

Conversores AC / DC (Exercícios)

Referência

SEL-EESC-USP

Conversores *AC* *DC*

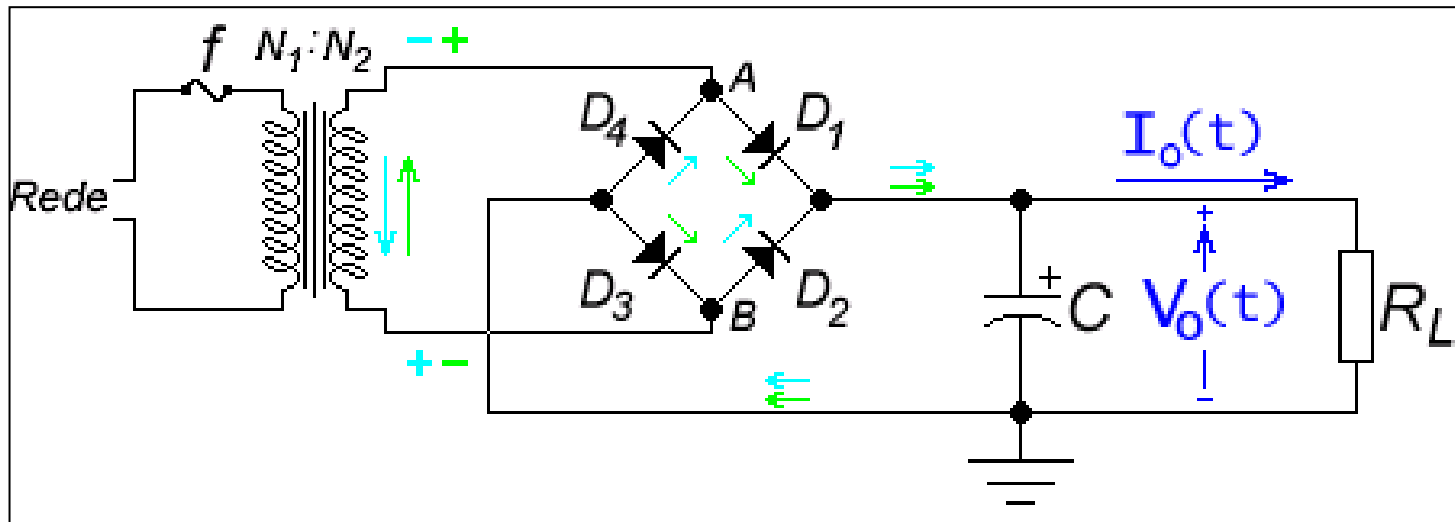
Cálculo de Retificadores

Paulo R Veronese, 2014

Exercício 1: Projeto (Síntese)

(Na **síntese** são dimensionados os diodos, capacitor, transformador e fusível.)

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 abaixo. 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 Hz e que $R_L = 16\ \Omega$, dimensionar todos os componentes do circuito.



1

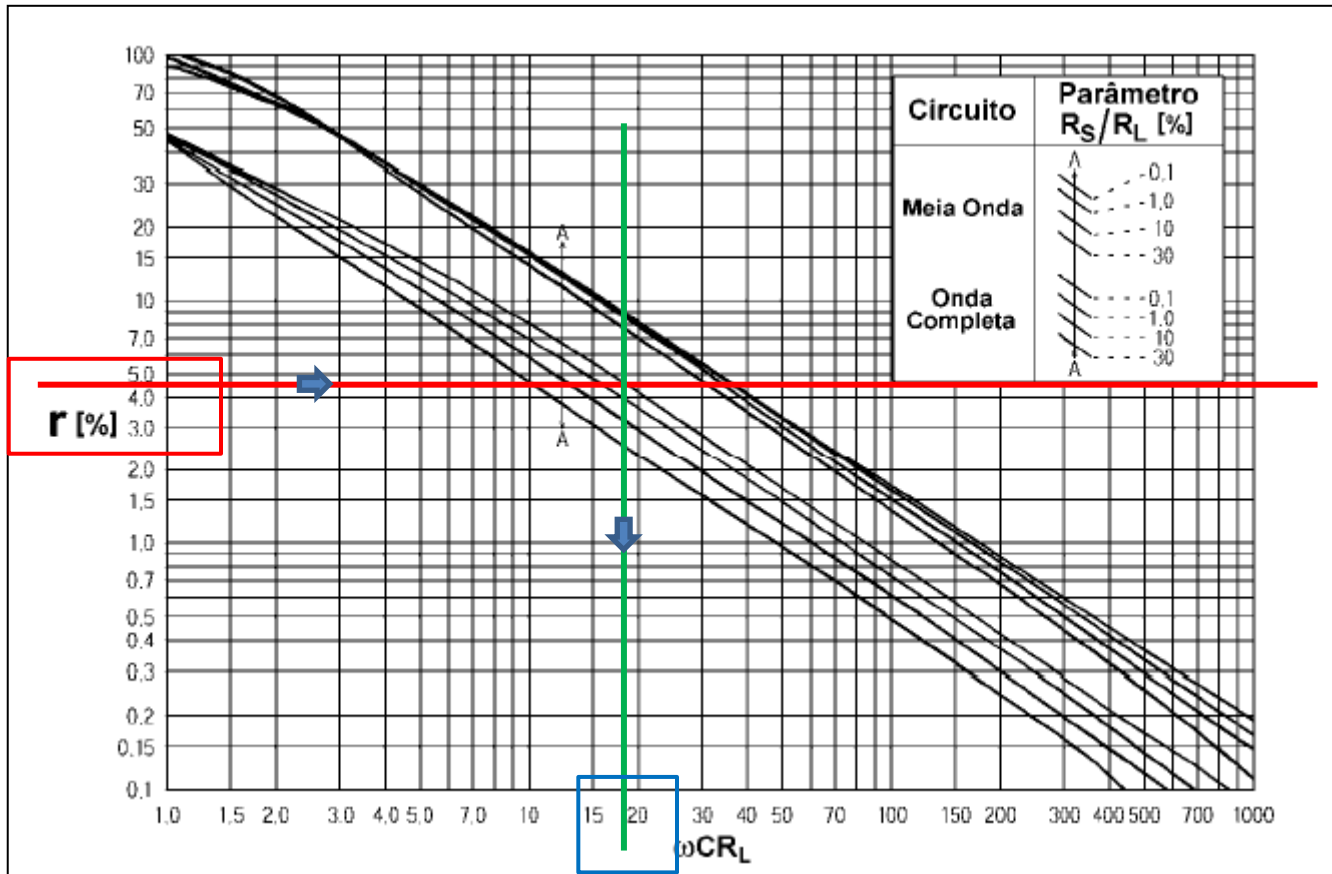
Cálculo do Fator de Regulação (r)

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

2

Cálculo de wCR_L

Como o valor de r e através do gráfico abaixo estima-se $10 \leq wCR_L \leq 20$. O valor escolhido é $wCR_L=10$.

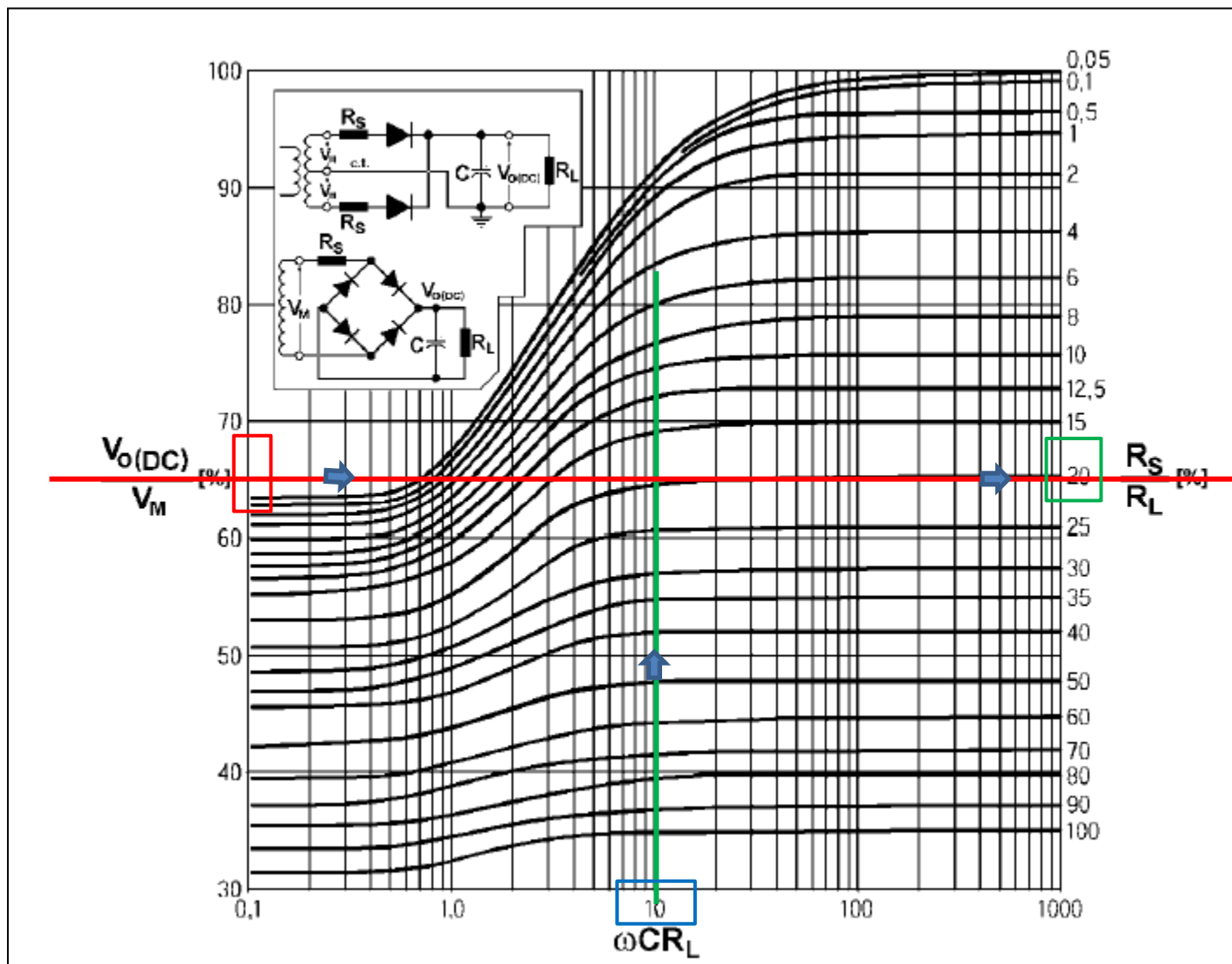


Para que haja uma regulação satisfatória da tensão de saída, deve-se fazer $wCR_L \geq 10$ para uma regulação superior a 10%. Deve-se fazer também $R_S/R_L \leq 0,1$ %.

A escolha $wCR_L=10$, descrita na pg. 11 da apostila "Conversores AC DC ...", deveria ser $wCR_L=18$.

Cálculo de R_s

Escolhendo-se $[\omega CR_L] = 10$ e através do gráfico abaixo com $V_{o(DC)}/V_M = 16/25 = 64\%$, calcula-se: $R_s/R_L = 20\%$. Como $R_L = 16\ \Omega$, então $R_s = 3,2\ \Omega$.



Escolha do Capacitor (C)

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

Deve-se usar, portanto, $C=1800 \mu\text{F}/35 \text{ V}$, que é o valor comercial mais próximo.

Recalcula-se $[\omega CR_L] = 120\pi \times 0,0018 \times 16 = 10,86$ que está dentro da faixa inicial prevista.

Escolha do Diodo

5

Corrente Média nos Diodos

Onda Completa:

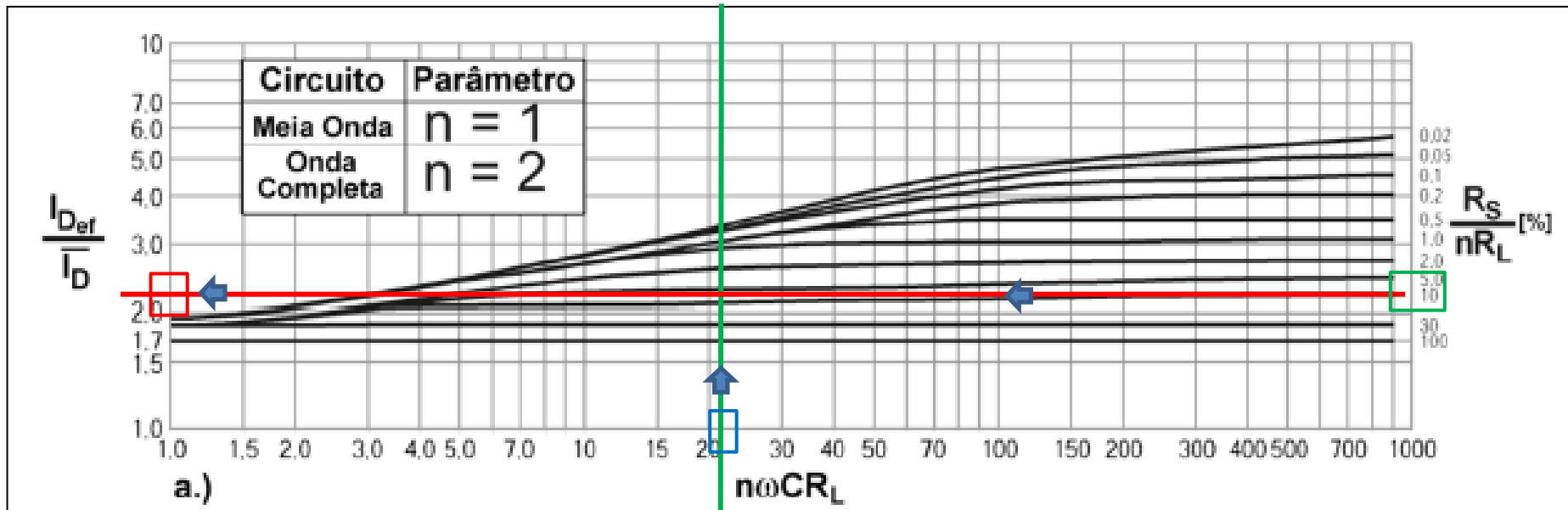
$$\bar{I}_D = \frac{I_o}{2} = \frac{I_1}{2} = 0.5A$$

6

Corrente Eficaz nos Diodos (I_{Def})

Usando o gráfico abaixo para onda completa (n=2) obtém-se:

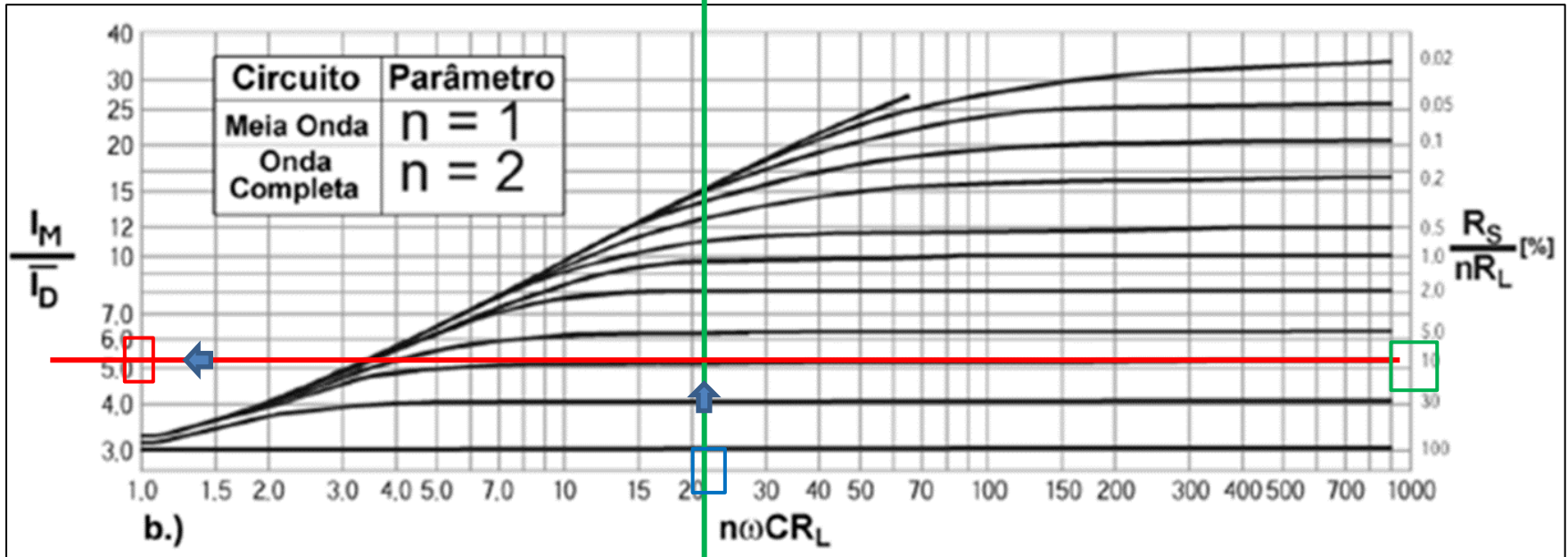
$$\begin{array}{l}
 R_s / nR_L = 10 \% \\
 n[wCR_L] = 2 \times 10,86 = 21,72
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} R_s / nR_L = 10 \% \\ n[wCR_L] = 2 \times 10,86 = 21,72 \end{array}} \right\} \rightarrow I_{Def} = 2,2 \bar{I}_D = 2,2 \times 0,5 = 1,1A$$



7 Corrente de Pico Repetitivo no Diodo (I_M)

Usando-se o gráfico da abaixo com $R_S/nR_L = 10\%$ e $n[wCR_L] = 21,72$ obtém-se:

$$\frac{I_M}{\bar{I}_D} = 5,3 \longrightarrow I_M = 5,3 \times \bar{I}_D = 5,3 \times 0,3 = 1,65A$$



8

Corrente de Surto Inicial dos Diodos (I_{surto})

$$I_{surto} = V_M / R_S = 25 / 3,2 = 7,8 \text{ A}$$

9

Máxima tensão reversa sobre os diodos (PIV)

$$PIV = V_M = 25V$$

Então, escolhe-se qualquer diodo com $BV \geq 30 \text{ V}$ é adequado !

O diodo 1N4001 com $(I_D)_{avg} = 1A$, $B_V = 50V$ e $I_{FSM} = 30A$ pode ser utilizado !

Características do Trafo

10 Tensão Eficaz do Secundário ($V_{ef(sec)}$)

$$V_{ef(sec)} = \frac{V_M}{\sqrt{2}} + nV_\gamma = \frac{25}{\sqrt{2}} + 2 \times 0,7 = 19,08 \text{ [V]}$$

11 Perdas Totais (R_s)

$$R_s = 3,2\Omega \quad (\text{calculado no item 3})$$

12 Corrente Eficaz no Secundário ($I_{ef(sec)}$)

$$I_{ef(sec)} = \sqrt{2} \times I_{Def} = \sqrt{2} \times 1,1 = 1,56 \text{ [A]}$$

13 Potência do Trafo (P)

$$P = V_{ef(sec)} \times I_{ef(sec)} = 19,68 \times 1,56 = 30,61 \text{ [VA]}$$

14 Fator de Regulação do Trafo (r_{eg})

$$r_{eg} = \frac{R_s \times I_{ef(sec)}}{V_{ef(vazio)}} \times 100 = \frac{3,2 \times 1,56}{19,68} \times 100 = 25,37 \text{ [%]}$$

15

Relação de Espiras

$$\frac{N_1}{N_2} \cong \frac{V_{prim}}{V_{sec}} = \frac{N_1}{N_2} \cong \frac{127}{19,68} = 6,45$$

16

Corrente de Fusível ($I_{fusível}$)

$$I_{fusível} = \frac{N_2}{N_1} \times I_{ef(sec)} = I_{fusível} = \frac{1,56}{6,45} = 0,242 \text{ [A]}$$

Pode-se usar um fusível de 250 mA !

17

Constante de Tempo de Carga do Capacitor (ζ)

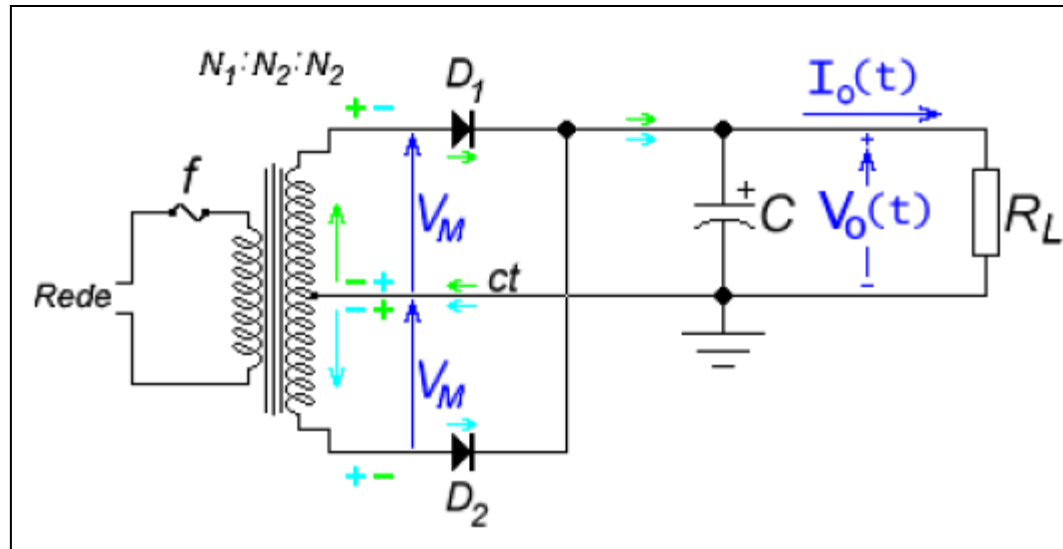
$$\zeta \approx R_S C = 3,2 \times 0,0018 = 5,76ms$$

Como $\zeta \leq 8,3ms$, os diodos estão protegidos contra excesso de surto inicial.

Exercício 2: Projeto (Análise)

(Na **análise** são conhecidos a capacitância, as características do transformador, do diodo e o valor da carga. Calcula-se as correntes e tensões no circuito.)

No circuito retificador de onda completa com *center tap* da figura abaixo o trafo possui as seguintes características: $25V_{ef} + 25V_{ef}$ no secundário, $P=125VA$ e $r_{eg}=25\%$. A capacitância do filtro é $C = 3300\mu F \times 35V$ e a carga máxima da fonte é $R_L(min) = 10\Omega$. Os diodos possuem os seguintes parâmetros: $V_{fwd} = 0,8763V$ e $R_{on} = 0,085206\Omega$.
 Calcular todos os parâmetros da fonte.



1 Capacidade Nominal de Corrente do Trafo ($I_{ef(sec)}$)

$$I_{ef(sec)} = \frac{P}{2 \times V_{ef(sec)}} = \frac{125}{2 \times 25} = 2,5A$$

2 Resistência Total de Perdas do Secundário ($R_{S(total)}$)

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

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

3 Cálculo de wCR_L e $(R_S + R_{on})/R_L$:

$$[\omega CR_L] = [120\pi \times 0,0033 \times 10] = 12,44$$

$$\frac{R_S + R_{on}}{R_L} = \frac{2,5 + 0,85206}{10} = 25,85\%$$

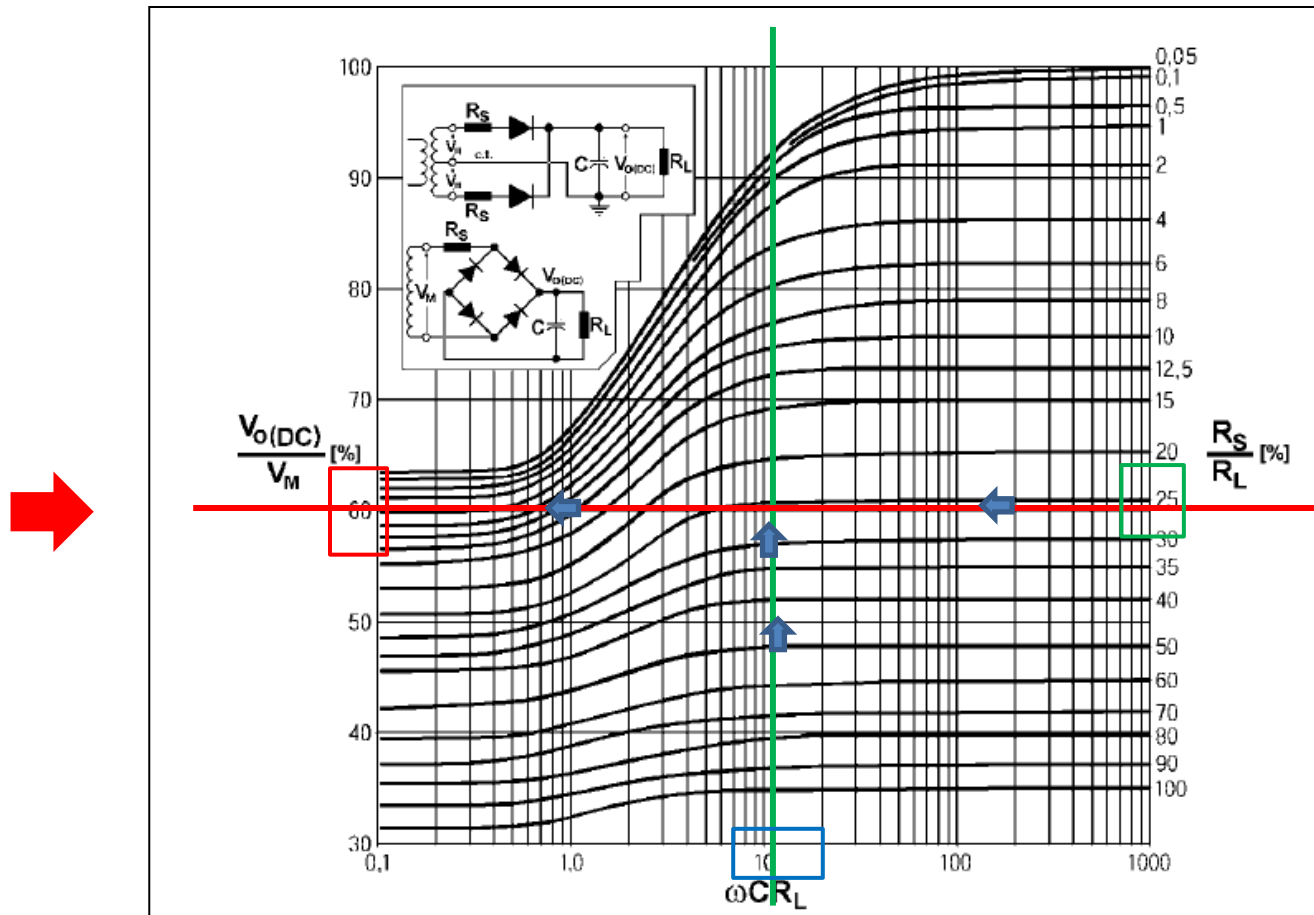
4 Cálculo de $V_{o(DC)}$ com a fonte em vazio ($R_L \rightarrow \infty$)

Se $R_L = \infty \rightarrow r=0 \rightarrow V_{o(DC)} = V_M \rightarrow V_{o(DC)} = 25 \times \sqrt{2} = 35,36 V$

5 Cálculo de $V_{o(DC)}$ com carga máxima

Utilizando-se no gráfico $\omega CR_L = 12,44$ e $R_S/R_L = 25,85\%$ obtém-se:

$V_{o(DC)}/V_M = 0,6 \rightarrow V_{o(DC)} = 0,6 \times (V_M - V_{D(fwd)}) = 0,6 \times (25\sqrt{2} - 0,8763) = 20,337V$



6

Corrente máxima na fonte (I_o)

$$I_o = V_{o(DC)} / R_L = 20.337 / 10 = 2.0337 \text{ A}$$

7

Corrente média por diodo ($\overline{I_D}$)

(onda completa) →

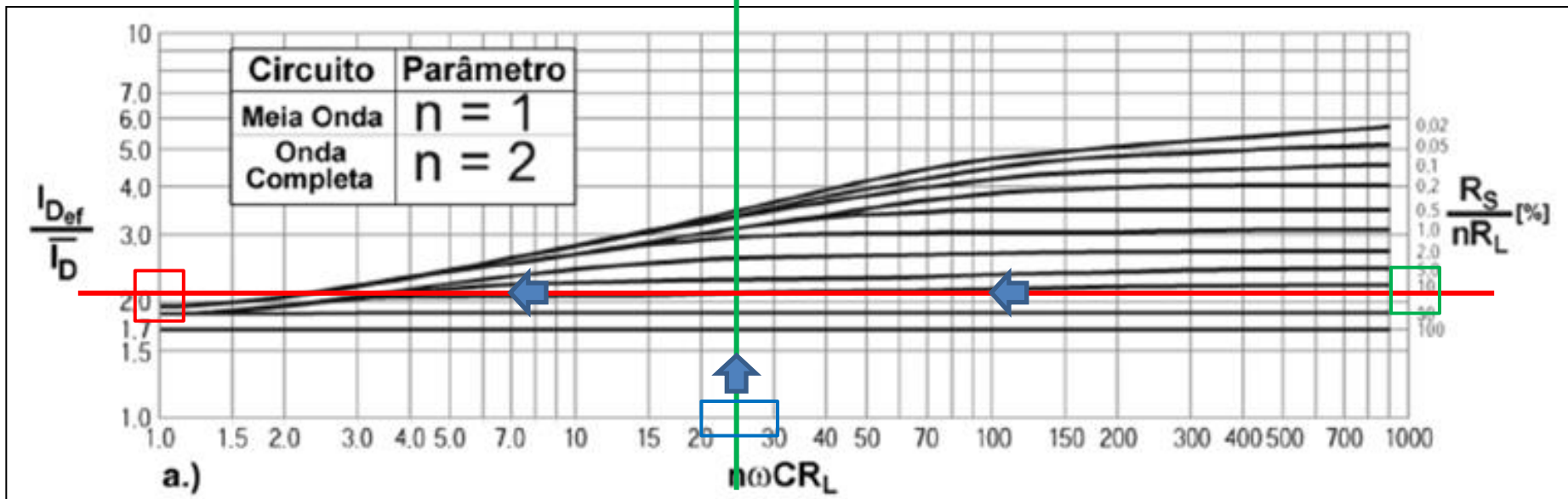
$$\overline{I_D} = \frac{I_o}{2} = 1,017 \text{ A}$$

8

Corrente eficaz no diodo (I_{Def})

Utilizando-se no gráfico abaixo $n\omega CR_L = 25,85$ e $R_s/nR_L = 12,925$, obtem-se:

$$\frac{I_{Def}}{\overline{I_D}} = 2,1 \rightarrow I_{Def} = 2,1 \times \overline{I_D} = 2 \times 1,017 = 2,157 \text{ A}$$

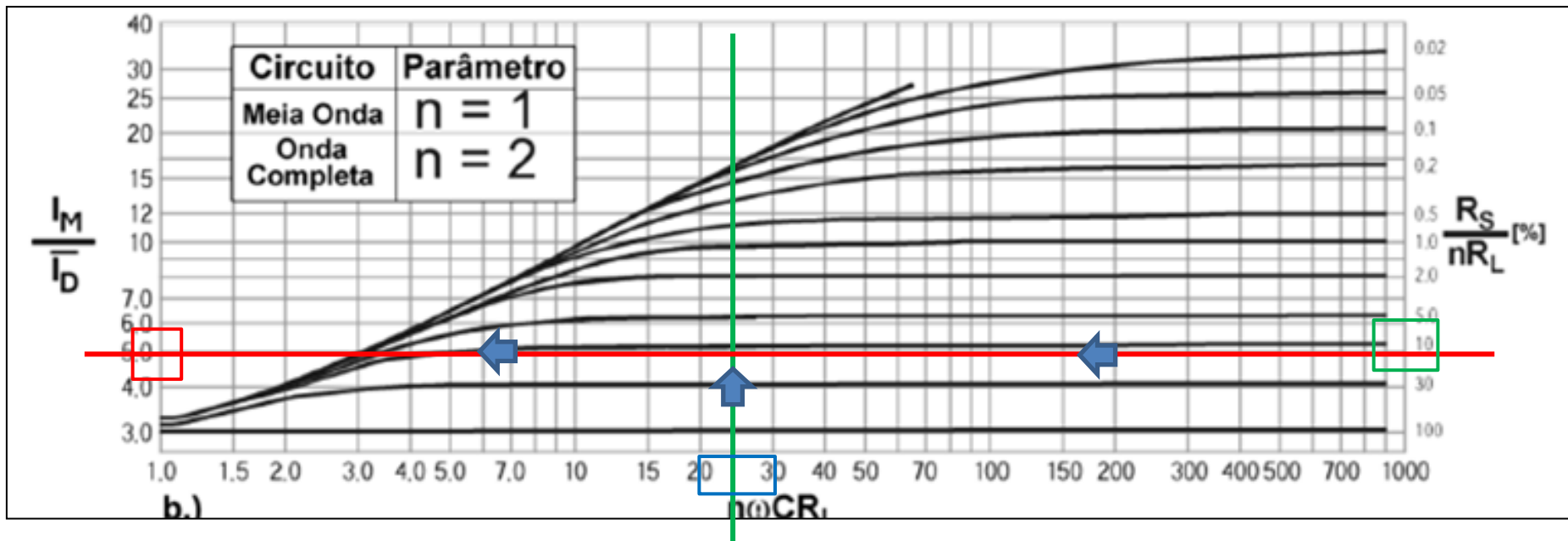


9

Corrente de Pico Repetitivo por (I_M)

Utilizando-se $n[\omega CR_L] = 24,88e$ e $R_S / nR_L = 12,925 \%$ no gráfico abaixo, obtém-se:

$$\frac{I_M}{I_D} = 5,0 \rightarrow I_M = 5 \times \overline{I_D} = 5 \times 1,017 = 5,085 \text{ A}$$



10 **Corrente de Surto Inicial nos diodos (I_{surge}) :**

$$I_{surto} = V_M / R_S < I_{FSM} \quad \longrightarrow \quad I_{surge} = \sqrt{2} \times 25 / 2,5852 = 13,68 \text{ A}$$

Obs: a corrente de surto é muito maior que a corrente de pico no diodo !

11 **Tempo de carga do capacitor (ζ)**

$$\zeta = R_S C = 2,5 \times 0,0033 = 8,53 \text{ ms}$$

(levemente acima do máximo permitido)

12 **Máxima tensão reversa sobre os diodo (PIV)**

$$PIV = 2 \times V_M = 70,71 \text{ V}$$

O diodo 1N4002 com os seguintes parâmetros pode ser utilizado:

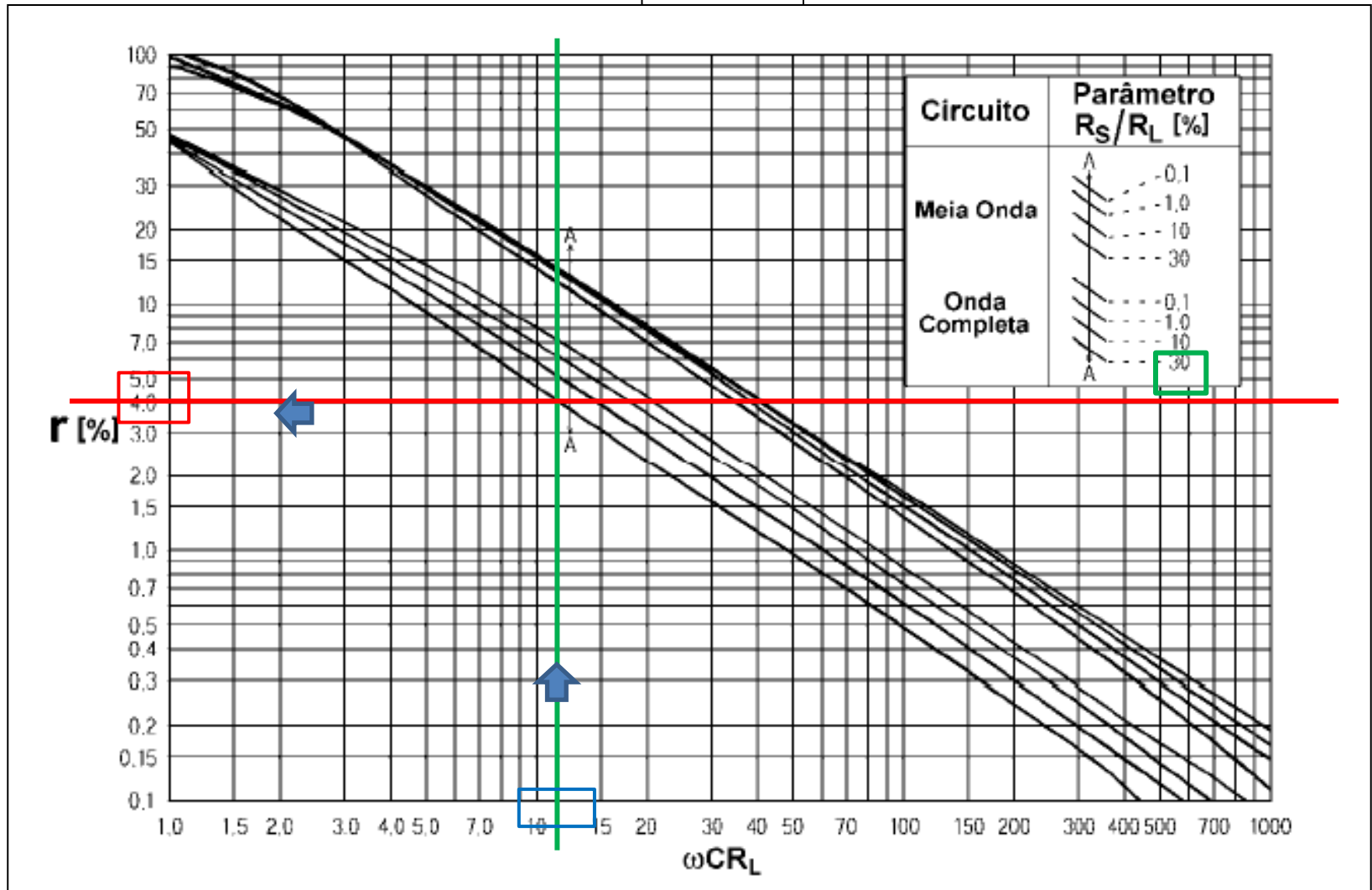
$$(I_D)_{avg} = 1\text{A}, B_V = 100\text{V} \text{ e } I_{FSM} = 30\text{A} .$$

13

Fator de Ripple (r)

Sendo $R_s/R_L = 25,85\%$, utiliza-se no gráfico abaixo a curva $R_s/R_L = 30\%$ e $wCR_L = 12,44$.

$r \approx 4\%$



14 Corrente eficaz do trafo no secundário ($I_{ef(sec)}$):

$$I_{ef(sec)} = I_{Def} = 2,1576 \text{ A}$$

15 Corrente no center-tap (I_{CT}):

$$I_{CT} = 2,157 \times \sqrt{2} = 3,05 \text{ A}$$

16 Relação de Espiras no trafo (primário de 127V):

$$\frac{N_1}{N_2} \cong \frac{V_{prim}}{V_{sec}} = 5,08$$

17 Corrente do fusível de proteção:

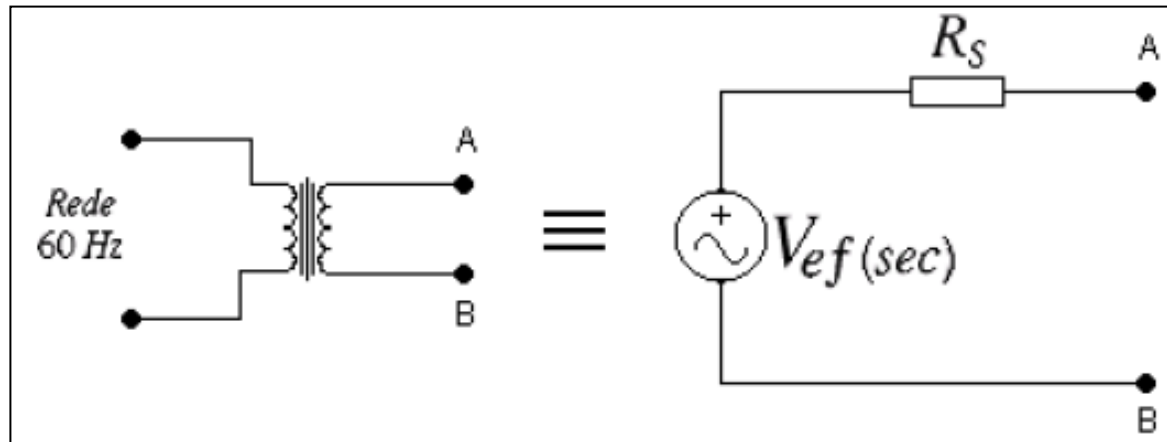
$$I_{fusível} = \frac{N_2}{N_1} \times I_{ef(sec)} \text{ [A]} \quad \text{ou} \quad I_{fusível} = \frac{N_2}{N_1} \times I_{CT}$$

$$I_{fusível} = 3,05 / 5,08 = 0,6005 \text{ A}$$

Pode ser usado um fusível de 600 mA !

Exercício 3

Na figura abaixo é esboçado um modelo simples de um trafo, usado em cálculos manuais, que apresenta as seguintes características: Primário: **$127 V_{ef}$, 60 Hz** ; Secundário: **$12V_{ef}$** , em vazio; Potência: **$40VA$** e **$reg=15\%$** . Se esse trafo for usado em um circuito retificador com filtro capacitivo, calcular o valor mínimo de I_{FSM} dos diodos e o valor máximo de C de filtro para que os diodos retificadores não sejam danificados.



Circuito equivalente simplificado de um trafo usado em conversores AC/DC de 60 Hz.

1**Cálculo da corrente nominal do Trafo ($I_{nom(sec)}$)**

$$I_{nom(sec)} = \frac{P}{V_{ef(sec)}} = \frac{40}{12} = 3,333 \text{ [A]}$$

2**Cálculo da tensão de secundário com carga ($V_{sec(carga)}$)**

$$r_{eg} = \frac{V_{sec(vazio)} - V_{sec(carga)}}{V_{sec(vazio)}} \times 100 \Rightarrow 15 = \frac{12 - V_{sec(carga)}}{12} \times 100 \Rightarrow V_{sec(carga)} = 10,2 \text{ [V]}$$

3**Cálculo da resistência do Trafo ($R_{S(Trafo)}$)**

$$R_{S(trafo)} = \frac{V_{sec(vazio)} - V_{sec(carga)}}{I_{nom}} = \frac{12 - 10,2}{3,333} = 0,54 \text{ [\Omega]}$$

4**Cálculo da corrente de surto em diodos retificadores (I_{surge})**

$$I_{surge} = \frac{V_M}{R_{S(trafa)}} = \frac{12 \times \sqrt{2}}{0,54} = 31,427 \text{ [A]}$$

5**Cálculo da máxima capacitância de filtro (C)**

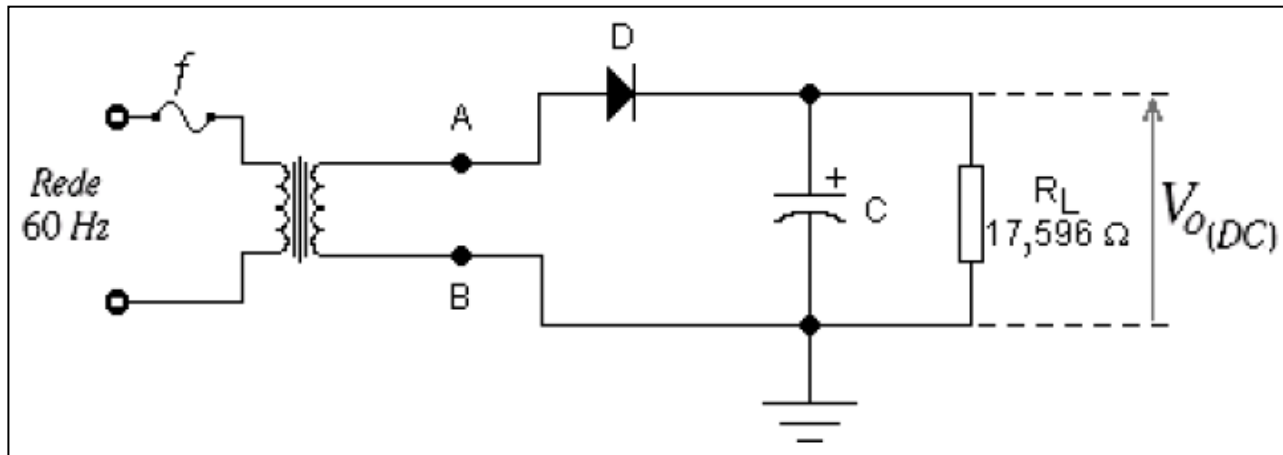
$$C \leq \frac{\tau_S}{R_{S(trafa)}} = \frac{8,3 \times 10^{-3}}{0,54} = 15370 \text{ [\mu F]}$$

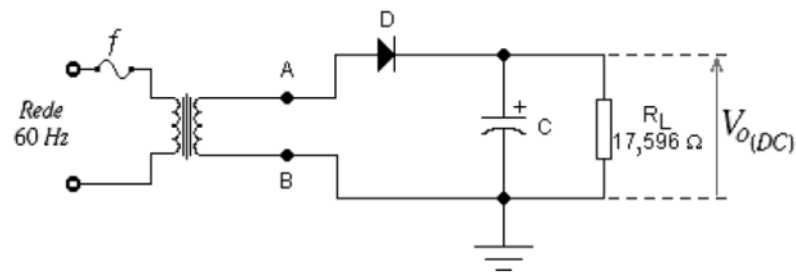
(usar o capacitor eletrolítico comercial mais próximo !)

Exercício 4

Usando o trafo do exercício 3 ($R_s = 0,54\Omega$, $V_{ef} = 12V$) e os gráficos de Schade, calcular o valor do capacitor de filtro C para que o ripple seja $r = (7\pm 1)\%$, com $R_L = 17,596\Omega$ em um retificador de meia-onda, conforme figura abaixo. Calcular também:

- A tensão de saída da fonte com carga máxima, $\overline{V_{o(DC)}}$.
- A corrente média no diodo com carga máxima, $\overline{I_D}$.
- A corrente de pico repetitivo no diodo com carga máxima, I_M .
- A corrente de surto inicial no diodo, I_{surge} .
- A corrente no fusível com carga máxima, I_f .
- A tensão de ruptura reversa mínima do diodo, B_V .
- As tensões, máxima e mínima, de saída da fonte, $V_{o(max)}$ e $V_{o(min)}$.



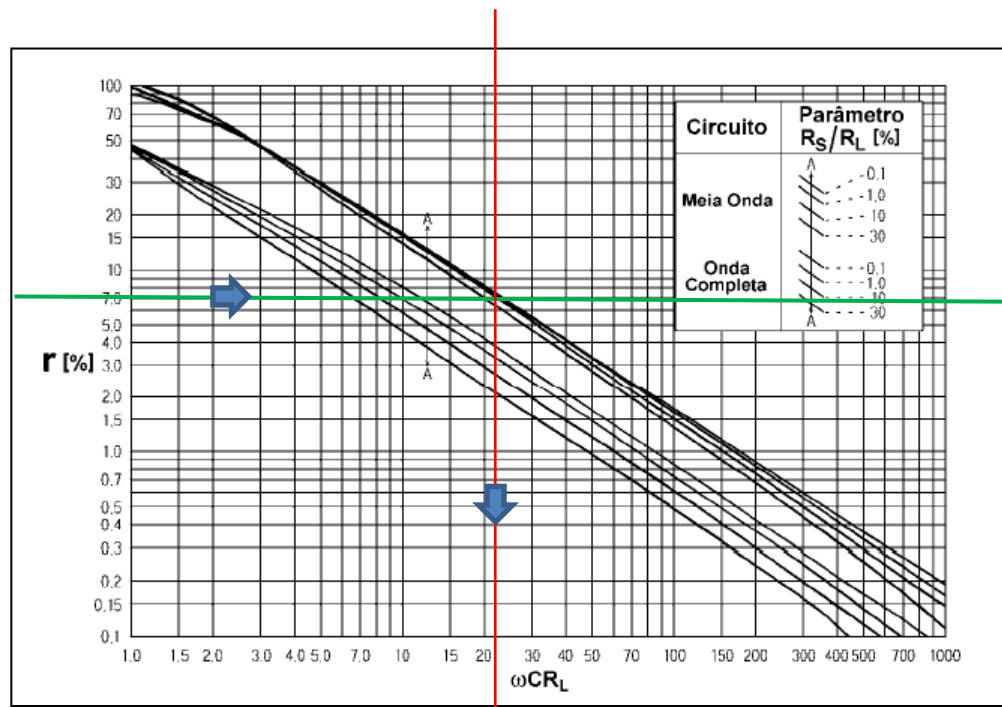


a.) A tensão de saída da fonte com carga máxima, $\overline{V_{o(DC)}}$.

1 Cálculo de R_s / R_L (%)

$$\frac{R_s}{R_L} \times 100 = \frac{0,54}{17,596} \times 100 = 3 \quad [\%]$$

2 Cálculo de ωCR_L



$r = 7\%$ e $R_s/R_L = 3\%$



$$[\omega CR_L] = 22$$

3

Cálculo da Capacitância (C)

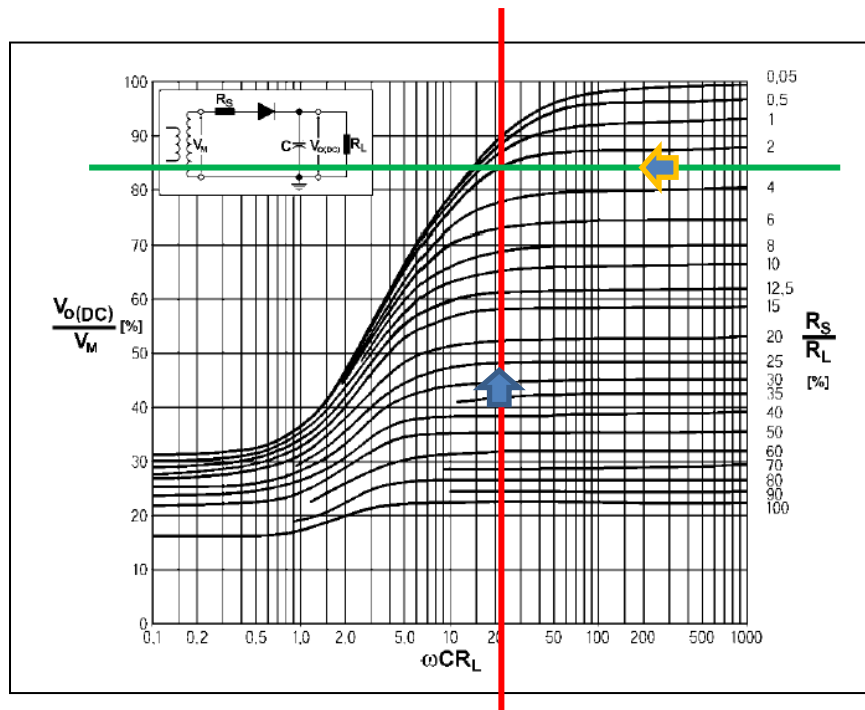
$$C = \frac{[\omega CR_L]}{2\pi f \times \left(\frac{V_{o(DC)}}{I_o}\right)} \quad [F]$$

$$\frac{V_{o(DC)}}{I_o} = R_L = 17,596\Omega$$

$$\rightarrow C \approx \frac{22}{120\pi 17,596} = 0,003316 \approx 3300 \mu F$$

4

Cálculo $V_{o(DC)}$



$$R_S/R_L = 3 \% \text{ e } [\omega CR_L] \cong 22$$

$$V_{o(DC)}/V_M \cong 81 \%$$

Para se obter um valor mais preciso de $V_{o(DC)} / V_M$ usar a escala logarítmica !

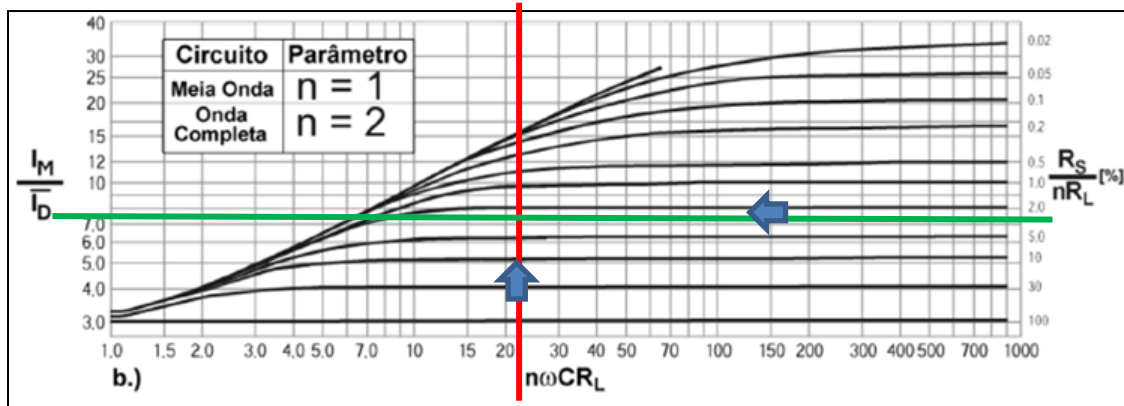
$$\rightarrow V_{o(DC)} = 0,81 \times 12 \times \sqrt{2} - 1 = 12,75 \quad [V]$$

(perda no diodo !)

b.) A corrente média no diodo com carga máxima, $\overline{I_D}$

$$\overline{I_D} = \frac{V_o}{R_L} \longrightarrow \overline{I_D} = \frac{12,75}{17,596} = 0,7246 \text{ [A]}$$

c.) A corrente de pico repetitivo no diodo com carga máxima, I_M

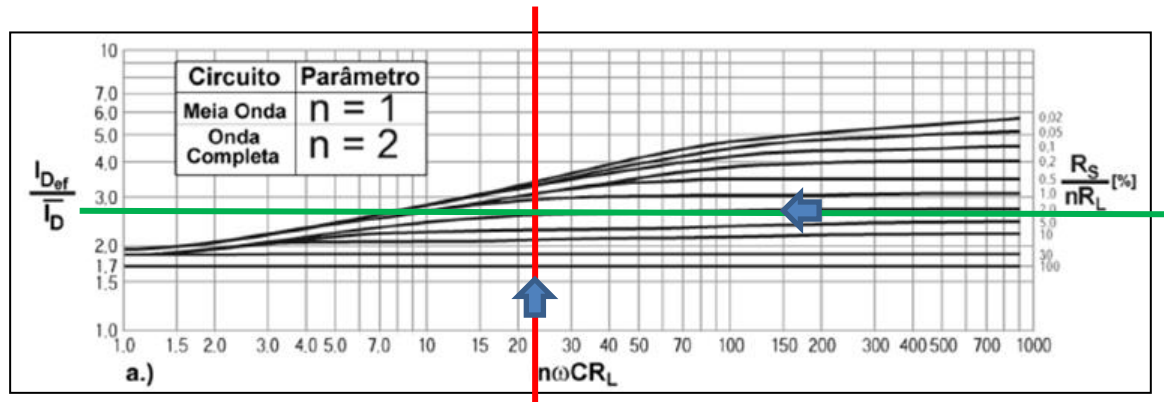


$$R_S/nR_L = 3 \% \text{ e } [n\omega CR_L] \cong 22 \longrightarrow I_M \cong 7,5 \times \overline{I_D} = 7,5 \times 0,7246 = 5,43 \text{ [A]}$$

d.) A corrente de surto inicial no diodo, I_{surge}

$$I_{surge} = \frac{V_m}{R_S} \longrightarrow I_{surge} = \frac{12 \times \sqrt{2}}{0,54} = 31,4 \text{ [A]}$$

e.) A corrente no fusível com carga máxima, I_f



$$R_S/nR_L = 3 \% \text{ e } [n\omega CR_L] \cong 22 \longrightarrow I_{Def} \cong 2,5 \times \bar{I}_D = 2,5 \times 0,7246 = 1,8 \text{ [A]}$$

$$I_{fusível} = \frac{N_2}{N_1} \times I_{ef(sec)} \text{ [A]} \longrightarrow I_{prim} \approx \frac{12}{127} \times I_{sec} = \frac{12}{127} \times 1,8 = 0,17 = I_f \text{ [A]}$$

f.) A tensão de ruptura reversa mínima do diodo, B_V

$$B_V > 2V_M = 2 \times 12 \times \sqrt{2} = 34 \text{ [V]}$$

Pode-se usar, nesse caso, um diodo do tipo *1N4001* que suporta corrente direta média máxima de 1 A e tensão reversa máxima de 50 V .

g.) As tensões, máxima e mínima, de saída da fonte, $V_{o(max)}$ e $V_{o(min)}$.

A máxima tensão de saída ocorre com a fonte em vazio, isto é, com $R_L = \infty$. Nesse caso, $V_{o(DC)} = V_{o(max)} = V_M$. Logo:

$$V_{o(max)} = 12 \times \sqrt{2} = 16,97 \text{ [V]}$$

Com a carga nominal, $R_L = 17,596 \Omega$, a tensão contínua de saída possui um valor médio igual a $12,75 \text{ V}$, como foi calculado no Item 4, e uma tensão ondulatória de 60 Hz (ripple) sobreposta.

$$r=7\% \quad \rightarrow \quad V_{r(ef)} = r \times V_{m\u00e9dio} = 0,07 \times 12,75 = 0,8925 \text{ V}$$

$$\text{Dente Serra} \quad \rightarrow \quad V_{r(pk)} = V_{r(ef)} \times \sqrt{3} = 1,5459 \text{ V}$$

$$V_{o(min)} = \overline{V_{o(DC)}} - V_{r(pk)} \quad \rightarrow \quad V_{o(min)} = 12,75 - 1,5459 = 11,2 \text{ [V]}$$

