

Introdução a Retificadores e retificadores monofásicos com carga resistiva

Prof. Alceu André Badin

Objetivo da aula

Estudo dos retificadores monofásicos com carga resistiva

- Análise das etapas de operação do retificador;
- ▶ Equacionamento dos parâmetros de interesse para carga R;
- Análise da operação com isolamento galvânico.

Conversores CA-CC ou Retificadores

Dispositivo usado no processamento de energia que converte uma entrada em corrente alternada (CA) em uma saída em corrente contínua (CC). Pode ser retificador de tensão ou de corrente.

- Utiliza semicondutores como chaves estáticas;
- Na maioria das aplicações tem entrada em tensão senoidal;
- Um dos dispositivos mais utilizados no mundo devido as redes de distribuição em CA e as cargas eletroeletrônicas.

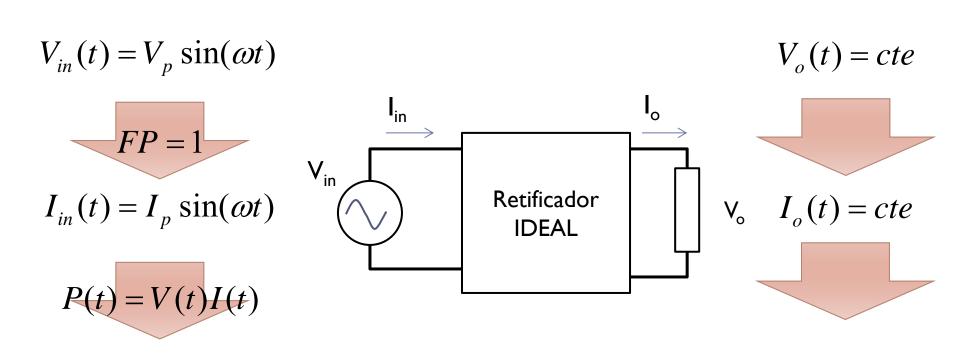
Características:

- Fator de potência unitário na entrada;
- Tensão de saída CC, sem ondulações;
- Rendimento unitário.

Algumas implicações:

- Forma de onda da corrente de entrada idêntica a de tensão e com mesma fase.
- Comportamento de carga resistiva vista pela fonte de entrada.
- Componentes sem perdas.
- Apresentar dispositivo armazenador de energia.

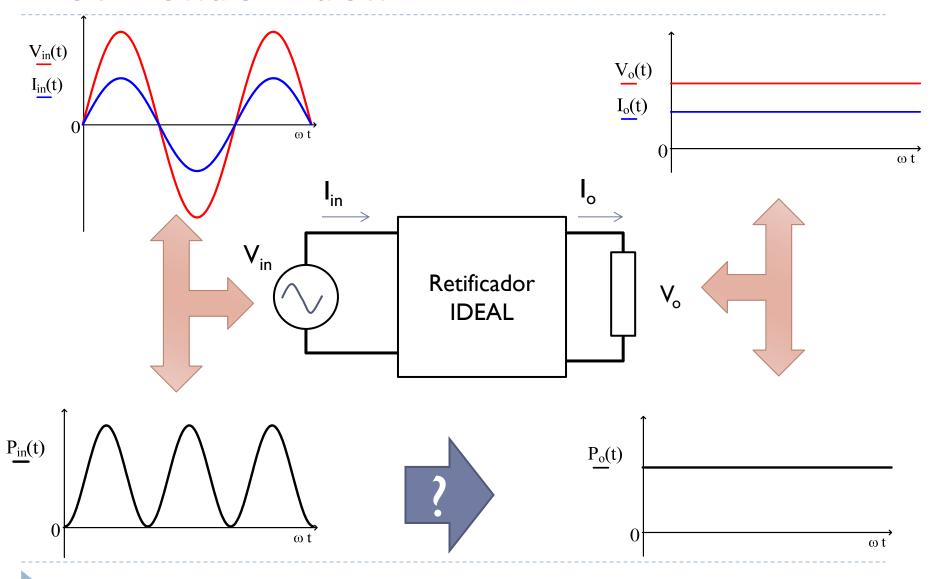
Para uma entrada senoidal típica



$$P_{in}(t) = V_p I_p \sin(\omega t)^2$$

$$P_o(t) = cte$$

Prof. Alceu A. Badin



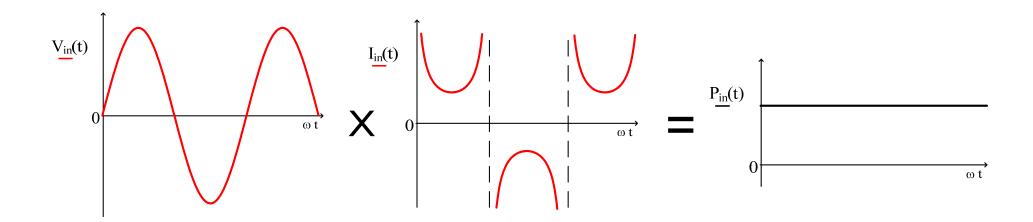
UTFPR/DAELT

Para $P_{in}(t)$ =cte:

$$P_{in}(t) = V_{in}(t)I_{in}(t) = cte$$

$$V_{in}(t) = V_{p} \sin(\omega t)$$

$$I_{in}(t) = \frac{P_{in}}{V_p \sin(\omega t)}$$
 FP < 1

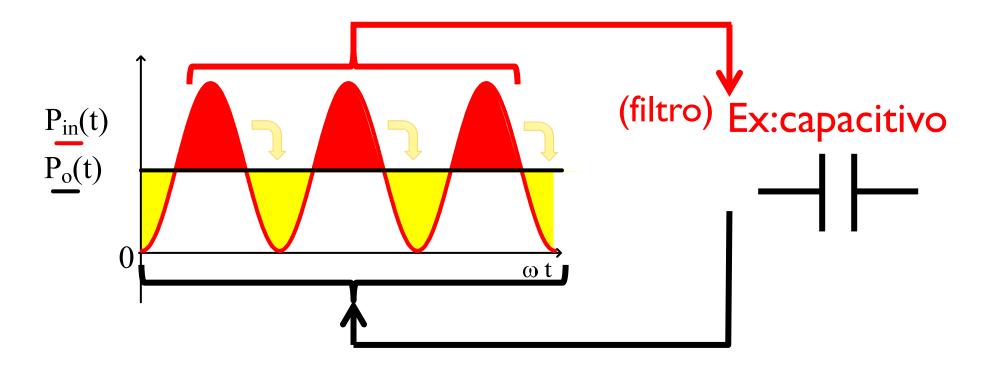


Prof. Alceu A. Badin

UTFPR/DAELT

Para $P_o(t)$ =cte

Estágio de armazenamento de energia

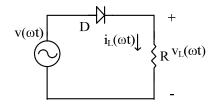


Retificadores - Tipos

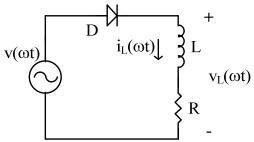
- Direcionalidade
 - Unidirectional
 - Bidirecional
- Controle de tensão
 - Não controlado
 - ▶ Controlado
- Número de fases
 - Monofásico
 - Trifásico
 - Multifases
- Isolamento
- Correção de fator de potência etc

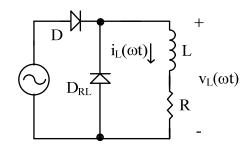
Retificador meia onda a diodo

Carga resistiva

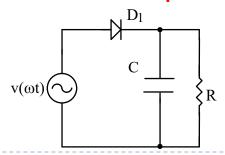


Carga indutiva-resistiva





Com filtro capacitivo



Retificador meia onda a diodo

Vantagens:

- Simplicidade.
- Número de componentes.
- Custo.

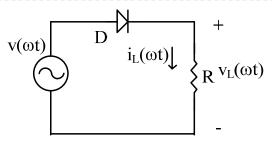
Desvantagens:

- Baixo fator de potência.
- Compromete a qualidade de energia.
- Baixo aproveitamento de transformador e possibilidade de saturação devido a corrente assimétrica.
- Necessidade de filtros maiores em relação ao onda completa.
- Tensão de saída não controlada.

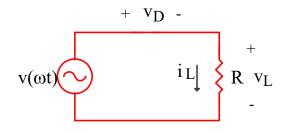
Retificador meia onda

- Considerações e observações para análise:
 - Diodo ideal para o levantamento das formas de onda;
 - O diodo bloqueia com polarização <u>reversa e quando a corrente</u> direta se anula.
 - Determina-se o circuito equivalente para cada etapa de operação.
 - Quando as tensões envolvidas são baixas e a tensão direta do diodo (V_F) é relativamente significativa, deve ser considerada na análise. (para tensões de rede é normalmente desconsiderada).
 - Em regime permanente a tensão média no indutor é nula se a corrente oscila entre dois valores fixos.
 - Em regime permanente a corrente média no capacitor é nula se a tensão oscila entre dois valores fixos.

Carga resistiva

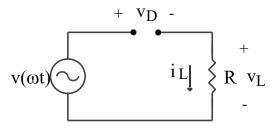


 I^a etapa $0 < \omega t < \pi$



 V_{p} V_{p

 2^a etapa $\pi < \omega t < 2\pi$



 v_{D} 0 π 2π 3π 4π $-v_{p}$ a etapa 2^{a} etapa

Prof. Alceu A. Badin

UTFPR/DAELT

Carga resistiva – tensão média

$$v_{L}(\omega t) = \begin{cases} V_{p}.sen(\omega t) \to 0 < wt < \pi \\ 0 \to \pi < wt < 2\pi \end{cases}$$



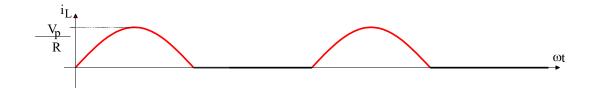
$$V_{Lmed} = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} v_{L}(\omega t) dt \xrightarrow{\omega t} \frac{1}{\omega T} \int_{0}^{\omega T} v_{L}(\omega t) d\omega t$$

$$V_{Lmed} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} V_p.sen(\omega t) d\omega t \rightarrow \frac{1}{2\pi} V_p \left[-\cos(\omega t) \right]_0^{\pi}$$

$$V_{{\it Lmed}} = rac{V_p}{\pi}$$

Carga resistiva – corrente média

$$i_{L}(\omega t) = \begin{cases} \frac{V_{p}}{R} . sen(\omega t) \to 0 < wt < \pi \\ 0 \to \pi < wt < 2\pi \end{cases}$$



$$I_{Lmed} = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} i_{L}(\omega t) dt \xrightarrow{\omega t} \frac{1}{\omega T} \int_{0}^{\omega T} i_{L}(\omega t) d\omega t$$

$$I_{Lmed} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{V_p}{R} . sen(\omega t) d\omega t \rightarrow \frac{1}{2\pi} \frac{V_p}{R} \left[-\cos(\omega t) \right]_0^{\pi}$$

$$I_{Lmed} = rac{V_p}{\pi R}$$

Carga resistiva – tensão eficaz

$$v_{L}(\omega t) = \begin{cases} V_{p}.sen(\omega t) \to 0 < wt < \pi \\ 0 \to \pi < wt < 2\pi \end{cases}$$

$$V_{Lef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{0}^{T} v_{L}(\omega t)^{2} dt} \xrightarrow{\omega t} \sqrt{\frac{1}{\omega T} \int_{0}^{\omega T} v_{L}(\omega t)^{2} d\omega t}$$

$$V_{Lef} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \left(V_p.sen(\omega t) \right)^2 d\omega t} \rightarrow \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left(V_p \right)^2 \left[\frac{\omega t}{2} - \frac{\cos(2\omega t)}{4} \right]_0^{\pi}}$$

$$V_{Lmed} = \frac{V_p}{2}$$

Carga resistiva – Corrente eficaz

$$i_{L}(\omega t) = \begin{cases} \frac{V_{p}}{R} . sen(\omega t) \to 0 < wt < \pi \\ 0 \to \pi < wt < 2\pi \end{cases}$$

$$I_{Lef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{0}^{T} i_{L}(\omega t)^{2} dt} \xrightarrow{\omega t} \sqrt{\frac{1}{\omega T} \int_{0}^{\omega T} i_{L}(\omega t)^{2} d\omega t}$$

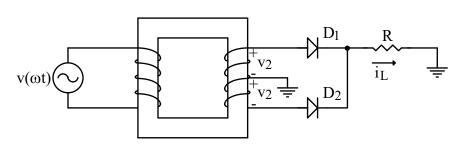
$$I_{Lef} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \left(\frac{V_p}{R}.sen(\omega t)\right)^2 d\omega t} \to \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left(\frac{V_p}{R}\right)^2 \left[\frac{\omega t}{2} - \frac{\cos(2\omega t)}{4}\right]_0^{\pi}}$$

$$I_{Lmed} = \frac{V_p}{2R}$$

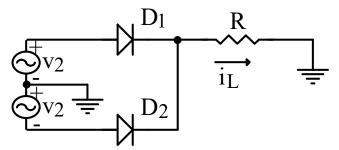
Retificador Monofásico de Onda Completa com Ponto Médio

- Vantagens:
- Não apresenta componente média na corrente de entrada;
- A tensão de saída apresenta valor médio superior ao meia ponte;
- Desvantagens:
- A tensão sobre os diodos é o dobro da tensão de secundário;
- Maior número de componentes;
- É necessário um transformador com dois secundários.
- Secundários sub utilizados (apenas em um semiciclo).

Retificador com ponto médio

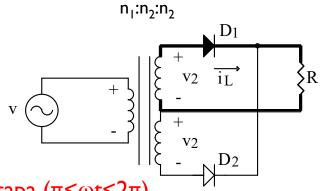


Circuito equivalente

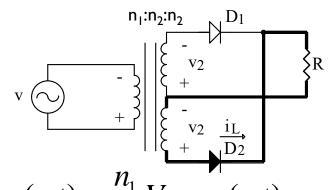


Retificador Monofásico de Onda Completa com Ponto Médio

I^a Etapa (0< ω t< π)

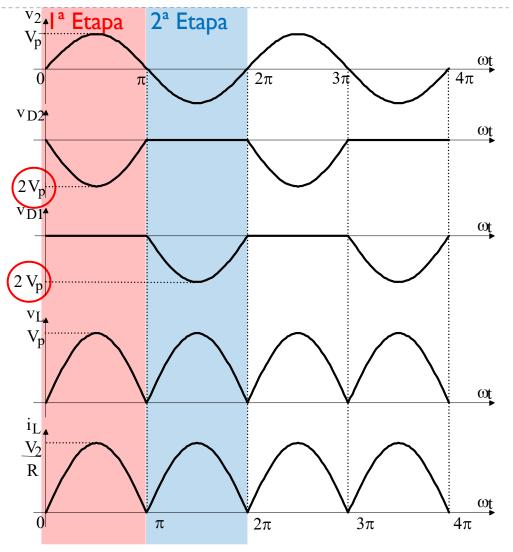


 2^a Etapa ($\pi < \omega t < 2\pi$)



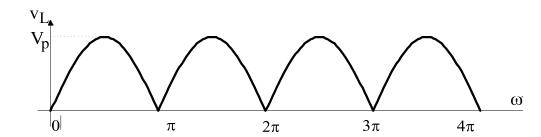
$$v(\omega t) = \frac{n_1}{n_2} V_p.sen(\omega t)$$
$$v_2(\omega t) = V_p.sen(\omega t)$$

$$v_2(\omega t) = V_p.sen(\omega t)$$



tensão média

$$v_{L}(\omega t) = \begin{cases} V_{p}.sen(\omega t) \to 0 < wt < \pi \\ -V_{p}.sen(\omega t) \to \pi < wt < 2\pi \end{cases}$$



$$V_{Lmed} = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} v_{L}(\omega t) dt \xrightarrow{\omega t} \frac{1}{\omega T} \int_{0}^{\omega T} v_{L}(\omega t) d\omega t$$

(frequência no dobro da tensão de entrada – integração em meio ciclo da rede)

ciclo da rede)
$$V_{Lmed} = \frac{1}{\pi} \int_{0}^{\pi} V_{p}.sen(\omega t) d\omega t \rightarrow \frac{1}{\pi} V_{p} \left[-\cos(\omega t) \right]_{0}^{\pi}$$

$$V_{Lmed} = rac{2V_p}{\pi}$$

Prof. Alceu A. Badin

JTFPR/DAELT

Carga resistiva – corrente média

$$i_{L}(\omega t) = \begin{cases} \frac{V_{p}}{R}.sen(\omega t) \to 0 < wt < \pi & \frac{i_{L}}{V_{p}} \\ -\frac{V_{p}}{R}.sen(\omega t) \to \pi < wt < 2\pi & \frac{1}{0} \end{cases} \xrightarrow{\pi} \underbrace{\frac{i_{L}}{V_{p}}}_{\pi} \underbrace{\frac{i_{L}}{V_$$

frequência no dobro da tensão de entrada

$$I_{Lmed} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{V_p}{R} . sen(\omega t) d\omega t \rightarrow \frac{1}{\pi} \frac{V_p}{R} \left[-\cos(\omega t) \right]_0^{\pi}$$

$$I_{Lmed} = \frac{2V_p}{\pi R}$$

Carga resistiva – tensão eficaz

$$v_{L}(\omega t) = \begin{cases} V_{p}.sen(\omega t) \to 0 < wt < \pi \\ -V_{p}.sen(\omega t) \to \pi < wt < 2\pi \end{cases}$$

$$V_{Lef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{0}^{T} v_{L}(\omega t)^{2} dt} \xrightarrow{\omega t} \sqrt{\frac{1}{\omega T} \int_{0}^{\omega T} v_{L}(\omega t)^{2} d\omega t}$$

$$V_{Lef} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \left(V_p.sen(\omega t) \right)^2 d\omega t} \rightarrow \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(V_p \right)^2 \left[\frac{\omega t}{2} - \frac{\cos(2\omega t)}{4} \right]_0^{\pi}}$$

$$V_{Lef} = rac{V_p}{\sqrt{2}}$$

Carga resistiva – Corrente eficaz

$$i_{L}(\omega t) = \begin{cases} \frac{V_{p}}{R} . sen(\omega t) \to 0 < wt < \pi \\ -\frac{V_{p}}{R} . sen(\omega t) \to \pi < wt < 2\pi \end{cases}$$

$$I_{Lef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{0}^{T} i_{L}(\omega t)^{2} dt} \xrightarrow{\omega t} \sqrt{\frac{1}{\omega T} \int_{0}^{\omega T} i_{L}(\omega t)^{2} d\omega t}$$

$$I_{Lef} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{0}^{\pi} \left(\frac{V_{p}}{R}.sen(\omega t)\right)^{2} d\omega t} \rightarrow \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\frac{V_{p}}{R}\right)^{2} \left[\frac{\omega t}{2} - \frac{\cos(2\omega t)}{4}\right]_{0}^{\pi}}$$

$$I_{Lef} = \frac{V_p}{\sqrt{2R}}$$

Potência de saída (P_o)

$$P_o = R.I_{Lef}^2$$

$$P_o = \frac{V_p^2}{2R}$$

Carga resistiva – Corrente média no diodo DI

$$i_{D_1}(\omega t) = \begin{cases} \frac{V_p}{R} . sen(\omega t) \to 0 < wt < \pi \\ 0 \to \pi < wt < 2\pi \end{cases}$$

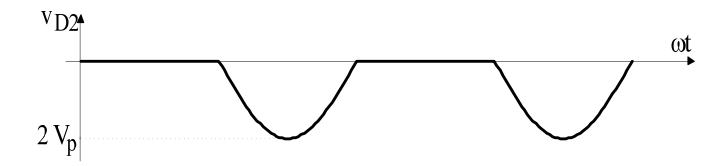


$$I_{D_1 med} = \frac{1}{T} \int_0^T i_{D_1}(\omega t) dt \xrightarrow{\omega t} \frac{1}{\omega T} \int_0^{\omega T} i_{D_1}(\omega t) d\omega t$$

$$I_{I_{D_{1}med}} = \frac{1}{2\pi} \int_{0}^{\pi} \frac{V_{p}}{R} . sen(\omega t) d\omega t \rightarrow \frac{1}{2\pi} \frac{V_{p}}{R} \left[-\cos(\omega t) \right]_{0}^{\pi}$$

$$I_{I_{D_{1}med}}=rac{V_{p}}{\pi R}$$

Tensão máxima reversa no diodo DI



$$V_{D_{1} \max} = 2V_{p}$$

Meia onda X Onda completa com ponto médio

	Meia onda	Onda completa – ponto médio
V _{Lmed}	V_p/π	$2V_p/\pi$
Lmed	$V_p/\pi R$	$2V_p/\pi R$
DImed	$V_p/\pi R$	$V_p/\pi R$
V _{DImax}	V_p	$2V_p$
P _o	$V_p^2/4R$	$V_p^2/2R$

Retificador Monofásico de Onda Completa em Ponte

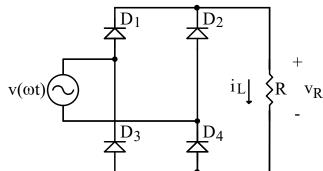
Vantagens:

Não apresenta componente média na corrente de entrada:



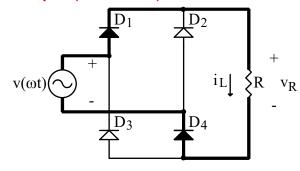


- Se houver isolamento na entrada, o transformador apresenta apenas um secundário.
- Desvantagens:
- Maior número de semicondutores;
- Dois condutores conduzindo simultaneamente.

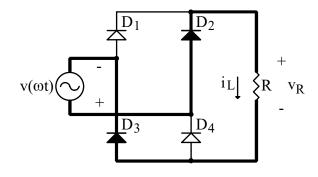


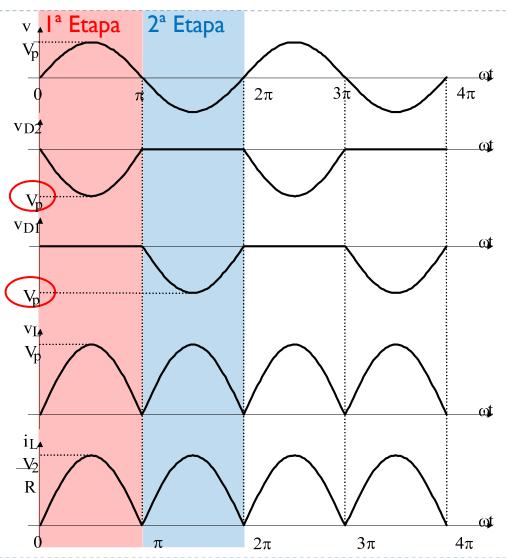
Retificador Monofásico de Onda Completa em ponte

I^a Etapa (0< ω t< π)



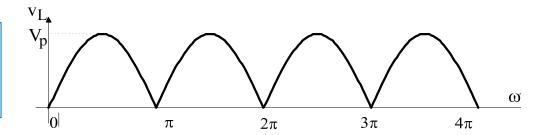
2^a Etapa ($\pi < \omega t < 2\pi$)





tensão média

$$v_{L}(\omega t) = \begin{cases} V_{p}.sen(\omega t) \to 0 < wt < \pi \\ -V_{p}.sen(\omega t) \to \pi < wt < 2\pi \end{cases}$$



$$V_{Lmed} = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} v_{L}(\omega t) dt \xrightarrow{\omega t} \frac{1}{\omega T} \int_{0}^{\omega T} v_{L}(\omega t) d\omega t$$

(frequência no dobro da tensão de entrada – integração em meio ciclo da rede)

ciclo da rede)
$$V_{Lmed} = \frac{1}{\pi} \int_{0}^{\pi} V_{p}.sen(\omega t) d\omega t \rightarrow \frac{1}{\pi} V_{p} \left[-\cos(\omega t) \right]_{0}^{\pi}$$

$$V_{Lmed} = rac{2V_p}{\pi}$$

Prof. Alceu A. Badin

JTFPR/DAELT

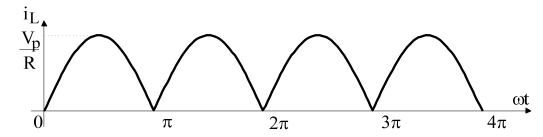
Carga resistiva – corrente média

$$i_{L}(\omega t) = \begin{cases} \frac{V_{p}}{R} . sen(\omega t) \to 0 < wt < \pi \\ -\frac{V_{p}}{R} . sen(\omega t) \to \pi < wt < 2\pi \end{cases}$$

$$i_{L}$$

$$v_{p}$$

$$R$$



$$I_{Lmed} = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} i_{L}(\omega t) dt \xrightarrow{\omega t} \frac{1}{\omega T} \int_{0}^{\omega T} i_{L}(\omega t) d\omega t$$

requência no dobro da tensão de entrada

$$I_{Lmed} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{V_p}{R} . sen(\omega t) d\omega t \rightarrow \frac{1}{\pi} \frac{V_p}{R} \left[-\cos(\omega t) \right]_0^{\pi}$$

$$I_{Lmed} = \frac{2V_p}{\pi R}$$

Carga resistiva – tensão eficaz

$$v_{L}(\omega t) = \begin{cases} V_{p}.sen(\omega t) \to 0 < wt < \pi \\ -V_{p}.sen(\omega t) \to \pi < wt < 2\pi \end{cases}$$

$$V_{Lef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{0}^{T} v_{L}(\omega t)^{2} dt} \xrightarrow{\omega t} \sqrt{\frac{1}{\omega T} \int_{0}^{\omega T} v_{L}(\omega t)^{2} d\omega t}$$

$$V_{Lef} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \left(V_p.sen(\omega t) \right)^2 d\omega t} \rightarrow \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(V_p \right)^2 \left[\frac{\omega t}{2} - \frac{\cos(2\omega t)}{4} \right]_0^{\pi}}$$

$$V_{Lef} = rac{V_p}{\sqrt{2}}$$

Carga resistiva – Corrente eficaz

$$i_{L}(\omega t) = \begin{cases} \frac{V_{p}}{R} . sen(\omega t) \to 0 < wt < \pi \\ -\frac{V_{p}}{R} . sen(\omega t) \to \pi < wt < 2\pi \end{cases}$$

$$I_{Lef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{0}^{T} i_{L}(\omega t)^{2} dt} \xrightarrow{\omega t} \sqrt{\frac{1}{\omega T} \int_{0}^{\omega T} i_{L}(\omega t)^{2} d\omega t}$$

$$I_{Lef} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{0}^{\pi} \left(\frac{V_{p}}{R}.sen(\omega t)\right)^{2} d\omega t} \rightarrow \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\frac{V_{p}}{R}\right)^{2} \left[\frac{\omega t}{2} - \frac{\cos(2\omega t)}{4}\right]_{0}^{\pi}}$$

$$I_{Lef} = \frac{V_p}{\sqrt{2R}}$$

Potência de saída (P_o)

$$P_o = R.I_{Lef}^2$$

$$P_o = \frac{V_p^2}{2R}$$

Carga resistiva – Corrente média no diodo DI

$$i_{D_1}(\omega t) = \begin{cases} \frac{V_p}{R} . sen(\omega t) \to 0 < wt < \pi \\ 0 \to \pi < wt < 2\pi \end{cases}$$



$$I_{D_1 med} = \frac{1}{T} \int_0^T i_{D_1}(\omega t) dt \xrightarrow{\omega t} \frac{1}{\omega T} \int_0^{\omega T} i_{D_1}(\omega t) d\omega t$$

$$I_{I_{D_{1}med}} = \frac{1}{2\pi} \int_{0}^{\pi} \frac{V_{p}}{R} . sen(\omega t) d\omega t \rightarrow \frac{1}{2\pi} \frac{V_{p}}{R} \left[-\cos(\omega t) \right]_{0}^{\pi}$$

$$I_{I_{D_{1}med}} = rac{V_{p}}{\pi R}$$

- Tensões e correntes na carga similares ao com ponto médio.
- Diferenças:
 - Dois diodos conduzindo simultaneamente
 - Numero maior de diodos;
 - Não precisa de transformador.
 - Tensão máxima sobre cada diodo:

$$V_{_{D_{\mathrm{l}}\,\mathrm{max}}}=V_{_{p}}$$

Carga resistiva

	Ponto médio	Em ponte
V _{Lmed}	$2V_p/\pi$	$2V_p/\pi$
Lmed	$2V_p/\pi R$	$2V_p/\pi R$
I _{DImed}	$V_p/\pi R$	$V_p/\pi R$
V _{DImax}	$2V_p$	$oldsymbol{V}_p$
No. de diodos	2	4

Referências

- ▶ BARBI, Ivo. Eletrônica de Potência; 6ª Edição, UFSC, 2006.
- AHMED, Ashfaq. Eletrônica de Potência; Editora: Prentice Hall, la edição, 2000.
- ▶ BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos. I I. ed. São Paulo, SP: Pearson Education do Brasil, c2013. xii, 766 p. ISBN 9788564574212