

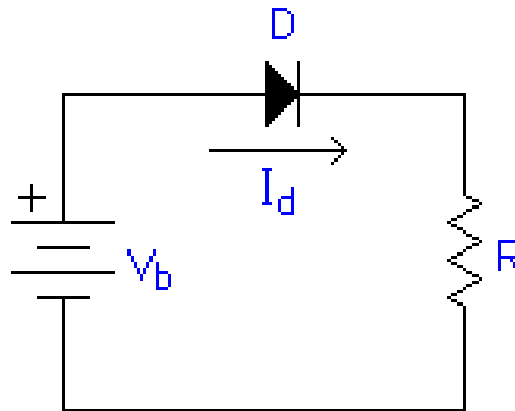
CIRCUITOS COM DIODOS: RETIFICADORES

J.R. Kaschny

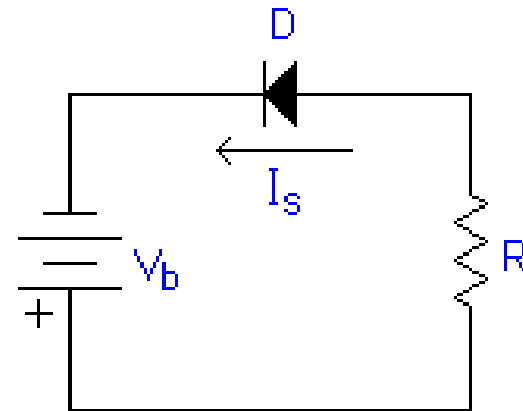
INTRODUÇÃO

Recordando: O diodo é um dispositivo que permite a passagem de corrente elétrica em uma única direção, idealmente comportando-se como um curto circuito ou um circuito em aberto.

Polarização Direta



Polarização Reversa



Ideal

$$I_d = \frac{V_b}{R}$$

$$I_s = 0$$

Real

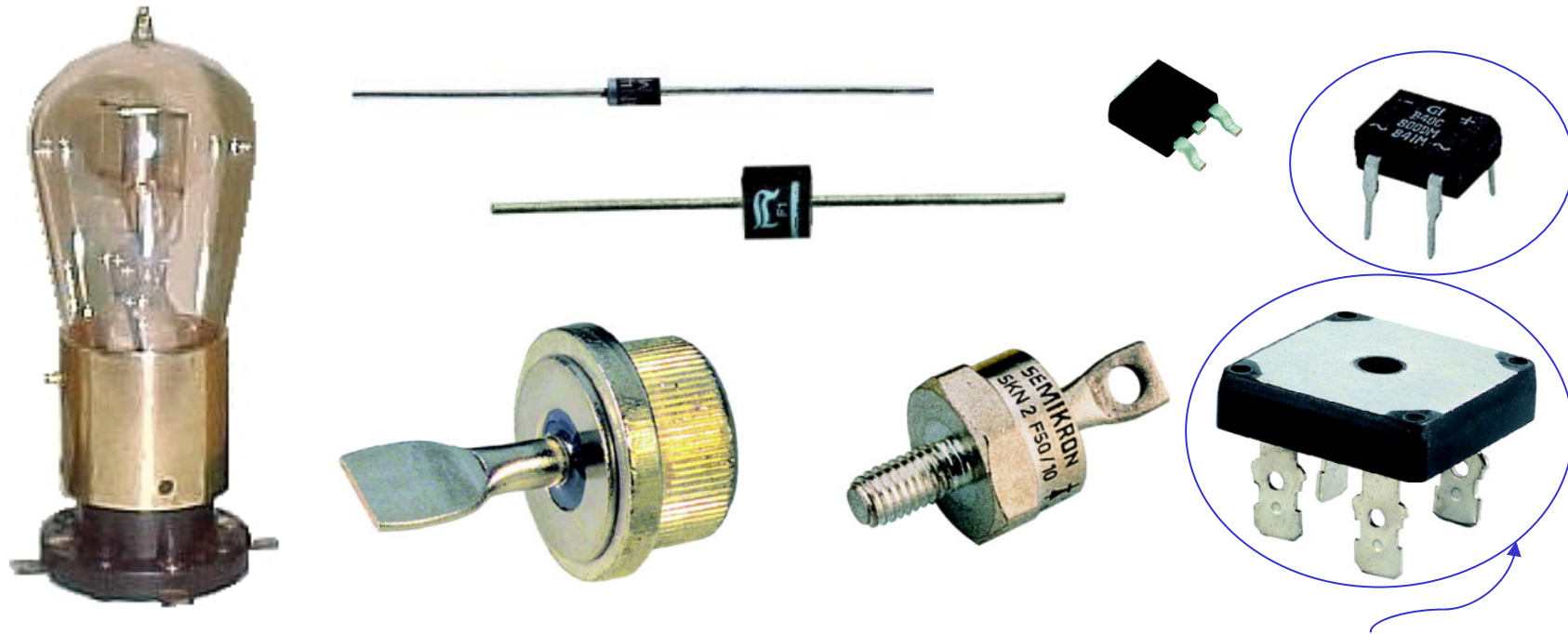
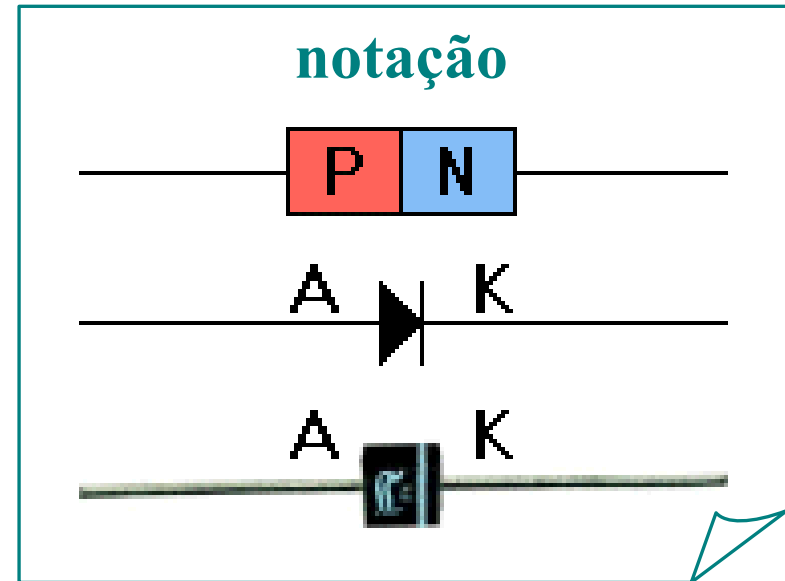
$$I_d = \frac{(V_b - V_d)}{R}$$

$$I_s > 0$$

Os diodos podem ser baseados em:

- a. Efeito termoiônico: válvulas eletrônicas.
(atualmente pouco comum)
- b. Semicondutores: diodo de estado solido.
(uso geral e bem difundido)

Estes dispositivos podem se apresentar com diversos aspectos, tais como:



associação de diodos em ponte

A curva $I \times V$ típica destes dispositivos é:

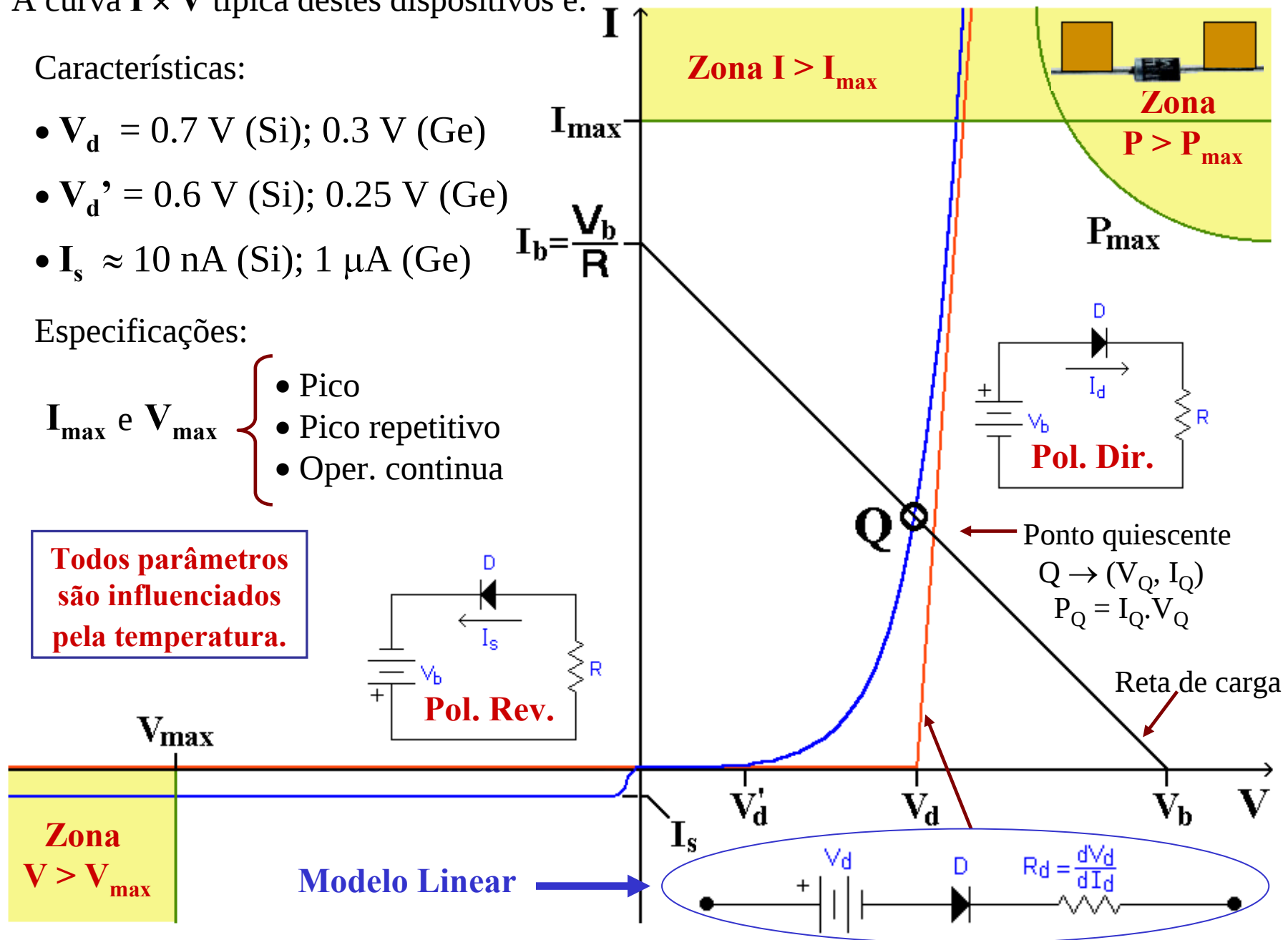
Características:

- $V_d = 0.7 \text{ V (Si); } 0.3 \text{ V (Ge)}$
- $V_d' = 0.6 \text{ V (Si); } 0.25 \text{ V (Ge)}$
- $I_s \approx 10 \text{ nA (Si); } 1 \mu\text{A (Ge)}$

Especificações:

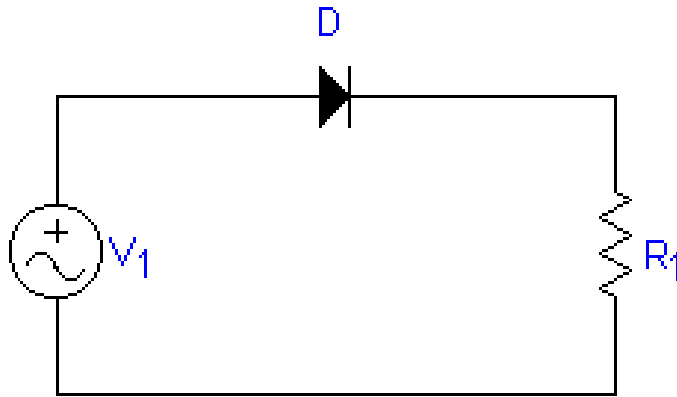
- $I_{\max}$ e $V_{\max}$ {
- Pico
 - Pico repetitivo
 - Oper. continua

**Todos parâmetros
são influenciados
pela temperatura.**



RETIFICADOR DE MEIA-ONDA

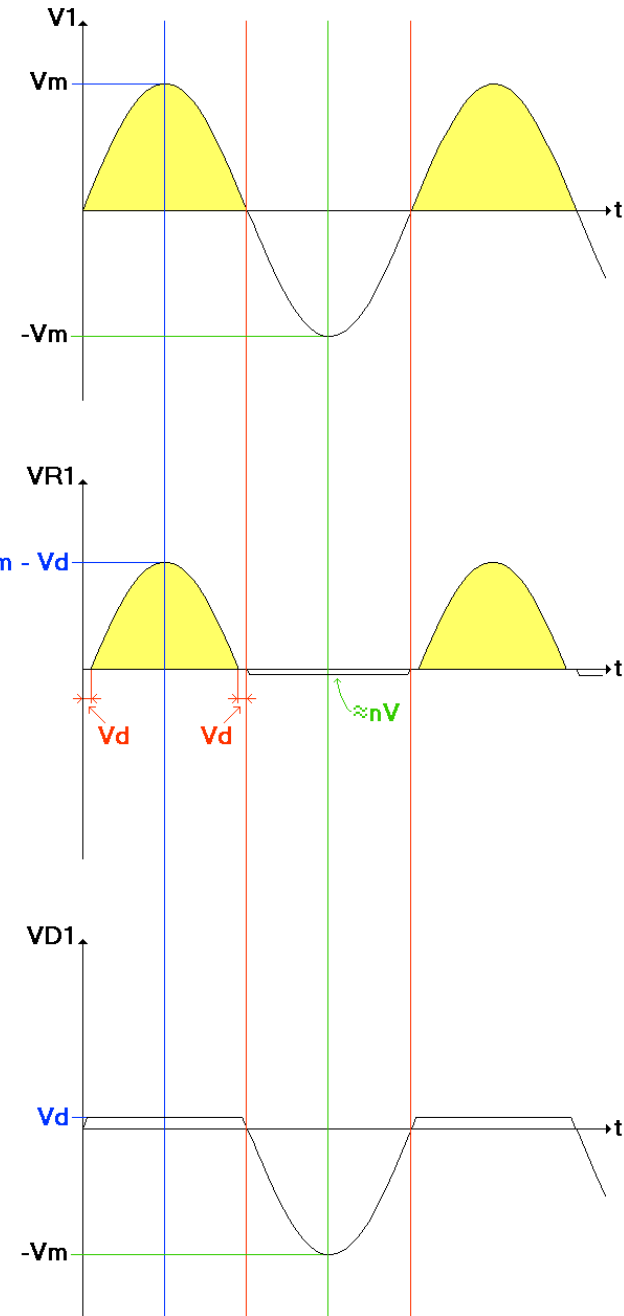
Vamos analisar a operação de um diodo em regime alternado, formando um circuito tipicamente chamado de retificador de meia-onda. Nesta primeira análise consideremos um carga puramente resistiva, R_1 , ou seja:



$$\text{onde } V_1 = V_m \text{sen}(\omega t)$$

$$\text{com } \omega = 2\pi.f \quad \text{e} \quad \theta = \omega.t$$

$$\Rightarrow V_1 = V_m \text{sen}(\theta)$$



Nesta aplicação o diodo deve suportar:

- corrente direta máxima:

$$I_{\max} > (V_m - V_d)/R$$

- tensão reversa máxima:

$$V_{\max} > V_m$$

Adotando 20% como margem de segurança, escolhemos um diodo VR1 com:

- corrente direta máxima:

$$I_{\max} = 1.2 \times (V_m - V_d)/R$$

- tensão reversa máxima:

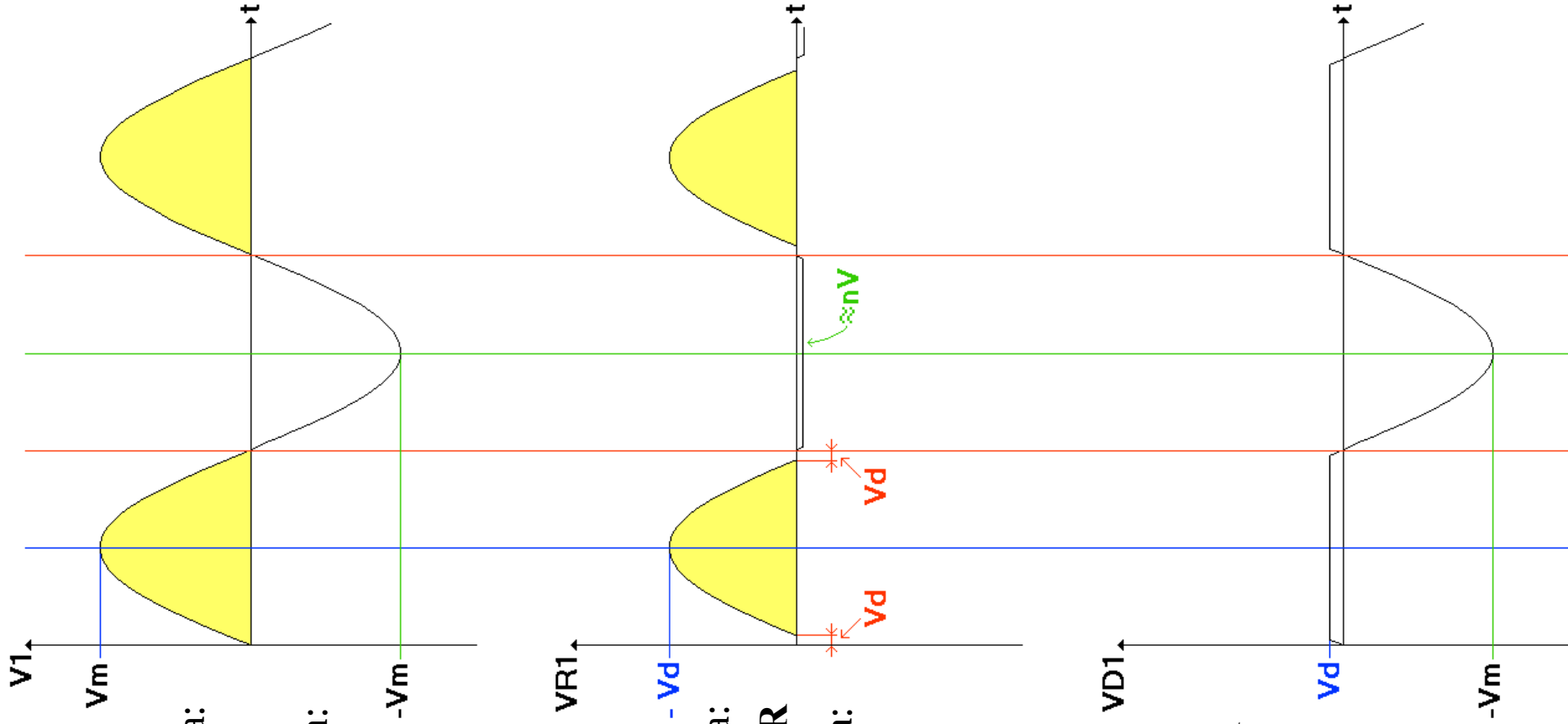
$$V_{\max} = 1.2 \times V_m$$

onde $I_{\max}$ e $V_{\max}$ são os valores de operação com tina (ver tabela).

Adicionalmente:

$$P_{\text{pico}} = V_d \times (V_m - V_d)/R$$

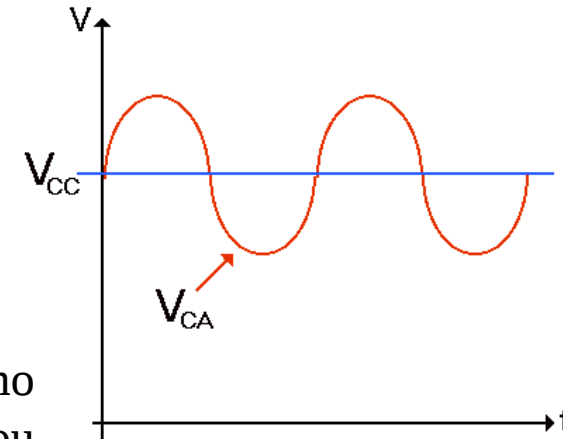
placas de metálicas



FATOR DE ONDULAÇÃO (RIPPLE)

De uma maneira geral, o fator de ondulação, r , usualmente chamado “ripple”, é definido pela razão:

$$r = \frac{V_{r(RMS)}}{V_{AV}} = \frac{\text{Valor RMS da componente CA}}{\text{Valor médio do sinal}}$$



Usualmente, podemos decompor o sinal, V , em um termo médio (CC), V_{CC} , e um termo periódico (CA), V_{CA} , ou seja:

$$V = V_{CC} + V_{CA} \Rightarrow V_{CA} = V - V_{CC}$$

onde:

$$V_{CC} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V d\theta = V_{AV} = \text{Valor médio do sinal}$$

$$V_{r(RMS)} = \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{CA}^2 d\theta \right]^{1/2}$$

Nestas integrais, o fator $1/2\pi$ corresponde a integração sobre um ciclo de período $T=1/f$. Isto pode ser feito pois temos V_{CA} periódico!

com $\theta = \omega t$ e $\omega = 2\pi f$. Aqui excluimos regimes ruidosos, onde V_{CA} deixa de ser periódico.

RIPPLE NO RETIFICADOR DE MEIA-ONDA

Neste caso teremos:

$$V = \begin{cases} V'_m \text{sen}\theta & \text{para } 0 \leq \theta \leq \pi \\ 0 & \text{para } \pi < \theta < 2\pi \end{cases}$$

Aqui ignoramos V_d ! Para compensar isto adotamos:

$$V'_m = V_m - V_d$$

$$\Rightarrow V_{CC} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V d\theta = \frac{V'_m}{2\pi} \int_0^{\pi} \text{sen}\theta d\theta = \frac{V'_m}{\pi} = \frac{V_m - V_d}{\pi}$$

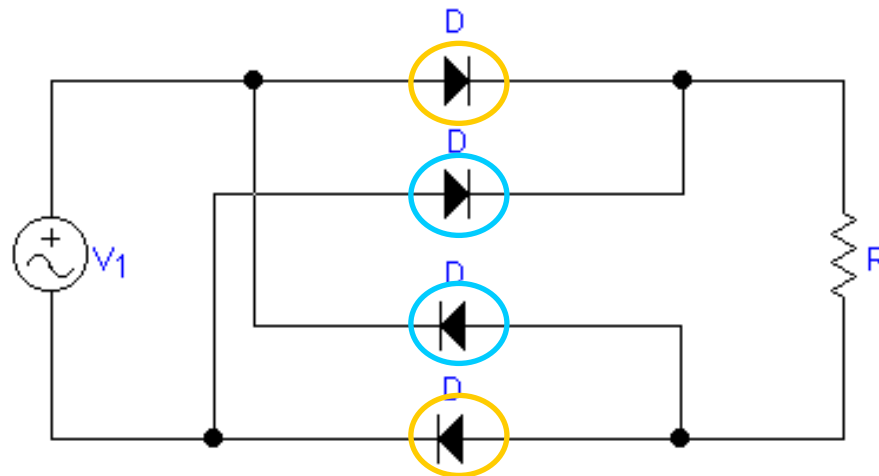
$$\Rightarrow V_{r(\text{RMS})}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{CA}^2 d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (V - V_{CC})^2 d\theta = 0.385 \cdot (V_m - V_d)$$

pois

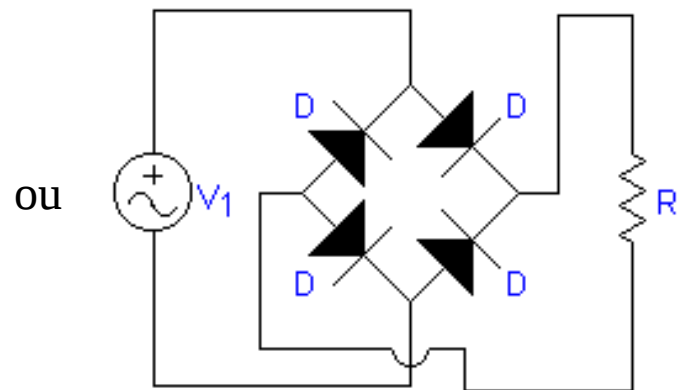
$$\begin{aligned} V_{r(\text{RMS})}^2 &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V^2 d\theta - \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} 2V \cdot V_{CC} d\theta + \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{CC}^2 d\theta = \frac{V_m'^2}{2\pi} \int_0^{\pi} \text{sen}^2 \theta d\theta - \\ &\quad - \frac{V_m'^2}{\pi^2} \int_0^{\pi} \text{sen}\theta d\theta + \frac{V_m'^2}{2\pi^3} 2\pi = \frac{V_m'^2}{2\pi} \frac{\pi}{2} - \frac{V_m'^2}{\pi^2} 2 + \frac{V_m'^2}{\pi^2} = V_m'^2 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{\pi^2} \right) \end{aligned}$$

Portanto obtemos: $r = V_{r(\text{RMS})} / V_{CC} = 1.209$ ou seja, um ripple de **120.9% (122%)**.

RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA (PONTE)



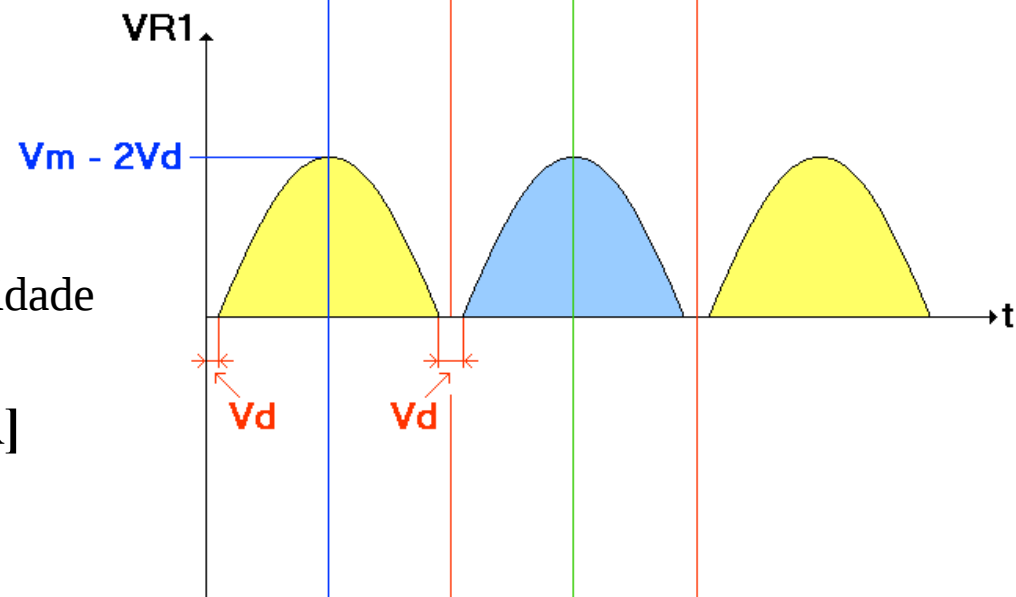
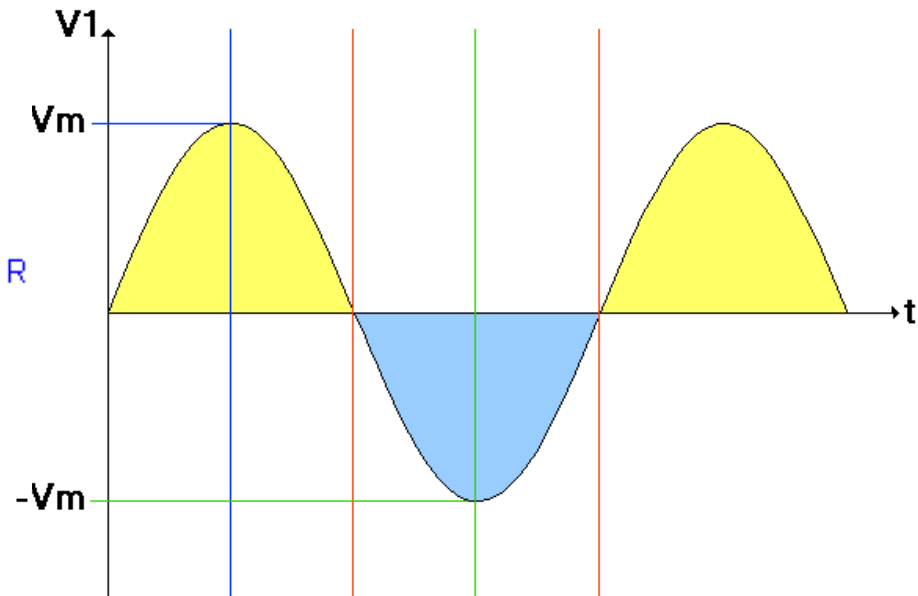
(todos diodos idênticos)



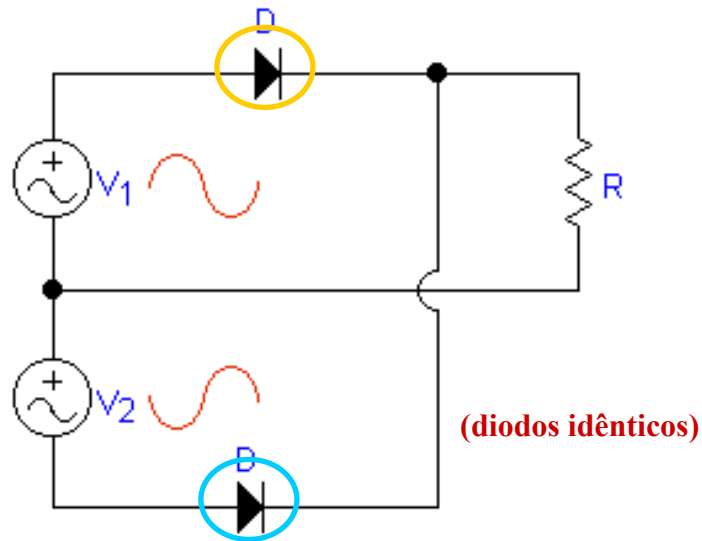
Assumindo uma margem de confiabilidade de 20%, o diodo deve ser tal que:

$$I_{\max} = 1.2 \times [(V_m - 2 \times V_d)/R]$$

$$V_{\max} = 1.2 \times V_m$$



RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA (BIFÁSICO)

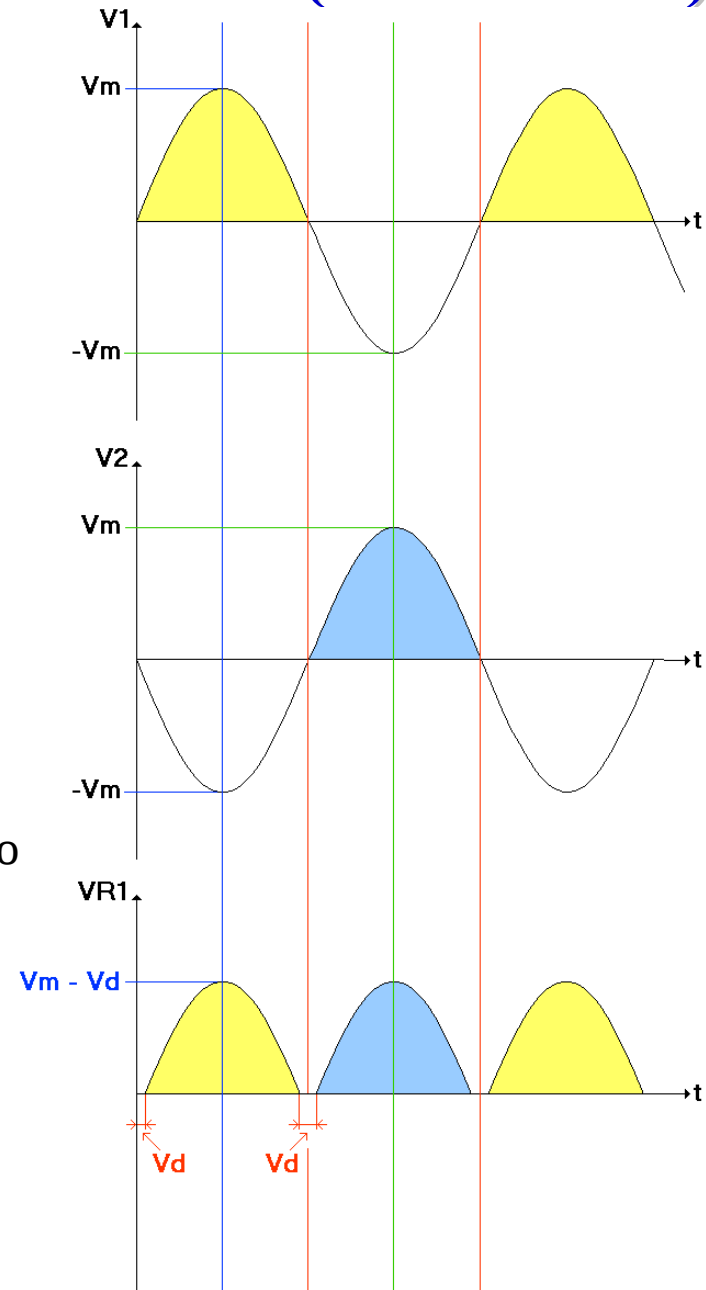


onde $V_1 = V_m \sin(\omega t) = -V_2$

Assumindo uma margem de confiabilidade de 20%, o diodo deve ser tal que:

$$I_{\max} = 1.2 \times [(V_m - 2 \times V_d)/R]$$

$$V_{\max} = 1.2 \times (2 \times V_m)$$



RIPPLE NO RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA

Neste caso teremos:

$$V = \begin{cases} V'_m \text{sen}\theta & \text{para } 0 \leq \theta \leq \pi \\ 0 & \text{para } \pi < \theta < 2\pi \end{cases}$$

Aqui ignoramos V_d ! Para compensar ...

$$V'_m = V_m - V'_d, \quad V'_d = \begin{cases} 2 \cdot V_d & \text{ponte} \\ V_d & \text{bifásico} \end{cases}$$

$$\Rightarrow V_{CC} = \frac{V'_m}{2\pi} \int_0^{\pi} \text{sen}\theta d\theta - \frac{V'_m}{2\pi} \int_{\pi}^{2\pi} \text{sen}\theta d\theta = \frac{2V'_m}{\pi}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow V_{r(RMS)}^2 &= \frac{V_m'^2}{2\pi} \left\{ \int_0^{\pi} \text{sen}^2\theta d\theta + \int_{\pi}^{2\pi} \text{sen}^2\theta d\theta + \right\} - \frac{2V_m'^2}{\pi^2} \left\{ \int_0^{\pi} \text{sen}\theta d\theta - \int_{\pi}^{2\pi} \text{sen}\theta d\theta \right\} \\ &+ \frac{4V_m'^2}{2\pi^3} \int_0^{2\pi} d\theta = V_m'^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{4}{\pi^2} \right) = 0.308 \cdot V_m'^2 \end{aligned}$$

Portanto obtemos:

$$r = V_{r(RMS)} / V_{CC} = 0.484$$

ou seja, um ripple de 48.4% (49%).

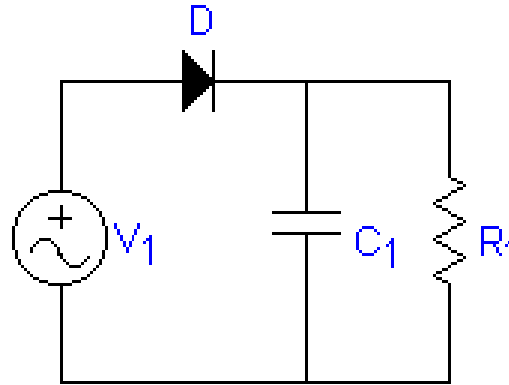
RETIFICADOR DE MEIA-ONDA COM CARGA RC

Neste caso, devemos escolher um diodo tal que:

$$V_{\max} > V_m + V'$$

ou, lembrando os 20%

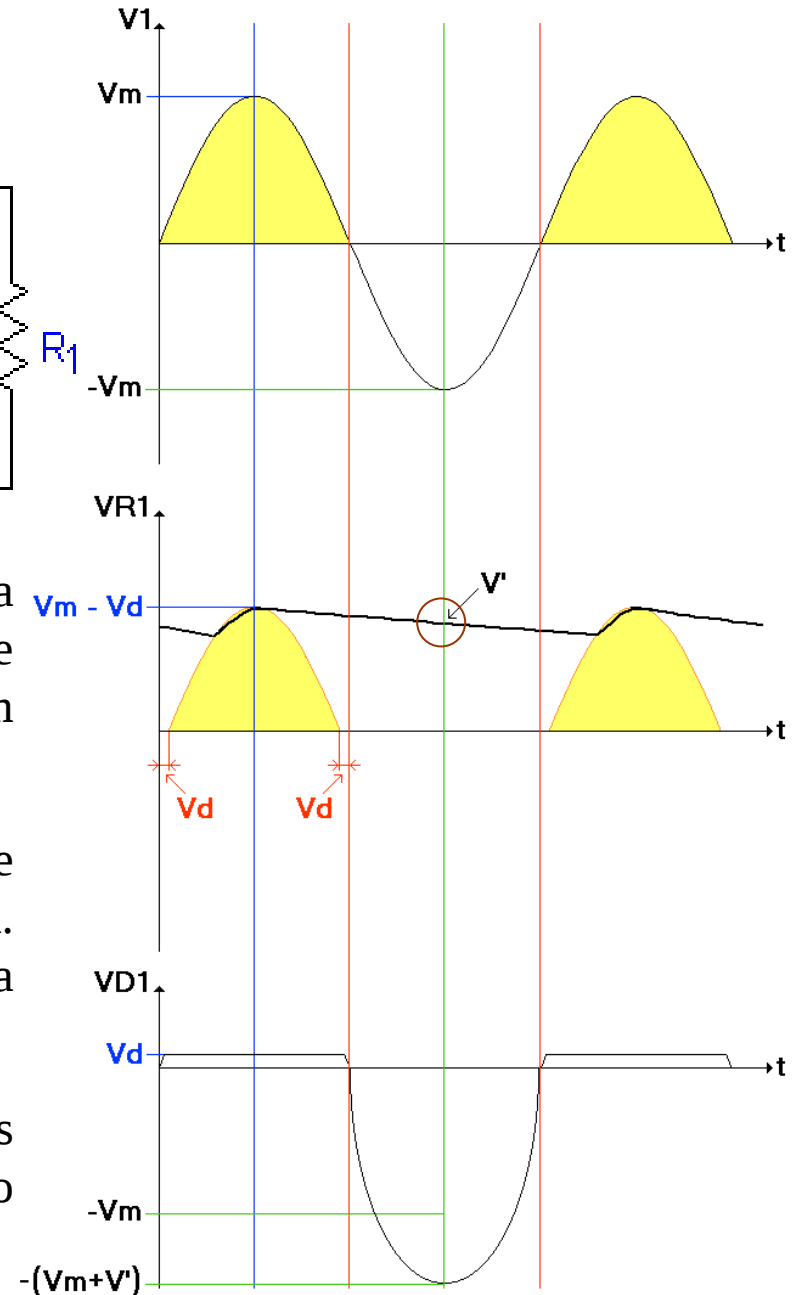
$$V_{\max} = 1.2 \times (2 \times V_m)$$



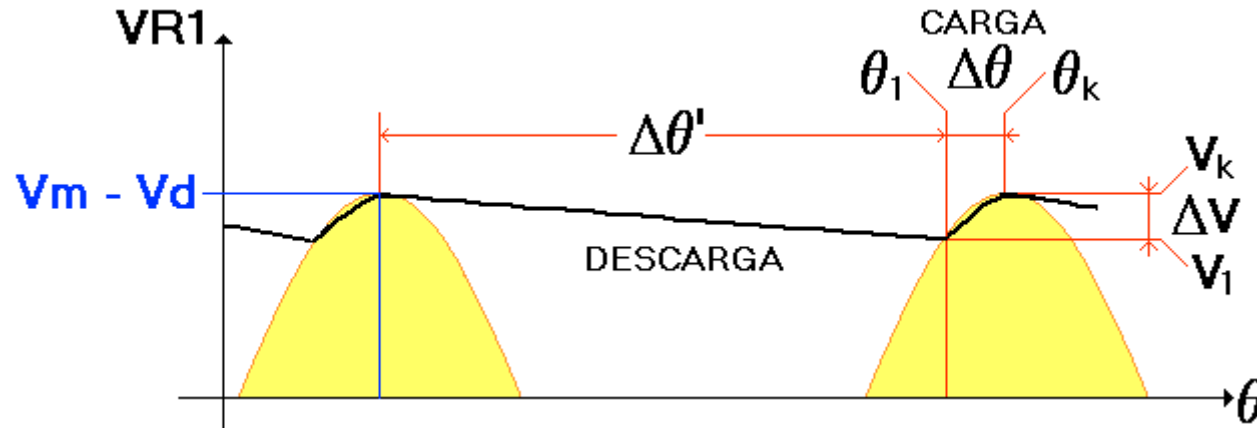
Como podemos observar, na ilustração ao lado, a tensão sobre o resistor de carga possuirá um ripple bem menor quando comparado com o circuito sem o capacitor C_1 .

Sob este ponto de vista, a tensão sobre R_1 se aproxima muito mais de uma tensão contínua. Dizemos que C_1 é um “capacitor de filtro” (na realidade temos um filtro Passa-Baixas).

Portanto, imaginando as aplicações disto, vamos determinar o valor deste capacitor como função do ripple desejado sobre a carga e do valor de R_1 .



Vamos assumir as seguintes simplificações:



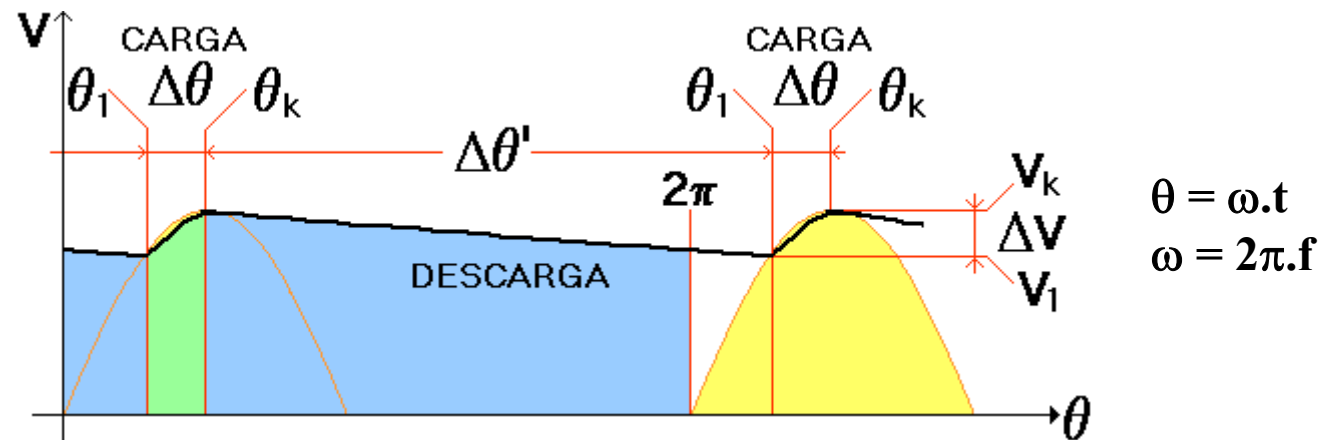
- Desprezamos V_d , ao considerarmos o meio ciclo positivo “completo”.
- Compensamos isto, parcialmente, considerando uma tensão de pico igual a $V_m - V_d$.
- Aproximamos a curva correspondente a carga e descarga de C_1 por segmentos de retas.
- A tensão de carga máxima de C_1 corresponde a tensão de pico, $V_m - V_d$.

Observando a ilustração mostrada acima, obtemos:

$$\Delta V = V_k - V_1 = (V_m - V_d) - (V_m - V_d) \cdot \text{sen}\theta_1 \quad \text{pois} \quad V_k = V_m - V_d$$

$$\Rightarrow \theta_1 = \arcsen\left(1 - \frac{\Delta V}{V_m - V_d}\right) \quad \text{como} \quad \theta_k = \frac{\pi}{2}$$

$$\Rightarrow \Delta\theta = \frac{\pi}{2} - \arcsen\left(1 - \frac{\Delta V}{V_m - V_d}\right) \quad \text{e} \quad \Delta\theta' = \frac{3\pi}{2} + \arcsen\left(1 - \frac{\Delta V}{V_m - V_d}\right)$$



$$\Rightarrow V = \begin{cases} -\frac{\Delta V}{\Delta\theta'}(\theta - \theta_1) + V_1 & \text{para } 0 \leq \theta \leq \theta_1 \\ +\frac{\Delta V}{\Delta\theta}(\theta - \theta_1) + V_1 & \text{para } \theta_1 \leq \theta \leq \pi/2 \\ -\frac{\Delta V}{\Delta\theta'}(\theta - \pi/2) + V_k & \text{para } \pi/2 \leq \theta \leq 2\pi \end{cases}$$

$$\Rightarrow V_{CC} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V d\theta = V_k - \frac{\Delta V}{2} \quad \Rightarrow V_{r(RMS)} = \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{CA}^2 d\theta \right]^{1/2} = \frac{\Delta V}{2\sqrt{3}}$$

$$\Rightarrow r = \frac{V_{r(RMS)}}{V_{CC}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\Delta V}{(2V_k - \Delta V)}$$

A partir destas expressões, podemos deduzir que:

$$\frac{V_k}{V_{CC}} = \frac{V_m - V_d}{V_{CC}} = 1 + \sqrt{3} \cdot r \quad \text{e} \quad \frac{V_{r(RMS)}}{V_k} = \frac{V_{r(RMS)}}{V_m - V_d} = \frac{r}{1 + \sqrt{3} \cdot r}$$

A corrente em C_1 durante a descarga será, aproximadamente, dada por:

$$I_d = \frac{\Delta Q}{\Delta t'} \quad \text{onde} \quad \Delta Q = C_1 \Delta V \quad \text{e} \quad \Delta t' = \frac{\Delta \theta'}{2\pi \cdot f} = \text{tempo de descarga}$$

Assumindo que o tempo de carga, $\Delta t = \Delta \theta / 2\pi \cdot f$, é muito menor que o tempo de descarga, ou seja, $\Delta \theta \ll \Delta \theta'$, teremos que $\Delta t' \approx 1/f$. Portanto, na media obteremos:

$$I_d = C_1 \cdot f \cdot \Delta V \approx \frac{V_{CC}}{R_1}$$

que em termos do ripple fornece:

$$C_1 = \frac{1}{2\sqrt{3} \cdot R_1 \cdot f \cdot r}$$

Para finalizar, vamos determinar a corrente que circula através do diodo, ou seja:

$$\begin{aligned} I_D &= I_R + I_C = \frac{[(V_m - V_d)\text{sen}(\omega t)]}{R_1} + C \frac{d}{dt} [(V_m - V_d)\text{sen}(\omega t)] \\ &= \frac{[(V_m - V_d)\text{sen}(\omega t)]}{R_1} + C \cdot \omega \cdot (V_m - V_d) \cos(\omega t) \end{aligned}$$

Determinando a respectiva corrente máxima, temos:

$$\Rightarrow \frac{dI_D}{dt} = 0 \quad \text{quando} \quad t_{\max} = \frac{\arctan\left[\frac{1}{C \cdot \omega \cdot (V_m - V_d)}\right]}{\omega}$$

que facilmente podemos comprovar que é realmente um máximo, pois $(d^2I_D/dt^2) < 0$, e ainda que:

$$I_D^{\max} = \frac{(V_m - V_d)}{R_1^2 \cdot C_1 \cdot \omega \cdot \psi} + \frac{C_1 \cdot \omega \cdot (V_m - V_d)}{\psi} \quad \text{onde} \quad \psi = \sqrt{1 + \frac{1}{R_1^2 \cdot C_1^2 \cdot \omega^2}}$$

e portanto, levando em consideração os 20% de confiabilidade, devemos escolher um diodo tal que:

$$I_{\max} = 1.2 \times I_D^{\max} \quad \dots \text{no “mínimo” !!!}$$

COMENTÁRIOS

- Em geral os valores obtidos para C_1 são bastante elevados - da ordem de milhares de μF 's. Tendo em mente que as imperfeições dos capacitores ficam bem mais evidentes em para capacitancias elevadas - em particular a indutancia serie,é recomendável associar em paralelo ao C_1 um capacitor menor com capacitancia da ordem de $0.1 \mu\text{F}$.
- Para aplicações que necessitem alta confiabilidade, não poupe no dimensionamento dos componentes Se possível !!!!!
- Em geral adota-se, no calculo de C_1 , r 's (ripple) inferiores a 5%.
- Na prática adota-se como valor de C_1 , o dobro do valor calculado teoricamente !!!!

EXERCÍCIOS

1. Com base na presente abordagem, efetuar o calculo de C_1 , $V_{\max}$ e $I_{\max}$ para o caso de um retificador onda completa com carga **RC**.
2. Como ficaria a situação se acrescentássemos um indutor **L** em serie com o **RC** ?

Referencias bibliográficas

- Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos, Robert L. Boylestad e Louis Nashelsky, editora Prentice-Hall do Brasil (2000).
- Teoria e Desenvolvimento de Projetos de Circuitos Eletrônicos, Antonio M.V. Cipelli e Waldir J. Sandrini, Editora Erica Ltda. (1982).
- Microelectronic Circuits, Adel S. Sedra, Oxford Series in Electrical Engineering, Oxford University Press; 4th edition (1997).
- Electronic Devices and Circuits, J. Millman, McGraw Hill (1967).