

Universidade Federal de Santa Catarina
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Instituto de Eletrônica de Potência

**Estabilizadores de Tensão Alternada para
Alimentação de Cargas Não-Lineares:
Estudo de Variações Topológicas e
Métodos de Controle**

Proponente: *Clóvis Antônio Petry, Me. Eng.*

Orientador: *Prof. João Carlos dos Santos Fagundes, Dr.*

Co-Orientador: *Prof. Ivo Barbi, Dr. Ing.*



Florianópolis, Fevereiro de 2004.

INEP

Organização

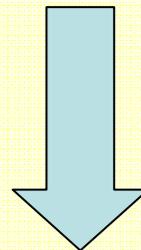
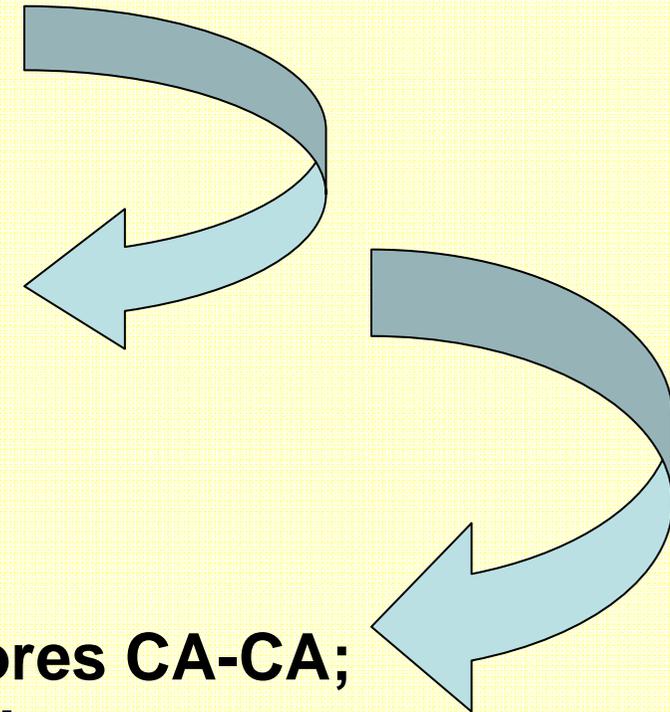
1. Motivações;

2. Introdução:

- Tema central (Problema);
- Definições iniciais.

3. Revisão bibliográfica:

- Conversão CA-CA;
- Classificação dos conversores CA-CA;
- Conversão CA-CA no Brasil.

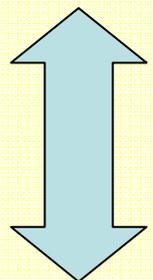


Organização

4. Hipótese solucionadora:

- Topologia proposta;
- Estudo teórico;
- Estudo experimental.

Refazer



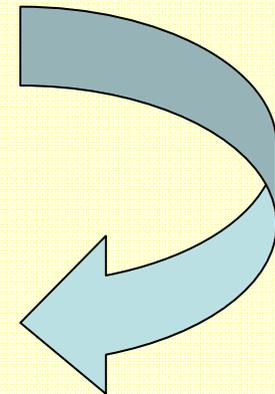
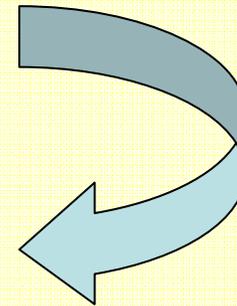
Ok, Fim

5. Conclusões parciais (análise dos dados);

6. Metodologia;

7. Cronograma;

8. Contribuições esperadas.





1 - Motivações

- **Ingresso no programa de bolsas PGI (Pós-Graduação Integrada);**
- **Aproveitamento da base de conhecimento gerada no mestrado;**
- **Desenvolvimento tecnológico para o país;**
- **Formação a nível de doutorado em área com deficiência de pessoal;**
- **Importância estratégica da Eletrônica de Potência;**

1 - Motivações

- **Multidisciplinaridade da Eletrônica de Potência;**
- **Realização pessoal.**

2000
ECO

© Marcelo Maestrelli

2 – *Tema central*

“Conciliar num estabilizador de tensão alternada as seguintes características:

- Bidirecionalidade em corrente e tensão;
- Tensão de saída senoidal com cargas lineares e não-lineares e com entrada distorcida;
- Capacidade elevadora e abaixadora de tensão;
- Processamento de apenas um percentual da potência da carga;
- Reduzido volume;
- Utilização de interruptores em configurações comerciais;
- Máxima distorção na tensão de saída de 5% [IEE 519-1992].”

2 – Definições iniciais

Conversão CA-CA:

“Aquela que converte energia na forma alternada (tensão e corrente), preferencialmente da rede de energia elétrica, em energia alternada (tensão e corrente) com valores de amplitude ajustável e frequência bem definida.”

2 – Definições iniciais

Estabilizador (regulador):

“Dispositivo capaz de assegurar a constância do valor eficaz e conformar a tensão em sua saída conforme uma referência desejada.”

2 – Definições iniciais

Conversor Direto:

“Aquele no qual a energia é transferida de forma direta da entrada para saída.”

*Sem estágios de armazenamento
ou de conversão de (corrente/tensão)
alternada em contínua.*

Conversor Indireto:

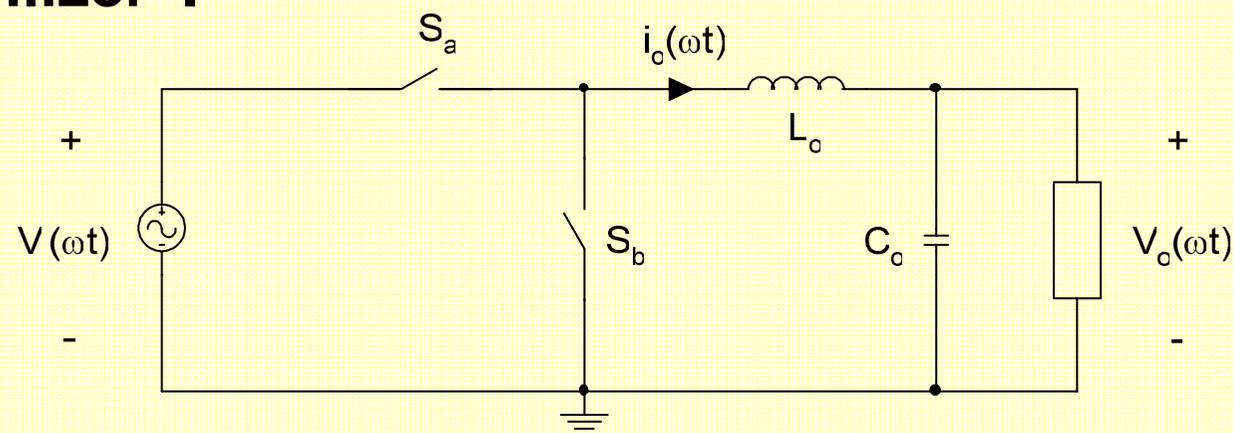
“Aquele no qual a energia é transferida de forma indireta da entrada para saída.”

2000
ECO

© Marcelo Maestrelli

3 – Conversão CA-CA

- 1910 – Transmissão e distribuição em tensão alternada nos EUA;
- 1929 – H. M. Stoler e J. R. Power: “A precision regulator for alternating voltages”.
- 1950 – G. N. Patchett: “Precision a.c. voltage stabilizer”.



Dificuldade da conversão CA-CA: comutação.

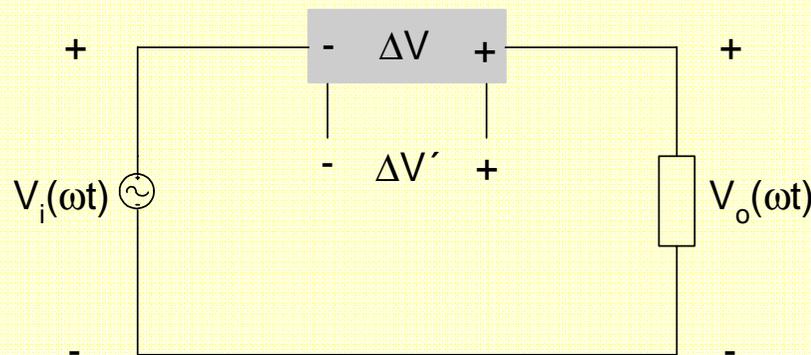
3 – *Classificação*

- **Classificação de Mohan [1] – baseada na função de conversão entre entrada e saída (1988);**
- **Classificação de Van Wyk [15] – baseada na função de chaveamento dos conversores (1999);**
- **Classificação de Yano [16] – engloba todos os conversores do Japão (2000);**
- **Classificação de Bhowmik [31] – aborda os conversores CA-CA (1992).**

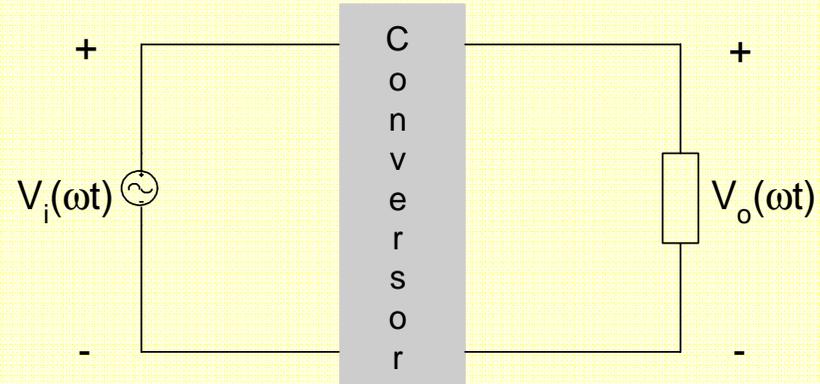
3 – Classificação

Classificação INEP - 2001

Compensador

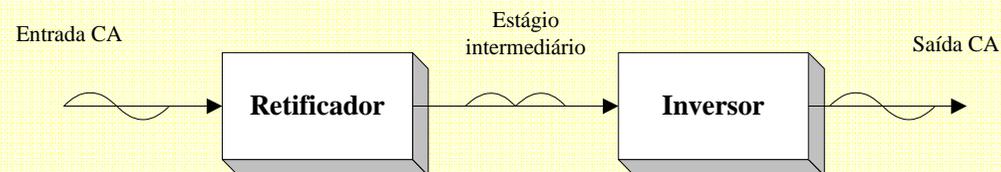
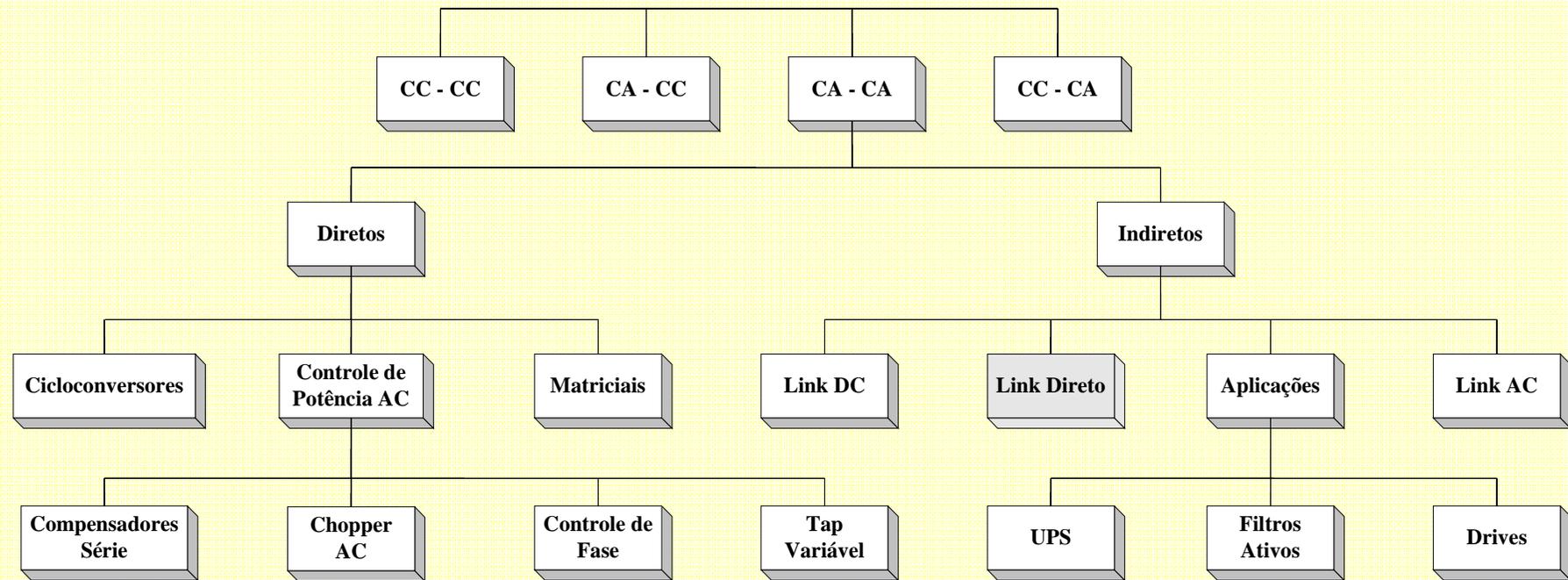


Não-Compensador



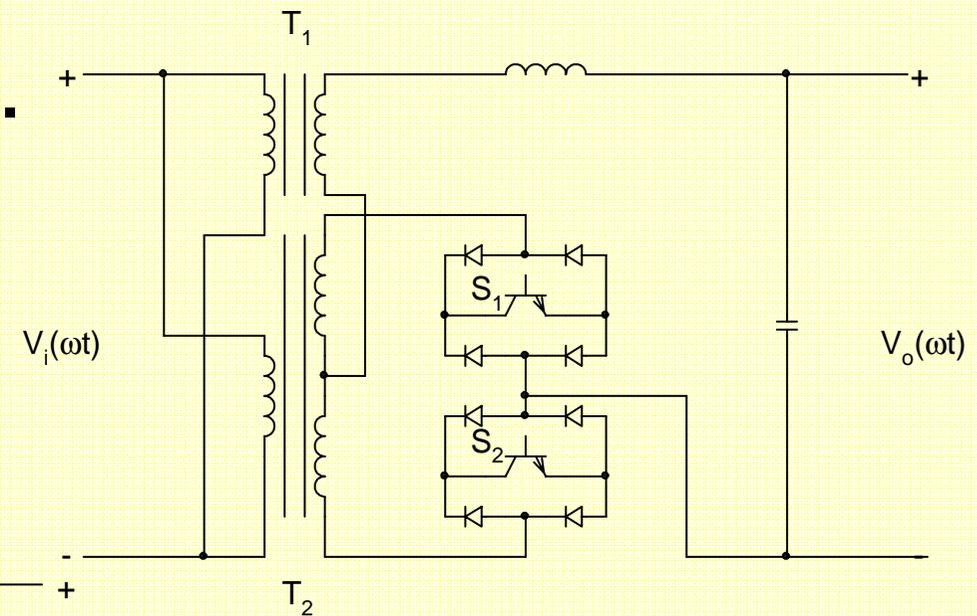
3 – Classificação

Classificação INEP - 2004

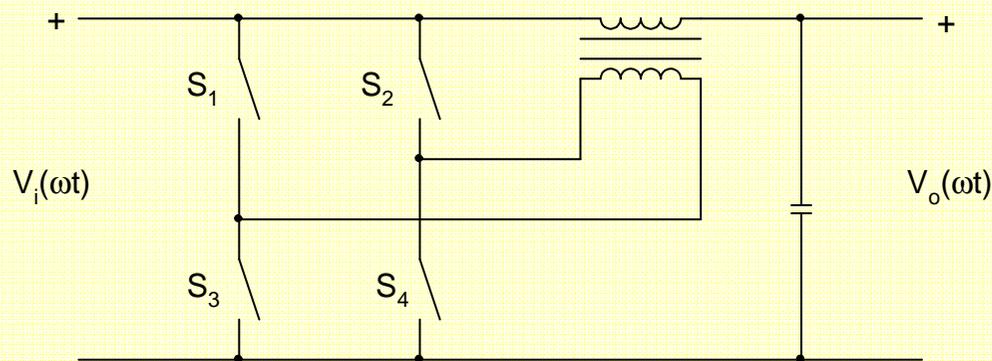


3 – Classificação

- Conversores matriciais – Venturini (1980);
- Cicloconversores;
- Compensação de tensão.



[79] – Oliveira (1997)

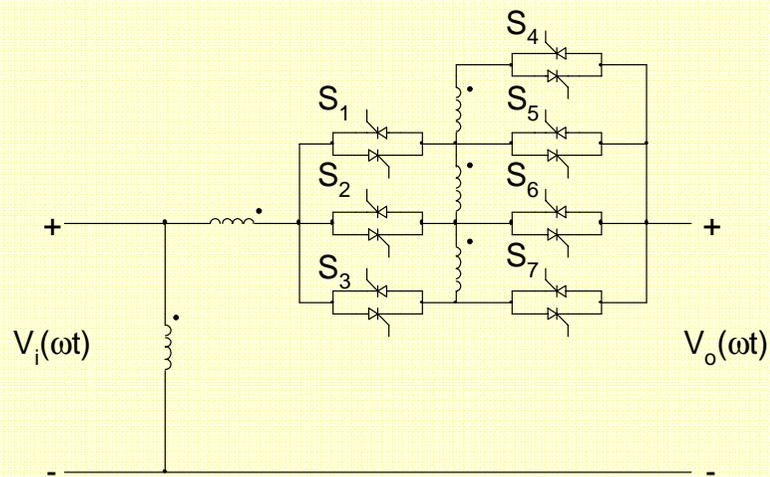
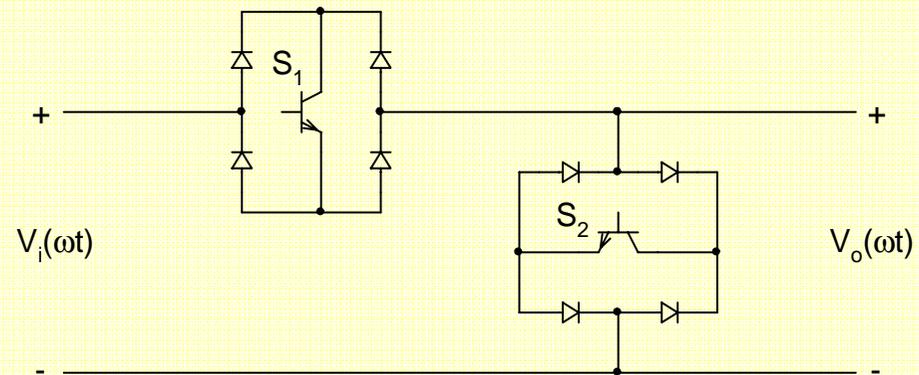


[70] – Cardoso (1986)

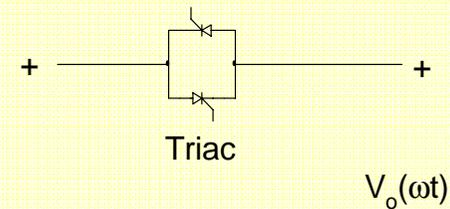
3 – Classificação

- Controle de fase;
- Chopper CA;
- Tap variável.

[105] – Fagundes (1983)

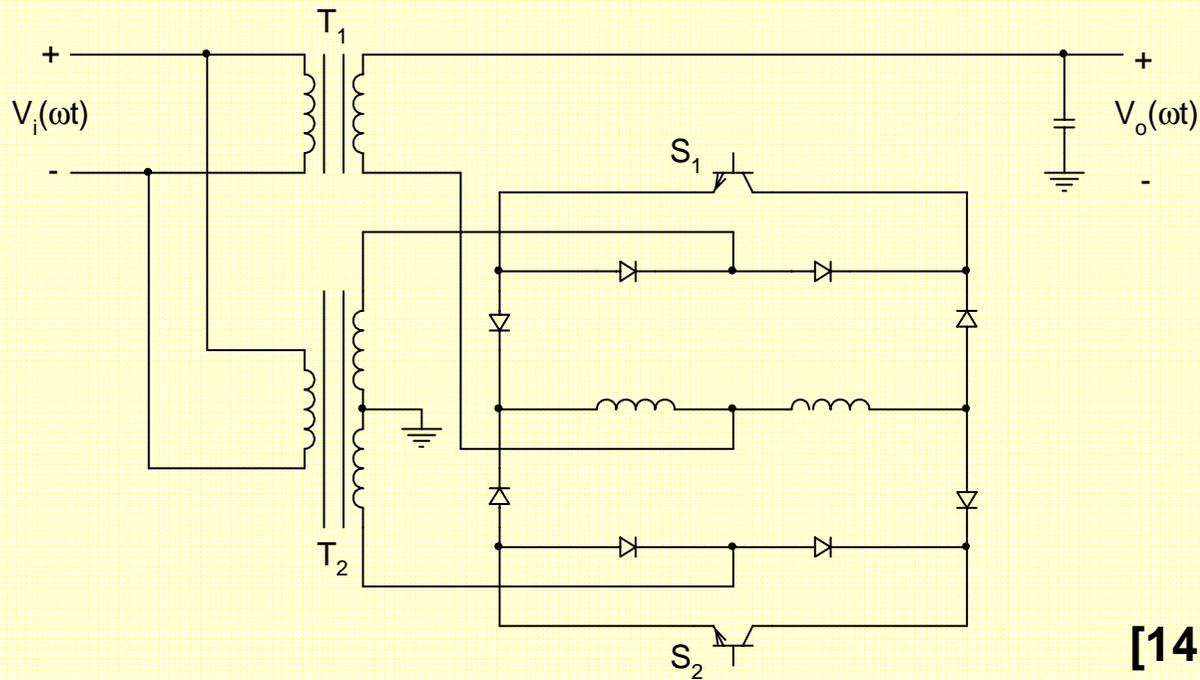


[183] – Alvarez (1984)



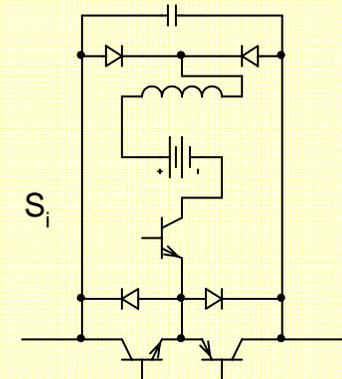
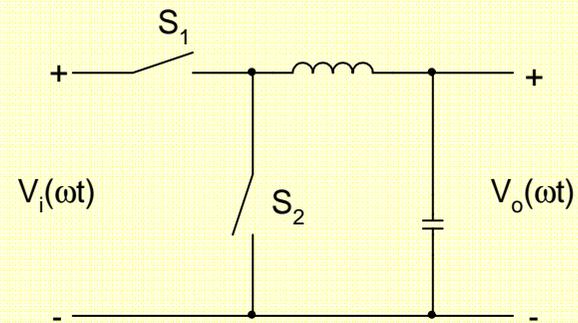
[27] – Kassick (1983)

3 – Classificação

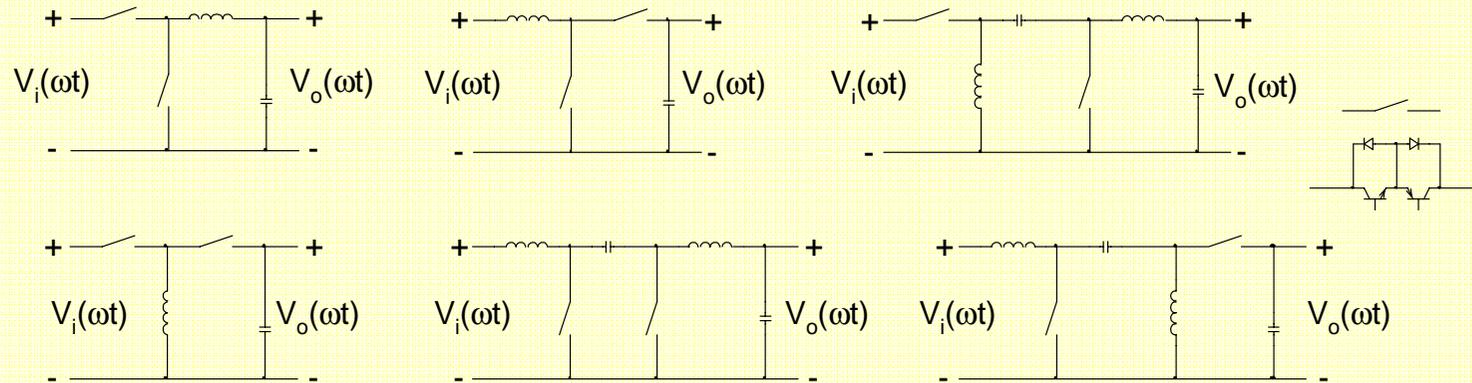


[88] – Petry (2001)

[141] – Villaça (1995)

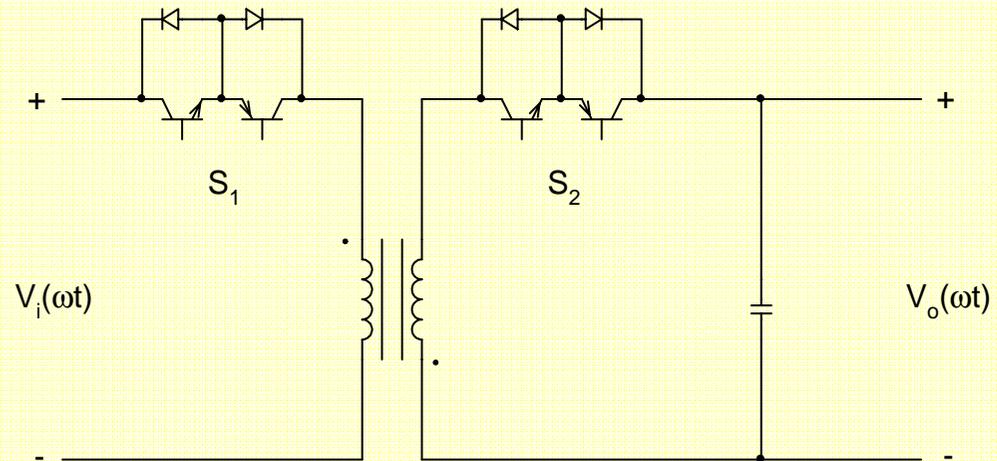


3 – Classificação



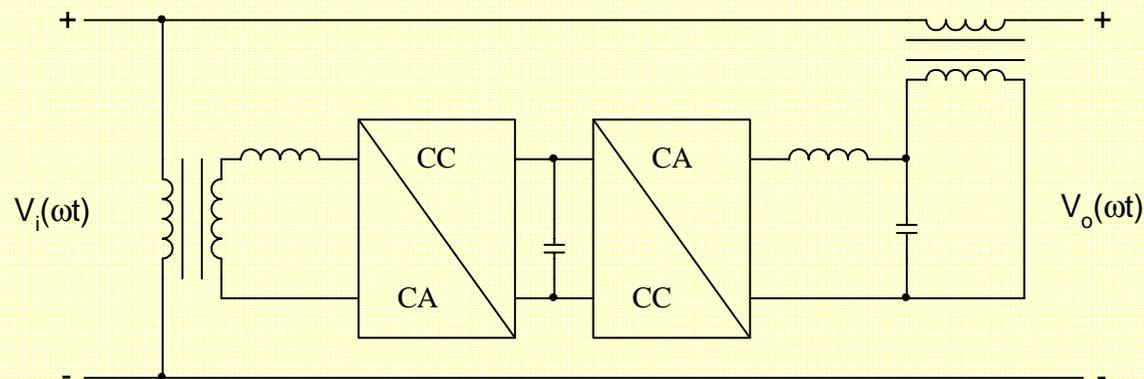
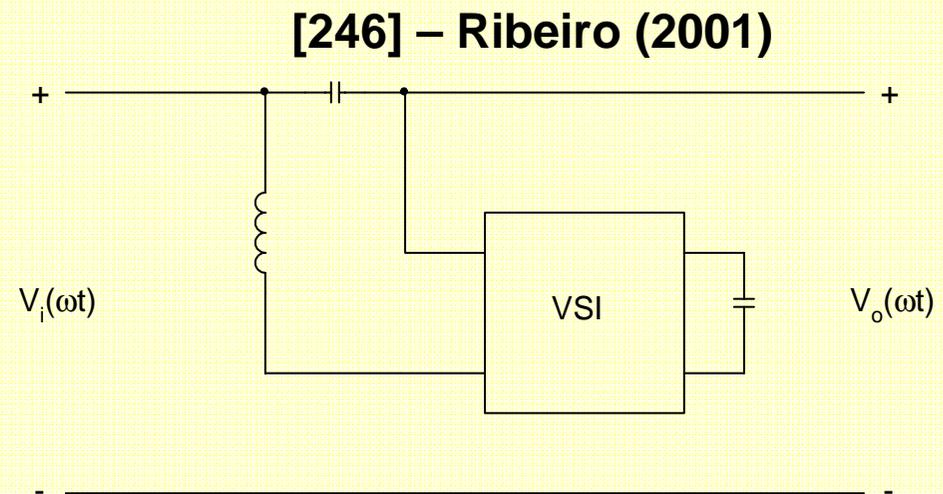
[127] – Barbi (1993)

[118] – Barbi (1991)



3 – Classificação

- Link CC ou CA;
- Link de alta freqüência;
- UPS;
- Drives;
- Filtros ativos.



[216] – Campos (1996)

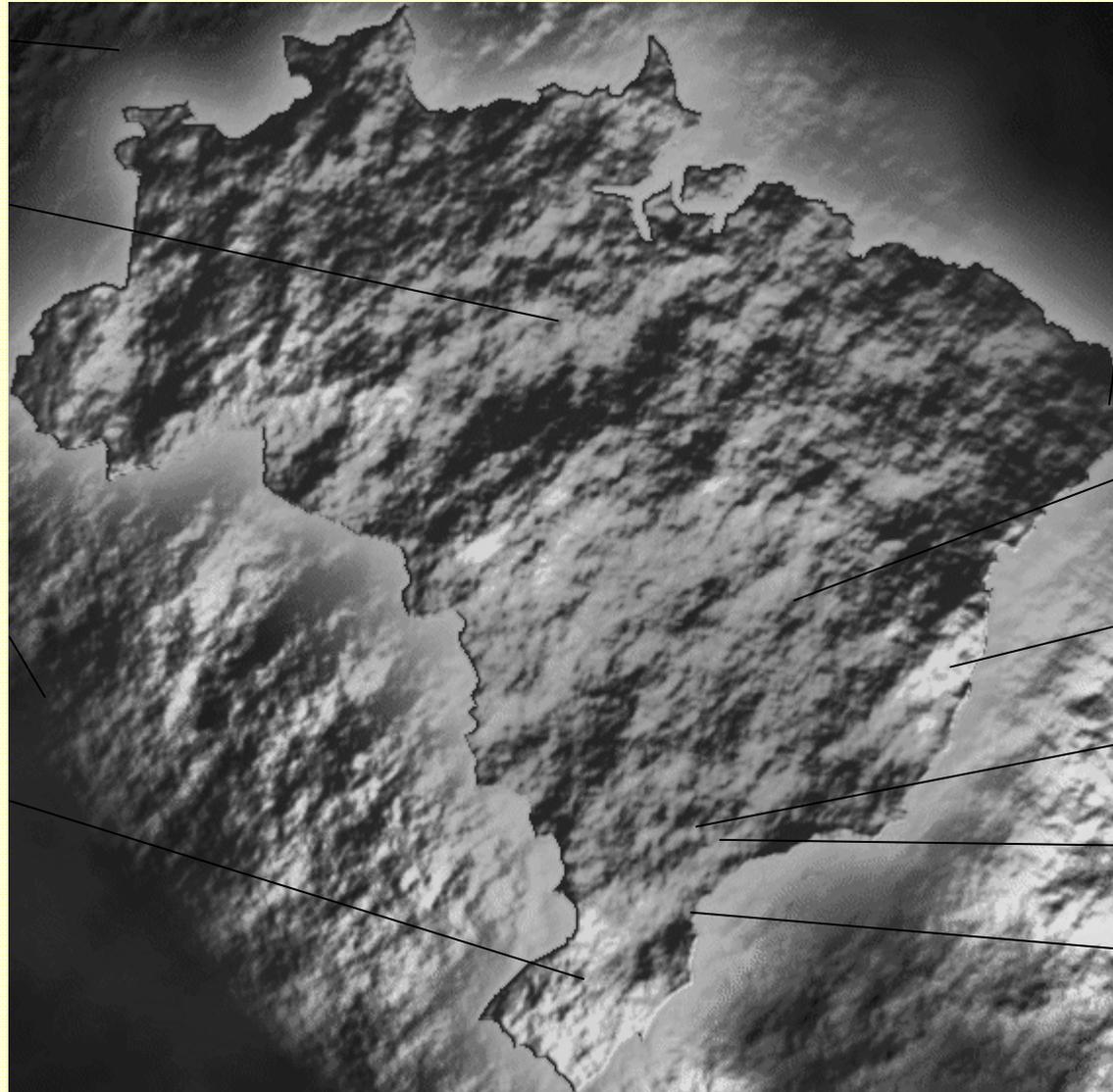
3 – Conversão CA-CA - Brasil

Campos – Canadá
- 1

Lopes – Pará - 1

Alvarez – Chile - 2

Campos, Pinheiro
– Santa Maria - 2



Rodrigues,
Jacobina – PB - 2

Oliveira e outros –
MG - 17

Trabach – ES - 2

Pomilio – SP - 1

Dantas – SP - 1

Barbi e outros –
SC - 26

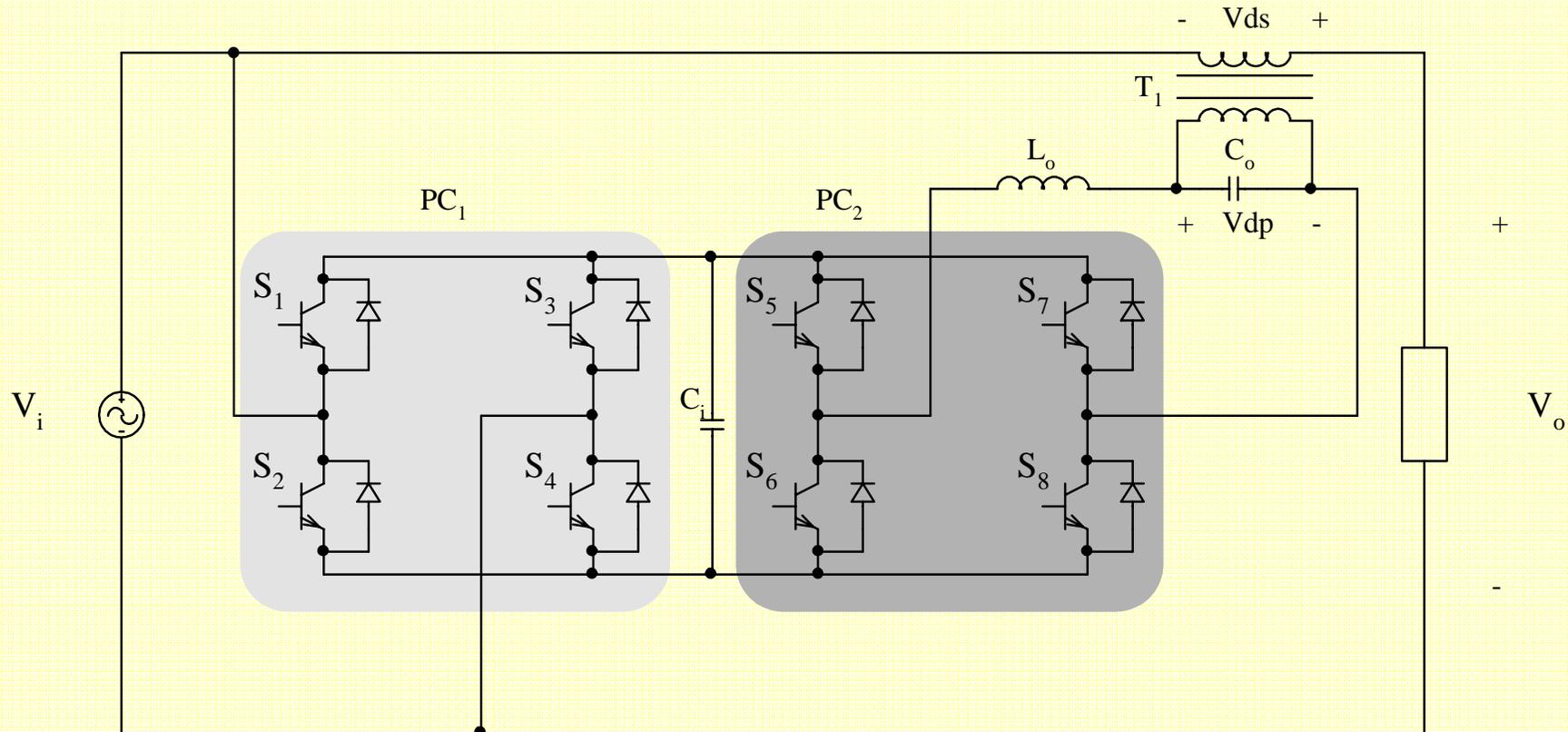
VIAGEM
ECO

© Marcelo Maestrelli



4 – Topologia proposta

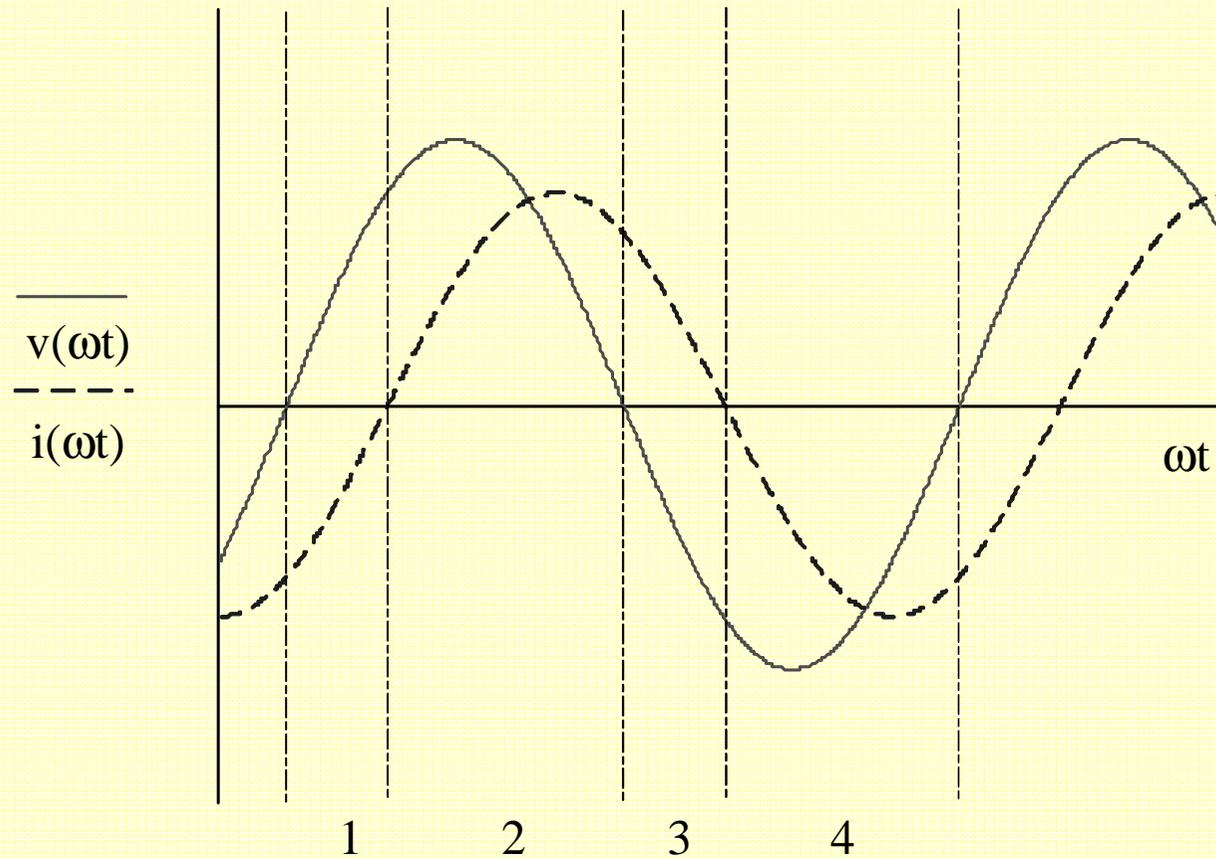
Kwon et al. (2002) [229]



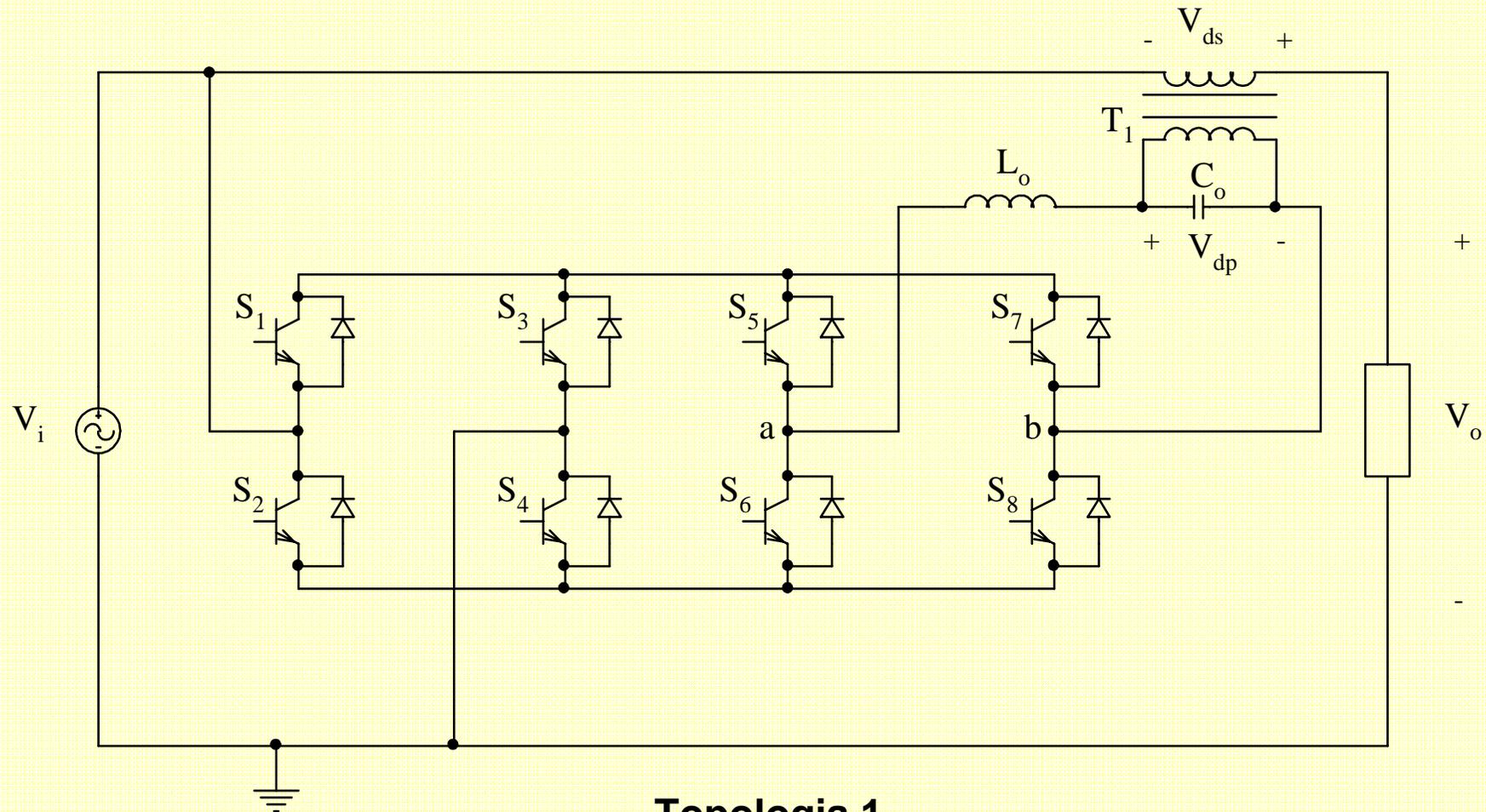
- Sem elementos armazenadores
- Bidirecional em tensão e corrente
- Interruptores comerciais
- Elevadora e abaixadora

- Fácil comando
- Robusta
- Alto rendimento
- Não permite variar a frequência

4 – Etapas de operação

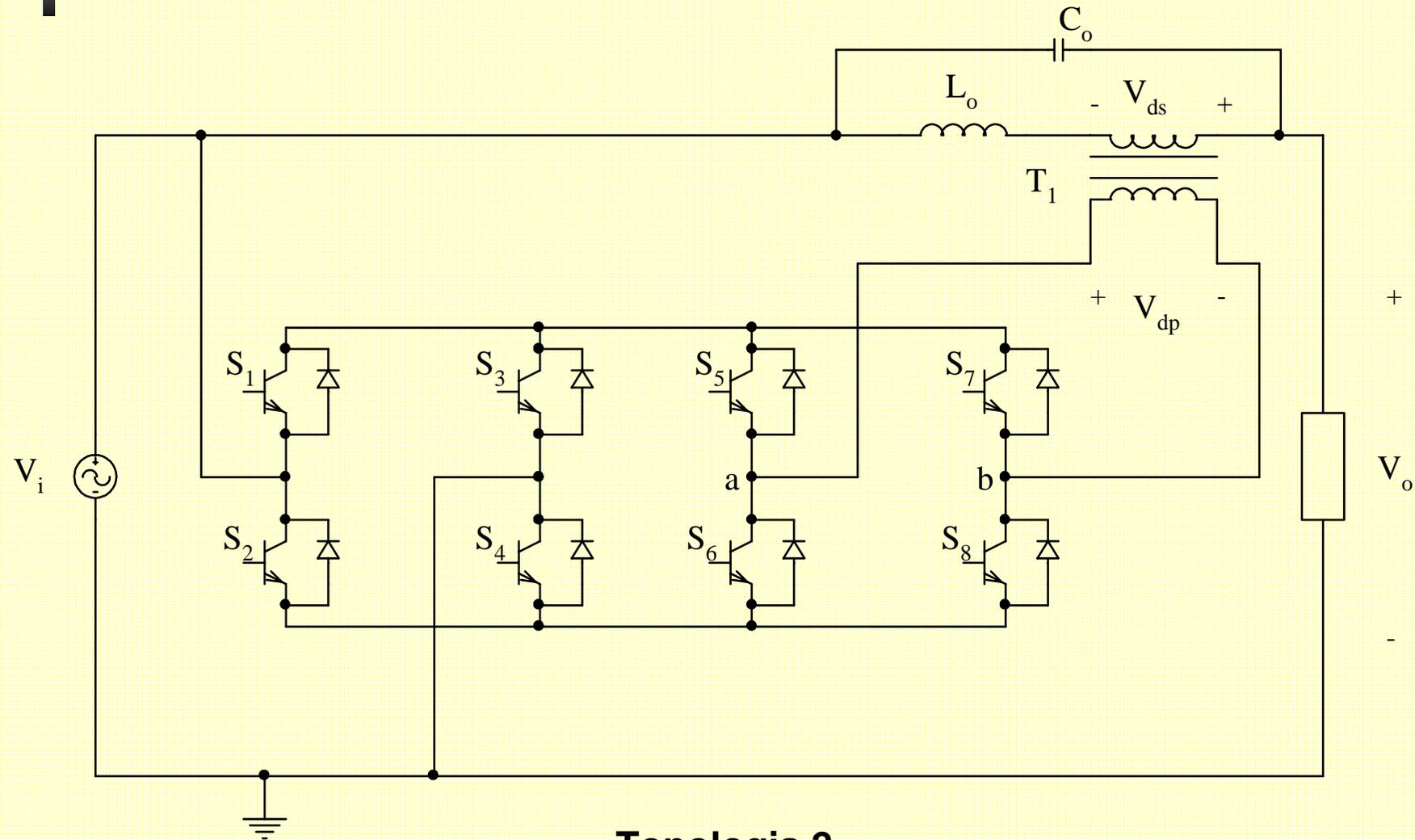


4 – *Variações topológicas*



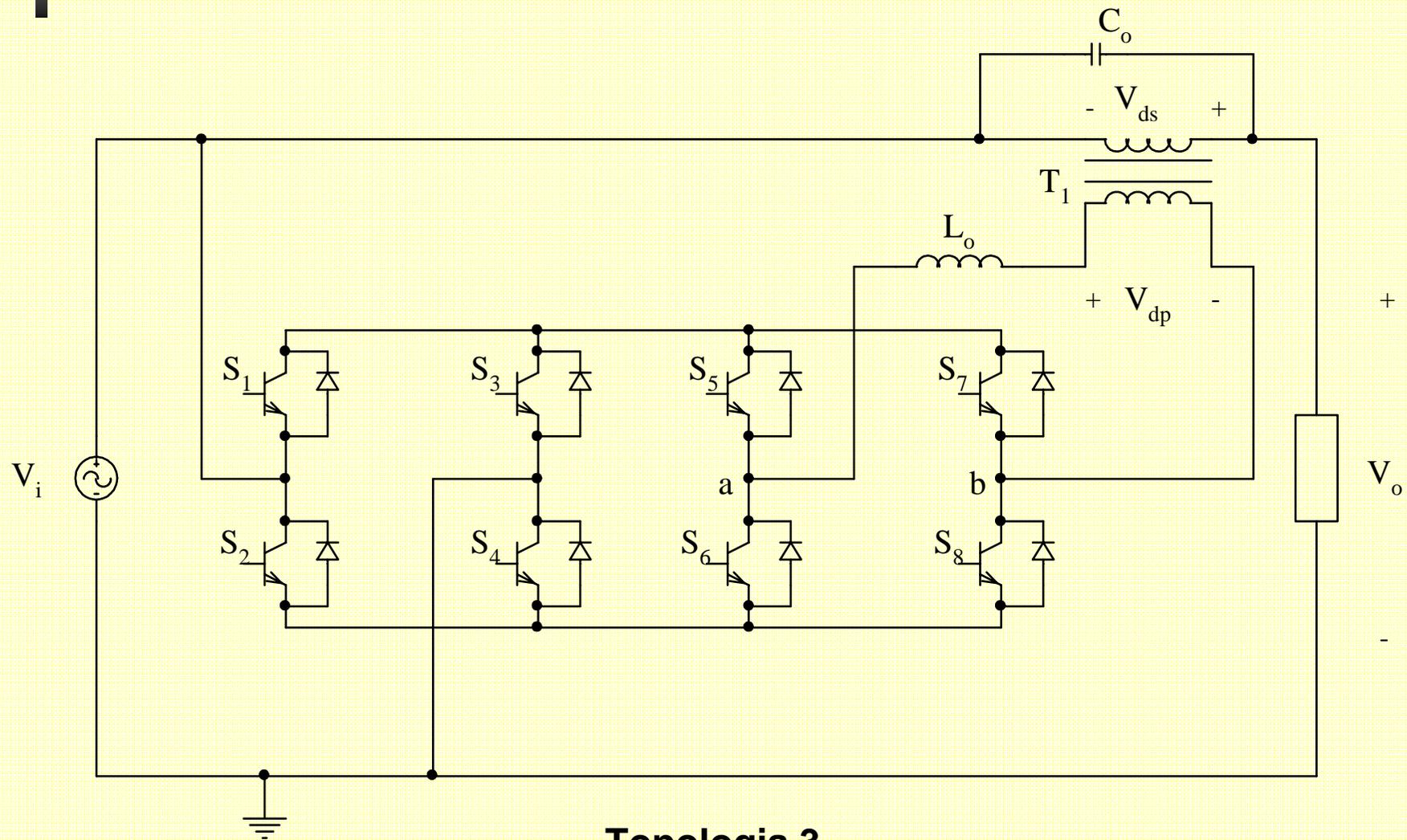
Topologia 1

4 – Variações topológicas



Topologia 2

4 – *Variações topológicas*



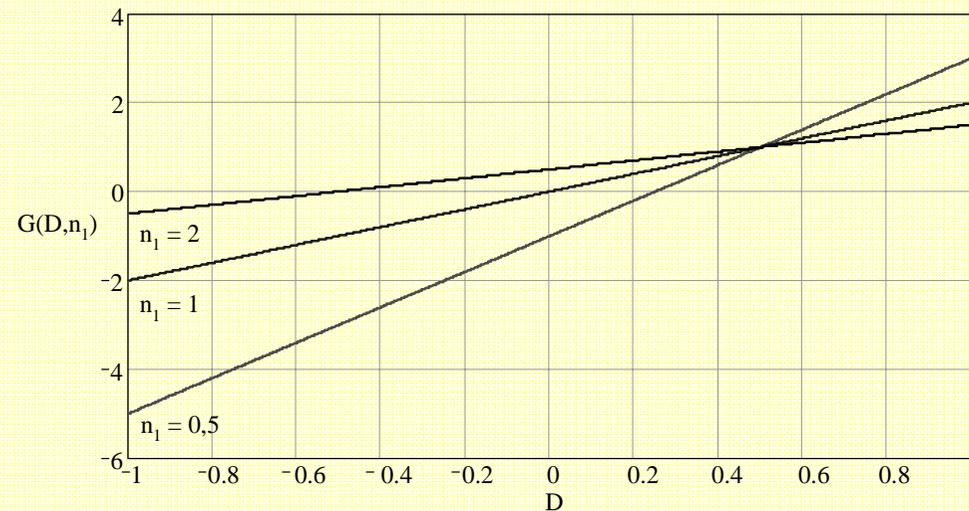
Topologia 3

4 – Estudo teórico

Ganho estático:

2 Níveis $G = \frac{V_o}{V_i} = \frac{n_1 + 2 \cdot D - 1}{n_1}$

3 Níveis $G = \frac{V_o}{V_i} = \frac{n_1 + D}{n_1}$



4 – Estudo teórico

Relação transformação:

$$V_i < V_{i_nom} \quad n_1 = \frac{(1 - \Delta)}{\Delta} \cdot D^+ \quad n_1 = \frac{(1 - 0,2)}{0,2} \cdot 1 = 4$$

$$V_i > V_{i_nom} \quad n_1 = \frac{(1 + \Delta)}{\Delta} \cdot D^- \quad n_1 = \frac{(1 + 0,2)}{0,2} \cdot 1 = 6$$

$$n_1 = \frac{(1 - \Delta)}{\Delta} \cdot D_{\max}$$

4 – Estudo teórico

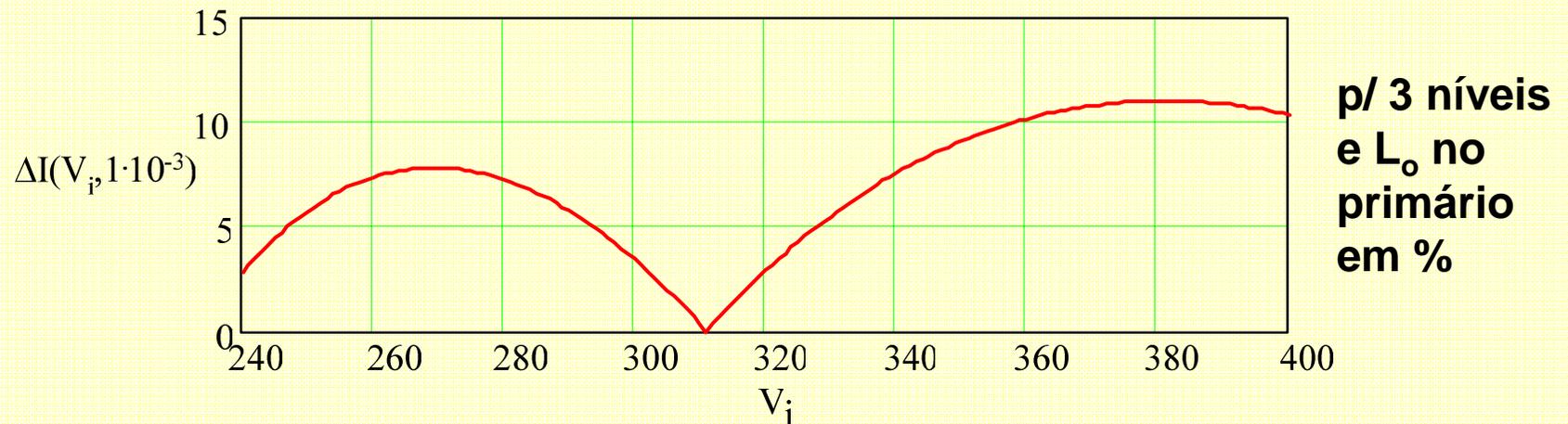
Ondulação de corrente:

2 Níveis

$$\Delta I_{L_o} = \frac{V_{L_o}}{L_o \cdot f_s} D$$

3 Níveis

$$\Delta I_{L_o} = \frac{V_{L_o}}{2 \cdot L_o \cdot f_s} D$$

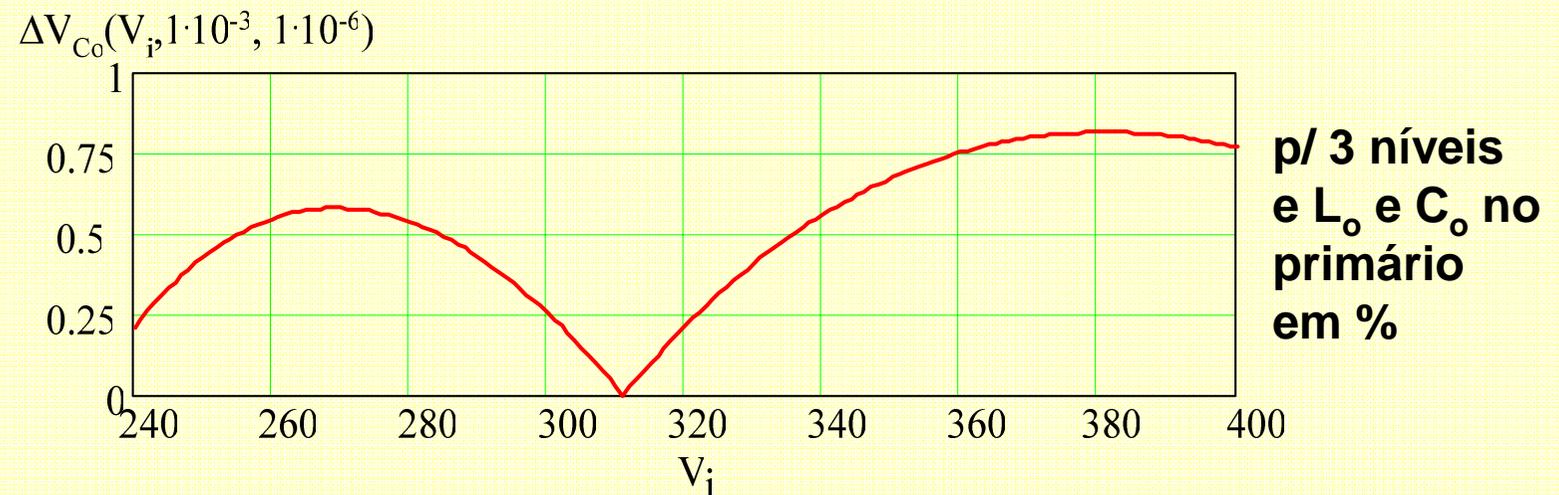


4 – Estudo teórico

Ondulação de tensão:

2 Níveis
$$\Delta V_{C_o} = \frac{4 \cdot V_{L_o}}{\pi^3 \cdot f_s^2 \cdot L_o \cdot C_o} \cdot D_{\max}$$

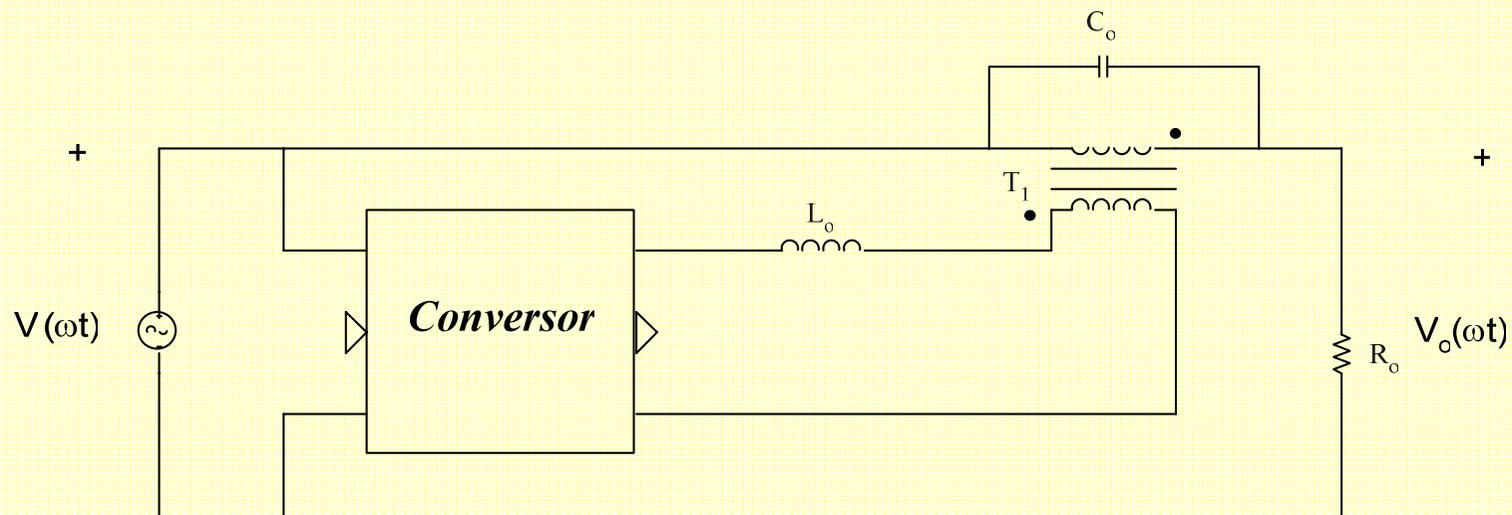
3 Níveis
$$\Delta V_{C_o} = \frac{V_{L_o}}{\pi^3 \cdot f_s^2 \cdot L_o \cdot C_o} \cdot D_{\max}$$



4 – *Estudo teórico*

Modelagem (3 níveis):

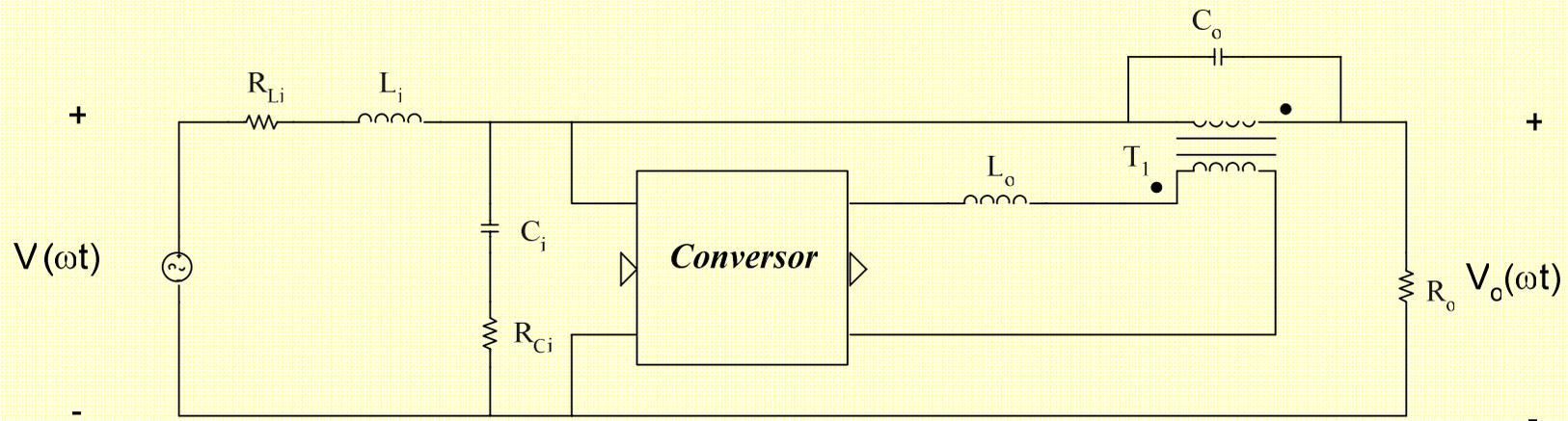
$$\frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{V_i}{n_1} \cdot \frac{1}{\left[s^2 \cdot L_o \cdot C_o + s \cdot \frac{L_o}{R_o} + 1 \right]}$$



4 – Estudo teórico

$$\frac{dV_o}{dt} = \frac{V_i}{n_1} \frac{R_o \cdot \left[V_{ap} \cdot n_1 - Z_i \cdot \left(s^2 \cdot L_o \cdot C_o \cdot I_c + s \cdot C_o \cdot D \cdot V_{ap} + n_1 \cdot (n_1 + D)^2 \cdot I_c \right) \right]}{\left(s^2 \cdot L_o \cdot C_o \cdot R_o + s \cdot L_o + R_o \cdot n_1^2 \right) + Z_i \cdot \left(s^2 \cdot L_o \cdot C_o + s \cdot C_o \cdot R_o \cdot D^2 + (n_1 + D)^2 \right)}$$

Conversor com: indutância, resistência e capacitor na entrada.



4 – Estudo experimental

Dados para projeto

$$\Delta = 0,2$$

$$V_i = 311 \text{ V}$$

$$V_o = 311 \text{ V}$$

$$P_o = 10 \text{ kVA}$$

$$\Delta V_o \cong 3\%$$

$$\Delta I_L \cong 20\%$$

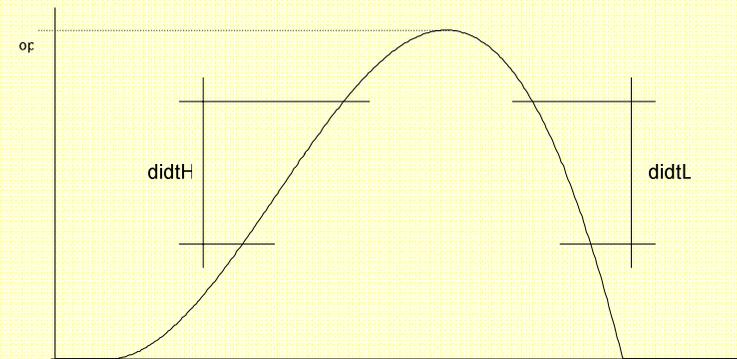
$$f_s = 20 \text{ kHz}$$

$$D_{\max} = 0,98$$

$$di/dt_H = 0,12 \text{ A} / \mu\text{s}$$

$$di/dt_L = -0,24 \text{ A} / \mu\text{s}$$

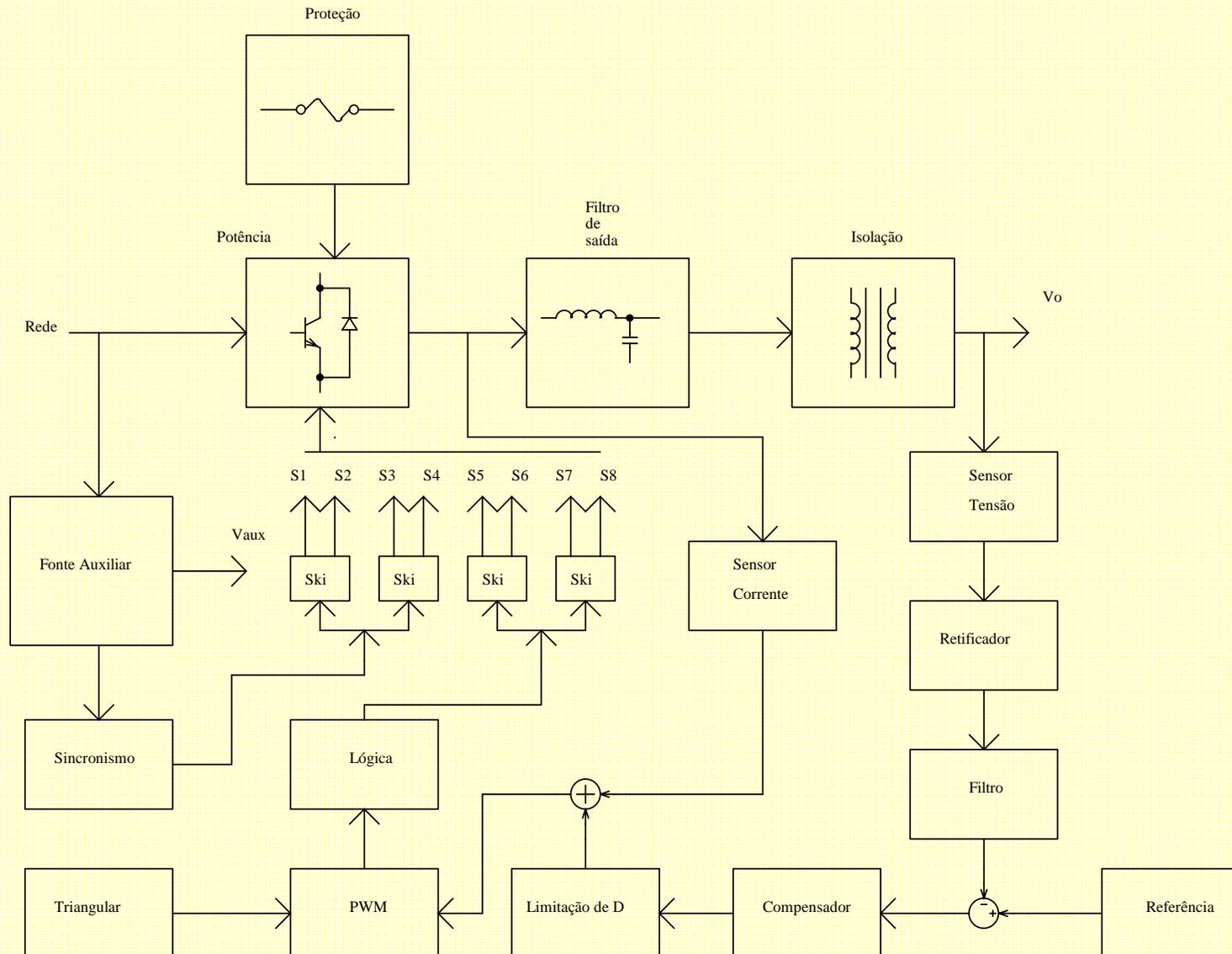
$$I_{\text{op}} = 137 \text{ A}$$



$$n_1 = 3 \quad P_1 = 2 \text{ kVA}$$

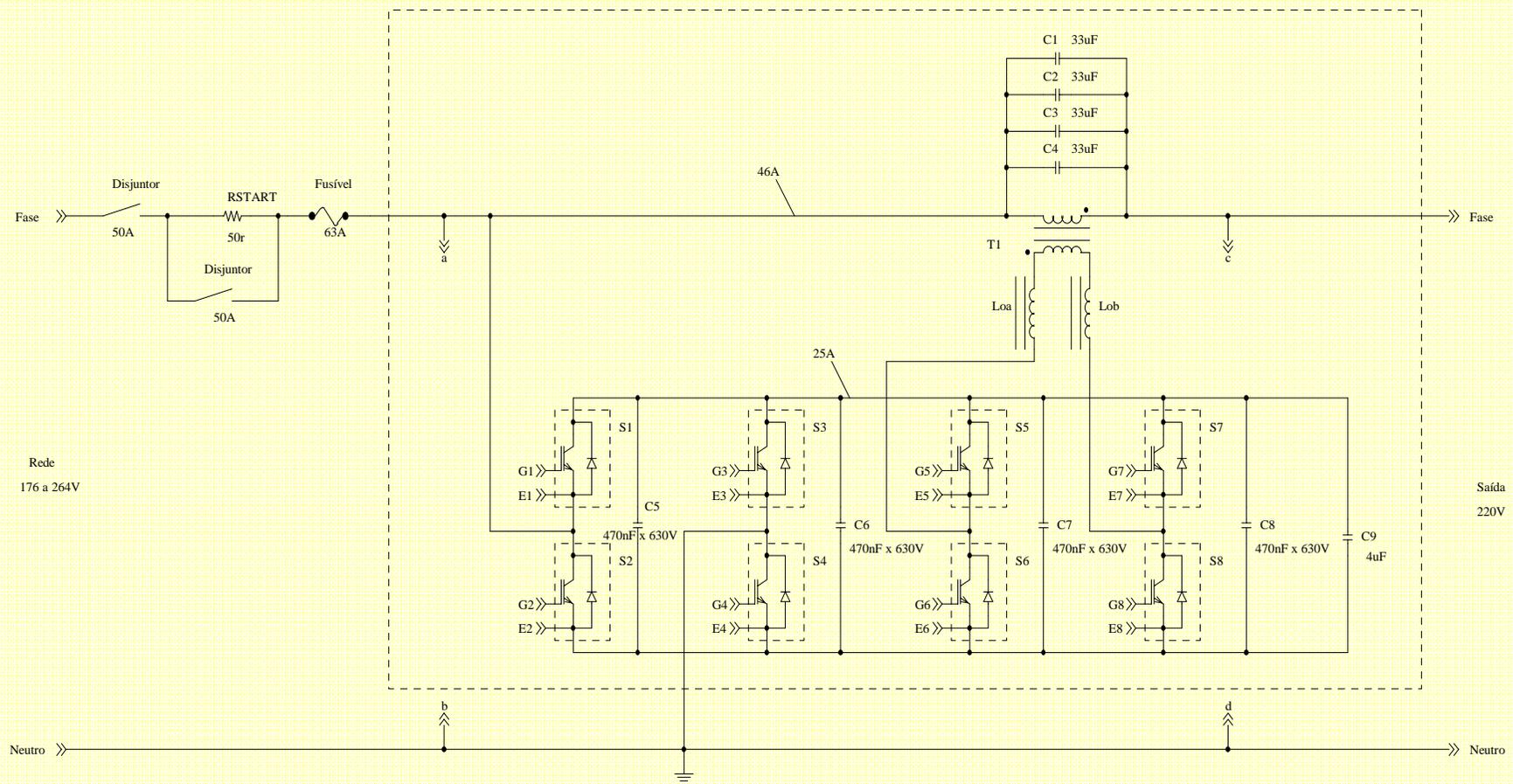
$$C_o = 4 \times 33 \mu\text{F} \quad L_{\text{eq}} = 60 \mu\text{H}$$

4 – Estudo experimental

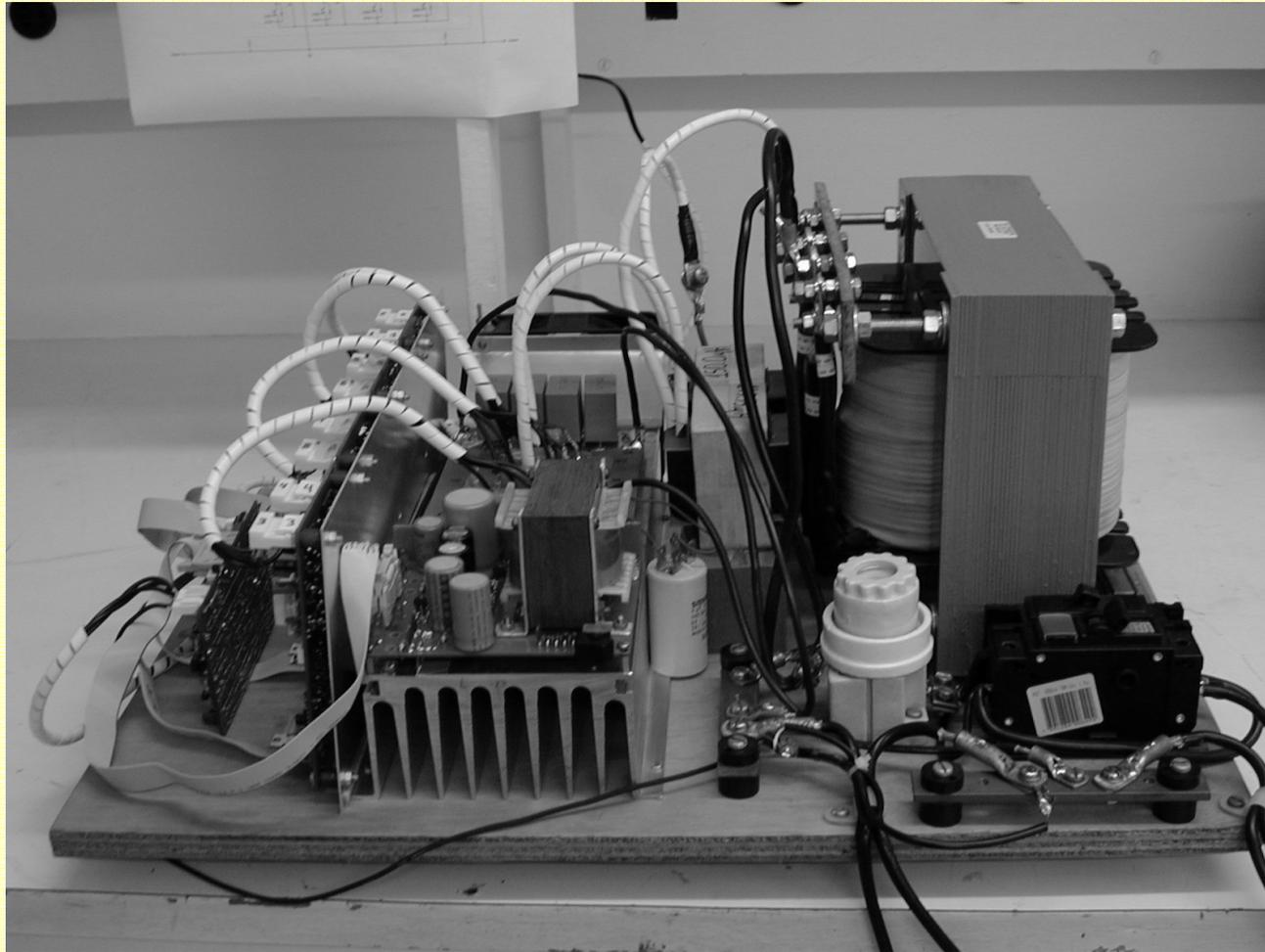


4 – Estudo experimental

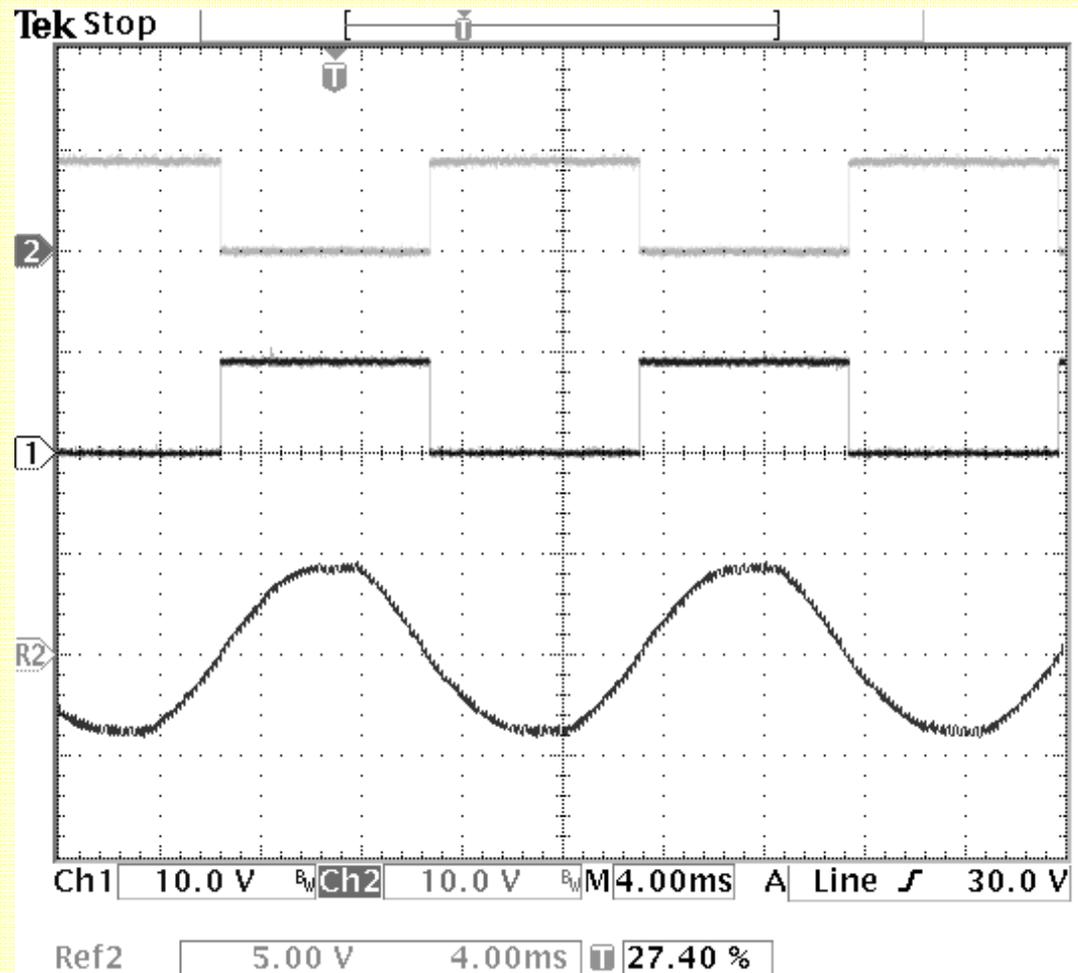
Circuito de potência



4 – *Estudo experimental*

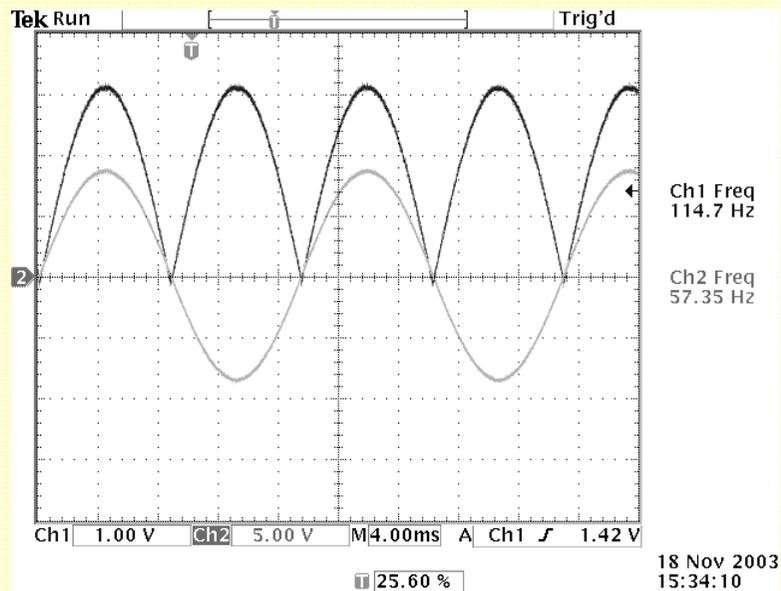
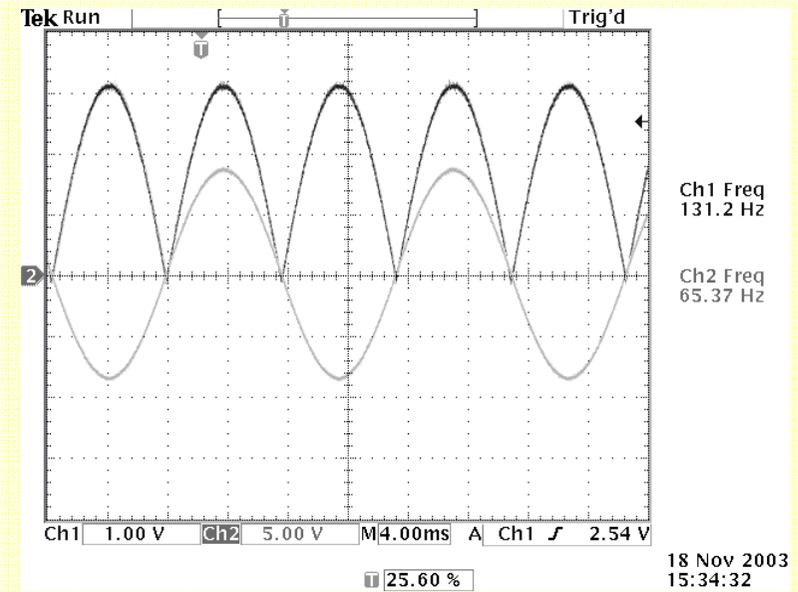
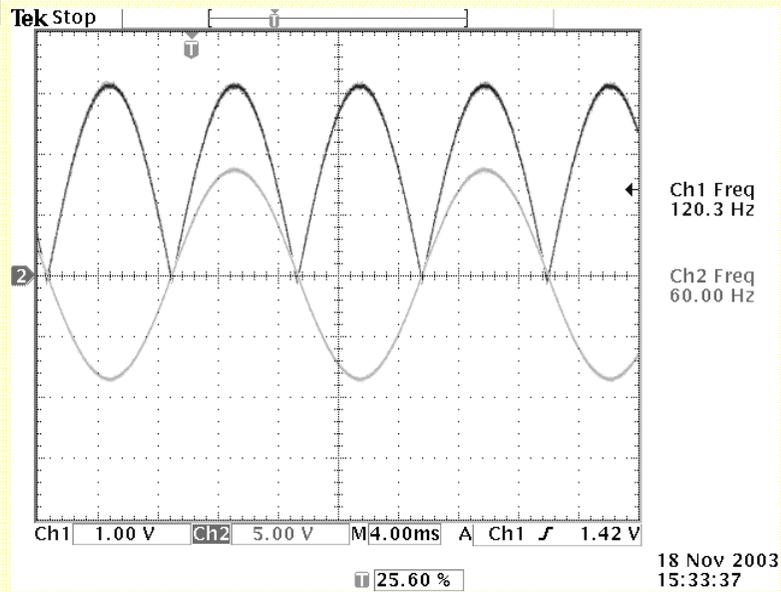


4 – Estudo experimental



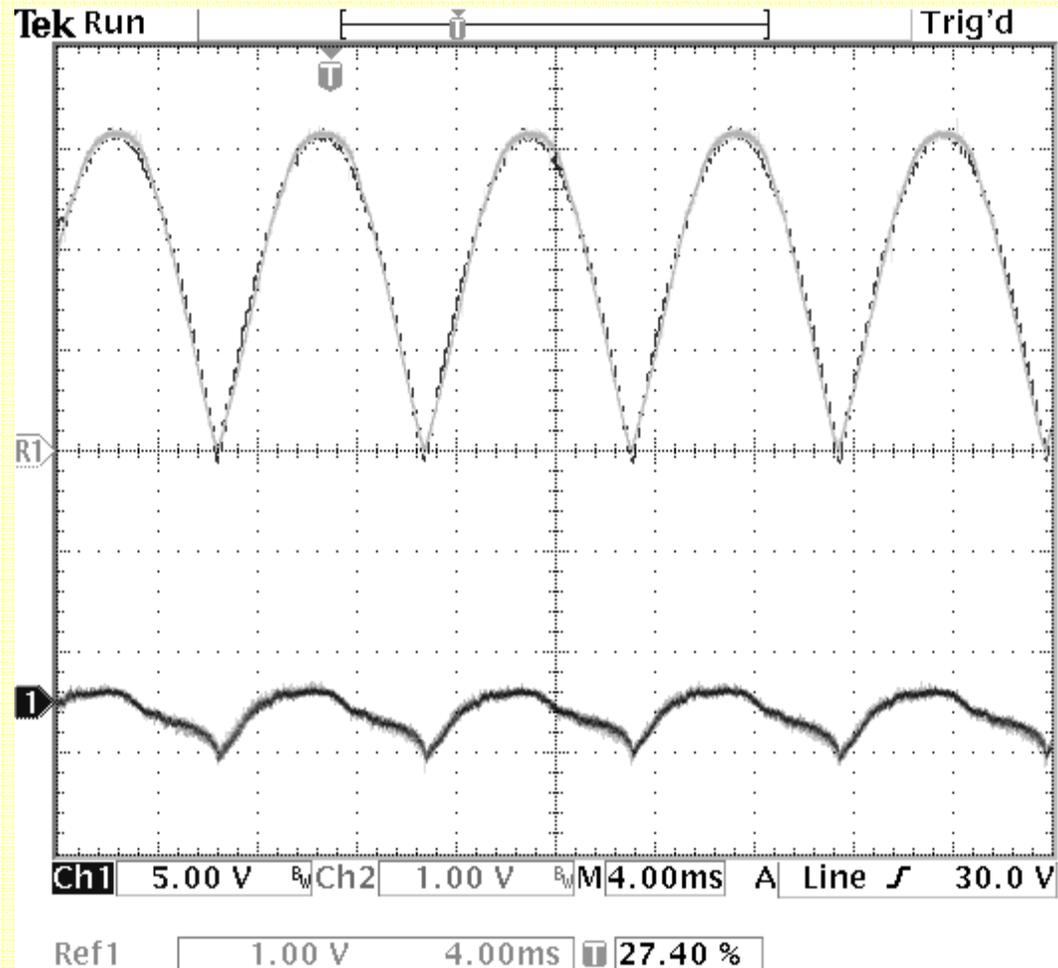
Sinal de sincronismo e pulsos de S_1/S_4 e S_2/S_3

4 – Estudo experimental



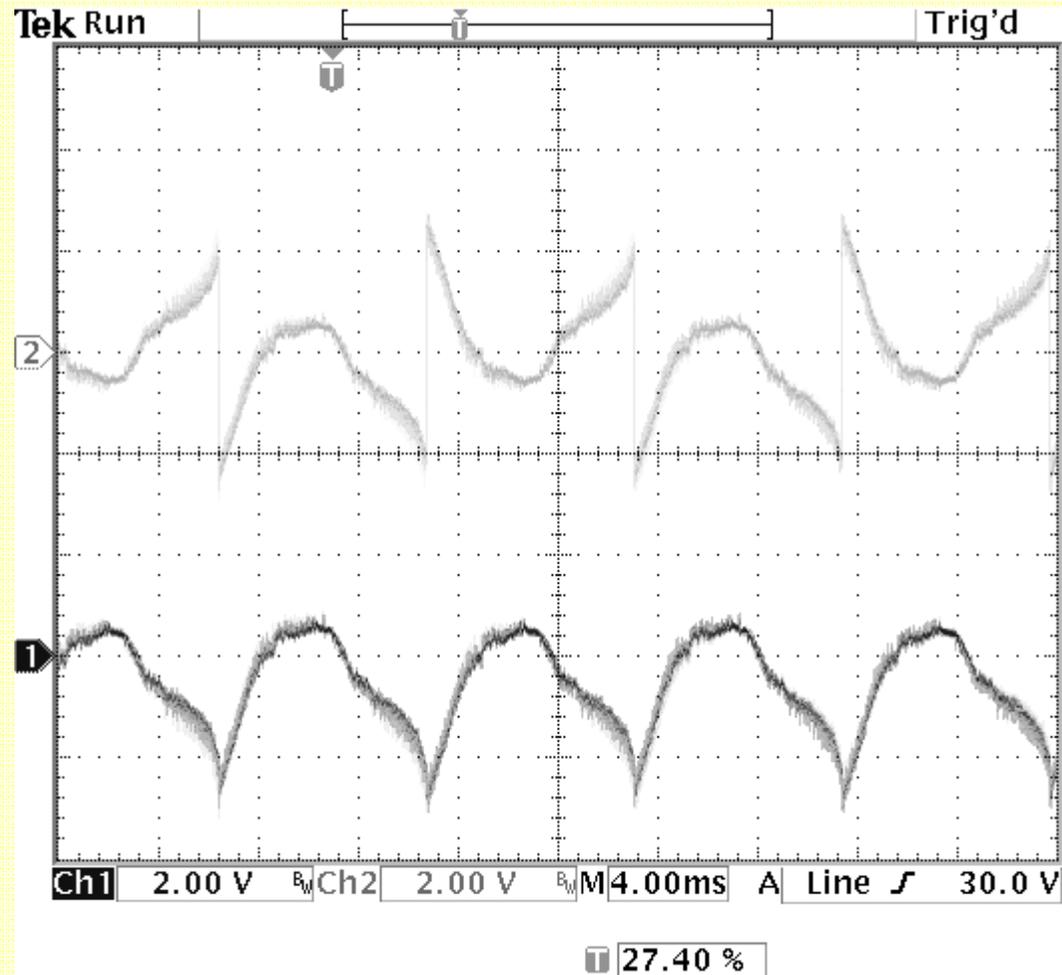
Variação de frequência

4 – Estudo experimental



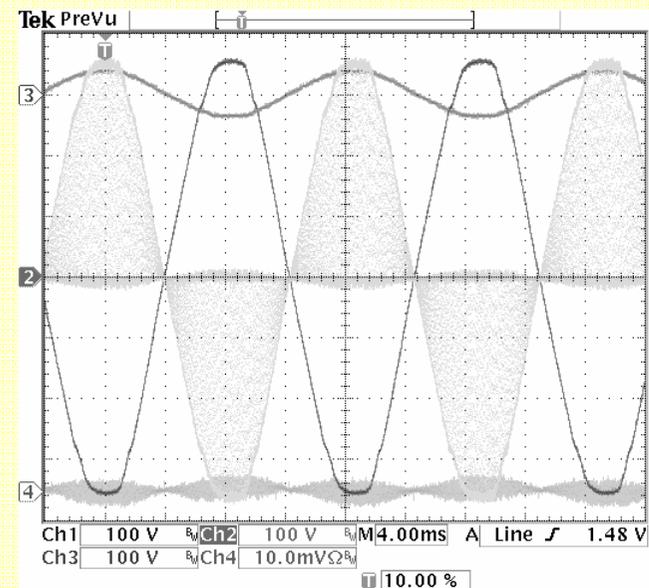
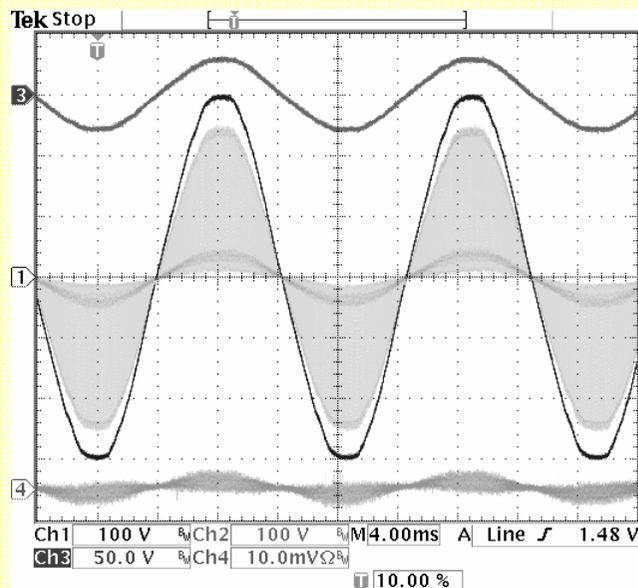
Tensões de: referência,
amostrada e controle
antes do mux/demux

4 – Estudo experimental



Tensão depois e antes do mux/demux.

4 – Estudo experimental



Malha aberta: somador e subtrator.

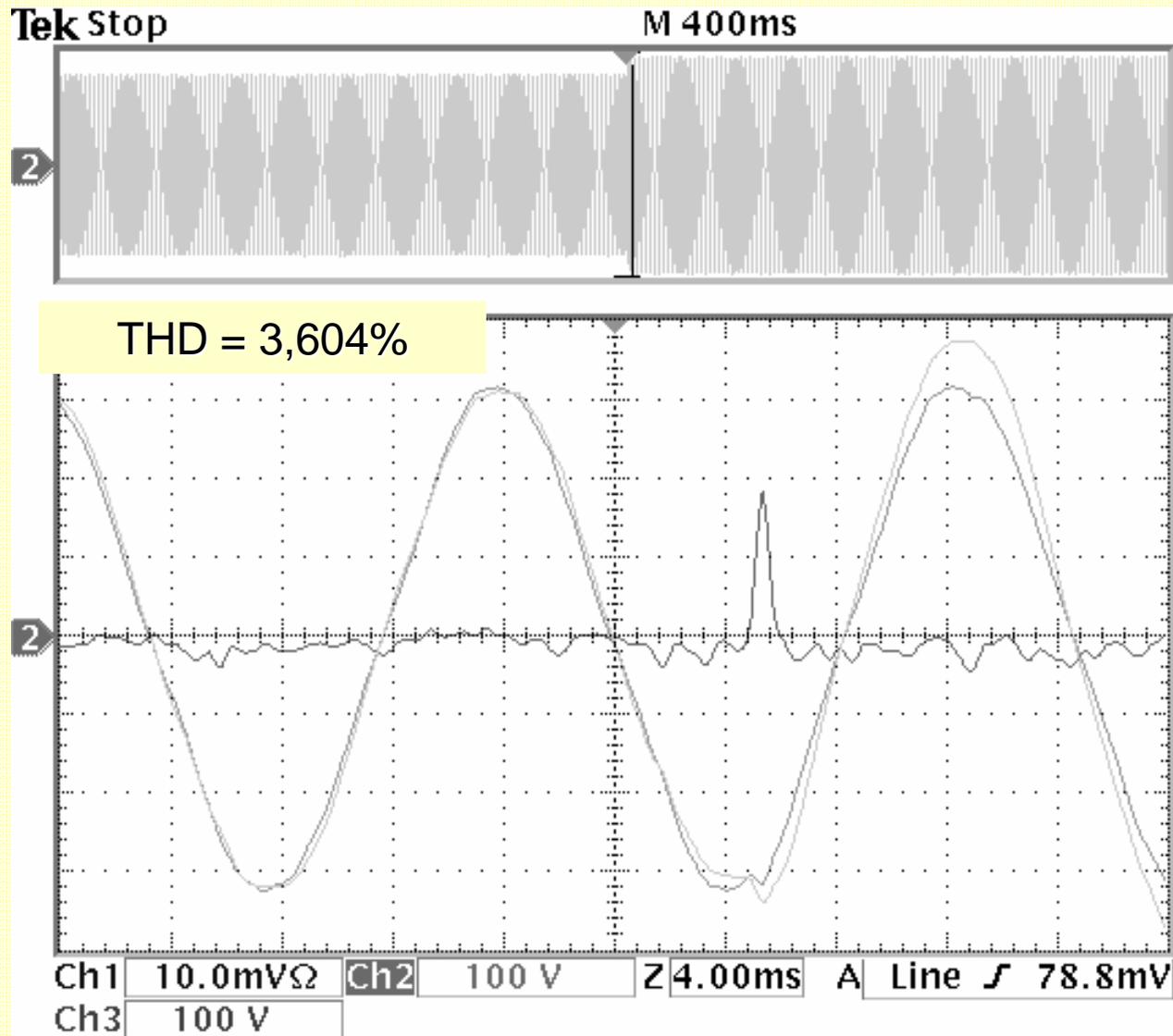
4 – *Estudo experimental*

Variação na tensão de entrada

V_i [V]	V_o [V]	ΔV_i [%]	$ \epsilon $ [%]
225,3	222,0	+2,4	0,9
249,4	221,2	+11,8	0,5
272,8	221,6	+19,4	0,7
201,4	221,3	-9,2	0,6
177,5	222,0	-23,9	0,9

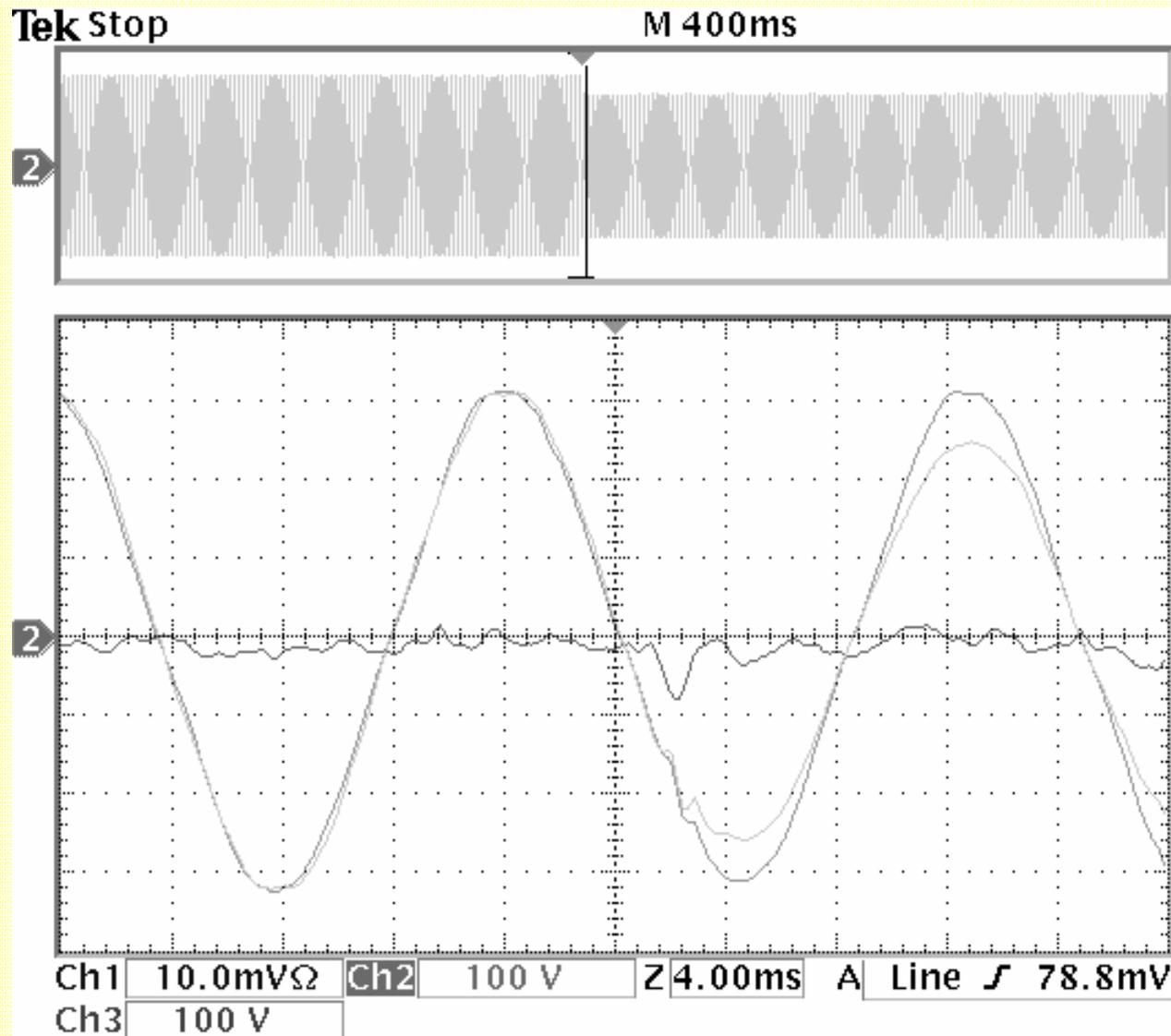
Malha fechada →

4 – Estudo experimental



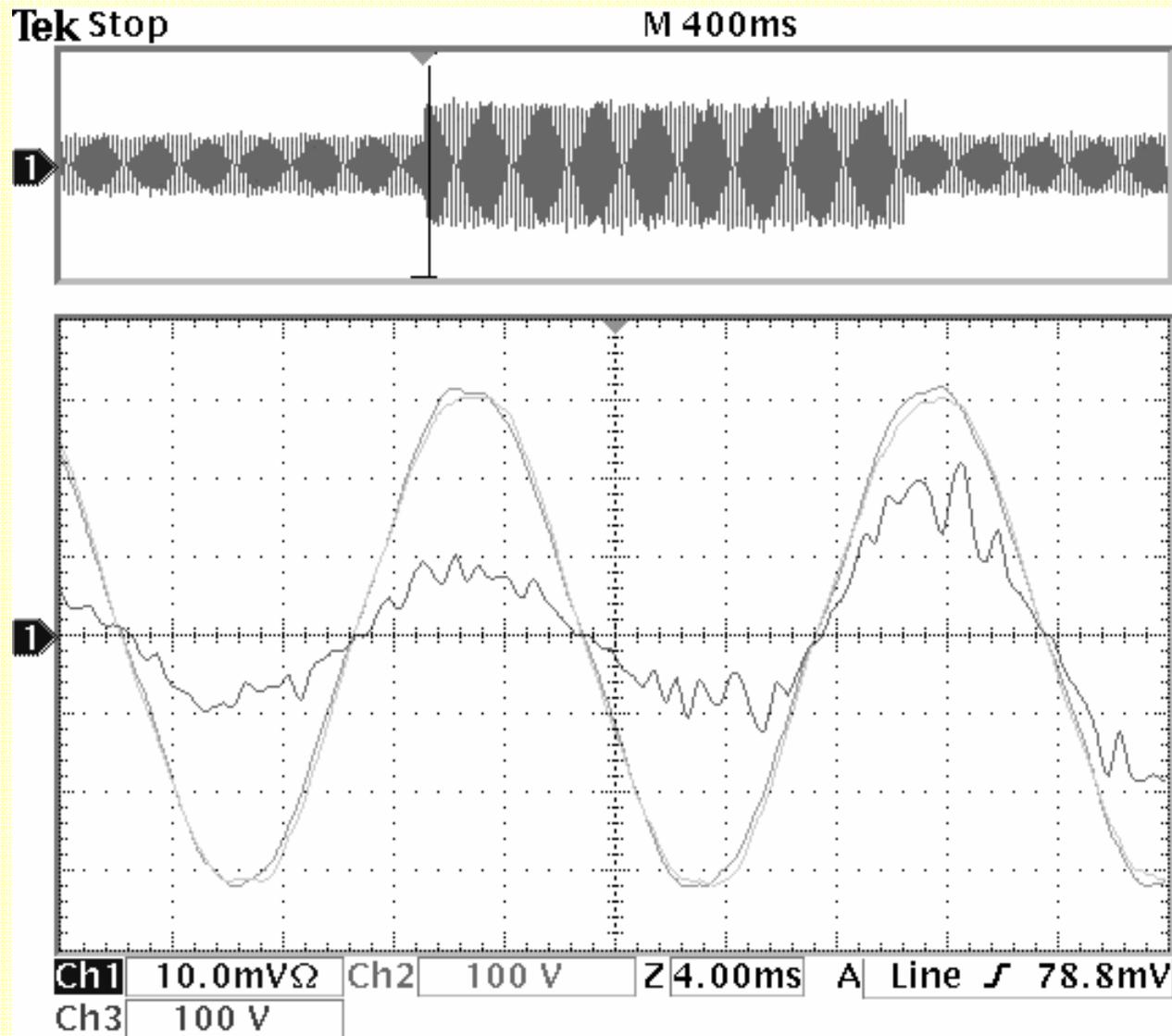
Varição na tensão de entrada

4 – Estudo experimental



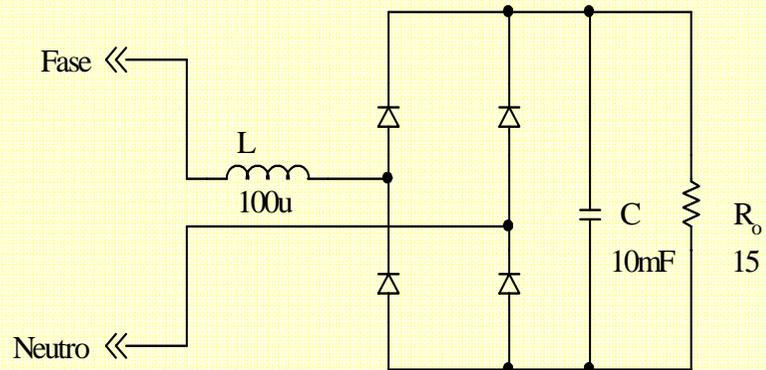
Varição na tensão de entrada

4 – Estudo experimental

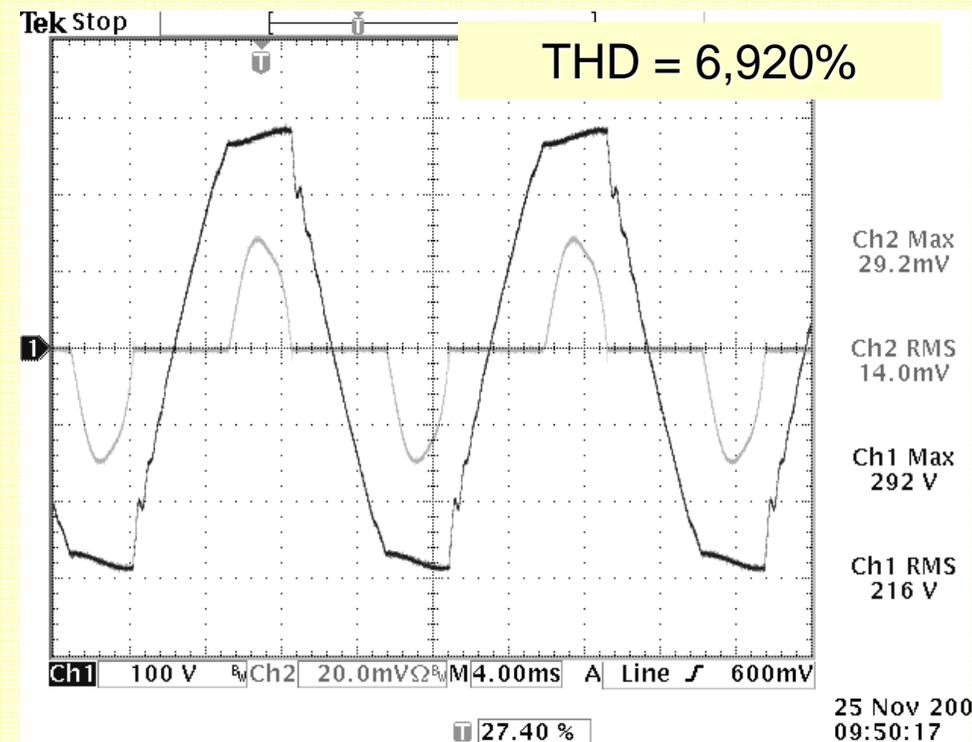


Variação de carga

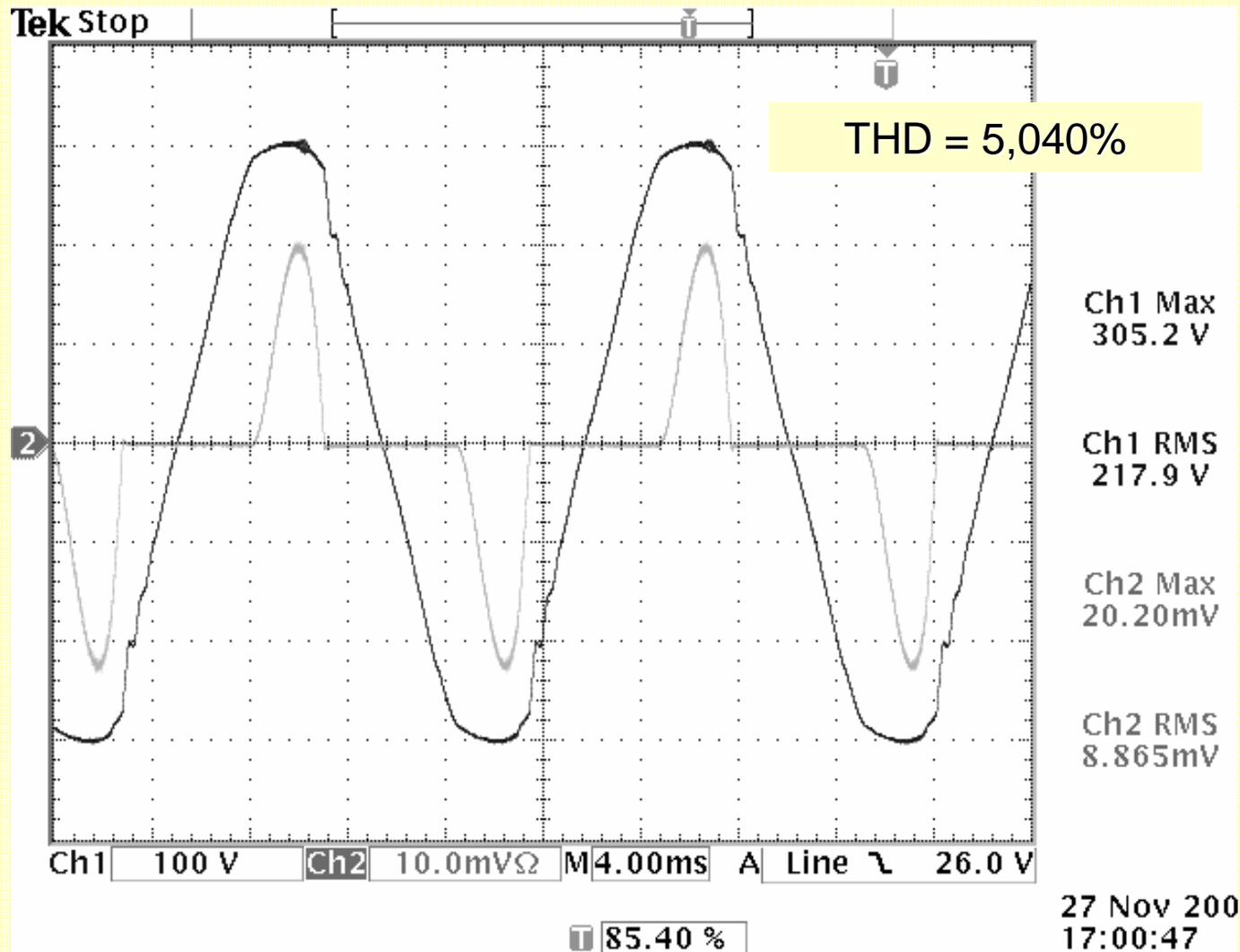
4 – Estudo experimental



Carga não-linear

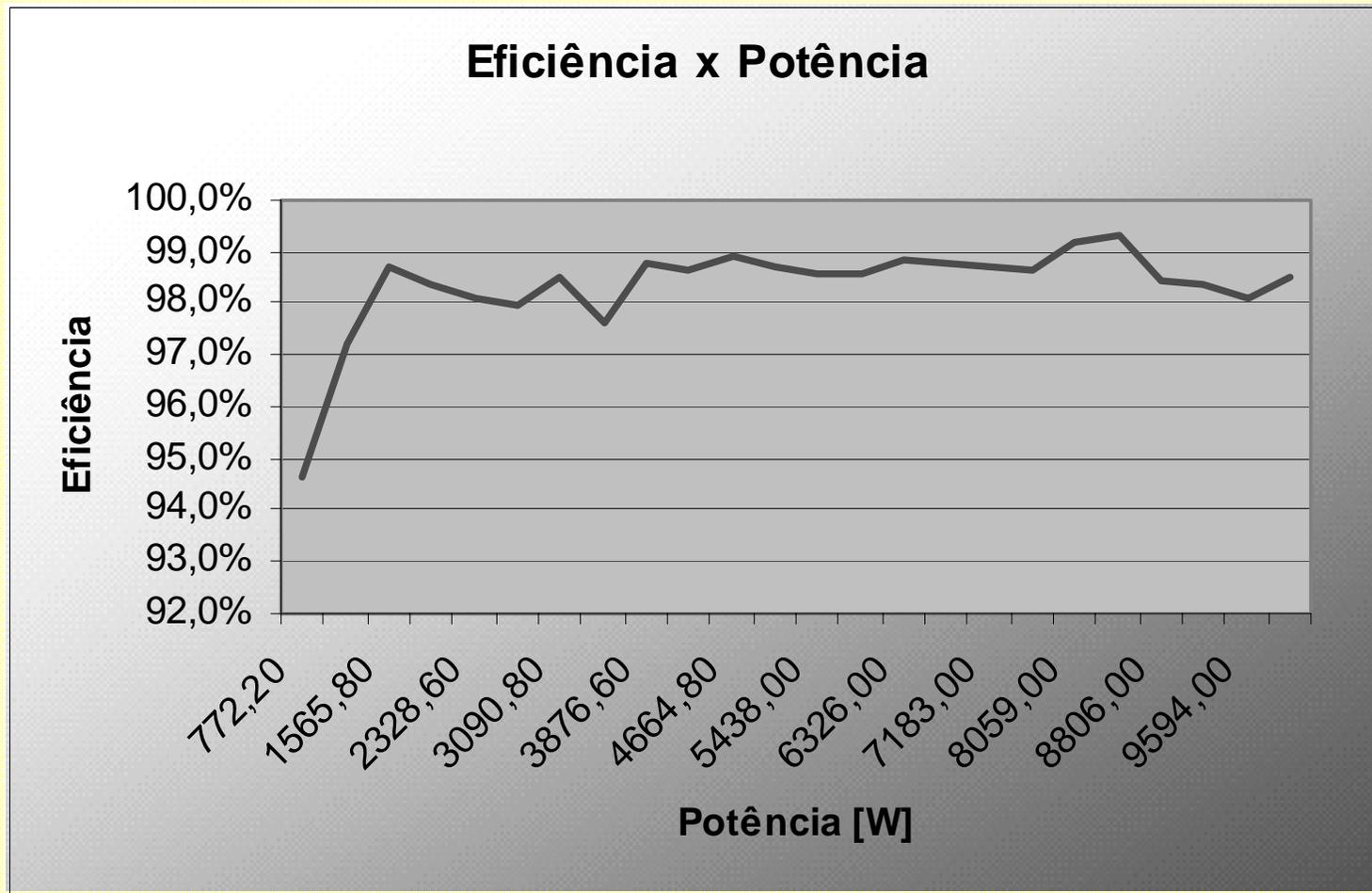


4 – Estudo experimental



4 – *Estudo experimental*

Rendimento





5 – Conclusões parciais

- **Revisão bibliográfica – deficiência de topologias atrativas com as características desejadas;**
- **Resultados obtidos apontam que a topologia escolhida pode tornar-se uma solução padrão;**
- **Forma de controle utilizada constitui uma importante contribuição na área;**
- **Análise dos dados de laboratório permitiram traçar novas metas/tarefas;**

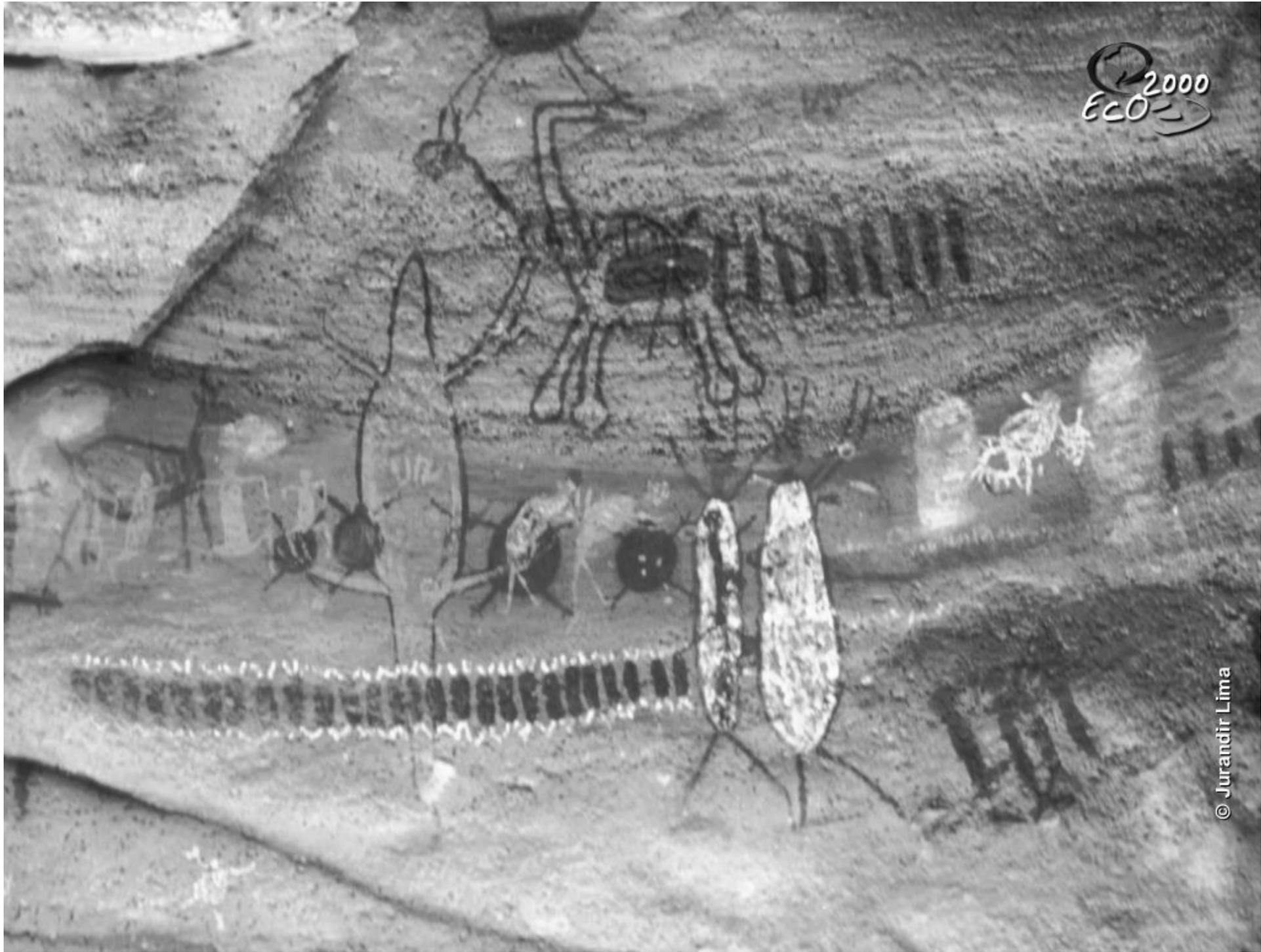
5 – Conclusões parciais

- **Modelagem com filtro de entrada trará contribuições efetivas para a área, bem como para áreas afins;**
- **Tecnologia transferida para indústria nacional é estratégica no contexto de comércio nacional e internacional.**



6 – *Metodologia*

- **Revisões bibliográficas;**
- **Seleção de possíveis soluções e análise das mesmas;**
- **Definição de hipóteses solucionadoras;**
- **Análise matemática, simulação e metodologia de projeto;**
- **Estudos experimentais;**
- **Análise dos dados;**
- **Corroboração ou reputação das hipóteses;**
- **Continuidade do trabalho.**



ECO 2000

© Jurandir Lima

8 – Contribuições esperadas

Dominar a tecnologia de projeto e implementação de estabilizadores de tensão alternada com as seguintes características:

- Bidirecionalidade em corrente e tensão;
- Tensão de saída senoidal com cargas lineares e não-lineares e com entrada distorcida;
- Capacidade elevadora e abaixadora de tensão;
- Processamento de apenas um percentual da potência da carga;
- Reduzido volume;
- Utilização de interruptores em configurações comerciais;
- Máxima distorção na tensão de saída de 5% [IEE 519-1992].”

8 – *Contribuições esperadas*

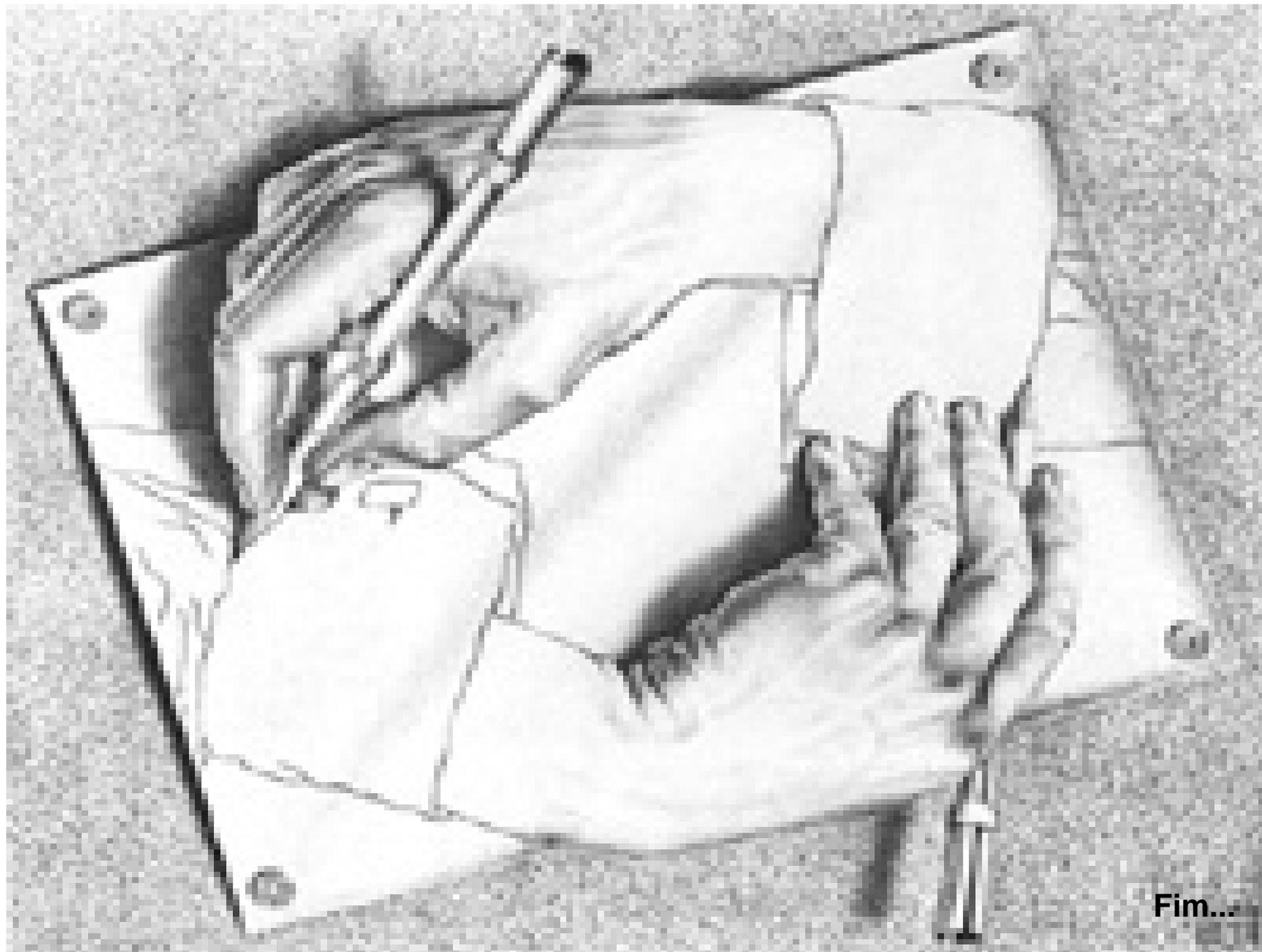
Características atendidas:

- **Robustez;**
- **Facilidade de comando e controle;**
- **Elevado rendimento;**
- **Reduzido volume;**
- **Facilidade de partida e desligamento;**
- **Operação com variação da frequência da rede;**
- **Bidirecionalidade de tensão e corrente;**
- **Utilização de interruptores em configurações comerciais;**
- **Resposta dinâmica rápida.**

8 – *Contribuições esperadas*

Características a serem melhoradas:

- THD da tensão de saída;
- Projeto para tensão de entrada distorcida e carga não-linear;
- Interação de controle/filtro de entrada;
- Operação com elementos de impedância não-nula na entrada: transformadores, geradores, variadores de tensão, etc.



Fim...