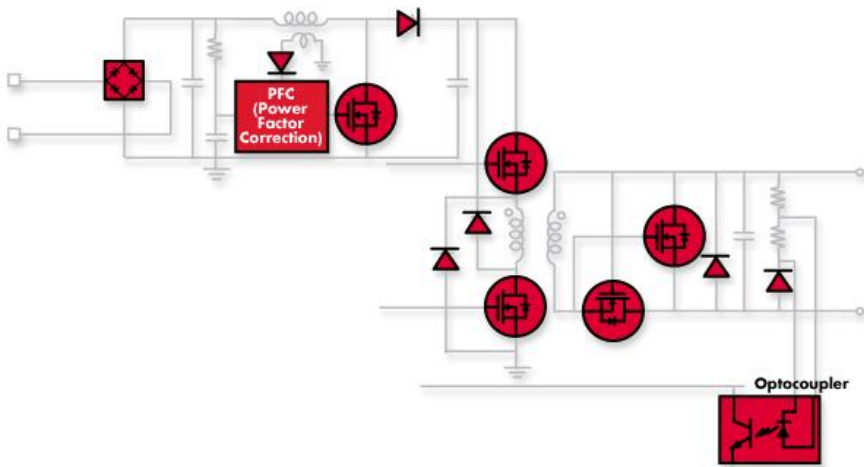


Introdução a Eletrônica de Potência I



Anderson Soares

EMENTA

- Análise das características e funcionamento do tiristor (SCR, DIAC, TRIAC, GTO;
- Caracterização de circuitos de proteção, associações, limites, formas e circuitos de disparo dos tiristores.
- Estabelecimento de relações entre retificadores não controlados, semi-controlados e controlados.
- Apresentação dos conceitos fundamentais sobre comutação forçada, circuitos e conversores com comutação forçada.
- Exame de conversores chopper, inversores e cicloconversores.

OBJETIVO

- Oportunizar situações para o desenvolvimento das habilidades de analisar, projetar e implementar circuitos retificadores controlados, semi-controlados e não controlados, para que o acadêmico entenda as técnicas de acionamento, proteção e associação de tiristores, identificando suas características;
- Criar condições para análise, projeto, montagem e teste de circuitos com comutação forçada.

CONTEÚDO PROGRAMÁTICO

1 - Estudo dos Componentes Empregados em Eletrônica de Potência (Diodos e Tiristores)

1.1. Circuitos de comando para tiristores

1.2. Gerenciamento térmico



2. Retificadores a Diodo com carga R e RL

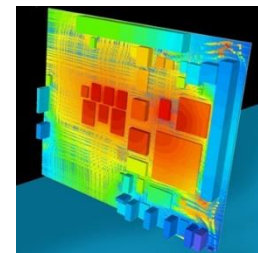
2.1. Retificador monofásico de meia onda

2.2. Retificador monofásico de onda completa com ponto médio

2.3. Retificador monofásico de onda completa em ponte

2.4. Retificador trifásico com ponto médio

2.5. Retificador trifásico de onda completa



CONTEÚDO PROGRAMÁTICO

3. Retificadores a tiristor com carga R e RL

- 3.1. Retificador monofásico de meia onda
- 3.2. Retificador monofásico semicontrolado
- 3.3. Retificador monofásico totalmente controlado
- 3.4. Retificador trifásico de meia onda
- 3.5. Retificador trifásico semicontrolado
- 3.6. Retificador trifásico totalmente controlado
- 3.7. Retificador trifásico de 12 pulsos

BIBLIOGRAFIA

Básica

BARBI, Ivo. Eletrônica de Potência. Ed. do Autor, 6ed. 2010.

AHMED, Ashfaq. Eletrônica de potência. São Paulo: Prentice Hall, 2000.

ARNOLD, Robert. Eletrônica industrial. São Paulo: EPU, 1974

Complementar

MOHAN, Ned; UNDELAND, Tore M.; ROBBINS, William P. Power electronics: converters, applications, and design. Hoboken, 3.ed. NJ: J. Wiley, 2003.

RASHID, Muhammad H. Power electronics: Circuits, Devices and Applications . Ed. Prentice Hall, 3ed. 2003.

ERICKSON, Robert W., MAKSIMOVIC, Dragan - Fundamentals of Power Electronics, Ed. Springer, 2ed. 2001.

KASSAKIAN, John G., SCHLECHT, Martin F., VERGUESE, George C. - Principles of Power Electronics, Ed. Prentice Hall, 1991.

LANDER, Cyril W. Eletrônica Industrial. São Paulo: Makron Books, 1996.

ALMEIDA, José Luiz Antunes. Dispositivos Semicondutores: Tiristores – Controle de Potência em CC e CA

HART, Daniel W. Eletrônica de Potência – Análise e projetos de circuitos. McGrawHill, 2012.

AVALIAÇÕES

ELE0218A (Caxias)

Aula 11 – 06/05/2019 -> Prova 1

Aula 19 – 24/06/2019 -> Prova 2

Aula 20 – 01/07/2019 -> Prova de Recuperação da Prova 1 ou Prova 2 (substitutivas apenas quem possui nota abaixo de 6)

Aula 21 – 08/07/2019 -> Apresentação Final dos Projetos

$$NF = \frac{3}{\frac{1}{P1} + \frac{1}{P2} + \frac{1}{TF}}$$

Tema do Projeto Final da Disciplina

1. Carregador de Bateria
2. Controle de Velocidade de Motor DC
3. Controle de Velocidade e Frenagem Motor DC
4. Acionamento Bi-direcional do Motor DC
5. Controle de torque/velocidade motor de indução
6. Controle de temperatura de forno por ciclos inteiros da senoide
7. Partida suave de motor elétrico monofásico/trifásico
8. Contator trifásico de estado sólido

Equipe 1:

Equipe 2:

Equipe 3:

Equipe 4:

Equipe 5:

Equipe 6:

Equipe 7:

Equipe 8:

Estrutura do relatório: Modelo de artigo da IEEE:

Resumo;

Introdução

Secção 1: Etapas de funcionamento

Secção 2: Cálculo dos esforços

Secção 3: Projeto magnéticos, definição dos componentes, Projeto térmico, Layout

Secção 4: Simulação do conversor

Secção 5: Resultados experimentais

Conclusões

Referências

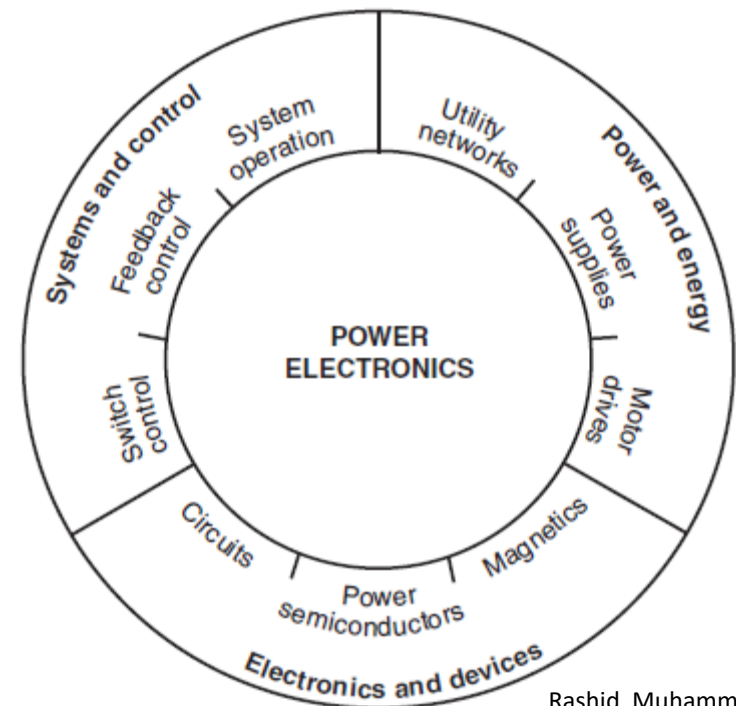
1.0 Eletrônica de Potência

➤ A Eletrônica e Potência envolve o estudo de circuitos eletrônicos aplicados ao controle do fluxo da energia elétrica.

➤ Sua faixa de potência vai de mW (telefone celular) a centenas de MW (sistemas de energia)

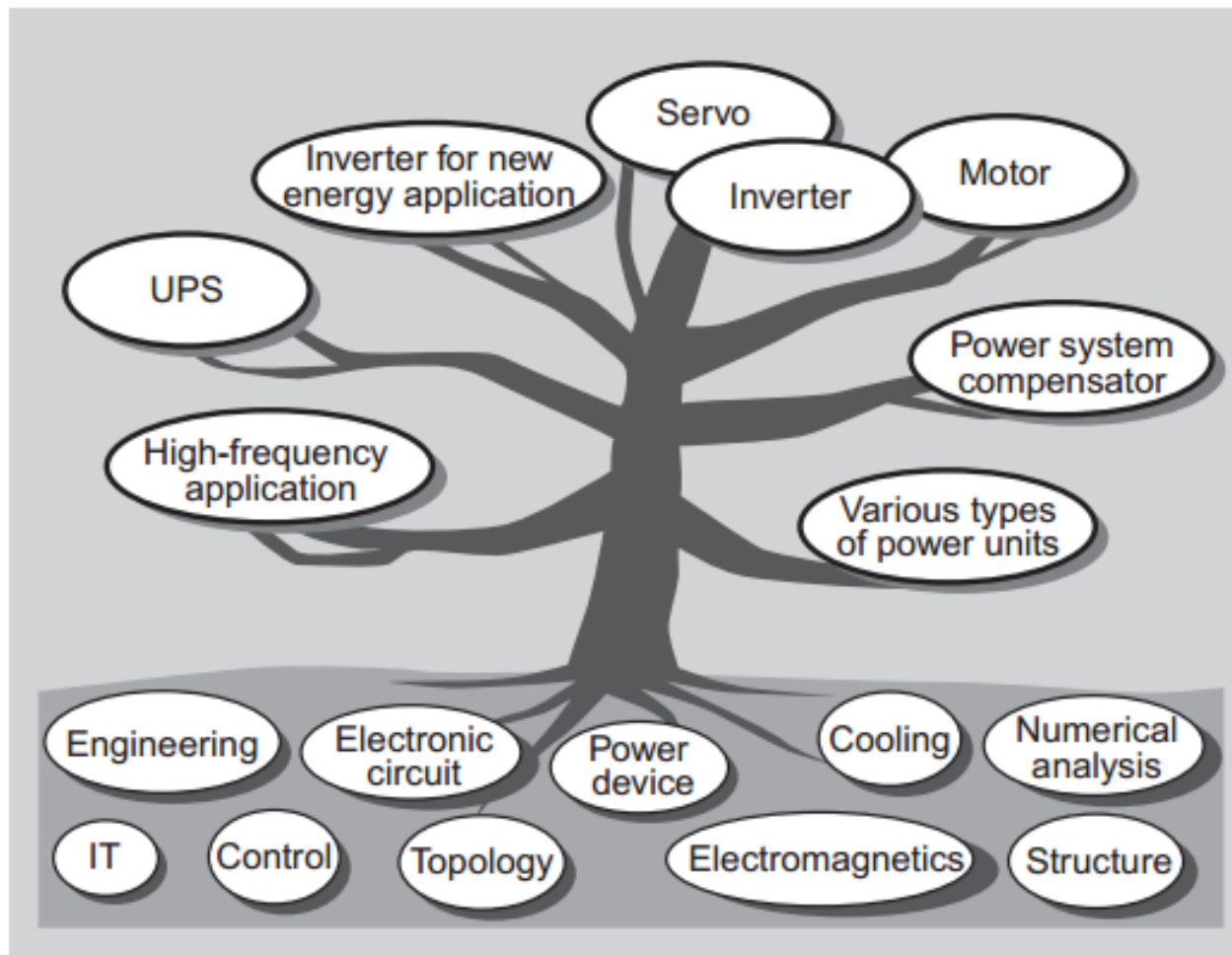
➤ Área multidisciplinar

- Conversão de energia
- Circuitos elétricos
- Eletrônica digital/analógica
- Controle e Instrumentação
- Máquinas elétricas

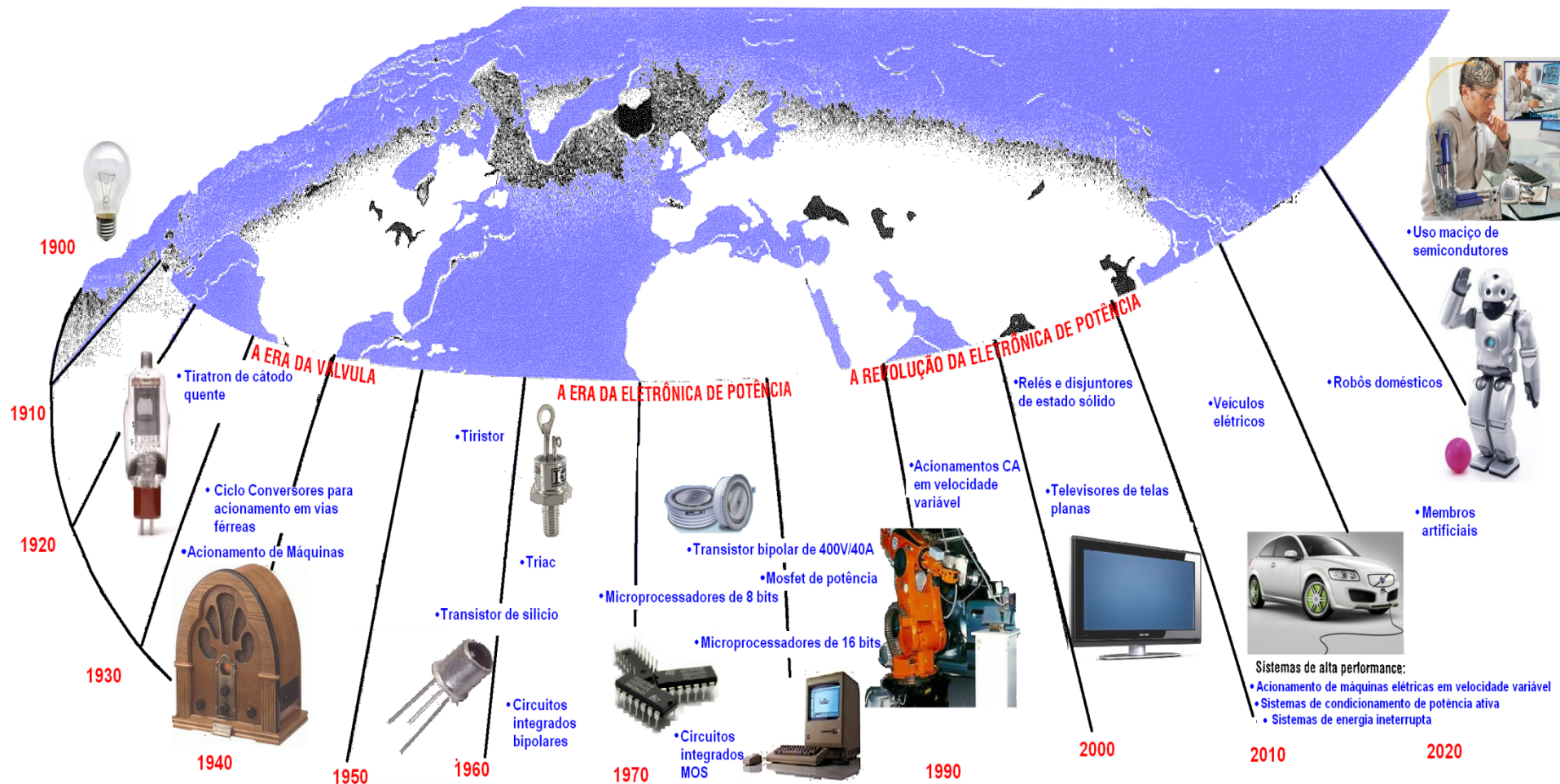


1.0 Eletrônica de Potência

Fig.1. Essential technologies and power electronics products



3.2 Conversores Estáticos – Evolução e Aplicação

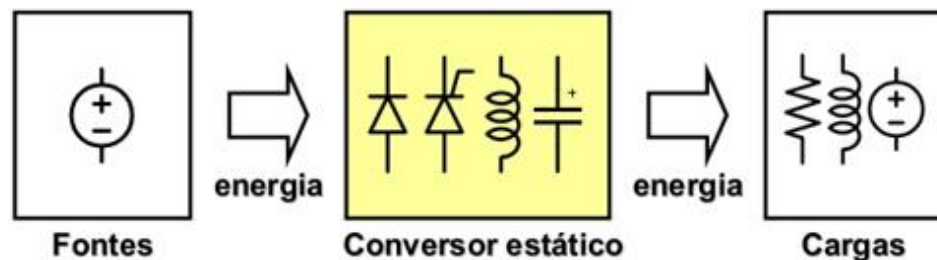


2.0 Métodos de Processamento da Energia

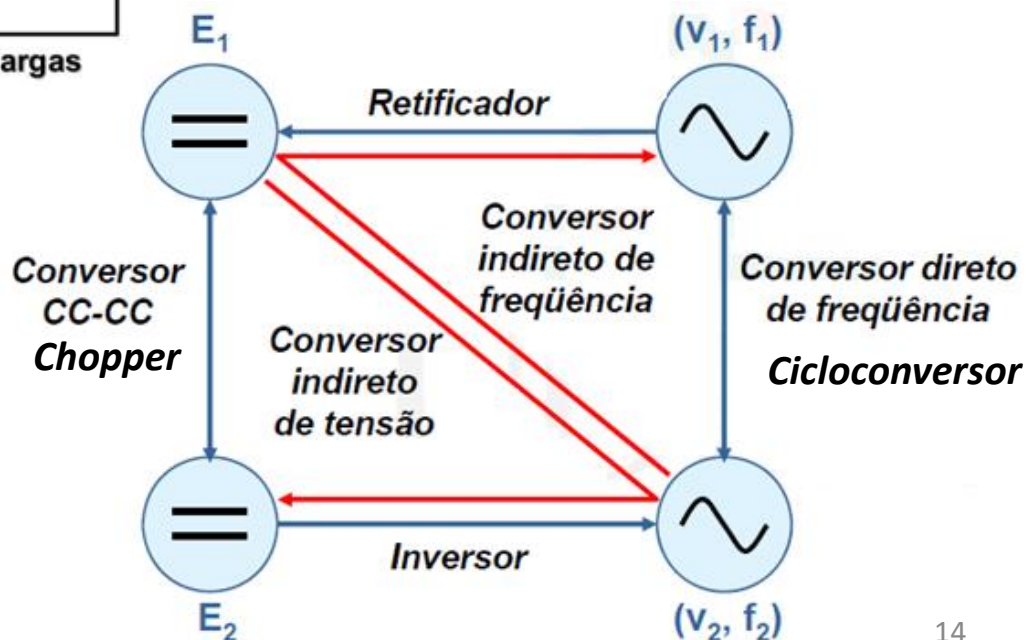
- **Linear:** conversão através de transistores operando como resistores variáveis . Apresentam elevadas perdas e utilizam eletrônica analógica convencional. (ex.: amplificador de som de rádio)
- **Comutada:** conversão através de dispositivos eletrônicos operando como interruptores. Operam em etapas distintas. (ex.: sistema de partida suave de motores – *softstarters*).

3.0 Conversores Estáticos

São sistemas constituídos de elementos passivos (resistores, capacitores, indutores) e elementos ativos (chaves estáticas como: diodos, transistores, tiristores, etc), com a função de controlar o fluxo de energia entre dois ou mais sistemas elétricos.



- CC – CC (pulsador)
- CA – CC (retificador)
- CC – CA (inversor)
- CA – CA (gradador/
cicloconversor)



3.1 Conversores Estáticos – Modo de Operação e Aplicação

- Conversores comutados pela linha
 - Necessitam de uma tensão CA externa para operarem adequadamente;
 - Empregam interruptores não-controlados (diodos) e semi-controlados (tiristores)
 - Aplicação em altas potências, utilizados principalmente na indústria;
 - Empregam frequências de comutação baixas e elementos reativos grandes.

3.1 Conversores Estáticos – Modo de Operação e Aplicação

- Conversores completamente controláveis
 - Não necessitam de tensão CA externa;
 - Empregam interruptores não-controlados (diodos) e completamente controlados (transistores);
 - Aplicação em potências pequenas à médias, principalmente empregados em sistemas residenciais ou comerciais;
 - Possuem elevada densidade de potência;
 - Empregam frequências de comutação elevadas e elementos reativos pequenos.

3.3 Conversores Comutados pela Linha – Dispositivos de Processamento de Energia



Diodo



Tiristor



Indutor (reator)



Transformador



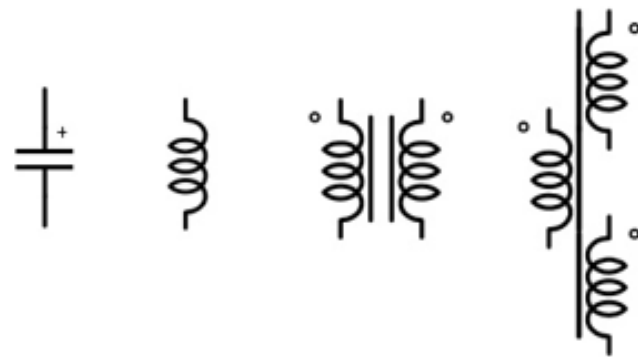
**Capacitor
metalizado (CA)**



**Capacitor
eletrolítico (CC)**

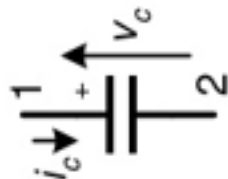
Dispositivos Lineares Reativos

- Armazenam energia → em forma de campo elétrico (capacitor) ou campo magnético (indutor)
- Não dissipam energia → a quantidade de energia que é absorvida deve ser posteriormente devolvida



Capacitores

$$i_c(t) = C \frac{dv_c(t)}{dt}$$

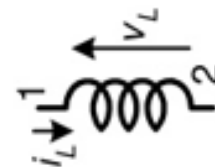


$$v_c(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i_c(t) dt + v_c(0) \quad \forall t > t_0$$

- Possuem comportamento de fonte de tensão
- Podem operar em circuito aberto
- Não podem operar em curto-circuito → exceção quando $V_c(t)=0$
- Componente real apresenta SER e indutância parasita

Indutores

$$v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}$$

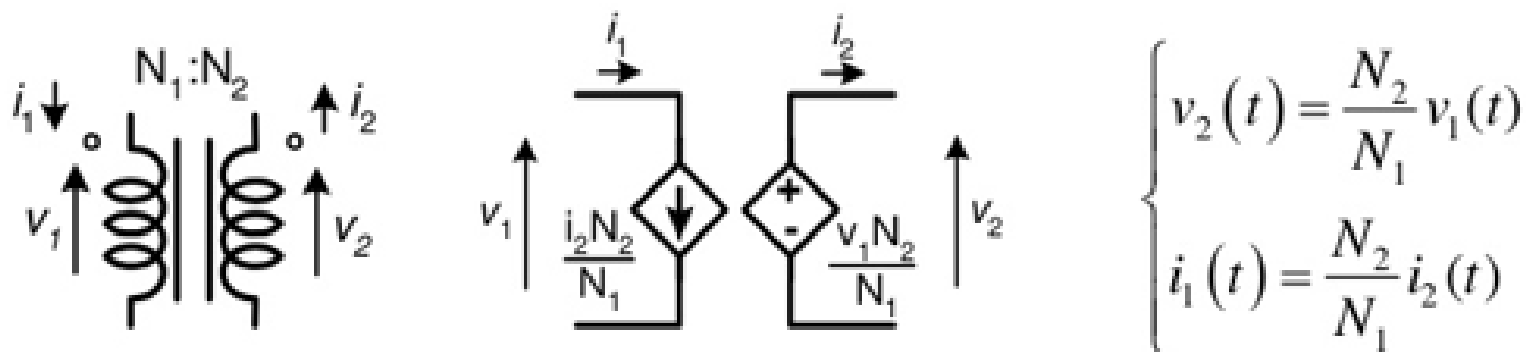


$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int_0^t v_L(t) dt + i_L(0) \quad \forall t > t_0$$

- Possuem comportamento de fonte de corrente
- A corrente em seus terminais não pode ser mudada imediatamente
- Não podem operar em circuito aberto → exceção quando $I_L(t)=0$
- Componente real apresenta SER e capacitância parasita

Dispositivos Lineares de Conversão

Transformador Ideal



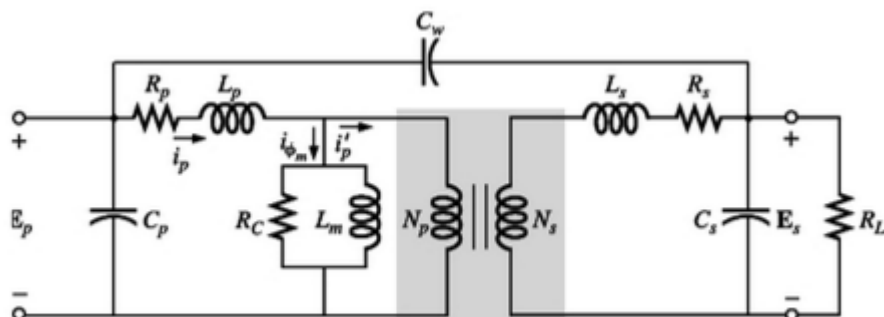
Lei de Faraday

$$v_{ind} = N \times \frac{d\phi}{dt}$$

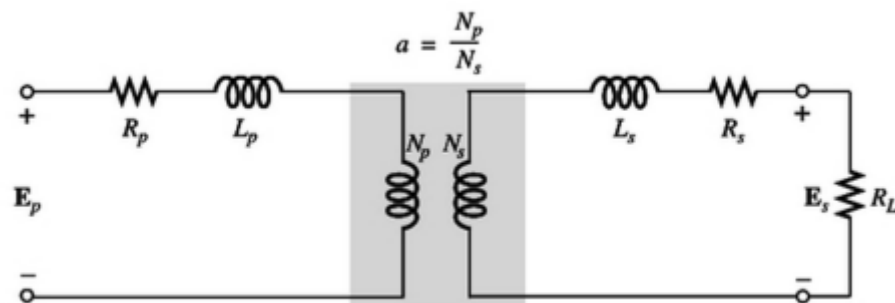
- Idealmente se comportam como um dispositivo sem dinâmica \rightarrow comportamento de fontes de corrente e tensão acopladas
- Não processa energia CC \rightarrow impedância nula

Dispositivos Lineares de Conversão

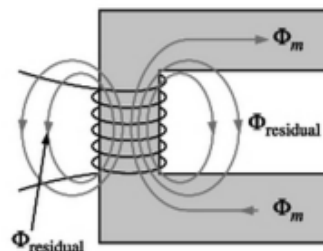
Transformadores Reais



Transformador ideal



Transformador ideal

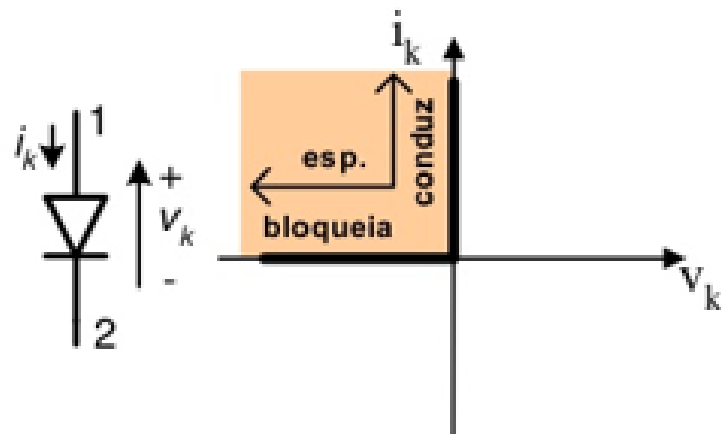


- Possuem dinâmica (indutância mútua e dispersão)
- A corrente em seus terminais não pode ser mudada imediatamente
- Não podem operar em circuito aberto → exceção quando $I_L(t)=0$
- Apresenta SER e capacitância parasita
- Podem operar em curto circuito

Dispositivos Não-Lineares: Semicondutores

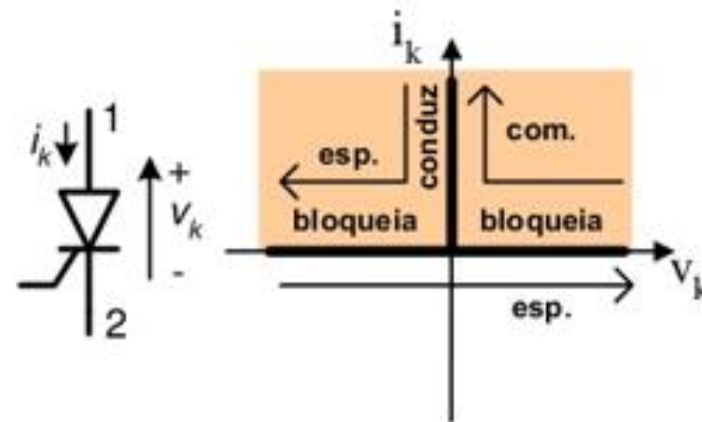
Operam como chaves interruptores para fazer a conversão de corrente ou tensão $CC \rightarrow CA$ e $CA \rightarrow CC$.

Diodos



- Unidirecional em corrente e tensão
- Entrada de condução não controlada ($V_{AK} > 0$)
- Saída de condução não controlada ($V_{AK} < 0$)

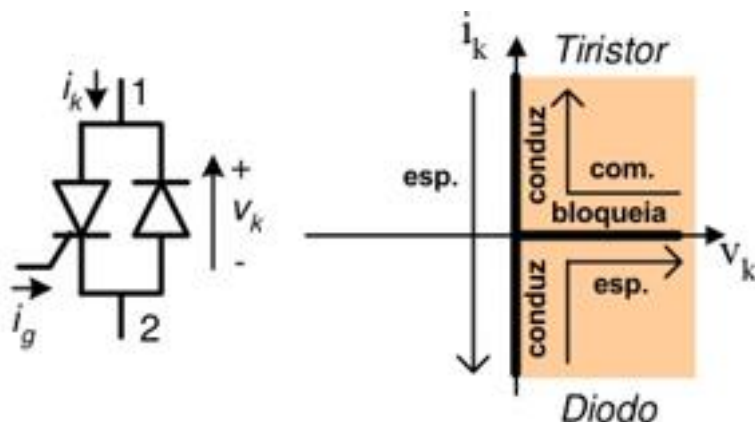
Tiristores



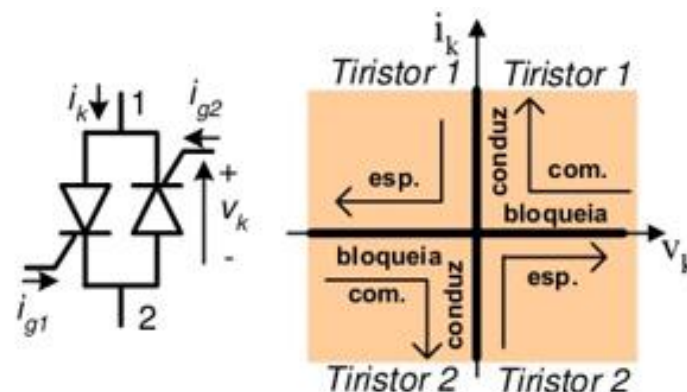
- Unidirecional em corrente e bidirecional em tensão
- Entrada de condução controlada ($V_{AK} > 0$ e $i_g > 0$)
- Saída de condução não controlada ($I_{AK} = 0$)

Dispositivos Não-Lineares: Associação de Semicondutores

Tiristor com diodo em antiparalelo



Tiristores em antiparalelo



- Unidirecional em tensão e bidirecional em corrente
- Entrada de condução controlada ($V_{AK} > 0$ e $i_g > 0$)
- Saída de condução não controlada ($I_{AK} = 0$)

- Bidirecional em corrente e bidirecional em tensão
- Entrada de condução controlada ($V_{AK} > 0$ e $i_{g1} > 0$) ou ($V_{AK} > 0$ e $i_{g2} > 0$)
- Saída de condução não controlada ($I_{AK} = 0$)

3.4 Conversores Comutados pela Linha – Dispositivos de Proteção e Dissipação



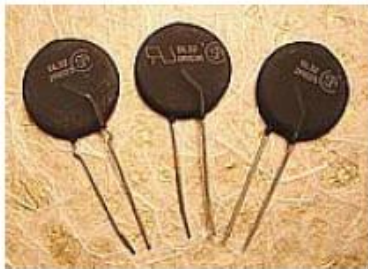
Dissipador de calor



Ventilador



Resistor



Resistor NTC



Varistor



**Fusível para
semicondutor**



Snubber

3.5 Conversores Comutados pela Linha – Dispositivos de Instrumentação



**Sensor de
corrente hall**



**Sensor de corrente
shunt**



**Sensor de
temperatura**

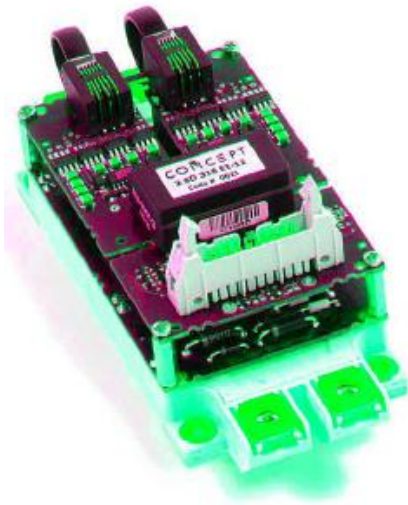


**Sensor de
tensão trafo**



**Sensor de
tensão hall**

3.6 Conversores Comutados pela Linha – Dispositivos de Comando e Controle



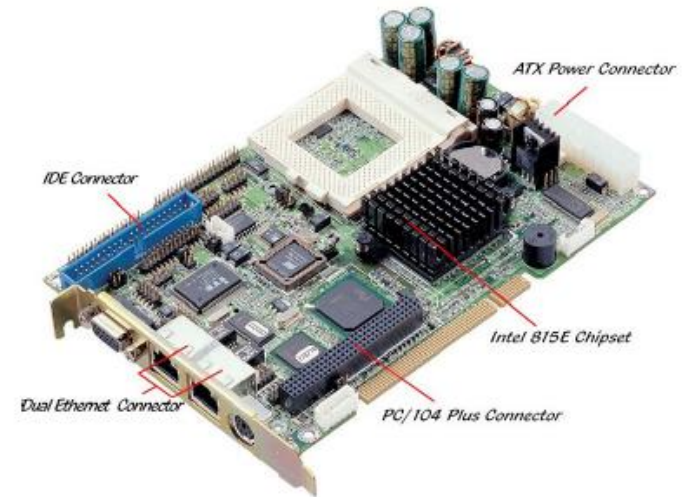
Driver isolado



Transformador de pulso



Fonte CC



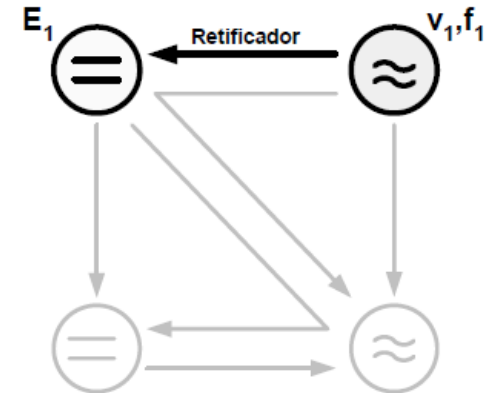
Placa de aquisição e controle

4.0 Conversores Comutados pela Linha – Retificadores não-controlados, carga RL

Principais tipos de retificadores

- Monofásico de meia onda
- Monofásico de onda completa com ponto médio
- Monofásico de onda completa em ponte
- Trifásico com ponto médio
- Trifásico de onda completa

Empregam apenas diodos



Aplicação

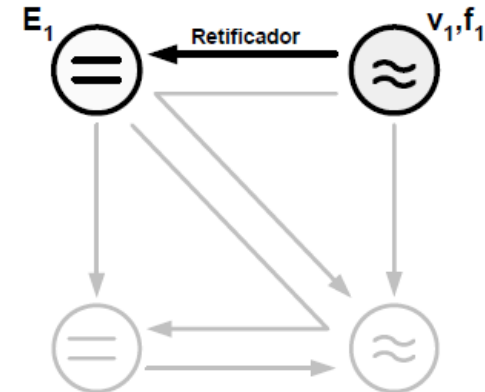


Alternador

4.1 Conversores Comutados pela Linha – Retificadores não-controlados, carga RC

Principais tipos de retificadores

- Monofásico de onda completa
- Monofásico como dobrador de tensão
- Trifásico



Aplicação



Empregam apenas diodos

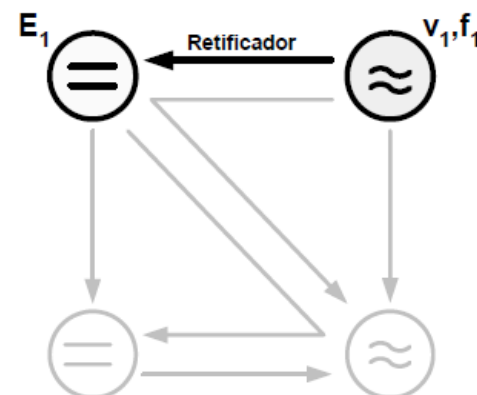
Estágio de entrada de fontes
para computador

4.2 Conversores Comutados pela Linha – Retificadores controlados, carga RL

Principais tipos de retificadores

- Monofásico de meia onda
- Monofásico de onda completa
- Trifásico com ponto médio
- Trifásico de onda completa

Empregam diodos e tiristores



Aplicação



Solda e corte



Fornos a arco CC

4.3 Conversores Comutados pela Linha – Retificadores controlados, carga RL - Aplicação



**HVDC (Transmissão de energia
em corrente contínua)**

4.4 Conversores Comutados pela Linha – Retificadores controlados, carga RLE - Aplicação



Excitatriz estática (geração do campo) para motor CC e gerador síncrono



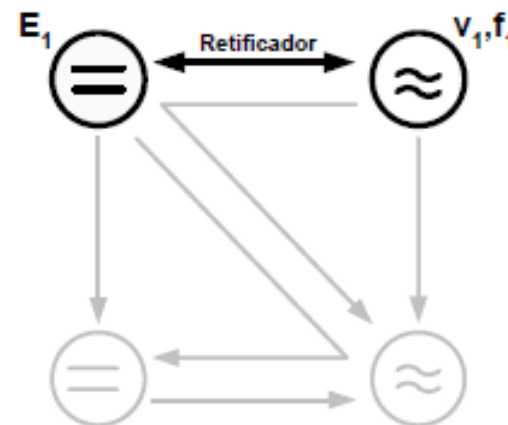
Motor CC → giro unidirecional

4.5 Conversores Comutados pela Linha – Conversores Duais

Principais tipos

- Monofásico com ponto médio
- Monofásico em ponte
- Trifásico com 3 pulsos
- Trifásico com 6 pulsos

Empregam apenas
tiristores



Aplicação



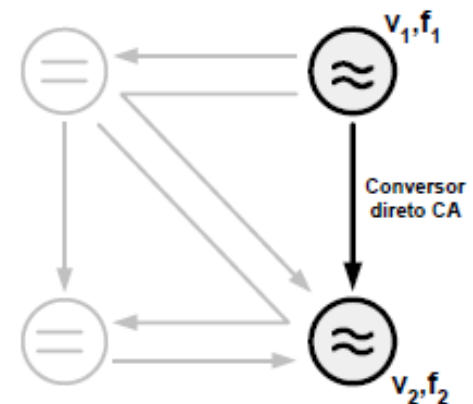
Motor CC → giro bidirecional
Indústria de laminação, papel, cimento, mineração

4.6 Conversores Comutados pela Linha – Gradadores

Principais tipos

- Gradadores monofásicos
- Gradadores trifásicos
- Controle por ciclos inteiros

Empregam apenas
tiristores



Aplicação



Controle de temperatura
Ducha eletrônica



Fornos industriais

4.7 Conversores Comutados pela Linha – Gradadores, cargas genéricas



Estabilizadores eletrônicos de tensão



Chaves de transferência estática

4.8 Conversores Comutados pela Linha – Gradadores, cargas L



**Compensadores estáticos de potência reativa
(FACTS – transmissão de energia)**

4.9 Conversores Comutados pela Linha – Gradadores, cargas RLE



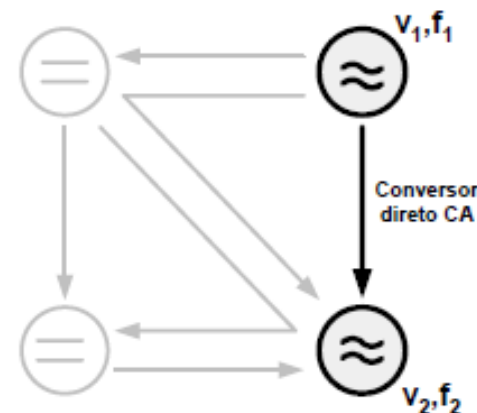
**Sistema de partida suave para motores
(soft-starters)**

4.10 Conversores Comutados pela Linha – Cicloconversores

Principais tipos

- Trifásicos 3 pulsos com ponto médio
- Trifásico 6 pulsos, em ponte, para cargas isoladas
- Trifásicos 6 pulsos, em ponte, para cargas não isoladas

Empregam apenas
tiristores



Aplicação

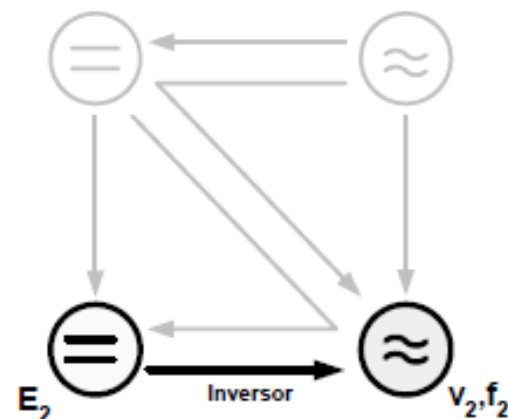


Controle de motores CA de propulsão de alta potência
(trens, navios, guindastes)

4.11 Conversores Comutados pela Linha – Inversores

Principais tipos

- Monofásicos
- Trifásico 3 braços
- Trifásicos 4 braços

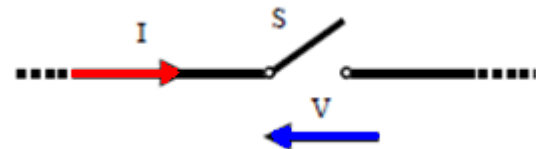


Aplicação

Empregam
tiristores e diodos



Forno de indução



PRINCÍPIO BÁSICO DA CONVERSÃO ESTÁTICA

INTERRUPTOR IDEAL (S)

- Tempos de comutação nulos (entrada em condução e bloqueio instantâneo);
- Resistência nula em condução;
- Resistência infinita quando bloqueado.

EVOLUÇÃO DOS DISPOSITIVOS INTERRUPTORES

• Relés \Rightarrow • Contatores \Rightarrow • Retificadores à arco \Rightarrow • Válvulas Tiratron \Rightarrow • SCR \Rightarrow • Transistores Bipolares \Rightarrow • MOSFETS \Rightarrow • Etc...

• **Conversão Estática:** Revolução no processamento de energia elétrica, possibilitando:

- \Rightarrow Redução de peso, volume e custos;
- \Rightarrow Redução das perdas e aumento da densidade de potência;
- \Rightarrow Operação com frequências maiores;
- \Rightarrow Aumento do rendimento.

Fonte: Performance Trends and Limitations of Power Electronic Systems



$f_p = 72 \text{ kHz}$
 $\rho = 4.5 \text{ kW/dm}^3$



250 kHz
 10 kW/dm^3



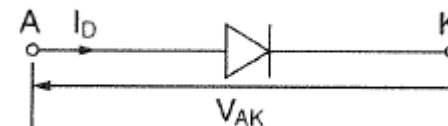
500 kHz
 13 kW/dm^3



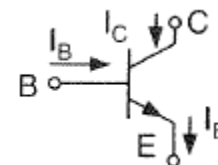
1 MHz
 14 kW/dm^3

PRINCIPAIS INTERRUPTORES EM ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

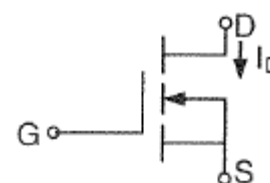
➤ Diodos de Potência (Diodo)



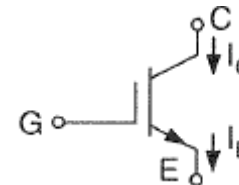
➤ Transistores Bipolares de Potência (BPT)



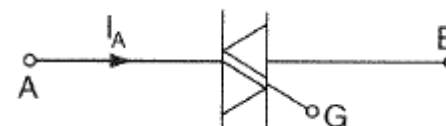
➤ MOSFETs de Potência (MOSFET)

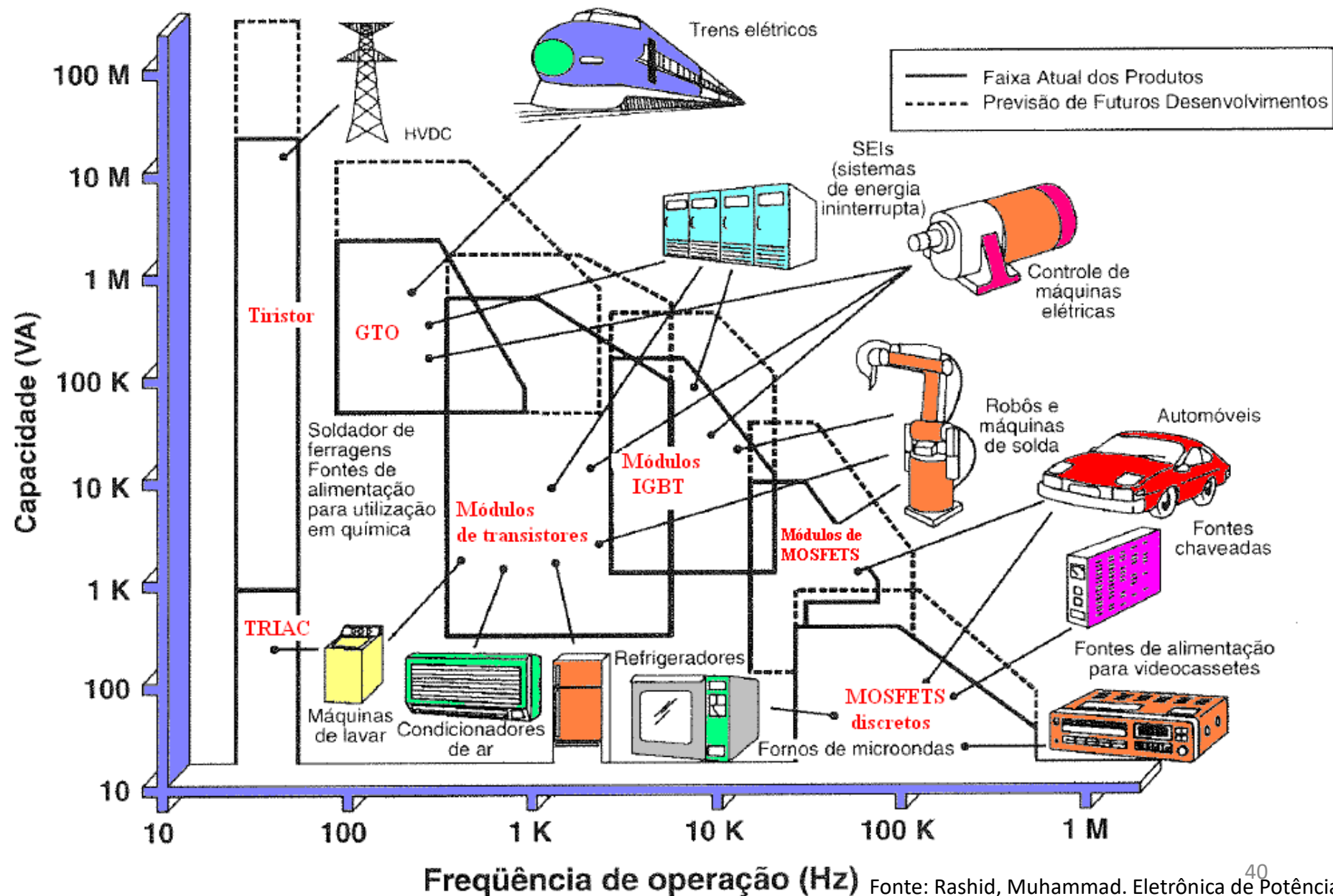


➤ Transistores tipo IGBT (IGBT)



➤ Tiristores (SCR, TRIAC, DIAC e GTO)





TIPOS DE CIRCUITOS DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

| CONVERSORES | O QUÊ FAZ | O QUÊ USA |
|-----------------------------------|---|----------------------|
| Retificador Não-controlado | Converte tensão AC em DC | Diodos |
| Retificador Controlado | Converte tensão AC em DC | Tiristores |
| Choppers | Converte DC em DC de amplitude variável | MOSFETs, IGBTs e BPT |
| Inversores | Convertem DC em AC | MOSFETs, IGBTs e BPT |
| Conversores Cíclicos | Convertem AC para AC | Tiristores |
| Chaves Estáticos | Acionam cargas em AC ou DC | Tiristores |