

SEL-EESC-USP

Conversores AC \rightarrow DC

Cálculo de Retificadores

Prof. Paulo Roberto Veronese

EESC – USP

Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação



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

Índice

Características dos Retificadores com Filtro Capacitivo

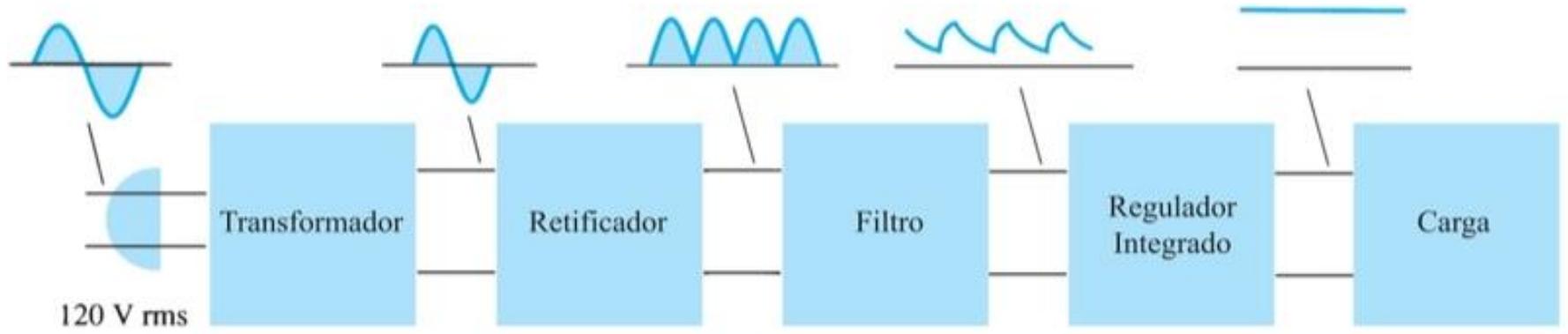
Curvas de Shade

Cálculos Gráficos: Retificador Monofásico de Onda Completa

Transformadores em Circuitos Retificadores

Voltage Regulators

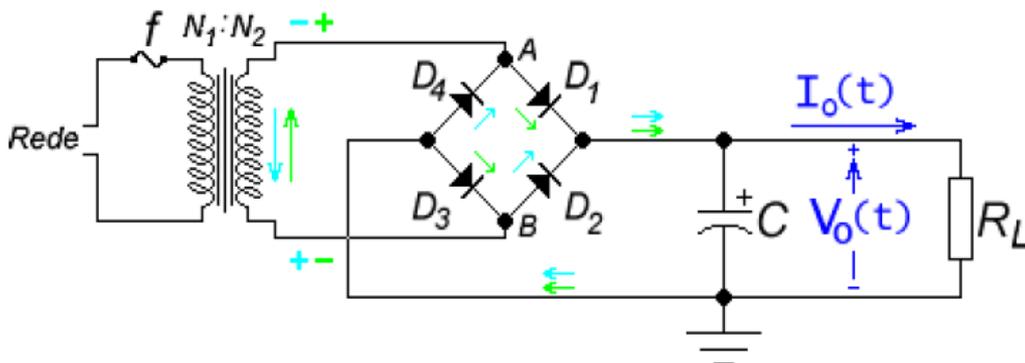
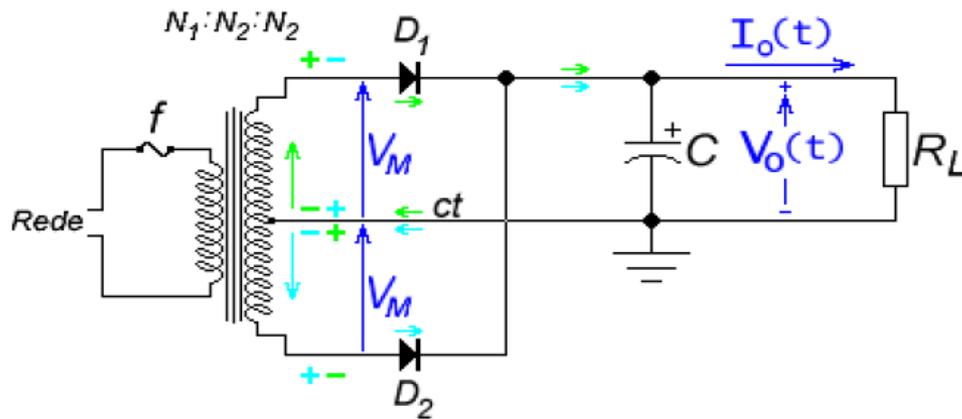
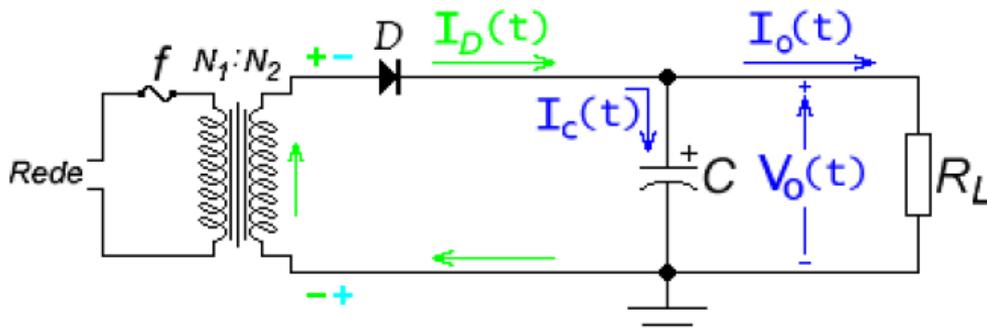
Roteiro de Projeto: Fonte de Alimentação com Retificador e Filtro Capacitivo



Características dos Retificadores com Filtro Capacitivo

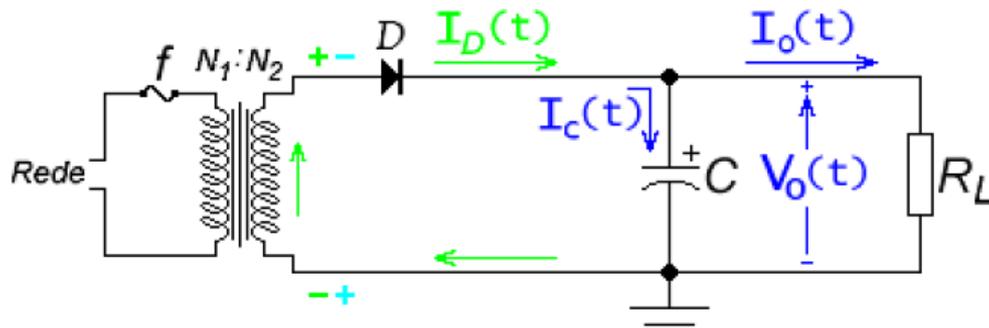
As fontes de alimentação de tensão e corrente contínuas usadas em eletrônica Podem ser construídas com circuitos retificadores baseados em transformadores monofásicos de 60 Hz, retificadores de meia-onda ou de onda-completa e de filtros capacitivos.

Retificador Monofásico de Meia-Onda com Filtro Capacitivo

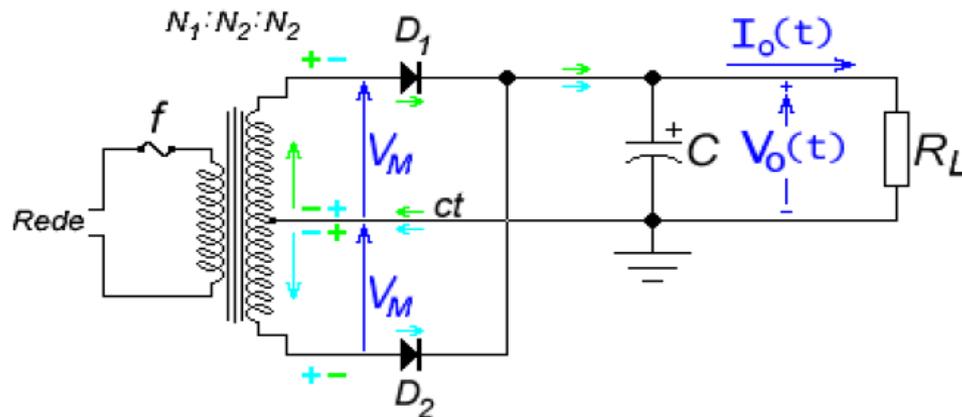


Nesses circuitos um **transformador monofásico**, geralmente abaixador de tensão, aplica uma senóide da rede de 60 Hz sobre um **retificador**.

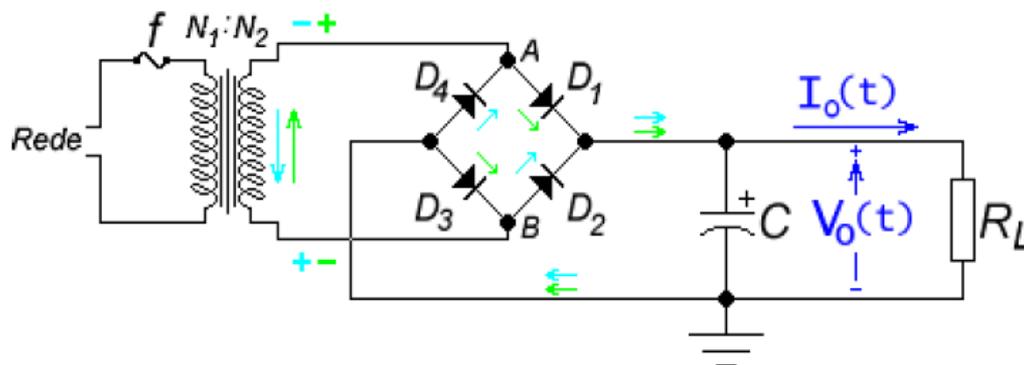
O **capacitor C** filtra a onda retificada tornando-a um sinal constante com **ripple**. O sinal retificado e filtrado é aplicado em uma **carga genérica R_L** . O **fusível f** protege o circuito contra curtos-circuitos e sobrecargas.



O retificador de meia-onda é preferido em aplicações de **baixas correntes e de baixo tensão** mas com **desempenho deficiente**.



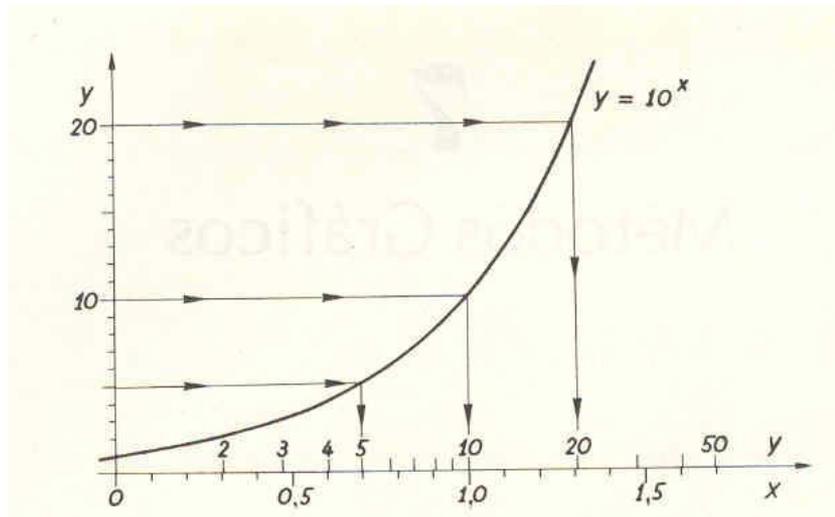
O retificador de onda-completa com dois diodos e tomada central é preferido em aplicações de **altas correntes e baixas tensões**.



O retificador de onda-completa em ponte é preferido em aplicações de **altas correntes e de tensões mais elevadas**.

Recordação

Função Logarítmica



y	$x = \log y$	y	$x = \log y$	y	$x = \log y$
1	0	6	0,778	20	1,301
2	0,301	7	0,845	30	1,477
3	0,477	8	0,903	40	1,602
4	0,602	9	0,954	50	1,699
5	0,699	10	1,000	etc.	

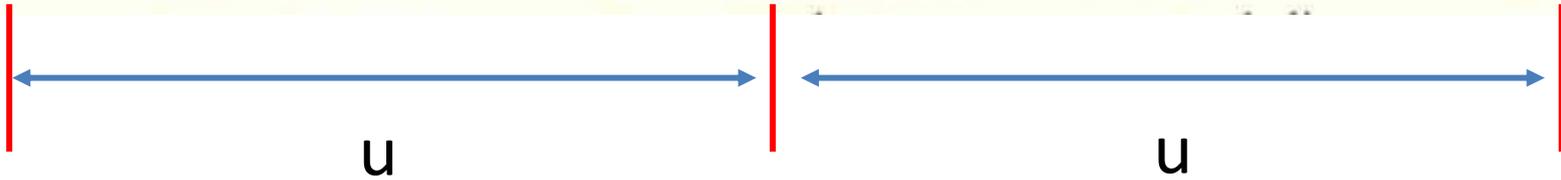
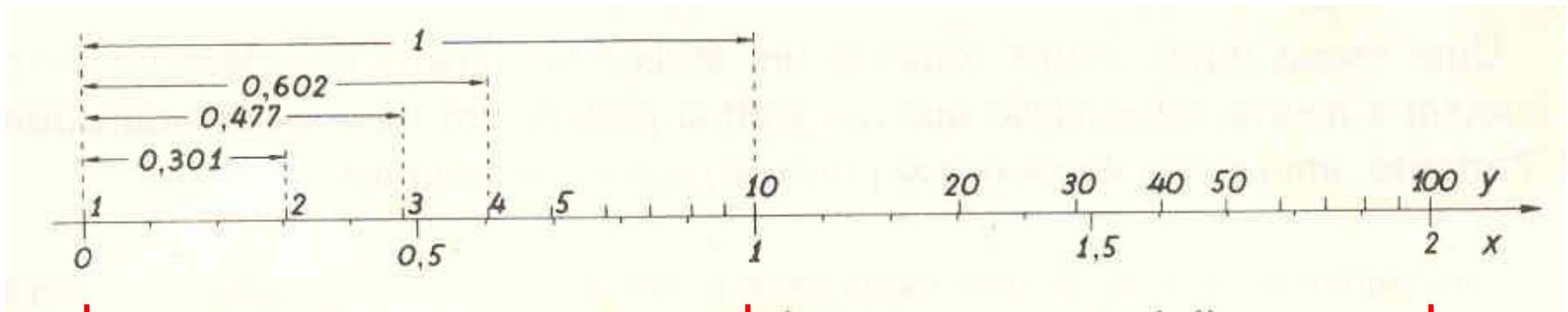


Gráfico Monologarítmico

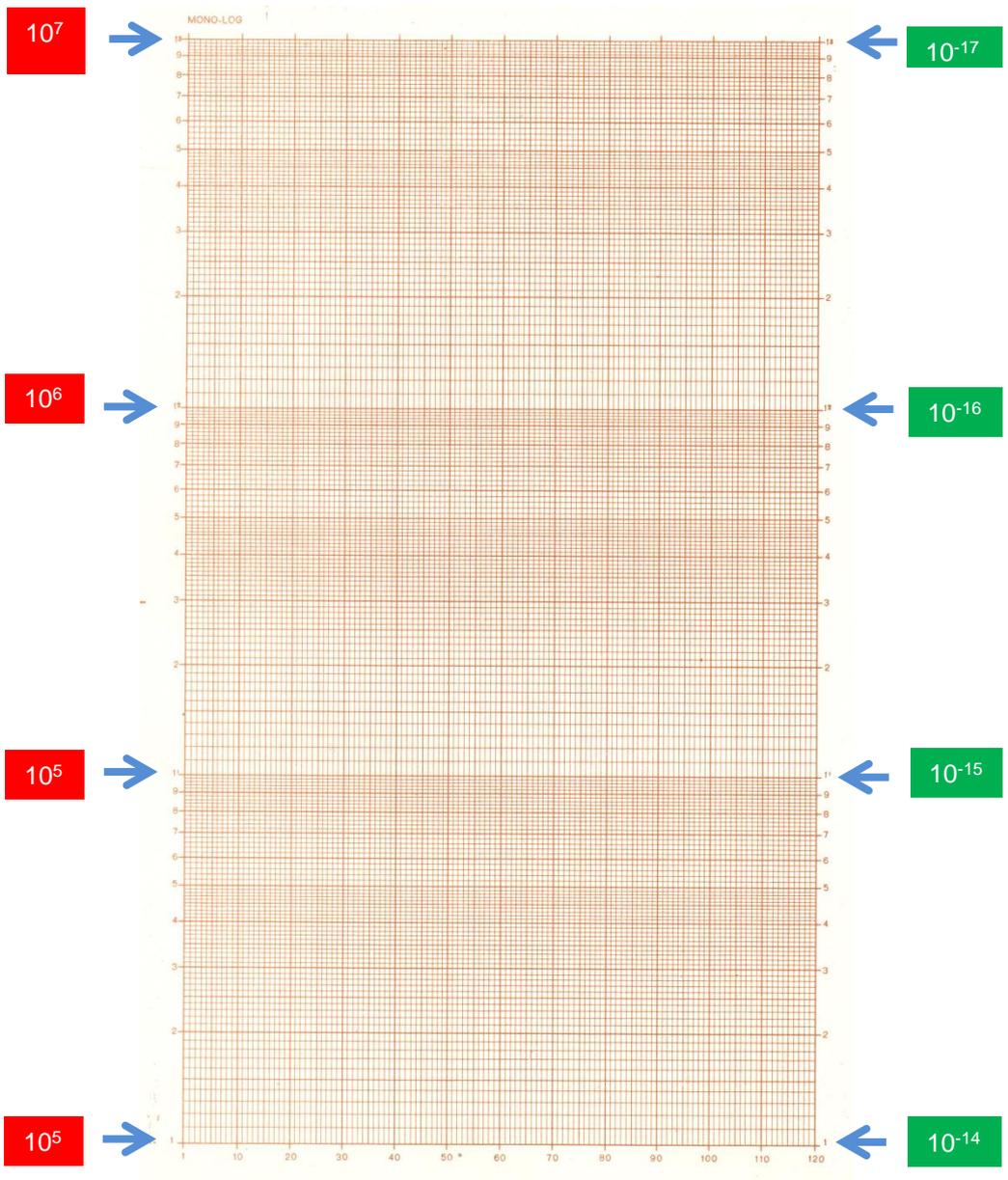
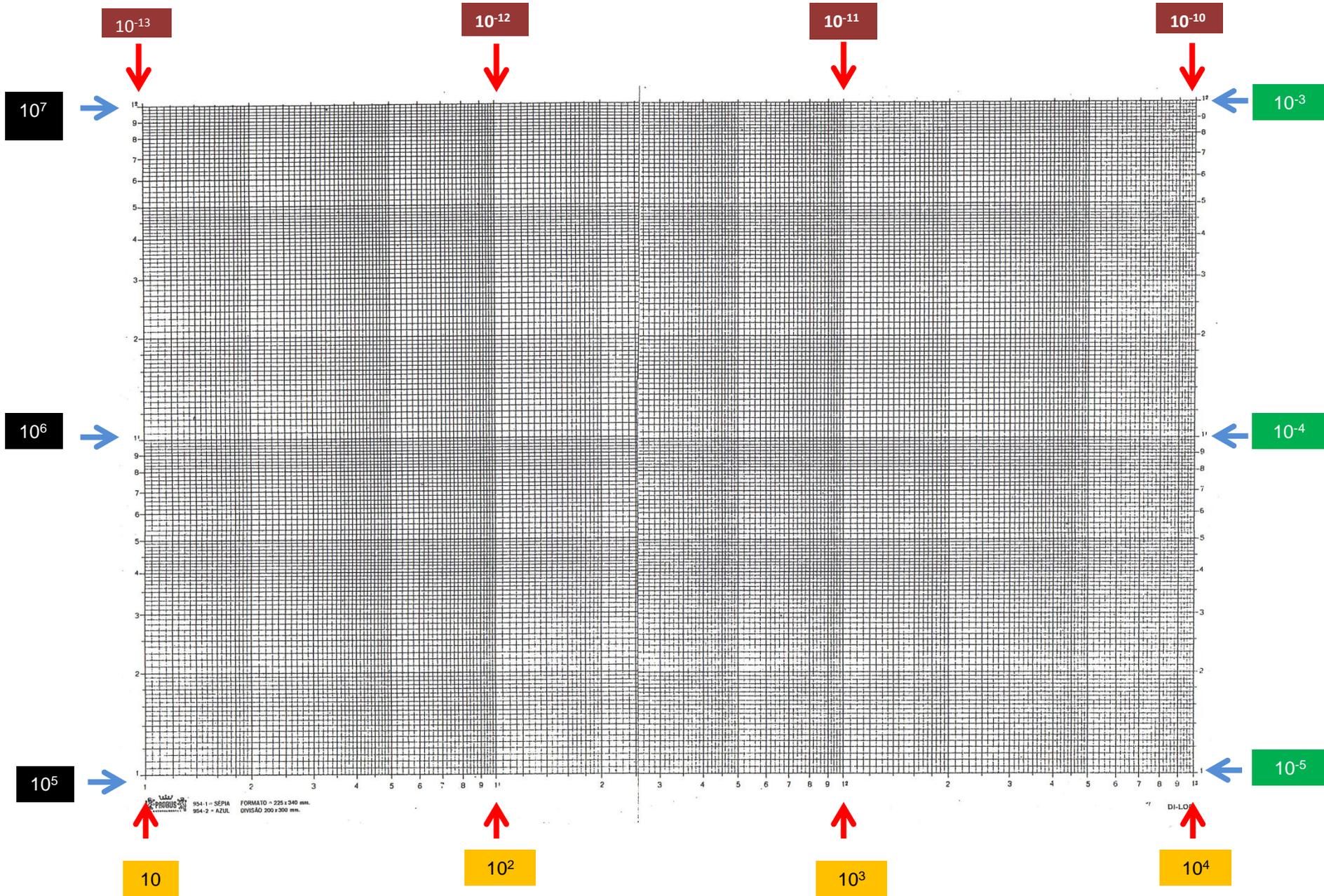


Gráfico Monologarítmico



Curvas de Shade

(Proceedings IRE 1943)

Analysis of Rectifier Operation*

O. H. SCHADE†, MEMBER, I.R.E.

Summary—An analysis of rectifier operation in principal circuits is made. The introduction of linear equivalent diode resistance values permits a simplified and accurate treatment of circuits containing high-vacuum diodes and series resistance. The evaluation of these equivalent resistance values and a discussion of emission characteristics of oxide-coated cathodes precede the circuit analysis.

Generalized curve families for three principal condenser-input circuits are given to permit the rapid solution of rectifier problems in practical circuits without inaccuracies due to idealizing assumptions.

The data presented in this paper have been derived on the basis of a sinusoidal voltage source. It is apparent that the graphic analysis may be applied to circuits with nonsinusoidal voltage sources or intermittent pulse waves.

It is also permissible to consider only the wave section during conduction time and alter the remaining wave form at will. Complicated wave shapes may thus be replaced in many cases by a sub-

one or another part of the subject on the assumption of zero series resistance. Practical circuits have resistance and may even require insertion of additional resistance to protect the diode and input condenser against destructive currents. The equivalent diode resistance and the emission from oxide-coated cathodes are, therefore, discussed preceding the general circuit analysis. This analysis is illustrated on graphic constructions establishing a direct link with oscillograph observations on practical circuits. A detailed mathematical discussion requires much space and is dispensed with in favor of graphic solutions, supplemented by generalized operating characteristics.

I. PRINCIPLES OF RECTIFICATION

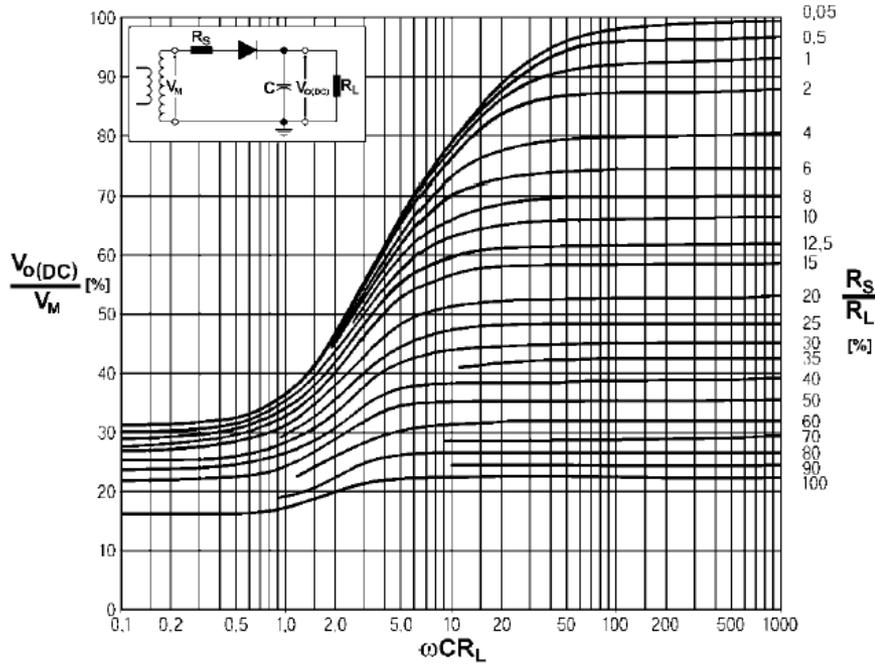
(Proceedings IRE 1943)

A maneira mais prática de se calcular retificadores com filtros capacitivos ainda é através das **curvas de Schade** apresentados em 1943.

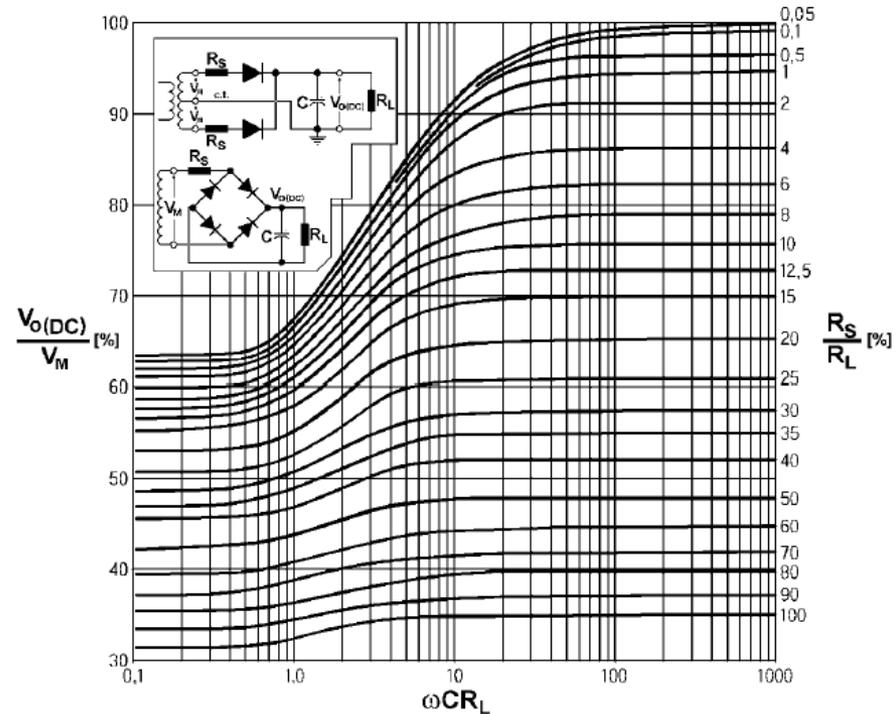
As curvas de Shade fornecem todas as informações necessárias para os cálculos de retificadores.

1ª Curva de Schade

Tensão de Saída ($V_{o(DC)}$), Tensão Máxima no Secundário (V_M), Resistência do Secundário do Transformador (R_S), Resistência da Carga (R_L)



Retificador de Meia-Onda



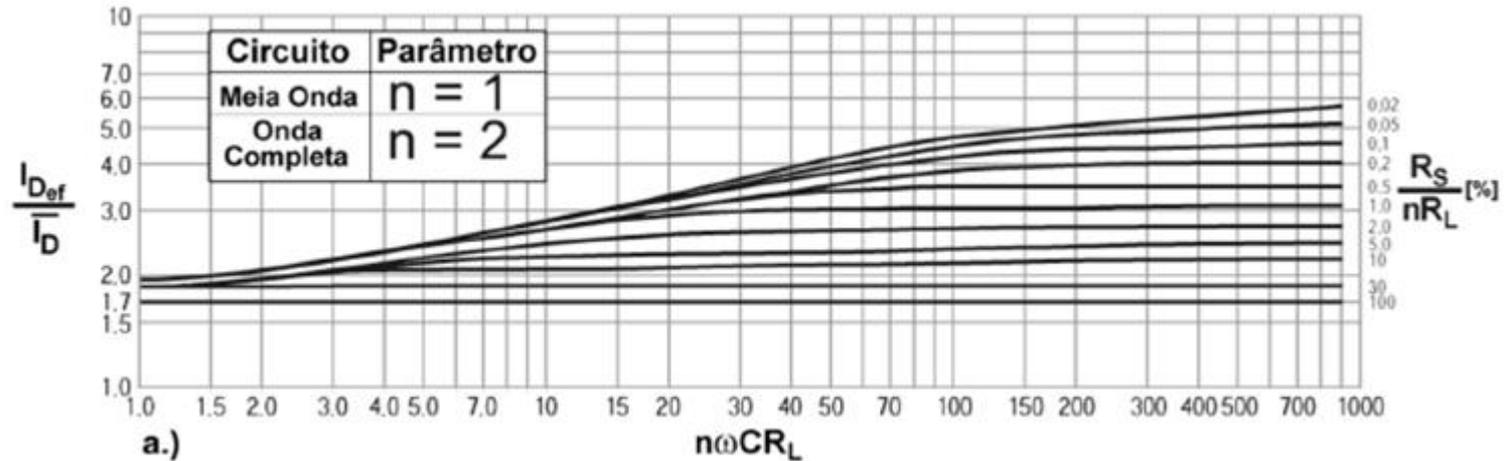
Retificador de Onda Completa

Resistência do Secundário do Transformador (R_S)

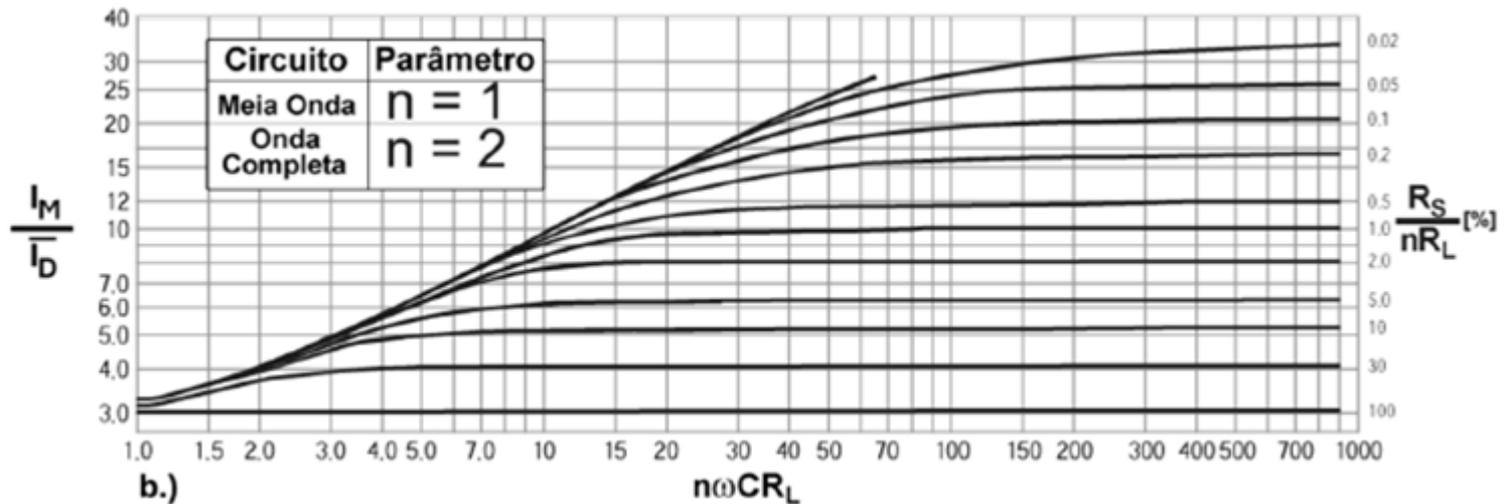
Correntes em Diodos de Circuitos Retificadores Monofásicos

Corrente Eficaz nos Diodos (I_{Def}), Corrente de Pico Repetitivo nos Diodos (I_M),
Corrente Média nos Diodos (\bar{I}_D)

2ª Curva de Schade

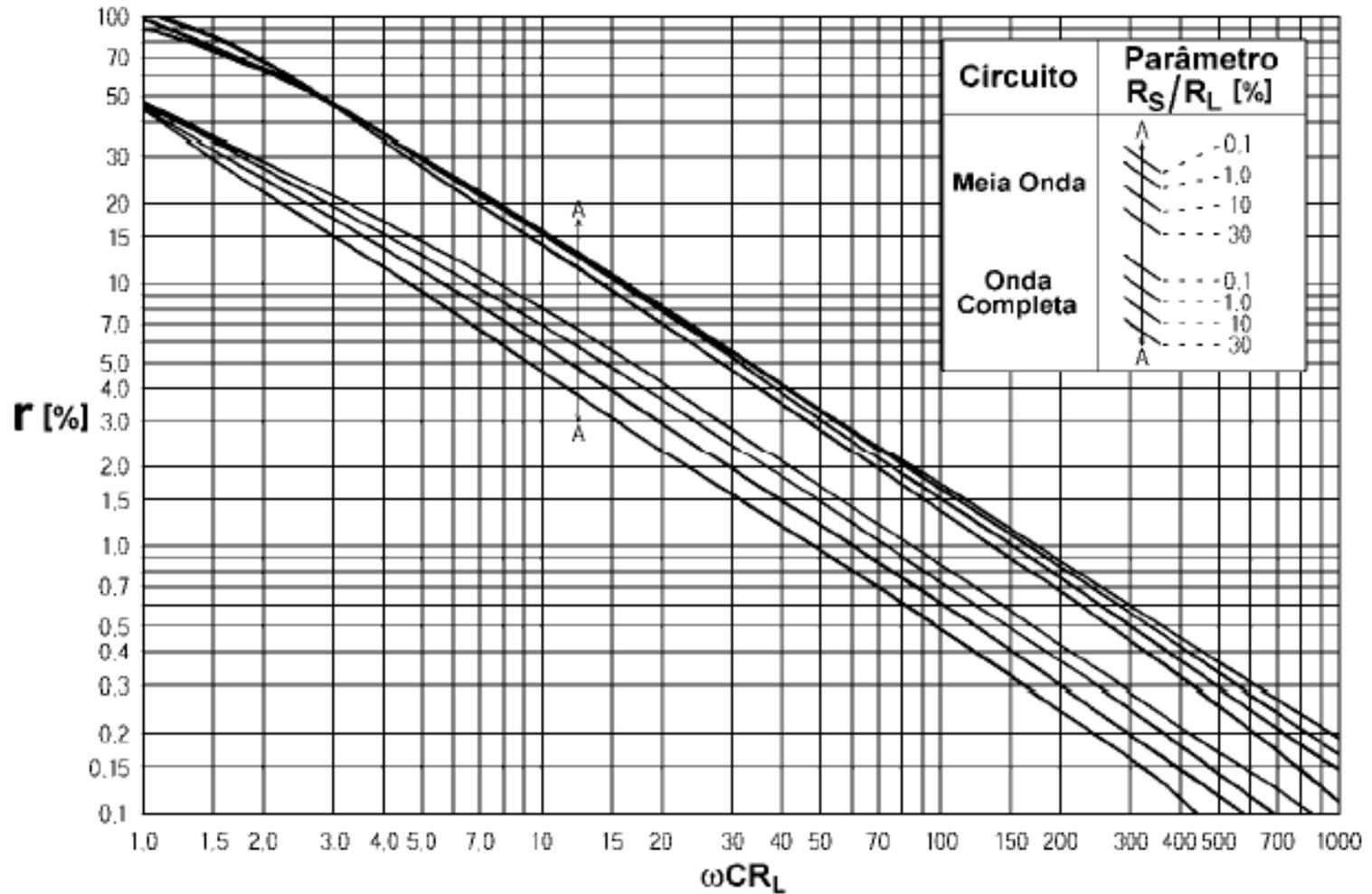


3ª Curva de Schade



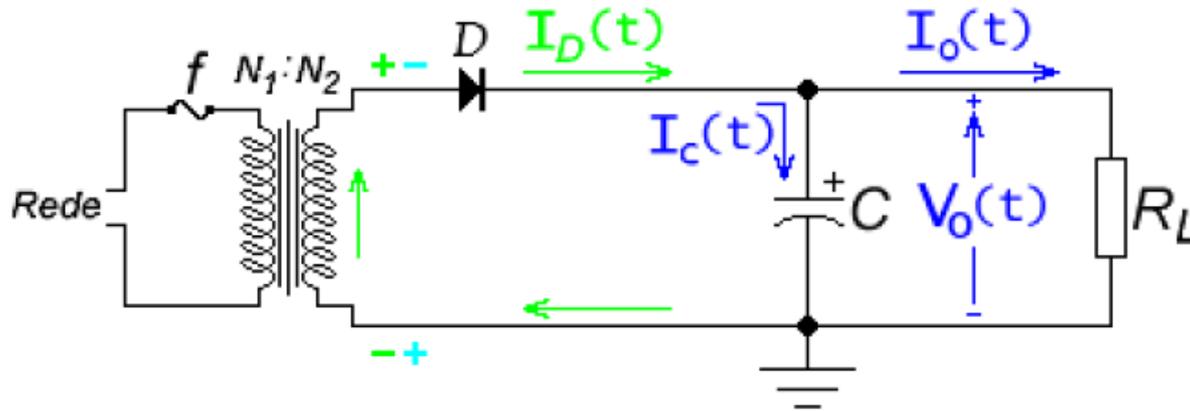
4ª Curva de Schade

Porcentagem da Ondulação (r)

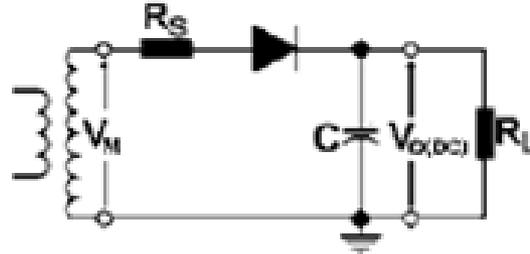


Cálculos Gráficos

Retificador Monofásico de Meia Onda com Filtro Capacitivo



A **resistência R_S** , que aparece nos gráficos é equivalente à **perda total do trafo** somada à **perda resistiva do diodo**, se esta for conhecida.



As **resistências de perdas dos diodos** podem ser negligenciadas pois são as resistências dinâmicas desses componentes e possuem valores bem baixos.

Se não forem negligenciadas, pode-se estipular $R_S = R_{S(\text{trafo})} + R_{on}$ sendo R_{on} a resistência do diodo diretamente polarizado.

A **queda de tensão direta (V_Y)** por diodo normalmente deve ser considerada. Em fontes de alta corrente deve-se estipular, por diodo, a seguinte queda de tensão direta:

$$0,9 \leq V_Y \leq 1,2 \text{ V}$$

A queda no diodo é igual a nV_Y :

$n=1$ para **retificador de onda completa com center tap**

$n=2$ para **retificador em ponte**.

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 (R_T)**, deve-se fazer:

$$\omega C R_L \geq 50 \text{ e } R_S / R_L \leq 0,05 \%$$

$$R_T = \frac{V_O - V_L}{V_L}$$

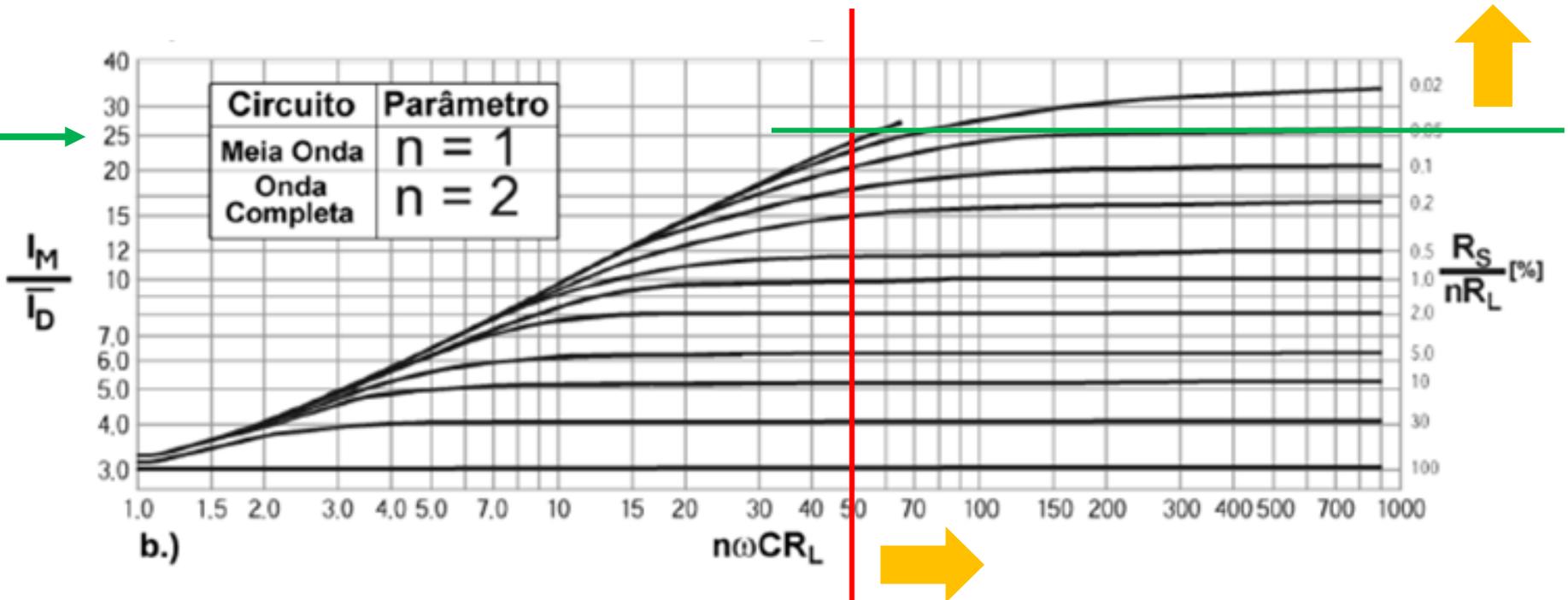
R_T é a regulação de tensão

V_O é a tensão de operação "sem carga"

V_L é a tensão de operação "em carga"

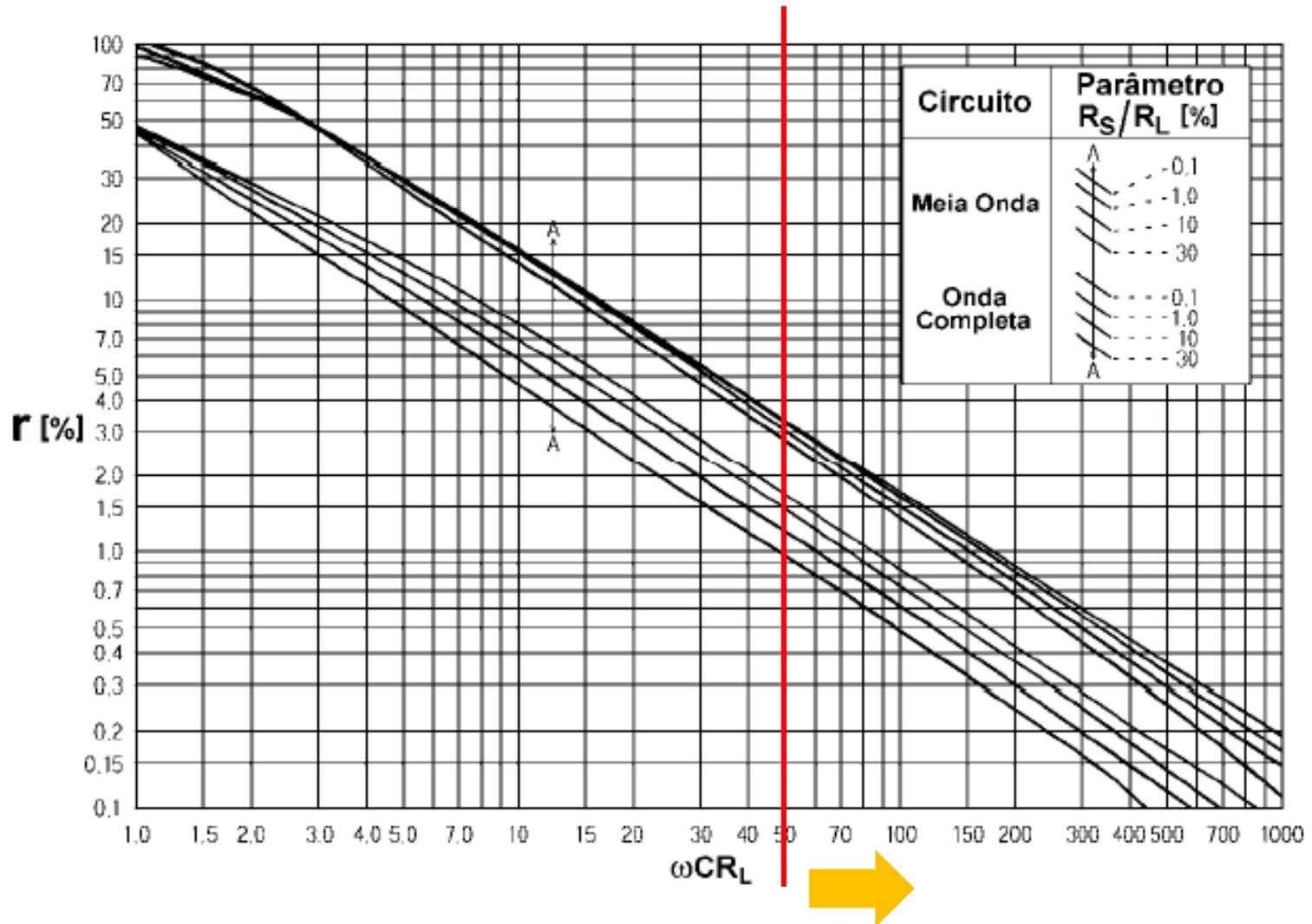
Esses valores, no entanto, podem causar, como mostra o gráfico abaixo, correntes de pico sobre os diodos superiores a 20 vezes a corrente média conduzida por eles.

Esse fato limita a aplicação desse tipo de retificador a aplicações de baixas correntes, com fatores de regulação aceitáveis.



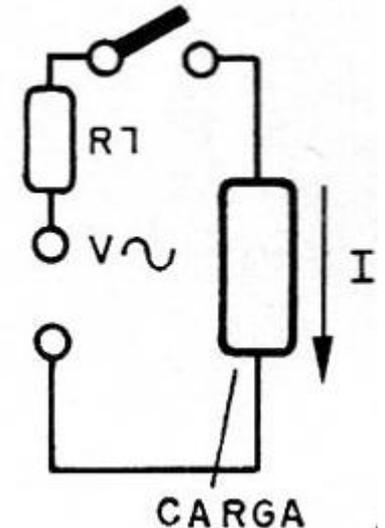
Para que o **fator de ondulação (ripple)** seja adequado, como mostra o gráfico abaixo, também se deve fazer:

$$\omega CR_L \geq 50$$



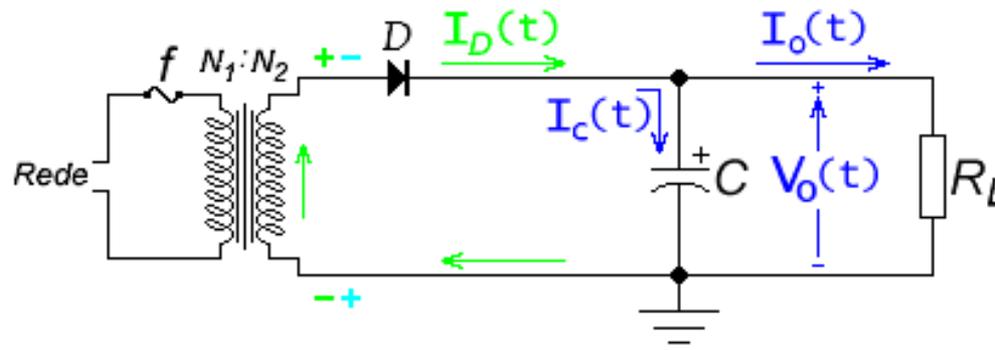
A **corrente de surto inicial pelos diodos** ($V_M (R_S + R_{ON})$) também limita aplicações de baixas perdas para esse tipo de retificador. Essa corrente deve ser inferior à corrente de pico não repetitivo suportada pelo diodo, isto é, $I_{surto} < I_{FSM}$.

Corrente de partida ou **corrente de surto é uma corrente muito elevada que percorre um circuito elétrico**, fluindo através da carga, no **momento em que o circuito é fechado**. Isto ocorre com cargas que apresentam impedância muito baixa no momento do fechamento do circuito. A corrente no diodo inicialmente atinge um valor bastante elevado (surto inicial), uma vez que ao o ligarmos o circuito, o capacitor encontra-se descarregado e na saída do circuito produz-se, em consequência, um tensão nula (curto-circuito) se desprezarmos a resistência série equivalente do capacitor (ESR).

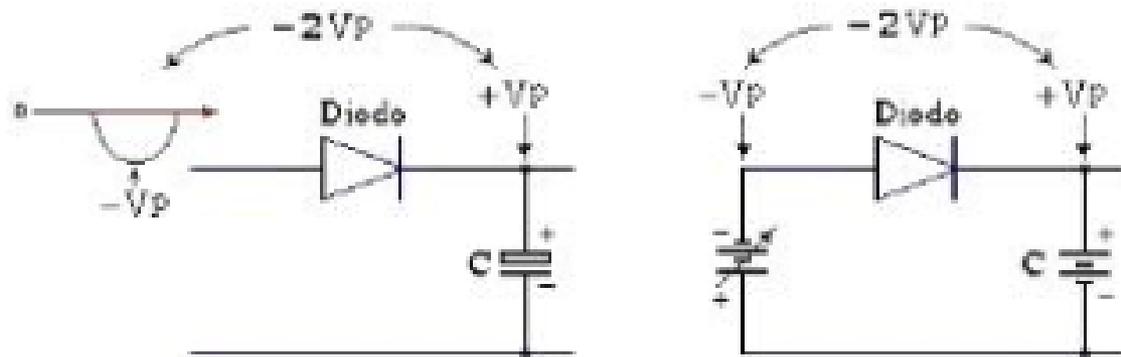


Outra consideração que deve ser feita para esse circuito é a respeito da **constante de tempo de carga inicial do capacitor**. Para que o diodo tenha um **funcionamento seguro**, isto é, não seja submetido ao corrente de surto inicial por muito tempo, deve-se estipular:

$$\zeta = R_S C \leq 8,33 \text{ ms}$$



A **máxima tensão reversa é $2V_M$** , conforme figura abaixo. O capacitor aumenta a tensão inversa no diodo porque permanece carregado quando o diodo não estiver conduzindo.



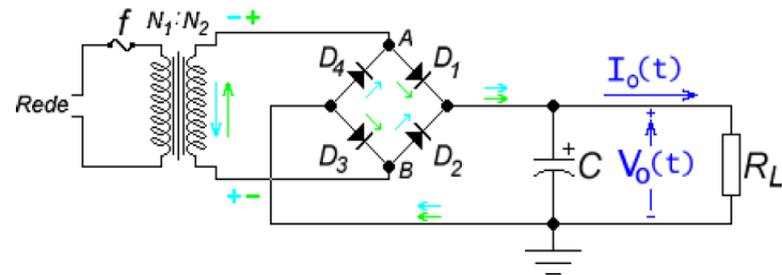
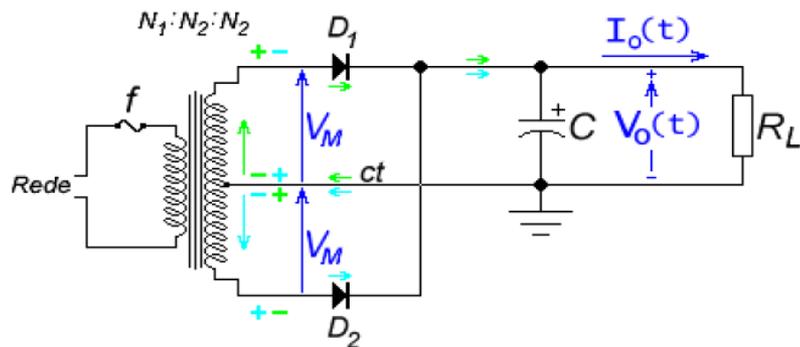
No dimensionamento desses diodos deve-se dar uma **margem de segurança de 20% ~ 50%**.

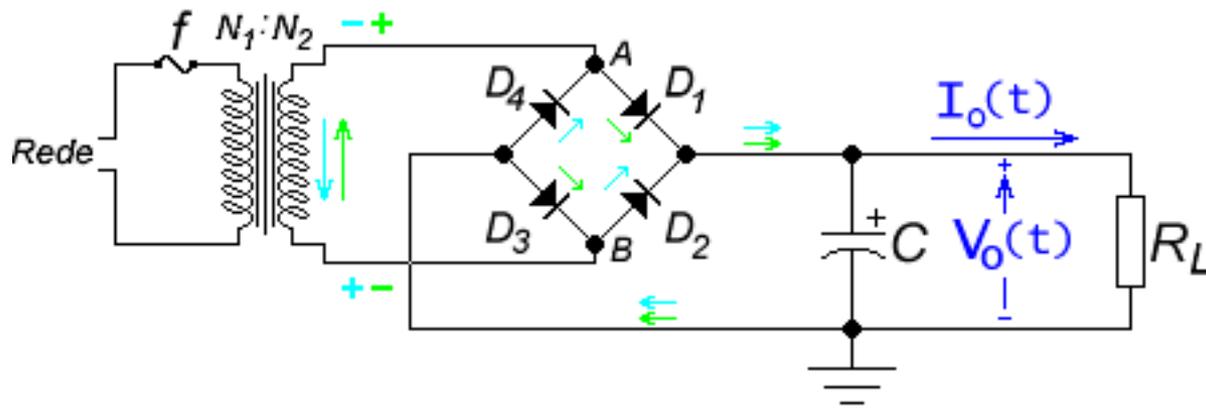
$$I_{\text{sec(trafo)}} = I_{D\text{ef}}$$

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

Cálculos Gráficos

Retificador Monofásico de Onda Completa com Filtro Capacitivo





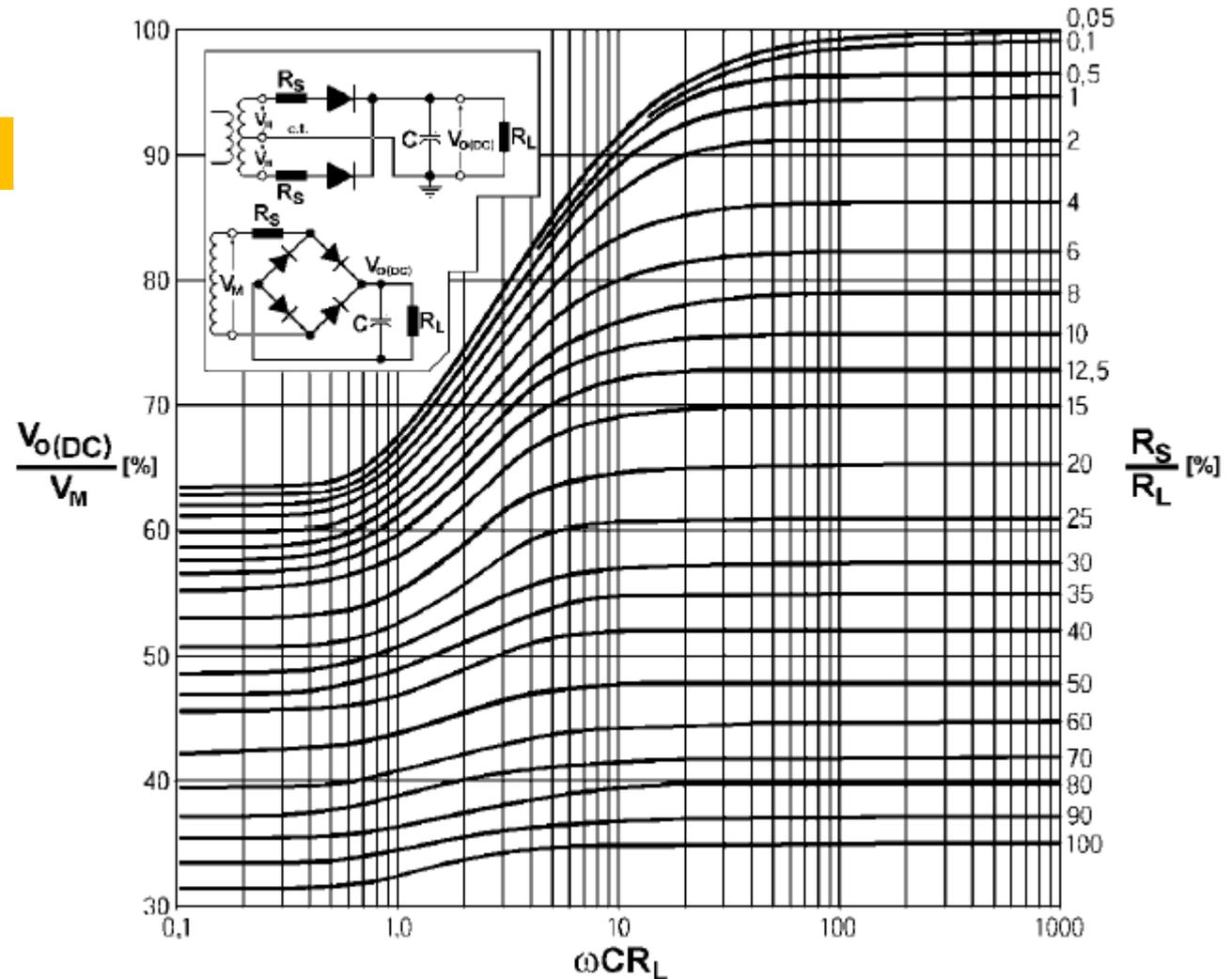
■ **A máxima tensão reversa é V_M .** No dimensionamento desses diodos deve-se dar uma margem de segurança de **20% ~ 50%**.

■
$$I_{sec(trafo)} = \sqrt{2} \times I_{Def}$$

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

Pode-se calcular a **tensão de saída ($V_{o(DC)}$)** das fontes em função da **tensão de pico do secundário do trafo** $V_M = \sqrt{2} V_{rms}$, da **razão R_S / R_L** e do **produto ωCR_L** .

1ª Curva de Schade



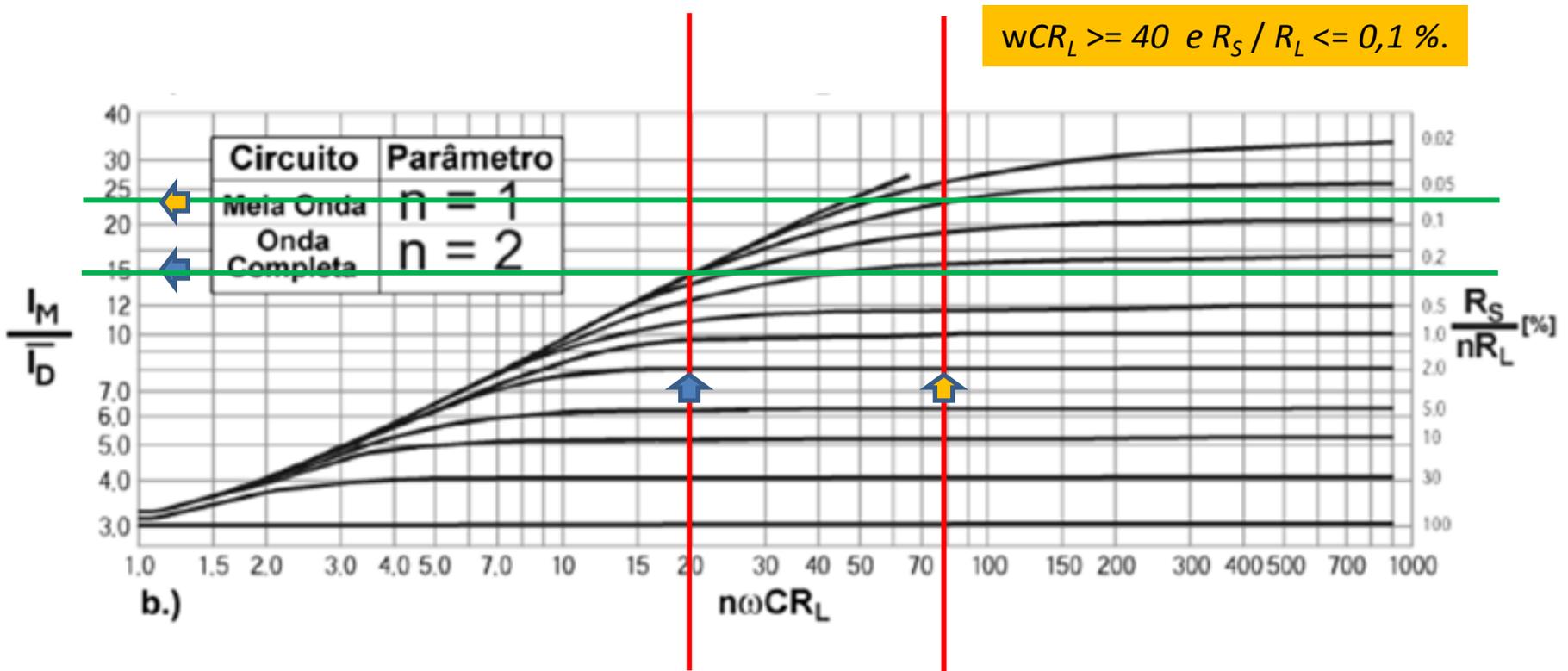
Para que haja uma regulação satisfatória da tensão de saída, deve-se fazer:

$wCR_L \geq 10$ para uma regulação superior a 10%

$wCR_L \geq 40$ para uma regulação superior a 2%

$R_S/R_L \leq 0,1\%$.

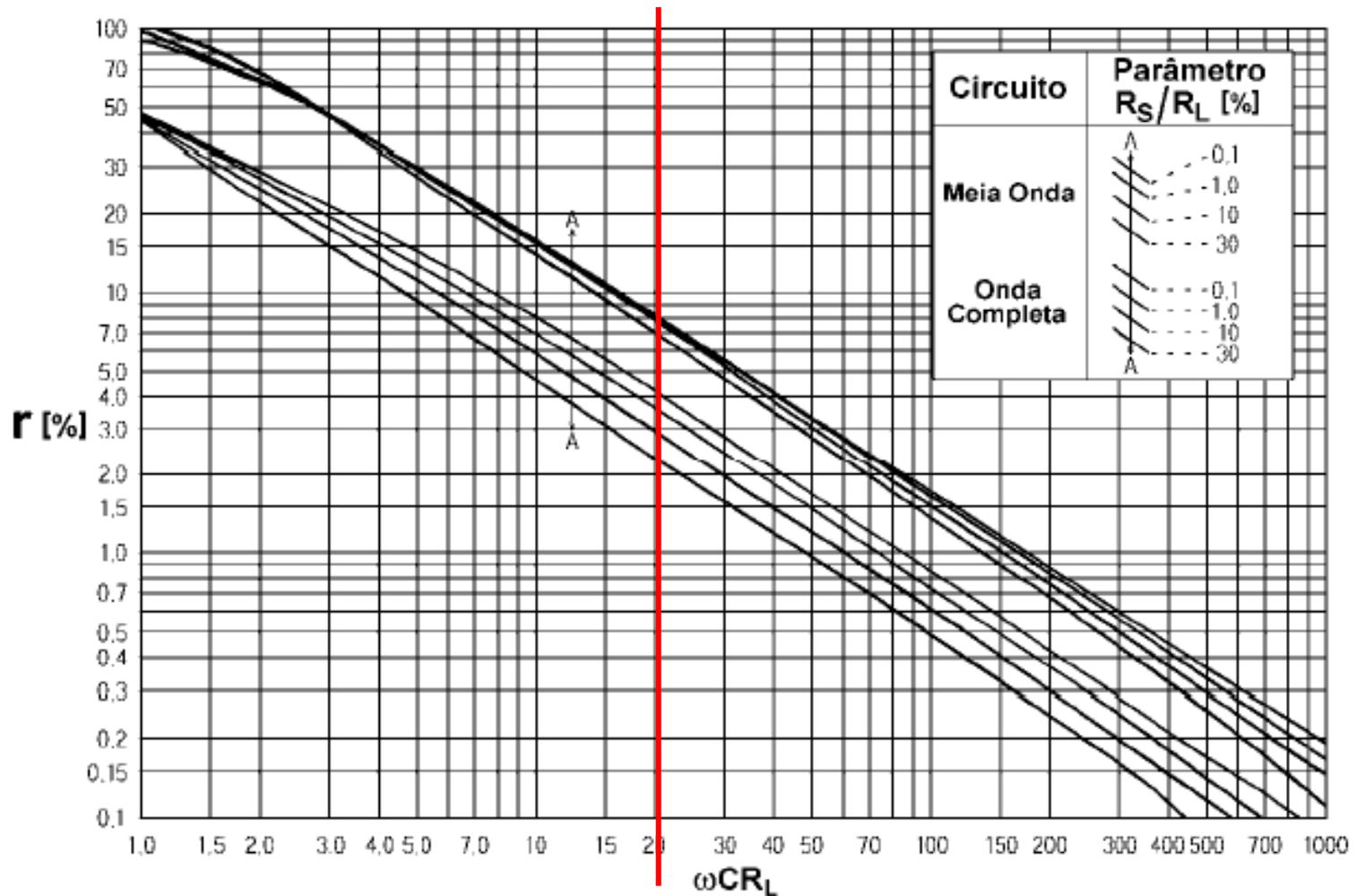
Esses valores podem causar, como mostra o gráfico abaixo, correntes de pico sobre os diodos entre 15 e 22 vezes superiores à corrente média que circula por eles.



$wCR_L \geq 10$ e $R_S/R_L \leq 0,1\%$.

Para que o **fator de ondulação (ripple)** seja adequado nesses tipos de retificadores, como mostra o gráfico abaixo, também se deve fazer:

$$\omega CR_L \geq 20$$



A **corrente de surto inicial pelos diodos**, que vale V_M/R_S limita aplicações de baixas perdas para esses tipos de retificadores.

A constante de tempo de carga do capacitor de filtro vale $\zeta = R_S C$.

O diodo estará protegido se $V_M / (R_S + R_{on}) \leq I_{FSM}$ e $\zeta \leq 8,333 \text{ ms}$, 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.

$$I_D = V_M / R_S$$

$$V_M / (R_{\text{trafo}} + R_{\text{on}}) \leq I_{FSM}$$

$$\zeta \leq 8,333 \text{ ms}$$

Transformadores em Circuitos Retificadores com Filtro Capacitivo

Transformador

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

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

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

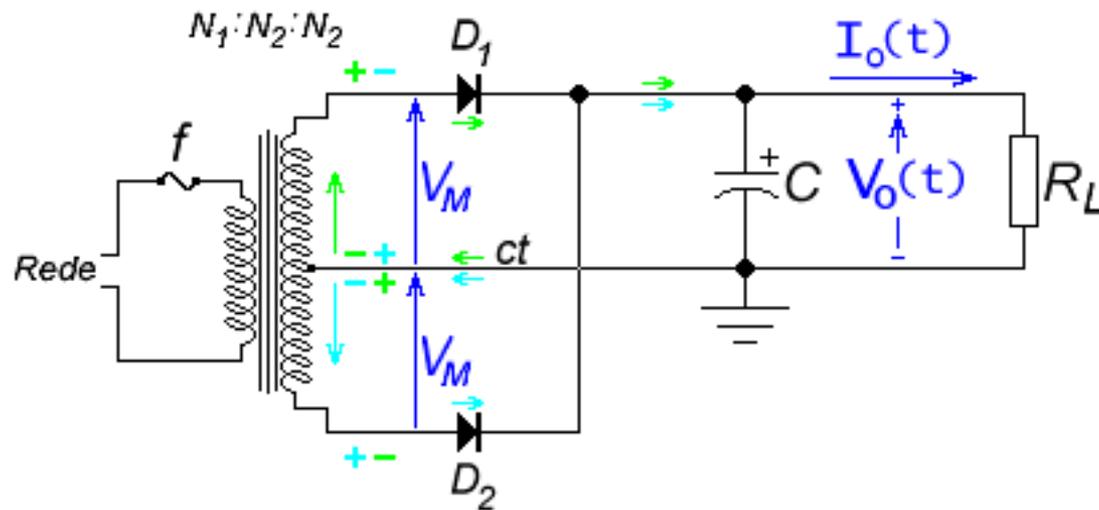
$$R_{S(trafo)} = \frac{V_{ef(vazio)}}{I_{ef(nom)}} \times \frac{r_{eg}}{100} \quad [\Omega]$$

sendo:

$V_{ef(vazio)}$ é a tensão eficaz do secundário do transformador em vazio

$I_{ef(nom)}$ é a capacidade nominal de corrente do transformador

r_{eg} é o seu fator de regulação do transformador



A **máxima tensão reversa** é $2V_M$. No dimensionamento desses diodos deve-se dar uma margem de segurança de 20% ~ 50%.

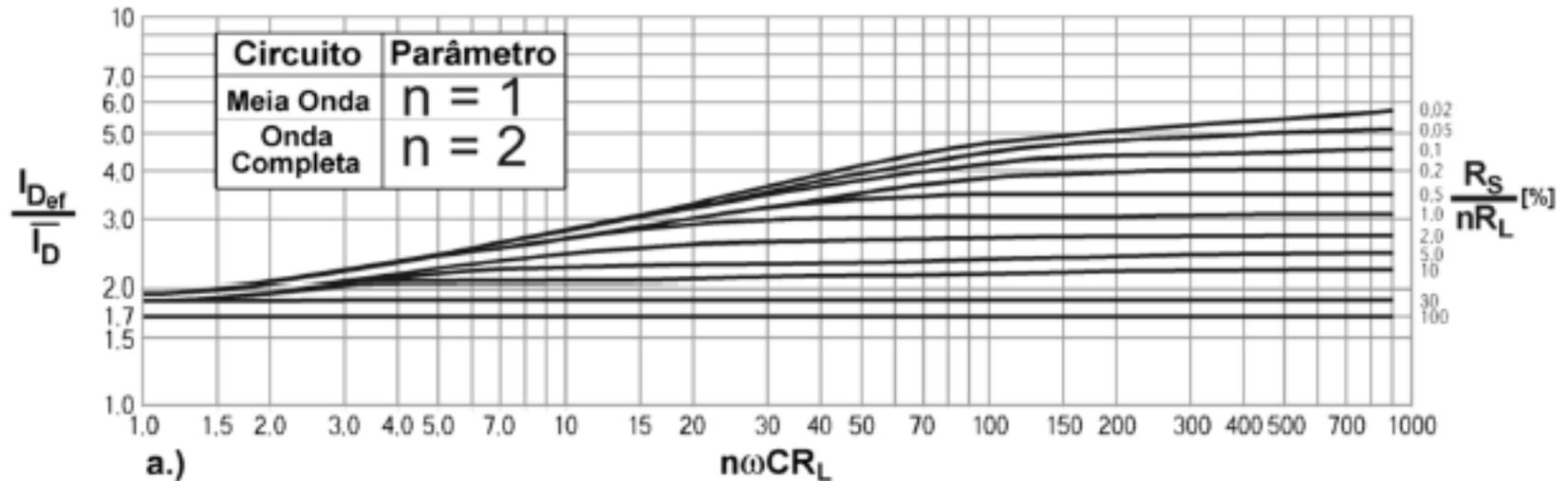
Para cada **rolamento secundário**:

$$I_{\text{sec}(\text{trafo})} = I_{D_{\text{ef}}}$$

Para o **condutor da tomada central**:

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

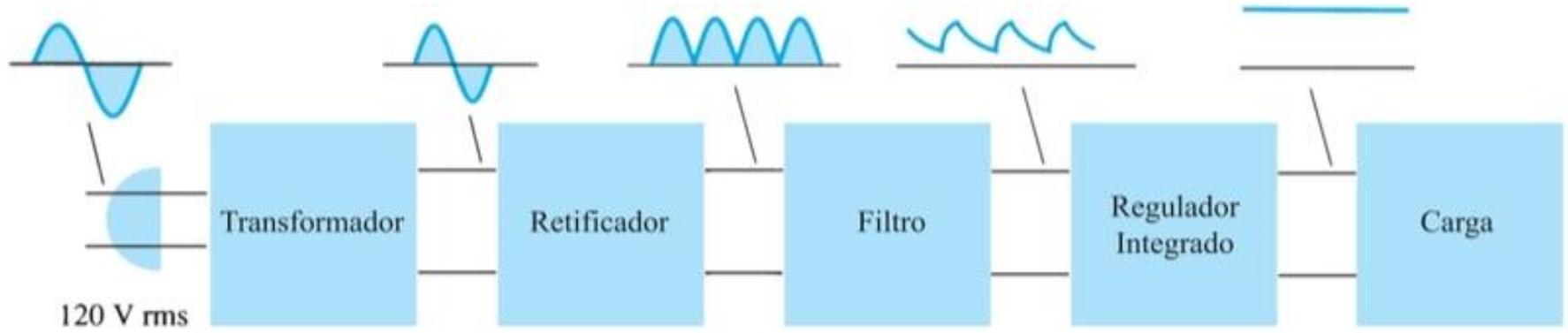
Os fusíveis devem ser dimensionados através dos cálculos das correntes eficazes nos diodos com o auxílio do gráfico abaixo. Ao resultado final deve-se acrescentar cerca de 10 % para compensar a corrente de magnetização de primário.



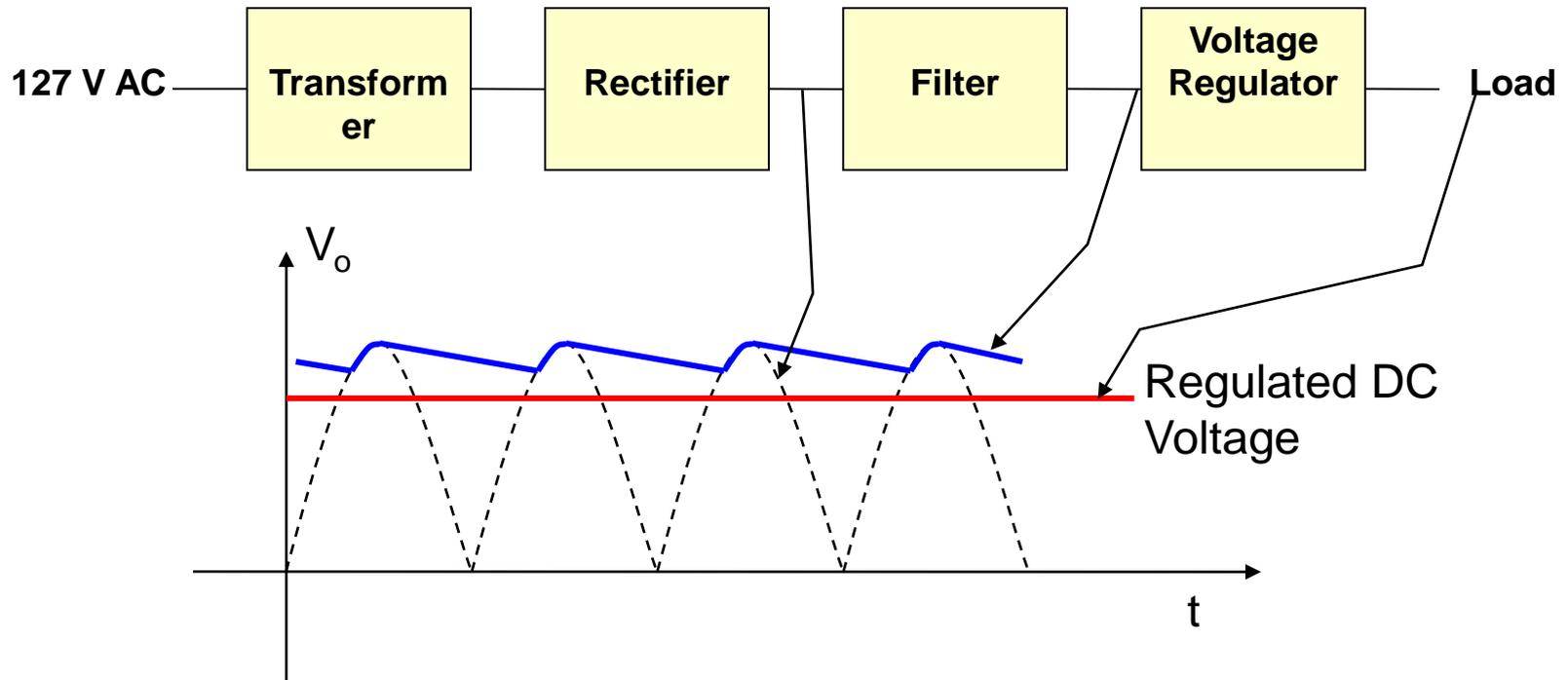
$$I_{fusivel} = I_{prim(trafo)} = \frac{N_2}{N_1} \times I_{CT} = \frac{N_2}{N_1} \times \sqrt{2} \times I_{Def}$$



Voltage Regulators



Basic Concept of Voltage Regulation



Starting with an AC voltage, a steady DC voltage is obtained by rectifying the AC voltage, filtering to a DC level and finally regulating to obtain a desired, regulated DC voltage.

$$\text{Ripple} = \frac{\text{ripple voltage (rms)}}{\text{dc voltage}} = \frac{V_r (rms)}{V_{dc}} \times 100\%$$

Line Regulation

When the DC input (line) voltage changes, the voltage regulator must maintain a nearly constant output voltage.

Line regulation: it is the percentage of change in output voltage for a given change in the input (line) voltage.

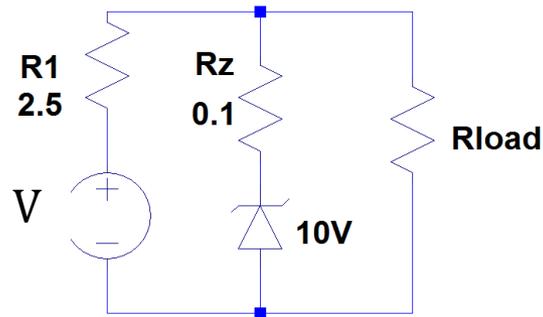
$$\text{Line Regulation} = \frac{\Delta V_{OUT}}{\Delta V_{in}} \times 100\%$$

Δ_{out} = variation in the output voltage

Δ_{in} = variation in the input voltage

Example:

In the circuit below calculate the line regulation if V varies from 13V to 17V.



■ If $V=17V$

$$I_s + I_z + I_{load} = 0 \rightarrow \frac{V_{load}-17}{2.5} + \frac{V_{load}-10}{0.1} + \frac{V_{load}}{10} = 0 \rightarrow V_{load} = 10.171 V$$

■ If $V=13V$

$$I_s + I_z + I_{load} = 0 \rightarrow \frac{V_{load}-13}{2.5} + \frac{V_{load}-10}{0.1} + \frac{V_{load}}{10} = 0 \rightarrow V_{load} = 10.019 V$$

$$\rightarrow \text{Line Regulation} = \frac{10.171 - 10.019}{17 - 13} \times 100 = 3,85 \rightarrow \frac{\Delta_{in}}{\Delta_{out}} \approx 26$$

Load Regulation

When the amount of current through a load changes due to a varying load resistance, the voltage regulator must maintain a nearly constant voltage across the load.

Load Regulation: percentage of change in output voltage for a given change in the load current.

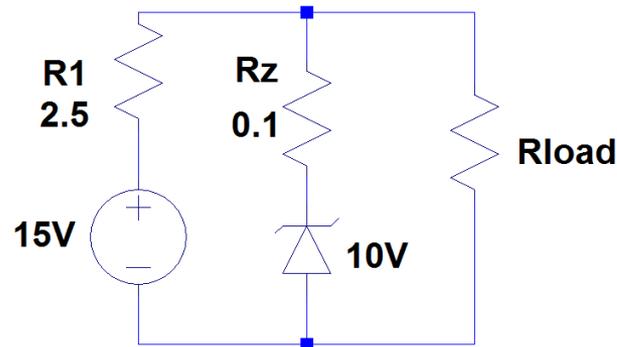
$$\text{Load Regulation} = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100\%$$

V_{NL} = load voltage with no load current

V_{FL} = load voltage with full load current

Example:

In the circuit below calculate the load regulation considering R_{load} varying between no load and 10Ω .



■ If $R_{load} = \infty$

$$I_{total} = \frac{15 - 10}{2.6} = 1.925A$$

$$V_{load} = 15 - 2.5 \times 1.925 = 10.19V$$

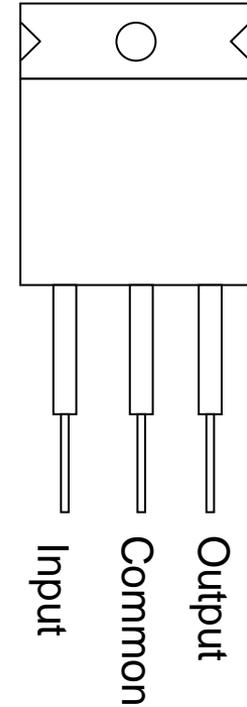
■ If $R_{load} = 10\Omega$

$$I_s + I_z + I_{load} = 0 \rightarrow \frac{V_{load} - 15}{2.5} + \frac{V_{load} - 10}{0.1} + \frac{V_{load}}{10} = 0 \rightarrow V_{load} = 10.10V$$

$$\rightarrow \text{Load Regulation} = \frac{10.19 - 10.10}{10.10} \times 100 = 0.89\%$$

IC Voltage Regulator

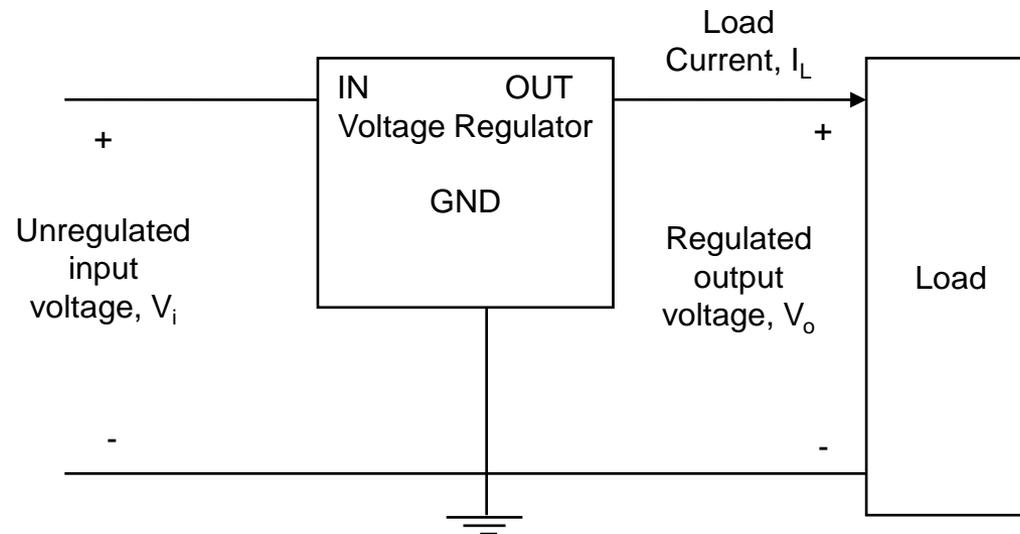
- Voltage regulator ICs are widely used in electronics appliances.
- It consists of circuitry with reference source, control device, and overload protection in a single IC package.
- The output of a voltage regulator IC can be:
 - Fixed positive voltage
 - Fixed negative voltage
 - Adjustable voltage



**Three-terminal
IC voltage regulator**

Three Terminal Voltage Regulators

- A typical block diagram of three terminal voltage regulator is shown below.
- An unregulated DC input voltage is applied to the input terminal (IN), a regulated output DC voltage is obtained at the output terminal (OUT), and the third terminal (GND) is connected to the system ground.

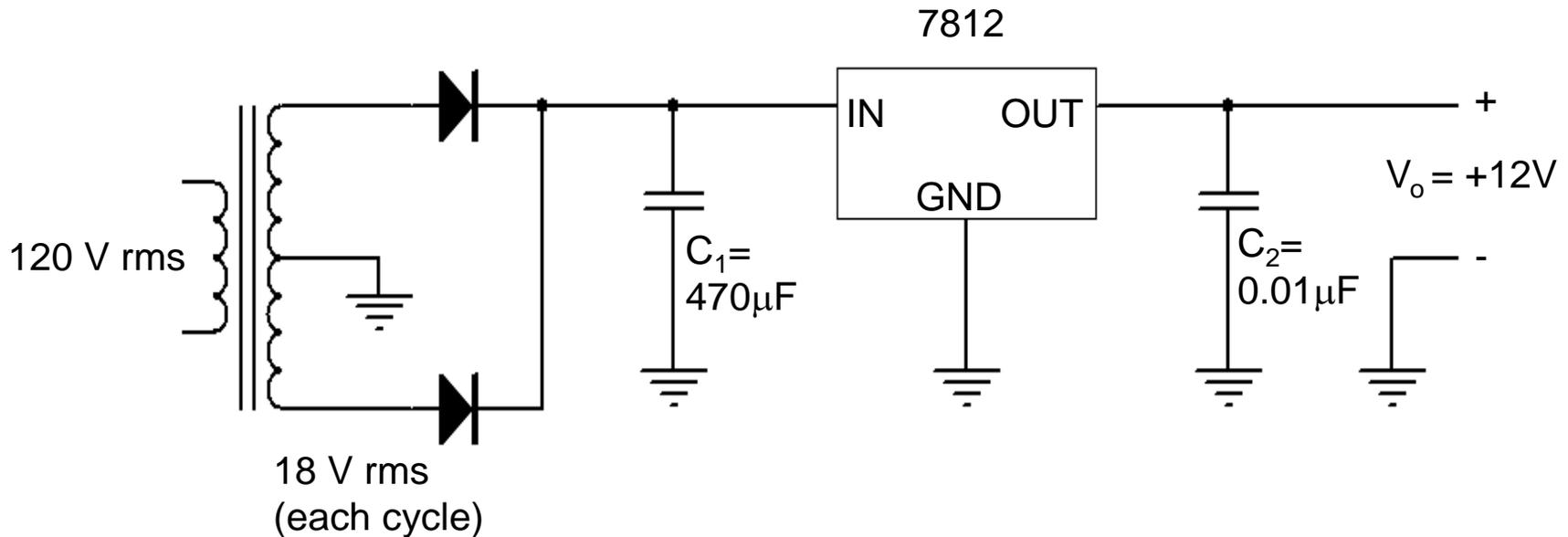


Positive Voltage Regulators

- Table below shows a list of positive voltage regulator ICs available in the market (**78 series**).
- The regulator IC will maintain the rated output voltage as long as the input voltage is greater than a minimum input value (~2-3 V).

IC Part	Output Voltage (V)	Minimum V_i (V)
7805	+5	7.3
7806	+6	8.3
7808	+8	10.5
7810	+10	12.5
7812	+12	14.6
7815	+15	17.7
7818	+18	21.0
7824	+24	27.1

Example: +12V Power Supply



- This diagram shows a simple +12 V power supply by using a step-down transformer and a 7812 voltage regulator.
- The AC line voltage with 120 V rms is stepped down to 18 Vrms across each half by the center tapped transformer.
- A full wave rectifier and a capacitor filter provides an unregulated DC voltage of about 22 V with a ripple of few volts.
- In the final stage, the 7812 provides an output which is regulated at 12 V dc.

Fixed Negative Voltage Regulation

- The **79 series** ICs provide fixed negative regulated voltages ranging from -5 V to -24 V .
- The regulator IC will maintain the rated output voltage as long as the input voltage is less than a minimum input value (more negative).

IC Part	Output Voltage (V)	Minimum V_i (V)
7905	-5	-7.3
7906	-6	-8.3
7908	-8	-10.5
7909	-9	-11.5
7912	-12	-14.6
7915	-15	-17.7
7918	-18	-20.8
7924	-24	-27.1

Roteiro de Projeto

Fonte de alimentação com retificador e filtro capacitivo

1

Dados Necessários

2

Cálculo do Fator de Ondulação (r)

3

Cálculo de wCR_L

4

Cálculo de R_S/R_L

5

Cálculo de C

Roteiro de Projeto

Fonte de alimentação com retificador e filtro capacitivo

- 6 Corrente Média por Diodo
- 7 Corrente Eficaz por Diodo
- 8 Corrente de Pico Repetitivo por Diodo
- 9 Corrente de Surto Inicial por Diodo
- 10 Máxima Tensão Reversa por Diodo

Roteiro de Projeto

Fonte de alimentação com retificador e filtro capacitivo

11

Dimensionamento dos Transformadores

11a

Tensão eficaz de Secundário em Vazio ($V_{ef(sec)}$)

11b

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

11c

Capacidade de Potência do Trafo

11d

Fator de Regulação do Trafo

12

Dimensionamento do Fusível de Proteção de Primário

1

Dados Necessários

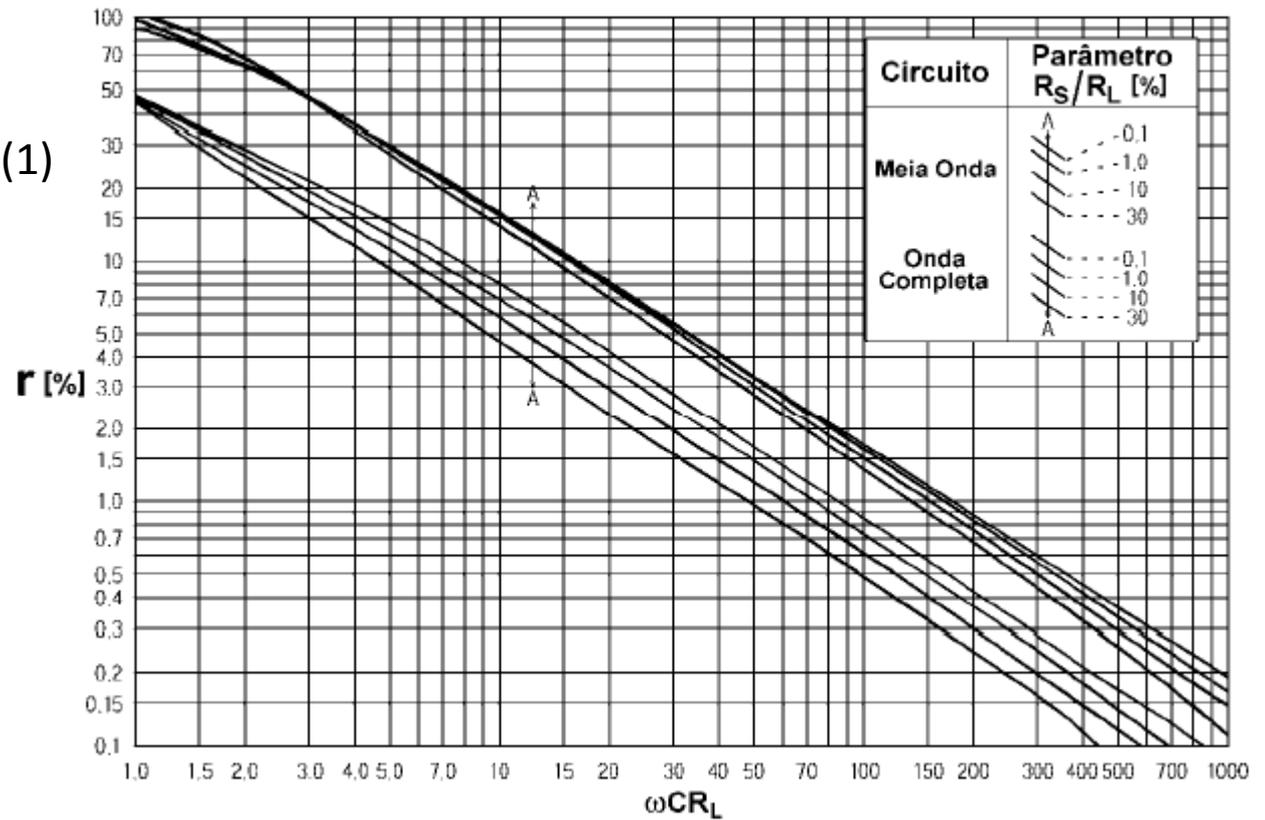
Tensão contínua média de saída com carga máxima: $V_{o(DC)}$

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: $I_o = V_{o(DC)} / R_L$

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



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

$$V_{r(ef)} = \frac{1/2 V_{R(pp)}}{\sqrt{3}} \quad (\text{dente de serra})$$

$$\rightarrow r = \frac{100 \times V_{R(pk-pk)}}{2\sqrt{3} \times V_{o(DC)}}$$

Pelo fato da forma de onda da ondulação não ser bem definida, pois tem uma região senoidal e exponencial (\approx triangular), o **fator de ondulação (r)** é dado por:

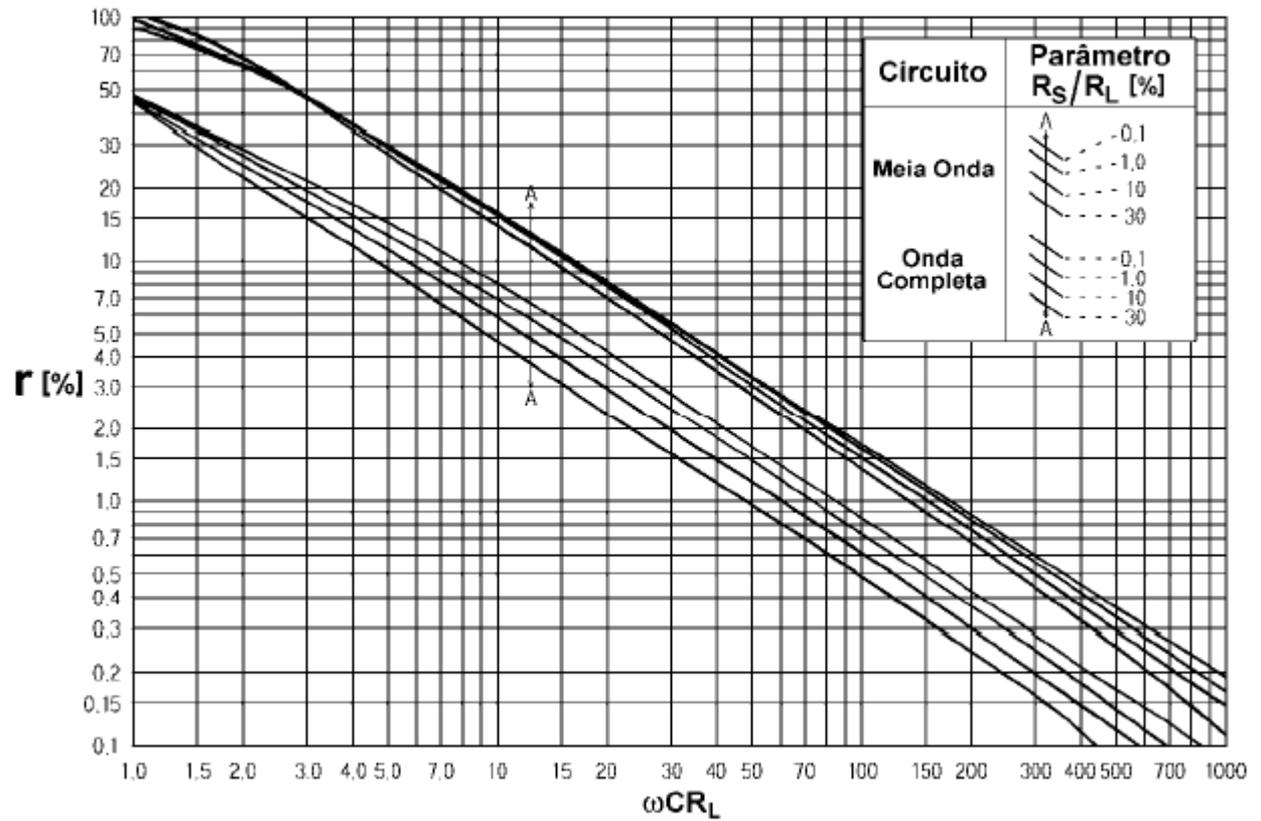
$$\frac{100 \times V_{r(pk-pk)}}{2\sqrt{3} \times V_{o(DC)}} \leq r \leq \frac{100 \times V_{r(pk-pk)}}{2\sqrt{2} \times V_{o(DC)}} \quad [\%] \quad (2)$$

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

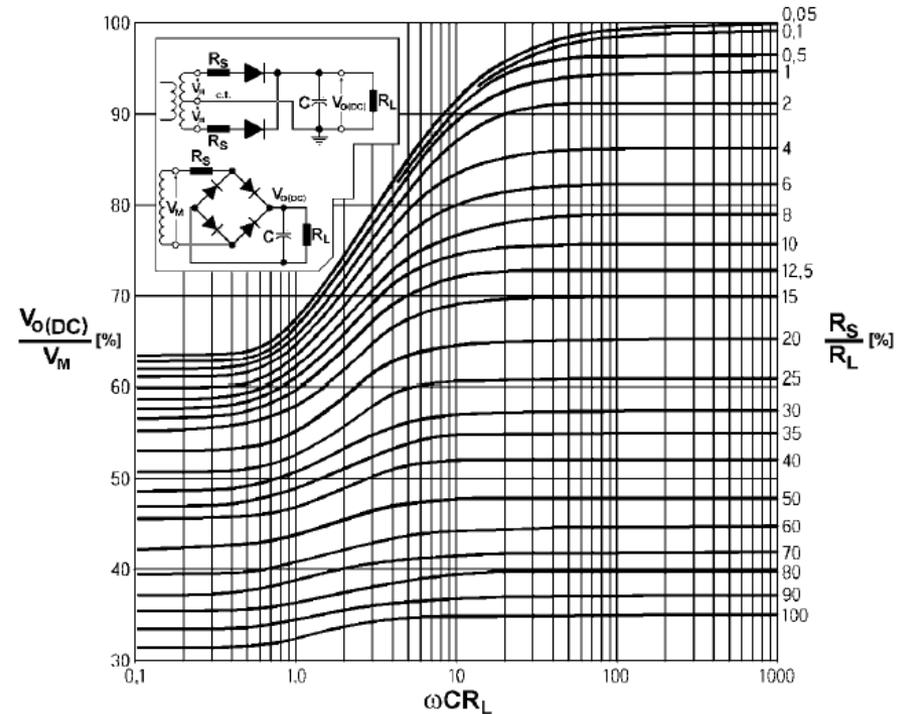
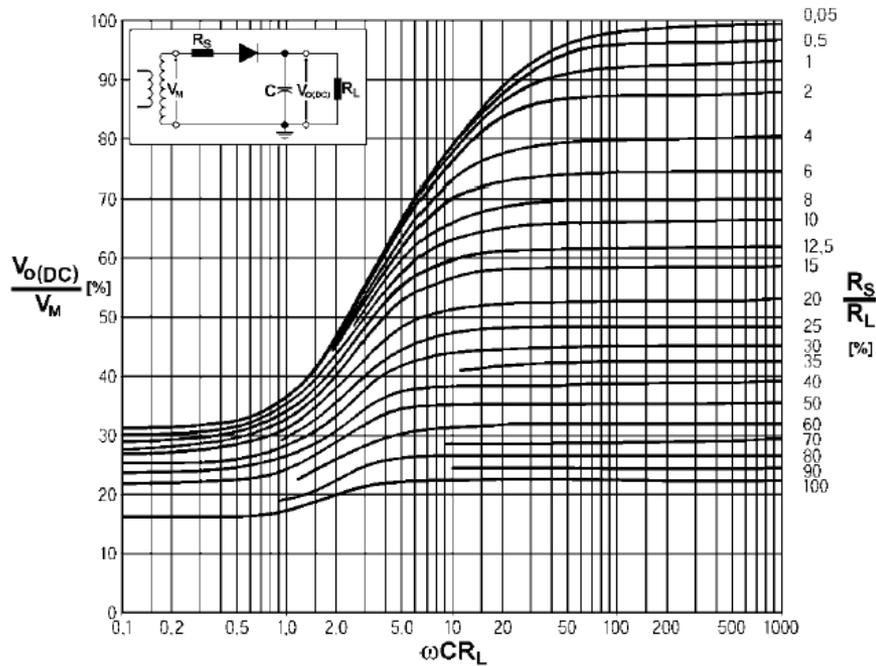
$$r \approx \frac{100 \times V_{r(pk-pk)}}{2\sqrt{2} \times V_{o(DC)}} \quad [\%] \quad (3)$$

Em função do valor obtido pela Equação 3, usando-se o gráfico abaixo, obtém-se o valor de $[wCR_L]$ necessário para o fator de ondulação desejado.

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



Usando-se o valor de $V_{o(DC)}/V_M$ desejado, o valor de $[\omega CR_L]$ calculado anteriormente, e um dos gráficos abaixo, estabelece-se a faixa de R_S/R_L possível para o projeto. Como R_L é conhecida, calcula-se R_S .



5

Cálculo de C

Usando-se o valor de $[\omega CR_L]$ calculado anteriormente, pode-se calcular:

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

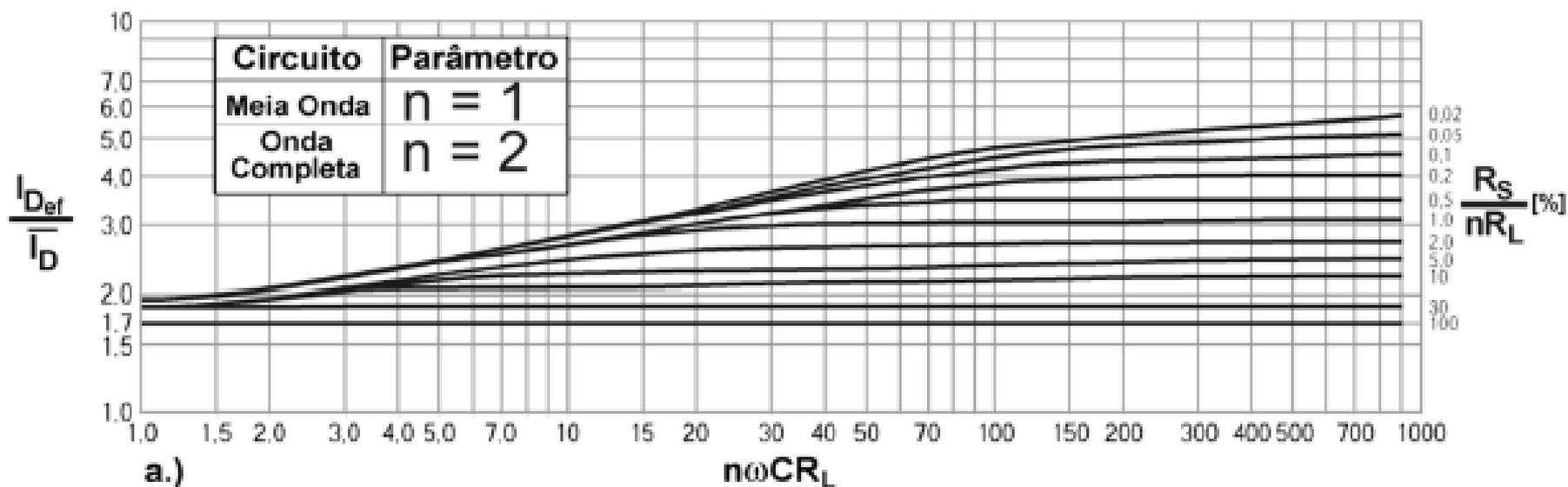
6

Corrente Média por Diodo

Meia - Onda: $\overline{I_D} = I_o$

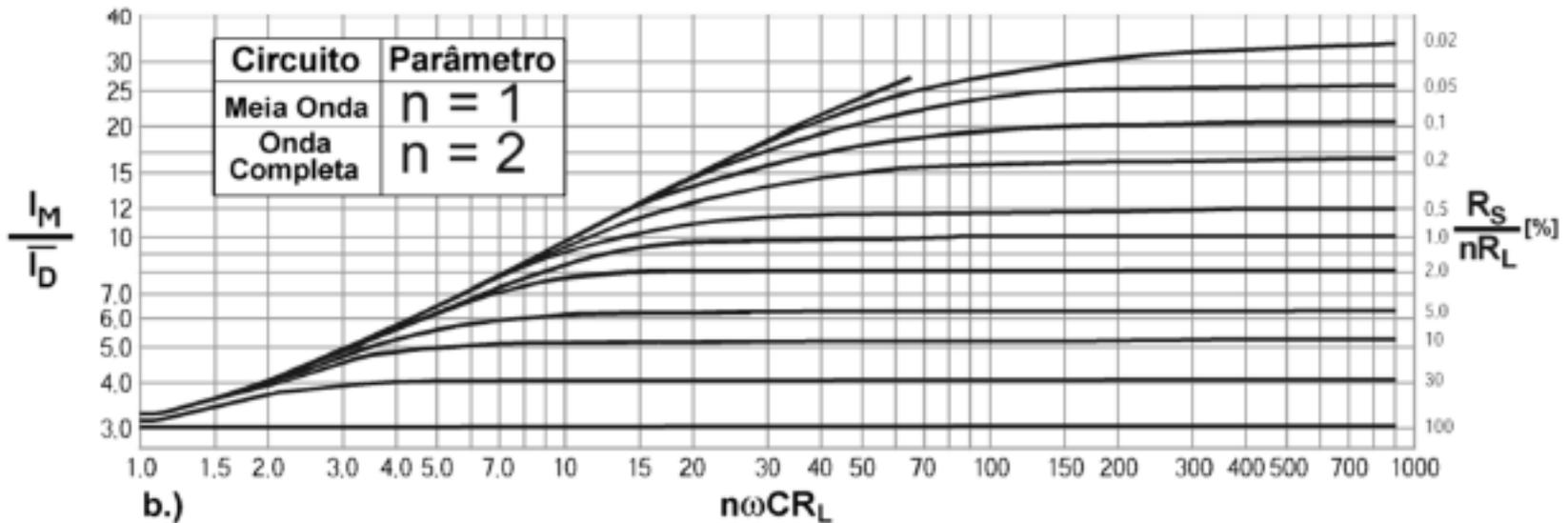
Onda Completa: $\overline{I_D} = I_o / 2$

A **corrente eficaz** (I_{Def}) por diodo do retificador deve ser calculada pelo gráfico abaixo, lembrando-se que $n = 1$ para retificadores de meia-onda e $n = 2$ para retificadores de onda-completa.



Corrente de Pico Repetitivo por Diodo

A **corrente de pico repetitivo (I_M)** por diodo do retificador deve ser calculada pelo gráfico abaixo: lembrando-se que $n = 1$ para retificadores de meia-onda e $n = 2$ para retificadores de onda-completa.



9

Corrente de Surto Inicial por Diodo

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

$$I_{\text{surto}} = V_M / R_S$$

$$I_{\text{surto}} < I_{FSM}$$

10

Máxima Tensão Reversa por Diodo

Meia-Onda e Onda Completa com Dois Diodos e Tomada Central: cada diodo está sujeito a uma tensão reversa máxima de $2V_M$.

Onda Completa em Ponte: cada diodo está sujeito a uma tensão reversa máxima de V_M .

11

Dimensionamento dos Transformadores

11a

Tensão eficaz de Secundário em Vazio ($V_{ef(sec)}$)

No dimensionamento dessa tensão as perdas em série por diodo devem ser levadas em conta.

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

$$0,9 \text{ V} \leq V_\gamma \leq 1,1 \text{ V}$$

V_γ é a perda em série por diodo de junção e n é o número de diodos em série sendo $n = 1$ para meia-onda e onda completa com dois diodos e $n = 2$ para ponte.

Corrente Eficaz no Secundário do Trafo ($I_{ef(sec)}$)**Meia-Onda:**

$$I_{ef(sec)} = I_{Def}$$

Onda Completa com Dois Diodos:

$$I_{CT} = \sqrt{2} I_{Def}$$

Onda Completa com Ponte:

$$I_{ef(sec)} = \sqrt{2} I_{Def}$$

11c

Capacidade de Potência do Trafo

A potência nominal de um transformador é calculada por:

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

Meia-Onda e Onda Completa:

$$P = V_{ef(sec)} \times I_{ef(sec)} \quad [\text{VA}]$$

Onda Completa com Dois Diodos:

$$P = V_{ef(sec)} \times I_{CT} \quad [\text{VA}]$$

11d

Fator de Regulação do Trafo

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

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

A relação de espiras do trafo é calculada por:

$$\frac{N_1}{N_2} \cong \frac{V_{prim}}{V_{sec}}$$

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

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