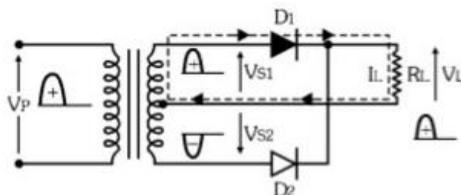


Figura 2.24 - Semiciclo positivo no primário.

Neste circuito, a tensão na carga é 0,6V menor que a do secundário do transformador, portanto a tensão real na carga é:

$$V_L = V_{S1} - 0,6 = V_{S2} - 0,6$$

15

kroton  
paixão por educar



## Aula 9

### Circuitos Retificadores Retificador de Onda Completa

#### Em síntese

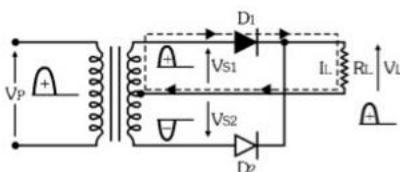


Figura 2.24 - Semiciclo positivo no primário.

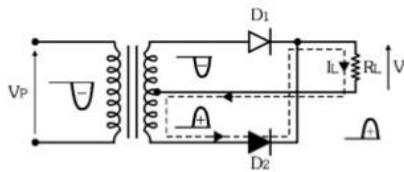


Figura 2.25 - Semiciclo negativo no primário.

Neste circuito, cada diodo conduz somente meio ciclo de onda, exatamente como no retificador de meia onda. A carga conduz corrente nos dois semiciclos e no mesmo sentido de modo que, nela, a tensão e a corrente são contínuas, e não mais alternadas, porém pulsantes.

16

kroton  
paixão por educar



## Aula 9

### Circuitos Retificadores Retificador de Onda Completa

Tensão reversa sobre os Diodos

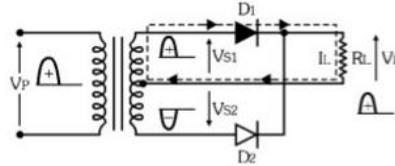


Figura 2.24 - Semiciclo positivo no primário.

A tensão reversa de pico sobre cada diodo é o dobro da tensão de pico de cada metade do secundário, isto é,  $V_{R1m\acute{a}x} = V_{R2m\acute{a}x} = 2 \cdot V_{s1m\acute{a}x} = 2 \cdot V_{s2m\acute{a}x}$ .

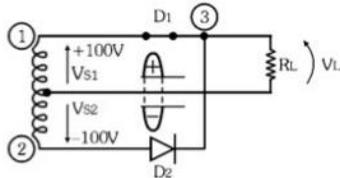


Figura 2.26 - Tensão reversa nos diodos.

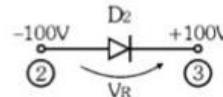


Figura 2.27 - Tensão reversa em D2.

17



## Aula 7

### Circuitos Retificadores Retificador de Onda Completa

Formas de Onda

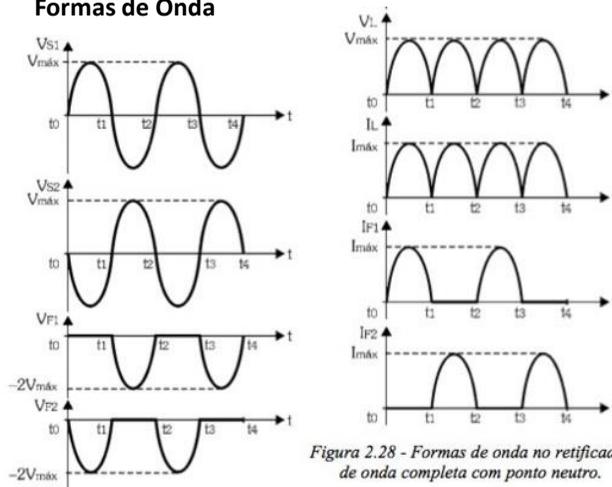


Figura 2.28 - Formas de onda no retificador de onda completa com ponto neutro.

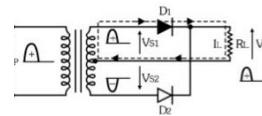


Figura 2.24 - Semiciclo positivo no primário.

18





## Aula 9

### Circuitos Retificadores Retificador de Onda Completa

#### Formas de Onda

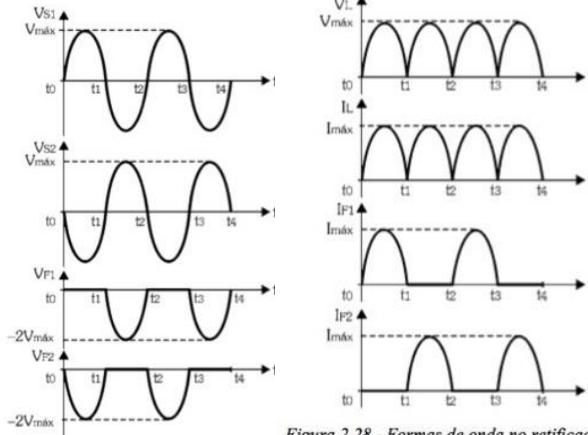


Figura 2.28 - Formas de onda no retificador de onda completa com ponto neutro.

Assim, no *circuito retificador de onda completa com ponto neutro*, temos:

Tensão média na carga: 
$$V_{dc} = \frac{2 \cdot V_{máx}}{\pi}$$

Corrente média na carga: 
$$I_{dc} = \frac{2 \cdot I_{máx}}{\pi}$$

Tensão eficaz na carga: 
$$V_{ef} = \frac{V_{máx}}{\sqrt{2}}$$

Corrente eficaz na carga: 
$$I_{ef} = \frac{I_{máx}}{\sqrt{2}}$$

Corrente média nos diodos: 
$$I_{dc} = \frac{I_{máx}}{\pi}$$

Observe que como cada diodo conduz apenas em um semiciclo, a sua corrente média é a metade da corrente média na carga.

19



## Aula 9

### Circuitos Retificadores Retificador de Onda Completa

#### Formas de Onda

Assim, no *circuito retificador de onda completa com ponto neutro*, temos:

Tensão média na carga: 
$$V_{dc} = \frac{2 \cdot V_{máx}}{\pi}$$

Corrente média na carga: 
$$I_{dc} = \frac{2 \cdot I_{máx}}{\pi}$$

Tensão eficaz na carga: 
$$V_{ef} = \frac{V_{máx}}{\sqrt{2}}$$

Corrente eficaz na carga: 
$$I_{ef} = \frac{I_{máx}}{\sqrt{2}}$$

Corrente média nos diodos: 
$$I_{dc} = \frac{I_{máx}}{\pi}$$

Observe que como cada diodo conduz apenas em um semiciclo, a sua corrente média é a metade da corrente média na carga.

$$I_{Fmáx} > \frac{I_{máx}}{\pi} \quad \text{e} \quad V_{Rmáx} > 2 \cdot V_{máx}$$

20





## Aula 9

### Retificador de Onda Completa em Ponte

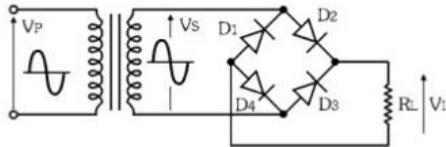


Figura 2.29 - Retificador de onda completa em ponte.

Neste circuito, a polaridade da tensão do secundário do transformador acompanha a polaridade da tensão do primário.

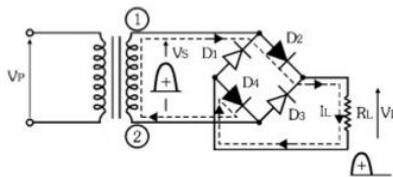


Figura 2.30 - Semiciclo positivo.

No intervalo de tempo em que a tensão  $V_s$  do secundário é positiva, ou seja, com ponto 1 positivo em relação ao ponto 2, os diodos D2 e D4 conduzem em série. Tensão polarizada diretamente.

21

**kroton**  
paixão por educar



## Aula 9

### Retificador de Onda Completa em Ponte

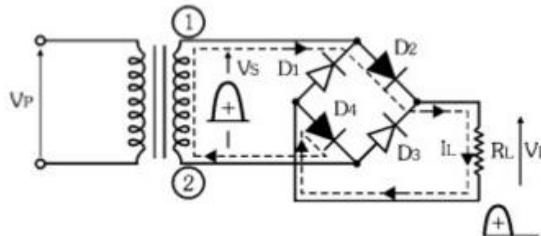


Figura 2.30 - Semiciclo positivo.

No intervalo de tempo em que a tensão  $V_s$  do secundário é positiva, ou seja, com ponto 1 positivo em relação ao ponto 2, os diodos D2 e D4 conduzem em série. Tensão polarizada diretamente.

Na carga  $R_L$ , a corrente circula no sentido de cima para baixo e a tensão é  $V_L$  com a polaridade indicada na figura, com potencial positivo no seu terminal superior.

22

**kroton**  
paixão por educar



## Aula 9

### Retificador de Onda Completa em Ponte

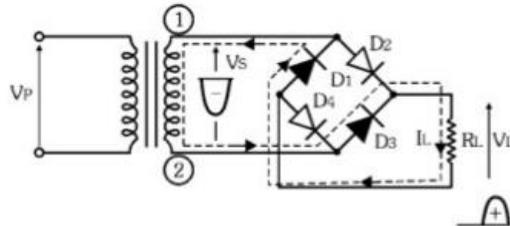


Figura 2.31 - Semiciclo negativo.

Quando  $V_s$  inverte a polaridade, o ponto 1 fica negativo em relação ao ponto 2. Com D1 e D3 conduzindo em série.

Na carga  $R_L$ , a corrente circula no mesmo sentido de cima para baixo e  $V_L$  na mesma situação do caso anterior.

23

**kroton**  
paixão por educar



## Aula 9

### Retificador de Onda Completa em Ponte

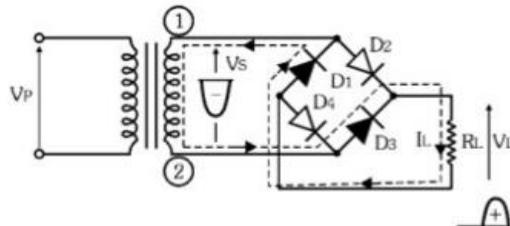


Figura 2.31 - Semiciclo negativo.

Nesse circuito, como há sempre dois diodos em série, a tensão na carga é 1,2V menor que a do secundário do transformador. Portanto a tensão real na carga é:

$$V_L = V_s - 1,2$$

24

**kroton**  
paixão por educar



## Aula 9

### Retificador de Onda Completa em Ponte

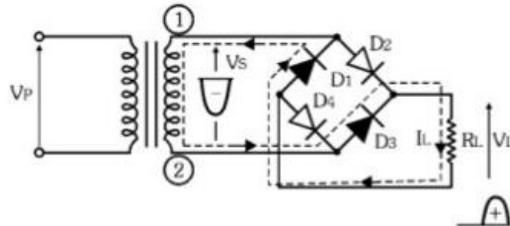


Figura 2.31 - Semiciclo negativo.

Nesse circuito, cada par de diodos conduz somente meio ciclo de onda, mas a carga conduz corrente nos dois semiciclos e no mesmo sentido. Nela, a tensão e a corrente são contínuas pulsantes.

25

kroton  
paixão por educar



## Aula 9

### Retificador de Onda Completa em Ponte – Tensão Reversa sobre os diodos

Como  $V_s$  é positivo, os Diodos D2 e D4 conduzem. Esses diodos são representados como curto-circuitos.

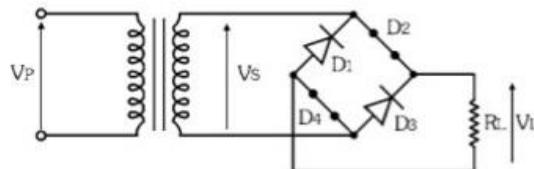


Figura 2.32 - Tensão reversa nos diodos D1 e D3 no semiciclo positivo.

26

kroton  
paixão por educar



## Aula 9

### Retificador de Onda Completa em Ponte – Tensão Reversa dobre os diodos

Nessa condição, os diodos D1 e D3, o secundário do transformador e a carga RL ficam em paralelo.

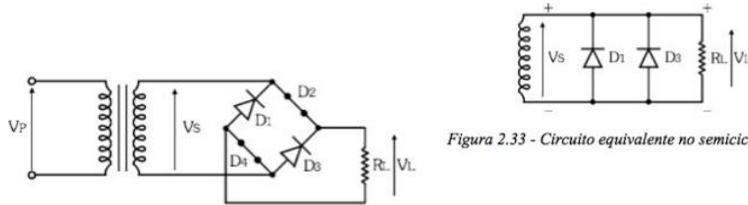


Figura 2.33 - Circuito equivalente no semiciclo positivo.

Figura 2.32 - Tensão reversa nos diodos D1 e D3 no semiciclo positivo.

Fica fácil, observar que a tensão reversa sobre os diodos é igual à tensão máxima fornecida pelo secundário do transformador.

27

kroton  
paixão por educar



## Aula 9

### Retificador de Onda Completa em Ponte Formas de Onda

No circuito retificador de onda completa em ponte, temos:

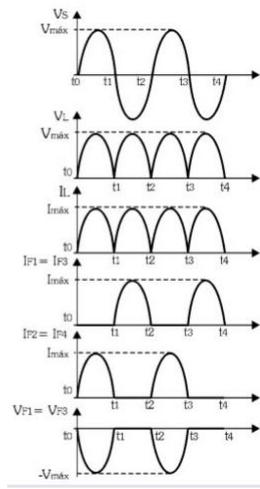
Tensão média na carga: 
$$V_{dc} = \frac{2 \cdot V_{m\acute{a}x}}{\pi}$$

Corrente média na carga: 
$$I_{dc} = \frac{2 \cdot I_{m\acute{a}x}}{\pi}$$

Tensão eficaz na carga: 
$$V_{ef} = \frac{V_{m\acute{a}x}}{\sqrt{2}}$$

Corrente eficaz na carga: 
$$I_{ef} = \frac{I_{m\acute{a}x}}{\sqrt{2}}$$

Corrente média nos diodos: 
$$I_{dc} = \frac{I_{m\acute{a}x}}{\pi}$$



kroton  
paixão por educar



## Aula 9

### Retificador de Onda Completa em Ponte

#### Formas de Onda

Corrente eficaz na carga:

$$I_{ef} = \frac{I_{m\acute{a}x}}{\sqrt{2}}$$

Corrente média nos diodos:

$$I_{dc} = \frac{I_{m\acute{a}x}}{\pi}$$

Nesse retificador, a corrente média nos diodos é a metade da corrente média na carga.

As especificações dos diodos para assegurar o seu correto funcionamento devem ser:

$$I_{Fm\acute{a}x} > \frac{I_{m\acute{a}x}}{\pi}$$

$$\text{e } V_{Rm\acute{a}x} > V_{m\acute{a}x}$$

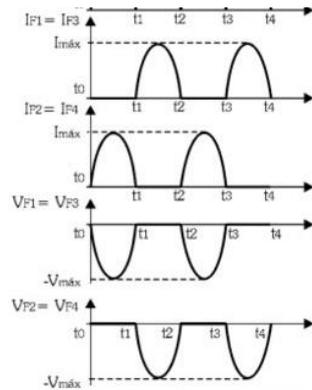


Figura 2.34 - Formas de onda no retificador de onda completa em ponte.

29

kroton  
paixão por educar



## Aula 9

### Retificadores com Filtro

O procedimento mais simples para reduzir o *ripple* da tensão de saída dos circuitos retificadores é a conexão de capacitores de filtro.

#### 2.5.1. Retificador de Meia Onda com Filtro Capacitivo

Considere o circuito retificador de meia onda com carga resistiva mostrado na Figura 2.48 no qual foi ligado em paralelo com a carga um capacitor de filtro.

Se o capacitor não tivesse sido ligado, a forma de onda da tensão na carga seria a senoidal retificada em meia onda, como a apresentada na Figura 2.49(a).

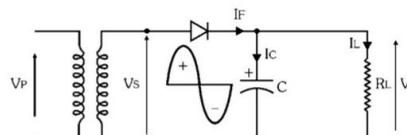


Figura 2.48 - Retificador de meia onda com filtro capacitivo.

30

kroton  
paixão por educar



## Aula 9

### Retificadores com Filtro

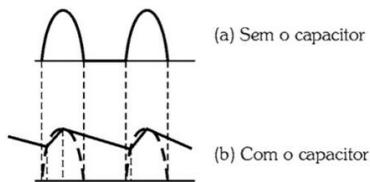
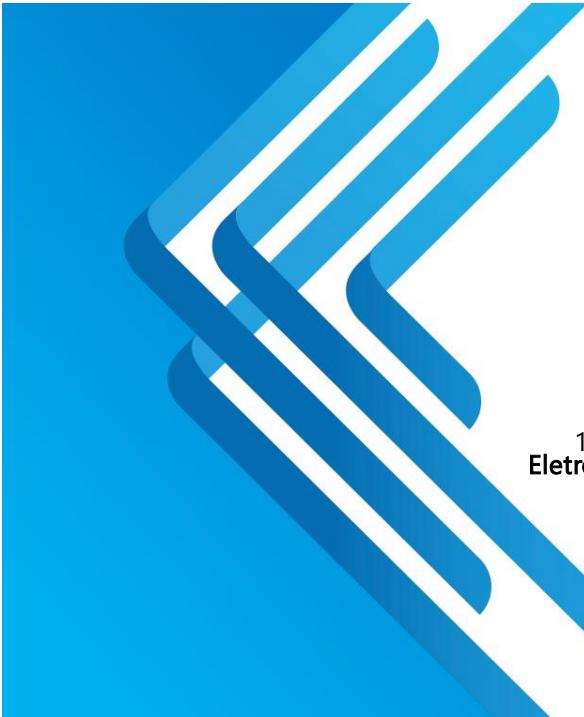


Figura 2.49 - Formas de onda na carga.

Conforme já vimos, essa forma de onda possui um *fator de ripple* de 120%, ou seja, há mais componente alternada do que contínua.

Quando se coloca um capacitor em paralelo com a carga, a forma de onda passa a ser a apresentada em linha cheia na Figura 2.49(b).

Observe que essa tensão também não é constante, mas ela varia entre um valor mínimo, que não é mais zero, e um valor máximo, que é igual ao valor de pico da onda senoidal.



## Bibliografia desta aula:

1. CRUZ, Eduardo Cesar Alves. **Eletrônica Aplicada**. 2ª edição. Rio de Janeiro: Erica, 2013.

