



Centro Virtual de Pesquisas em Qualidade da Energia Elétrica



Laboratório de Eletrônica de Potência

<http://www.dee.feis.unesp.br/docentes/dee/canesin.php>

Prof. Dr. Carlos Alberto Canesin

E-mail: canesin@dee.feis.unesp.br

Mini-Curso COBEP 2007

Qualidade da Energia e Correção Ativa do Fator de Potência de Fontes de Alimentação

Ilha Solteira(SP), Setembro/Outubro de 2007.

Sumário

- Introdução Geral: Motivação Estudo QEE

CAP 1. Fator de Potência e Distorção Harmônica

CAP 2. Normas para FP e Distorção Harmônica

CAP 3. Efeitos das Harmônicas no Sistema Elétrico

**CAP 4. Correção da Distorção Harmônica de Corrente
com dispositivos de Eletrônica de Potência**

CAP 5. Considerações Finais



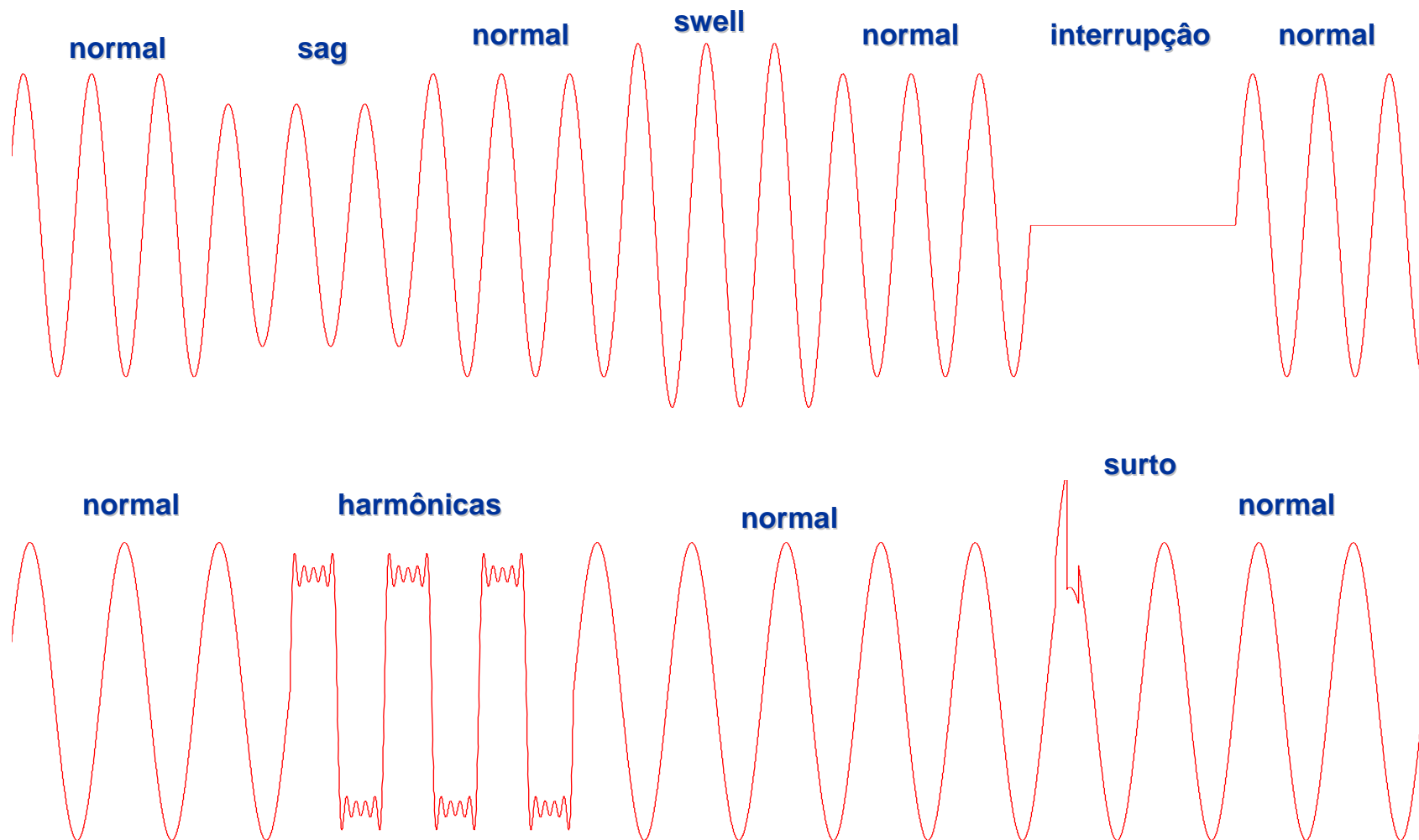
Introdução Geral

Motivação para Estudos de QEE

Qualidade da Energia Elétrica

- Qualidade do Produto !**
- Qualidade do Serviço !**
- Qualidade do Atendimento !**

Qualidade do Produto = Conformidade da Tensão



Uma definição abrangente para QEE

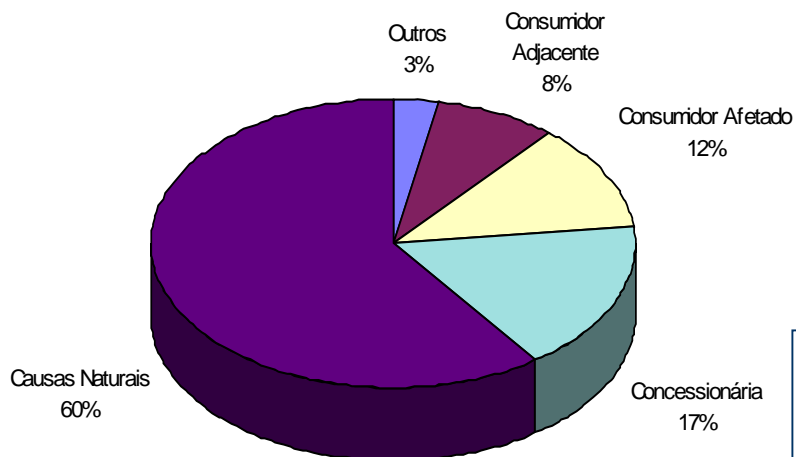
A QEE deve ser a perfeita combinação entre características quase ideais do produto eletricidade (**qualidade do produto / conformidade**);

com um sistema físico de fornecimento adequado (**qualidade do serviço / continuidade**);

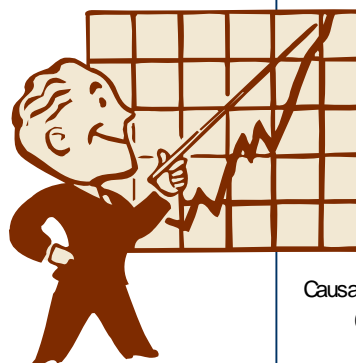
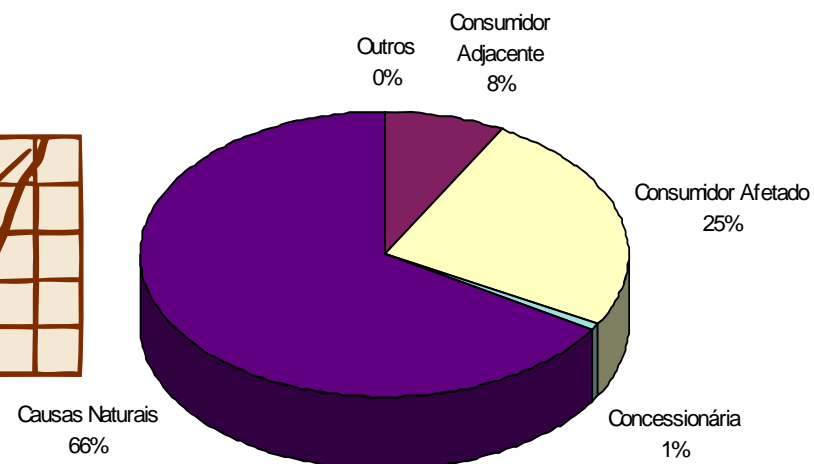
e agilidade operacional para satisfazer as expectativas do cliente (**qualidade do atendimento**).

Pontos de Vista para os Problemas de Qualidade

Ponto de Vista do Consumidor



Ponto de Vista do Concessionário



SGQ: Sistema de Gestão da Qualidade



● Processos da Engenharia de Requisitos

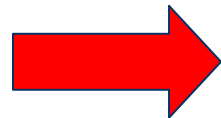
● Processos do Sistema de Gestão da Qualidade (requisitos)

Motivação para a Pesquisa e Desenvolvimento

As Maiores Exigências Impostas pelos Consumidores são Devido a Implicações de Ordem Econômica.

Perdas econômicas nos EUA, relacionadas a fenômenos de QEE atingem montantes entre US\$ 15 e 24 bilhões anuais, conforme relatório do EPRI de julho/01.

QEE



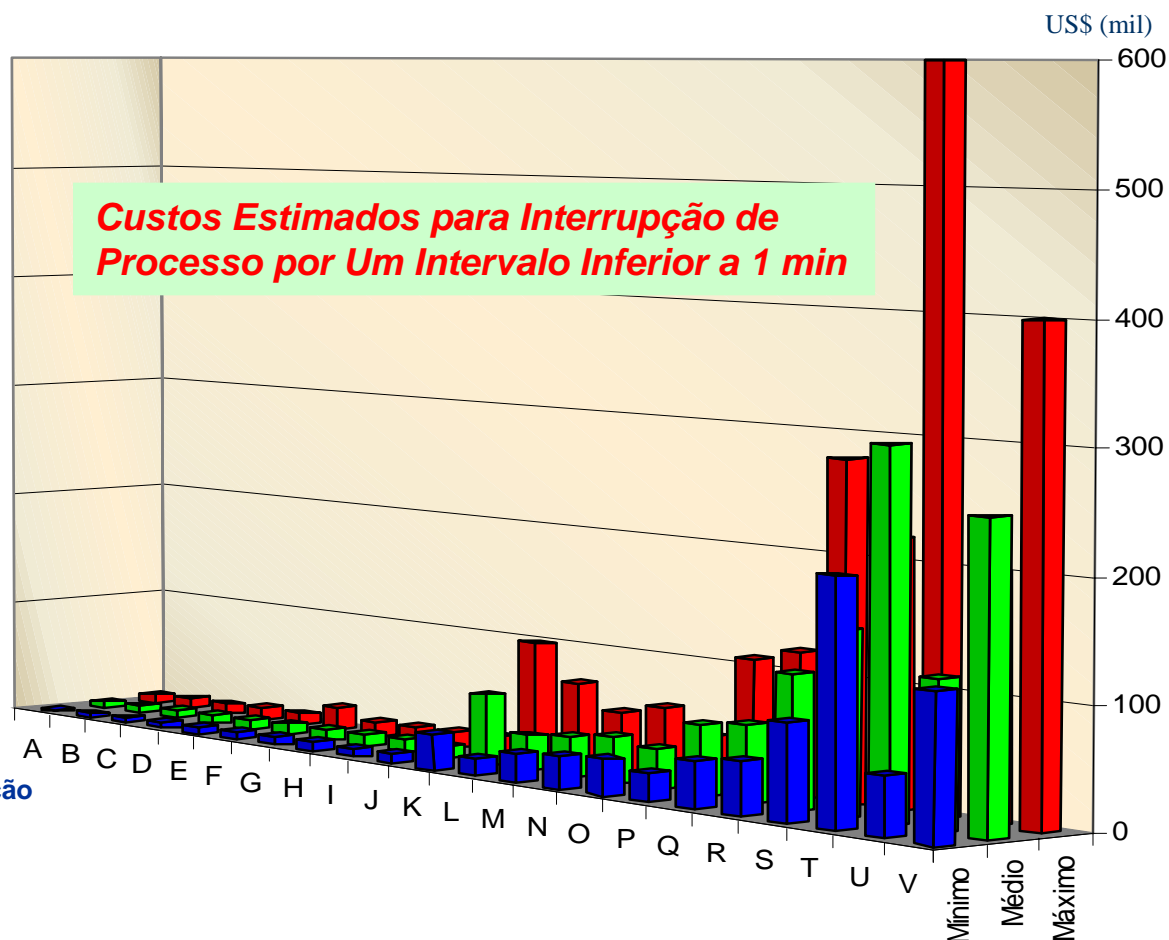
- ✓ Imagem Empresarial ;
- ✓ Prejuízos Financeiros;
- ✓ Competitividade;
- ✓ Desenvolvimento Regional.

- ✓ Concessionário – Oferecer Contratos de Fornecimento que Garantam a **QEE**
- ✓ Conquistar o Consumidor Livre – Torná-lo Cativo

Motivação para a Pesquisa e Desenvolvimento

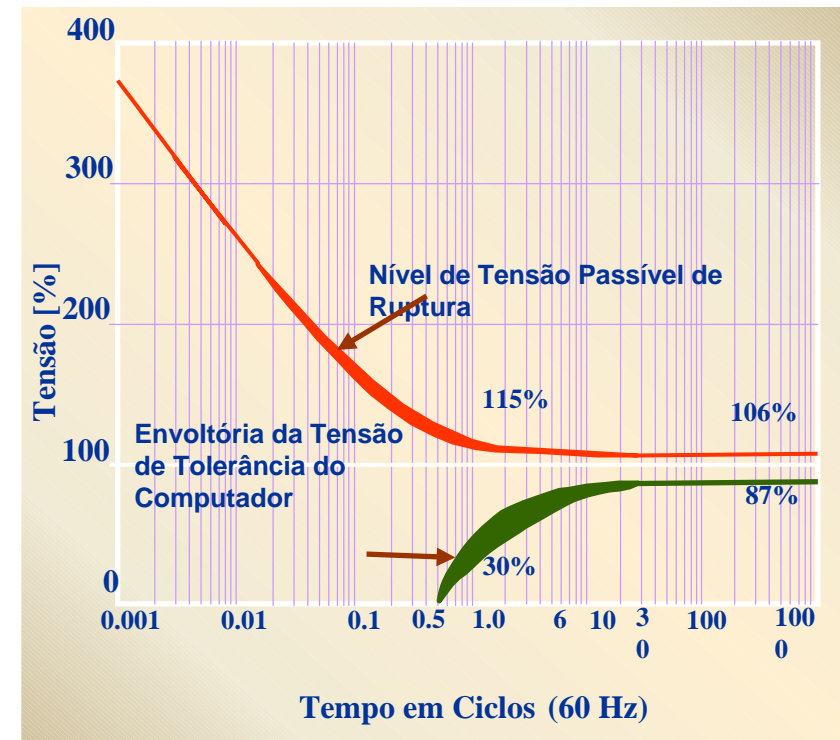
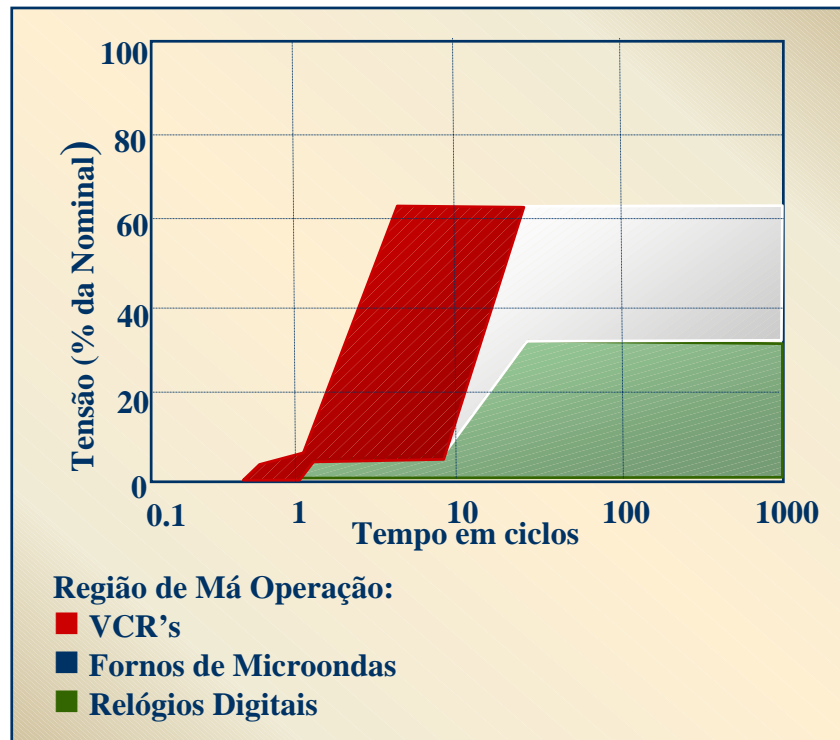
Custos Estimados para Interrupção de Determinado Processo - US\$(mil).

- A - Saúde
- B - Gás
- C - Papel
- D - Órgãos Públicos
- E - Transportadoras
- F - Comércio Atacadista
- G - Madeireiras
- H - Químicas
- I - Plásticos/Borrachas
- J - Extração de Petróleo
- K - Produtos Alimentícios
- L - Computadores
- M - Engenharia
- N - Equip. de Transporte
- O - Órgãos de Financiamento
- P - Centros de Negócios
- Q - Mineração
- R - Equipamentos Eletrônicos
- S - Equipamentos de Instrumentação
- T - Refinarias de Petróleo
- U - Siderúrgicas
- V - Têxtil



Sensibilidade de Equipamentos Eletroeletrônicos

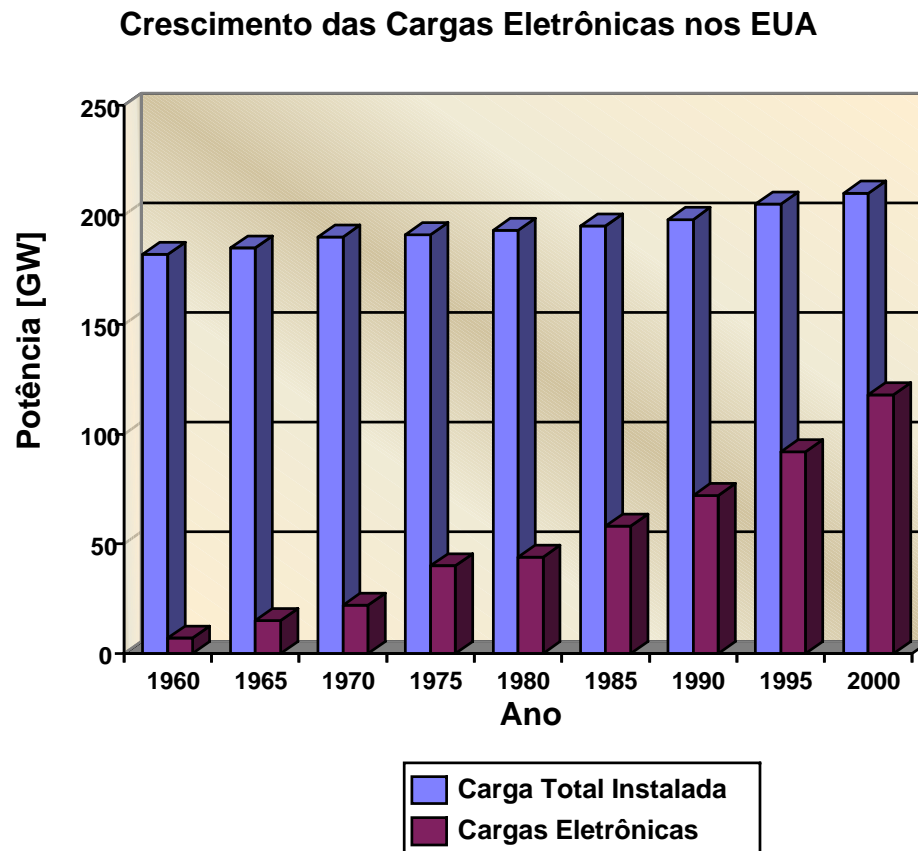
👉 Análise de Defeitos em Equip. Eletroeletrônicos, em Função de Distúrbios no Sistema de Distribuição



✓ Subsidiar Ações para Ressarcimento de Perdas e Danos Causados Aos Consumidores

Motivação para a Pesquisa e Desenvolvimento

A Crescente Aplicação de Equipamentos que Utilizam Eletrônica de Potência



- ✓ Correção do Fator de Potência;
- ✓ Modelagem de Cargas Não Lineares;
- ✓ Estudos de Penetração Harmônica;
- ✓ Planejamento da Expansão;
- ✓ Planejamento da Operação;
- ✓ Representação da Rede Elétrica;
- ✓ Perdas Técnicas;
- ✓ Proteção;
- ✓ Medição;

Modelagem de Cargas e Análise de Distorções

Modelagem e Previsão de Distorções Harmônicas de Tensão, Provocadas por Cargas Não Lineares

The image displays the QUALI 1.00 software interface, which is used for modeling and predicting harmonic distortions in power systems. The interface is divided into several main sections:

- Composição de Rede (Network Composition):** This section allows for the configuration of the network parameters, including the primary and secondary voltage levels, the base power (MVA), and the identification of the primary and secondary buses.
- Formação da Rede Primária (Primary Network Formation):** This section is used to define the primary network structure, including the number of primary buses (BP), the number of primary feeders (NP), and the number of primary loads (LP).
- Formação da Rede Secundária (Secondary Network Formation):** This section is used to define the secondary network structure, including the number of secondary buses (BS), the number of secondary feeders (NS), and the number of secondary loads (LS).
- Simulação de Rede (Network Simulation):** This section is used to run the simulation, including the configuration of the simulation parameters, the selection of the simulation method, and the execution of the simulation.
- Resultados: Teste - Reduzida (Reduced Test Results):** This section displays the results of the simulation, including the harmonic distortion levels (THD) for the primary and secondary networks, the total harmonic distortion (THD) for the primary and secondary networks, and the individual harmonic distortion levels for each harmonic order.
- Gráficos de Tensão e Corrente (Voltage and Current Graphs):** This section displays the voltage and current waveforms for the primary and secondary networks, showing the harmonic distortion levels and the total harmonic distortion (THD) for the primary and secondary networks.

The interface also includes a sidebar with a tree view of the network structure, a status bar at the bottom, and a help menu.

Motivação para a Pesquisa e Desenvolvimento

O Impacto de Algumas Medidas Errôneas para a Racionalização/Conservação



**Máquinas de
Lavar Roupas**



**Sistemas de
Refrigeração**

Sistemas Eficientes??
Elevada TDH!!



**Substituição Dos
Sistemas de Iluminação
Incandescentes**



**Reatores Eletrônicos
de Baixo FP**



Lâmpadas Compactas

Comparação entre Lâmpadas



[W]	[lm]	[lm/W]	[h]
150	2400	16,0	750

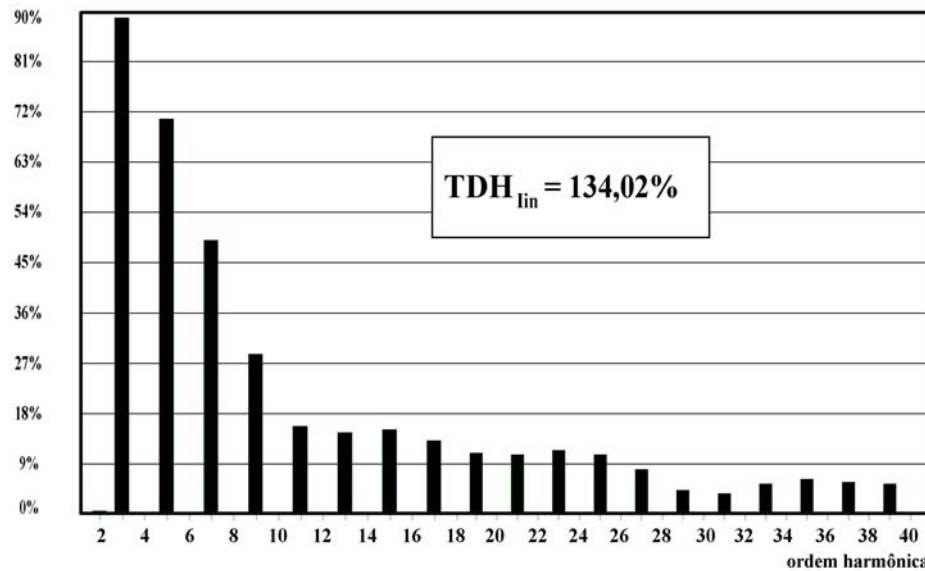
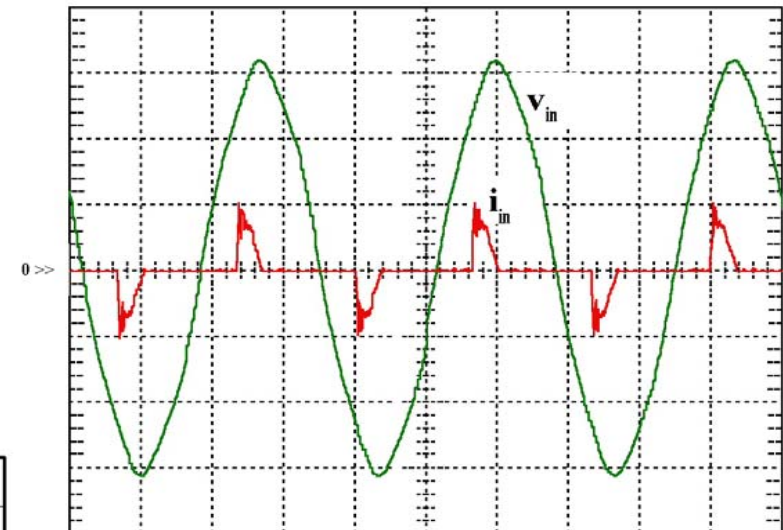
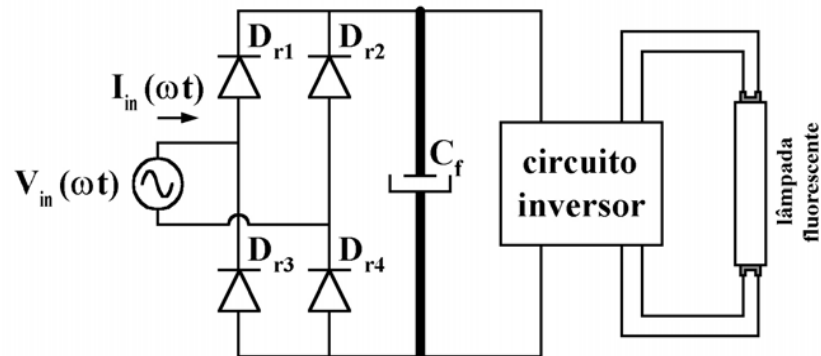
5% Energia Elétrica → Luz Visível



[W]	[lm]	[lm/W]	[h]
40	2600	65,0	7500

21% Energia Elétrica → Luz Visível

Reator Eletrônico Convencional (inclusive compactas)



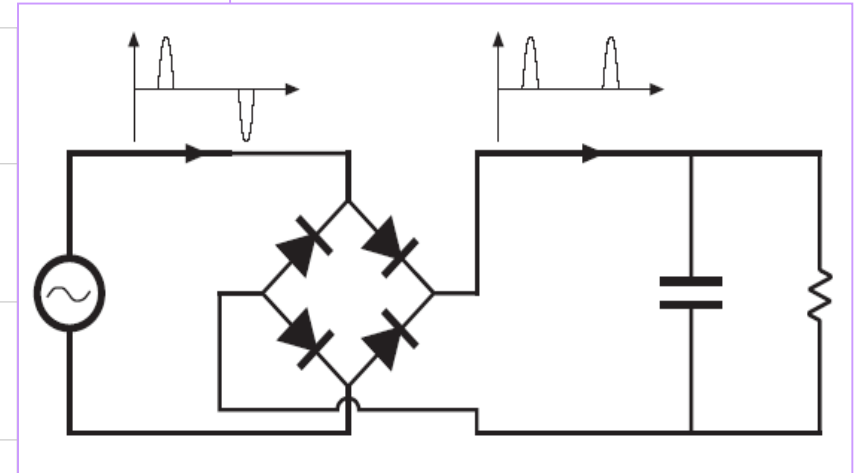
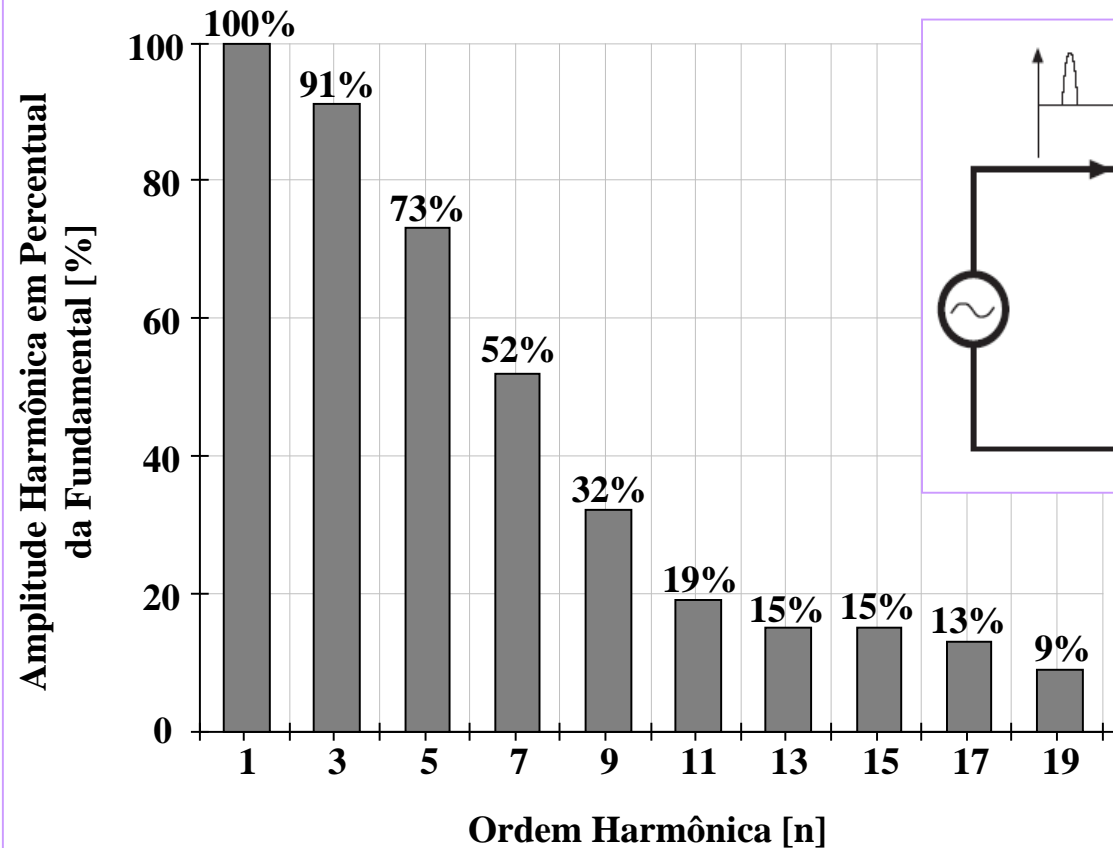
$$\phi \approx 25^\circ$$

$$\text{DHT} \approx 134\%$$



$$\text{FP} \approx 0,54$$

Exemplo - Retificador Monofásico com Filtro Capacitivo



DHT = 136%
Fator de Distorção = 59%

Espectro Harmônico Típico para a Corrente de Entrada

Processamento Eletrônico da Energia

- **Distorções Harmônicas nas Correntes** (Rede de CA)
- Reduzido Fator de Potência
- Distorções nas Tensões da Rede de CA (PCC)
- Deslocamentos entre Tensões e Correntes



CONSEQÜÊNCIAS

- Interferências Eletromagnéticas (EMI/RFI)
- Aumento das Perdas em Condutores
- **Redução do Rendimento**
- Conseqüente Redução da Potência Útil
- Necessidade de Aumento na Geração (Potência (VA))

CAPÍTULO 1

Fator de Potência e Distorção Harmônica

CAPÍTULO 1

1.1 – Potência Média (ativa) em termos de Séries de Fourier

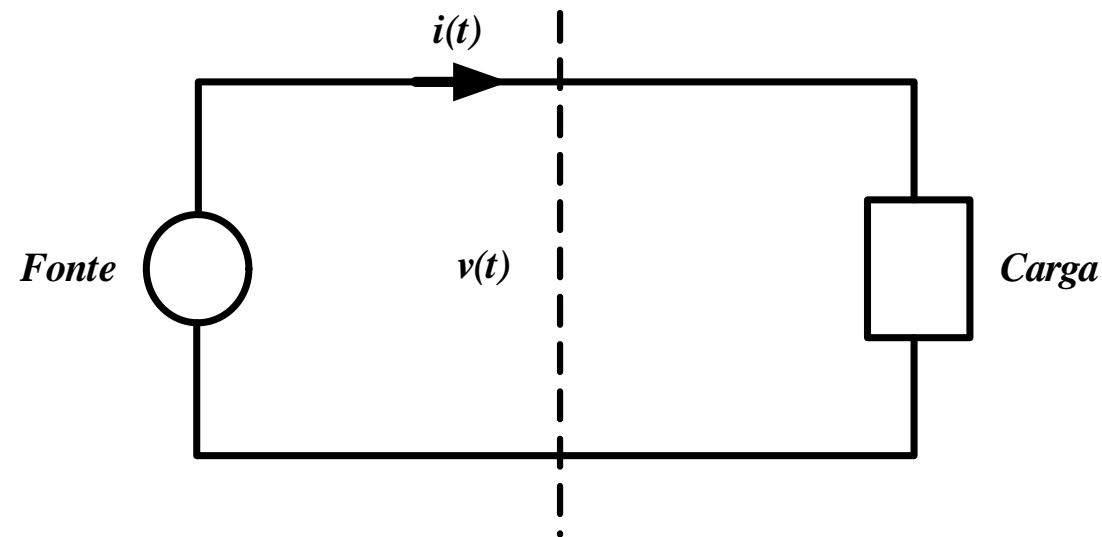
1.2 – Valor Eficaz de uma Forma de Onda

**1.3 – Definição do Fator de Potência;
Distorção Harmônica Total (DHT);
Fatores de Distorção e de Deslocamento.**

1.4 – Fasores de Potência em Sistemas Senoidais

1.5 – Harmônicas de Corrente em Sistemas Trifásicos

1.1 - Potência Média (Ativa)



Tensão e Corrente como séries de Fourier relacionadas com a Transmissão de Energia no Sistema:

$$v(t) = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cdot \cos(n \cdot \omega \cdot t - \varphi_n)$$

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cdot \cos(n \cdot \omega \cdot t - \theta_n)$$

Energia Transmitida para a Carga, num Período

$$W_{\text{ciclo}} = \int_0^T v(t) \cdot i(t) \cdot dt$$

Esta energia resulta na Potência Média (P):

$$P = \frac{W_{\text{ciclo}}}{T} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \cdot i(t) \cdot dt$$

Analisaremos a influência dos harmônicos na Potência, substituindo as expressões de tensão e corrente instantâneas em séries de Fourier:

$$P = \frac{W_{\text{ciclo}}}{T}$$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \left(V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cdot \cos(n \cdot \omega \cdot t - \varphi_n) \right) \cdot \left(I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cdot \cos(n \cdot \omega \cdot t - \theta_n) \right) \cdot dt$$

Evolução da Integral para P

Ortogonalidade das harmônicas: Integrais dos produtos cruzados são nulos

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{T} \int_0^T \left(V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cdot \cos(n \cdot \omega \cdot t - \varphi_n) \right) \cdot \left(I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cdot \cos(n \cdot \omega \cdot t - \theta_n) \right) \cdot dt \\ &= \begin{cases} 0 & \text{se } n \neq m \\ \frac{V_n I_n}{2} \cos(\varphi_n - \theta_n) & \text{se } n = m \end{cases} \end{aligned}$$

Portanto, a expressão para P (Potência Média) resulta em:

$$P = V_0 I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_n I_n}{2} \cdot \cos(\varphi_n - \theta_n)$$

Desta forma, a energia é transmitida para a carga somente se as séries de Fourier de v(t) e i(t) contêm termos de MESMA frequência.

Por exemplo, se a tensão e a corrente possuem termos de terceira harmônica, então estes termos resultarão em potência média:

$$P = \frac{V_3 I_3}{2} \cdot \cos(\varphi_3 - \theta_3)$$

Exemplo 1

Forma de Onda de Tensão:

- somente com a componente fundamental

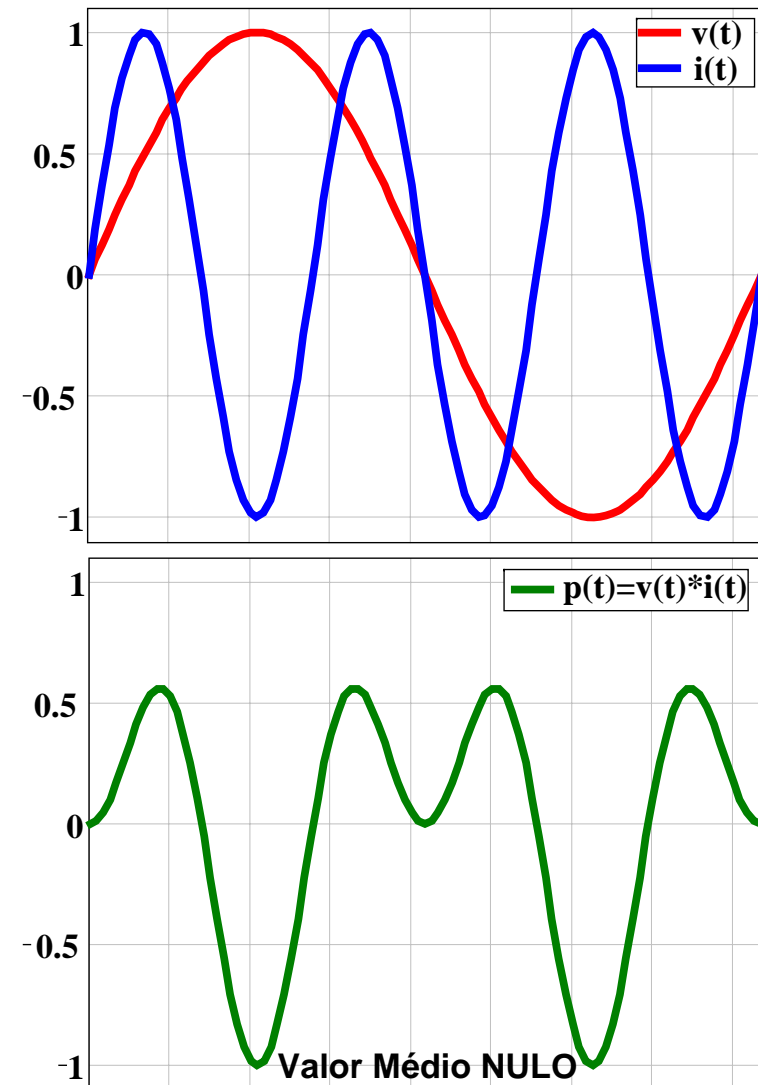
Forma de Onda de Corrente:

- somente com a componente harmônica de 3ª ordem

Potência Instantânea [$p(t)$]

Potência Média [P]

$$P = 0 \text{ (Valor Médio NULO)}$$



Exemplo 2

Forma de Onda de Tensão:

- somente com a componente Harmônica de 3ª ordem.

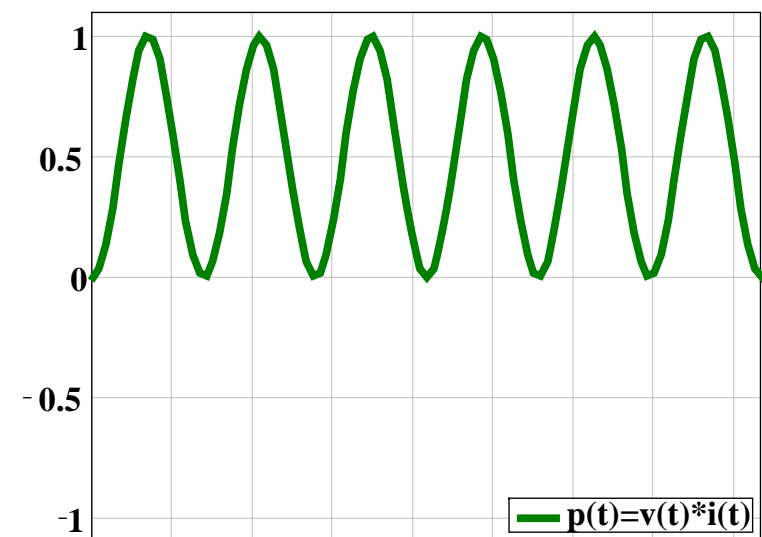
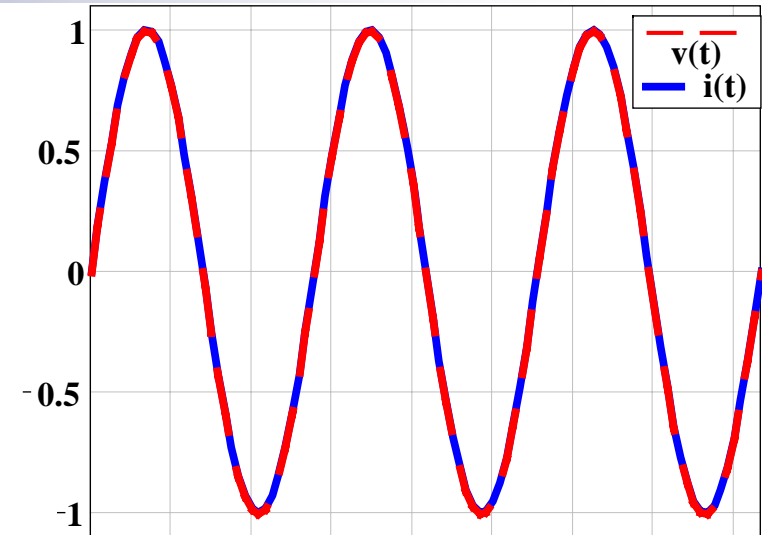
Forma de Onda de Corrente:

- somente com a componente harmônica de 3ª ordem, e, em fase com a tensão.

Potência Instantânea [$p(t)$]

Potência Média [P]

$P = 0,5$ (Valor Médio NÃO nulo)



Exemplo 3 (I)

Observe o exemplo através das séries de Fourier

$$v(t) = 1,2 \cdot \cos(\omega t) + 0,33 \cdot \cos(3 \cdot \omega t) + 0,2 \cdot \cos(5 \cdot \omega t)$$

$$i(t) = 0,6 \cdot \cos(\omega t + 30^\circ) + 0,1 \cdot \cos(5 \cdot \omega t + 45^\circ) + 0,1 \cdot \cos(7 \cdot \omega t + 60^\circ)$$

Cálculo da Potência Média:

$$P = \frac{(1,2) \cdot (0,6)}{2} \cdot \cos(30^\circ) + \frac{(0,2) \cdot (0,1)}{2} \cdot \cos(45^\circ) = 0,32$$

Exemplo 3 (II) – Formas de Onda

Forma de Onda de Tensão:

- **Fundamental, 3ª e 5ª ordens.**

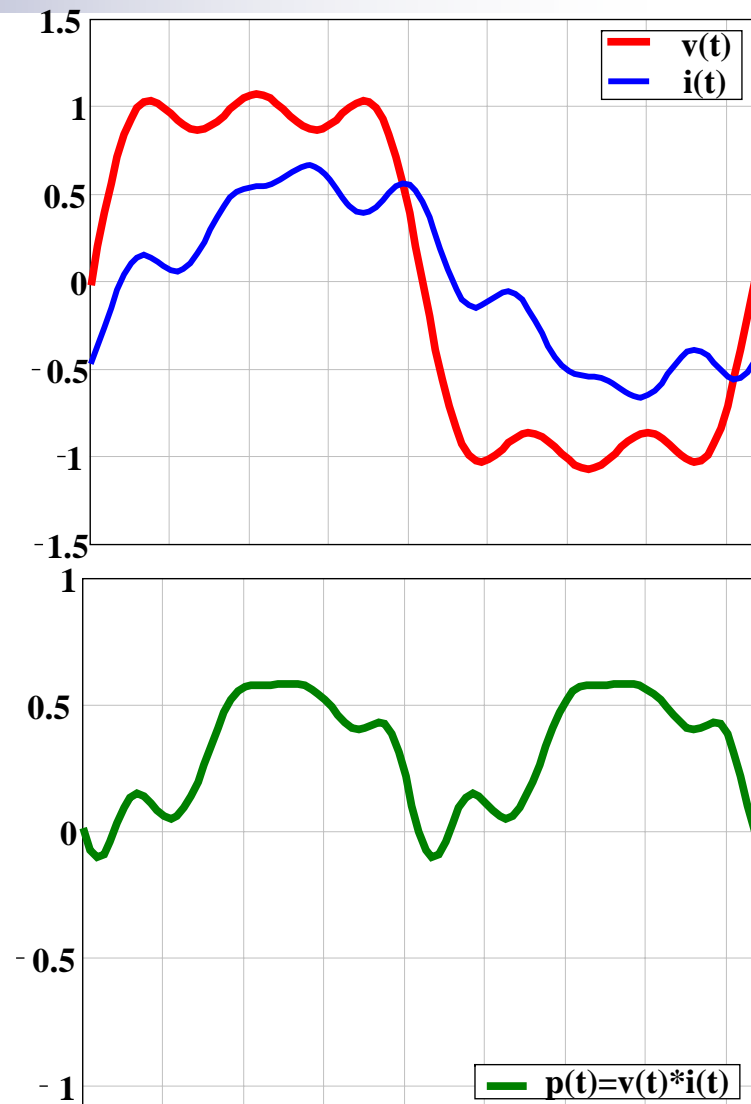
Forma de Onda de Corrente:

- **Fundamental, 5ª e 7ª ordens.**

Energia é transferida devido componentes fundamentais e de quinta ordem harmônica.

Potência Média [P]

P= 0,32 (Valor Médio NÃO nulo)



1.2 Valor Efícaz de uma forma de onda

$$(\text{Valor Efícaz}) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt}$$

Inserindo a expressão de $v(t)$ em termos de série de Fourier, resulta em :

$$(\text{Valor Efícaz}) = \sqrt{V_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_n^2}{2}}$$

- As componentes Harmônicas **AUMENTAM o Valor Efícaz;**
- Harmônicas **NÃO NECESSARIAMENTE** aumentam o Valor Médio;
- Aumento nos Valores Efícazes implica no **AUMENTO DAS PERDAS.**

1.3. Definição do Fator de Potência

Para uma eficiente transmissão de energia da fonte para a carga é desejável **Maximizar a Potência Média**, com a **Minimização dos Valores Eficazes de Tensão e Corrente** (portanto, Minimizando-se as Perdas).

O Fator de Potência (FP) é uma figura de mérito que avalia quanto Eficiente é a Transmissão/Distribuição de Energia. Ele é definido como:

$$\text{Fator de Potência} = \frac{(\text{Potência Média})}{(\text{Tensão Eficaz})(\text{Corrente Eficaz})}$$

O Fator de Potência está sempre entre 0 e 1; sendo a relação entre Potência Ativa (P) e Potência Aparente (S)

1.3.1. Carga Resistiva (Linear) e Tensão Não-Senoidal

Neste caso as harmônicas de corrente estarão em fase e com amplitudes proporcionais às harmônicas de tensão.

Portanto, **todas as harmônicas contribuirão para a energia transmitida à carga**, e, o Fator de Potência será UNITÁRIO.

$$I_n = \frac{V_n}{R}; \quad \theta_n = \varphi_n; \quad \cos(\varphi_n - \theta_n) = 1$$

$$(\text{Tensão Eficaz}) = \sqrt{V_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_n^2}{2}}$$

$$(\text{Corrente Eficaz}) = \sqrt{I_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_n^2}{2}} = \sqrt{\frac{V_0^2}{R^2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_n^2}{2R^2}} = \frac{1}{R} (\text{Tensão Eficaz})$$

$$P = V_0 I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_n I_n}{2} \cos(\varphi_n - \theta_n)$$

1.3.2. Carga Não Linear e Tensão Senoidal

Com Tensão Senoidal, as harmônicas de corrente **não contribuem para a Potência Média.**

Entretanto, correntes harmônicas **aumentam o valor Eficaz da Corrente**, e, portanto, reduzem o Fator de Potência.

$$P = \frac{V_1 I_1}{2} \cos(\varphi_1 - \theta_1)$$

$$(\text{Corrente Eficaz}) = \sqrt{I_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_n^2}{2}}$$

$$(\text{Fator de Potência}) = \left(\frac{\frac{I_1}{\sqrt{2}}}{\sqrt{I_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_n^2}{2}}} \right) (\cos(\varphi_1 - \theta_1))$$

$$(\text{Fator de Potência}) = (\text{Fator de Distorção})(\text{Fator de Deslocamento})$$

Fator de Distorção

Definido Somente para Tensão Senoidal.

$$(\text{Fator de Distorção}) = \left(\frac{\frac{I_1}{\sqrt{2}}}{\sqrt{I_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_n^2}{2}}} \right)$$

$$(\text{Fator de Distorção}) = \frac{(\text{Valor Eficaz da Fundamental da Corrente})}{(\text{Valor Eficaz da Corrente})}$$

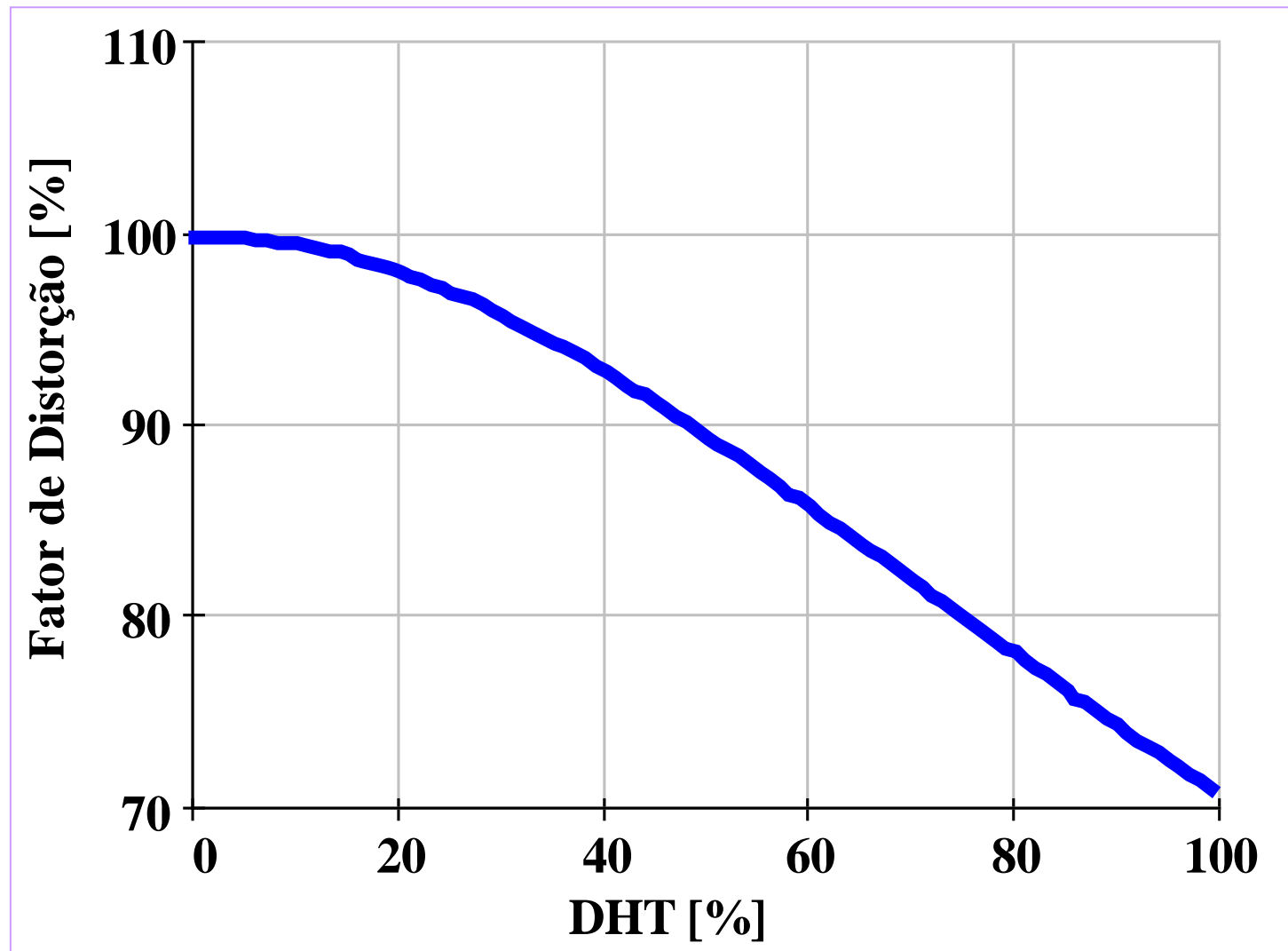
Distorção Harmônica Total (DHT)*:

$$(\text{DHT}) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1}$$

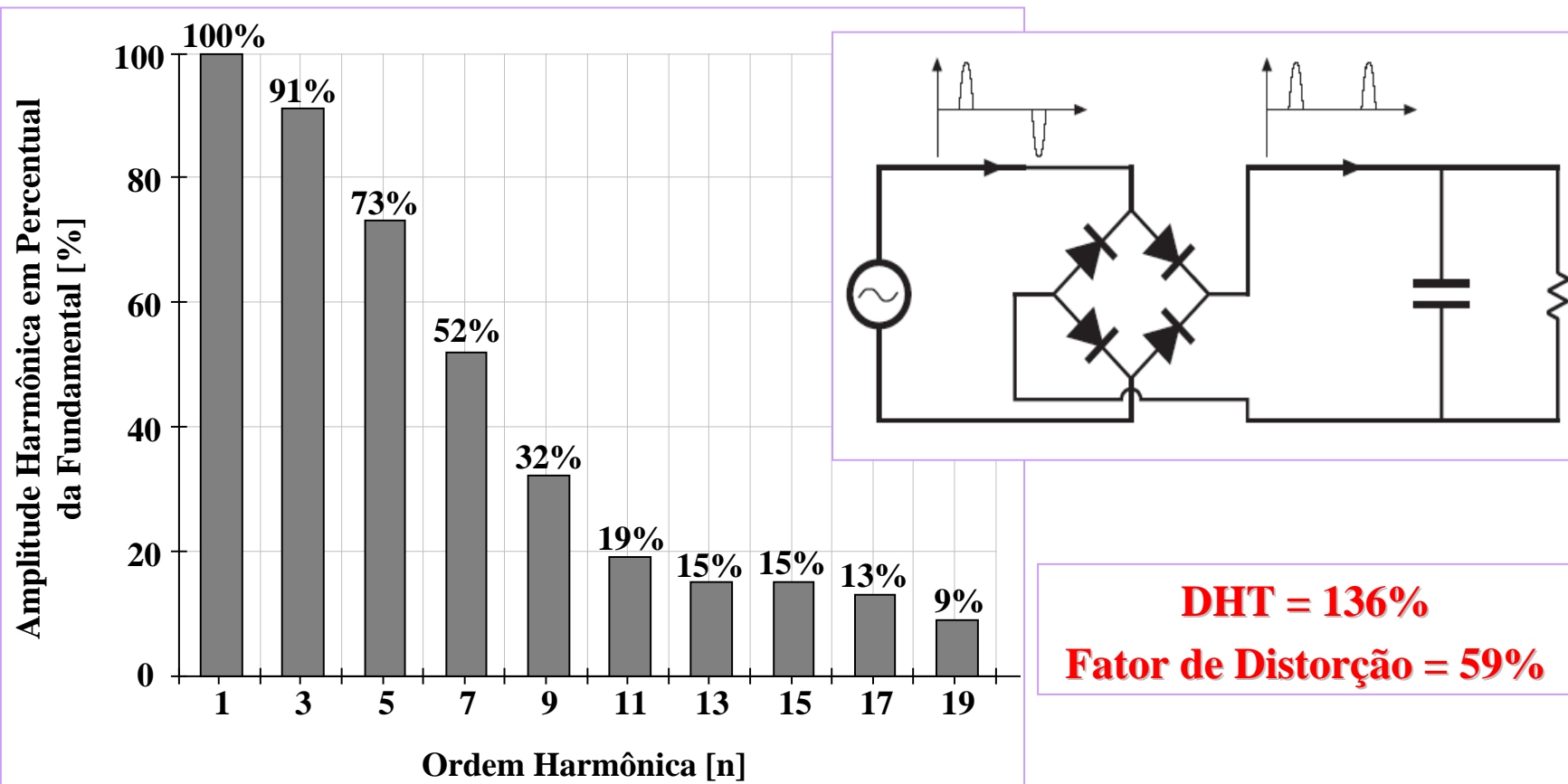
$$(\text{Fator de Distorção}) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\text{DHT})^2}}$$

*** Também definido como TDH**

Fator de Distorção versus DHT



Exemplo - Retificador Monofásico com Filtro Capacitivo



Espectro Harmônico Típico para a Corrente de Entrada

Exemplo: Máxima Potência Ativa Disponível Retificador Monofásico em rede de CA: 127V; 15A

$$P_{\text{disponível}} (\text{Ret. Conv.}) = V_{\text{eficaz}} \cdot \text{Limite Proteção} \cdot \text{Fator Potência} \cdot \text{Rendimento}$$

$$P_{\text{disponível}} (\text{Ret. Conv.}) = (127\text{V}) \cdot (80\% \text{ de } 15\text{A}) \cdot (0,55) \cdot (0,98)$$

$$P_{\text{disponível}} (\text{Ret. Conv.}) = 821,4 \text{ W}$$

$$P_{\text{disponível}} (\text{Ret. CFP}) = V_{\text{eficaz}} \cdot \text{Limite Proteção} \cdot \text{Fator Potência} \cdot \text{Rendimento}$$

$$P_{\text{disponível}} (\text{Ret. CFP}) = (127\text{V}) \cdot (80\% \text{ de } 15\text{A}) \cdot (0,99) \cdot (0,93)$$

$$P_{\text{disponível}} (\text{Ret. CFP}) = 1.403,15 \text{ W (70,8\% A MAIS de Potência Ativa Disponível)}$$

1.4 Fasores de Potência em Sistemas Senoidais

Potência Aparente: *É o produto entre Tensão Eficaz e Corrente Eficaz*

Unidade de Potência Aparente: VA

Muitos elementos do sistema, como os transformadores, são especificados em VA que os mesmos podem suprir.

Da definição, verifica-se que o **FP** é a relação entre as potências ativa e aparente. Para formas de onda senoidais (sem harmônicos), podemos então definir:

P (Potência Real); Q (Potência Reativa) e S (Potência Complexa). Sejam os fasores de V e I, então:

$$S = V \cdot I^* = P + j \cdot Q$$

Onde: I^* = complexo conjugado de I, j = raiz quadrada de -1.

A magnitude de S é a potência aparente (VA). A parte real de S é a potência média P (Watts). A parte imaginária de S é a potência reativa Q (Volt-Amperes reativo, ou VARs).

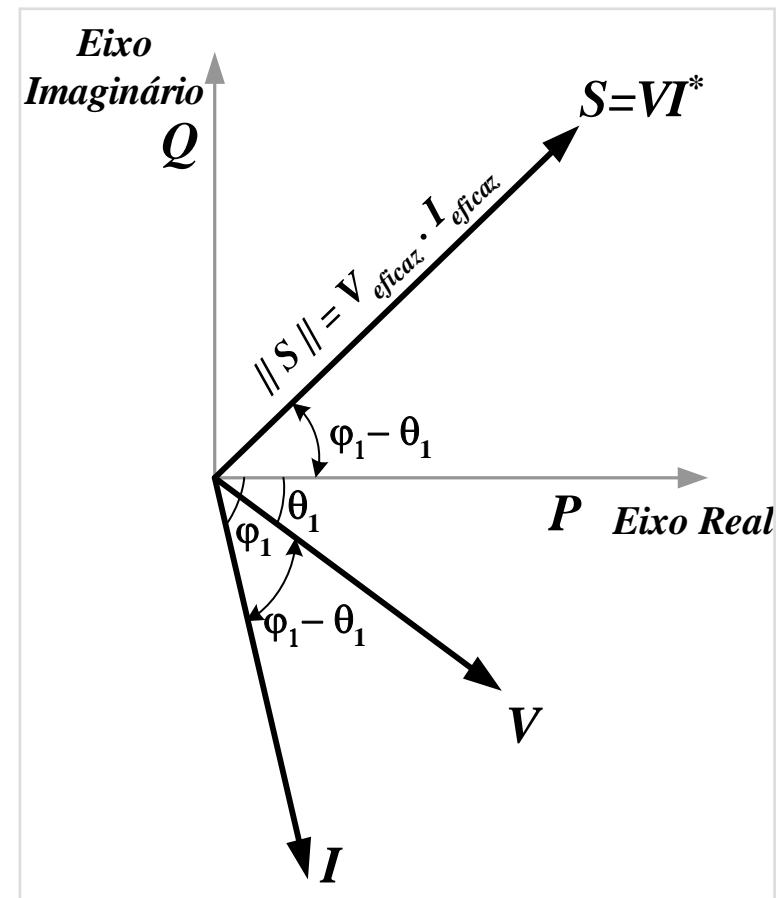
Exemplo: Diagrama Fasorial de Potência

O ângulo de fase entre a tensão e a corrente, ou $(\varphi_1 - \theta_1)$, coincide com o ângulo de S .

O Fator de Potência é :

$$FP = \frac{P}{|S|} = \cos(\varphi_1 - \theta_1)$$

Neste caso, **Puramente Senoidal**, o Fator de Distorção é unitário (**DHT=0**), e o **Fator de Potência** coincide com o Fator de Deslocamento.



Potência Reativa Q

A potência Reativa Q não contribui no processo de transmissão de energia entre a fonte e a carga. **Quando $Q \neq 0$, a Corrente Eficaz e a Potência Aparente são maiores do que o mínimo necessário destas variáveis, para transmitir a Potência Média P .**

Indutores: Corrente atrasada em relação à tensão de 90° , Fator de Deslocamento = 0.

Em função da natureza do fluxo de energia alternada num indutor, apesar da Potência Aparente ser NÃO NULA, a Potência Ativa resulta nula ($P = 0$).

Assim como um Resistor "consome" Potência Real (média) P , os Indutores podem ser vistos como "consumidores" de Potência Reativa Q .

Capacitores: Corrente adiantada em relação à tensão de 90° , Fator Deslocamento=0.

Capacitores podem se vistos como "Fontes" de Potência Reativa Q .

Por este motivo são freqüentemente inseridos na Rede de Distribuição, próximos às cargas indutivas. Se a Q fornecida pelo capacitor for igual à Q consumida pelo indutor, então a corrente resultante (que flui proveniente da rede para o conjunto capacitor-indutância-carga) estará em fase com a tensão, resultando num Fator de Potência UNITÁRIO e Magnitude Mínima para a Corrente Eficaz (**caso ideal senoidal**).

1.5. Harmônicas de Corrente em Sistemas Trifásicos

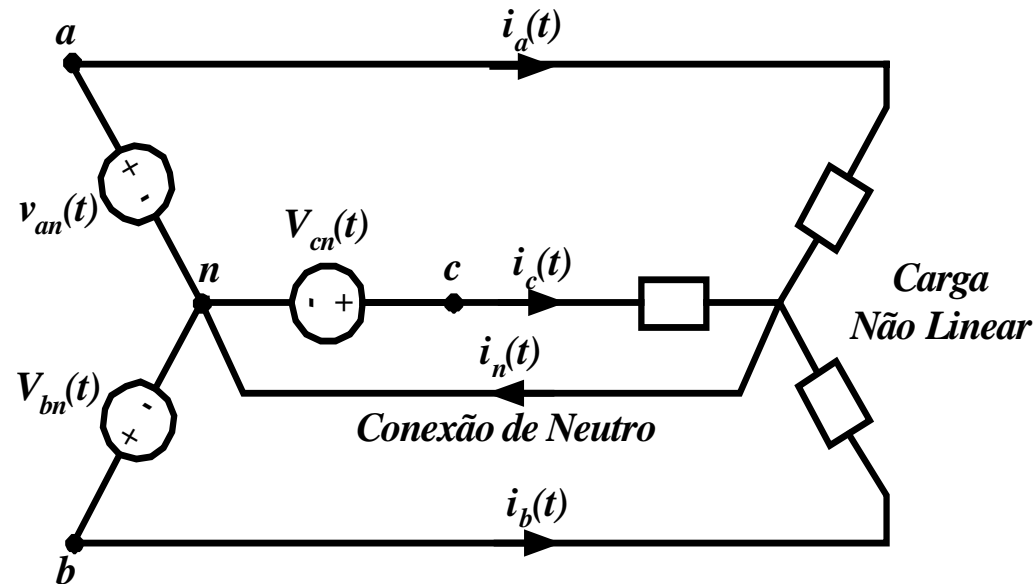
A presença de Harmônicas de Corrente em Sistemas Trifásicos podem também resultar em sérios problemas:

- Em sistemas trifásicos a quatro-fios, das harmônicas de corrente podem resultar elevadas correntes de neutro, as quais podem facilmente exceder a máxima corrente Eficaz dos condutores;
- Capacitores para Correção do Fator de Potência podem resultar em significativo aumento das correntes eficazes, podendo ocorrer FALHAS operacionais.

Nesta seção, estes problemas serão examinados, considerando-se o fluxo de correntes harmônicas em sistemas trifásicos, nos seguintes casos:

- Correntes harmônicas em sistemas 3ϕ a quatro-fios;
- Correntes harmônicas em sistemas 3ϕ a três-fios (Cargas: Δ e Y).

1.5.1. Harmônicas de Corrente em Sistemas Trifásicos a quatro-fios



Séries de Fourier das Correntes de linha e Tensões

$$i_a(t) = I_{a0} + \sum_{k=0}^{\infty} I_{ak} \cdot \cos(k \cdot \omega \cdot t - \theta_{ak})$$

$$v_{an}(t) = V_m \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

$$i_b(t) = I_{b0} + \sum_{k=0}^{\infty} I_{bk} \cdot \cos(k \cdot (\omega \cdot t - 120^\circ) - \theta_{bk})$$

$$v_{bn}(t) = V_m \cdot \cos(\omega \cdot t - 120^\circ)$$

$$i_c(t) = I_{c0} + \sum_{k=0}^{\infty} I_{ck} \cdot \cos(k \cdot (\omega \cdot t + 120^\circ) - \theta_{ck})$$

$$v_{cn}(t) = V_m \cdot \cos(\omega \cdot t + 120^\circ)$$

Corrente de Neutro

$$i_n(t) = \begin{cases} I_{a0} + I_{b0} + I_{c0} \\ + \sum_{k=1}^{\infty} \begin{pmatrix} I_{ak} \cdot \cos(k \cdot \omega \cdot t - \theta_{ak}) \\ + I_{bk} \cdot \cos(k \cdot (\omega \cdot t - 120^\circ) - \theta_{bk}) \\ + I_{ck} \cdot \cos(k \cdot (\omega \cdot t + 120^\circ) - \theta_{ck}) \end{pmatrix} \end{cases}$$

Se a carga é NÃO-BALANCEADA, então na conexão de neutro poderá circular correntes contendo o mesmo espectro harmônico das correntes de linha.

No caso balanceado, $I_{ak} = I_{bk} = I_{ck} = I_k$ e $\theta_{ak} = \theta_{bk} = \theta_{ck} = \theta_k$, para todo k ;

i.e., as harmônicas das três fases terão as mesmas amplitudes e os mesmos ângulos de deslocamento. Então, a corrente de neutro resulta em:

$$i_n(t) = 3I_0 + \sum_{k=3,6,9,\dots}^{\infty} (3I_k \cdot \cos(k \cdot \omega \cdot t - \theta_k))$$

Corrente Eficaz de Neutro

$$i_n(t) = 3I_0 + \sum_{k=3,6,9,\dots}^{\infty} (3I_k \cdot \cos(k \cdot \omega \cdot t - \theta_k))$$

Fundamental e maioria dos harmônicos se cancelam;

- Harmônicos de ordens múltiplos de 3 (triplo-n, ou 0, 3, 6, 9, ...) **não se cancelam**, pelo contrário, se **SOMAM**.

Obs: Componentes CC também se somam.

- A Corrente Eficaz de Neutro resulta em:

$$i_{n,ef} = 3 \sqrt{I_0^2 + \sum_{k=3,6,9,\dots}^{\infty} \frac{I_k^2}{2}}$$

Exemplo – Corrente Eficaz de Neutro

Suponhamos uma carga balanceada que produza uma corrente de linha contendo a fundamental e 20% de terceiro harmônico:

$$i_a(t) = I_1 \cdot \cos(\omega \cdot t - \theta_1) + 0,2 \cdot I_1 \cdot \cos(3 \cdot \omega \cdot t - \theta_3)$$

Encontraremos a corrente eficaz de neutro em comparação com a amplitude do valor eficaz da fundamental da corrente linha:

$$i_{n,ef} = 3 \sqrt{\frac{(0,2 \cdot I_1)^2}{2}} = \frac{0,6 \cdot I_1}{\sqrt{2}}$$
$$i_{l,ef} = \sqrt{\frac{I_1^2 + (0,2 \cdot I_1)^2}{2}} = \frac{I_1}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + 0,04} \approx \frac{I_1}{\sqrt{2}}$$

Portanto, a corrente eficaz de neutro é 60% da fundamental da corrente de linha!

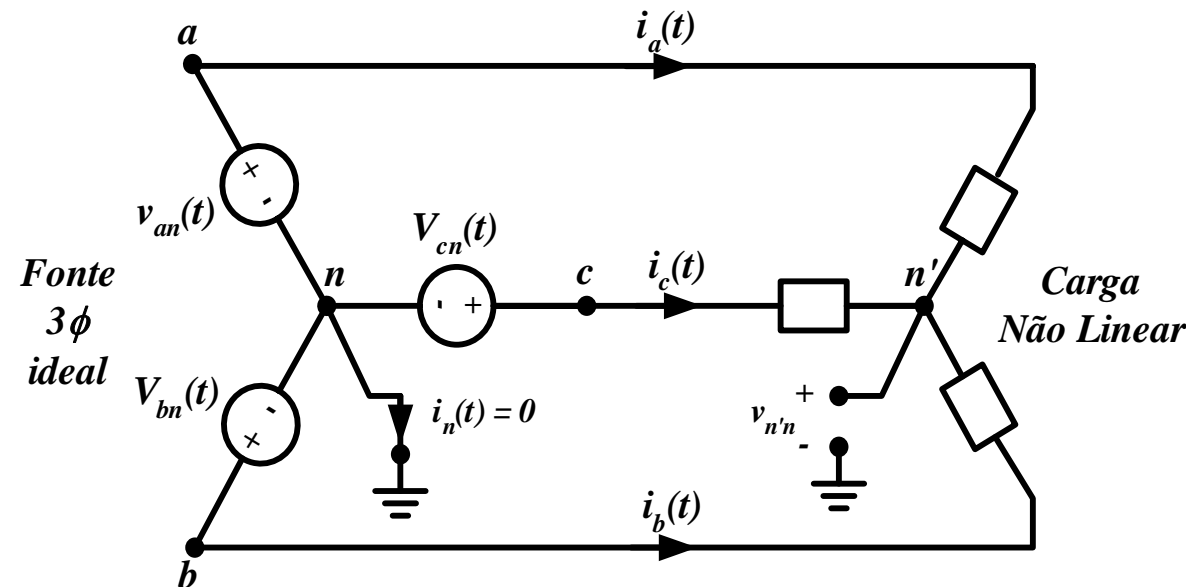
- As harmônicas de ordem tripla se somam no sistema trifásico, tanto que 20% de terceiro harmônico na linha resultou em 60% deste harmônico no neutro.

- Assim, a presença de terceiro harmônico poderá até não ter grande efeito no valor eficaz da corrente de linha. Contudo, poderá resultar em inesperado fluxo de corrente pelo neutro.

Prof. CANESIN, UNESP – Ilha Solteira(SP)

1.5.2. Harmônicas de Corrente em Sistemas Trifásicos a três-fios

Carga Não-Linear conectada em Y, sem conexão de neutro:



Carga em Y - Sem Conexão de Neutro

Se a carga é Balanceada, então :

$$i_n(t) = 3I_0 + \sum_{k=3,6,9\ldots}^{\infty} (3I_k \cdot \cos(k \cdot \omega \cdot t - \theta_k))$$

Mas $i_n(t) = 0$, desde que não haja conexão de neutro.

Então, as correntes alternadas da linha não podem conter componentes CC nem harmônicas triplas.

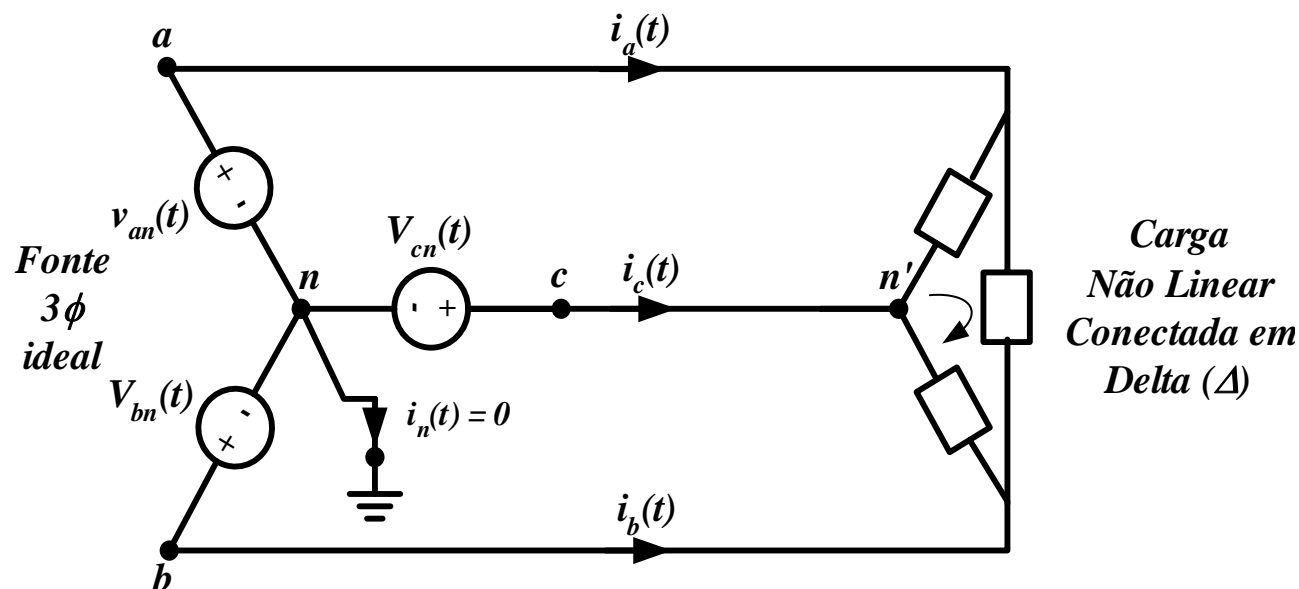
O que aconteceu então:

- A tensão que é induzida no ponto de neutro da carga, que causa a corrente de linha CC e harmônicas triplas torna-se nula.

A tensão no ponto de neutro da carga contém componentes CC e harmônicas triplas:

- Com uma carga Desequilibrada, as correntes de linha poderão conter componentes CC e harmônicas triplas.

Carga conectada em Delta



- Como não existe conexão de neutro, então as correntes de linha não contêm componentes CC nem harmônicas múltiplas de 3.
- As correntes na carga podem conter componentes CC e harmônicas triplas;
- Para carga não-linear balanceada, estas correntes ficam confinadas no delta.

CAPÍTULO 2

Normas para FP e Distorção Harmônica

Capítulo 2

2.1 – Norma Nacional - Portaria DNAEE 1569 de 23/12/1993

PRODIST – Procedimentos de Distribuição

Módulo 8 – Qualidade da Energia, Proposta ANEEL 2005

2.2 – Normas Internacionais

IEC – IEC 61000-3-2 (até 16A eficazes por fase)

IEEE/ANSI Standard 519

2.1. Norma Nacional – Portaria DNAEE 1569

Norma Brasileira?? Limites Distorções Harmônicas??

- A regulamentação Nacional para o Fator de Potência das instalações elétricas consumidoras, ainda válida (até entrada dos Limites em discussão/PRODIST), estabelece como **VALOR MÍNIMO $FP_{min}=0,92$** .
- Não existe o estabelecimento de limites para as harmônicas individuais de corrente em circulação através do sistema elétrico.
- Esta regulamentação estabelece que o cálculo para o Fator de Potência deve ser realizado por Média Horária (avaliação hora a hora, ou mensal).
- O Limite para o consumo de Reativos é de **0,425VARh** por cada Wh, e a **sobre-taxa** sobre o consumo ocorrerá se no intervalo das 6h-24h a energia Reativa consumida for indutiva, e, das **0h-6h se for capacitiva**.

2.1. Norma Nacional - PRODIST/ANEEL, Módulo 8

PRODIST – Procedimentos de Distribuição

PRODIST é um conjunto de documentos regulatórios na forma de regulamentações, normatizações e padronizações que têm como objetivo possibilitar a conexão elétrica aos sistemas de distribuição por usuários, garantindo que os indicadores de desempenho ou de qualidade de serviço sejam atingidos de forma clara e transparente, preservando, dentre outros aspectos, a segurança, a eficiência e a confiabilidade dos sistemas elétricos.

(* até Agosto de 2007, ainda não aprovados de forma definitiva)

2.1. Norma Nacional - PRODIST/ANEEL, Módulo 8

Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica (Versão de 24/03/2006)

- O valor do fator de potência (FP) deverá ser calculado a partir dos valores registrados das potências ativa e reativa (P,Q) ou das respectivas energias (EA, ER), usando as seguintes fórmulas:

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad \text{ou} \quad \frac{EA}{\sqrt{EA^2 + ER^2}}$$

- O controle do fator de potência deverá ser efetuado por medição permanente no caso de clientes do Grupo A ou medição individual por tempo determinado nos clientes de BT.
- O resultado das medições será conservado na concessionária para permitir, no futuro, o cálculo de indicadores que expressem fatores coletivos de potência e permitam avaliar políticas tarifárias sensíveis ao fator de potência, como a medição de Ampére-hora no caso de consumidores residenciais.

PRODIST/ANEEL, Módulo 8 – Fator de Potência

- Valores de referência.

- ♦ O responsável por unidade consumidora conectada em BT ou MT deve assegurar que no ponto de conexão o fator de potência esteja compreendido entre 0,92 (noventa e dois centésimos) e 1,00 (um) indutivo, ou, 1,00 (um) e 0,92 (noventa e dois centésimos) capacitivo.
- ♦ O responsável por unidade consumidora conectada em AT deve assegurar que no ponto de conexão o fator de potência esteja compreendido entre 0,95 (noventa e cinco centésimos) e 1,00 (um) indutivo, ou, 1,00 (um) e 0,92 (noventa e dois centésimos) capacitivo.
- ♦ O responsável por unidade produtora de energia, operando com potência ativa nominal, deve assegurar que no ponto de conexão o fator de potência esteja compreendido entre os valores estabelecidos na Tabela 2.1 a seguir.

*** Fórmulas para cálculo de excedentes reativos: Consulte site ANEEL**

<http://www.aneel.gov.br>

PRODIST/ANEEL, Módulo 8 – Fator de Potência

TABELA 2.1 - Limites FP para diferentes Tipos de Geração

Tipo de Geração	Fator de Potência Capacitivo	Fator de Potência Indutivo
Hidrelétrica e Termelétrica	0,90 a 1,00 sobre-excitado (capacitivo – injetando reativo)	1,00 a 0,95 sub-excitado (indutivo – absorvendo reativo)
Eólica	0,95 a 1,00 (capacitivo – injetando reativo)	1,00 a 0,95 (indutivo – absorvendo reativo)

PRODIST/ANEEL, Módulo 8: Terminologia

– Distorção Harmônica, Terminologia Prodist

Tabela 2.2 – Terminologia Prodist-Aneel

Identificação da Grandeza	Símbolo
Distorção harmônica individual de tensão, ordem h	$DIT_h\%$
Distorção harmônica total de tensão	$DTT\%$
Tensão harmônica de ordem h	V_h
Ordem harmônica	h
Ordem harmônica máxima	$h_{m\acute{a}x}$
Ordem harmônica mínima	h_{min}
Tensão fundamental medida	V_1

PRODIST/ANEEL, Módulo 8 – Distorção Harmônica

- ♦ As expressões para o cálculo de DIT_h% e DTT % são:

$$DIT_h \% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad \text{e} \quad DTT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\text{máx}}} V_h^2}}{V_1} \times 100$$

- Metodologia de medição.

- ♦ Os sinais a serem monitorados devem utilizar sistemas de medição baseados em tecnologia com microprocessadores (??precisão, bits,...)
- ♦ A capacidade de armazenamento dos sistemas de medição deve atender os requisitos de banco de dados do protocolo de medição a ser definido pela ANEEL (??? A ser definido ???).
- ♦ Para os sistemas elétricos trifásicos, as medições de distorção harmônica devem ser feitas através das tensões fase-neutro para sistemas estrela aterrada e fase-fase para as demais configurações.

PRODIST/ANEEL, Módulo 8 – Distorção Harmônica

- Instrumentação.

- ♦ Os instrumentos de medição devem observar o atendimento aos protocolos de medição e às normas técnicas vigentes (?? Definição??).
- ♦ O espectro harmônico a ser considerado para fins do cálculo da distorção total deve compreender uma faixa de frequências que considere desde a componente fundamental até, no mínimo, a 25ª ordem harmônica ($h_{min} = 25$).
- ♦ Quando da utilização de sinais advindos de transformador de potencial (TP) e transformador de corrente (TC), é relevante observar que estes sensores podem introduzir erros, acima dos valores previstos para as condições nominais, quando das medições de frequências superiores à fundamental, podendo haver necessidade de ensaios de resposta em frequência de TP e TC.
- ♦ Os TP utilizados em um sistema trifásico devem ter as mesmas especificações e suas cargas devem corresponder a impedâncias semelhantes, e serem conectados em Y – Y aterrado, independentemente do tipo ou classe de tensão. Para os casos sem conexão à terra podem ser utilizados arranjos para os TP do tipo V.

PRODIST/ANEEL, Módulo 8 – Distorção Harmônica

- Valores de referência para Distorção Harmônica Total

Tabela 2.3 – Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental)

Tensão Nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) [%]
$V_N \leq 1\text{kV}$	10
$1\text{kV} < V_N \leq 13,8\text{kV}$	8
$13,8\text{kV} < V_N \leq 69\text{kV}$	6
$69\text{kV} < V_N \leq 138\text{kV}$	3

PRODIST/ANEEL, Módulo 8 – Distorção Harmônica

- Valores de referência para Distorção Harmônica Individual

Tabela 2.4(I*) – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em percentagem da tensão fundamental)

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]			
	$V_n \leq 1\text{kV}$	$1\text{kV} < V_n \leq 13,8\text{kV}$	$13,8\text{kV} < V_n \leq 69\text{kV}$	$69\text{kV} < V_n \leq 230\text{kV}$
5	7,5	6	4,5	2,5
7	6,5	5	4	2
11	4,5	3,5	3	1,5
13	4	3	2,5	1,5
17	2,5	2	1,5	1
19	2	1,5	1,5	1
23	2	1,5	1,5	1
25	2	1,5	1,5	1
>25	1,5	1	1	0,5

*** Ímpares não múltiplas de 3**

Prof. CANESIN, UNESP – Ilha Solteira(SP)

PRODIST/ANEEL, Módulo 8 – Distorção Harmônica

Tabela 2.4(II*) – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em percentagem da tensão fundamental)

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]			
	$V_n \leq 1\text{kV}$	$1\text{kV} < V_n \leq 13,8\text{kV}$	$13,8\text{kV} < V_n \leq 69\text{kV}$	$69\text{kV} < V_n \leq 230\text{kV}$
3	6,5	5	4	2
9	2	1,5	1,5	1
15	1	0,5	0,5	0,5
21	1	0,5	0,5	0,5
>21	1	0,5	0,5	0,5
2	2,5	2	1,5	1
4	1,5	1	1	0,5
6	1	0,5	0,5	0,5
8	1	0,5	0,5	0,5
10	1	0,5	0,5	0,5
12	1	0,5	0,5	0,5
>12	1	0,5	0,5	0,5

* Ímpares múltiplas 3

* Pares

2.2. Normas Internacionais – IEC 61000-3-2

- IEC 61000-3-2: Limites para a emissão de harmônicas de corrente em equipamentos (agrupados em classes) com **corrente eficaz inferior a 16A(por fase)** .
- Atualmente esta norma esta sendo sugerida para aplicação no Brasil. Observa-se que, para os Reatores Eletrônicos para Iluminação Fluorescente, acima de 60W, já se encontra regulamentada no país.
- Aplica-se a equipamentos conectados à rede pública de baixa tensão de 50Hz ou 60Hz, com tensão fase-neutro de 220V até 240V (entre fases de 380V até 415V).
- Para tensões inferiores (127V por exemplo), apesar dos limites não estarem estabelecidos por esta norma, pode-se encontrar estes novos limites para as harmônicas de corrente numa determinada tensão V_x , multiplicando-se os limites encontrados na norma pela relação $(230/V_x)$.

(Norma para: **Sistemas monofásicos a dois ou três fios e Trifásico a três ou quatro fios**)

IEC 61000-3-2: Classes A e B

Classe A: Equipamentos com alimentação trifásica equilibrada e todos os demais que não se enquadram nas outras classes. Esta classe inclui ainda equipamentos de uso residencial (exceto classe D); de áudio; ferramentas (não portáteis) e "dimmers" para lâmpadas incandescentes.

Limites - Tabela 2.5 (Limites máximos em valores eficazes).

Classe B: Equipamentos portáteis.

Os Limites para esta classe são aqueles da Tabela 2.5, **multiplicados por 1,5.**

IEC 61000-3-2: Classe A Limites

Tabela 2.5. IEC 61000-3-2 Limites para Correntes Harmônicas, Classe A (obs: Classe B x 1,5)

Harmônicas Impares		Harmônicas Pares	
Ordem (n)	Máxima Corrente	Ordem (n)	Máxima Corrente
3	2,30 A	2	1,08 A
5	1,14 A	4	0,43 A
7	0,77 A	6	0,30 A
9	0,40 A	$8 \leq n \leq 40$	$0,23 \text{ A} \cdot (8/n)$
11	0,33 A		
13	0,21 A		
$15 \leq n \leq 39$	$0,15 \text{ A} \cdot (15/n)$		

IEC 61000-3-2: Classe C

Classe C: Equipamentos para iluminação dos tipos: incandescente; a descarga; LEDs; incluindo "dimmers" (exceto para incandescentes).

Para equipamentos com potência ativa de entrada acima de 25W os limites são aqueles da Tabela 2.6 (expressos em % da fundamental da corrente de entrada).

Dispositivos tipo “dimmers (acima de 25W)” devem obedecer os limites impostos pela Tabela 2.6, em qualquer condição de operação.

Para potência ativa menor do que 25W, os Limites da Tabela 2.7 se aplicam (Limites Máximos da Coluna 2).

IEC 61000-3-2: Classe C Limites

Tabela 2.6. IEC 61000-3-2 Limites para Correntes Harmônicas, Classe C

Ordem(n)	Máxima corrente, percentual da fundamental
2	2 %
3	(30%) . (Fator de Potência)
5	10 %
7	7 %
9	5 %
$11 \leq n \leq 39$	3 %

IEC 61000-3-2: Classe D

Classe D: Equipamentos com uma forma de onda de corrente com forte influencia nos sistemas de distribuição de energia elétrica, com uma potência ativa de entrada menor ou igual a 600W.

Nesta classe estão os computadores pessoais, monitores e equipamentos de televisão.

Os limites estão na Tabela 2.7.

IEC 61000-3-2: Classe D Limites

Tabela 2.7. IEC 61000-3-2 Limites para Correntes Harmônicas, Classe D

Ordem (n)	Corrente Máxima por Watt [mA/W]	Corrente Máxima [A]
3	3,40	2,30 A
5	1,90	1,14 A
7	1,00	0,77 A
9	0,50	0,40 A
11	0,35	0,33 A
13	0,296	0,21 A
$15 \leq n \leq 39$	$(3,85/n)$	$(2,25/n)$ A

2.2. Normas Internacionais – IEEE/ANSI - 519

- Em 1993, o IEEE publicou uma revisão para as recomendações da IEEE 519 para limites de amplitudes para harmônicas de corrente: *IEEE Guide for Harmonic Control and Reactive Compensation of Static Power Converters*.
- Os Limites para os Harmônicos são baseados em relação entre a fundamental da corrente de carga (I_L) e a corrente de curto circuito no Ponto de Acoplamento Comum à rede pública (PAC) (ou, PCC- Point of Common Coupling).
- A Filosofia é distinta da IEC e fundamenta-se em que não interessa ao sistema o que ocorre dentro de uma instalação, mas sim, o que ela reflete para o exterior, ou seja, para os demais consumidores conectados à mesma rede de alimentação.
- Os Limites diferem de acordo com o nível de tensão e com o nível de corrente de curto-circuito (I_{cc}). Obviamente, quanto maior I_{cc} em relação à I_L , maiores serão os limites admissíveis (pois afetarão menos a tensão no PAC).

IEEE-519 Limites Corrente, Sistemas Baixa Tensão

Tabela 2.8. IEEE-519 Máximo Limite para Harmônicos Ímpares em Sistema de Distribuição em geral de 120V até 69kV.

I_{CC} / I_L	$n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 \leq n$	DHT
< 20	4,0 %	2,0 %	1,5 %	0,6 %	0,3 %	5,0 %
20 – 50	7,0 %	3,5 %	2,5 %	1,0 %	0,5 %	8,0 %
50 – 100	10,0 %	4,5 %	4,0 %	1,5 %	0,7 %	12,0 %
100 – 1000	12,0 %	5,5 %	5,0 %	2,0 %	1,0 %	15,0 %
> 1000	15,0 %	7,0 %	6,0 %	2,5 %	1,4 %	20,0 %

IEEE-519 Limites Corrente, Sistemas de Alta Tensão

Tabela 2.9. IEEE-519 Máximo Limite para Harmônicos Ímpares em Sistema de Distribuição em geral de 69,001kV até 161kV.

I_{CC} / I_L	$n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 \leq n$	DHT
< 20	2,0 %	1,0 %	0,75 %	0,3 %	0,15 %	2,5 %
20 – 50	3,5 %	1,75 %	1,25 %	0,5 %	0,25 %	4,0 %
50 – 100	5,0 %	2,25 %	2,0 %	0,75 %	0,35 %	6,0 %
100 – 1000	6,0 %	2,75 %	2,5 %	1,0 %	0,5 %	7,5 %
> 1000	7,5 %	3,5 %	3,0 %	1,25 %	0,7 %	10,0 %

IEEE-519 Limites Corrente, Sistemas de Alta Tensão

Tabela 2.10. IEEE-519 Máximo Limite para Harmônicos Ímpares em Sistemas de Distribuição de Alta Tensão (maior do que 161kV) e Sistemas de Geração e Co-geração isolados.

I_{CC} / I_L	$n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 \leq n$	DHT
< 50	2,0 %	1,0 %	0,75 %	0,3 %	0,15 %	2,5 %
> 50	3,0 %	1,5 %	1,15 %	0,45 %	0,22 %	3,75 %

OBSERVAÇÃO: As componentes PARES são limitadas a 25% dos valores das Tabelas 2.8; 2.9 e 2.10.

A IEEE 519 estabelece ainda Limites de Distorção Harmônica de Tensão (mais severos a nível de distribuição).

IEEE-519 Limites Distorção Harmônica da Tensão

Tabela 2.11. IEEE-519 Limites Percentuais de Distorção da Tensão de Alimentação em Relação à Fundamental.

Tensão no PAC	Harmônicas Individuais	DHT_v
69kV e abaixo	3,0 %	5,0 %
69,001kV – 16kC	1,5 %	2,50 %
acima de 16kC	1,0 %	1,50 %

Observa-se finalmente que estas restrições para a tensão são de responsabilidade das Companhias de Distribuição de Energia Elétrica.

Efeitos das Harmônicas no Sistema Elétrico

CAPÍTULO 3

Capítulo 3

3.1 – Desvantagens do Baixo FP e da alta DHT da corrente

3.2 – Fontes de Distorção Harmônica

3.3 – Efeitos das Harmônicas em componentes do Sistema Elétrico

3.3.1. Transformadores

3.3.2. Motores e Geradores

3.3.3. Capacitores

3.3.4. Cabos de Alimentação

3.3.5. Equipamentos Eletrônicos e Aparelhos de Medição

3.3.6. Fusíveis e Relés de Proteção

3.1. Desvantagens do baixo FP e alta DHT

- A Máxima Potência Ativa absorvível da rede é fortemente afetada pelo Fator de Potência;
- As harmônicas de corrente exigem um sobre-dimensionamento das instalações elétricas e dos transformadores, além de aumentar as perdas (efeito pelicular);
- A componente de corrente de 3ª ordem harmônica, em sistemas trifásicos com neutro, pode ser elevada (resultando em corrente de neutro maior do que a fundamental);
- O achatamento da onda de tensão, devido a picos de corrente, além da distorção na tensão, pode causar mau funcionamento de demais equipamentos na rede;
- As componentes harmônicas podem excitar ressonâncias no sistema de potência levando a picos de tensão e corrente, podendo danificar dispositivos da rede.

Exemplo 1 - Redução das Perdas com Aumento do FP

Exemplo de uma Instalação de consumo anual de 200MWh, supondo-se perdas de 5%, e, elevando-se o FP de 0,78 para 0,92.

	Caso 1 Sem Correção do FP	Caso 2 Com Correção do FP
Fator de Potência	0,78	0,92
Perdas Globais (%)	5,00 %	3,59 %
Perdas Globais (MWh/ano)	10,00	7,18
Redução Efetiva de Perdas		28,10 %

Exemplo 2 - Redução de Perdas, Posicionamento CFP

Economia de Energia em Função do Posicionamento do circuito de Correção de Fator de Potência (CFP)

Perdas Totais sem Compensação 8148 W	Posicionamento da Compensação (Carga Nominal de 60kVA)			
	Trafo Entrada (Primário)	Trafo Entrada (Secundário)	Central de Cargas (PAC)	Equipamento
Perdas Totais com Compensação (W)	8125	5378	4666	3346
Total de Perdas com Compensação (%)	13,54	8,96	7,78	5,58
Redução de Perdas (W)	23	2770	3482	4802
Redução de Perdas (%)	0,04	4,62	5,80	8,00
Economia por ano (US\$mil)	10	1213	1523	2101

3.2. Fontes de Distorção Harmônica

Apresentam-se neste tópico algumas Fontes de distorção harmônica:

➤ **Retificadores Controlados, ou não, com Carga R-L e Indutância de Comutação:**

- resultam em distorção na tensão de alimentação (notching) nos instantes de comutação,
- indesejável queda de tensão média na carga (devido indutância de comutação).

➤ **Reatores controlados a Tiristores (RCT):**

- Presença de Harmônicas Ímpares de corrente, com amplitude dependente de α (14%-3h).

➤ **Fornos a Arco (por exemplo, na produção de aços):**

- Harmônicas são imprevisíveis (harmônicas pares, ímpares e fracionárias), 2ª e 7ª predominam.

➤ **Retificadores com Filtro Capacitivo (monofásicos ou trifásicos):**

- Corrente de entrada de forma impulsiva com elevada DHT e em consequência reduzido FP.

3.3. Efeitos das Harmônicas no Sistema Elétrico

3.3.1. Transformadores

Principal Efeito: Aumento das Perdas

- Harmônicas de corrente aumentam as perdas no cobre, principalmente devido ao efeito pelicular que implica na redução efetiva da área condutora à medida que se eleva a frequência da componente de corrente;
- Harmônicas de tensão aumentam as perdas no ferro;
- Normalmente, **para amplitudes reduzidas das harmônicas**, este aumento de perdas não é excessivo;
- Reatâncias de dispersão ampliadas (para frequências harmônicas elevadas);
- Aumento das correntes induzidas devido fluxo de dispersão;
- Capacitâncias parasitas que podem resultar em acoplamentos indesejáveis, e, eventualmente produzir ressonâncias.

3.3.2. Motores e Geradores

Principal Efeito: Aumento do Aquecimento/Perdas

- Aumento das Perdas no Ferro e no Cobre, afetando-se a eficiência e o torque disponível;
- Possibilidade de ruído audível (torques pulsantes resultando em vibrações);
- Torques em sentido oposto àquele da fundamental, devido 5°, 11°, 17°, etc... harmônicos;
- Máquinas de rotores bobinados são mais afetadas do que as de rotor em gaiola;
- Máquinas de rotores em gaiola profunda (devido efeito pelicular), produzem maiores elevações de temperatura em relação à gaiola convencional;
- Oscilações mecânicas (5° e 7° harmônicos no estator → 6° no rotor) em sistemas turbina-gerador ou motor-carga.

3.3.3. Capacitores

Maior Problema: Possibilidade de Ressonâncias

- Ressonâncias podem ser excitadas pelas componentes harmônicas, resultando em níveis excessivos de tensão e/ou corrente;
- **Reatância capacitiva se reduz com a frequência, aumentando-se as correntes relativas às harmônicas presentes na tensão;**
- Aumento das perdas (devido resistência-série), elevação de temperatura e redução da vida útil do capacitor.

3.3.4. Cabos de Alimentação

- Harmônicos elevam valores eficazes da corrente que resultam em aumento das perdas nos condutores;
- Efeito pelicular que restringe a área útil do condutor para componentes de elevadas frequências;
- Efeito de proximidade em função de campos magnéticos próximos, resultando em aumento da resistência do condutor (Aumento das Perdas);
- Cabos Longos, componentes harmônicas podem excitar ressonâncias, resultando em sobre-tensões ao longo da linha (Danificação do Cabo);
- À medida que se aumenta o comprimento do cabo, a ressonância se dará em frequências mais baixas, podendo então ampliar-se os efeitos dos harmônicos mais comuns do sistema.

3.3.5. Equipamentos Eletrônicos e de Medição

Equipamentos Eletrônicos :

- Podem ser muito sensíveis à distorção harmônica da tensão, principalmente quando a utilizam como referência para sua operação, e/ou, execução de determinada tarefa;
- Caso as harmônicas penetrem na alimentação dos mesmos por acoplamentos (EMI), poderão também ter seu funcionamento totalmente comprometido.

Aparelhos de Medição :

- Devido ressonâncias que afetam a grandeza medida, são fortemente afetados;
- Medidores de Energia Convencionais (Discos de indução) são sensíveis às componentes harmônicas, podendo resultar em erros POSITIVOS ou NEGATIVOS, dependendo do tipo de medidor e da harmônica presente.
- Em geral a distorção deve ser elevada ($> 20\%$) para produzir um erro "significativo". Entretanto, o erro não será nulo na presença de harmônicas.

3.3.6. *Fusíveis e Relés de Proteção*

Fusíveis :

- Devido harmônicas e inerente aumento da corrente eficaz, resultando em maior aquecimento, poderá levar à redução da vida útil dos mesmos, ou até mesmo, à uma operação inadequada.

Relés de Proteção :

- Não é possível generalizar os efeitos nos mesmos, devido à grande variedade das distorções existentes e dos diferentes tipos de relés (digitais e convencionais);
- O desempenho de um relé para uma determinada faixa de frequências de entrada especificadas, não é o mesmo quando da presença de uma onda distorcida contendo estes mesmos componentes espectrais. Relés com múltiplas entradas são ainda mais imprevisíveis.

CAPÍTULO 4

Correção da Distorção Harmônica de Corrente com dispositivos de Eletrônica de Potência

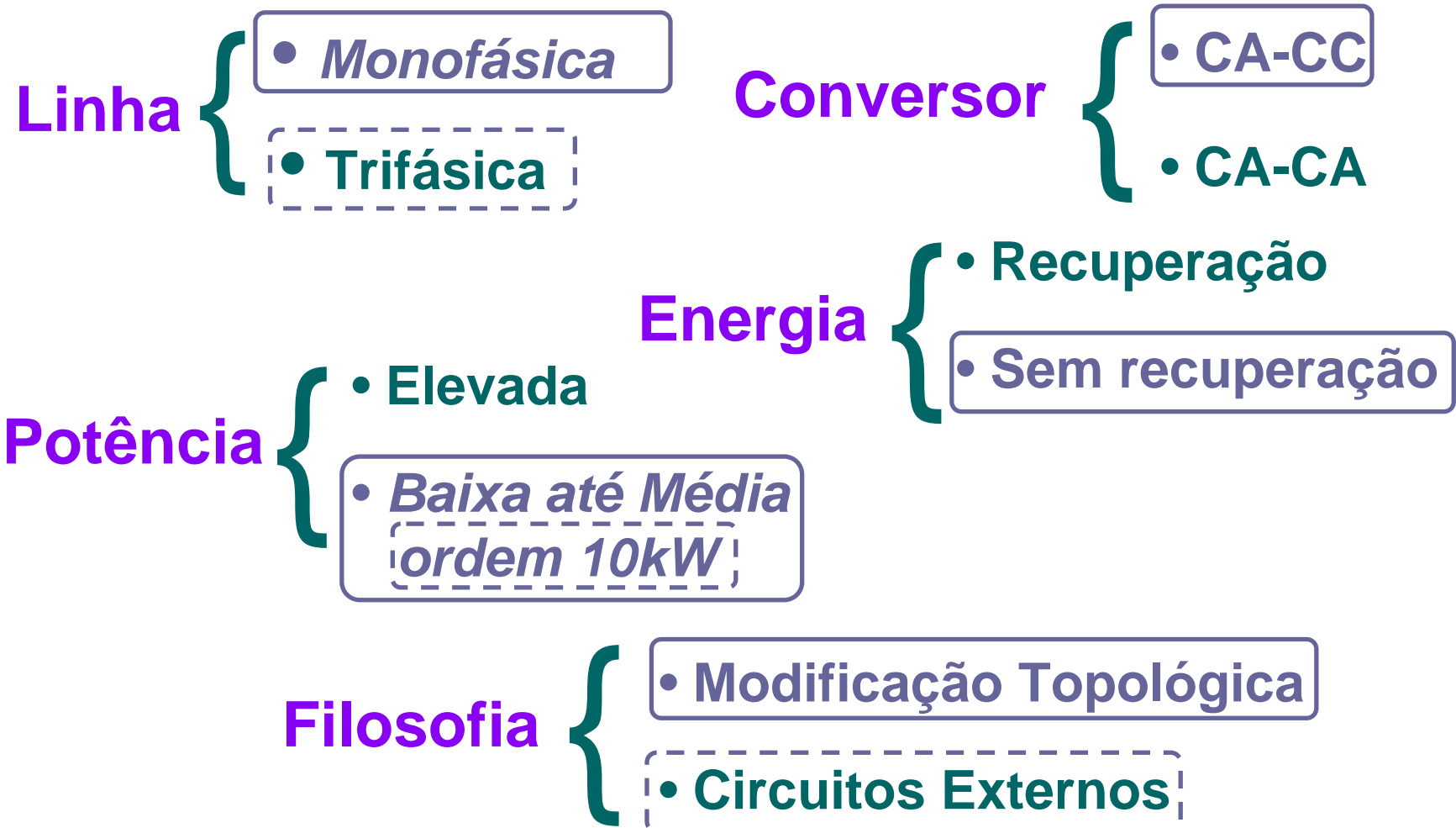
CAPÍTULO 4

4.1 – Técnicas Passivas (versus) Ativas

4.2 – Técnicas para Circuitos Monofásicos

4.3 – Técnicas para Circuitos Trifásicos

CAPÍTULO 4: Foco da Apresentação



Questões (Q) & Respostas (R):

Q: Atualmente, são o FP e DHT os mais importantes parâmetros, sob o ponto de vista regulatório?

• **R: Não !!!**

• **Q:** O que as Normas “ dizem” sobre FP e DHT?

• **R: Quase Nada. Elas apenas impõe/sugerem máximos valores para cada componente harmônica**

• **Q:** Normalmente, qual é o principal objetivo foco de um projeto em Eletrônica de Potência?

• **R: Atender às Normas Correlatas, com o Menor Custo possível. $FP=1$ e $DHT=0$ não são os principais objetivos !!!**

Mudança de Conceitos: FP versus DHT

Correção Fator Potência

Redução Harmônicas Baixas Frequências

- Objetivos {
- Atender às Normas
 - Reduzidas Perdas
 - Reduzidos Custos

4.1 – Técnicas Passivas (versus) Ativas

Soluções Passivas

- 👍 Robustez & Confiabilidade
- 👍 Baixo Custo
- 👎 Baixa Potência
- 👎 Não há pré-regulação
- 👎 Elevado peso & Tamanho
- 👎 Problemas de Start-up
- 👎 Média Qualidade para a corrente de entrada *

* Depende da Técnica de Controle







Soluções Ativas

- 👍 Pré-regulação
- 👍 Baixo tamanho & peso
- 👍 Start-up sem problema
- 👍 Baixa & Alta potência
- 👍 Elevada Qualidade corrente entrada *
- 👎 Maior Custo
- 👎 Robustez & Confiabili.






Prof. CANESIN, UNESP – Ilha Solteira(SP)

Forma de Onda da Corrente de Entrada

Corrente Entrada Senoidal

-  **Operação Ideal**
-  **Entrada Universal**
-  **Elevada Potência**
-  **Custo Elevado**
-  **Uso em 50-60Hz - se Correção Passiva**
-  **Baixa Eficiência**

Corrente Entrada Não-Senoidal

-  **Elevada eficiência**
-  **Baixo Custo**
-  **Técnicas Passivas ou Ativas**
-  **Entrada Universal, Somente se regulado**
-  **Baixa Potência**

4.2 – Técnicas para Circuitos Monofásicos

		<i>Forma de Onda da Corrente Entrada</i>	
		senoidal	não-senoidal
<i>Dispositivos</i>	passivos	passivo & senoidal	passivo & não-senoidal
	ativos	ativo & senoidal	ativo & não-senoidal

Tipos Soluções(I): Passiva & Senoidal

		<i>Forma de Onda da Corrente Entrada</i>	
		senoidal	não-senoidal
<i>Dispositivos</i>	passivos	passivo & senoidal	passivo & não-senoidal
	ativos	ativo & senoidal	ativo & não-senoidal

Filtro de Entrada Série-Ressonante

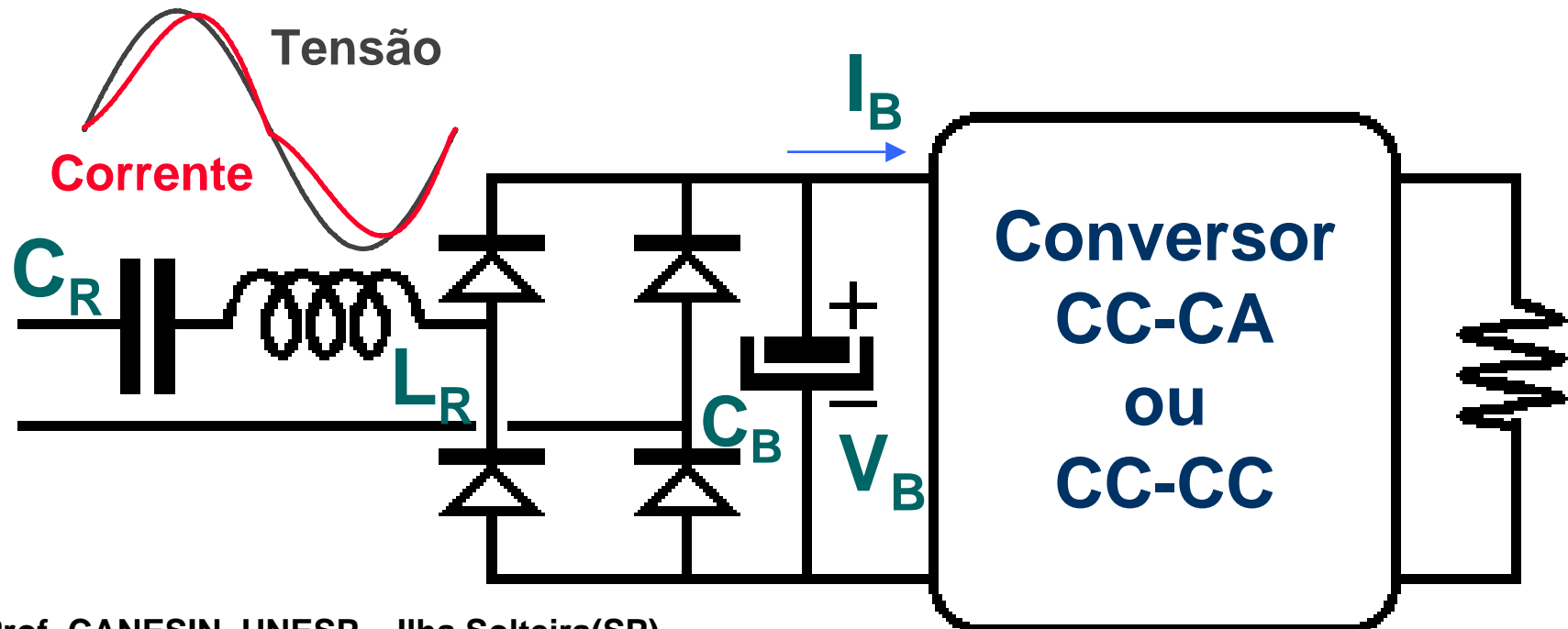


Alto FP, Baixa DHT

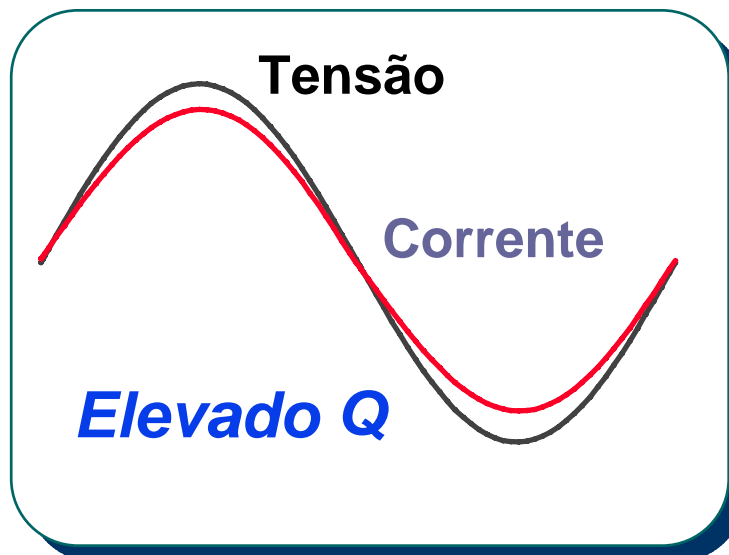
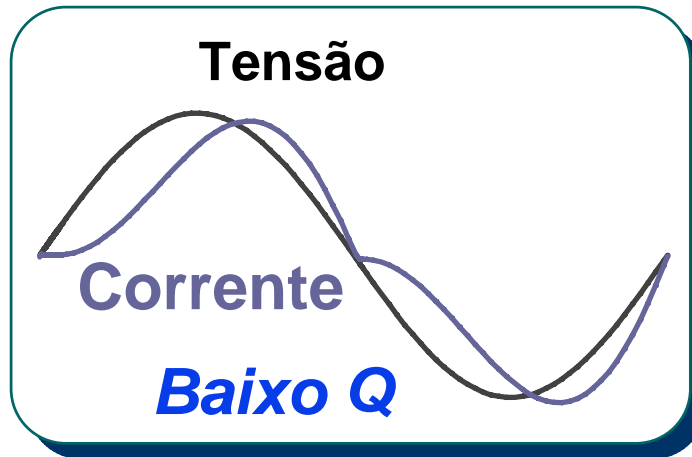


**Elevado peso/volume
para 50-60Hz**

**Aplicável em HF
(ex. 20 kHz)**



Filtro de Entrada Série-Ressonante: Projeto



$$Q = Z/R$$
$$Z = (L_R/C_R)^{1/2}$$
$$R = V_B/I_B$$

Elevado Q resulta:



Elevado FP



Reduzida DHT



**Elevados Esforços
nos componentes**



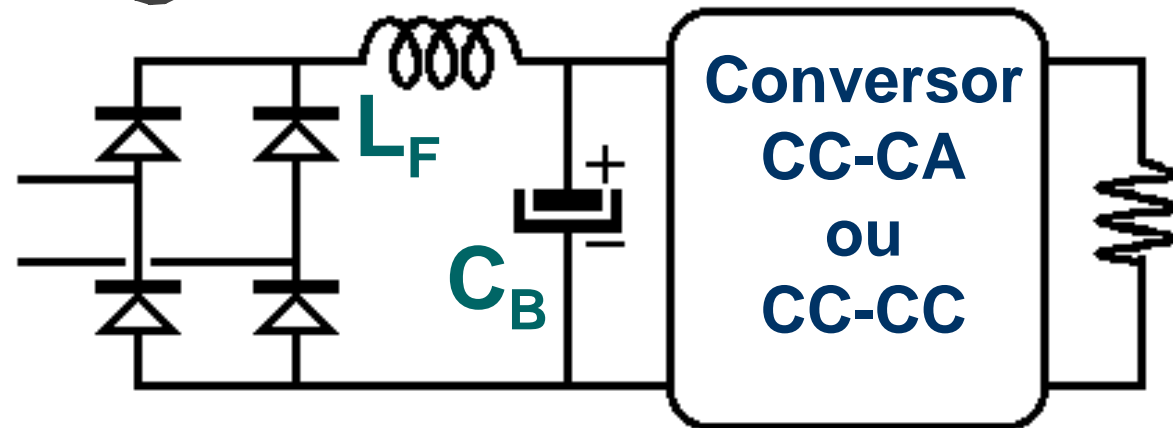
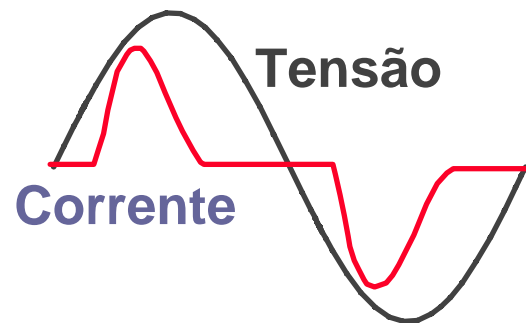
**Elevado Volume/Peso
do Indutor**

Tipos Soluções(II): Passiva & Não-Senoidal

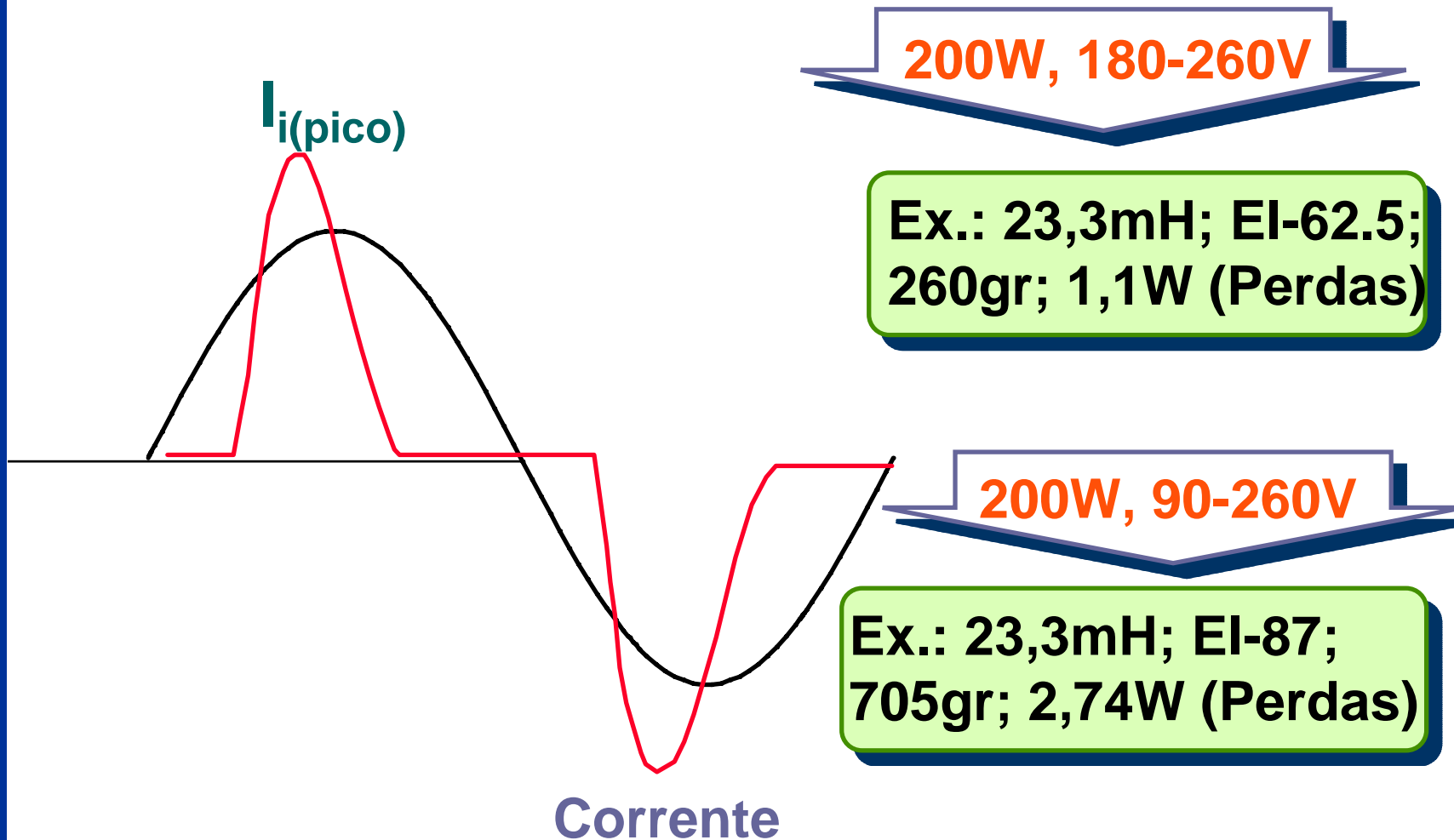
		<i>Forma de Onda da Corrente Entrada</i>	
		senoidal	não-senoidal
<i>Dispositivos</i>	passivo	passivo & senoidal	passivo & não-senoidal
	ativo	ativo & senoidal	ativo & não-senoidal

Filtro LC do Lado CC (I)

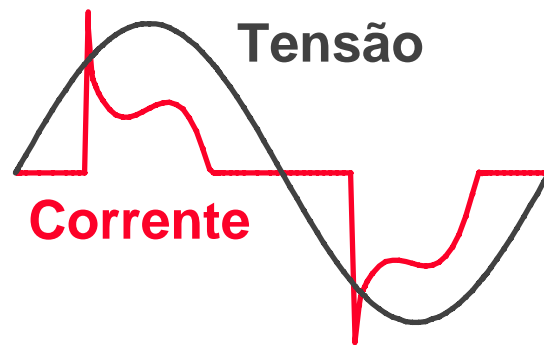
- Até cerca de 300W
- Diferentes resultados para variações na entrada CA



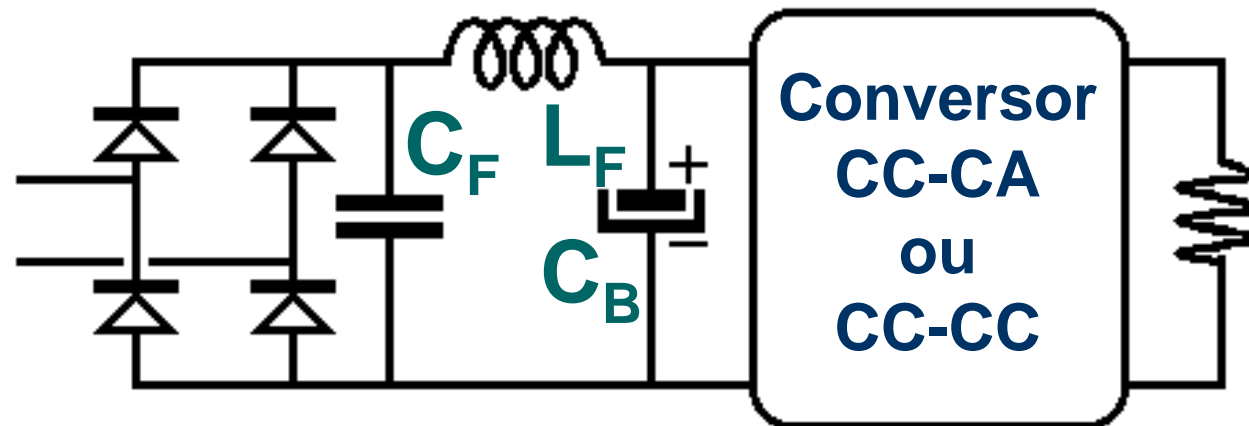
Filtro LC do Lado CC (II)



Filtro LCC do Lado CC (I)

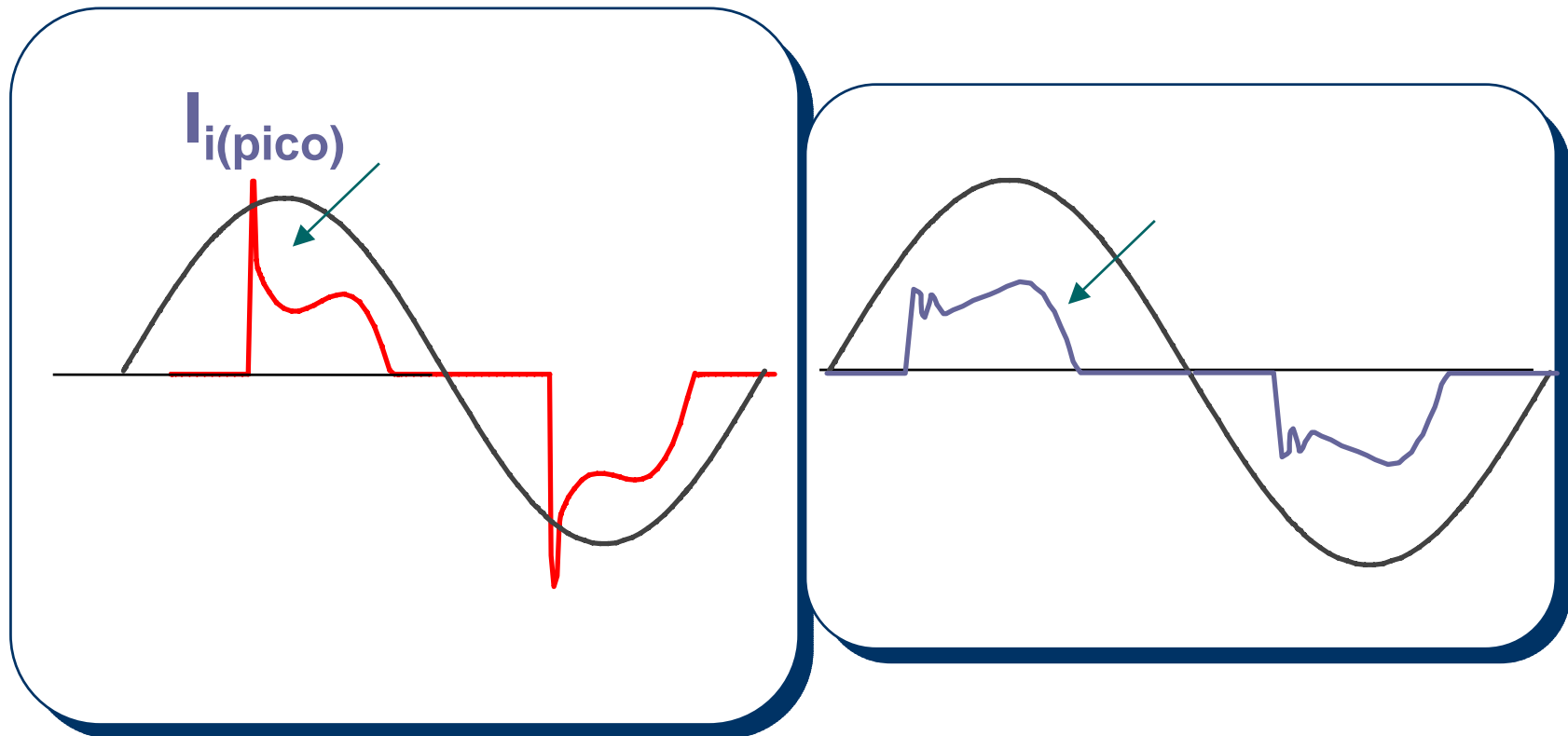


- Até cerca de 300W
- Diferentes resultados se indutor L_F & C_F lado CA



Filtro LCC do Lado CC (II)

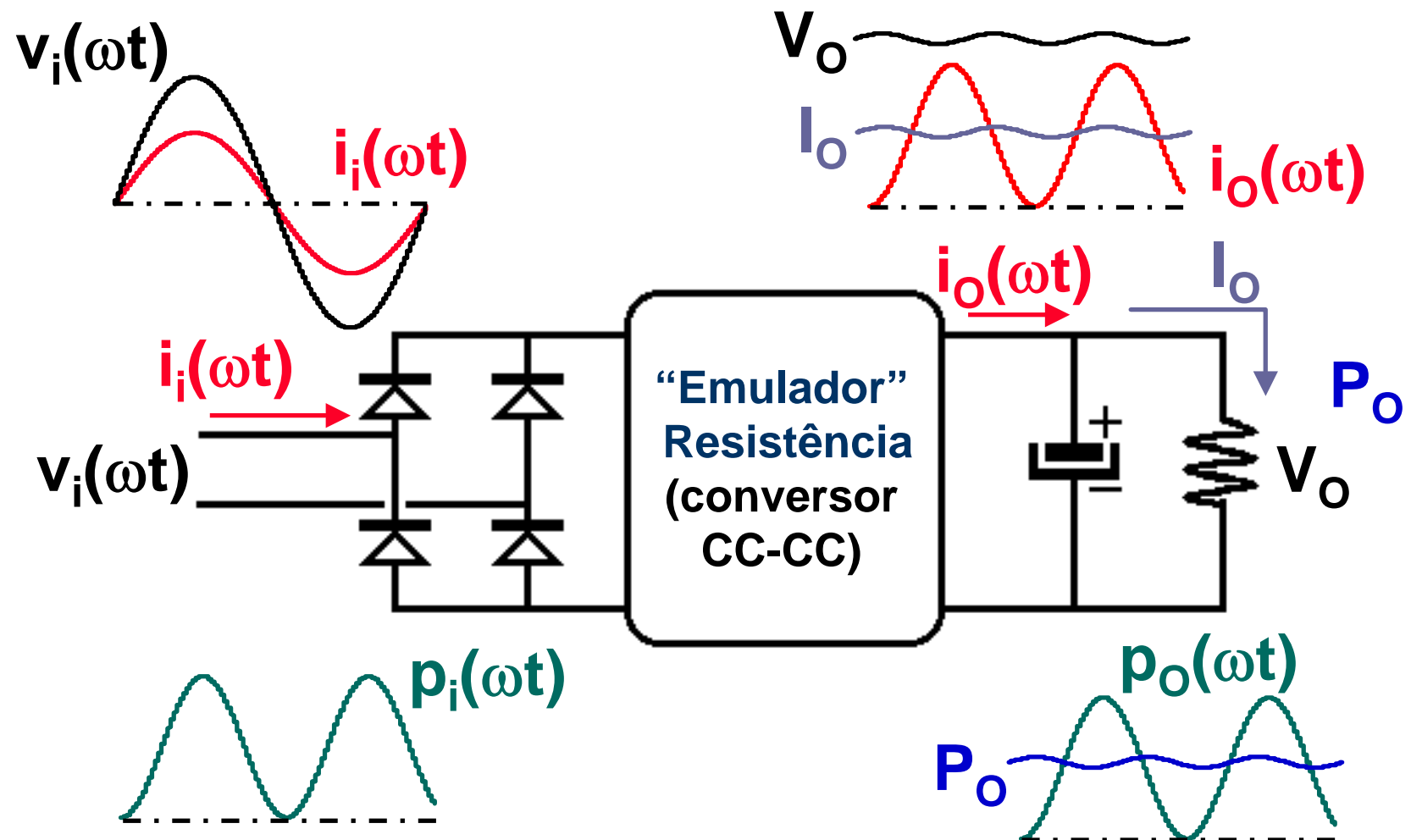
Projeto para Classe A



Tipos Soluções(III): Ativa & Senoidal

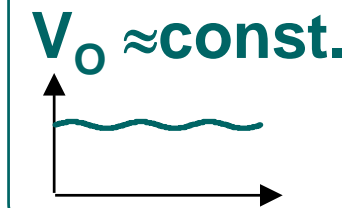
		<i>Forma de Onda da Corrente Entrada</i>	
		senoidal	não-senoidal
<i>Dispositivos</i>	passivos	passivo & senoidal	passivo & não-senoidal
	ativos	ativo & senoidal	ativo & não-senoidal

Conceito: Emulação de Resistência



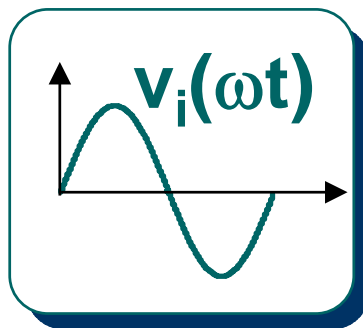
Propriedades: “Emulador” de Resistência (I)

$$m(\omega t) = \frac{V_o}{|v_i(\omega t)|} = \frac{V_o / V_{ip}}{|\text{sen}(\omega t)|}$$



$$v_i(\omega t) = V_{ip} \cdot \text{sen}(\omega t)$$

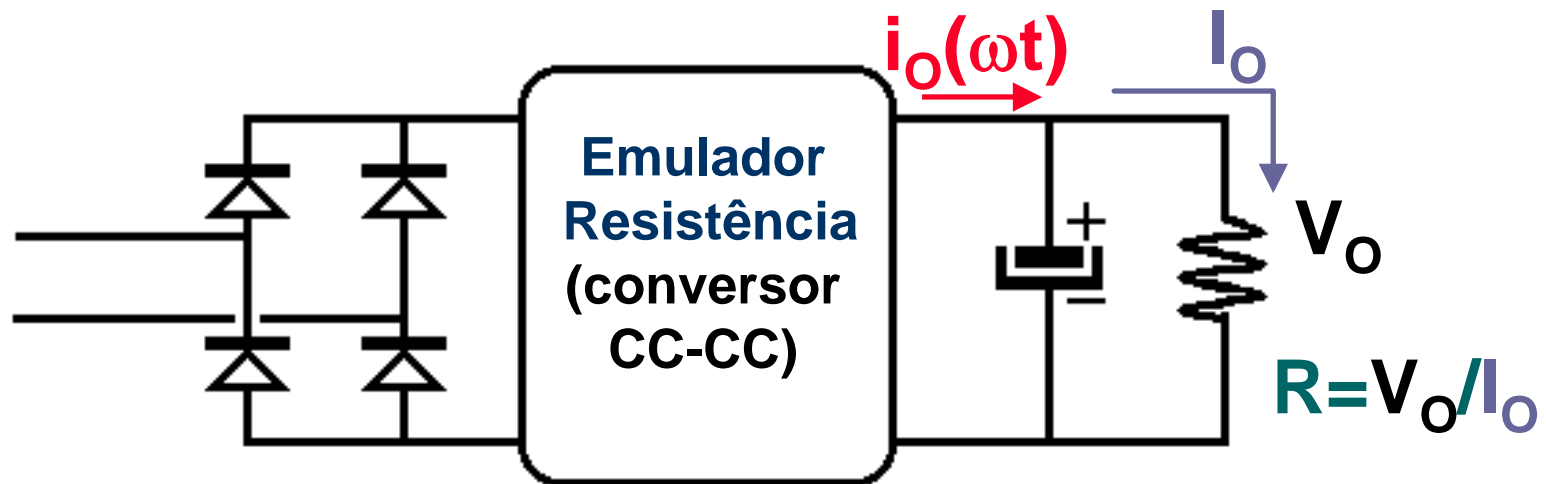
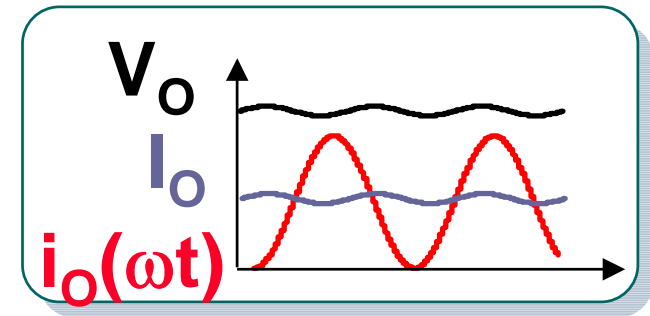
$v_i(\omega t)$



- A relação de Conversão $m(\omega t)$ varia de V_o / V_{ip} até infinito

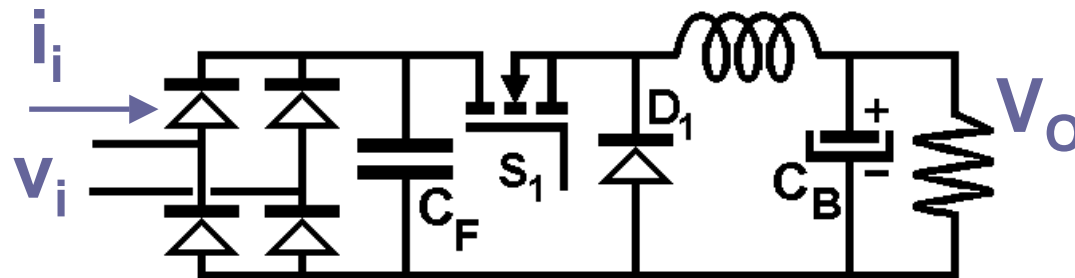
Propriedades: “Emulador” de Resistência (II)

$$r(\omega t) = \frac{V_o}{i_o(\omega t)} = \frac{R}{2 \cdot \sin^2(\omega t)}$$

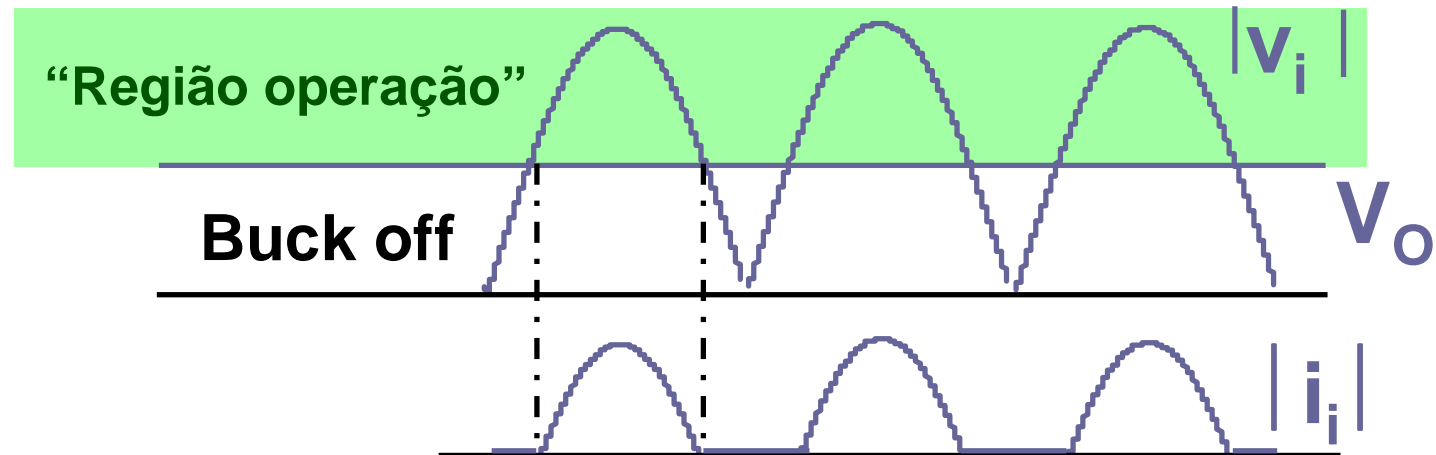


- A resistência de carga “vista” pelo conversor, $r(\omega t)$, varia de $R/2$ até infinito

Conseqüências: Propriedades, Exemplo (I)

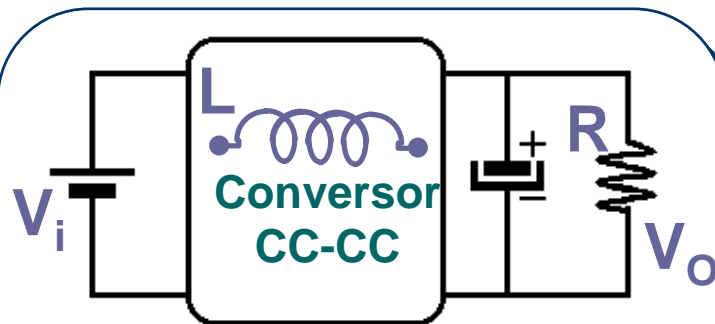


**Propriedade
#1**



Conclusão: O conversor Buck NÃO PODE operar como “Emulador” de Resistência

Conseqüências Propriedades: Modos Condução



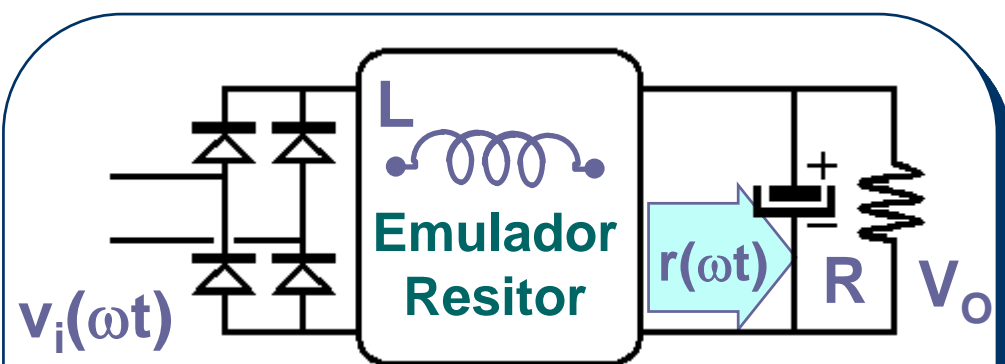
$$M = V_o / V_i$$

$$K(R) = 2L / (RT)$$

$$K(R) > K_{crit}(M) \quad \text{MCC}$$

$$K(R) < K_{crit}(M) \quad \text{MCD}$$

CC-CC



$$m(\omega t) = V_o / v_i(\omega t)$$

$$k[r(\omega t)] = 2L / [r(\omega t)T]$$

$$k[r(\omega t)] > k_{crit}[m(\omega t)] \quad \text{MCC}$$

$$k[r(\omega t)] < k_{crit}[m(\omega t)] \quad \text{MCD}$$

CA-CC

Conseqüências Propriedades: Modos Condução

$$\begin{array}{ll} k[r(\omega t)] > k_{\text{crit}}[m(\omega t)] & \text{MCC} \\ k[r(\omega t)] < k_{\text{crit}}[m(\omega t)] & \text{MCD} \end{array}$$

$$\begin{array}{l} k'_{\text{crit}}[m(\omega t)] = k_{\text{crit}}[m(\omega t)] / [2 \sin^2(\omega t)] \\ K_{\text{aparente}}(R) = 2L / (RT) \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} K_{\text{aparente}}(R) > k'_{\text{crit}}[m(\omega t)] & \text{MCC} \\ K_{\text{aparente}}(R) < k'_{\text{crit}}[m(\omega t)] & \text{MCD} \end{array}$$

Conseqüências Propriedades: Modos Condução

$$\begin{array}{ll} K_{\text{aparente}}(R) > k'_{\text{crit}}[m(\omega t)] & \text{MCC} \\ K_{\text{aparente}}(R) < k'_{\text{crit}}[m(\omega t)] & \text{MCD} \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{max. de } \{k'_{\text{crit}}[m(\omega t)]\} = k'_{\text{crit max}} \\ \text{min. de } \{k'_{\text{crit}}[m(\omega t)]\} = k'_{\text{crit min}} \end{array}$$

OPERAÇÃO MCC: $K_{\text{aparente}}(R) > k'_{\text{crit max}}$

OPERAÇÃO MCD: $K_{\text{aparente}}(R) < k'_{\text{crit min}}$

Conseqüências Propriedades: Modos Condução

OPERAÇÃO MCC: $K_{\text{aparente}}(R) > k'_{\text{crit max}}$

OPERAÇÃO MCD: $K_{\text{aparente}}(R) < k'_{\text{crit min}}$

$$v_i(\omega t) = V_{ip} \text{sen}(\omega t)$$

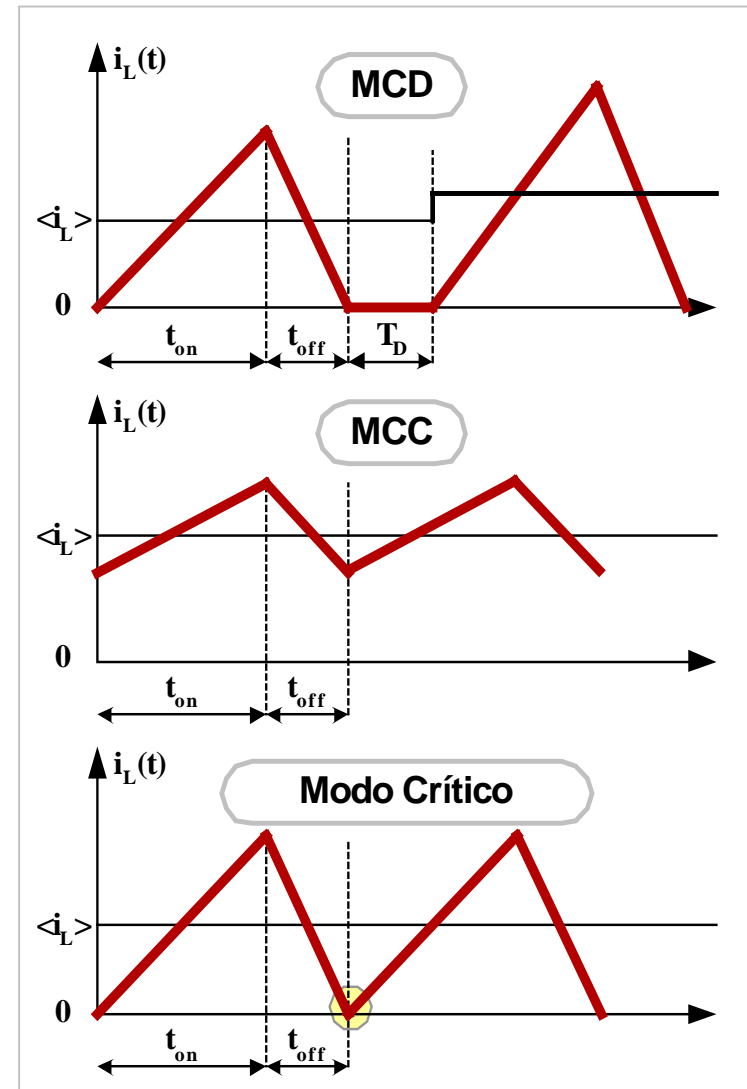
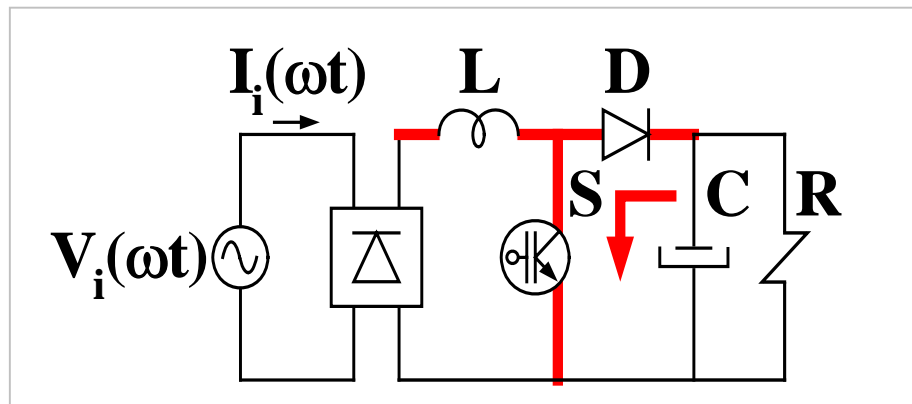
$$M = V_o / V_{ip}$$

	$K'_{\text{crit max}}$	$K'_{\text{crit min}}$
Buck-Boost, SEPIC, Cuk	$1/(2M^2)$	$1/(2M+1)^2$
Boost	$1/(2M^2)$	$(M-1)/(2M^3)$

Emulação de Resistência: Modos de Condução

■ Modos de Operação

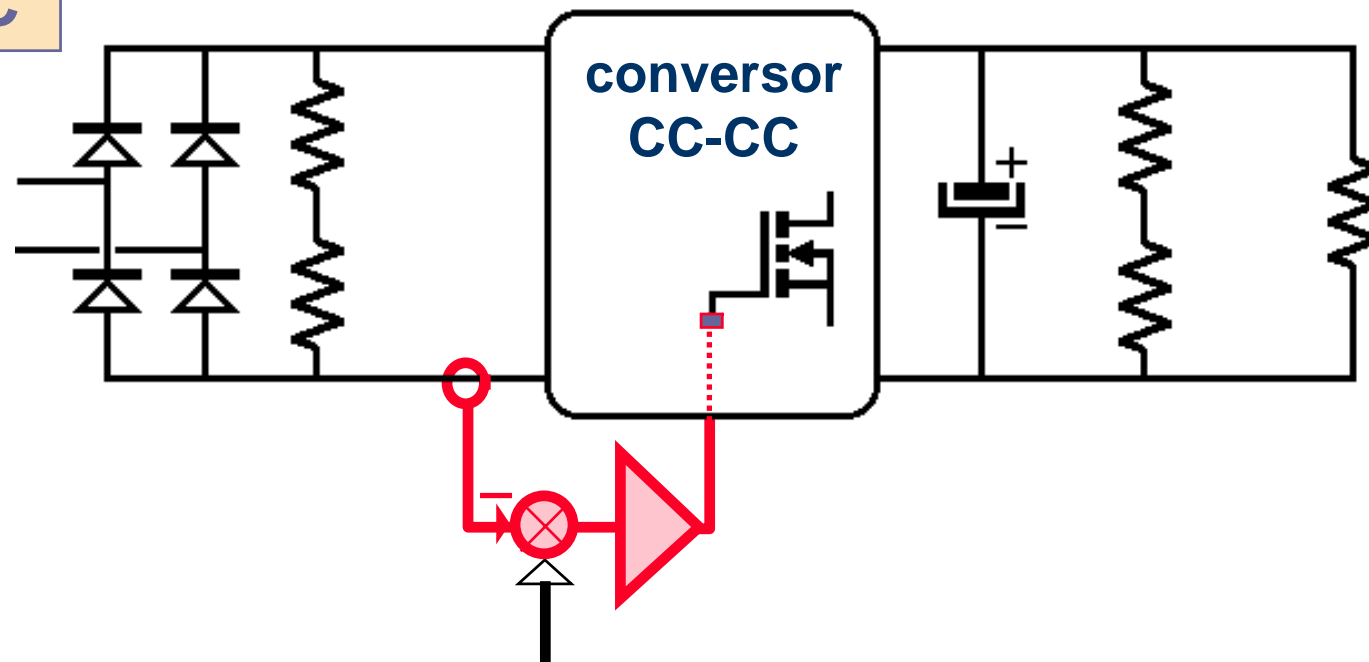
**Exemplo:
Conversor
Retificador Boost**



Técnicas de Controle: Emulação Resistência

Uso de Circuito Multiplicador (I)

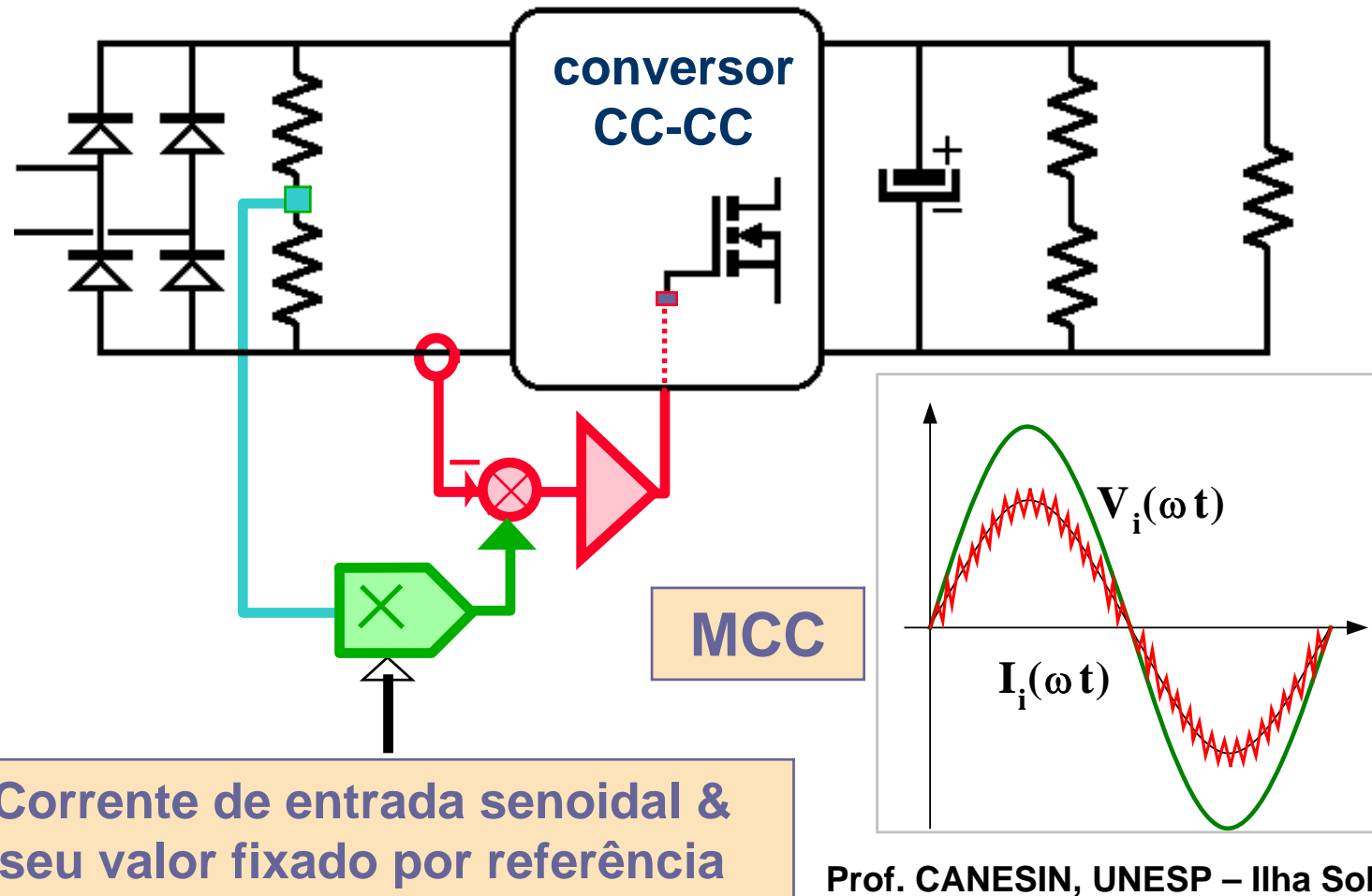
MCC



Corrente entrada fixada por referência

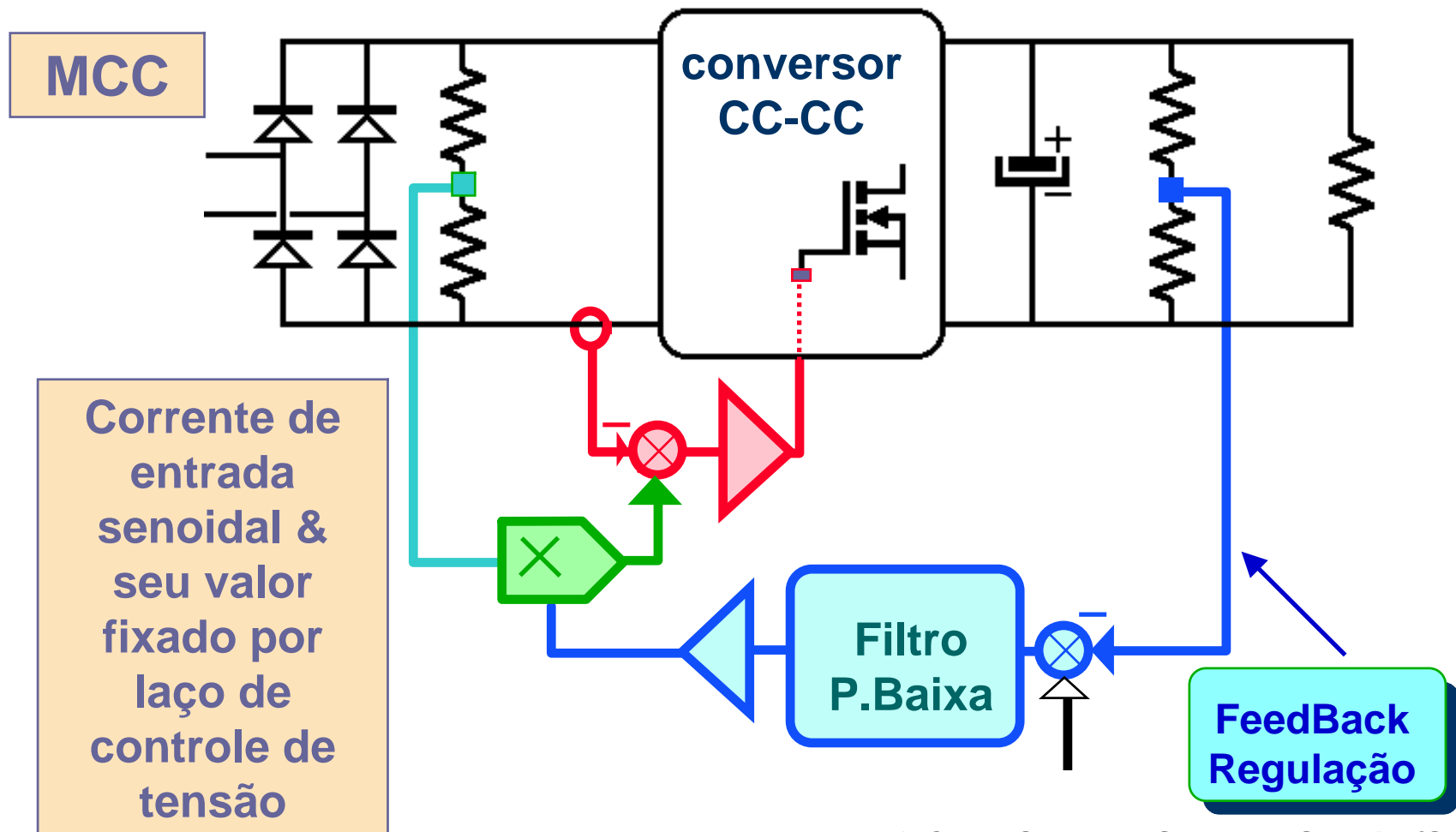
Técnicas de Controle: Emulação Resistência

Uso de Circuito Multiplicador (II)



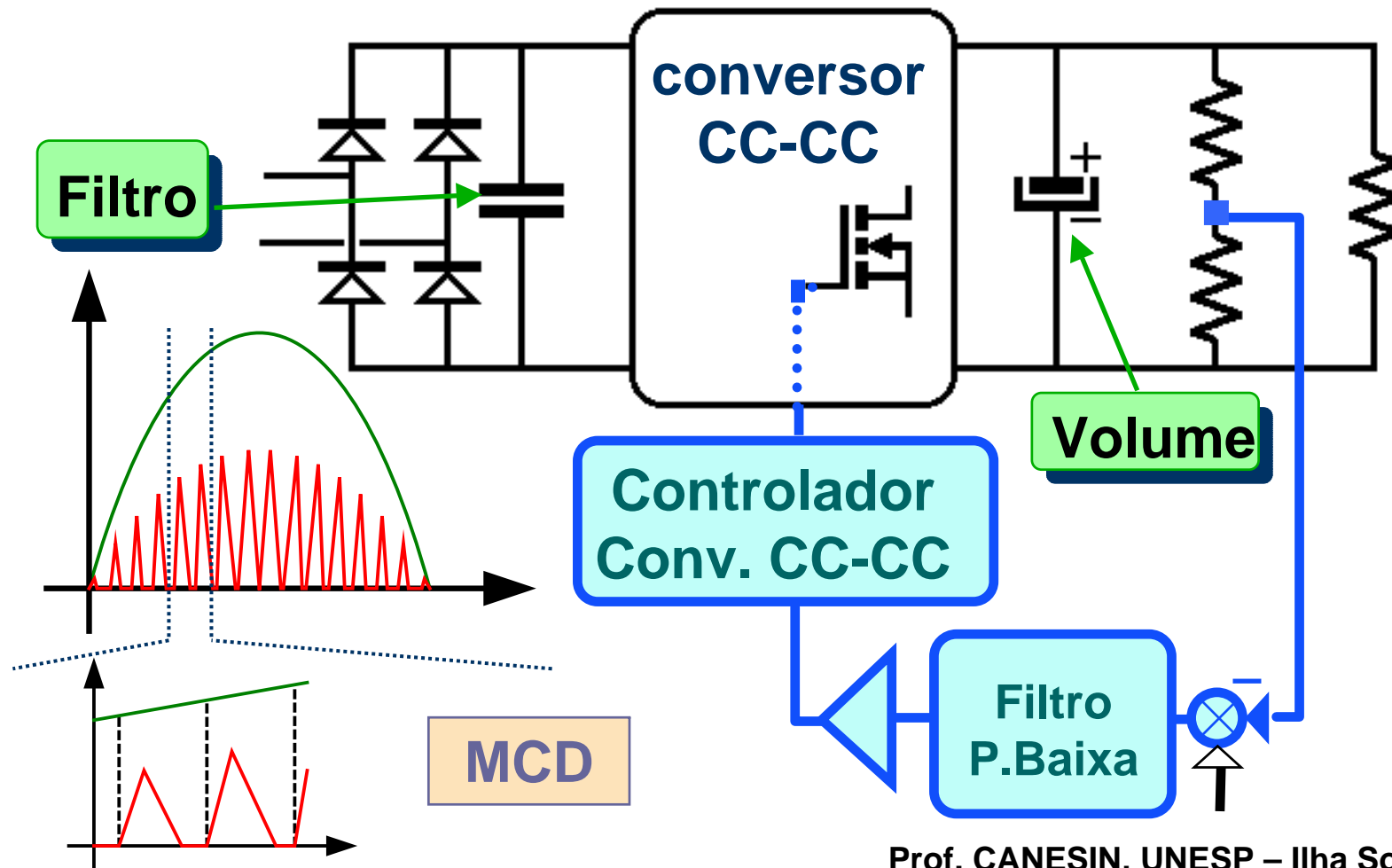
Técnicas de Controle: Emulação Resistência

Uso de Circuito Multiplicador (III)



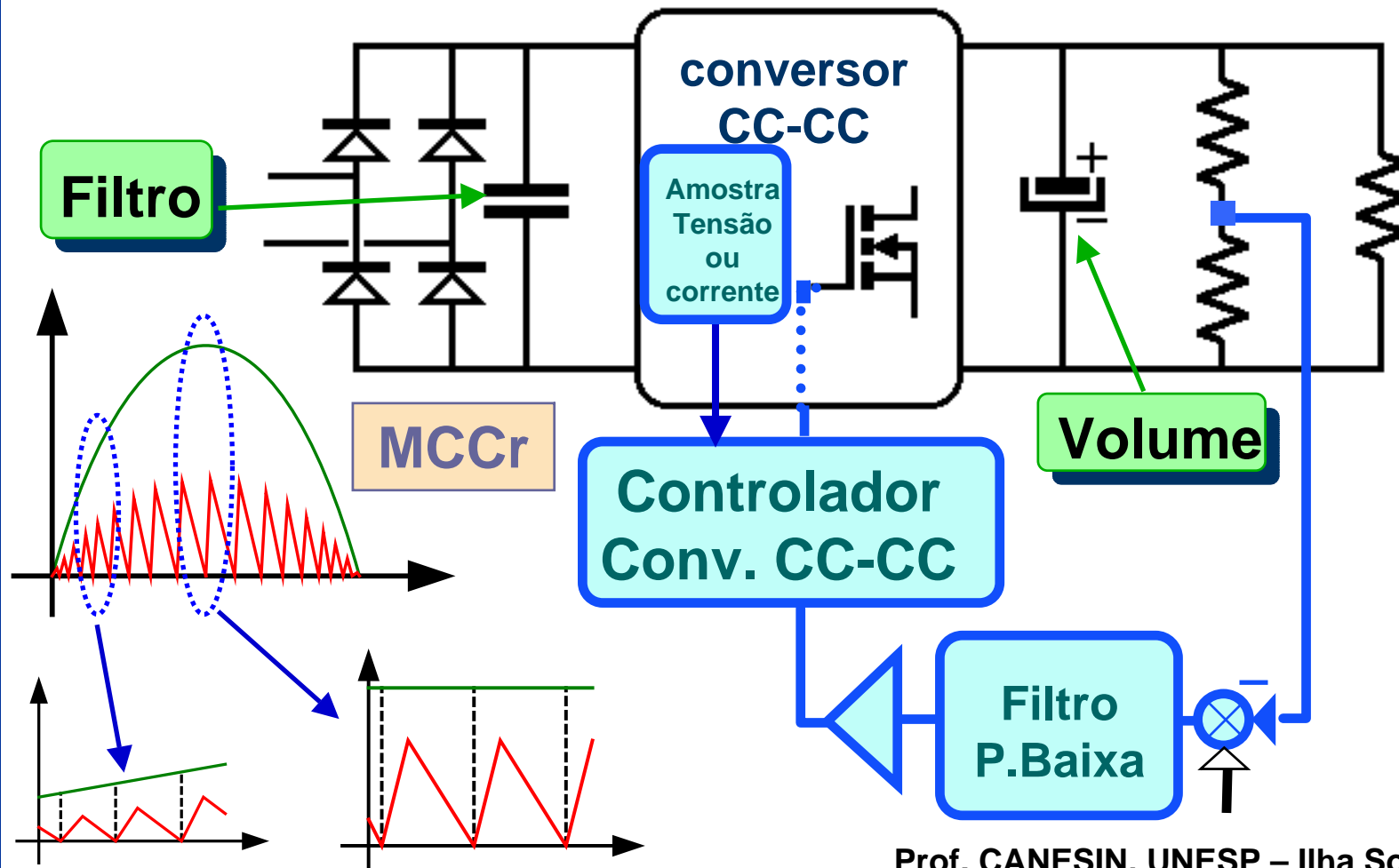
Técnicas de Controle: Emulação Resistência

Técnica Seguidor de Tensão (I)



Técnicas de Controle: Emulação Resistência

Técnica Seguidor de Tensão (II)



Técnicas de Controle/Modos Condução: Comparações

Multiplicador

MCC

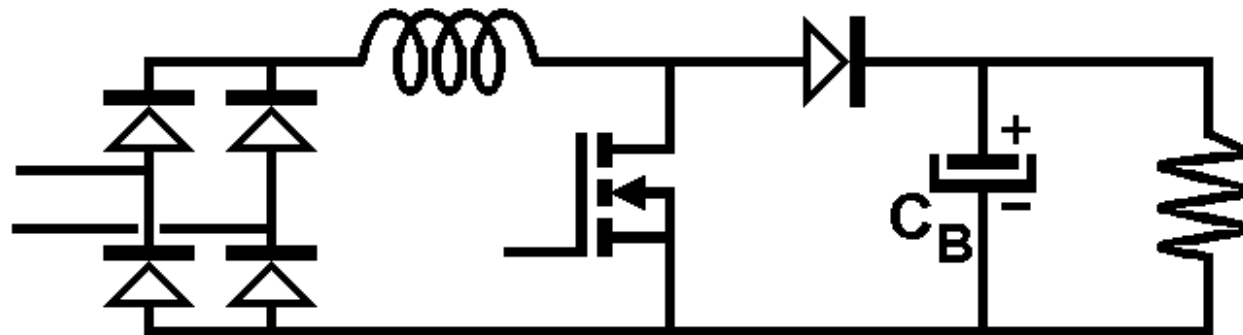
- 👍 Baixas ou elevadas impedâncias de saída
- 👍 Excelente FP & DHT
- 👍 Reduzidas perdas no Transistor
- 👎 Uso Sensor Corrente
- 👎 Uso Multiplicador
- 👎 Maior Custo

Seguidor-Tensão

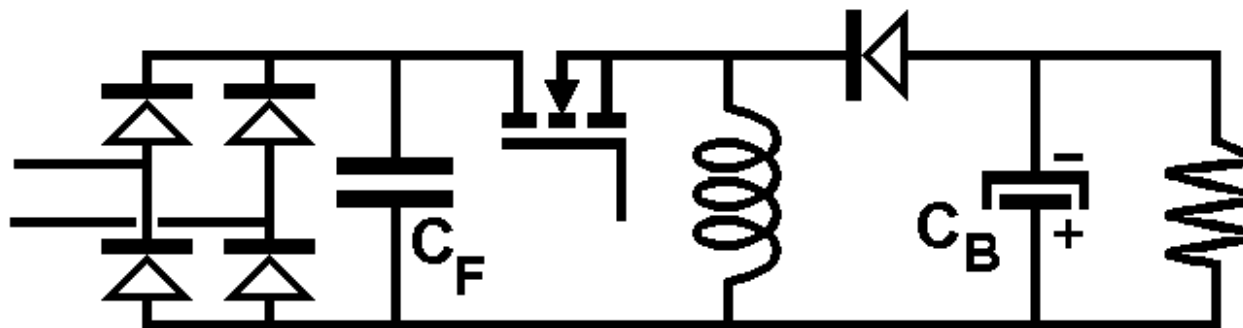
MCD

- 👍 Sem Sensor Corrente
- 👍 Sem Multiplicador
- 👍 Baixo Custo
- 👍 Baixas Perdas Diodo
- 👎 Somente Elevadas Impedâncias de saída
- 👎 Alguns casos DHT

Emulação de Resistência: Estruturas (Não Isoladas)

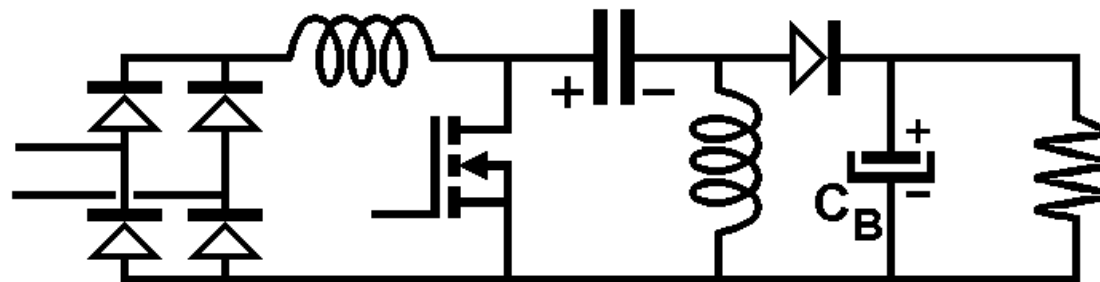


Boost

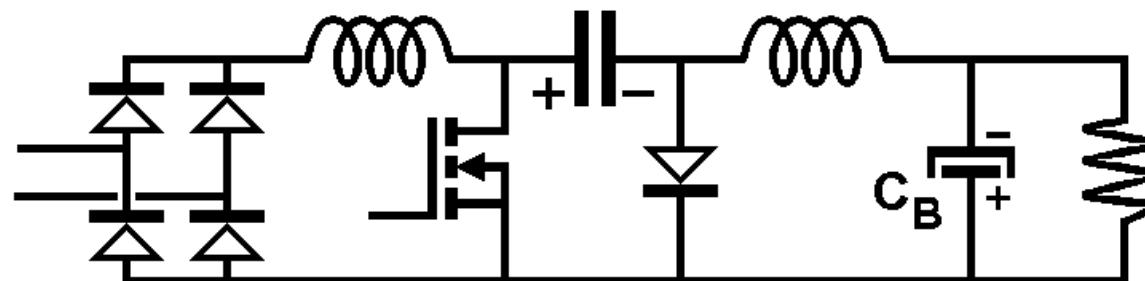


Buck-boost

Emulação de Resistência: Estruturas (Não Isoladas)



SEPIC



Cuk

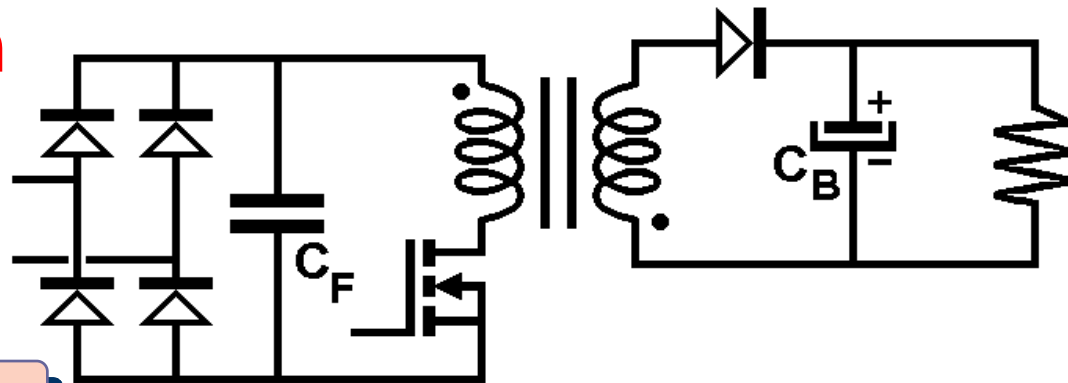
Emulação de Resistência: Comparações(Estruturas)

Comparações: Estruturas Básicas

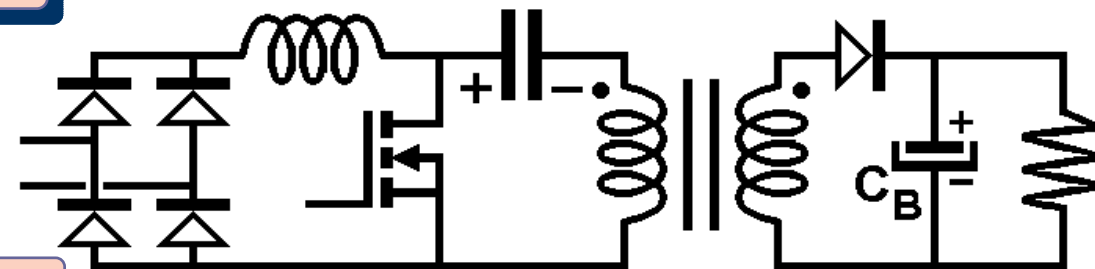
	esforço semic.	indutor entrada	Interrupt. “Massa”	V_o / V_i	Isolação galvânica (possível)	Proteção
Boost	Baixo	Sim	Sim	>1	Não	Não
Buck- Boost	Alto	Não	Não	$<1, >1$	Sim	Sim
SEPIC & Cuk	Alto	Sim	Sim	$<1, >1$	Sim	Sim

Emulação de Resistência: Estruturas (Isoladas)

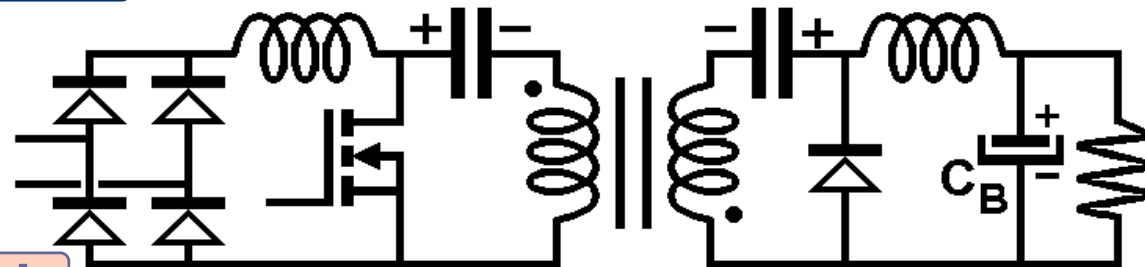
- Somente Um Interruptor
- Isolação



Flyback



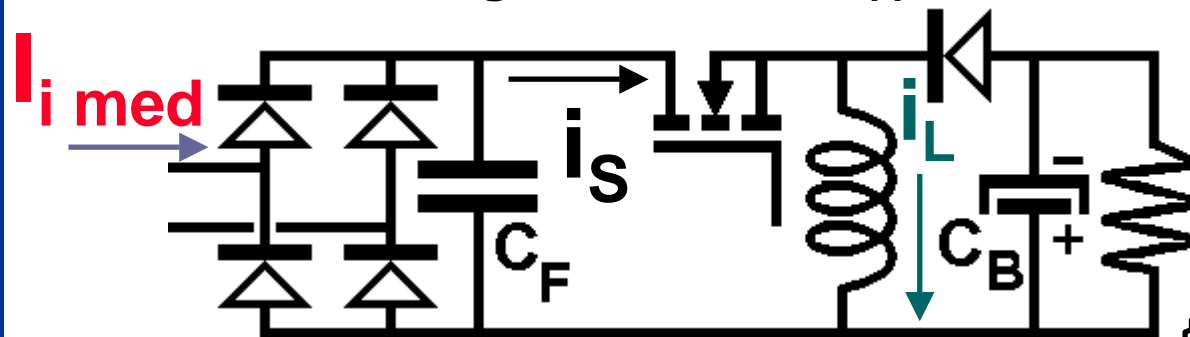
Sepic



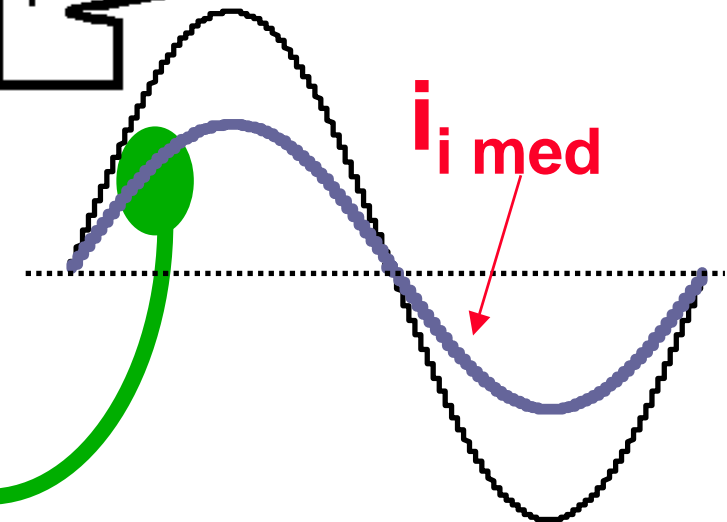
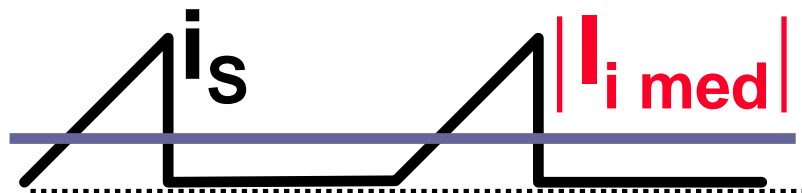
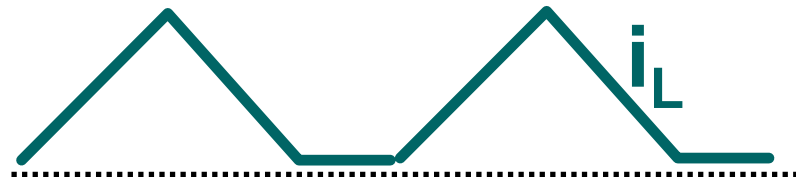
Cuk

Emulação de Resistência: Exemplos Estruturas

Controle: Seguidor Tensão (I)



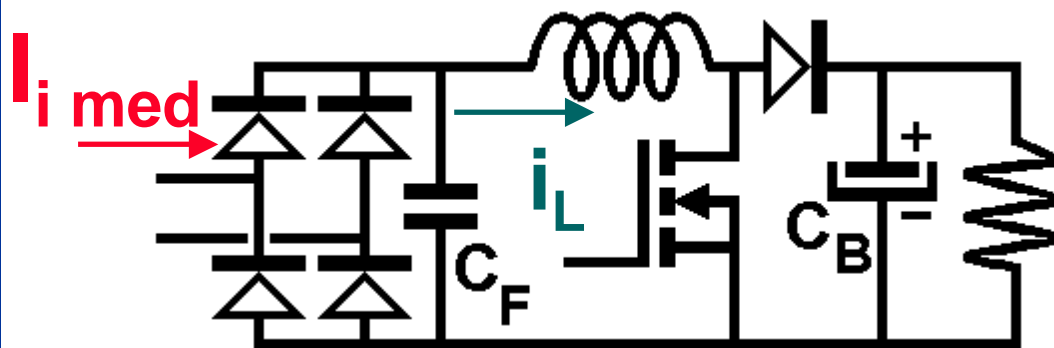
Buck-Boost
no MCD



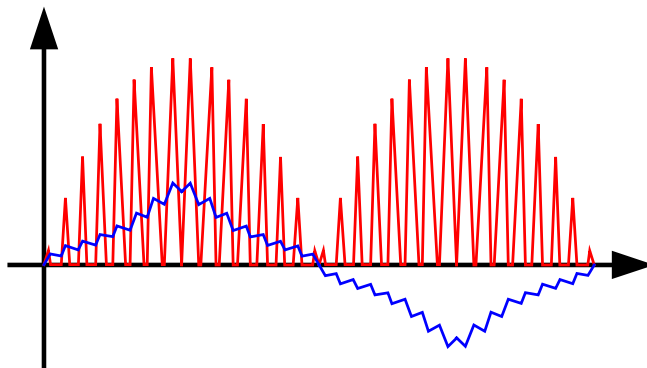
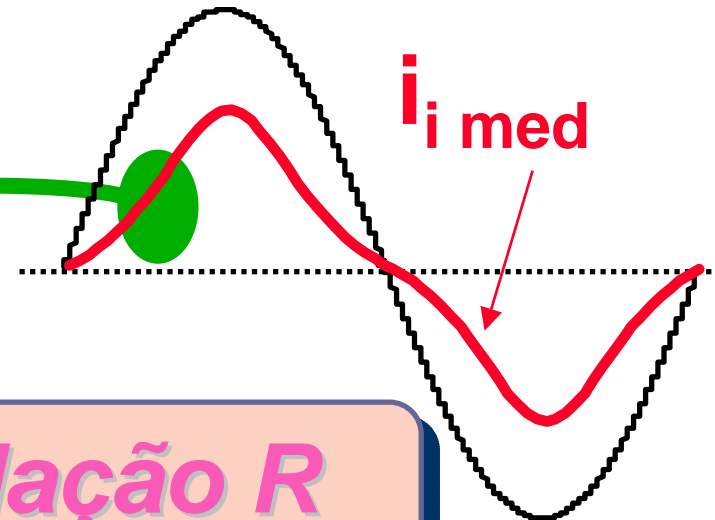
Forma Ideal
Emulação R

Emulação de Resistência: Exemplos Estruturas

Controle: Seguidor Tensão (II)



Boost MCD,
 $f_s = \text{const.}$



*Emulação R
Não Ideal*

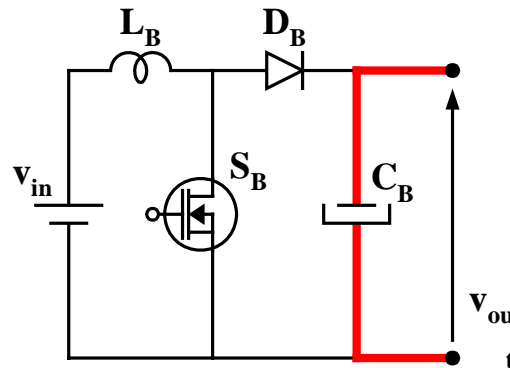
Pré-Regulador Retificador Boost MCD (I)

**Ciclo Genérico
de Comutação**
“Condições Idealizadas”

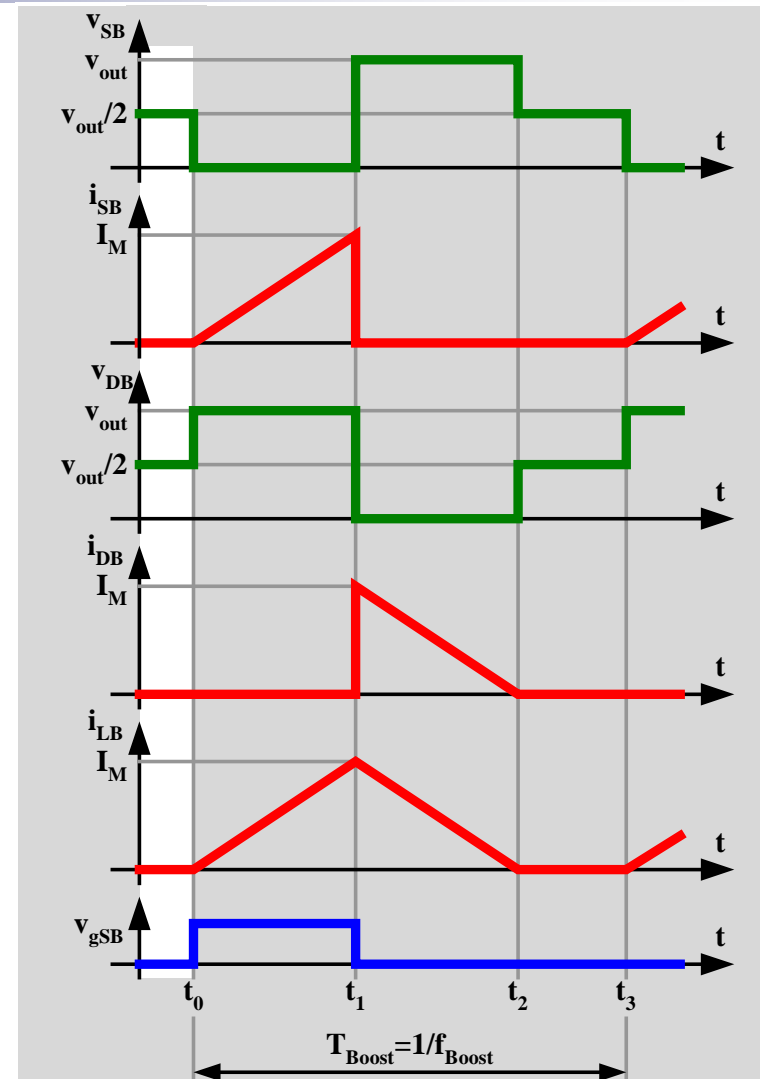
MCD

Etapas de Funcionamento:

Condição Inicial (antes de t_0)

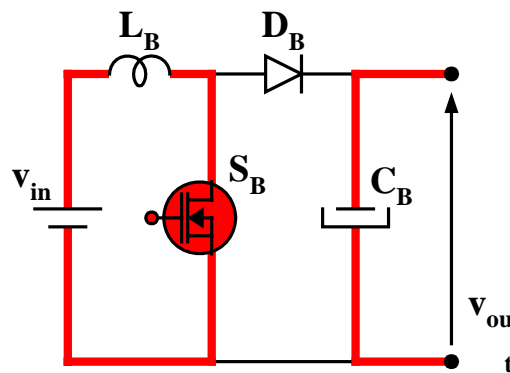


- O capacitor C_B sustenta toda a requisição da carga.



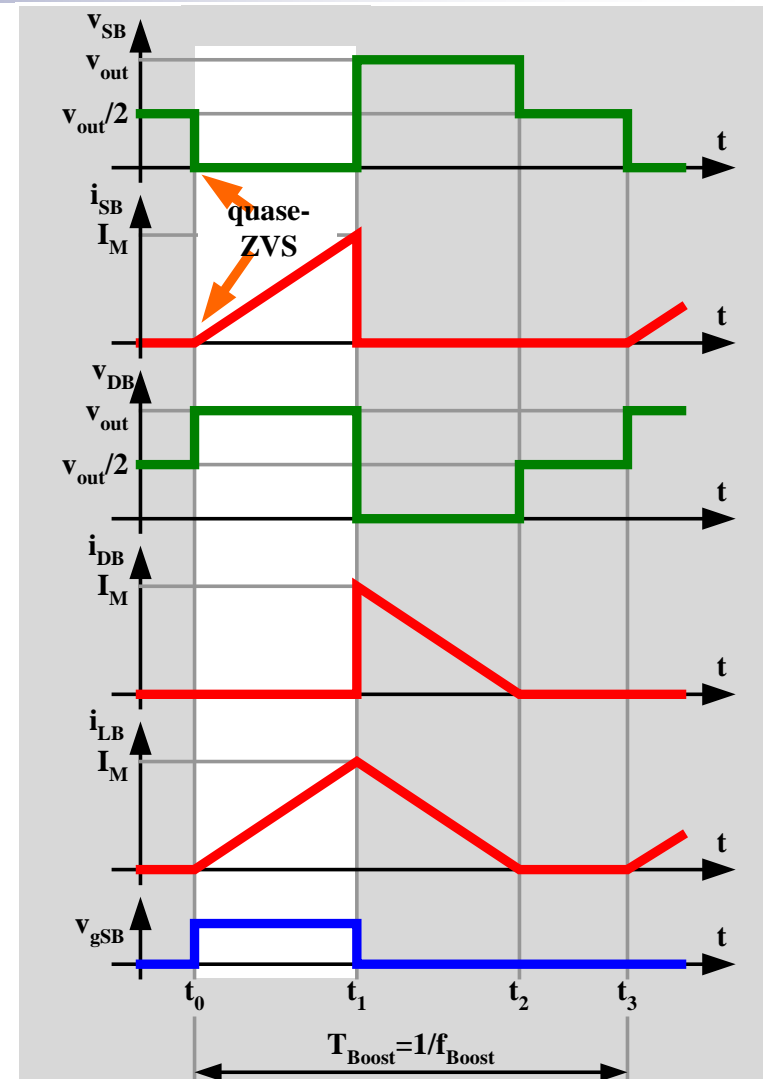
Pré-Regulador Retificador Boost MCD (II)

Primeira Etapa [t_0, t_1]



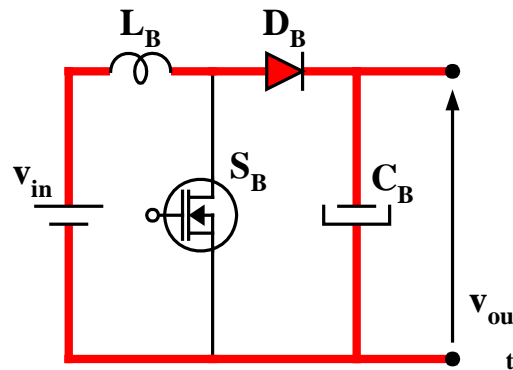
- Entrada em condução suave de S_B , em $t=t_0$.

$$i_{LB}(t) = \frac{v_{in}}{L_B} \cdot t$$



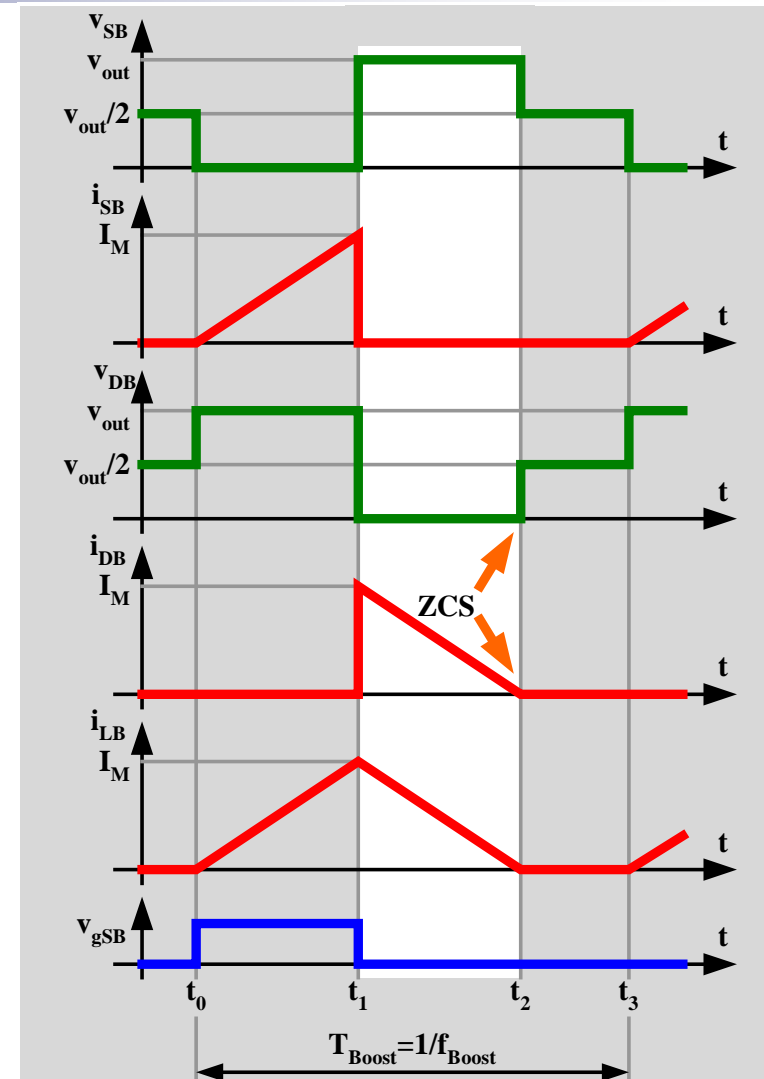
Pré-Regulador Retificador Boost MCD (III)

Segunda Etapa [t_1, t_2]



- Bloqueio suave de D_B , em $t=t_2$.
- Minimização da recuperação reversa de D_B .

$$i_{LB}(t) = I_M(\omega t) - \frac{v_{out} - v_{in}}{L_B} \cdot t$$



Pré-Regulador Retificador Boost MCD (IV)

- Minimização da recuperação reversa de D_B .
- Minimização das perdas e da interferência eletromagnética causadas pela recuperação reversa de D_B .

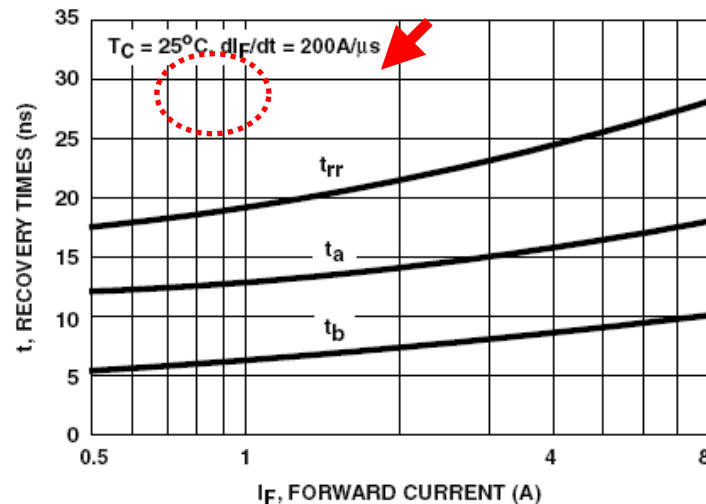


FIGURE 3. t_{rr} , t_a AND t_b CURVES vs FORWARD CURRENT

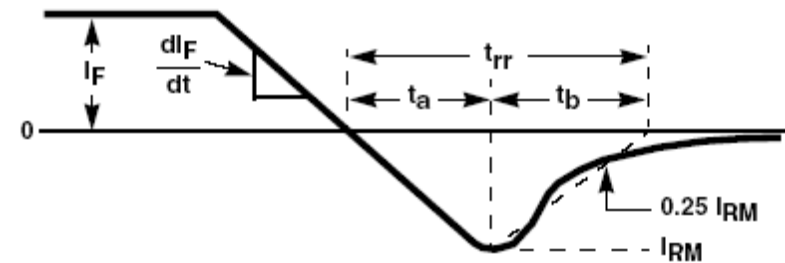


FIGURE 9. t_{rr} WAVEFORMS AND DEFINITIONS

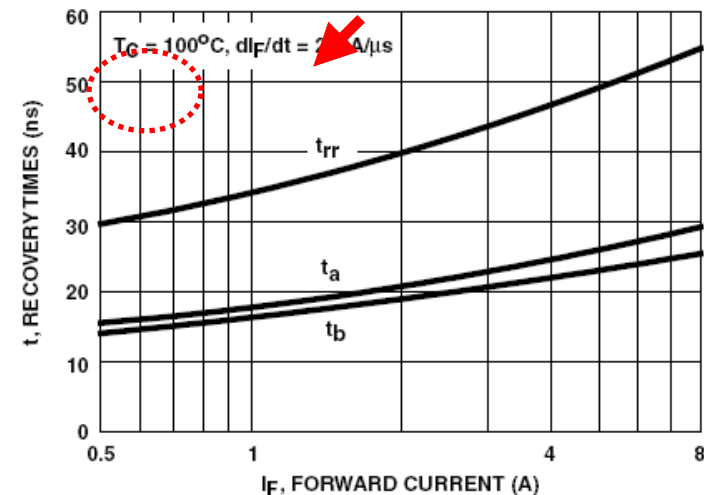
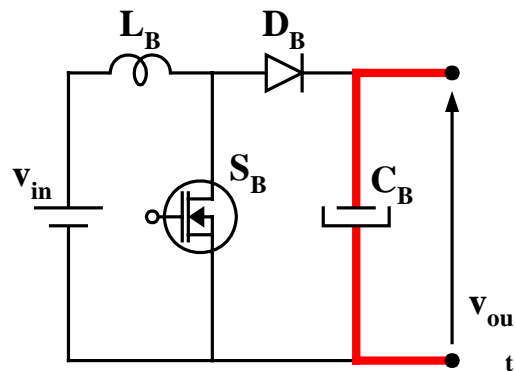


FIGURE 4. t_{rr} , t_a AND t_b CURVES vs FORWARD CURRENT

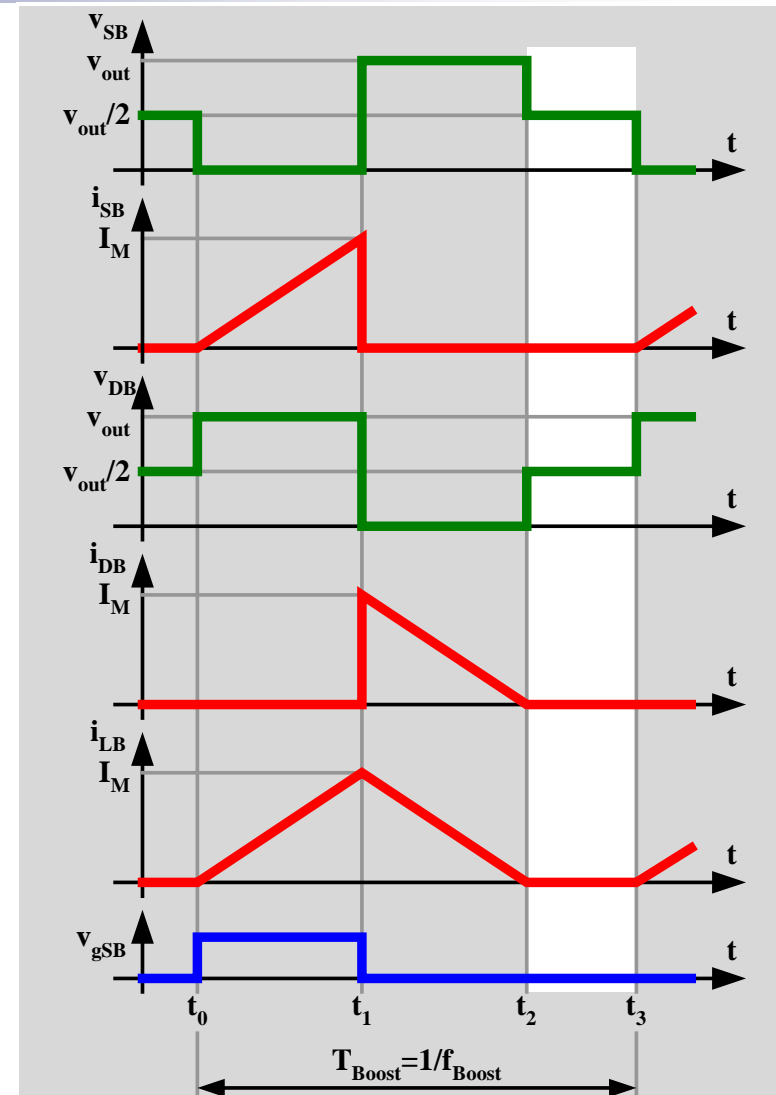
Pré-Regulador Retificador Boost MCD (V)

Terceira Etapa [t_2, t_3]



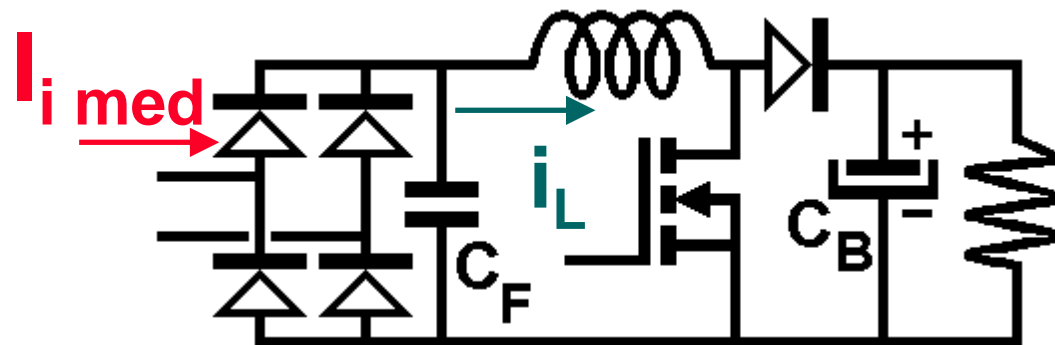
- O capacitor C_B sustenta toda a requisição da carga.

$$i_{LB}(t) = 0$$

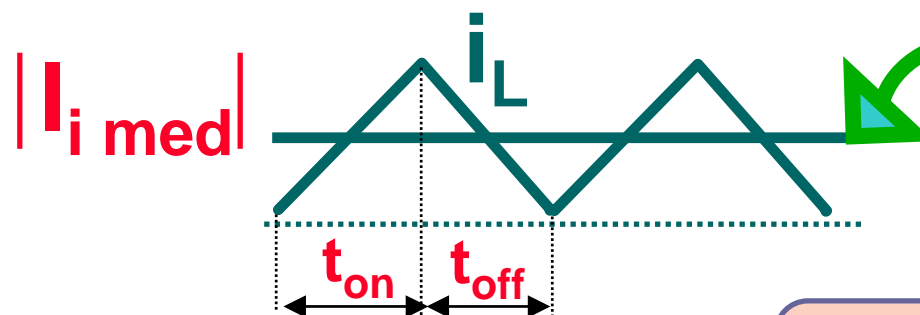


Emulação de Resistência: Exemplos Estruturas

Controle: Seguidor Tensão (III)

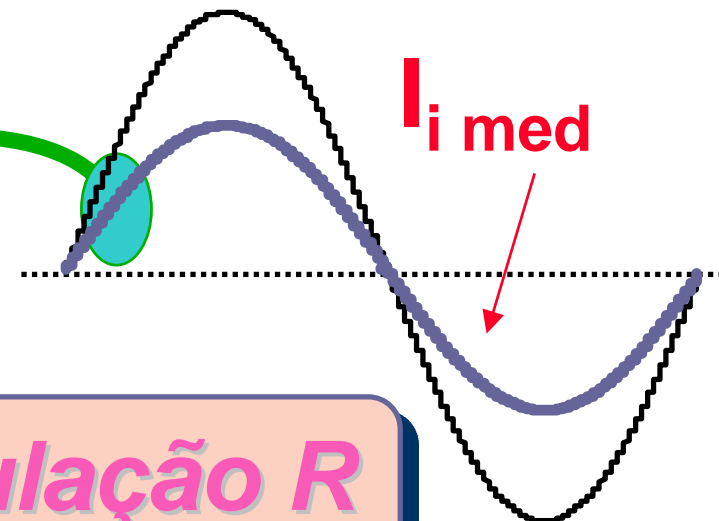


Boost no
limite
MCD/MCC



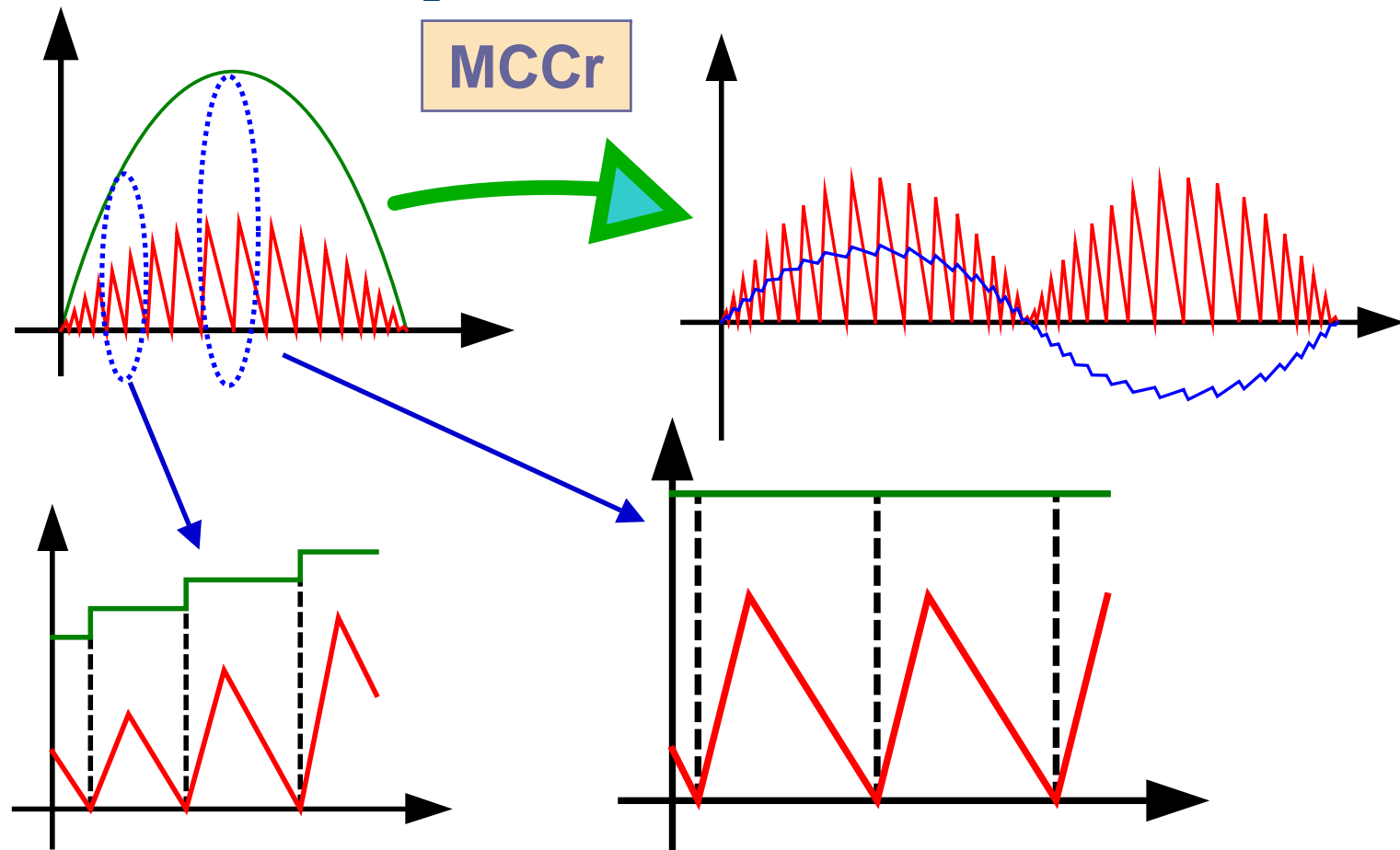
- t_{on} const. em cada ciclo
- t_{off} depende de $v_i = (\omega t)$
- Portanto, $f_s = \text{variável}$

Emulação R
Ideal (MCCr)



Exemplo Estruturas: Retificador Boost MCCr

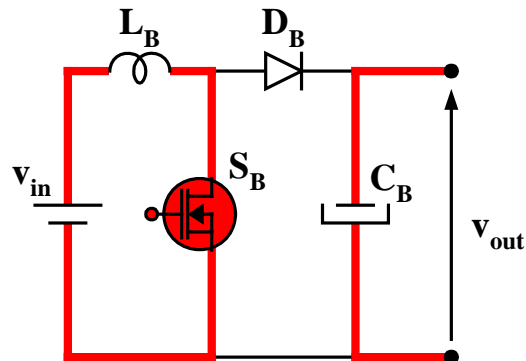
• Principais Formas de Onda



Pré-Regulador Retificador Boost MCCr (I)

Etapas de Funcionamento,
Idealizadas:

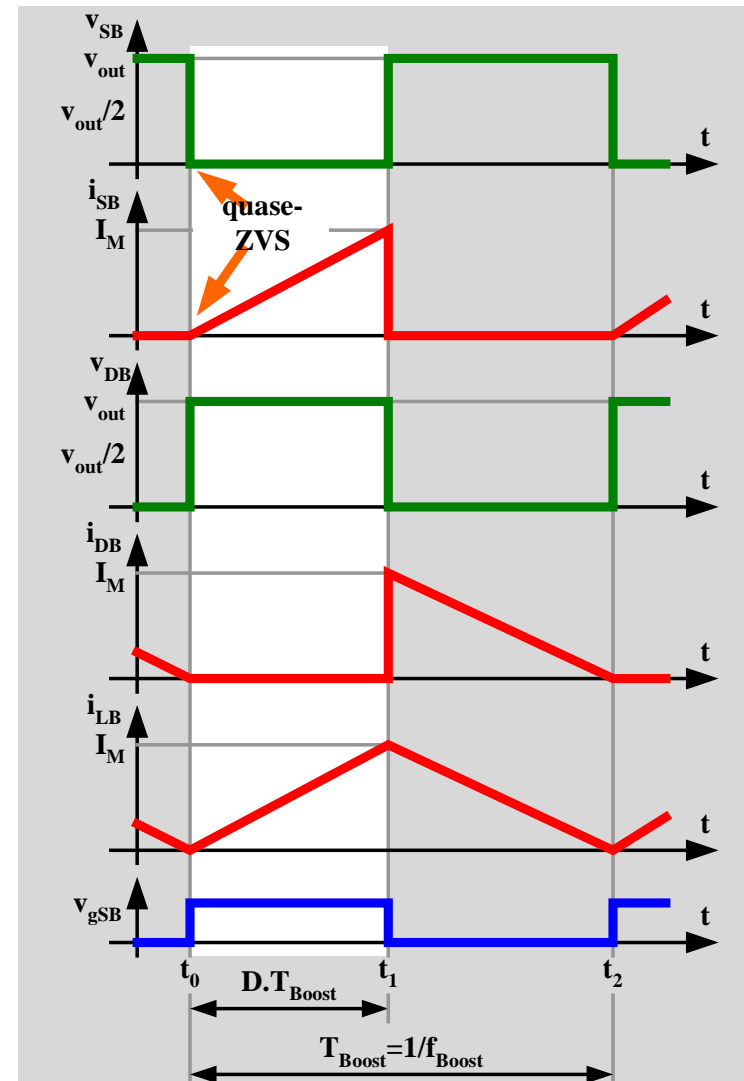
Primeira Etapa [t_0, t_1]



- Entrada em condução suave de S_B , em $t=t_0$.

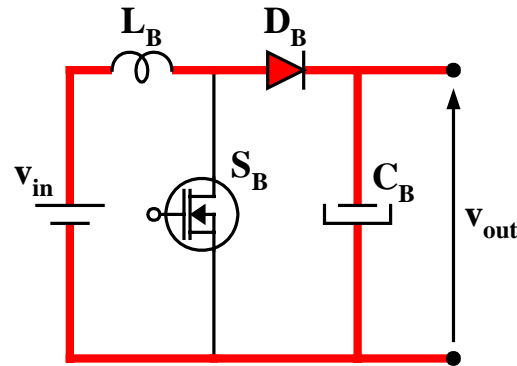
$$i_{LB}(t) = \frac{v_{in}}{L_B} \cdot t$$

$$i_{LB}(t_1) = I_M(\omega t)$$



Pré-Regulador Retificador Boost MCCr (II)

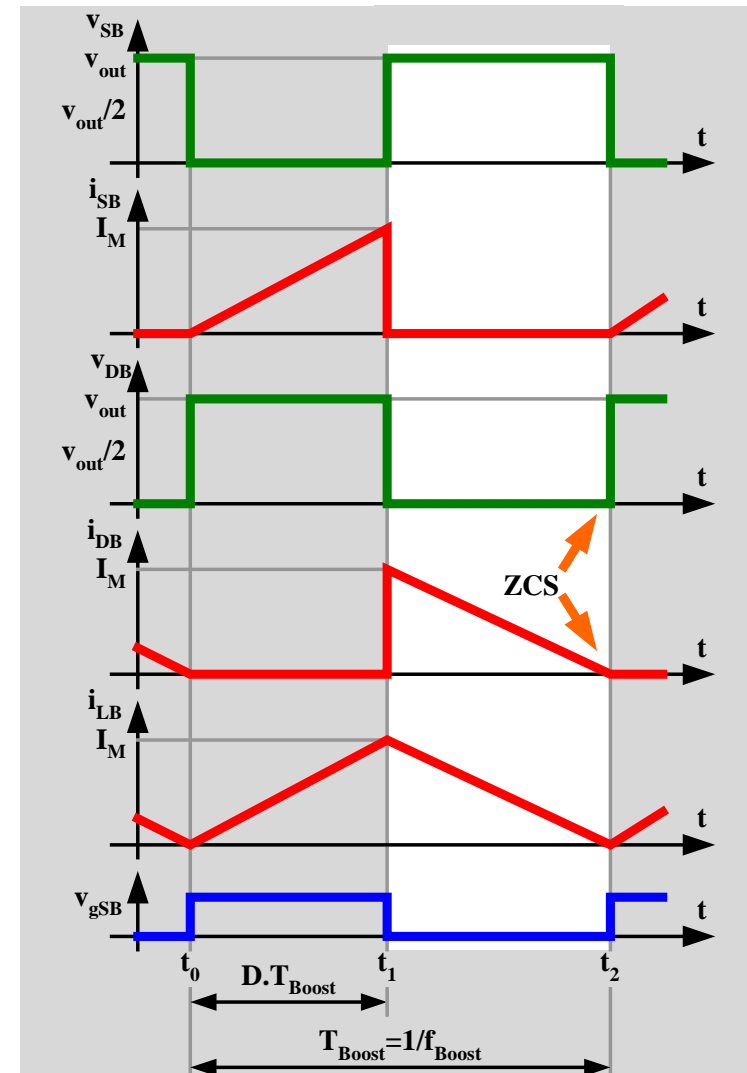
Segunda Etapa $[t_1, t_2]$



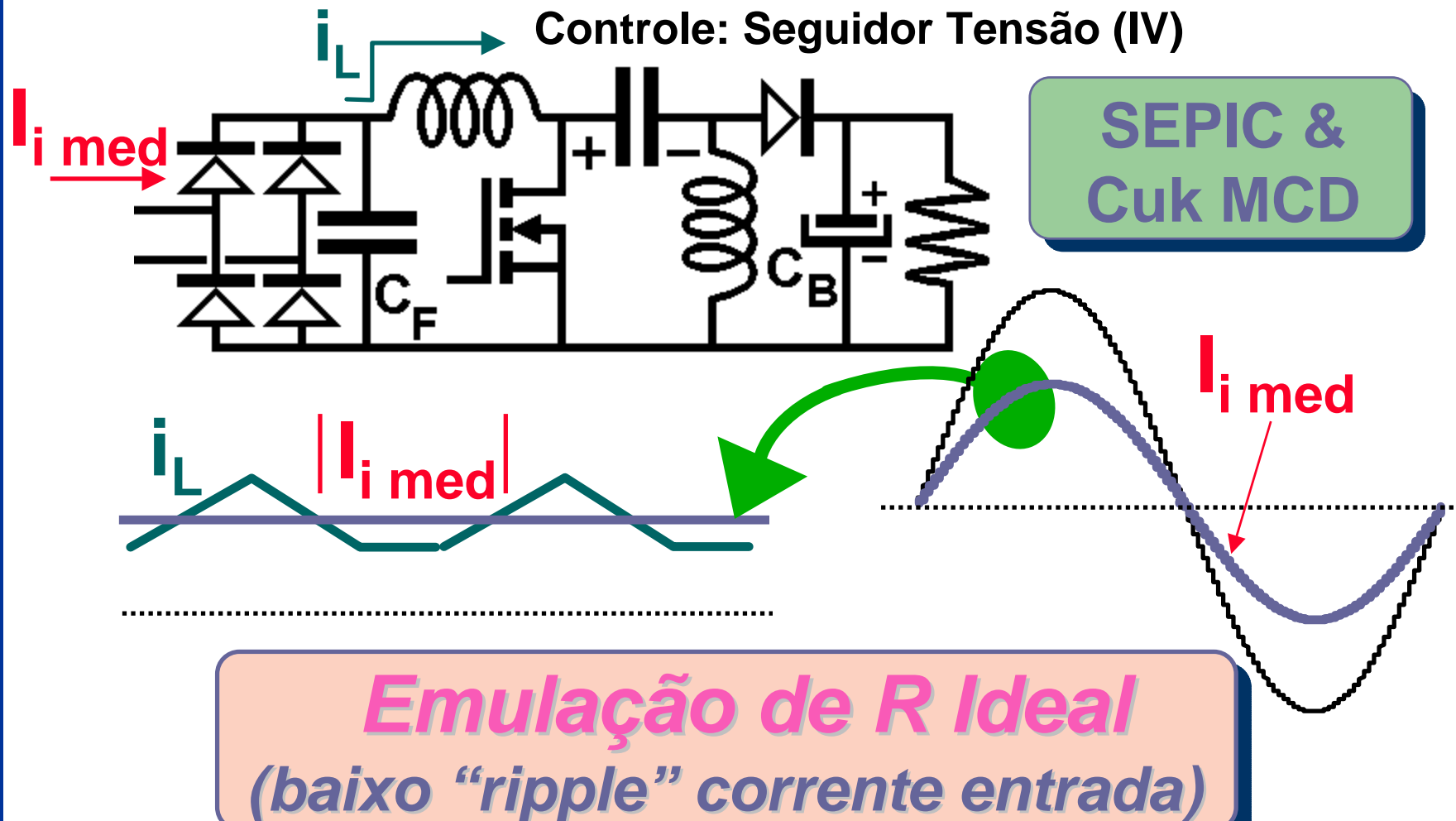
- Bloqueio suave de D_B , em $t=t_2$.
- Minimização da recuperação reversa de D_B .

$$i_{LB}(t) = I_M(\omega t) - \frac{v_{out} - v_{in}}{L_B} \cdot t$$

$$\mathbf{i}_{LB}(t_2) = \mathbf{0}$$

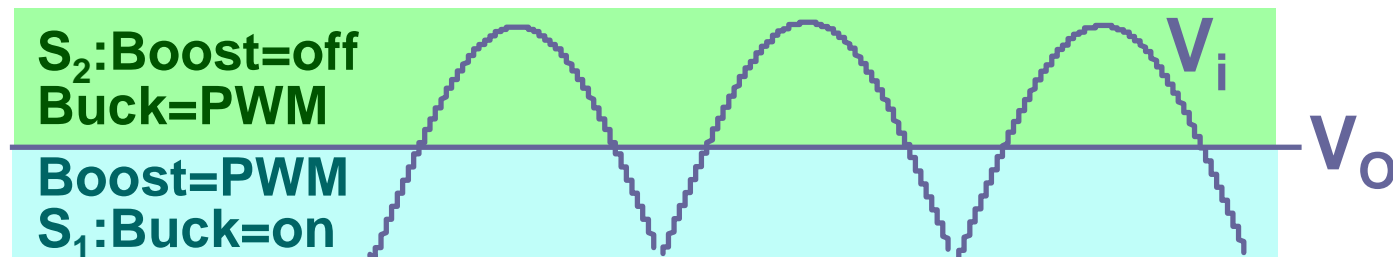
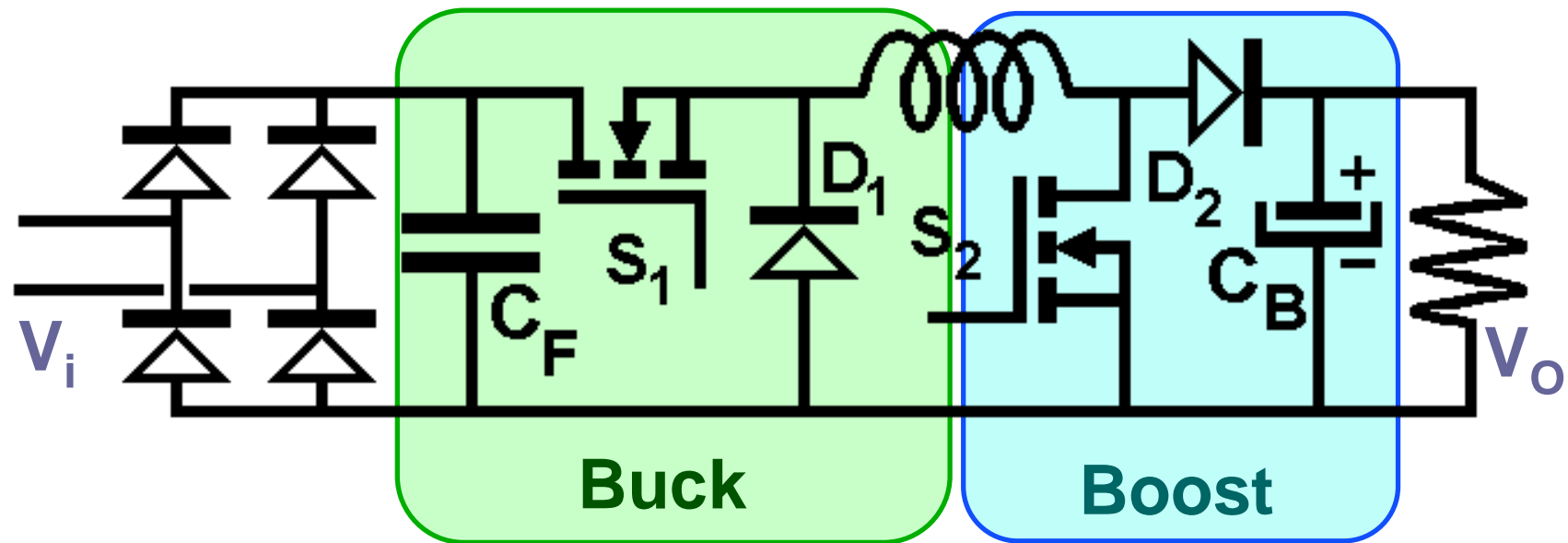


Emulação de Resistência: Exemplos Estruturas



Emulação de Resistência: Exemplos Estruturas

•Dois Interruptores (Sem Isolação)

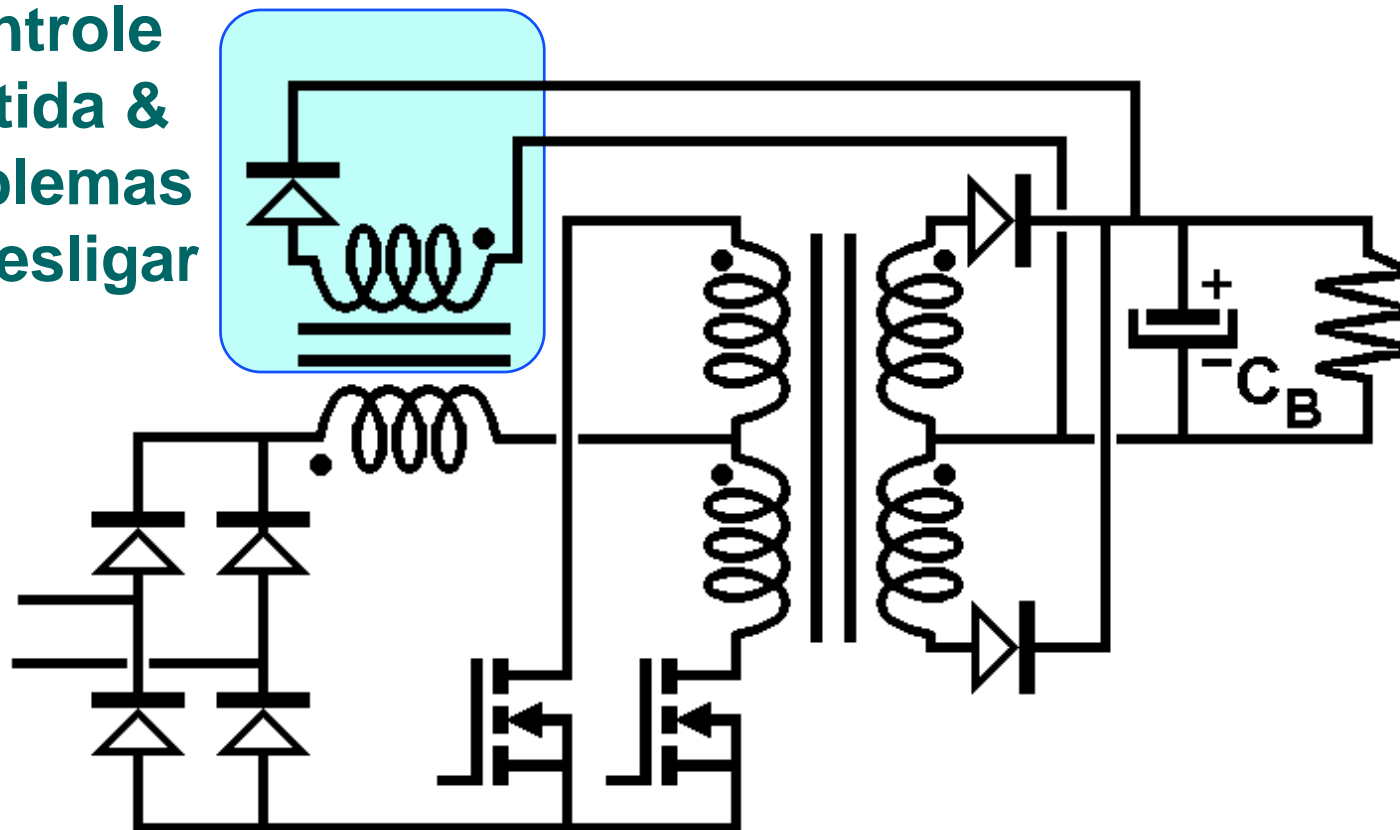


Emulação de Resistência: Exemplos Estruturas

•Dois Interruptores (Com Isolação)

Push-Pull Alimentado em Corrente

Controle
partida &
problemas
ao desligar

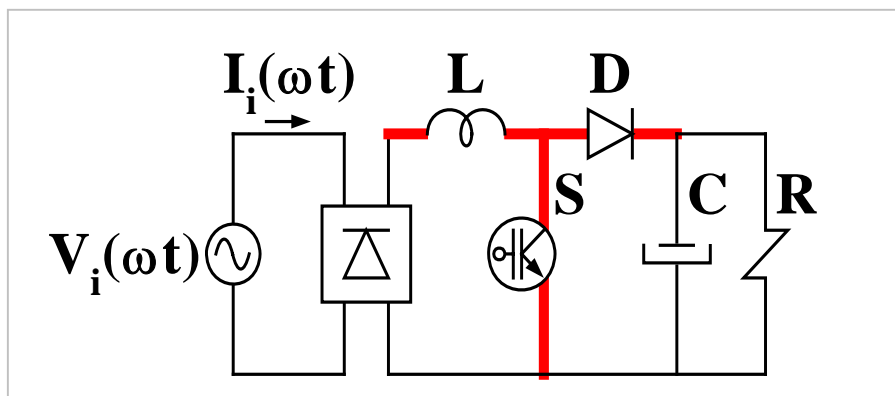


Emulação de Resistência: Modo Contínuo (I)

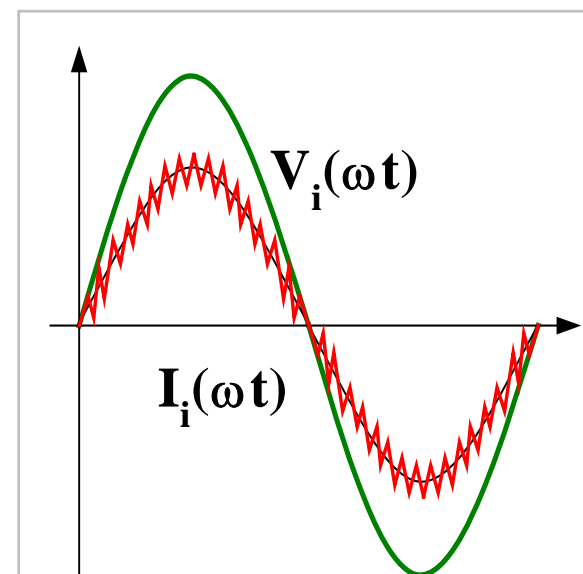
Retificador Boost

(MCC - Modo Condução Contínuo).

- diodo de saída (D):
 - Recuperação reversa rápida e suportar elevadas tensões.

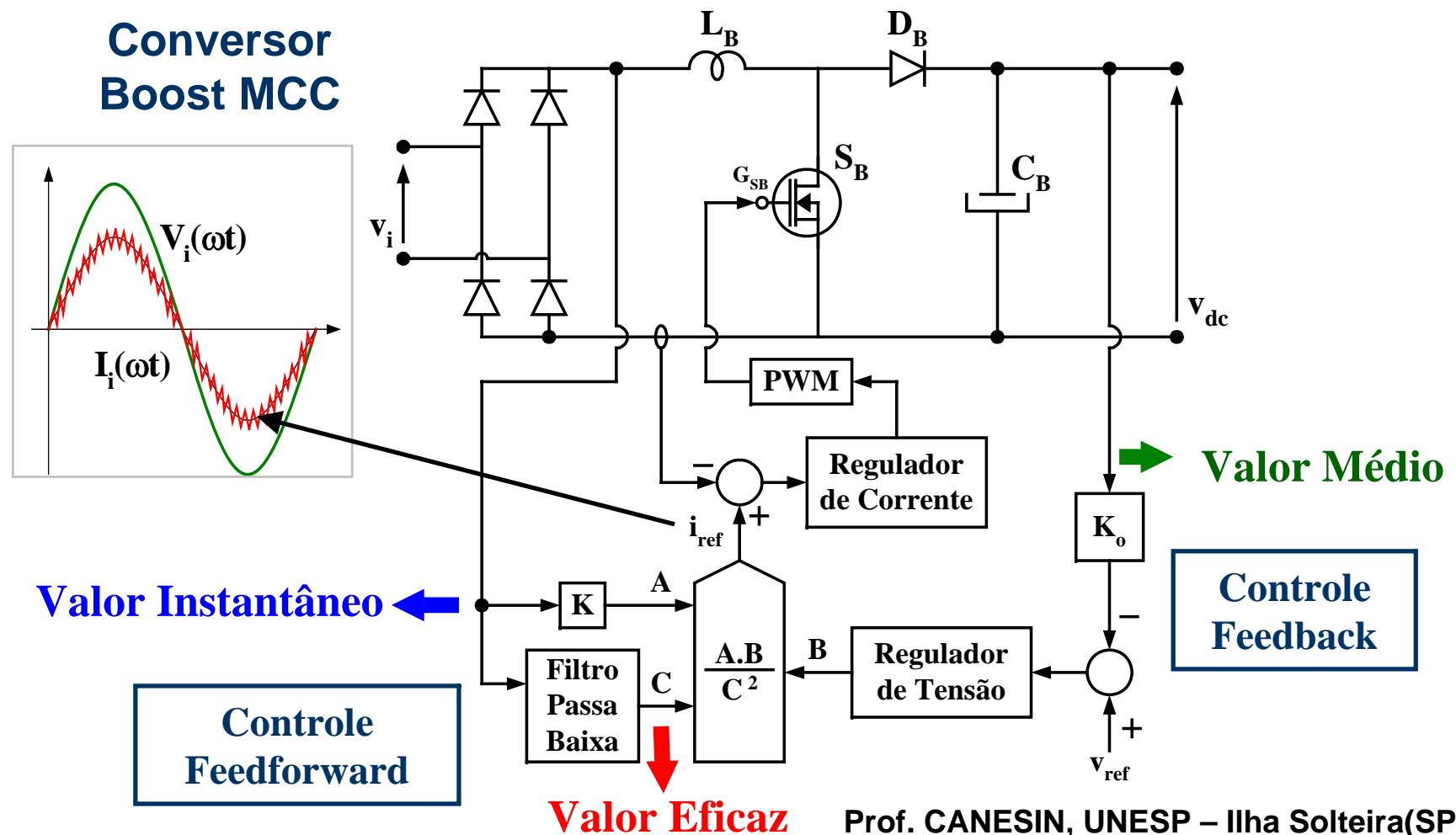


CFP Boost MCC



Emulação de Resistência: Modo Contínuo (II)

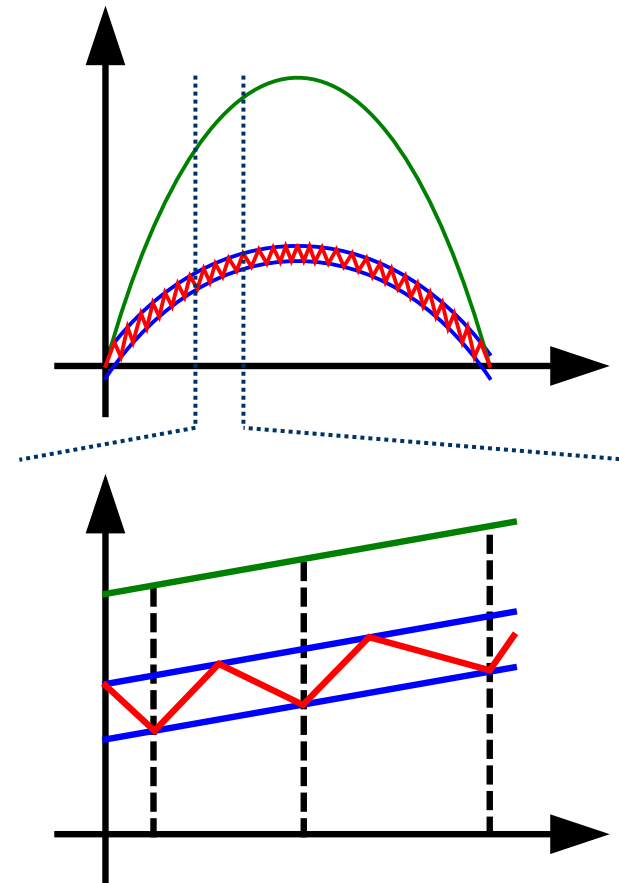
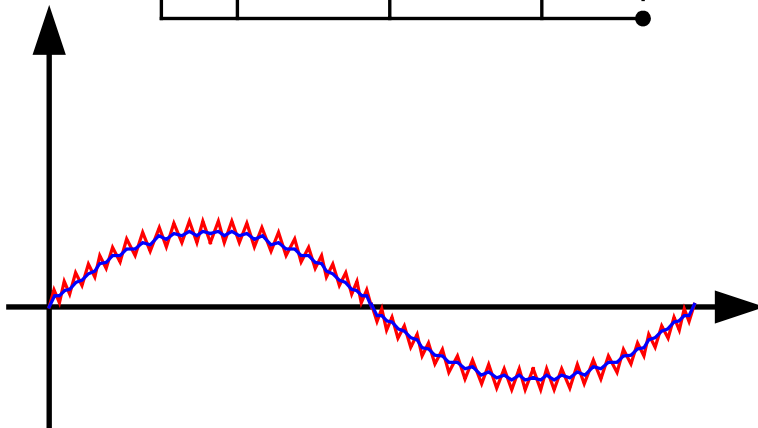
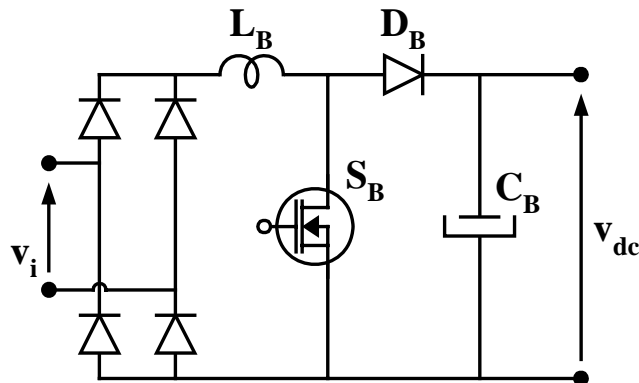
Controle: Valores Médios Instantâneos



Emulação de Resistência: Modo Contínuo (III)

Controle: Histerese Constante

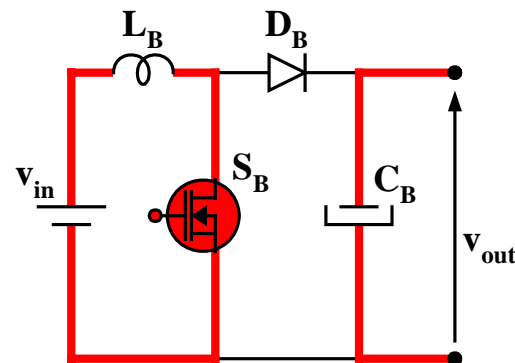
Exemplo:
Retificador Boost MCC



Controle Histerese Constante: Boost MCC (I)

Etapas de Funcionamento,
Idealizadas:

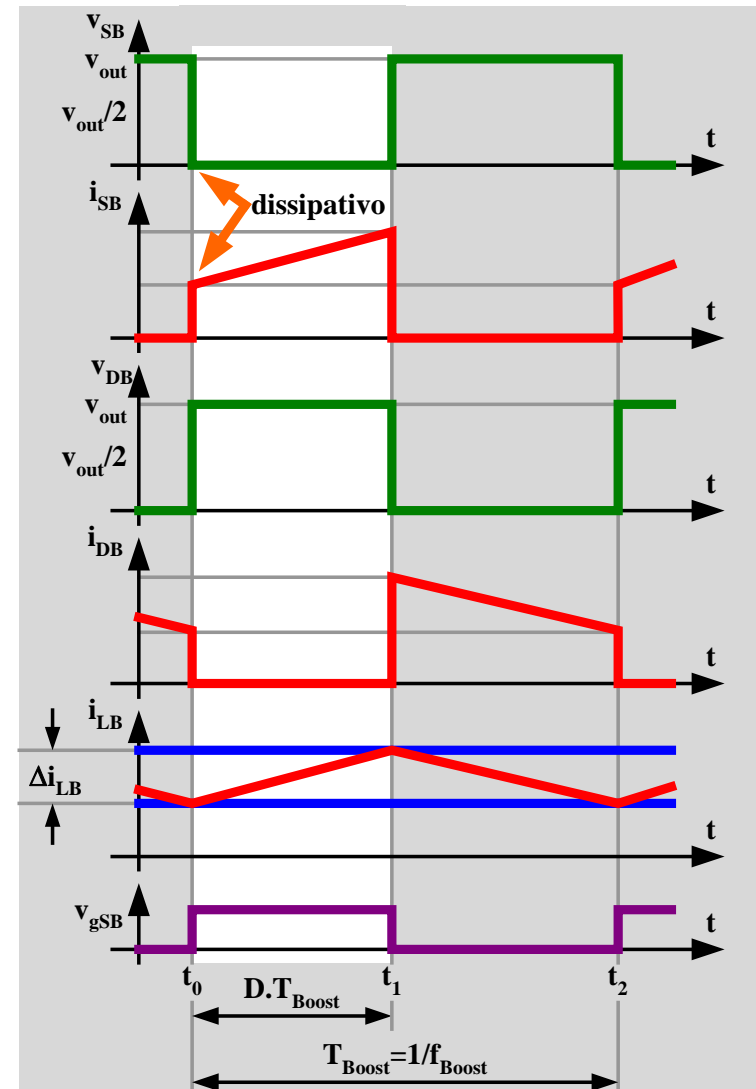
Primeira Etapa [t_0, t_1]



- Entrada em condução dissipativa de S_B , em $t=t_0$.

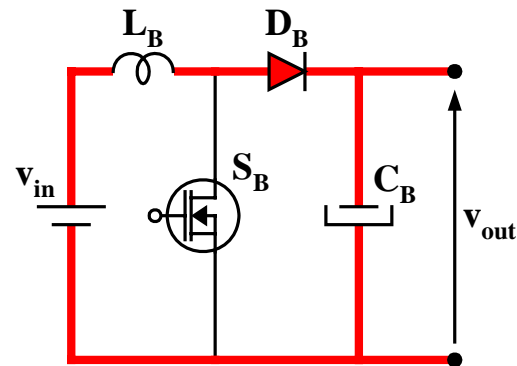
$$i_{LB}(t) = I_m(\omega t) + \frac{v_{in}}{L_B} \cdot t$$

$$\Delta i_{LB} = \frac{v_{in}}{L_B} \cdot \Delta t_1$$



Controle Histerese Constante: Boost MCC (II)

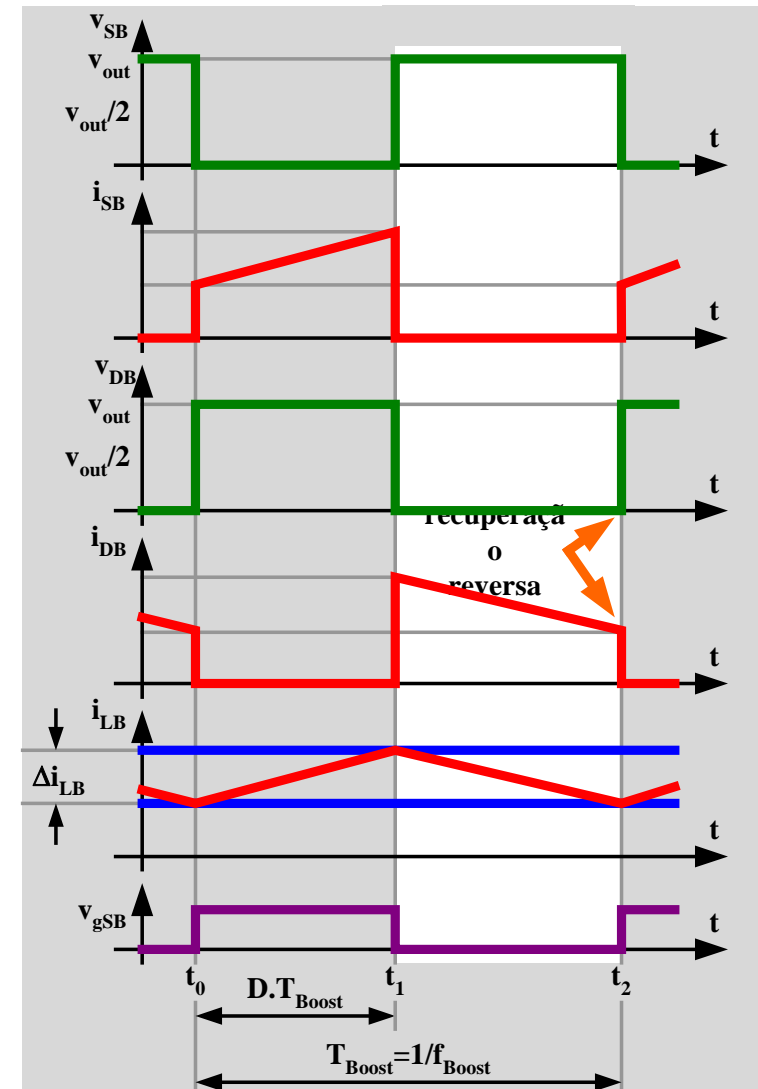
Segunda Etapa [t_1, t_2]



- Bloqueio com recuperação reversa de D_B , em $t=t_2$.

$$i_{LB}(t) = I_M(\omega t) - \frac{v_{out} - v_{in}}{L_B} \cdot t$$

$$\Delta i_{LB} = \frac{v_{out} - v_{in}}{L_B} \cdot \Delta t_2$$



Controle Histerese Constante: Boost MCC (III)

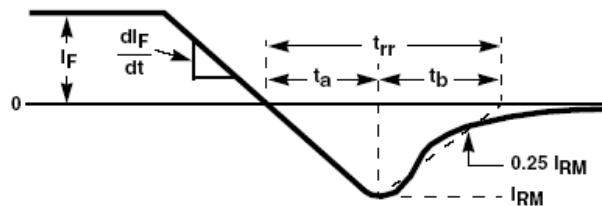
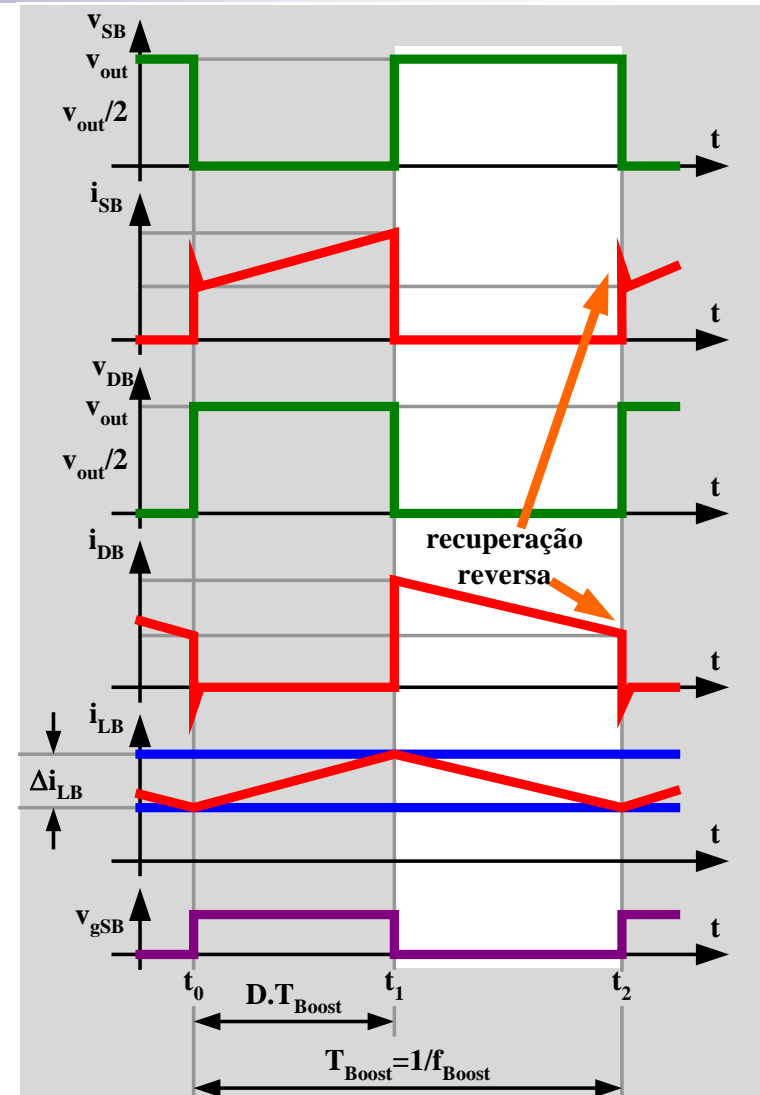
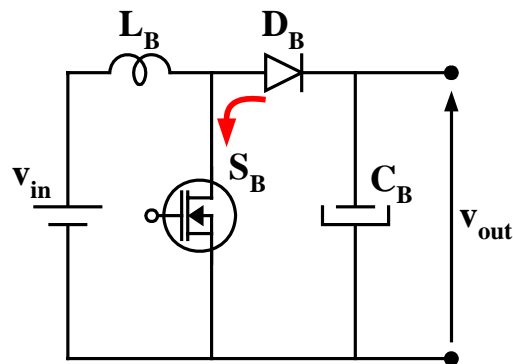


FIGURE 9. t_{rr} WAVEFORMS AND DEFINITIONS

Característica Não Ideal Diodo






(Recuperação reversa)



Emulação de Resistência: Exemplos Estruturas

- **Operação em Elevadas Frequência**
- **Uso Técnicas Comutações Não-Dissipativas**

Comutação “Suave” PWM

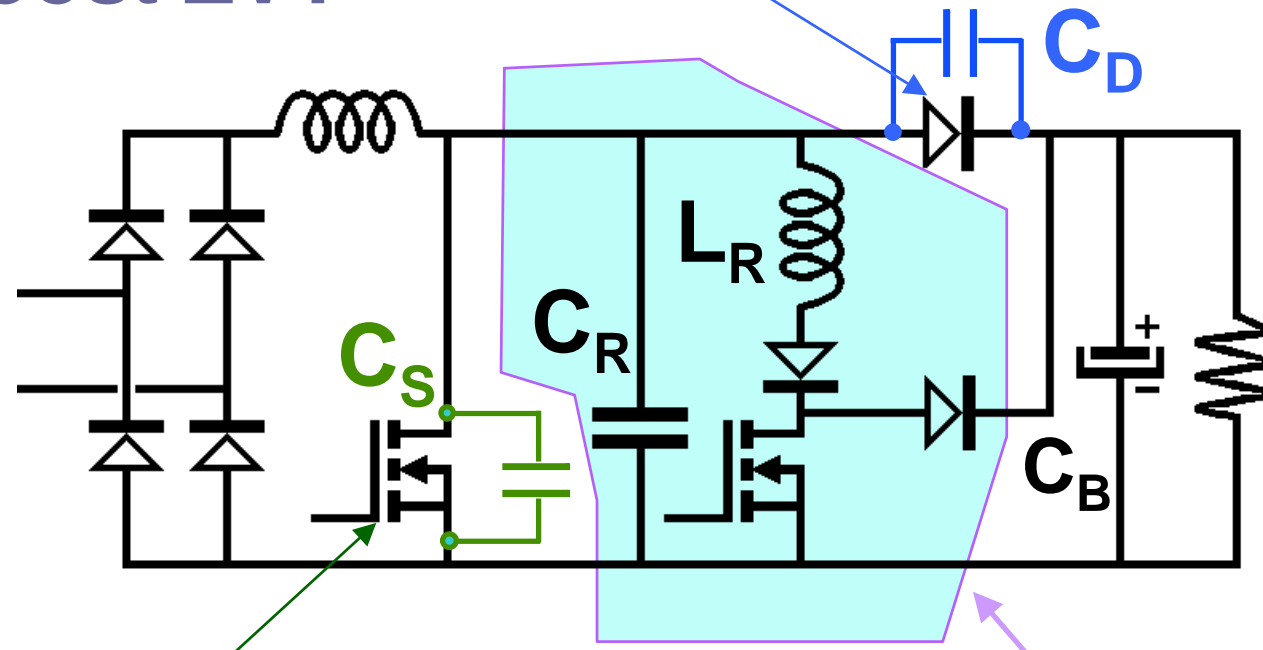
-  **Esforços similares PWM**
-  **Frequência Constante**
-  **Técnicas ZCS ou ZVS**
-  **Número Semicondutores**
-  **Complexidade Controle**

Emulação de Resistência: Exemplos Estruturas

•Elevadas Frequência (Técnica ZVS/ZVT)

Boost ZVT

Diodo principal

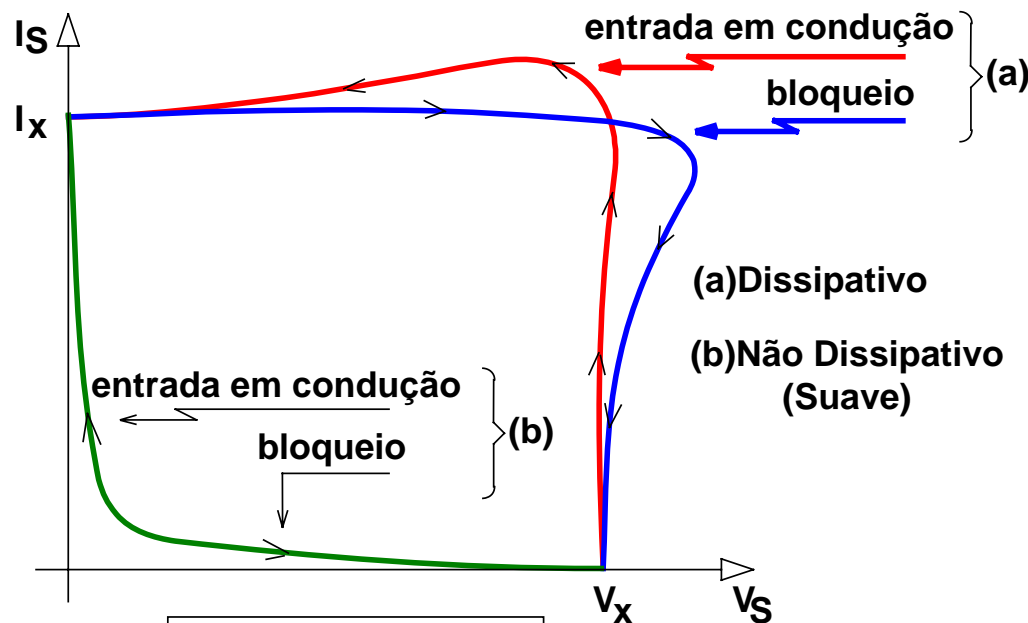


S1: Interruptor principal

Componentes auxiliares

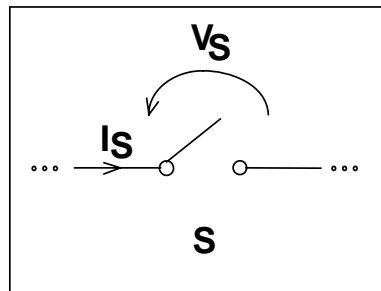
Emulação de Resistência: Exemplos Estruturas

Conceito Comutação “Não Dissipativa” (Suave)

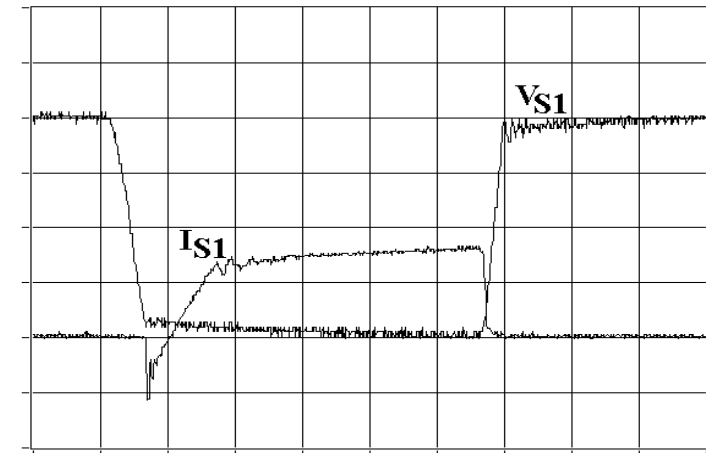


(a) Dissipativo

(b) Não Dissipativo (Suave)



Boost ZVT

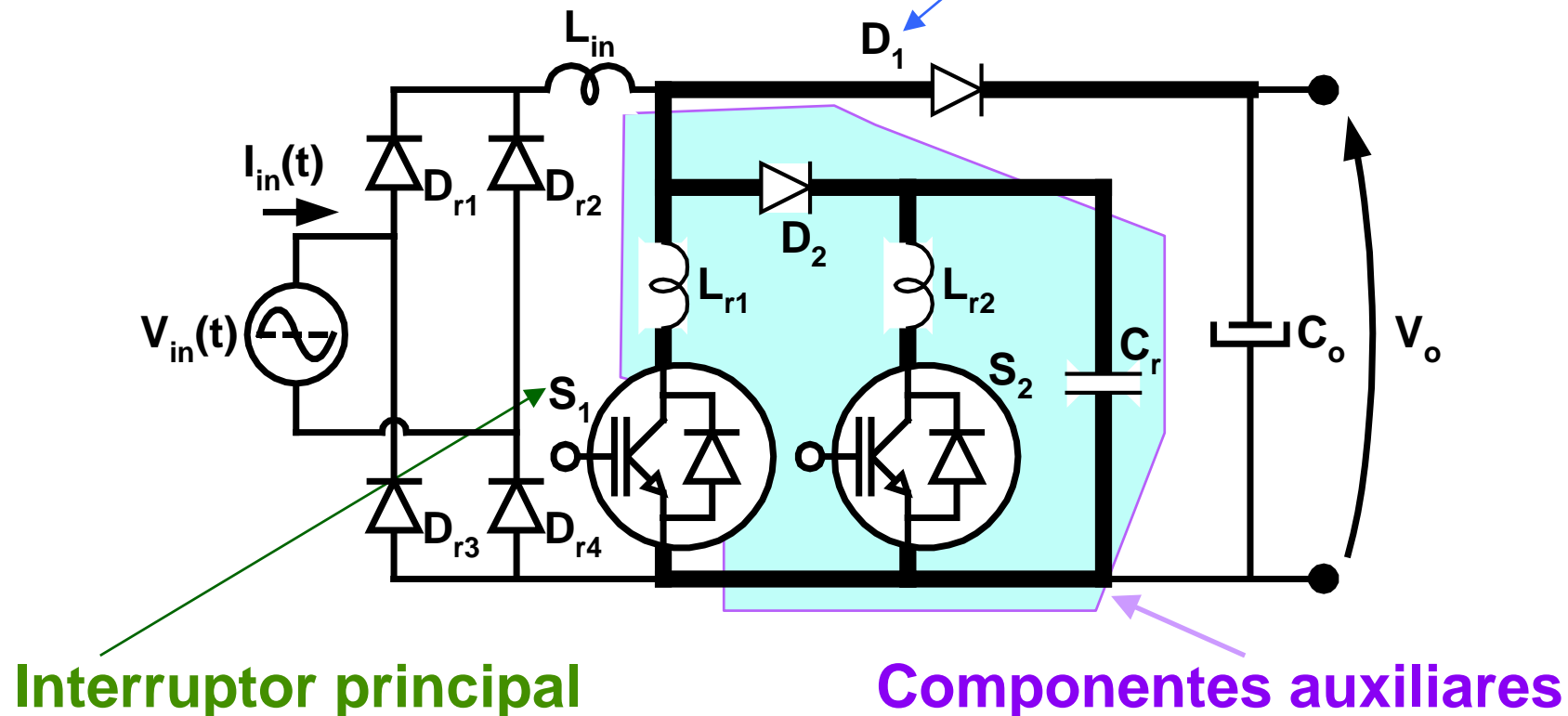


i_{S1} : 5A/div; V_{S1} : 100V/div; 5 μ s/div

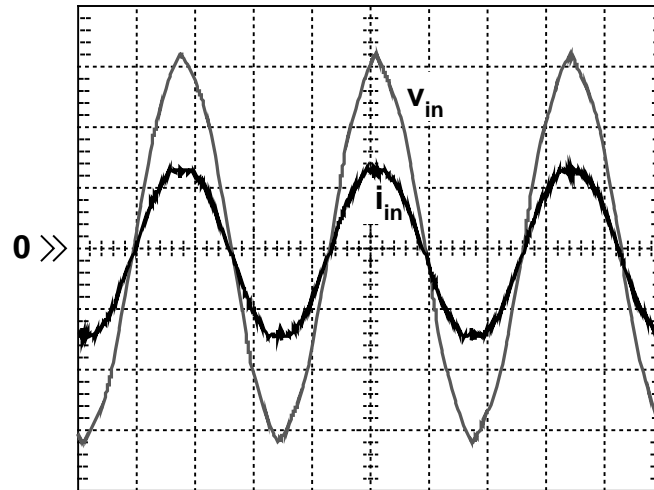
Emulação de Resistência: Exemplos Estruturas

•Elevadas Frequência (Técnica ZCS/ZCT)

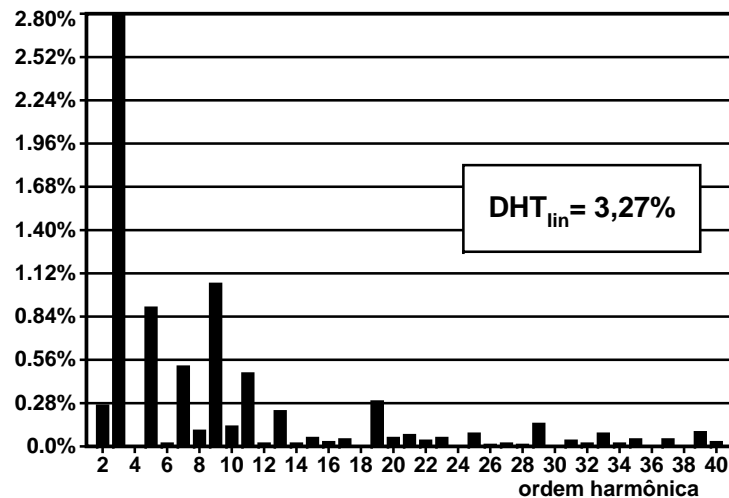
CFP Boost ZCS (ZCZVS) Diodo principal



Emulação de Resistência: Exemplos Estruturas

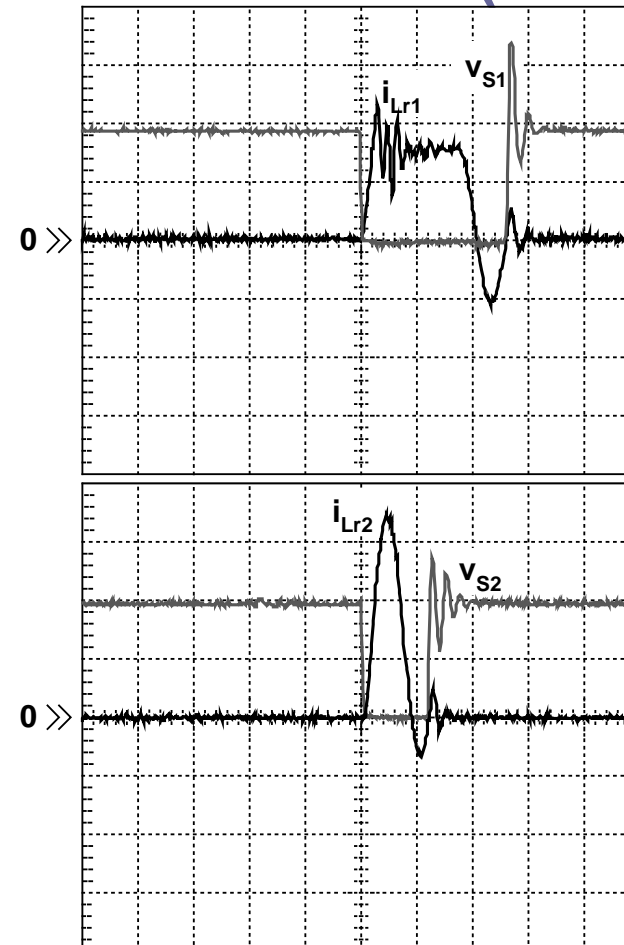


$i_{in} : 5A/div; V_{in} : 100V/div; 5ms/div$

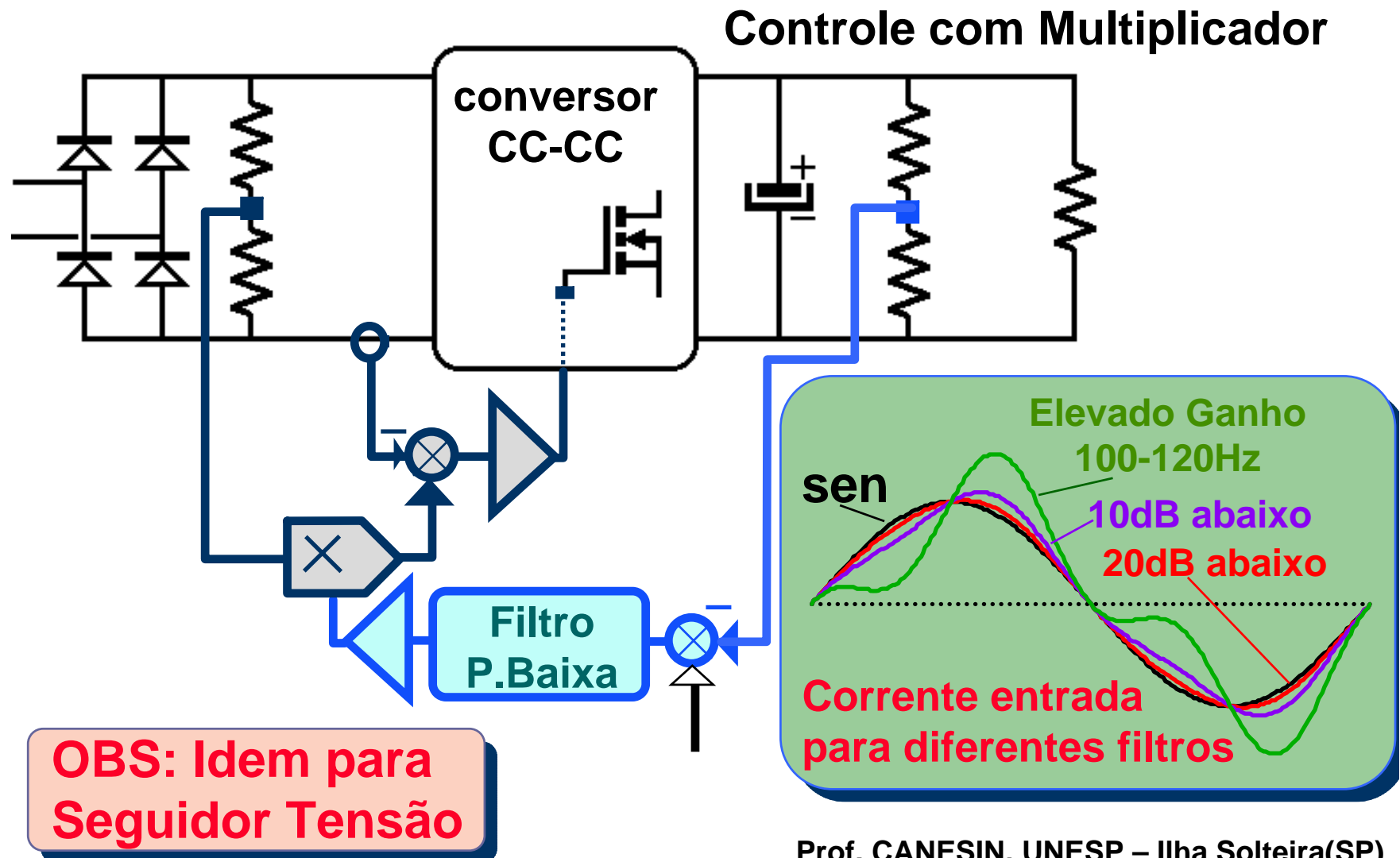


CFP Boost ZCS (ZCZVS)

i_{Lr1} e $i_{Lr2} : 5A/div; v_{S1}$ e $v_{S2} : 200V/div; 2\mu s/div$

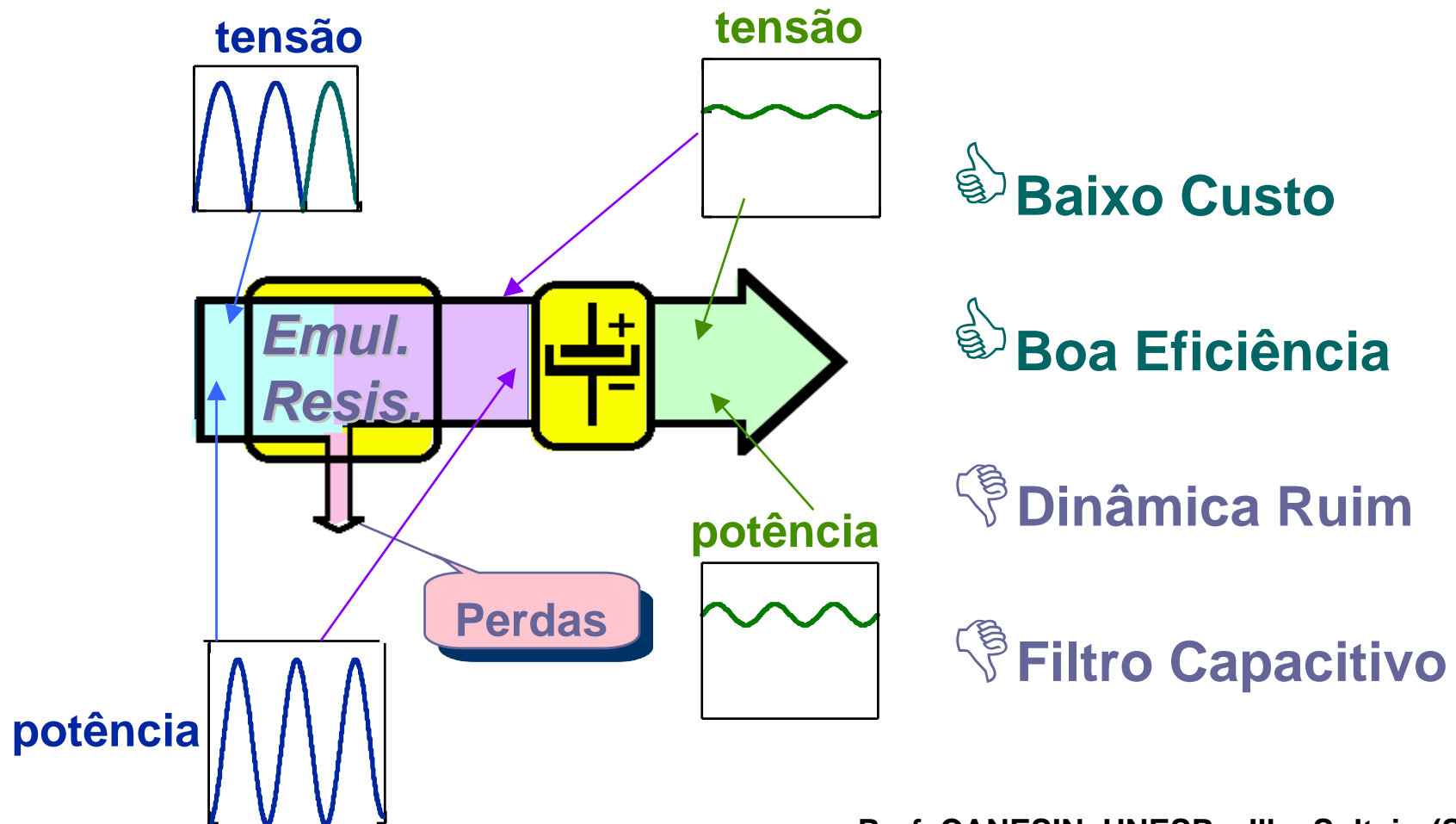


Emulação de Resistência: Problemas Dinâmicos



Emulação de Resistência: Considerações Finais

Estruturas com apenas UM ESTÁGIO

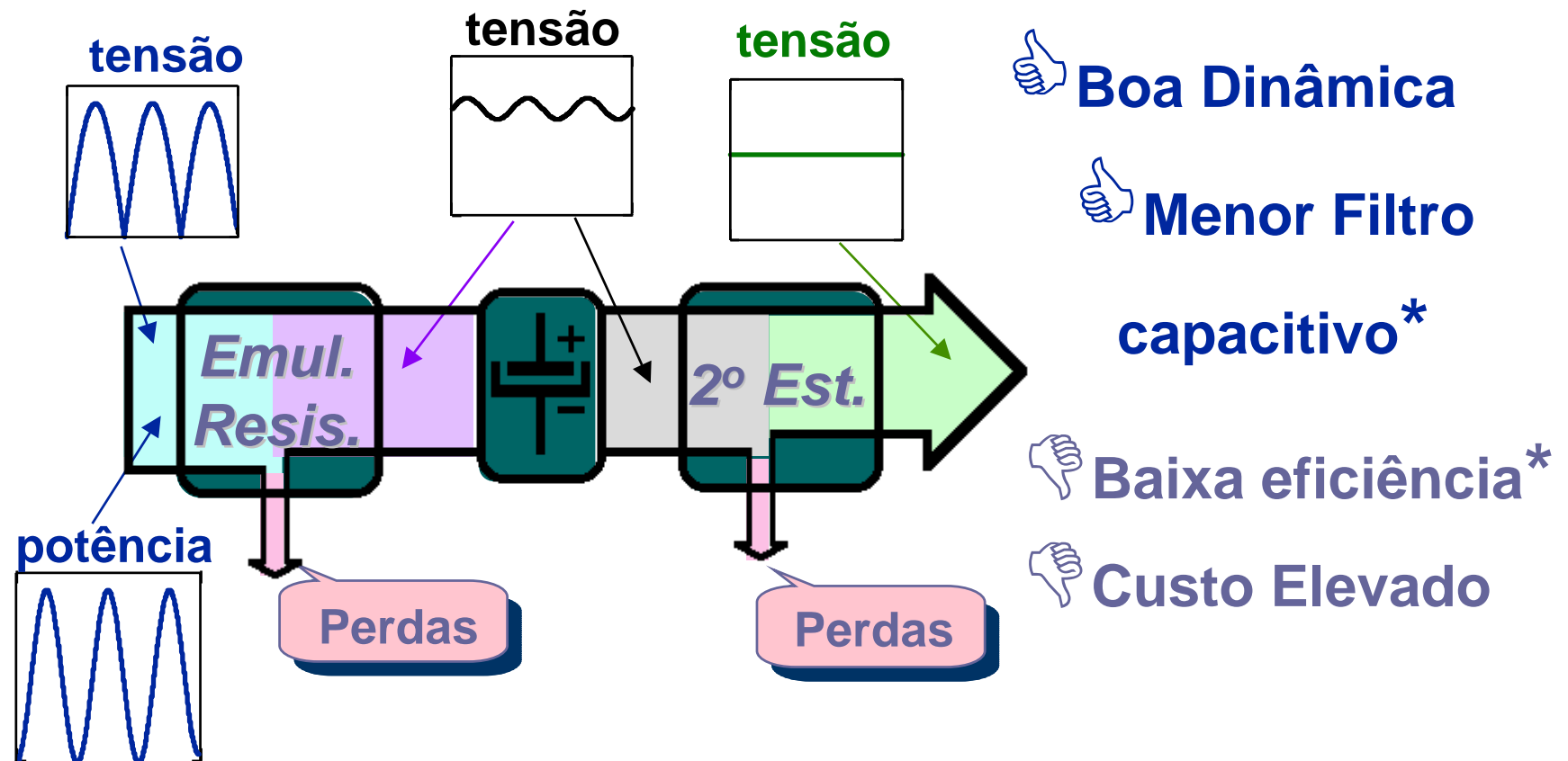


Estruturas 2 Estágios: Boa Resposta Dinâmica

- Topologias duplo processamento potência
 - Dois estágios em cascata
 - Topologias com Dois Estágios integrados
- Topologias com processamento menor do que “por 2”
 - “Charge Pump” ou “Line-Voltage Augmentation”
 - Estruturas em Paralelo
 - Com Pós-Reguladores de elevada eficiência

Emulação de Resistência: Estruturas 2 Estágios

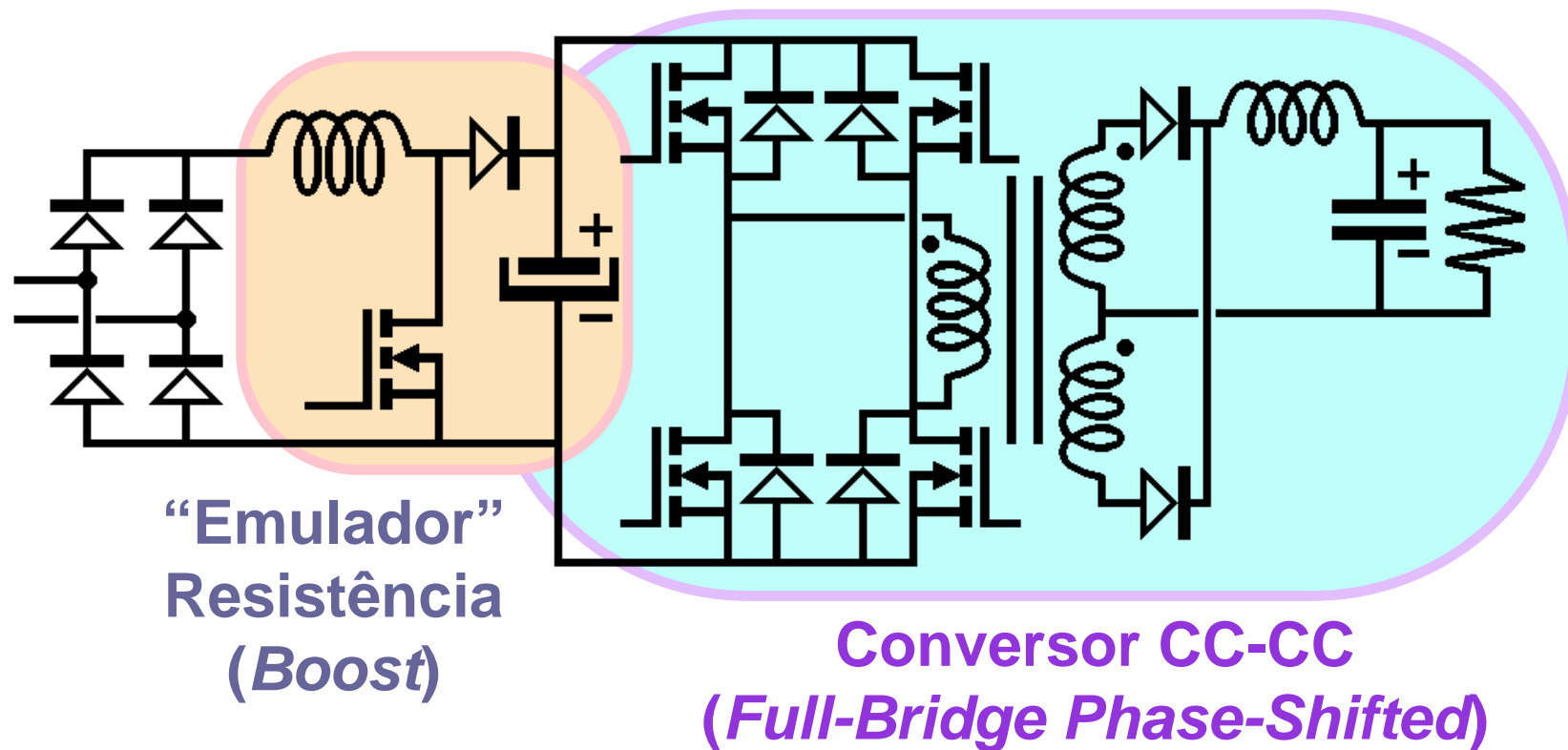
Estruturas com 2 ESTÁGIOS



* Em comparação com Estruturas de UM ESTÁGIO

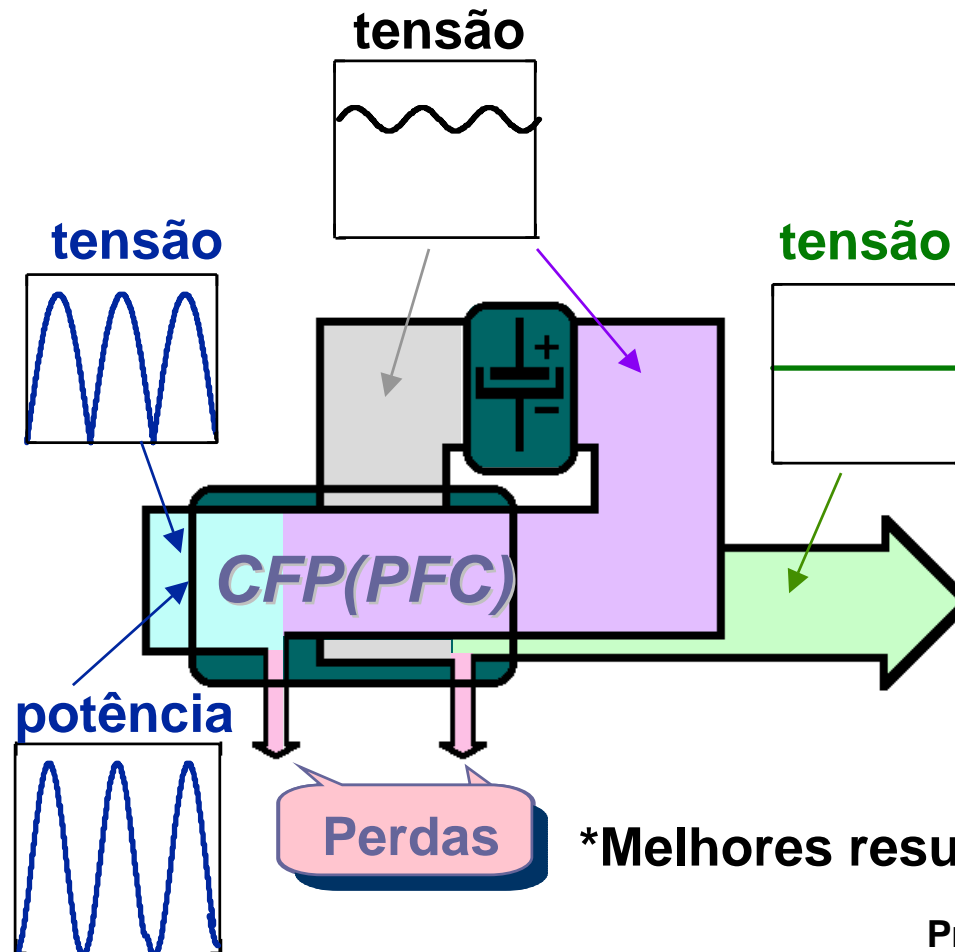
Emulação de Resistência: Estruturas 2 Estágios

Exemplo Estrutura 2 ESTÁGIOS



Emulação de Resistência: Estruturas 2 Estágios

INTEGRAÇÃO de Estruturas (2 Estágios)

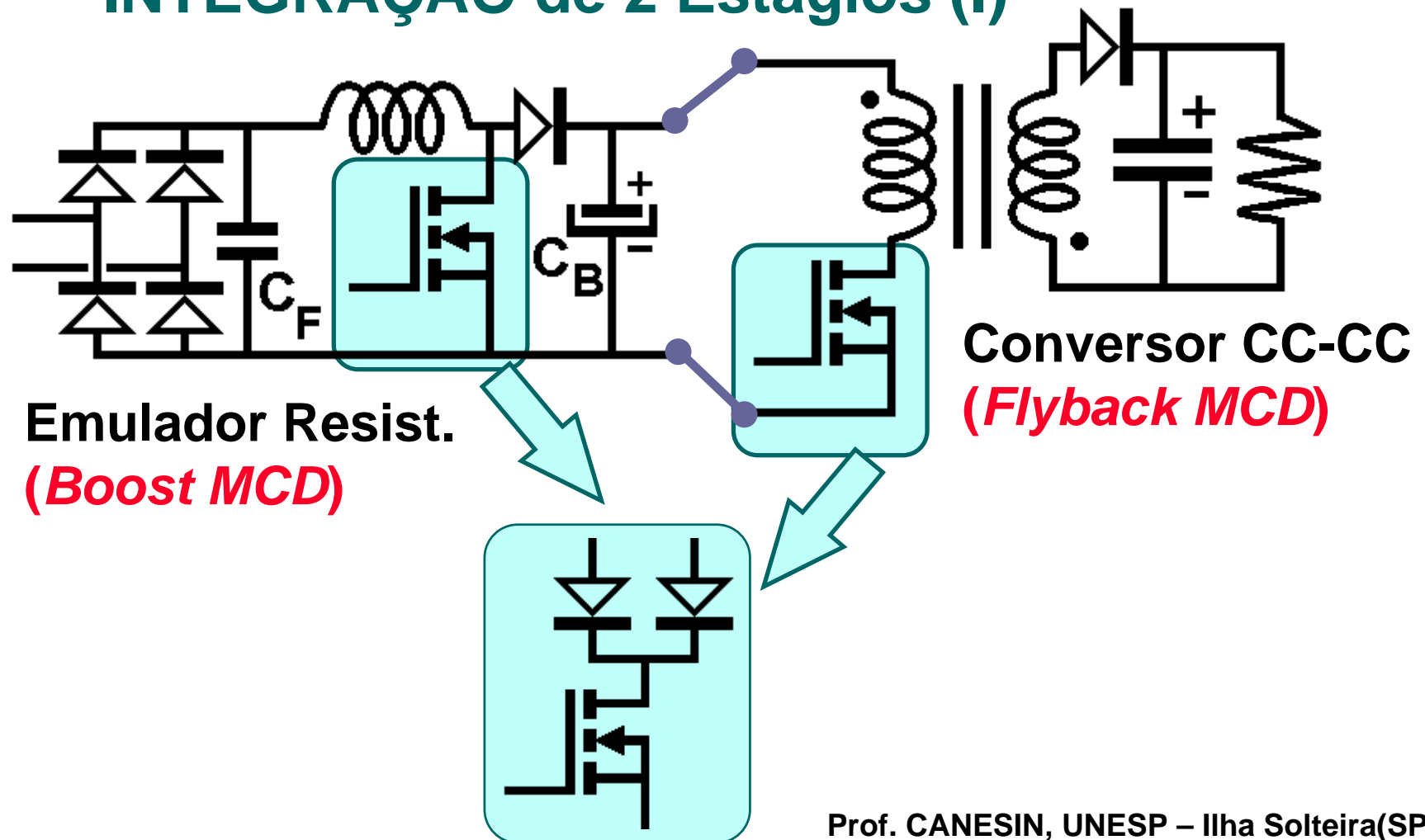


- 👍 **Boa dinâmica**
- 👍 **Menor Filtro capacitivo**
- 👍 **Mais Baixo Custo**
- 👎 **Altos Esforços**
- 👎 **Baixa eficiência***

*Melhores resultados em certas aplicações

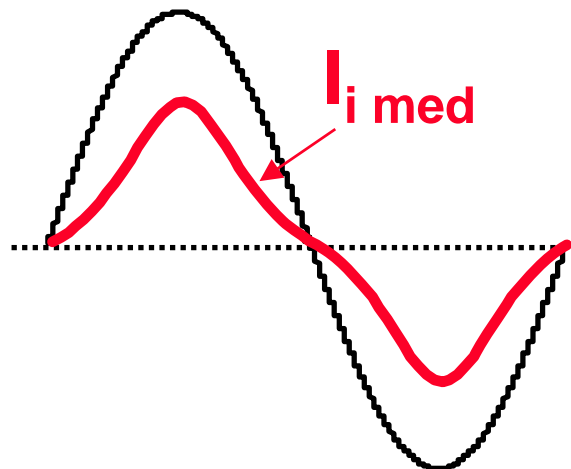
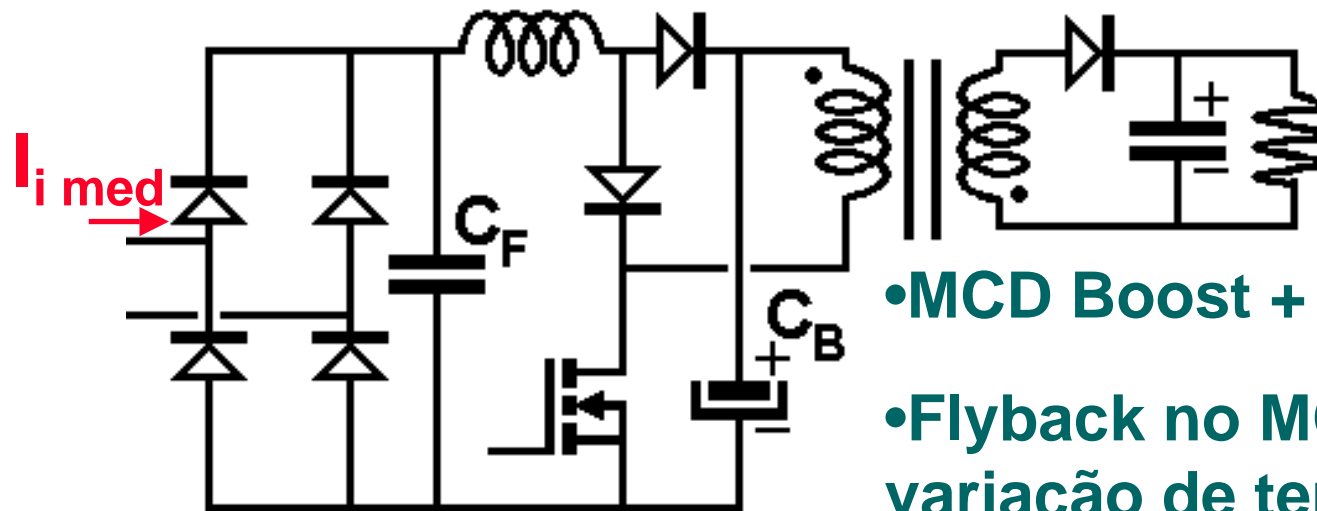
Emulação de Resistência: Estruturas Integradas

INTEGRAÇÃO de 2 Estágios (I)



Emulação de Resistência: Estruturas Integradas

INTEGRAÇÃO de 2 Estágios (II)



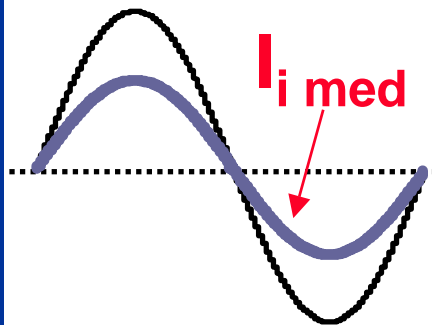
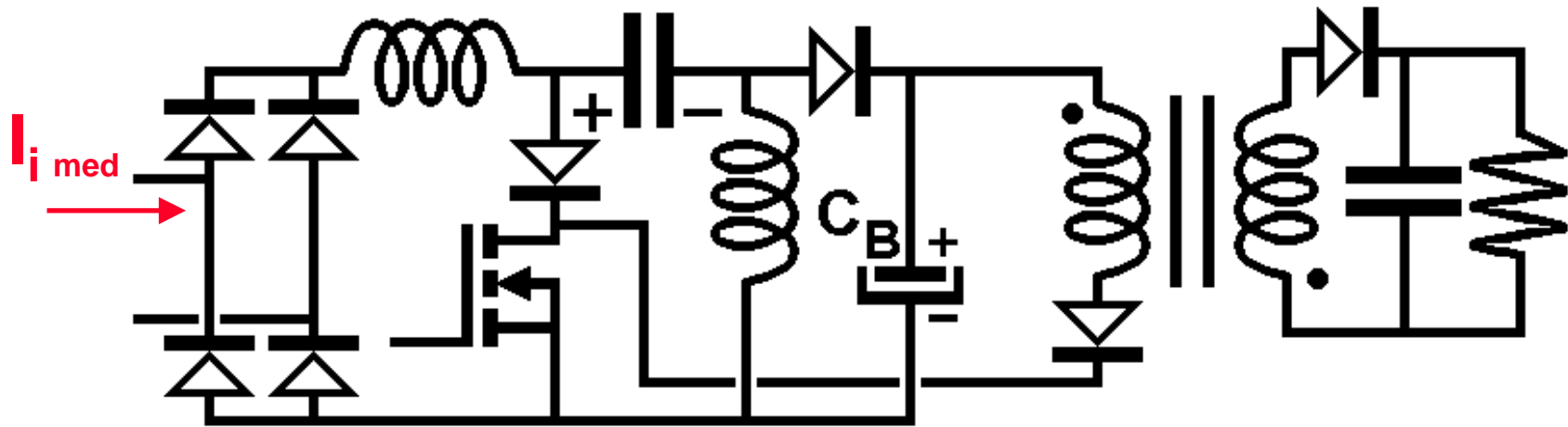
- MCD Boost + Flyback

- Flyback no MCD, pequena variação de tensão em C_B

- Corrente Entrada Quase-Senoidal

👎 Esforços no transistor elevadas tensão & corrente

INTEGRAÇÃO de 2 Estágios (Exemplo III)



- MCD SEPIC + Flyback

- Flyback no MCD, pequena variação de tensão em C_B (quase sem variação)

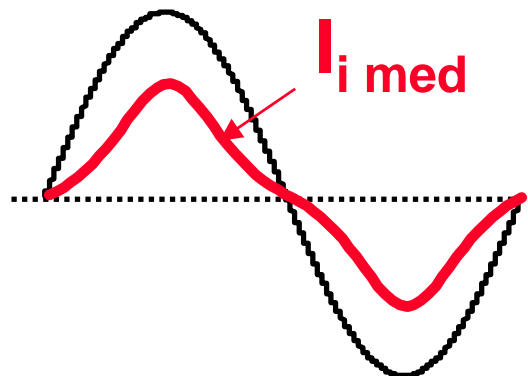
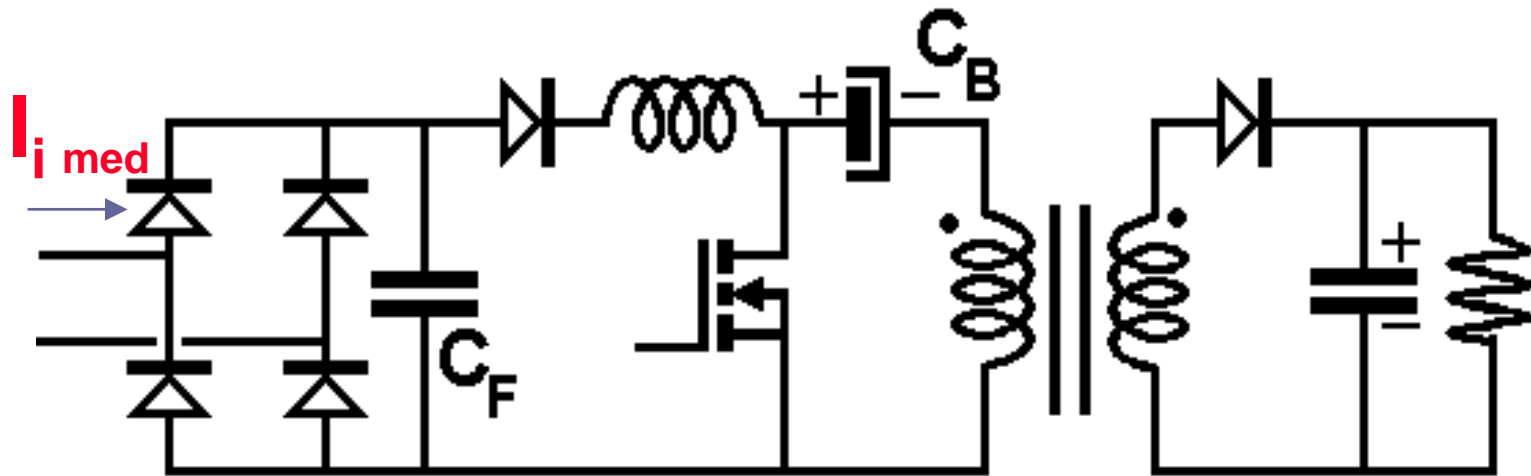
- Corrente de Entrada Senoidal



Esforços de Corrente no transistor

INTEGRAÇÃO de 2 Estágios (Exemplo IV)

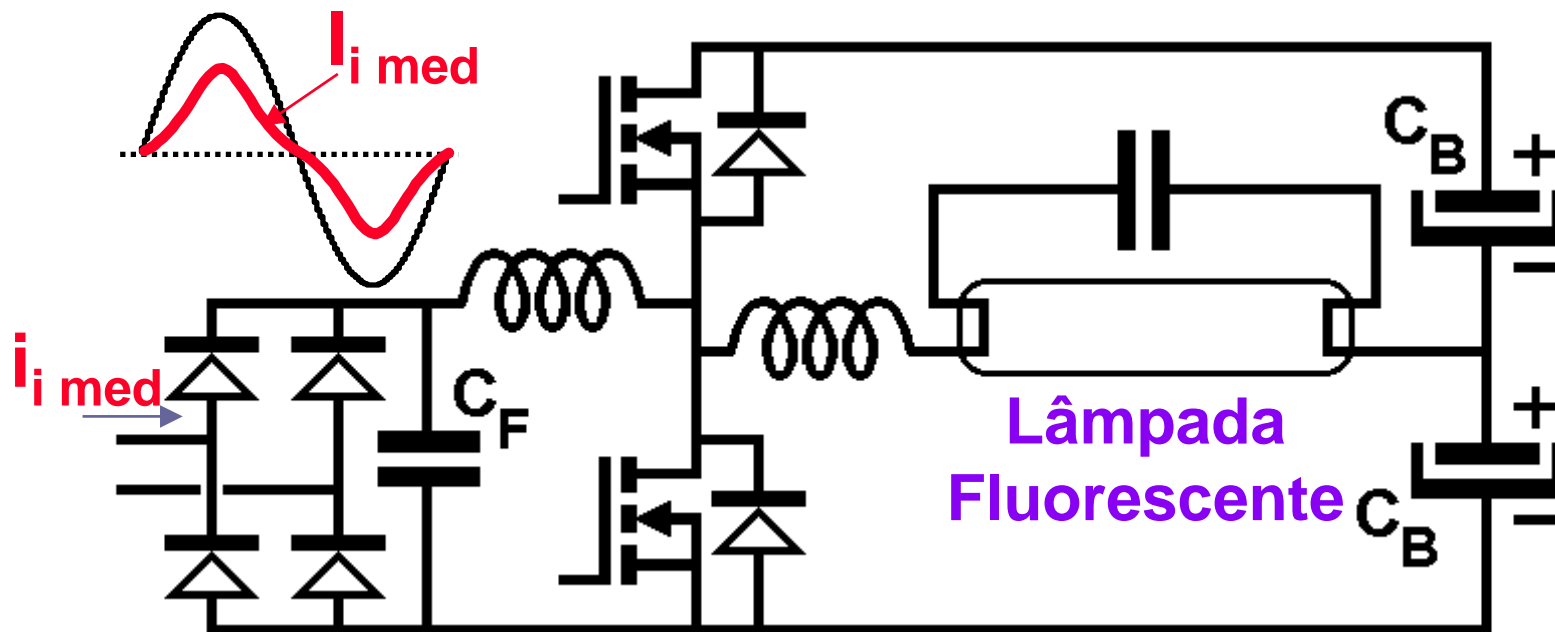
Conversor **Boost** Integrado com **Flyback**
Retificador/Armazenador **Energia/CC-CC (Dc-dc)(BIFRED)**



•Característica similar
MCD Boost + Flyback

INTEGRAÇÃO de 2 Estágios (Exemplo V)

- CFP Boost MCD + Inversor Half-Bridge com Filtro Paralelo Ressonante

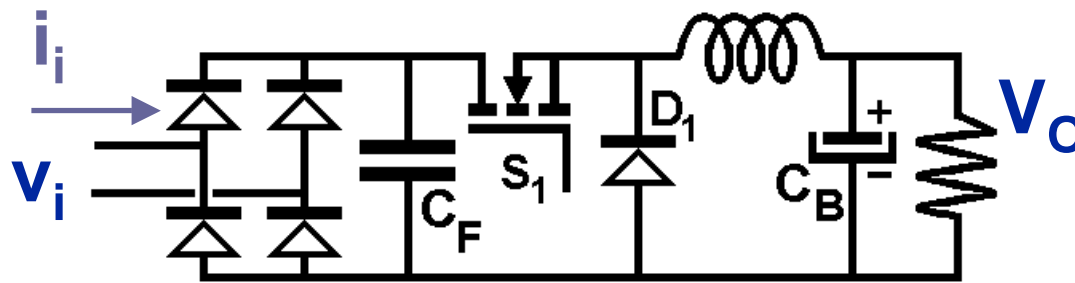


Tipos Soluções(IV): Ativa & Não-Senoidal

		<i>Forma de Onda Corrente de Entrada</i>	
		senoidal	não-senoidal
<i>Dispositivos</i>	passivos	passivo & senoidal	passivo & não-senoidal
	ativos	ativo & senoidal	ativo & não-senoidal

Tipos Soluções: Ativa & Não-Senoidal

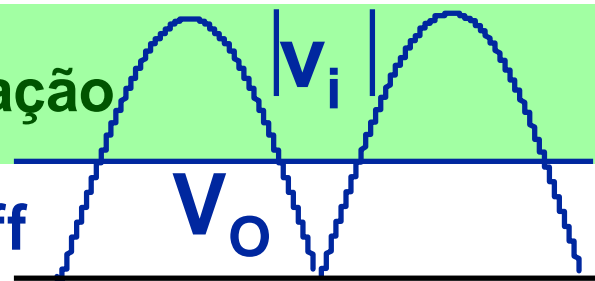
•CFP Buck (reduzida dinâmica)



Sempre:
 $V_o < V_{i \text{ pico}}$

Buck operação

Buck off



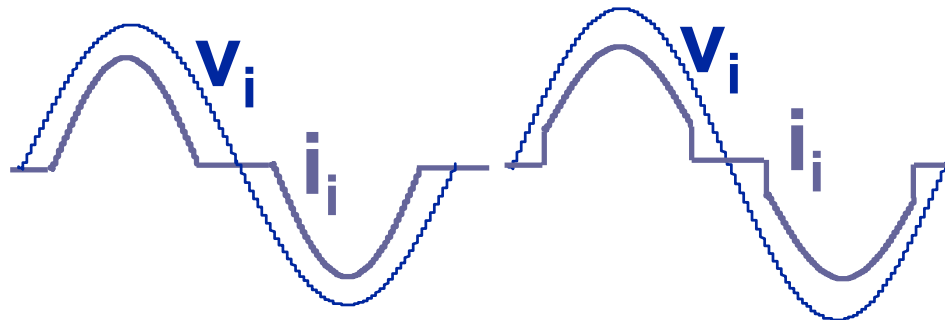
Sem problemas “start”



Baixos esforços nos
semicondutores

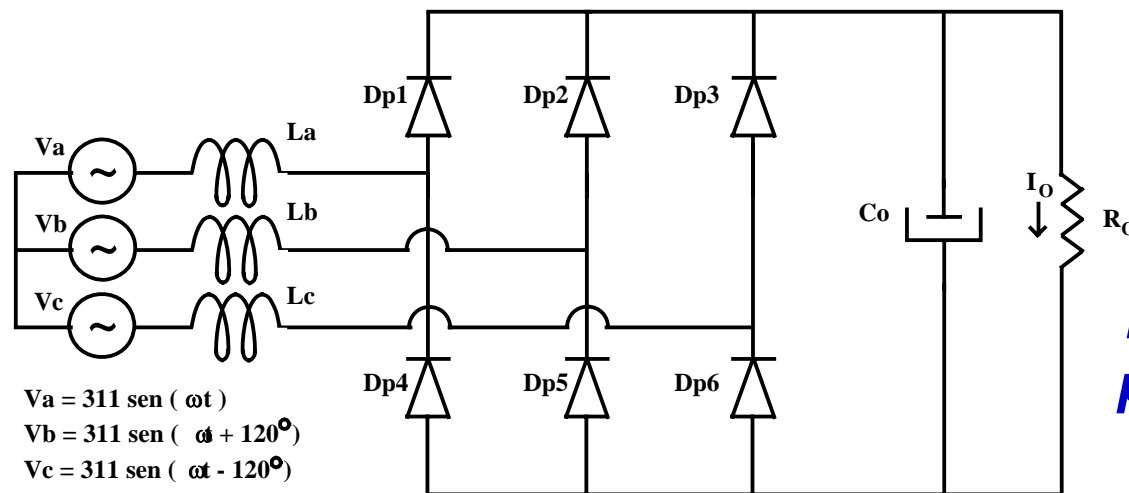


Reduzida resposta
transitória

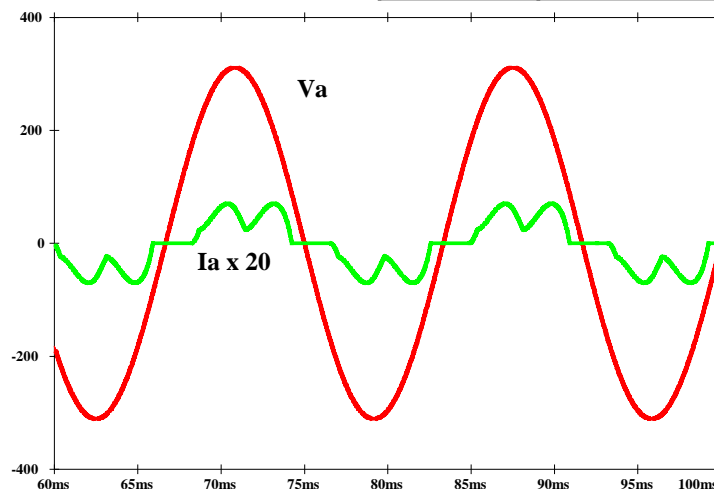


4.3 – Técnicas para Circuitos Trifásicos

Retificador trifásico a diodos, com filtro capacitivo



**Diferentes resultados
para diferentes Filtros**



Dados:

$C_o = 100\mu F$; $L = L_a = L_b = L_c = 10mH$ e $R_o = 200\Omega$

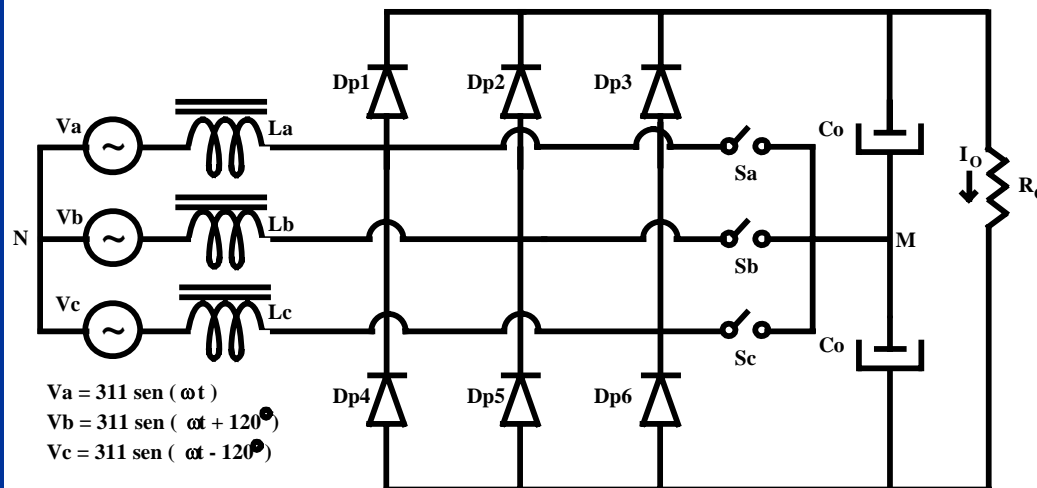
DHT= 39,85%

$$FP = \frac{\cos(180^\circ - 165,9^\circ)}{\sqrt{1 + (0,3985841)^2}} = 0,9009$$

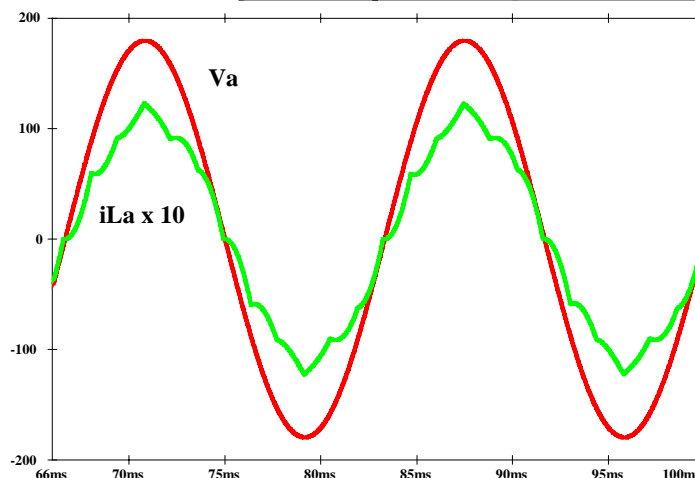
Prof. CANESIN, UNESP – Ilha Solteira(SP)

Técnicas para Circuitos Trifásicos

Retificador trifásico a diodos, com circuito auxiliar e elevado fator de potência



$$\begin{aligned} V_a &= 311 \sin(\omega t) \\ V_b &= 311 \sin(\omega t + 120^\circ) \\ V_c &= 311 \sin(\omega t - 120^\circ) \end{aligned}$$



Dados:
 $C_o = 1000 \mu F$; $L = L_a = L_b = L_c = 10 \text{ mH}$ e
 $R_o = 28,82 \Omega$ ($P_o = 3 \text{ kW}$)

DHT = 6,85%

$$FP = \frac{\cos(7,7^\circ)}{\sqrt{1 + (0,0685)^2}} = 0,989$$

Técnicas para Circuitos Trifásicos



Uso de Estruturas Retificadoras Multi-Pulsos:

- 1. Transformadores Multi-Fases (Multiphase);**
- 2. Transformadores de Equilíbrio (Interphase);**
- 3. Transformadores Bloqueio de Harmônicos.**



Robustez e Confiabilidade



Simplicidade



Elevado Peso, Volume e Perdas

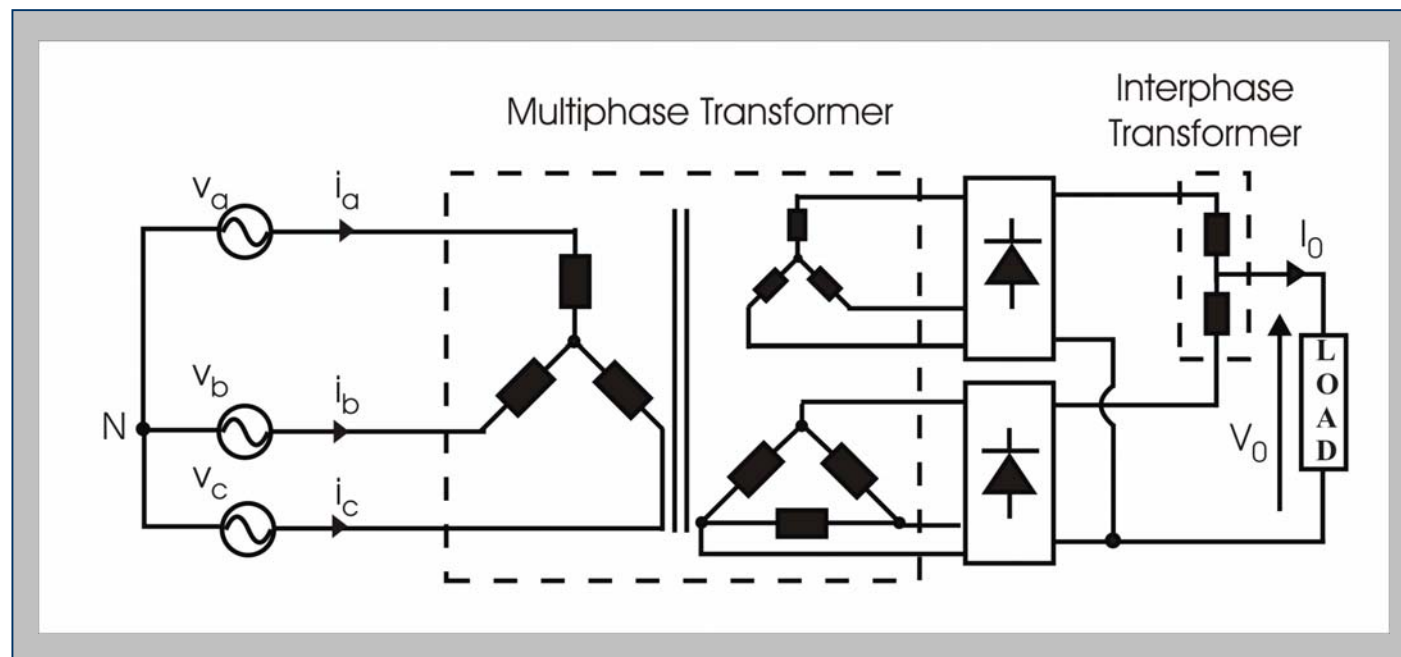


Atendimento Normas*

*** Dificuldades em Determinadas Aplicações**

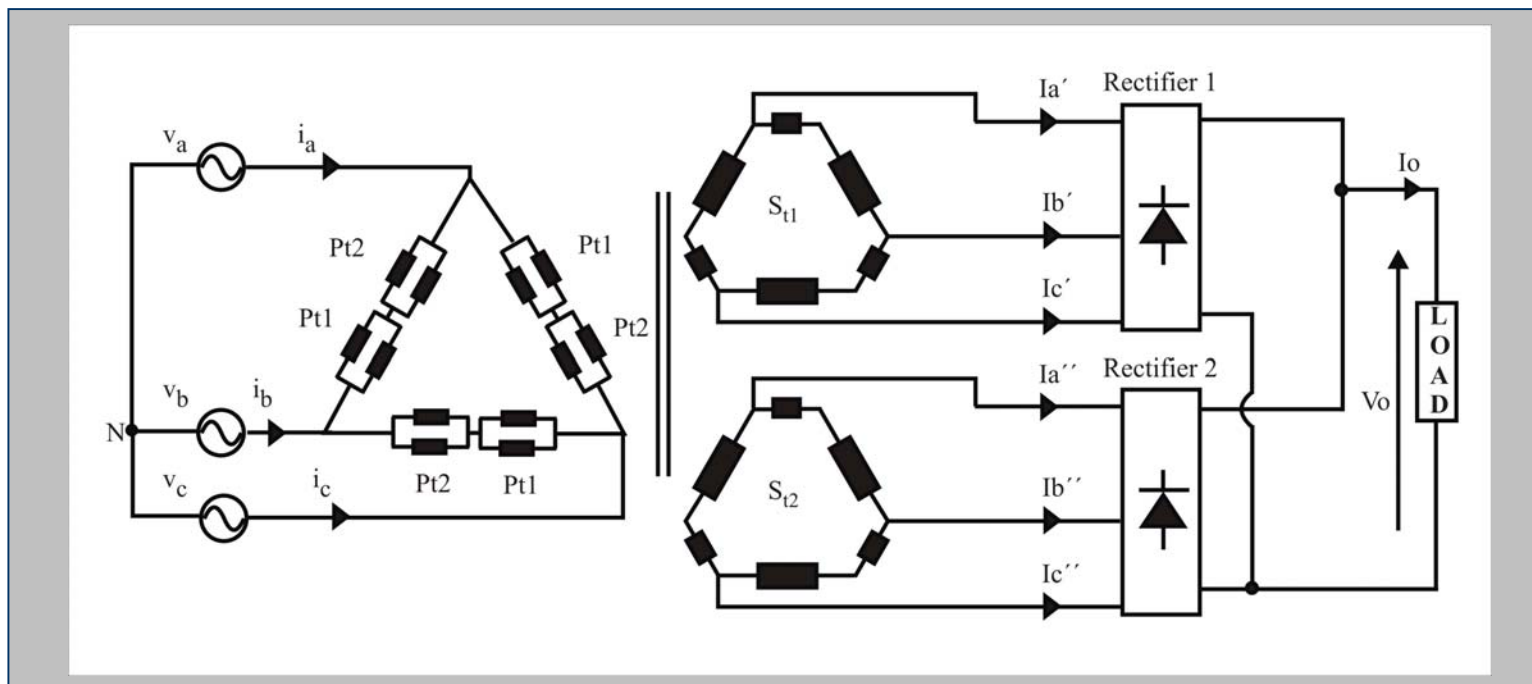
Prof. CANESIN, UNESP – Ilha Solteira(SP)

Estruturas Trifásicas Múltiplos Pulsos



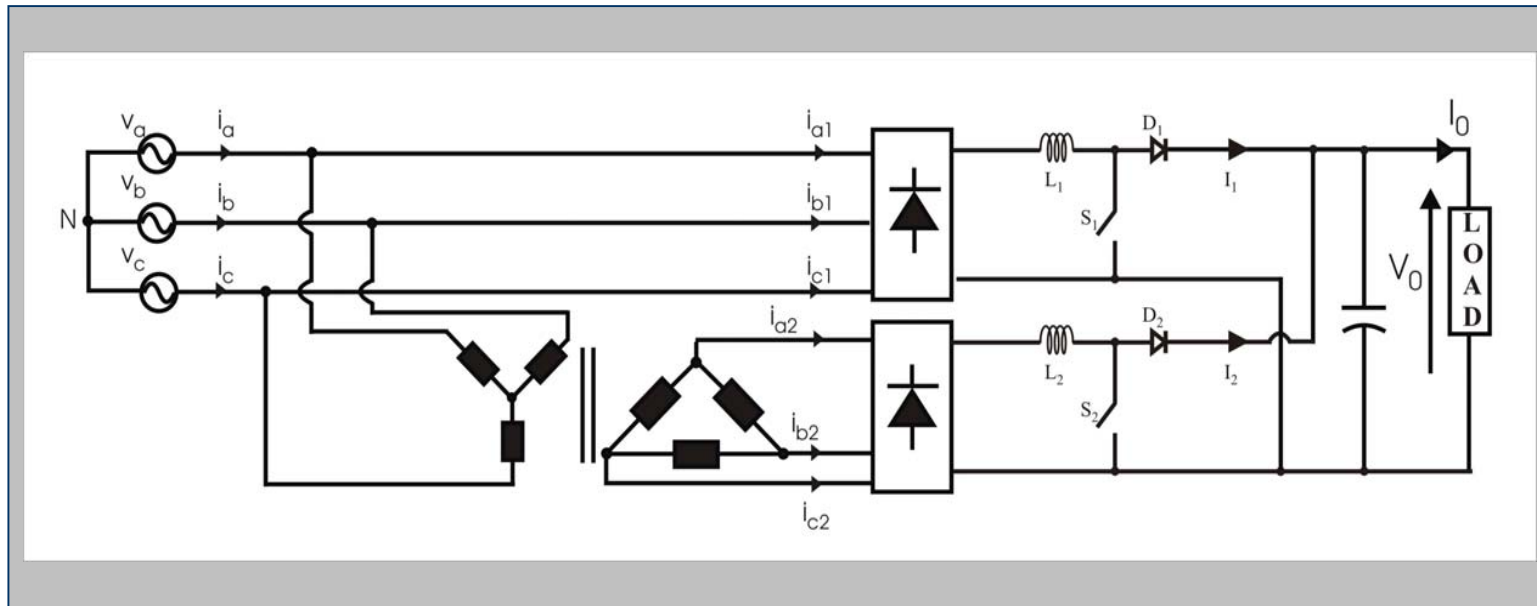
RETIFICADOR TRIFÁSICO DE 12 PULSOS CONVENCIONAL

Estruturas Trifásicas Múltiplos Pulsos



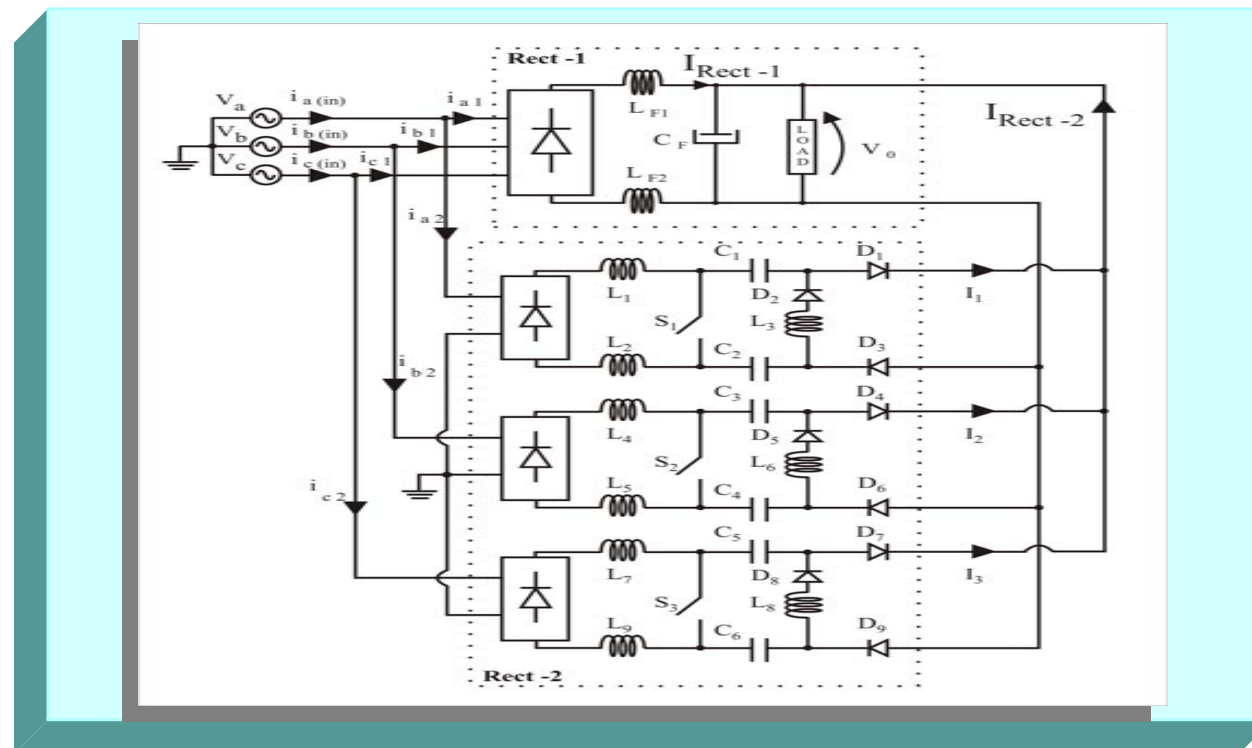
Conexões Especiais de Transformadores para Aplicação em Retificador Multi-Pulsos

Estruturas Trifásicas Múltiplos Pulsos



Retificador Trifásico Multi-Pulsos com Estágios Boost em Paralelo

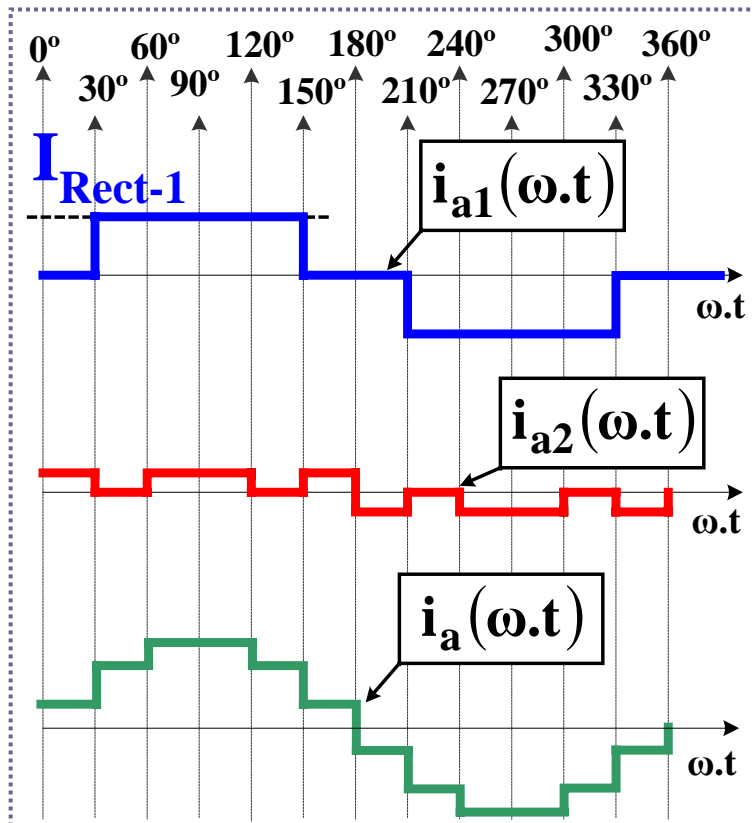
Estruturas Trifásicas Múltiplos Pulsos



**RETIFICADOR TRIFÁSICO HÍBRIDO, COM CONVERSORES SEPIC
(Ponte convencional a diodos + conversores chaveados)**

Estruturas Trifásicas Múltiplos Pulsos

**Formas de Onda para Corrente de Entrada
(12 PULSOS)**

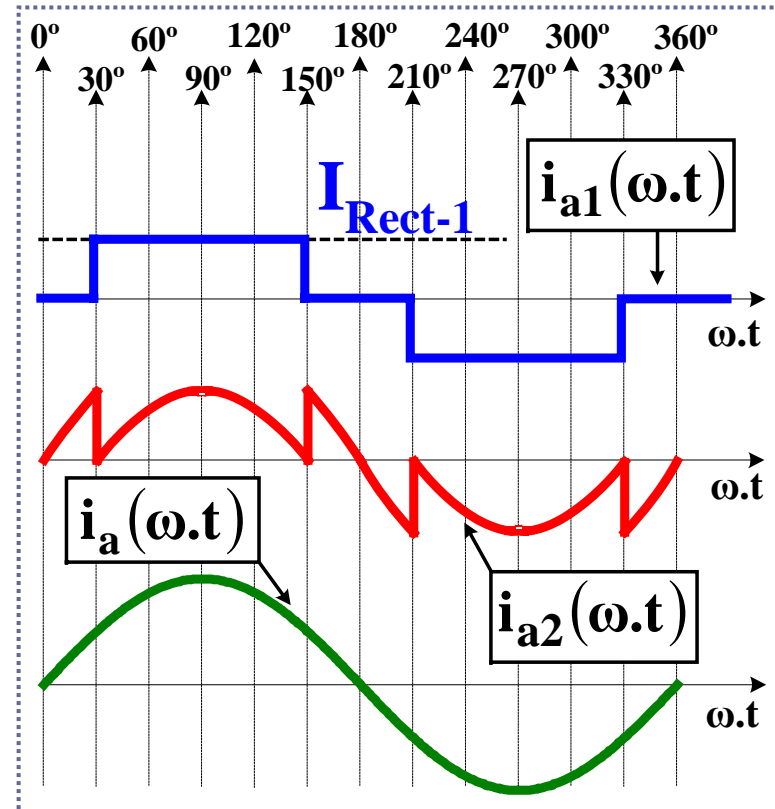


DHT = 30%



DHT = 14%

**Formas de Onda para Corrente de Entrada
(SENOIDAL)**



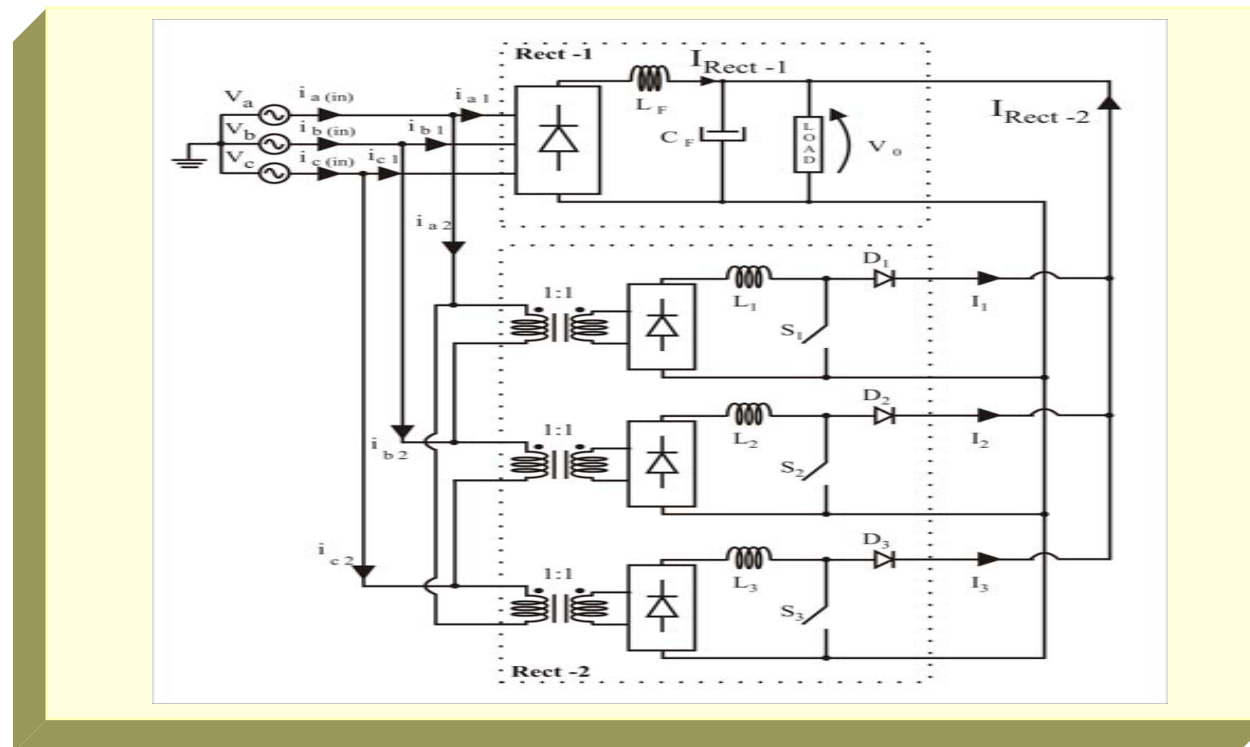
DHT = 30%



DHT = 0

Prof. CANESIN, UNESP – Ilha Solteira(SP)

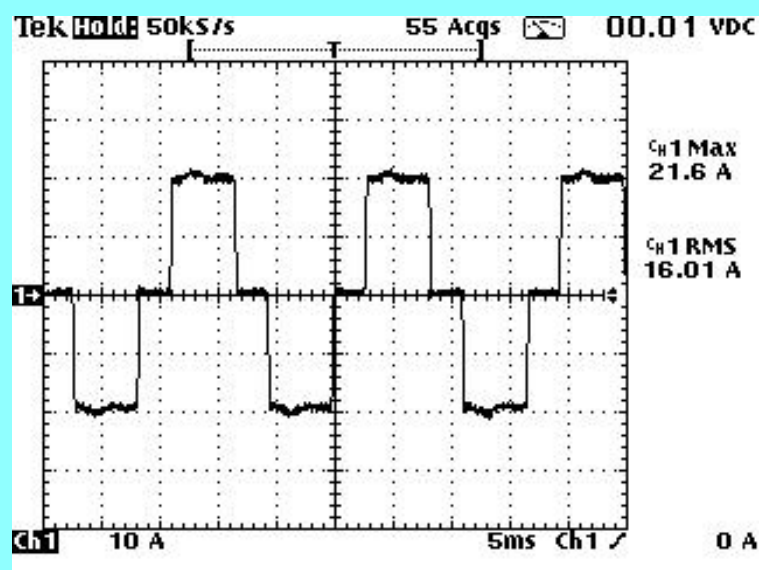
Estruturas Trifásicas Múltiplos Pulsos



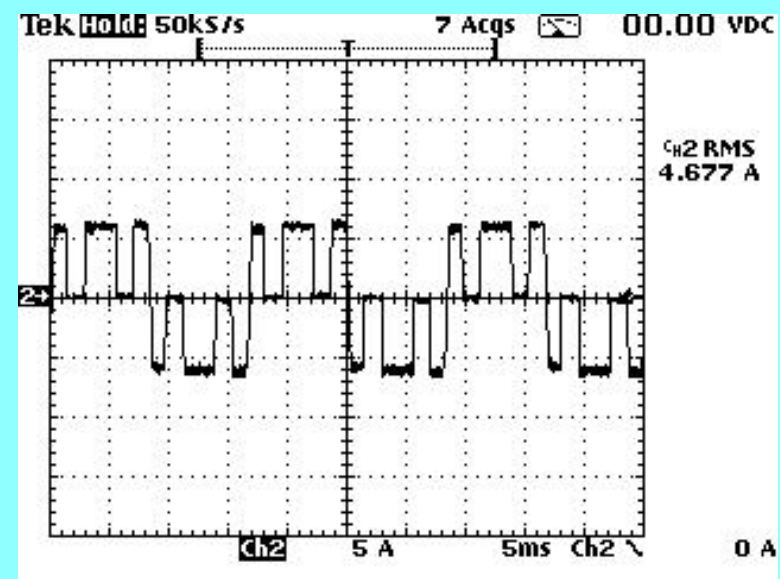
**RETIFICADOR TRIFÁSICO HÍBRIDO, COM CONVERSORES BOOST
(Ponte convencional a diodos + conversores chaveados)**

Retificador Trifásico Híbrido Multi-Pulsos

• Principais Formas de Onda (Operação – 12 Pulsos)



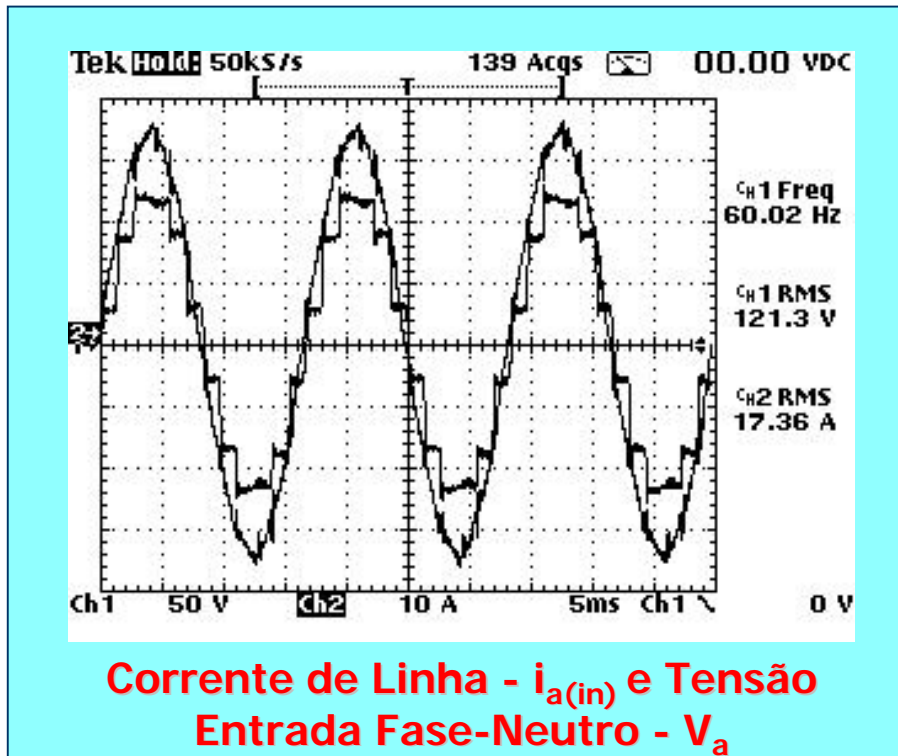
**Corrente Retificador
Convencional - ia1 (Rect.1)**



**Corrente Retificador
Chaveado - ia2 (Rect.2)**

Retificador Trifásico Híbrido Multi-Pulsos

• Principais Formas de Onda (Operação – 12 Pulsos)



- 👍 Elevado FP e Reduzida DHT
- 👍 Baixo Peso e Volume
- 👍 FP e DHT Programada
- 👍 Elevada Eficiência
- 👎 Comando Complexo
- 👎 Custo*

* Competitivo até poucas dezenas de kW

Considerações Finais

CAPÍTULO 5

Conversores: Correção Ativa Fator de Potência

Objetivos Gerais: Estruturas com CFP

Baixo Peso/Volume \Rightarrow Elementos reativos (Elev.Freq.)

Baixo Custo \Rightarrow Um único Transistor & Controlador

Elevada Eficiência \Rightarrow Integração & Comutações Suaves

Atendimento Pleno às Normas (Ex: IEC 61000-3-2)

$FP=1$ & $DHT=0$ NÃO é um objetivo principal !!!



e-mail: qualienergi@dee.feis.unesp.br
e-mail: canesin@dee.feis.unesp.br



UNESP – DEE – Campus III



Obrigado !!!