

SEL-EESC-USP

# Conversores *AC* ⚡ *DC*

Cálculo de Retificadores

2014

## SEL313 ó Circuitos Eletrônicos I

### Conversores AC/DC

#### 1. Tipos de Conversores

As fontes de alimentação de tensão e corrente contínuas usadas em eletrônica, em grande parte, são construídas através de circuitos retificadores baseados em transformadores monofásicos de  $60\text{ Hz}$ , retificadores de meia-onda ou de onda-completa e de filtros capacitivos. As topologias desses conversores AC/DC serão vistas a seguir.

##### 1.1 ó Retificador Monofásico de Meia-Onda

A Figura 1 mostra um retificador monofásico de meia-onda com filtro capacitivo.

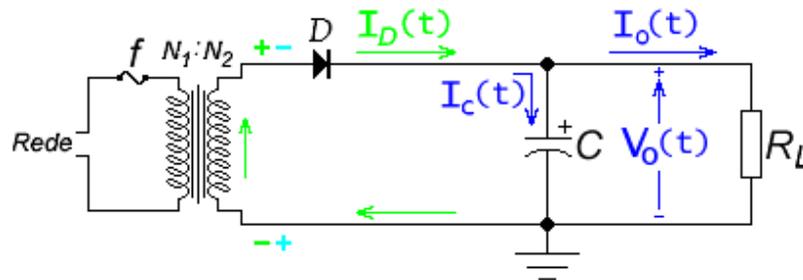


Figura 1 - Retificador Monofásico de Meia-Onda com Filtro Capacitivo.

Nesse circuito, um transformador monofásico, geralmente abaixador de tensão, aplica uma senóide, oriunda da rede de  $60\text{ Hz}$ , sobre um retificador de meia-onda constituído pelo diodo  $D$ . O capacitor  $C$  filtra a onda retificada tornando-a a mais constante possível. O sinal retificado e filtrado é recolhido por uma carga genérica  $R_L$ . O fusível  $f$  protege o circuito contra curtos-circuitos e sobrecargas. O retificador de meia-onda é preferido em aplicações de baixas correntes e de baixo custo, mas com desempenho deficiente.

##### 1.2 ó Retificador Monofásico de Onda-Completa com Dois Diodos e *Center Tap*

A Figura 2 mostra um retificador monofásico de onda-completa, com dois diodos, com tomada central (*center tap*) e com filtro capacitivo.

Nesse circuito, um transformador monofásico, geralmente abaixador de tensão, aplica uma senóide, oriunda da rede de  $60\text{ Hz}$ , sobre um retificador de onda-completa constituído pelos diodos  $D_1$  e  $D_2$ . O capacitor  $C$  filtra a onda retificada tornando-a a mais constante possível. O sinal retificado e filtrado é recolhido por uma carga genérica  $R_L$ . O fusível  $f$  protege o circuito contra curtos-circuitos e sobrecargas. O retificador de onda-completa com dois diodos e tomada central é preferido em aplicações de altas correntes e baixas tensões.

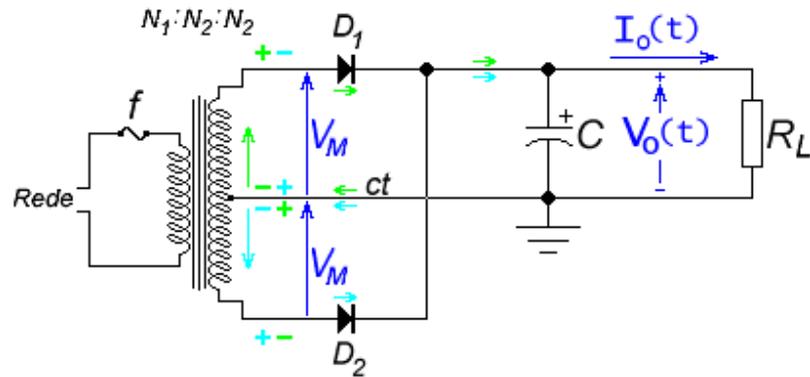


Figura 2 - Retificador Monofásico de Onda-Completa com Dois Diodos e com Filtro Capacitivo.

### 1.3 ó Retificador Monofásico de Onda-Completa com Diodos em Ponte

A Figura 3 mostra um retificador monofásico de onda-completa, com diodos em ponte e com filtro capacitivo.

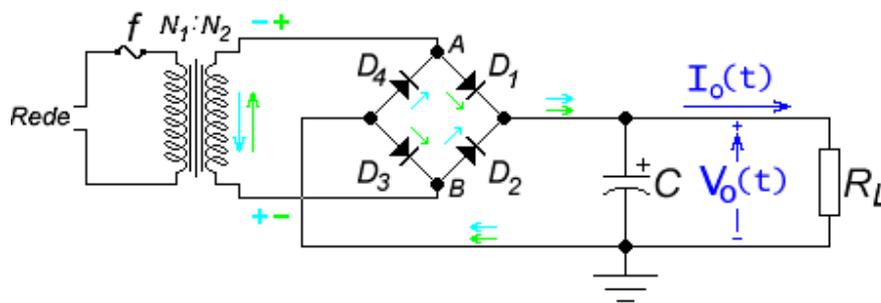


Figura 3 - Retificador Monofásico de Onda-Completa em Ponte e com Filtro Capacitivo.

Nesse circuito, um transformador monofásico, geralmente abaixador de tensão, aplica uma senóide, oriunda da rede de 60 Hz, sobre um retificador de onda-completa constituído pelos diodos  $D_1 \sim D_4$ . O capacitor  $C$  filtra a onda retificada tornando-a a mais constante possível. O sinal retificado e filtrado é recolhido por uma carga genérica  $R_L$ . O fusível  $f$  protege o circuito contra curtos-circuitos e sobrecargas. O retificador de onda-completa em ponte é preferido em aplicações de altas correntes e de tensões mais elevadas.

## 2. Cálculos Gráficos

### 2.1 ó Retificador Monofásico de Meia-Onda

A maneira mais prática e precisa de se calcular retificadores com filtros capacitivos ainda é através dos gráficos apresentados por Schade em 1943 [1]. As curvas mostradas nas Figuras 4, 6 e 7 fornecem todas as informações necessárias para os cálculos de retificadores de meia-onda. A resistência  $R_s$ , que aparece nesses gráficos, é equivalente à perda total do trafo somada à perda resistiva do diodo, se esta for conhecida.

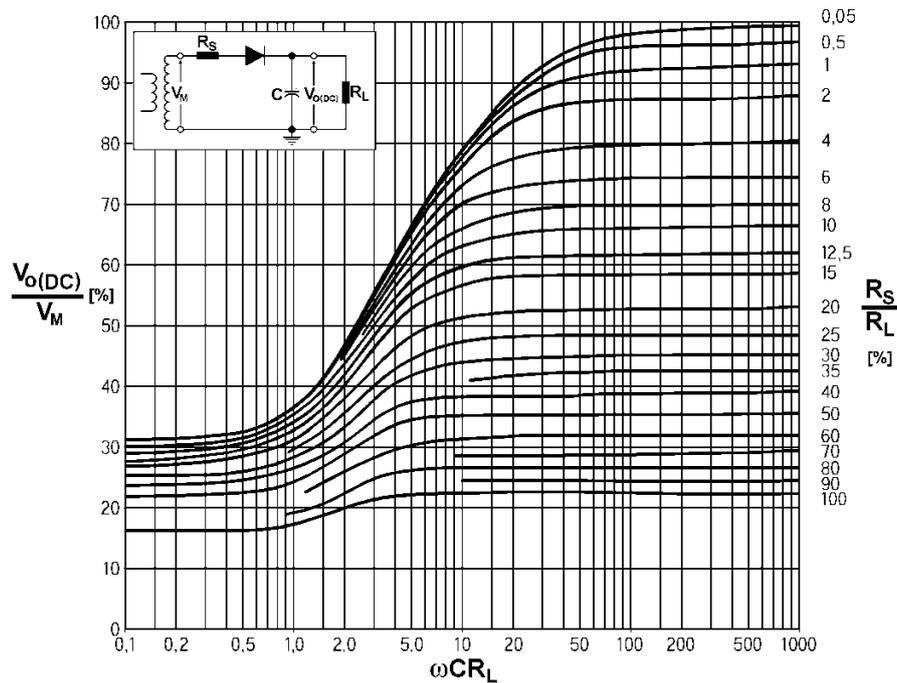


Figura 4 - Gráfico de Schade Usado para o Cálculo da Tensão de Saída da Fonte da Figura 1.

As resistências de perdas dos diodos podem ser negligenciadas, pois, como são as resistências dinâmicas desses componentes, possuem valores bem baixos. A queda de tensão direta por diodo normalmente deve ser considerada. Em fontes de alta corrente deve-se estipular, por diodo, a seguinte queda de tensão direta:  $V_\gamma = 1 \text{ V}$  ( $0,9 \text{ V} \leq V_\gamma \leq 1,2 \text{ V}$ ). Se o modelo linearizado do diodo for conhecido, no entanto, pode-se estipular  $R_S = R_{S(\text{trafo})} + R_{on}$  e uma queda por diodo igual a  $V_{fwd}$ , sendo  $R_{on}$  e  $V_{fwd}$  os parâmetros linearizados do diodo. Através do gráfico da Figura 4 pode-se calcular a tensão de saída ( $V_{o(DC)}$ ) da fonte da Figura 1 em função da tensão de pico do secundário do trafo ( $V_M = \sqrt{2}V_{ef}$ ), da razão  $R_S/R_L$  e do produto  $\omega CR_L$ . A resistência  $R_S$  representa as perdas totais em série do trafo mais diodo,  $C$  é o capacitor de filtro e  $\omega = 2\pi f$  é a frequência angular da senóide da rede ( $f = 60 \text{ Hz}$ ). Para que haja uma regulação satisfatória da tensão de saída, deve-se fazer  $\omega CR_L \geq 50$  e  $R_S/R_L \leq 0,05 \%$ . Esses valores, no entanto, podem causar, como mostra o gráfico da Figura 6b, correntes de pico sobre os diodos superiores a 20 vezes a corrente média conduzida por eles, que, no caso, vale  $V_{o(DC)}/R_L$ . Esse fato limita a aplicação desse tipo de retificador a aplicações de baixas correntes, com fatores de regulação aceitáveis. Para que o fator de ondulação sobreposta (*ripple*) seja adequado, como mostra o gráfico da Figura 7, também se deve fazer  $\omega CR_L \geq 50$ , nesse tipo de retificador. A corrente de surto inicial pelos diodos, que vale  $V_M/R_S$ , também limita aplicações de baixas perdas para esse tipo de retificador. Outra consideração que deve ser feita para esse circuito é a respeito da constante de tempo de carga inicial do capacitor. Para que o diodo tenha um funcionamento seguro deve-se estipular  $\tau = R_S C \leq 8,3333 \text{ ms}$ .

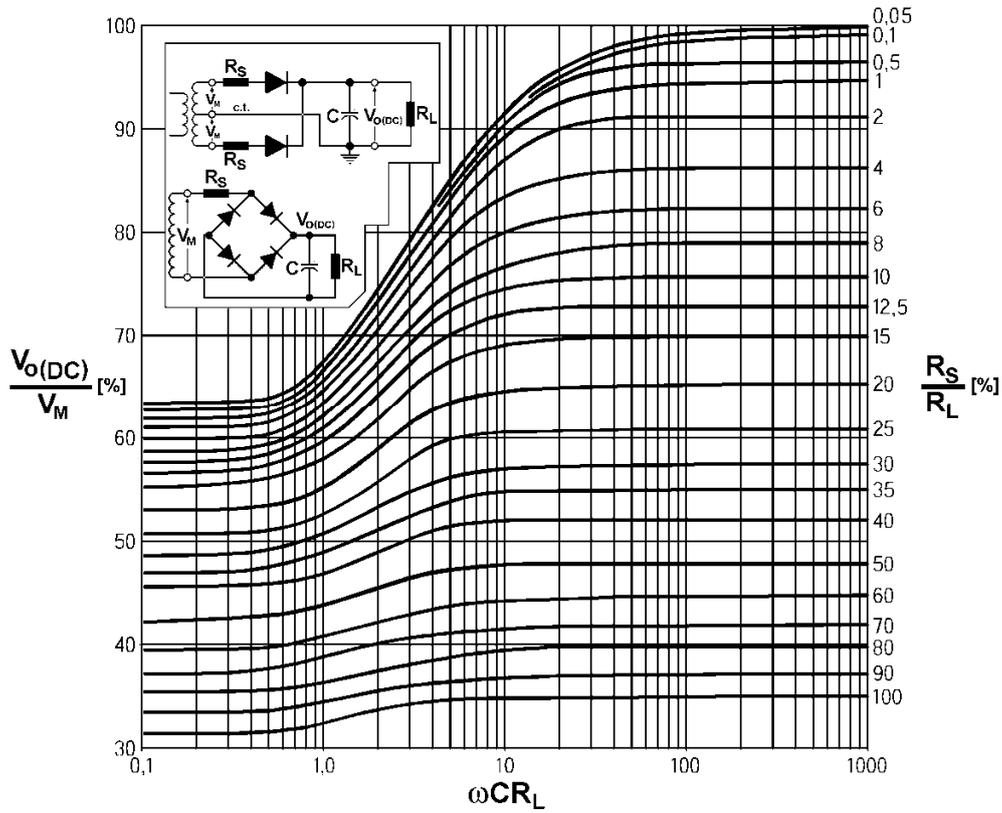


Figura 5 - Gráfico de Schade Usado para o Cálculo da Tensão de Saída de um Retificador Monofásico de Onda-Completa.

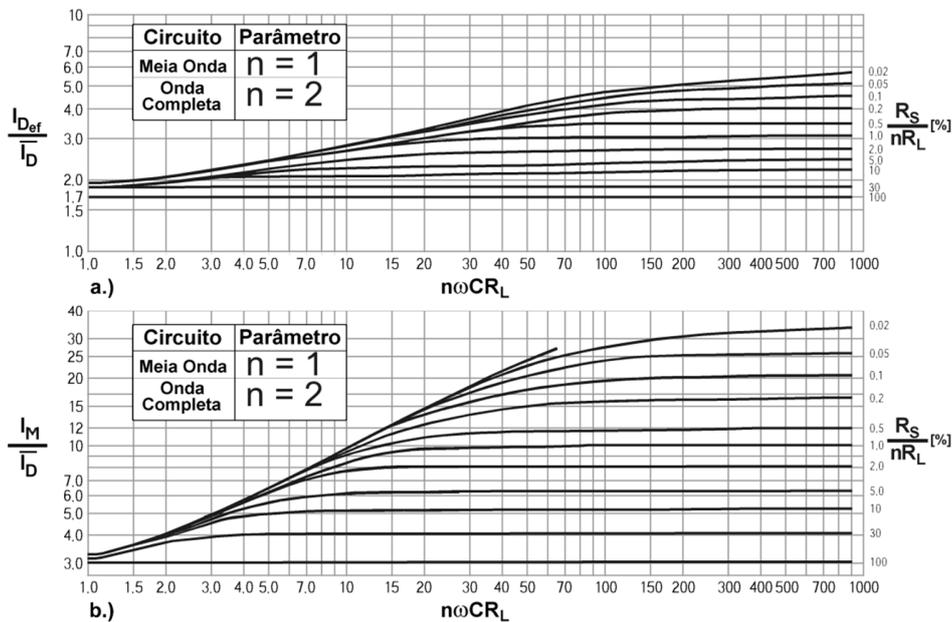
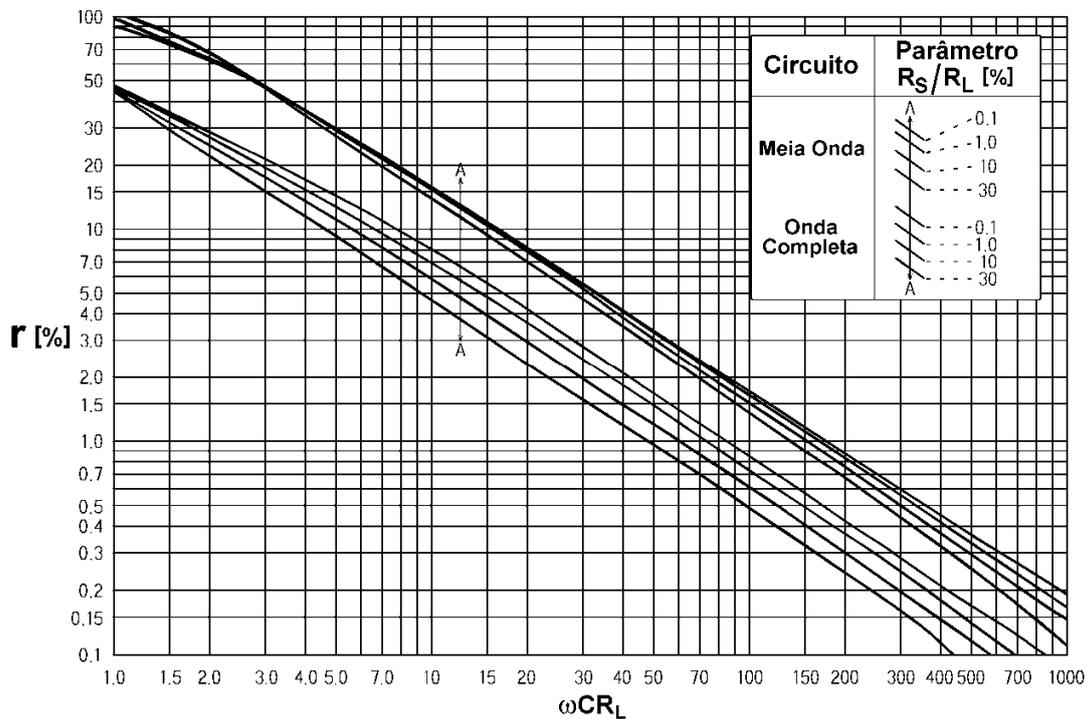


Figura 6 - Gráficos de Schade Usados para o Cálculo de Correntes em Diodos de Circuitos Retificadores. a.) Corrente Eficaz nos Diodos. b.) Corrente de Pico Repetitivo nos Diodos.



**Figura 7 - Gráfico de Schade Usado para o Cálculo da Porcentagem da Ondulação Sobreposta (Ripple) Sobre a Tensão de Saída de Circuitos Retificadores Monofásicos.**

### 1.2 ó Retificadores Monofásicos de Onda-Completa

As curvas mostradas nas Figuras 5, 6 e 7 fornecem todas as informações necessárias para os cálculos de retificadores de onda-completa dos dois tipos. A resistência  $R_S$ , que aparece nesses gráficos, é equivalente à perda total por enrolamento do trafo somada às perdas resistivas dos diodos, se estas forem conhecidas. As resistências de perdas dos diodos podem, no entanto, ser negligenciadas, pois, como são as resistências dinâmicas desses componentes, possuem valores bem baixos. A queda de tensão direta por diodo normalmente deve ser considerada. Em fontes de alta corrente deve-se estipular, por diodo, a seguinte queda de tensão direta:  $V_\gamma = 1 \text{ V}$  ( $0,9 \text{ V} \leq V_\gamma \leq 1,2 \text{ V}$ ). Se o modelo linearizado do diodo for conhecido, no entanto, pode-se estipular  $R_S = R_{S(\text{trafo})} + nR_{on}$  e uma queda por diodo igual a  $nV_{fwd}$ , sendo  $R_{on}$  e  $V_{fwd}$  os parâmetros linearizados do diodo e  $n=1$  para retificador de onda completa com *center tap* e  $n=2$  para retificador em ponte. Através do gráfico da Figura 5 pode-se calcular a tensão de saída ( $V_{o(DC)}$ ) das fontes das Figuras 2 e 3 em função da tensão de pico do secundário do trafo ( $V_M = \sqrt{2}V_{ef}$ ), da razão  $R_S/R_L$  e do produto  $\omega CR_L$ . A resistência  $R_S$  representa as perdas totais em série do trafo,  $C$  é o capacitor de filtro e  $\omega = 2\pi f$  é a frequência angular da senóide da rede ( $f = 60 \text{ Hz}$ ). Para que haja uma regulação satisfatória da tensão de saída, deve-se fazer  $\omega CR_L \geq 10$ , para uma regulação superior a 10 %, e  $\omega CR_L \geq 40$ , para uma regulação superior a 2 %. Deve-se fazer, também,  $R_S/R_L \leq 0,1 \%$ . Esses valores podem causar, como mostra o gráfico da Figura 6b, correntes de pico sobre os diodos entre 10 e 17 vezes superiores à corrente média por eles, que, no caso, vale  $V_{o(DC)}/2R_L$ .

Esse fato não chega, no entanto, a ser limitante para a maioria das aplicações. Para que o fator de ondulação sobreposta (*ripple*) seja adequado, como mostra o gráfico da Figura 7, também se deve fazer  $\omega CR_L \geq 20$ , nesses tipos de retificadores.

A corrente de surto inicial pelos diodos, que vale  $V_M/R_S$ , limita, contudo, aplicações de baixas perdas para esses tipos de retificadores. A constante de tempo de carga do capacitor de filtro vale  $\tau \cong R_S C$  e, grosso modo, o diodo estará protegido se  $V_M/R_S \leq I_{FSM}$  e  $\tau \leq 8,333$  ms, sendo  $I_{FSM}$  a corrente de surto máximo não repetitivo suportado pelo diodo. Por essa razão, muitas vezes, deve-se preferir um trafo com perdas maiores para que os diodos não sejam danificados, embora a regulação da fonte seja prejudicada.

A máxima tensão reversa suportada pelos diodos vale  $2V_M$  para os retificadores das Figuras 1 e 2 e  $V_M$  para o retificador da Figura 3. No dimensionamento desses diodos deve-se dar uma margem de segurança de 20% ~ 50%.

Os fusíveis devem ser dimensionados através dos cálculos das correntes eficazes nos diodos, feitos com o auxílio do gráfico da Figura 6a. Ao resultado final deve-se acrescentar cerca de 10%, para compensar a corrente de magnetização de primário.

Para o circuito da Figura 3 (*ponte*) pode-se escrever que:

$$I_{\text{sec(trafo)}} = \sqrt{2} \times I_{\text{Def}} \quad \text{e} \quad I_{\text{fusível}} = I_{\text{prim(trafo)}} = \frac{N_2}{N_1} \times I_{\text{sec(trafo)}} = \frac{N_2}{N_1} \times \sqrt{2} \times I_{\text{Def}}$$

Para o circuito da Figura 2 (*CT*) pode-se escrever que, para cada enrolamento secundário:

$$I_{\text{sec(trafo)}} = I_{\text{Def}}$$

E, para o condutor da tomada central:

$$I_{CT} = I_{\text{sec(trafo)}} \times \sqrt{2}$$

A corrente no primário do trafo vale, portanto, considerando  $N_2$  o número de espiras de cada enrolamento secundário:

$$I_{\text{fusível}} = I_{\text{prim(trafo)}} = \frac{N_2}{N_1} \times I_{CT} = \frac{N_2}{N_1} \times \sqrt{2} \times I_{\text{Def}}$$

Para o circuito da Figura 1 pode-se escrever que:

$$I_{\text{sec(trafo)}} = I_{\text{Def}} \quad \text{e} \quad I_{\text{fusível}} = I_{\text{prim(trafo)}} = \frac{N_2}{N_1} \times I_{\text{sec(trafo)}}$$

A relação de espiras do trafo é calculada por:

$$\frac{N_1}{N_2} \cong \frac{V_{prim}}{V_{sec(total)}}$$

Os trafos são caracterizados pelas seguintes relações:

$$R_{S(trafo)} = \frac{V_{ef(vazio)}}{I_{ef(nom)}} \times \frac{r_{eg}}{100} \quad [\Omega]$$

Onde,  $V_{ef(vazio)}$  é a tensão eficaz do secundário do transformador em vazio,  $I_{ef(nom)}$  é a capacidade nominal de corrente do transformador e  $r_{eg}$  é o seu fator de regulação calculado por:

$$r_{eg} = \frac{V_{ef(vazio)} - V_{ef(carga)}}{V_{ef(vazio)}} \times 100 \quad [\%]$$

Onde,  $V_{ef(carga)}$  é a tensão de secundário do transformador quando ele estiver fornecendo a corrente  $I_{ef(nom)}$ .

A potência nominal de um transformador é calculada por:

$$P_{nom} = V_{ef(vazio)} \times I_{ef(nom)} \quad [\text{VA}]$$

### 3. Roteiro de Projeto

- Para se desenvolver um projeto de uma fonte de alimentação constituída de um retificador e de um filtro capacitivo, normalmente os seguintes dados são necessários:
  - Tensão contínua média de saída com carga máxima:  $V_{o(DC)}$ .
  - Tensão de pico senoidal do secundário do trafo:  $V_M$ .
  - Máximo valor pico-a-pico da ondulação sobreposta (*ripple*):  $V_{r(pk-pk)}$ .
  - Corrente de saída da fonte com carga máxima:  $I_o = V_{o(DC)} / R_L$ .

#### 3.1 ó Cálculo de $[\omega CR_L]$

O fator de ondulação, calculado pelo gráfico da Figura 7, tem o seguinte significado algébrico:

$$r = \frac{V_{r(ef)}}{V_{o(DC)}} \times 100 \quad [\%] \quad (1)$$

Pelo fato da forma de onda da ondulação não ser bem definida, ficando entre senoidal e triangular, o valor eficaz da ondulação,  $V_{r(ef)}$ , pode ser aproximada pela relação:

$$\frac{100 \times V_{r(pk-pk)}}{2\sqrt{3} \times V_{o(DC)}} \leq r \leq \frac{100 \times V_{r(pk-pk)}}{2\sqrt{2} \times V_{o(DC)}} \quad [\%] \quad (2)$$

Para satisfazer uma certa margem de segurança no cálculo, normalmente o valor inicial suposto para a ondulação será:

$$r \approx \frac{100 \times V_{r(pk-pk)}}{2\sqrt{2} \times V_{o(DC)}} \quad [\%] \quad (3)$$

Em função do valor obtido pela Equação 3, usando-se o gráfico da Figura 7, obtém-se o valor de  $[\omega CR_L]$  necessário para o fator de ondulação desejado.

### 3.2 ó Cálculo de $R_S / R_L$

Usando-se o valor de  $V_{o(DC)} / V_M$  desejado e o valor de  $[\omega CR_L]$  calculado no item 3.1, através do gráfico da Figura 4 ou da Figura 5, estabelece-se a faixa de  $R_S / R_L$  possível para o projeto. Como  $R_L$  é conhecida, calcula-se  $R_S$ .

### 3.3 ó Cálculo de C

Usando-se o valor de  $[\omega CR_L]$  calculado no item 3.1, pode-se calcular:

$$C = \frac{[\omega CR_L]}{2\pi f \times \left( \frac{V_{o(DC)}}{I_o} \right)} \quad [F] \quad (4)$$

### 3.4 ó Propriedades Exigidas pelo Retificador

#### 3.4.a ó Corrente média por diodo:

A corrente média que atravessa cada diodo do retificador vale  $\overline{I_D} = I_o$ , para retificadores de meia-onda, e  $\overline{I_D} = I_o / 2$ , para retificadores de onda-completa, em ponte ou com dois diodos.

#### 3.4.b ó Corrente eficaz e de pico repetitivo por diodo:

A corrente eficaz ( $I_{Def}$ ) por diodo do retificador deve ser calculada pelo gráfico da Figura 6a e a corrente de pico repetitivo ( $I_M$ ) por diodo do retificador deve ser calculada pelo gráfico da Figura 6b, lembrando-se que  $n = 1$  para retificadores de meia-onda e  $n = 2$  para retificadores de onda-completa.

#### 3.4.c ó Corrente de surto inicial por diodo:

A corrente de surto inicial, que pode atravessar os diodos no instante de ligação da fonte, vale  $I_{surto} = V_M / R_S$ . Essa corrente deve ser inferior à corrente de pico não repetitivo suportada pelo diodo, isto é,  $I_{surto} < I_{FSM}$ .

#### 3.4.d ó Máxima tensão reversa por diodo:

Nos retificadores de meia-onda e de onda-completa com dois diodos e tomada central, cada diodo está sujeito a uma tensão reversa máxima de  $2V_M$ . Nos retificadores de onda-completa em ponte, cada diodo está sujeito a uma tensão reversa máxima de  $V_M$ . Devido a transientes presentes na rede, uma margem de segurança de 20 % ~ 50 % deve ser usada no dimensionamento dos diodos.

#### 3.4.e ó Dimensionamento do Trafo:

- Tensão eficaz de secundário em vazio: no dimensionamento dessa tensão, as perdas em série por diodo devem ser levadas em conta. Então:

$$V_{ef(sec)} = \frac{V_M}{\sqrt{2}} + nV_\gamma \quad [\text{V}] \quad (5)$$

Na Equação 5,  $0,9 \text{ V} \leq V_\gamma \leq 1,1 \text{ V}$  é a perda em série por diodo de junção e  $n$  é o número de diodos em série, isto é,  $n = 1$  para meia-onda e onda completa com dois diodos e  $n = 2$  para ponte. Se os diodos forem de barreira Schottky, deve-se fazer:  $0,45 \text{ V} \leq V_\gamma \leq 0,55 \text{ V}$ .

- Corrente eficaz no secundário do trafo:  $I_{ef(sec)} = I_{Def}$ , para meia-onda,  $I_{ef(sec)} = I_{Def}$  e  $I_{CT} = \sqrt{2} \times I_{Def}$  para onda completa com dois diodos e  $I_{ef(sec)} = \sqrt{2} \times I_{Def}$ , para retificadores em ponte.

- Capacidade de potência do trafo:  $P = V_{ef(sec)} \times I_{ef(sec)}$  [VA], para meia onda e onda completa em ponte e  $P = V_{ef(sec)} \times I_{CT}$  [VA], para onda completa com dois diodos.

- Fator de regulação do trafo:

$$r_{eg} = \frac{R_S \times I_{ef(sec)}}{V_{ef(vazio)}} \times 100 \quad [\%] \quad (6)$$

#### 3.4.f ó Dimensionamento do Fusível de Proteção de Primário:

A relação de espiras do trafo é calculada por:

$$\frac{N_1}{N_2} \cong \frac{V_{prim}}{V_{sec}} \quad (7)$$

O fusível de proteção da fonte deve ser dimensionado, portanto, para a seguinte corrente:

$$I_{fusível} = \frac{N_2}{N_1} \times I_{ef(sec)} \quad [\text{A}] \quad (8a)$$

ou

$$I_{fusível} = \frac{N_2}{N_1} \times I_{CT} \quad (8b)$$

## 4. Exemplos de Cálculo

### 4.1 ó Síntese

#### 4.1.a ó Projeto:

Para ser usada com o estabilizador eletrônico 7812, deve-se construir uma fonte DC a partir de um retificador em ponte e de um filtro capacitivo, como mostra a Figura 3. Essa fonte deverá possuir as seguintes características:  $V_{o(DC)} = 16 \text{ V}$  e  $V_{r(pk-pk)} = 2 \text{ V}$  em plena carga com  $I_o = 1 \text{ A}$ . A máxima tensão de pico na saída deve ser:  $V_M = 25 \text{ V}$ . Sabendo-se que o trafo é alimentado pela rede de  $60 \text{ Hz}$ , dimensionar todos os componentes do circuito.

#### 4.1.b ó Resolução:

Usando-se a Equação 3, tem-se:

$$r \approx \frac{100 \times V_{r(pk-pk)}}{2\sqrt{2} \times V_{o(DC)}} = \frac{100 \times 2}{2\sqrt{2} \times 16} = 4,42 \quad [\%]$$

Através do gráfico da Figura 7 estima-se:  $10 \leq [\omega CR_L] \leq 15$ . Escolhendo-se  $[\omega CR_L] = 10$ , através do gráfico da Figura 5 e com  $V_{o(DC)}/V_M = 16/25 = 64 \%$ , calcula-se:  $R_S/R_L = 20 \%$ . Como  $R_L = 16 \Omega \Rightarrow R_S = 3,2 \Omega$ .

Através da Equação 4 calcula-se:

$$C = \frac{[\omega CR_L]}{2\pi f \times \left(\frac{V_{o(DC)}}{I_o}\right)} = \frac{10}{2\pi 60 \times 16} = 1,658 \times 10^{-3} \quad [\text{F}]$$

Deve-se usar, portanto,  $C = 1800 \mu\text{F} \times 35 \text{ V}$ , que é o valor comercial mais próximo. Recalcula-se, então,  $[\omega CR_L] = 120\pi \times 0,0018 \times 16 = 10,86$ , dentro, portanto, da faixa inicial prevista.

As características dos diodos podem, então, ser calculadas:

- Corrente média nos diodos:  $\overline{I_D} = I_o/2 = 1/2 = 0,5 \text{ [A]}$ .

- Corrente eficaz nos diodos: através do gráfico da Figura 6a, com  $R_S/nR_L = 10\%$  e  $n[\omega CR_L] = 21,72$ , calcula-se  $I_{Def} \cong 2,2 \times \overline{I_D} = 1,1$  [A].
- Corrente de pico repetitivo nos diodos: através do gráfico da Figura 6b, com  $R_S/nR_L = 10\%$  e  $n[\omega CR_L] = 21,72$ , calcula-se  $I_M \cong 5,3 \times \overline{I_D} = 2,65$  [A].
- Corrente de surto inicial nos diodos:  $I_{surto} = V_M/R_S = 25/3,2 = 7,8$  [A].
- Máxima tensão reversa sobre os diodos:  $PIV = V_M = 25$  V. Então qualquer diodo com  $B_V \geq 30$  V é adequado.

Diodos do tipo *1N4001*, com  $\overline{I_D} = 1$ A;  $B_V = 50$ V e  $I_{FSM} = 30$ A, servem perfeitamente.

As características do trafo podem ser calculadas com:

- Tensão eficaz de secundário:  $V_{ef(sec)} = \frac{V_M}{\sqrt{2}} + nV_\gamma = \frac{25}{\sqrt{2}} + 2 = 19,68$  [V].
- Perdas totais:  $R_S = 3,2 \Omega$ .
- Corrente eficaz de secundário:  $I_{ef(sec)} = \sqrt{2} \times I_{Def} = \sqrt{2} \times 1,1 = 1,56$  [A].
- Potência do trafo:  $P = V_{ef(sec)} \times I_{ef(sec)} = 19,68 \times 1,56 = 30,61$  [VA].
- Fator de regulação do trafo:  $r_{eg} = \frac{R_S \times I_{ef(sec)}}{V_{ef(vazio)}} \times 100 = \frac{3,2 \times 1,56}{19,68} \times 100 = 25,37$  [%].
- Relação de espiras:  $\frac{N_1}{N_2} \cong \frac{V_{prim}}{V_{sec}} = \frac{N_1}{N_2} \cong \frac{127}{19,68} = 6,45$ .
- Corrente de fusível:  $I_{fusível} = \frac{N_2}{N_1} \times I_{ef(sec)} = I_{fusível} = \frac{1,56}{6,45} = 0,242$  [A]. Pode-se usar um fusível de  $250$  mA.

Segundo foi comentado no item 1.2,  $\tau \cong R_S C = 3,2 \times 0,0018 = 5,76$  ms. Como  $\tau \leq 8,3$  ms, os diodos estão protegidos contra excesso de surto inicial.

## 4.2 ó Análise

### 4.2.a ó Circuito:

Foi montado um circuito retificador com a topologia da Figura 2. O trafo possui as seguintes características:  $25 V_{ef} + 25 V_{ef}$  no secundário;  $P = 125$  VA e  $r_{eg} = 25\%$ . O capacitor de filtro vale  $C = 3300 \mu F \times 35$  V e a carga máxima da fonte vale  $R_{L(min)} = 10 \Omega$ . Os diodos possuem os seguintes parâmetros:  $V_{fwd} = 0,8763$  V e  $R_{on} = 0,085206$ . Calcular todos os parâmetros dessa fonte.

### 4.2.b ó Resolução:

A capacidade nominal de corrente do trafo vale  $I_{ef(sec)} = 125/50 = 2,5$  A e a resistência total de perdas do secundário vale:

$$R_{S(total)} = \frac{r_{eg} \times V_{ef(vazio)}}{100 \times I_{ef(sec)}} = \frac{25 \times 50}{100 \times 2,5} = 5 \quad [\Omega]$$

A resistência de perdas por enrolamento vale, portanto,  $R_S = 2,5 \Omega$ .

Têm-se, então, que  $[\omega CR_L] = [120\pi \times 0,0033 \times 10] = 12,44$  e  $R_S / R_L = 258,52/10 = 25,85 \%$ .

Se a fonte estiver em vazio ( $R_L \rightarrow \infty$ ), a tensão de saída vale:  $V_{o(DC)} = 25 \times \sqrt{2} = 35,36 V$ .

Se a fonte estiver com carga máxima, pelo gráfico da Figura 5 calcula-se  $V_{o(DC)} / V_M = 0,6 \Rightarrow V_{o(DC)} = 0,6 \times (25 \times \sqrt{2} - V_{fvd}) = 0,6 \times (25 \times \sqrt{2} - 0,8763) = 20,337 V$ .

A corrente máxima que a fonte fornece vale, portanto,  $I_o = 2,0337 A$ . A corrente média por diodo vale, conseqüentemente,  $\overline{I_D} = 1,017 A$ .

Usando-se o gráfico da Figura 6a, com  $n[\omega CR_L] = 24,88$  e  $R_S / nR_L = 12,925 \%$ , obtém-se:  $I_{Def} = 2,1 \times \overline{I_D} = 2 \times 1,017 = 2,157 A$ .

Usando-se o gráfico da Figura 6b, com  $n[\omega CR_L] = 24,88$  e  $R_S / nR_L = 12,925 \%$ , obtém-se:  $I_M = 5 \times \overline{I_D} = 5 \times 1,017 = 5,085 A$ .

A corrente de surto inicial pelos diodos vale  $I_{surge} = \sqrt{2} \times 25 / 2,5852 = 13,68 A$  e  $\tau = 2,5 \times 0,0033 = 8,53 ms$  (levemente acima do máximo permitido).

A máxima tensão reversa sobre os diodos vale  $PIV = 2 \times V_M = 70,71 V$ .

Podem ser usados, portanto, diodos do tipo *1N4002*, que possuem os seguintes parâmetros:  $\overline{I_D} = 1A; B_V = 100V - e - I_{FSM} = 30A$ .

O fator de *ripple*, pelo gráfico da Figura 7, vale  $r \cong 4 \%$ .

O trafo estará conduzindo uma corrente eficaz máxima igual a  $I_{ef(sec)} = I_{Def}$  por enrolamento, ou seja,  $I_{ef(sec)} = I_{Def} = 2,1576 A$ , no secundário. O *õcenter tapõ* conduz uma corrente igual a  $I_{CT} = 2,157 \times \sqrt{2} = 3,05 A$ . A relação de espiras do trafo, para um primário de  $127 V$ , vale  $5,08:1:1$ . A corrente de fusível de proteção de primário deverá, portanto, valer:  $I_{fusível} = 3,05 / 5,08 = 0,6005 A$ . Poderá ser usado, no caso, um fusível de  $600 mA$ .

## 5. Referência

1. O. H. Schade, "Analysis of Rectifier Operation," Proc. IRE, vol 31, n° 7, p.p. 341-361, 1943.