Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina
Departamento Acadêmico de Eletrônica
Pós-Graduação em Desen. de Produtos Eletrônicos
Processamento Eletrônico de Energia

INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

Introdução à Eletrônica de Potência

Prof. Clóvis Antônio Petry.
Prof. Mauro Tavares Peraça.

Florianópolis, outubro de 2015.

Agenda para esta aula

Parte 1 (19h até 20h):

- Esposição inicial sobre introdução à eletrônica de potência.

Intervalo

Parte 2 (20h20min até 22h):

- Ferramentas de projeto em eletrônica de potência;
- Tecnologias de componentes eletrônicos.

Parte 3 (22h até 22h20min):

- Acesso ao moodle e trabalho individual.

Agenda para esta aula

Parte 1 (19h até 20h):

- Esposição inicial sobre introdução à eletrônica de potência.

Intervalo

Parte 2 (20h20min até 22h):

- Ferramentas de projeto em eletrônica de potência;
- Tecnologias de componentes eletrônicos.

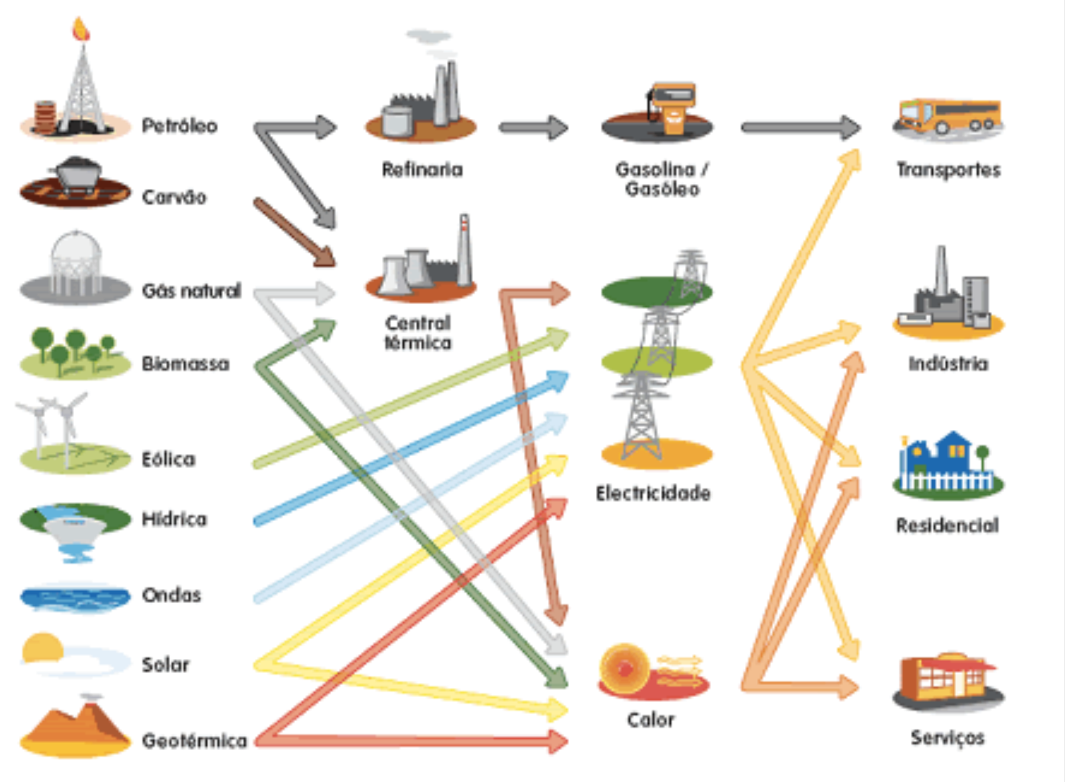
Parte 3 (22h até 22h20min):

- Acesso ao moodle e trabalho individual.

Conversão de energia

Finalidade da conversão de energia:

- Aplicações diferentes conforme a forma;
- Dificuldades de armazenamento;
- Dificuldades de transmissão;
- Alteração/adaptação de amplitudes, formas e quantidades;
- Reaproveitamento de energia.



http://www.portal-energia.com/fontes-de-energia/

Conversores estáticos

Definição:

- Conversor rotativo: aquele converte energia usando mecanismos móveis (gerador-motor-gerador);

- Conversor estático: dispositivo eletrônico que converte energia sem usar componentes móveis (giratórios).

Conversor rotativo
Motor + gerador

Conversor estático
Inversor de freqüência

INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

Definições:

- Eletrônica de Potência é a tecnologia associada com conversão eficiente, controle e condicionamento de potência elétrica através de interruptores estáticos de uma fonte disponível na entrada numa saída desejada;

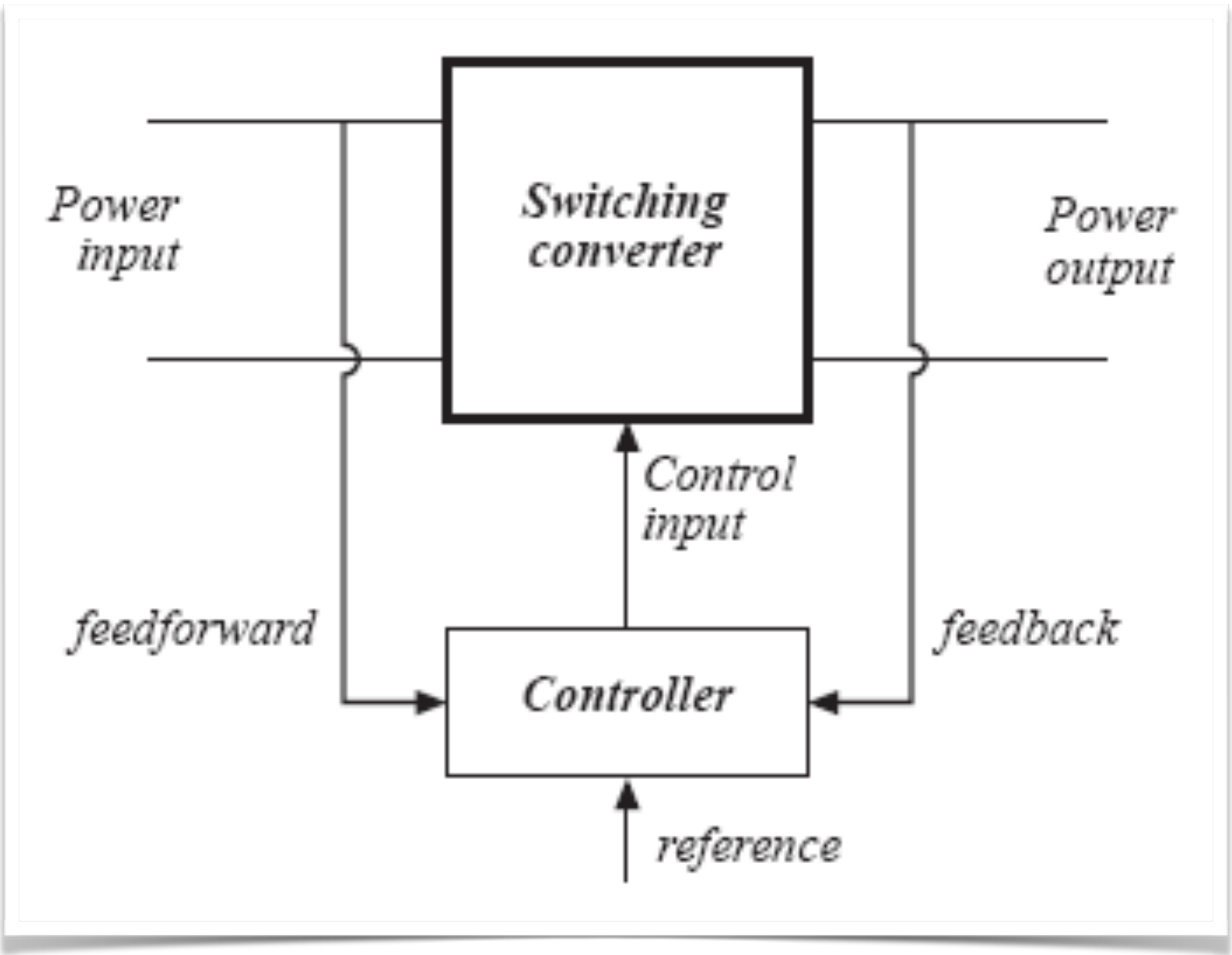
- Eletrônica de Potência pode ser definida como uma ciência aplicada dedicada ao estudo dos conversores estáticos de energia elétrica. Este último pode ser definido com um sistema, constituído por elementos passivos (resistores, capacitores e indutores) e elementos ativos (interruptores), tais como Diodos, Tiristores, Transistores, GTO´s, Triacs, IGBT´s e MOSFET´s, associados segundo uma lei pré-estabelecida.

- **Entende-se que Eletrônica de Potência é uma área da Engenharia Elétrica que tem a finalidade de estudar e construir conversores de potência visando o controle de energia elétrica.**

Eletrônica de potência

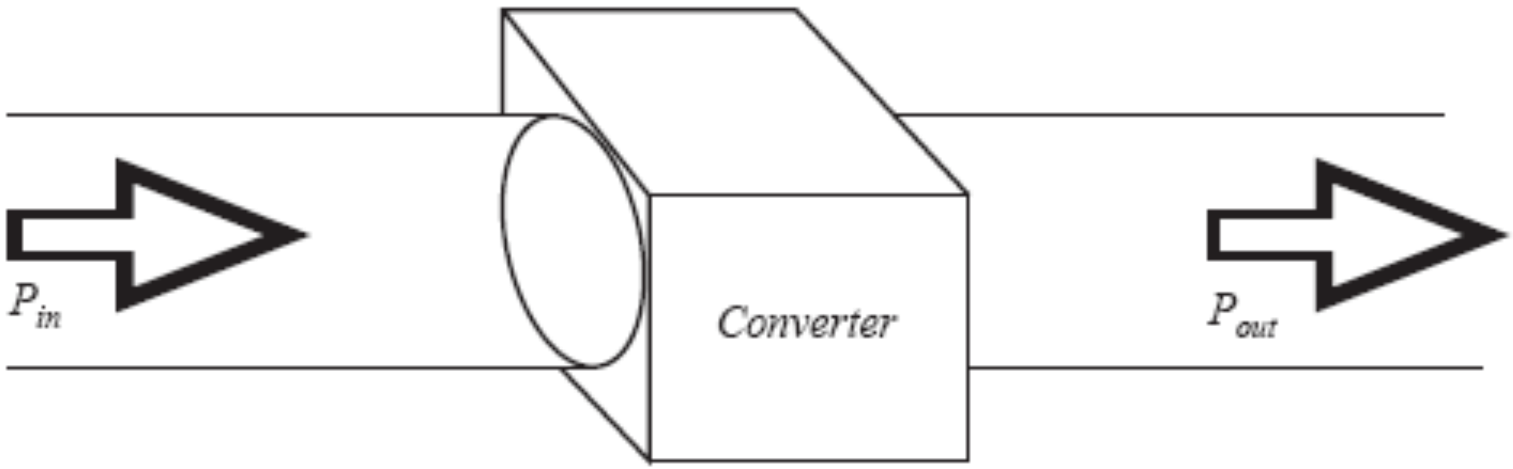
Princípio:

- Os circuitos em eletrônica de potência são denominados não-lineares, pois utilizam os semicondutores como chaves, ligadas ou desligadas.



Objetivo maior:

- Busca da máxima eficiência.



$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

Eletrônica de potência

Primeiro computador Apple
(1976)

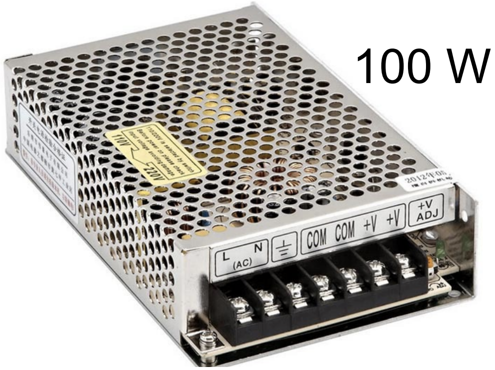
Notebook Apple atual
(2015)

Eletrônica de potência

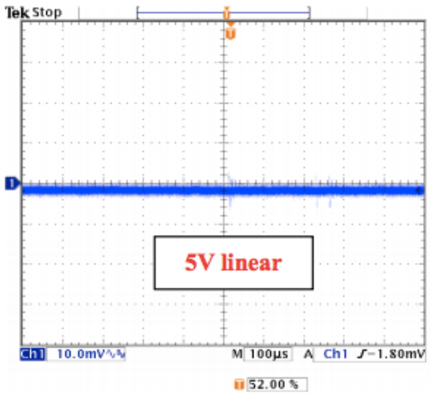
http://www.righto.com/2014/05/a-look-inside-ipad-chargers-pricey.html

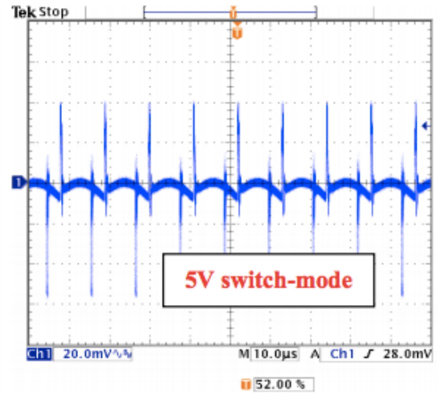
Fonte linear versus comutada

90 W



100 W

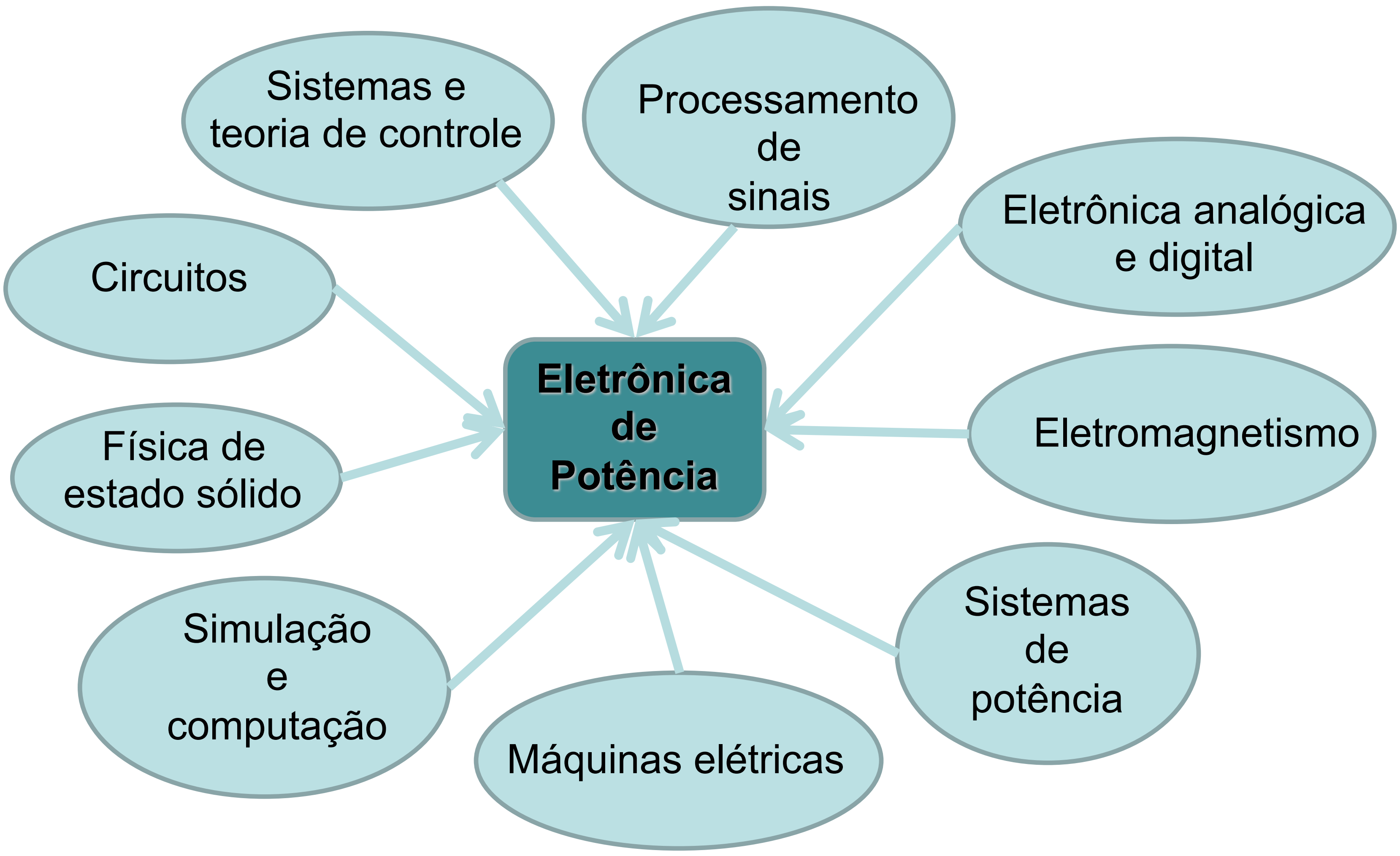




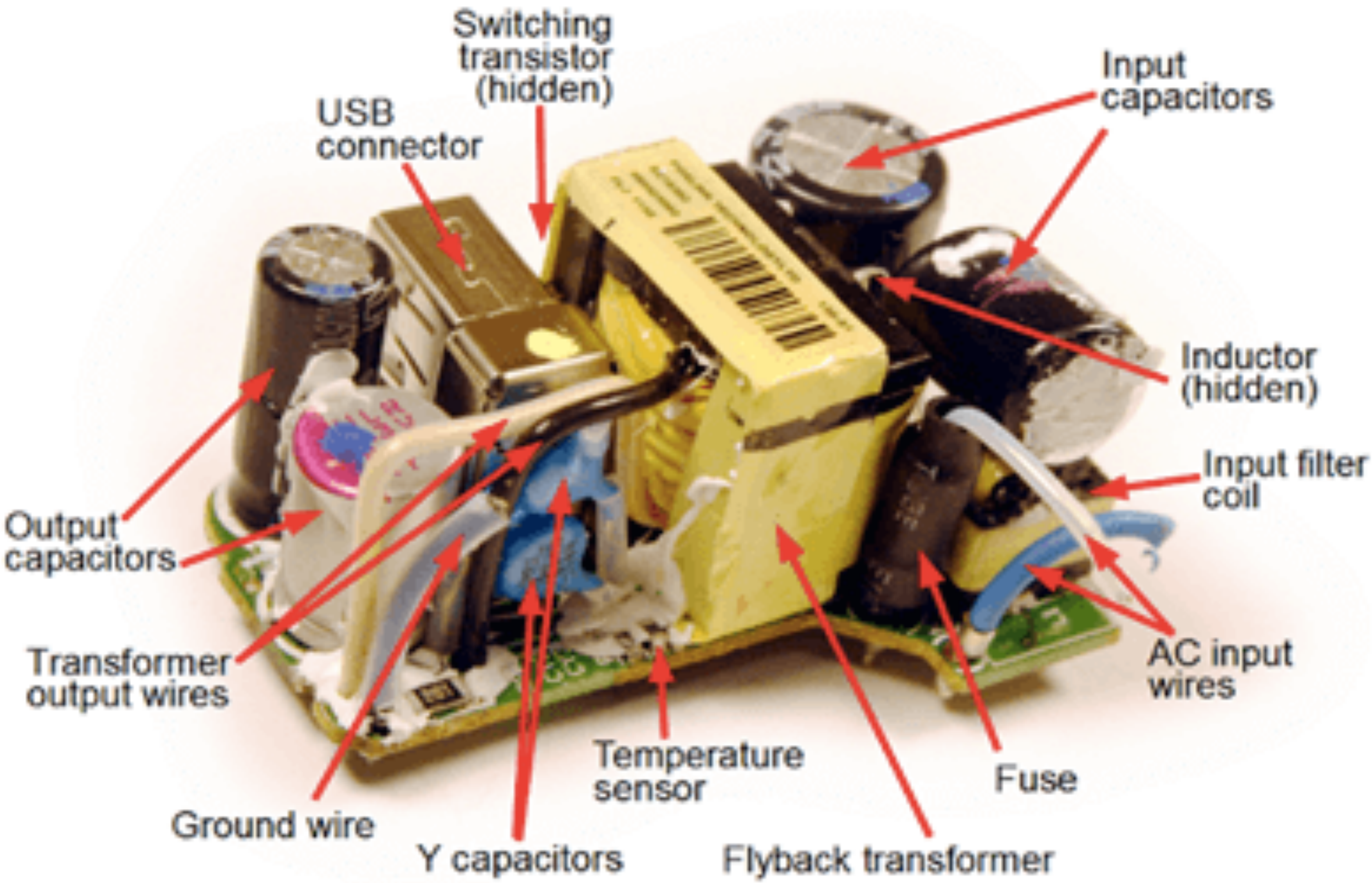
	Linear	Switch-mode	Comments
Size	✖	✔	Typically 80% smaller
Weight	✖	✔	Typically 80% lighter
Input Voltage Range	✖	✔	10% vs. up to 300% range
Efficiency	✖	✔	Calculate it long term!
Reliability	✔	✖/✔	Component count method, demonstrated probably equal
Ripple & Noise	✔	✖/✔	Up to 10,000 times - often possible to overcome though
Transient Response	✔	✖	Up to 100 times - necessary in specialized areas
Low leakage Current	✔	✖/✔	Often used in medical systems, switch-mode gaining share

https://www.valuetronics.com/Manuals/Lambda_%20linear_versus_switching.pdf

Interdisciplinaridade da eletrônica de potência



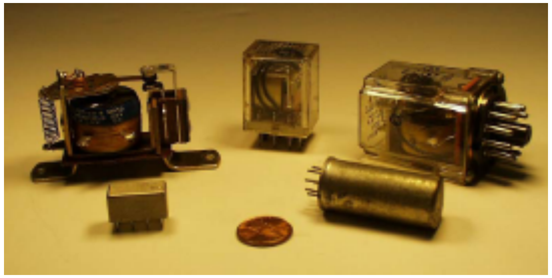
Interdisciplinaridade da eletrônica de potência



Iphone charger

Breve histórico da eletrônica de potência

.... 1880	Estudo de métodos de retificação
1880	George Stanley implementou o transformador
1883	Diodo de selenium por C. T. Fritts
1883	Efeito termiônico
1888	Motor de indução por Tesla
1891	Geração hidrelétrica por Siemens
1900	Lâmpadas de vapor de mercúrio por P. Cooper-Hewitt
1901	Explicação do efeito termiônico por O. W. Richardson
1903	Diodo de tubo de vácuo
1903	Previsão de controlar o retificador de mercúrio por Cooper-Hewitt
1904	Retificação com o efeito termiônico por J. A. Fleming

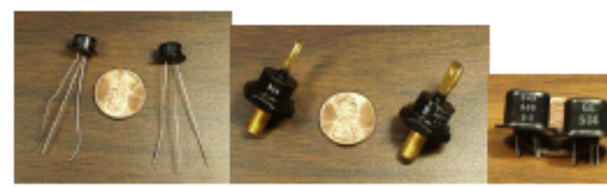


Breve histórico da eletrônica de potência

1905	Uso dos tubos de mercúrio para retificação por Steinmetz
1907	Tubo de vácuo termiônico de três elementos por L. DeForest
1910	Adoção do sistema alternado trifásico nos EUA
1912	Amplificador magnético por E. F. W. Alexanderson
1916	Uso do amplificador magnético com potência de 70 kW
Década de 20	Desenvolvimento dos tubos de vácuo
	Circuitos passivos com diodos de vácuo implementando inversores
1928	Retificador a arco com terceiro elemento por Langmuir e Prince
1928 a 1933	Desenvolvimento dos retificadores controlados a gás e vapor
Década de 30	Fabricação de diodos de selenium, óxido de cobre entre outros materiais
	Controle da grade de diodos de vácuo e mercúrio objetivando inversores
	Melhorias nos amplificadores magnéticos por Frank G. Logan
	Tubos de gás, ignitrons e thyratrons
	Desenvolvimento dos retificadores

Breve histórico da eletrônica de potência

1931	Surgimento dos cicloconversores
1933	Ignitron por Slepian e Ludwig
1940	Diodos de junção PN
Década de 40	Desenvolvimento dos amplificadores magnéticos e elementos saturáveis
	Novos materiais com melhorias nos amplificadores magnéticos
1948	Transistor de contato por Barden, Brattain e Schokley
1950	Tiristores a controle de fase
	Oscilador de Hertz, predecessor do inversor de onda quadrada
1951	Transistor de junção na Bell Laboratories
1952	Semicondutor de potência significante por Hall
1954	Transistor de silício comercialmente disponível
1956	Invenção do SCR pela Bell Laboratories



Breve histórico da eletrônica de potência

1957	Fabricação do SCR pela General Electric
1960 e 1961	Comercialização do SCR
1958 a 1975	Domínio dos tiristores
1961	GTO
1964	TRIAC
1967	Fonte CC linear
1970	MOSFET de potência
	Técnicas de controle vetorial
	RCT
Década de 70	Transistores Darlington
	Desenvolvimento intenso das aplicações
1983	IGBT
1987	SIT
1988	SITH e MCT

Artigo Prof. Ewaldo L. M. Mehl

http://www.eletr.ufpr.br/mehl/te040/historia_transistor.pdf

Breve histórico da eletrônica de potência

INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

Guest Introduction
by Bimal K. Bose

The Past, Present, and Future of Power Electronics

IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 60, NO. 7, JULY 2013

Global Energy Scenario and Impact of Power Electronics in 21st Century

Bimal K. Bose, *Life Fellow, IEEE*

history | barry brusso

Power Electronics—Historical Perspective and My Experience

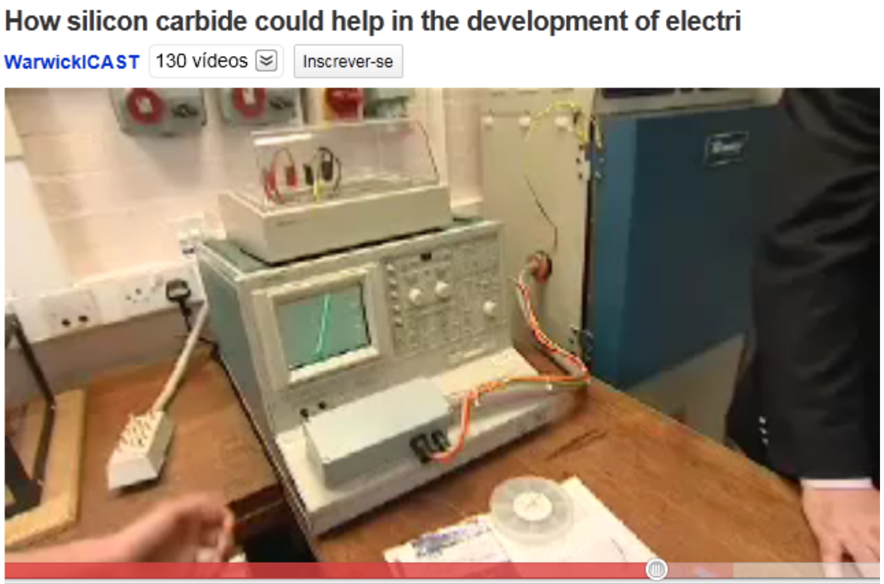
Bimal Bose, Guest Author

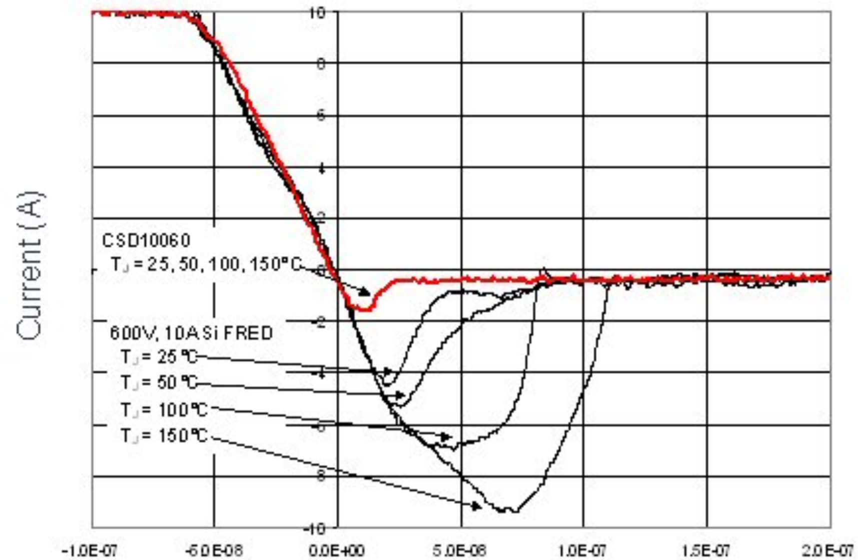
My View
by Bimal K. Bose

Doing Research in Power Electronics

Bimal K. Bose, 2009, 2013, 2014 e 2105. → http://www.ieee.org

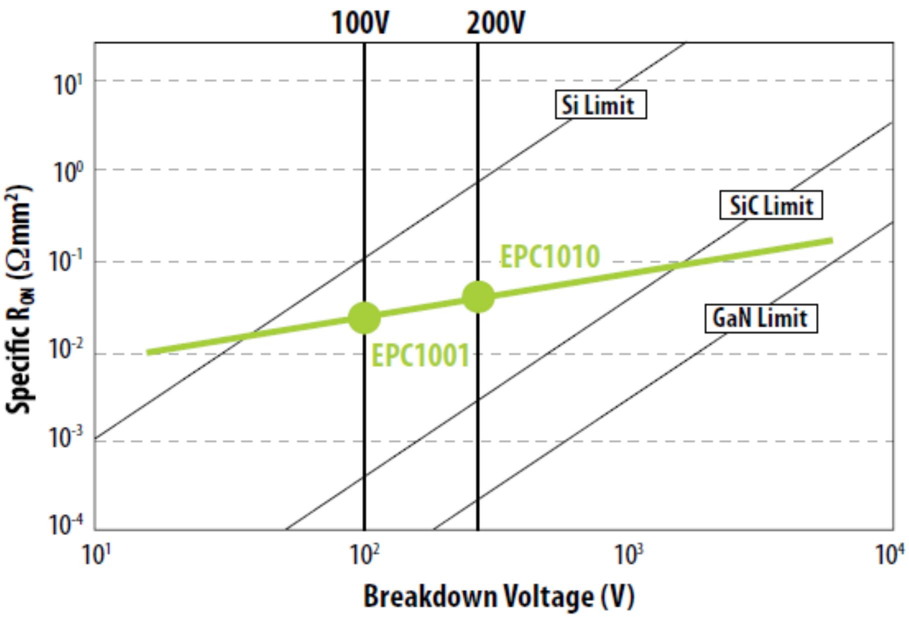
Silicon Carbide - SiC



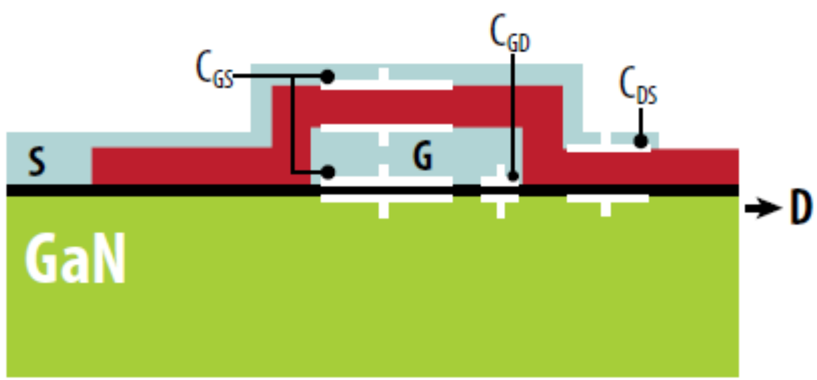


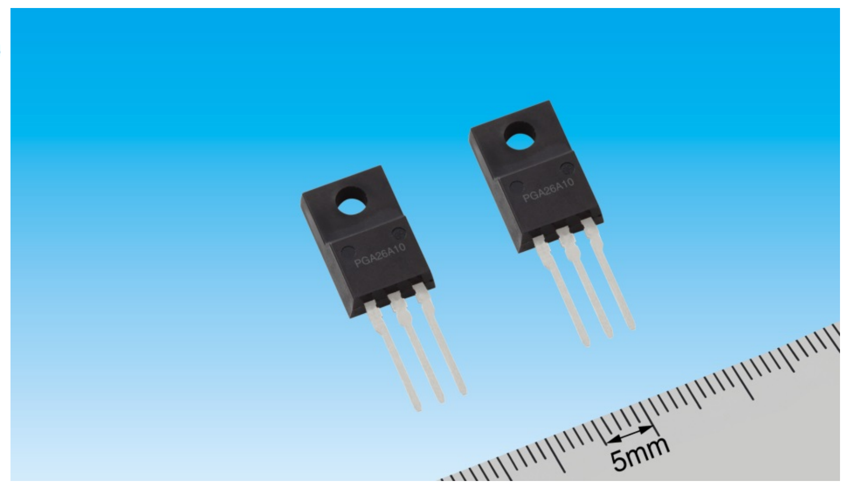
http://www.youtube.com/watch?v=lPKtRu4y3JY

Nitreto de Gálio - GaN



http://panasonic.net/id/news/20130319_1.html

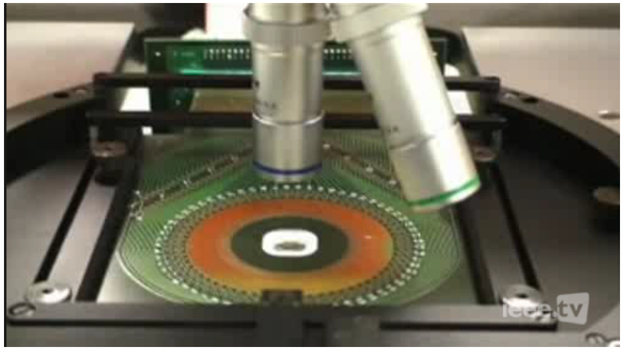




https://www.youtube.com/watch?v=4tIRFutPFP0

Memristor

ieee.tv



http://www.ieee.org

Eletrônica

Memristor: cientistas comprovam existência do quarto componente eletrônico fundamental

Redação do Site Inovação Tecnológica - 02/05/2008

Cientistas da HP anunciaram que um novo componente eletrônico, construído por eles em 2005, é na verdade um memristor, o quarto componente eletrônico básico, teorizado pelo cientista Leon Chua, em 1971.

Até agora os cientistas da HP chamavam seu componente de *crossbar latch* - veja a descrição completa de sua estrutura e funcionamento em Cientistas criam novo componente que poderá substituir o transistor. Eles deram outro passo importante em sua pesquisa em 2007 (veja Descoberta avança três gerações na construção de chips).

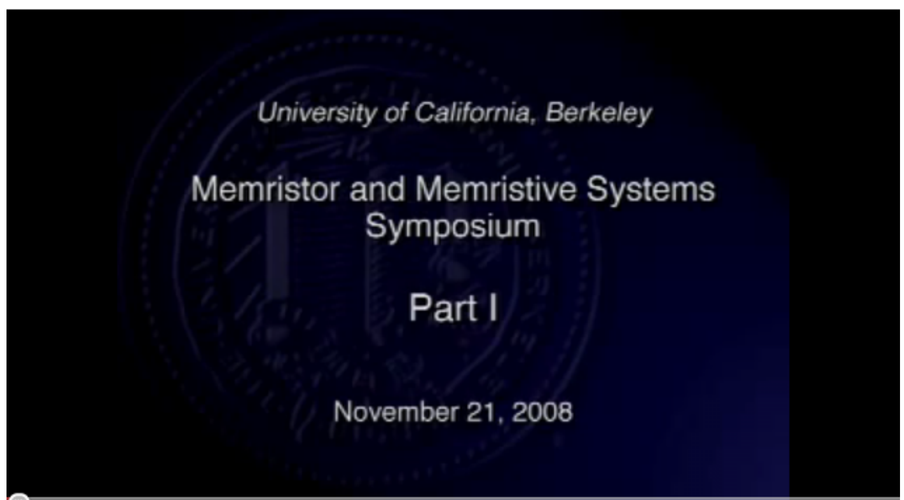
Im
17

http://www.inovacaotecnologica.com.br

YouTube

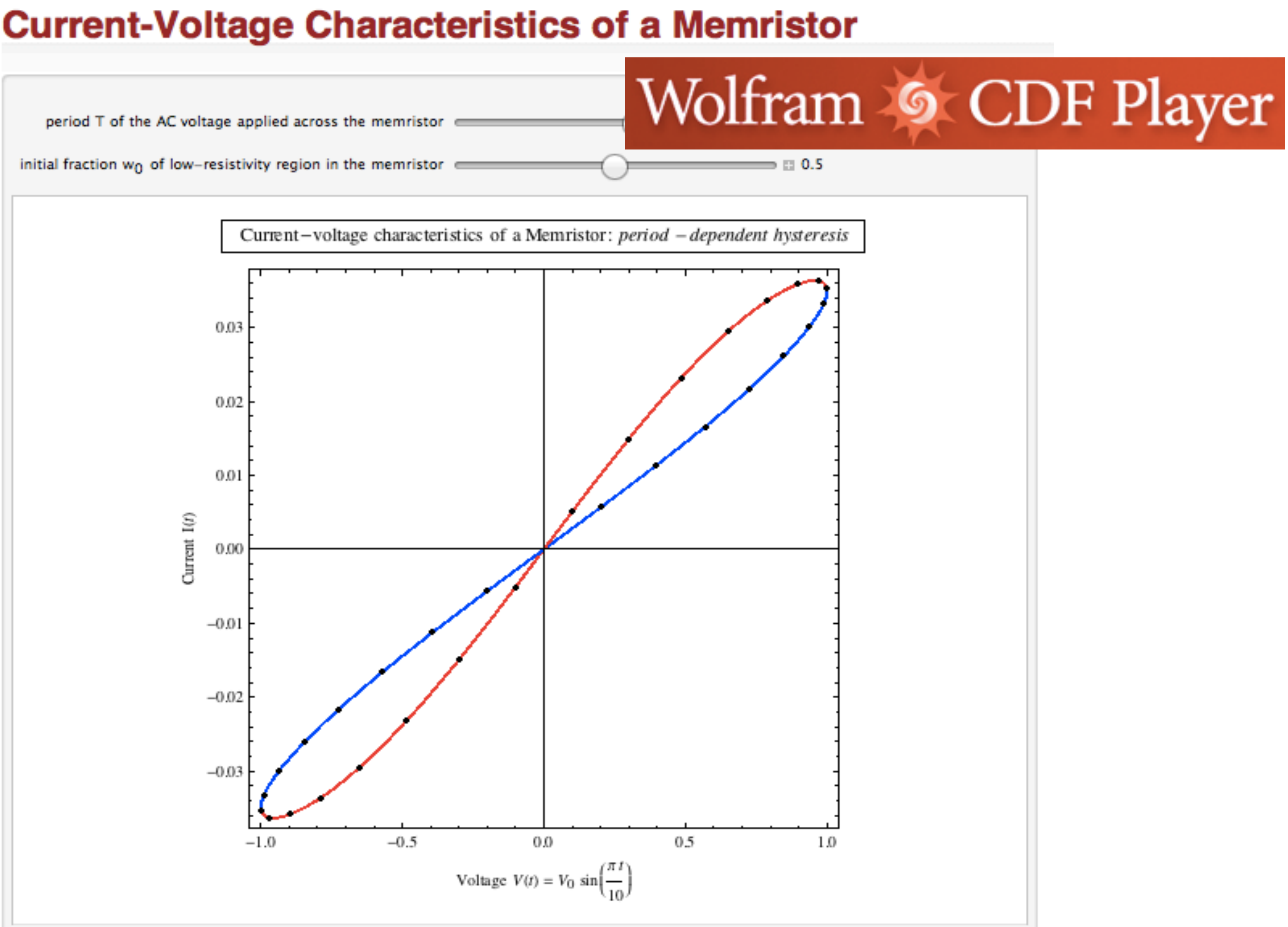
http://www.youtube.com

Ver
Parte 1, 2, 3 e 4



http://www.youtube.com/watch?v=QFdDPzcZwbs

Memristor



www.demonstrations.wolfram.com

Transistores de grafeno

Materiais Avançados

Nobel de Física vai para estudos com o grafeno

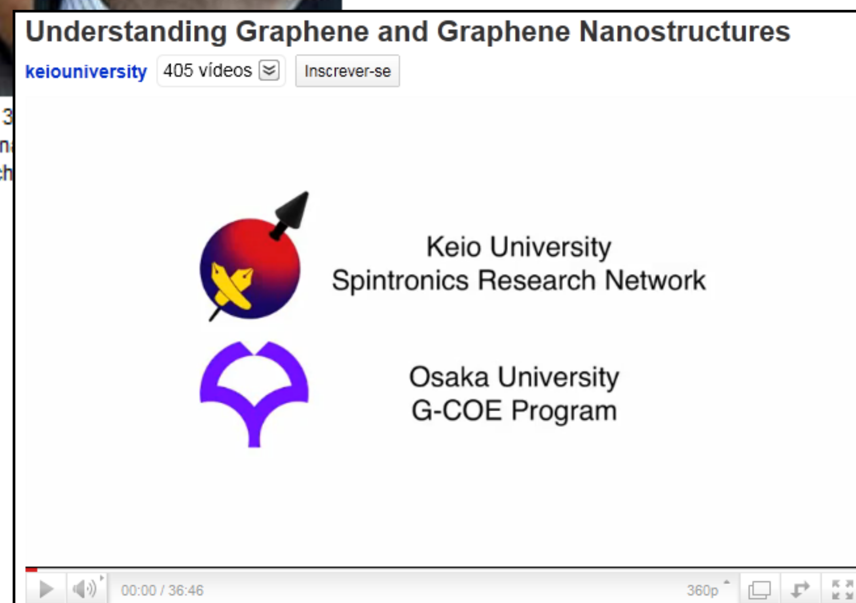
Redação do Site Inovação Tecnológica - 05/10/2010

Andre Geim e Konstantin Novoselov, ambos da Universidade de Manchester, no Reino Unido, vão dividir o Prêmio Nobel de Física de 2010 pelos seus trabalhos com o grafeno.

A premiação, de certa forma inesperada - o grafeno foi descoberto por eles em 2004 - mostra o reconhecimento do potencial desse novo material, que possui uma infinidade de usos possíveis, da eletrônica ao sequenciamento de DNA.

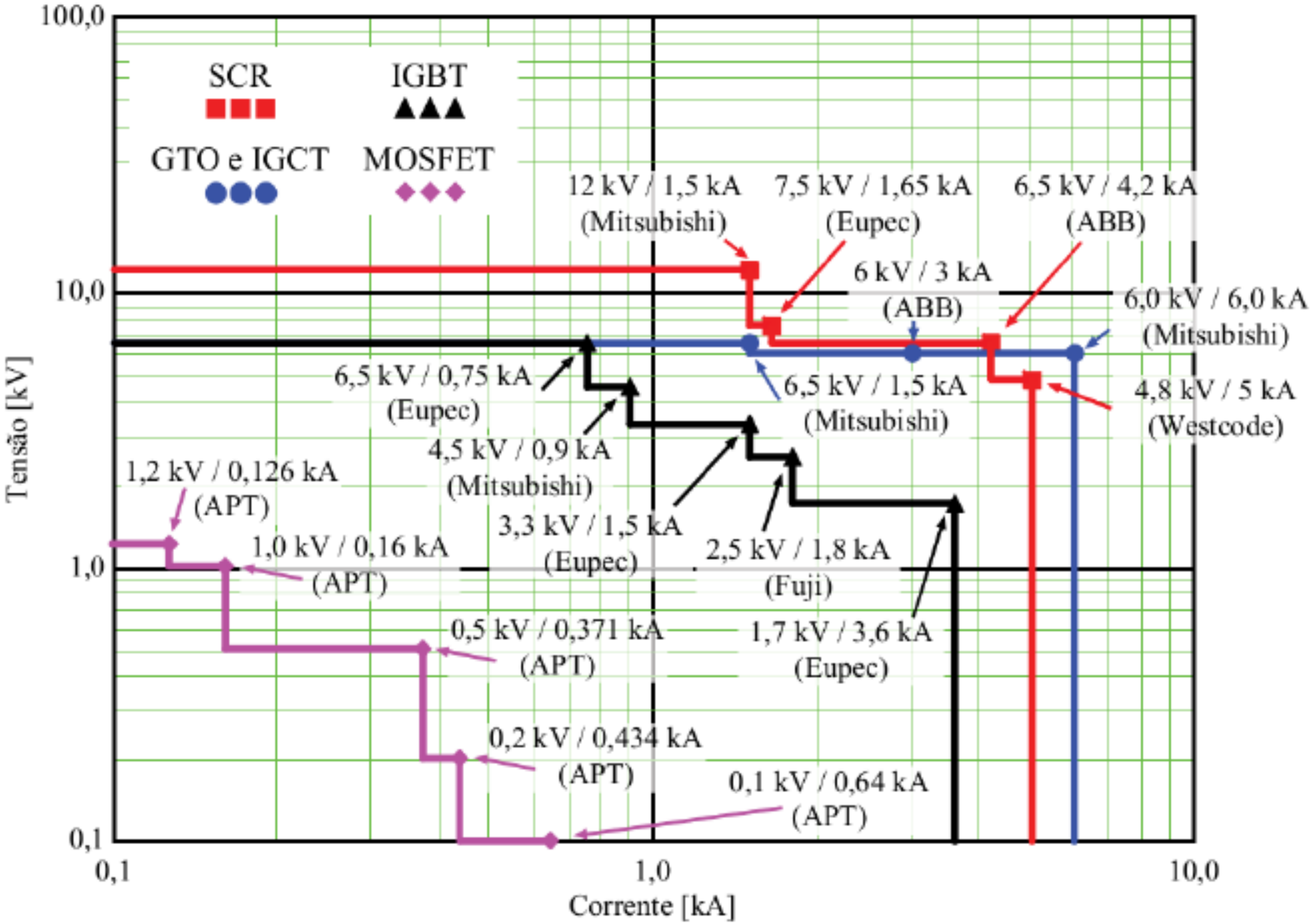
Konstantin Novoselov tem 3
tem 51. Ambos nasceram n
Unido. [Imagem: Univ.Manch

http://www.inovacaotecnologica.com.br

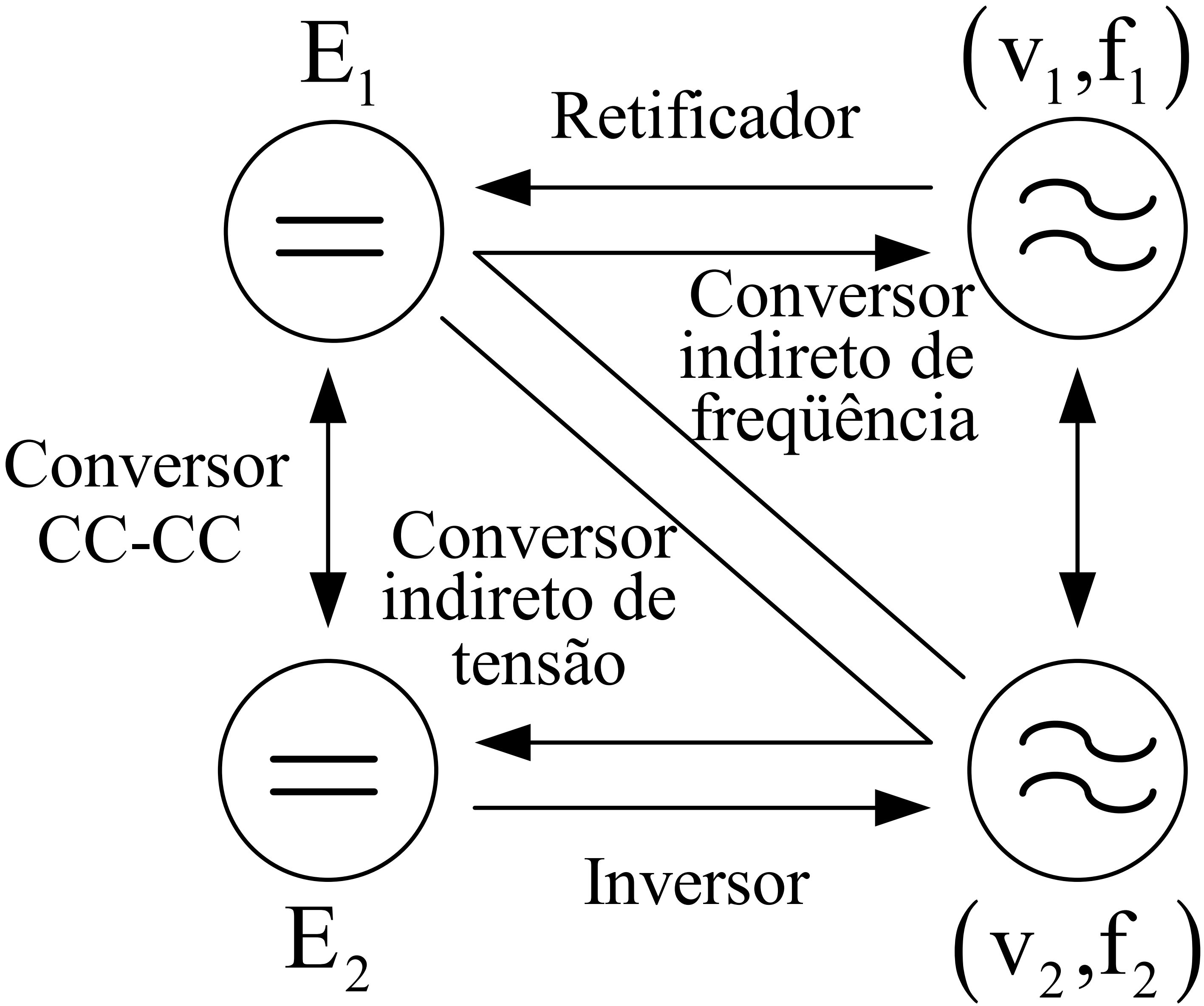


http://www.youtube.com/watch?v=8KgrEIRhMCg&feature=related

Capacidade dos Transistores atualmente



Divisão da eletrônica de potência



Divisão da eletrônica de potência

Conversores CA-CC:

- Denominados de retificadores: convertem a tensão alternada da rede de energia elétrica em uma tensão contínua;

Conversores CC-CC:

- Denominados de choppers: convertem tensão contínua em tensão contínua;

Conversores CC-CA:

- Denominados de inversores: convertem tensão contínua em alternada, muito usados em acionamento;

Conversores CA-CA:

- Denominados de choppers CA: convertem a tensão alternada da rede de energia elétrica em tensão alternada estabilizada, por exemplo.

Aplicações da eletrônica de potência

Aplicações:

- Fontes chaveadas;
- Controle de motores de corrente contínua e alternada;
- Conversores para soldagem;
- Alimentação de emergência;
- Carregadores de bateria;
- Retificadores para eletroquímica;
- Transmissão em corrente contínua;
- Reatores eletrônicos;
- Filtros ativos;
- Compensadores estáticos;
- Processamento de energias alternativas;
- Amplificadores de potência;
- Controles de temperatura;
- Entre outras.

Aplicações da eletrônica de potência

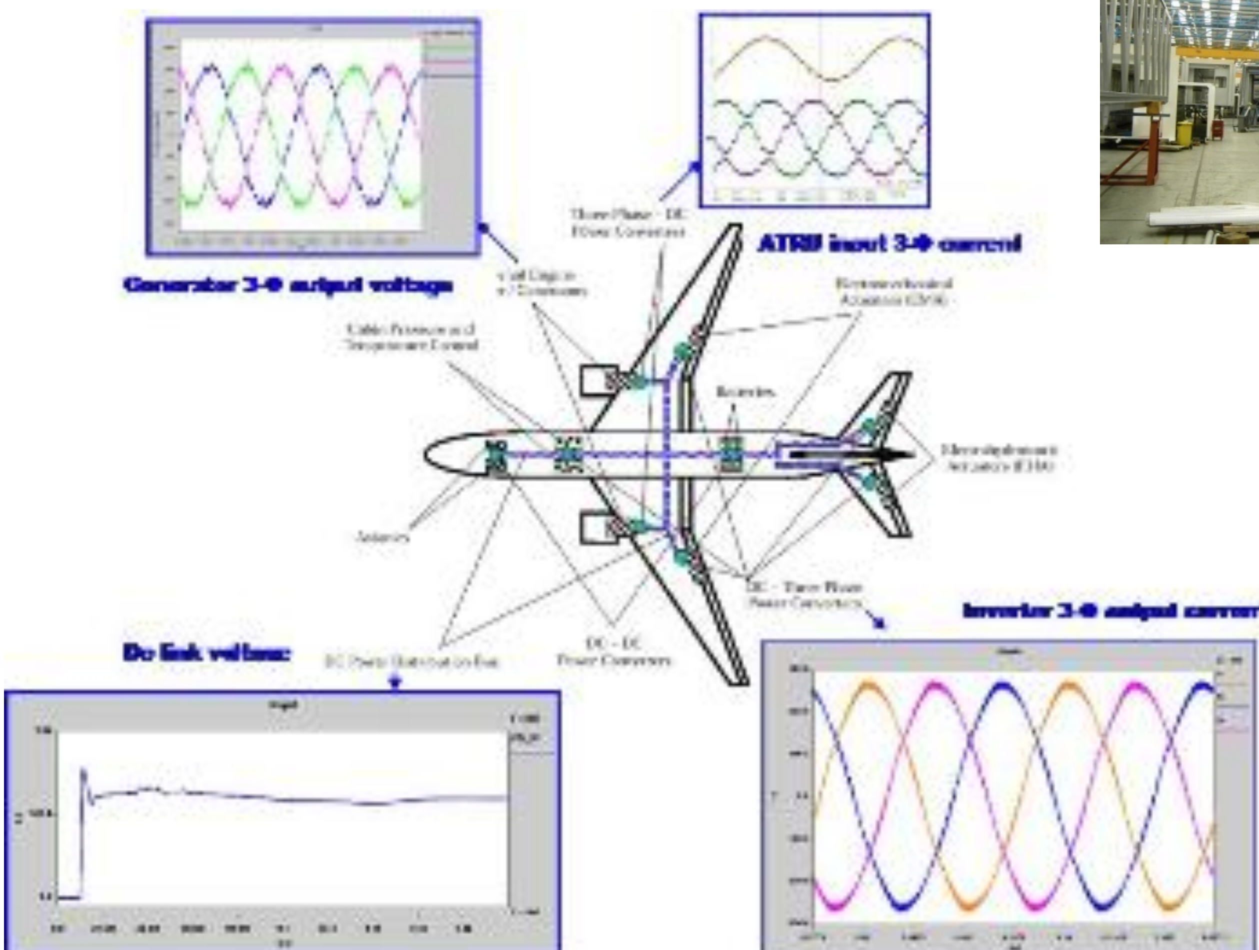
Aplicações:

- Fontes chaveadas;

Aplicações da eletrônica de potência

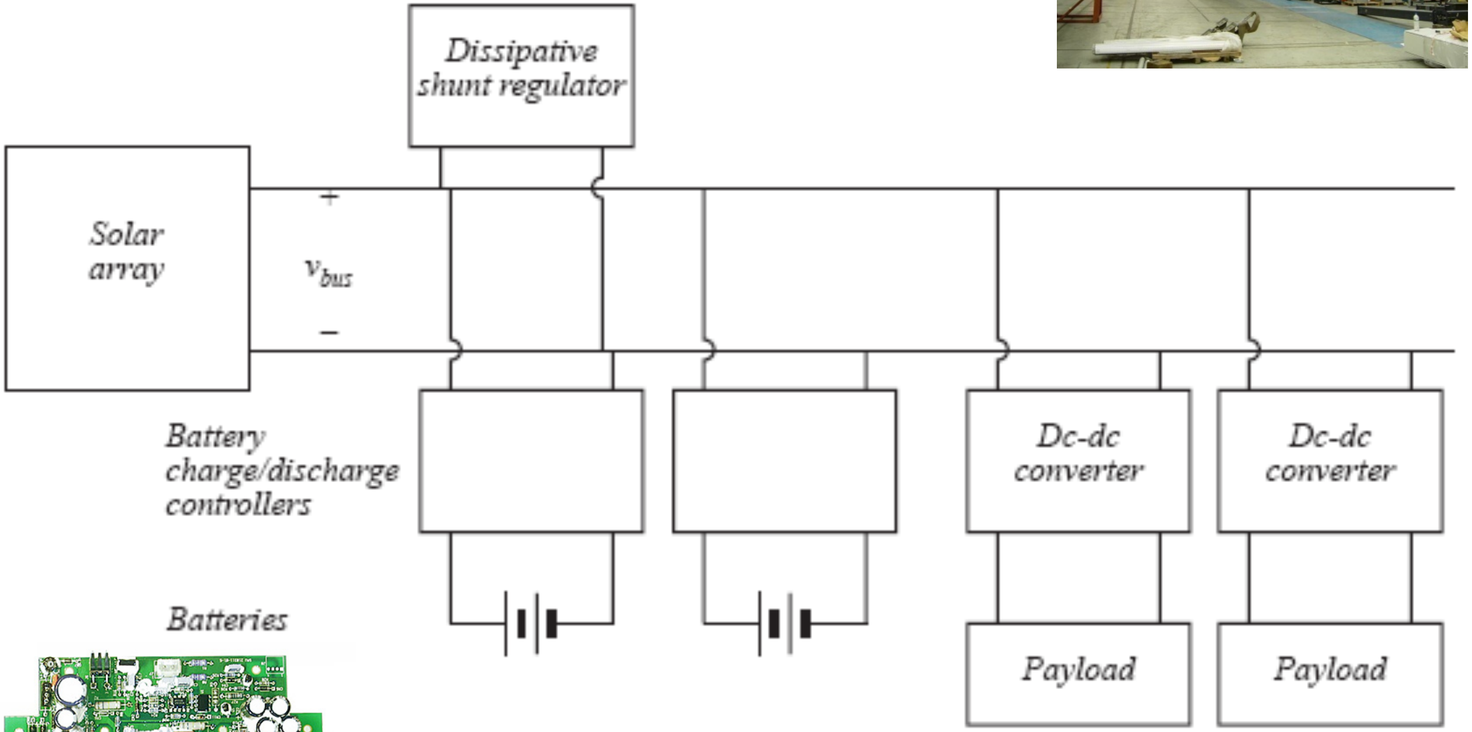
Aplicações:

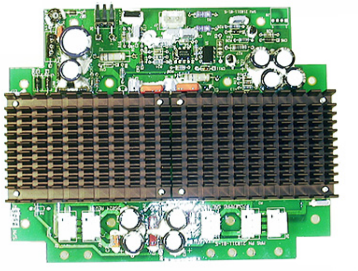
- Sistema de alimentação de aviões;



Aplicações:

- Sistema Elétrico de Satélite;

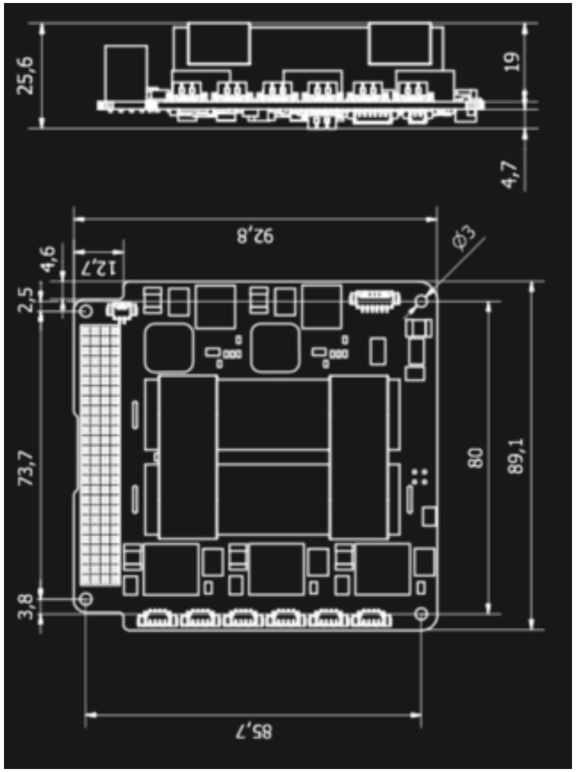




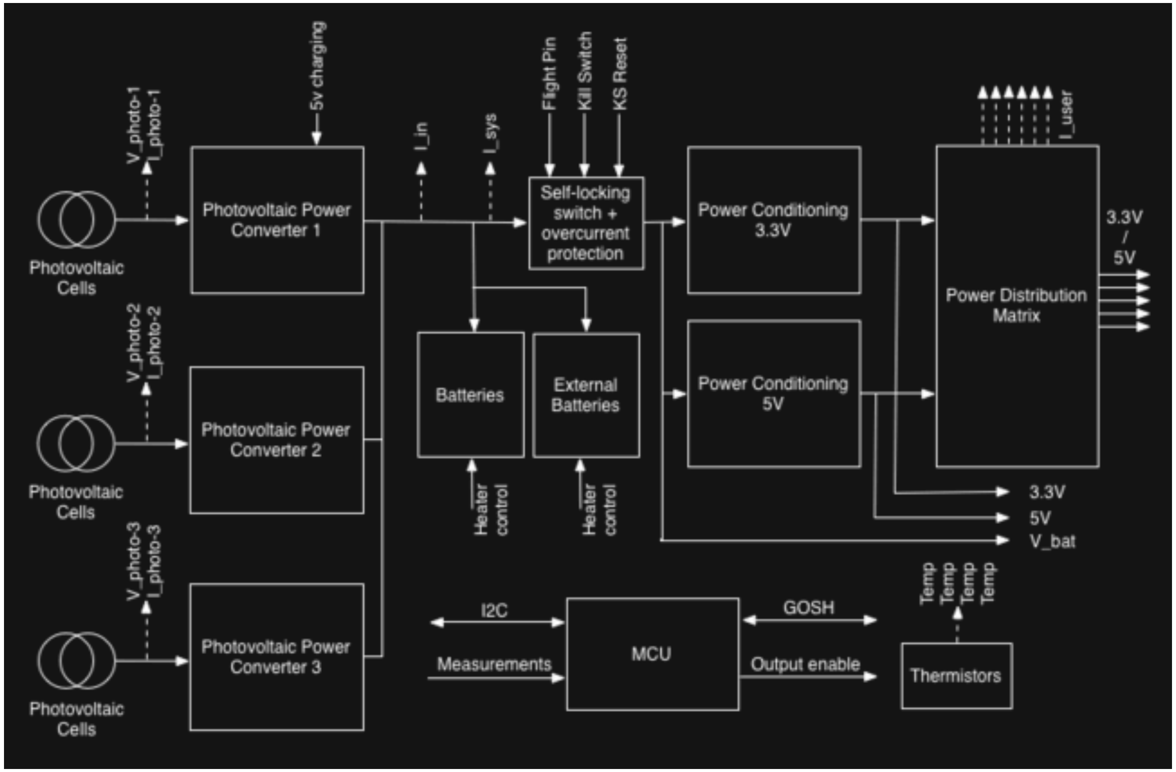
Aplicações da eletrônica de potência

Aplicações:

- Nano Satélites;



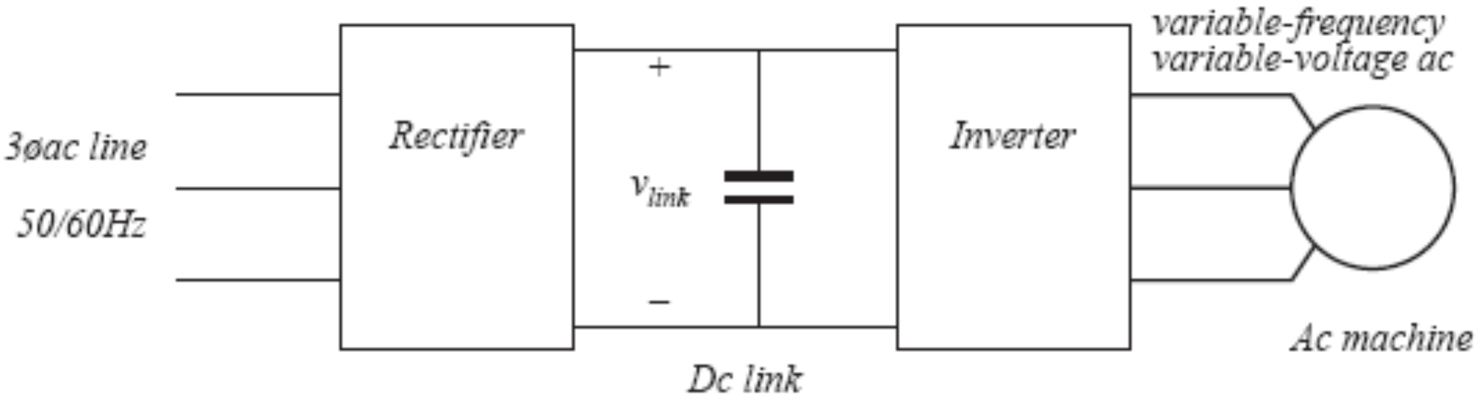
http://gomspace.com



Aplicações da eletrônica de potência

Aplicações:

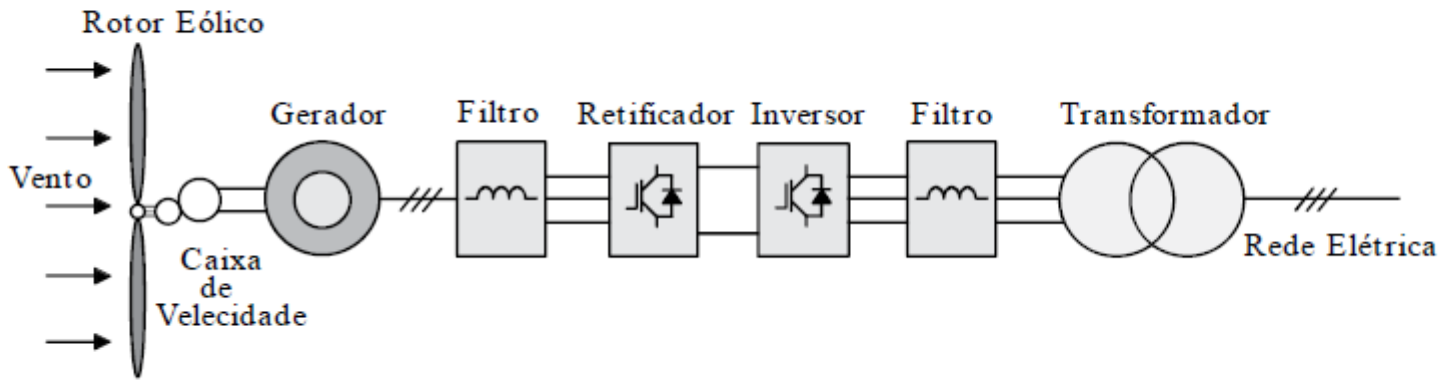
- Acionamento de motores CA;

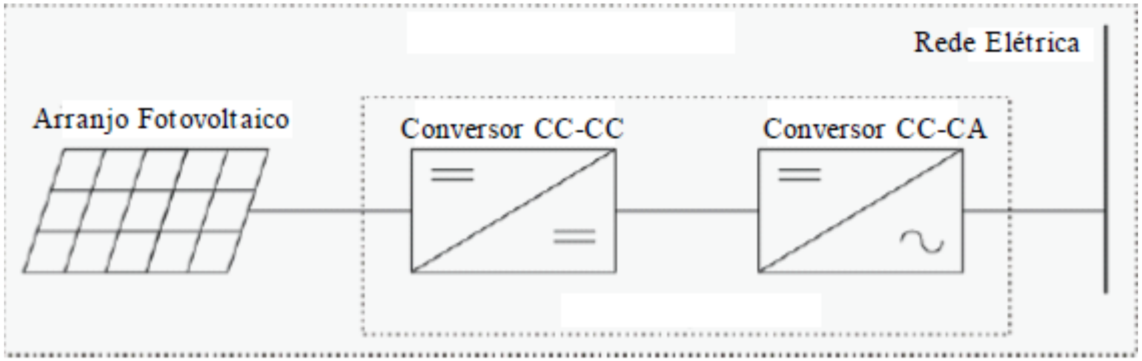


Aplicações da eletrônica de potência

Aplicações:

- Microgerações – Interface com a rede elétrica;





http://www.sma.com

Agenda para esta aula

Parte 1 (19h até 20h):

- Esposição inicial sobre introdução à eletrônica de potência.

Intervalo

Parte 2 (20h20min até 22h):

- Ferramentas de projeto em eletrônica de potência;
- Tecnologias de componentes eletrônicos.

Parte 3 (22h até 22h20min):

- Acesso ao moodle e trabalho individual.

Agenda para esta aula

Parte 1 (19h até 20h):

- Esposição inicial sobre introdução à eletrônica de potência.

Intervalo

Parte 2 (20h20min até 22h):

- Ferramentas de projeto em eletrônica de potência;
- Tecnologias de componentes eletrônicos.

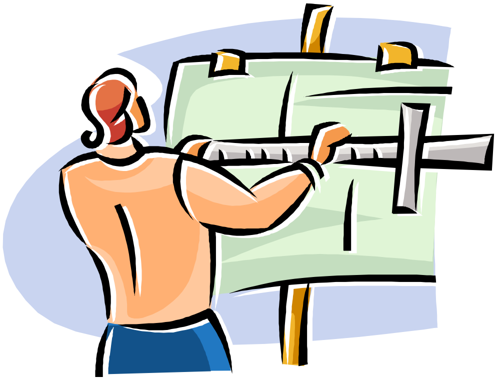
Parte 3 (22h até 22h20min):

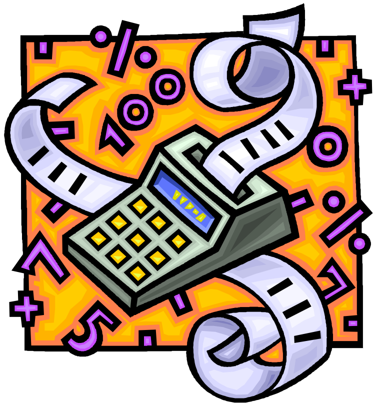
- Acesso ao moodle e trabalho individual.

Introdução

Razões para usar softwares específicos:

a) Complexidade dos circuitos eletrônicos;
b) Dificuldade de representar o mundo real;
c) Possibilidade de uso inúmeras vezes;
d) Diminuição do custo de projeto;
e) Aprendizagem via software;
f) Outras...





Introdução

INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

Qual a necessidade de se realizar uma simulação computacional:

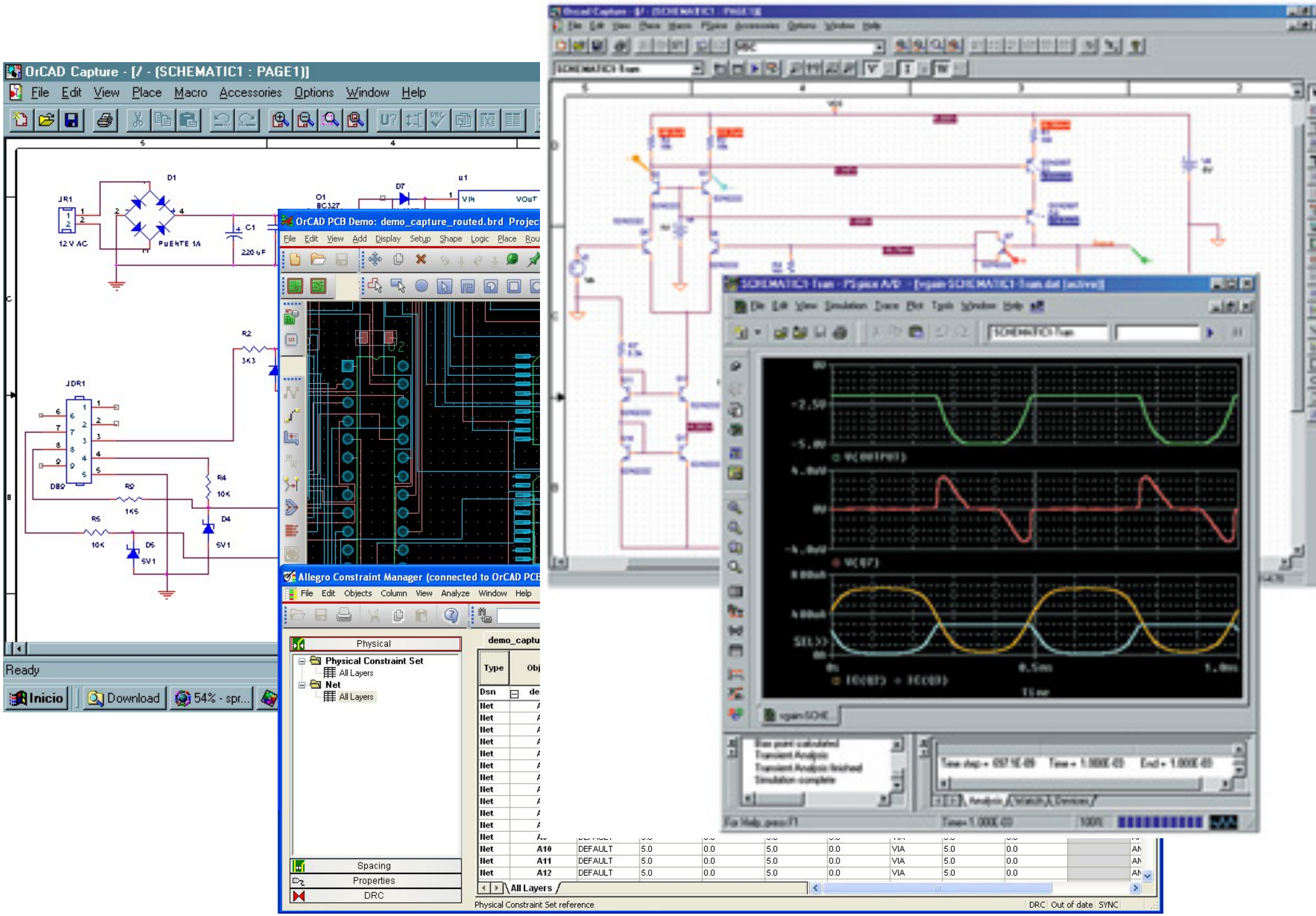
- Averiguação do funcionamento do circuito projetado
  - Comprovação com a teoria
    - Evitar gastos desnecessários
      - Tempo
      - Compra de componentes
- Segurança
  - Ex: Aviação, Aeroespacial

Como funcionam os simuladores de circuitos:

- Os componentes elétricos/eletrônicos são modelados matematicamente
  - Ideal
  - Considerando os parâmetros do componente

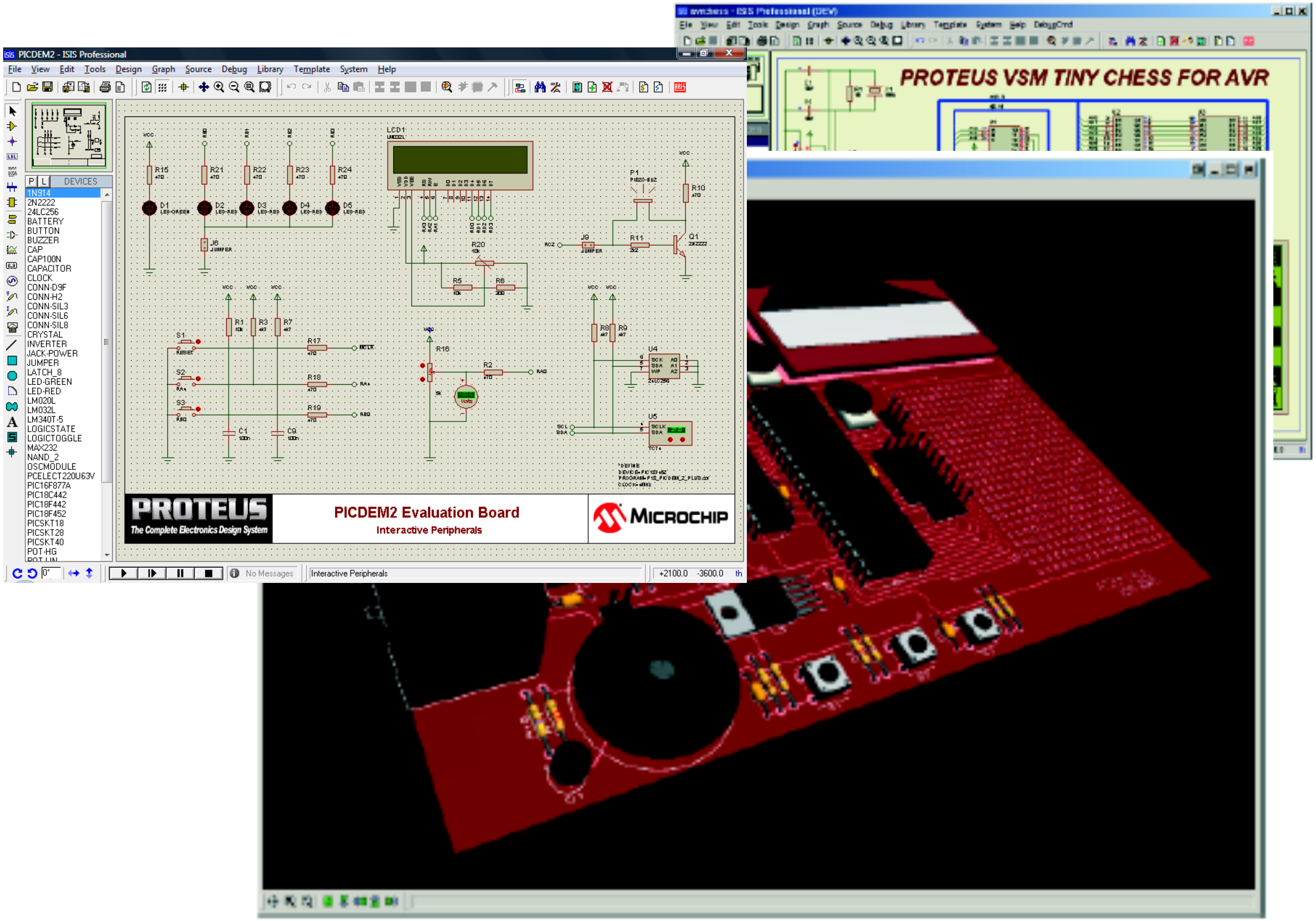
Orcad/pspice

INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA



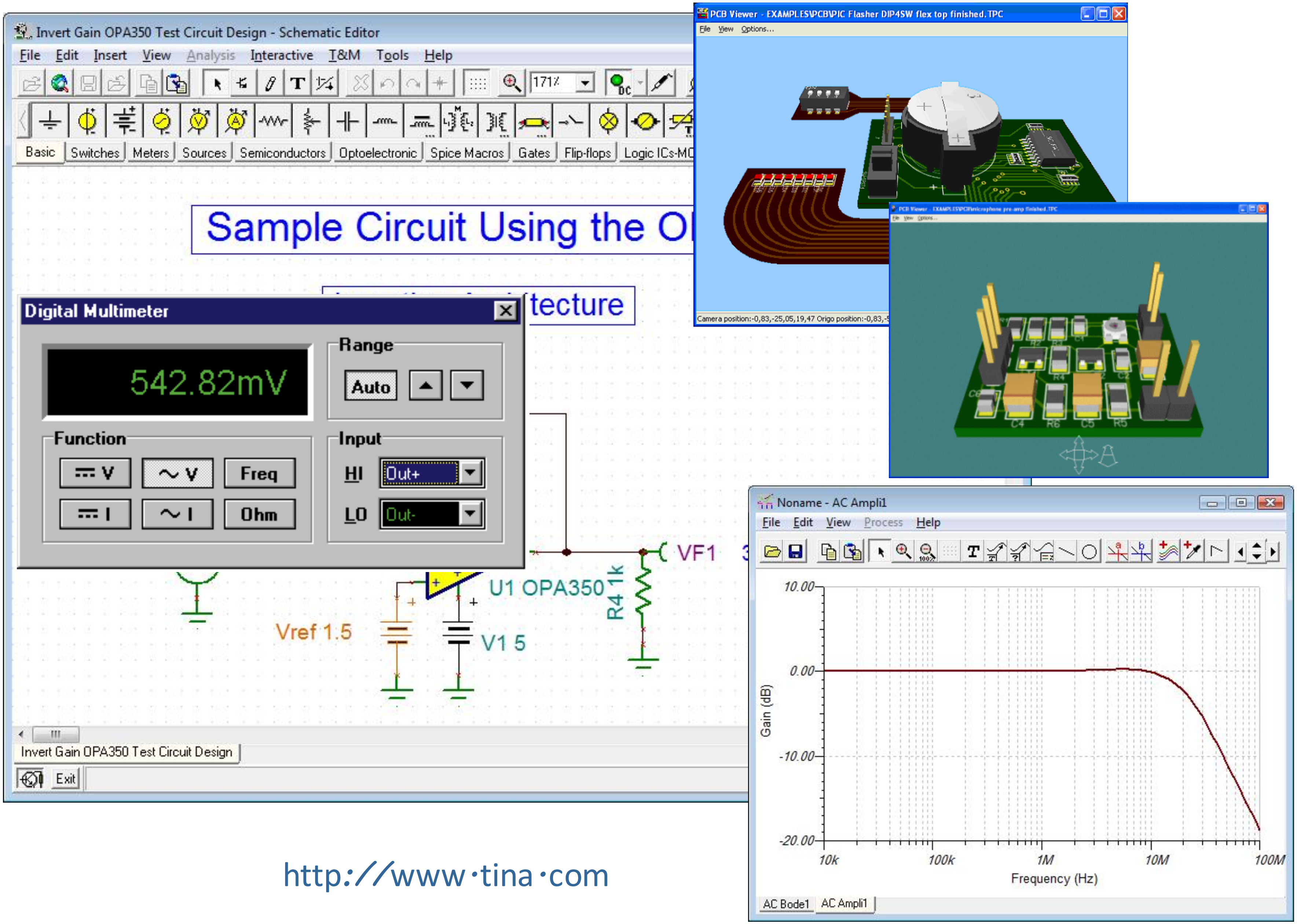
http://www.cadence.com

Proteus



http://www.labcenter.co.uk/

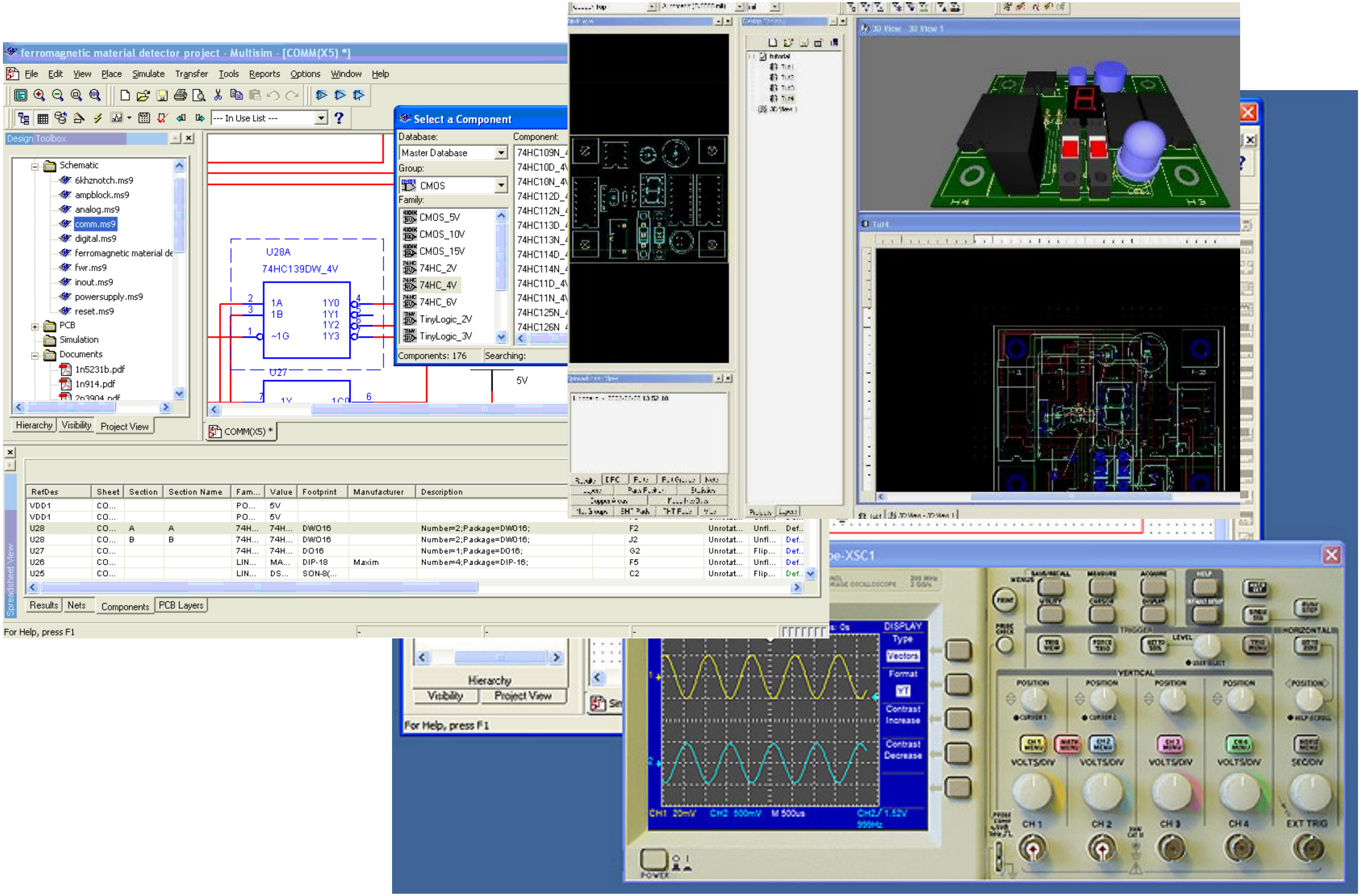
Tina



http://www.tina.com

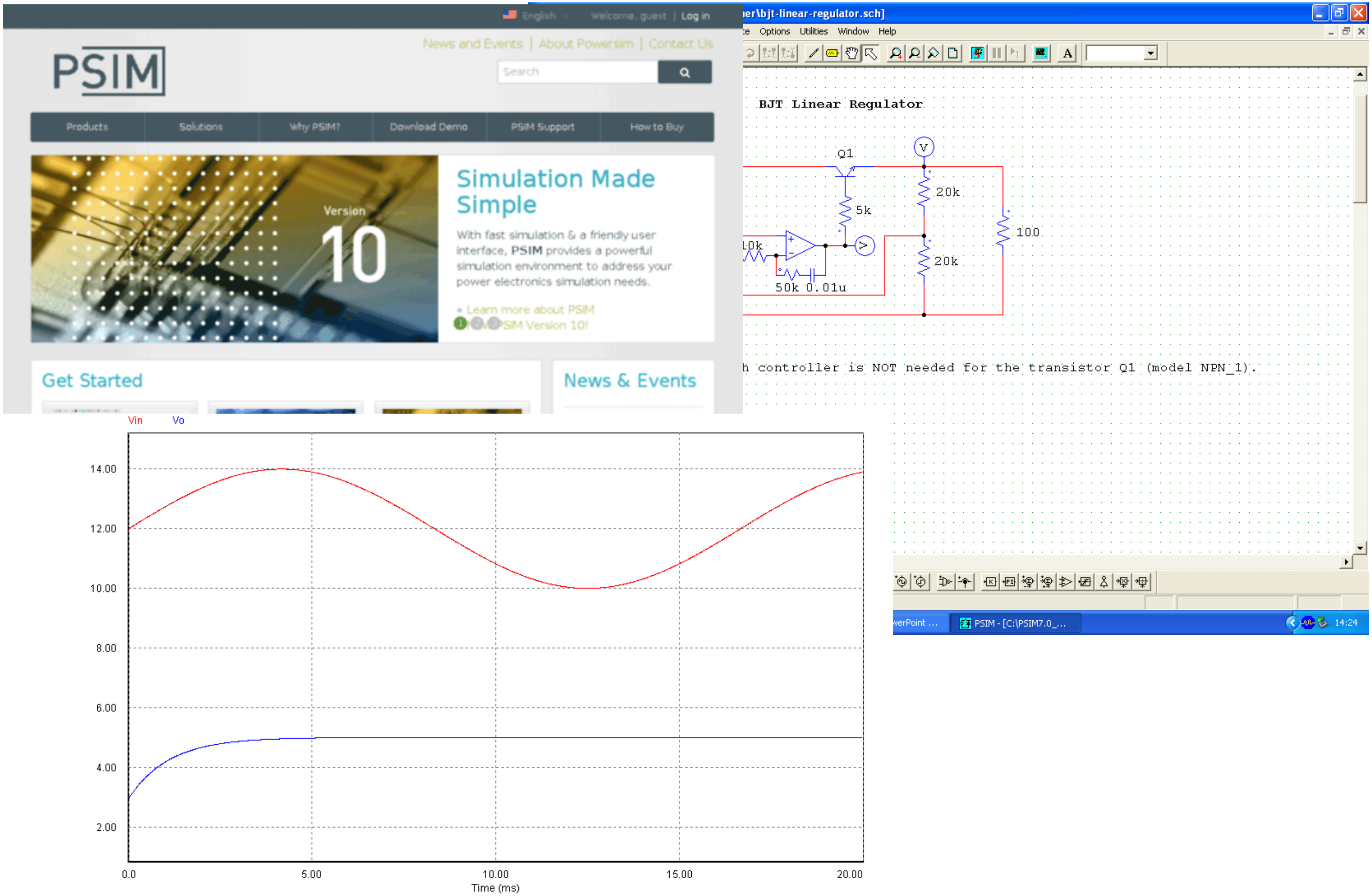
Multisim

INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA



www·ni·com/multisim/

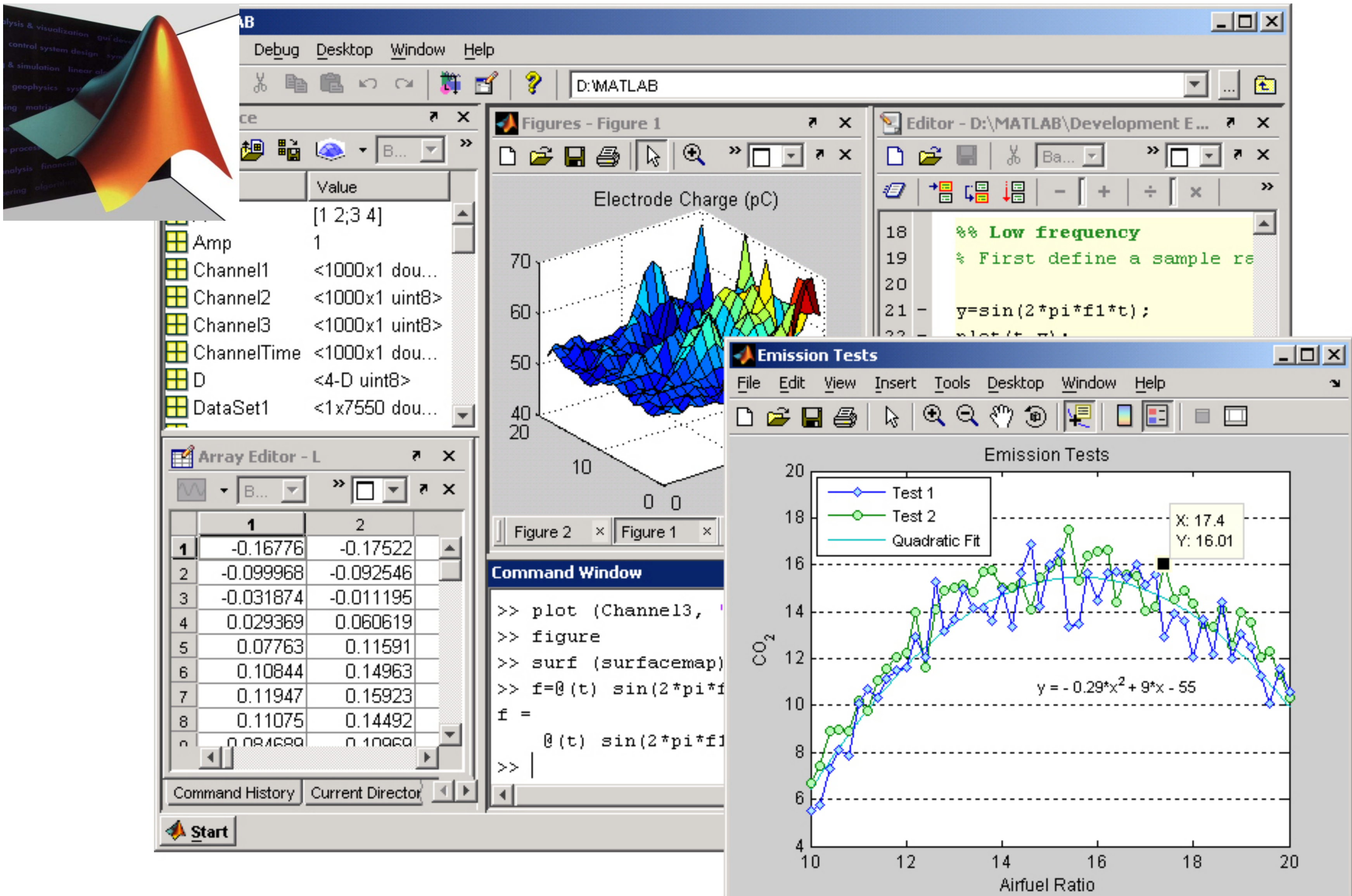
Psim



http://www.powersimtech.com

Matlab

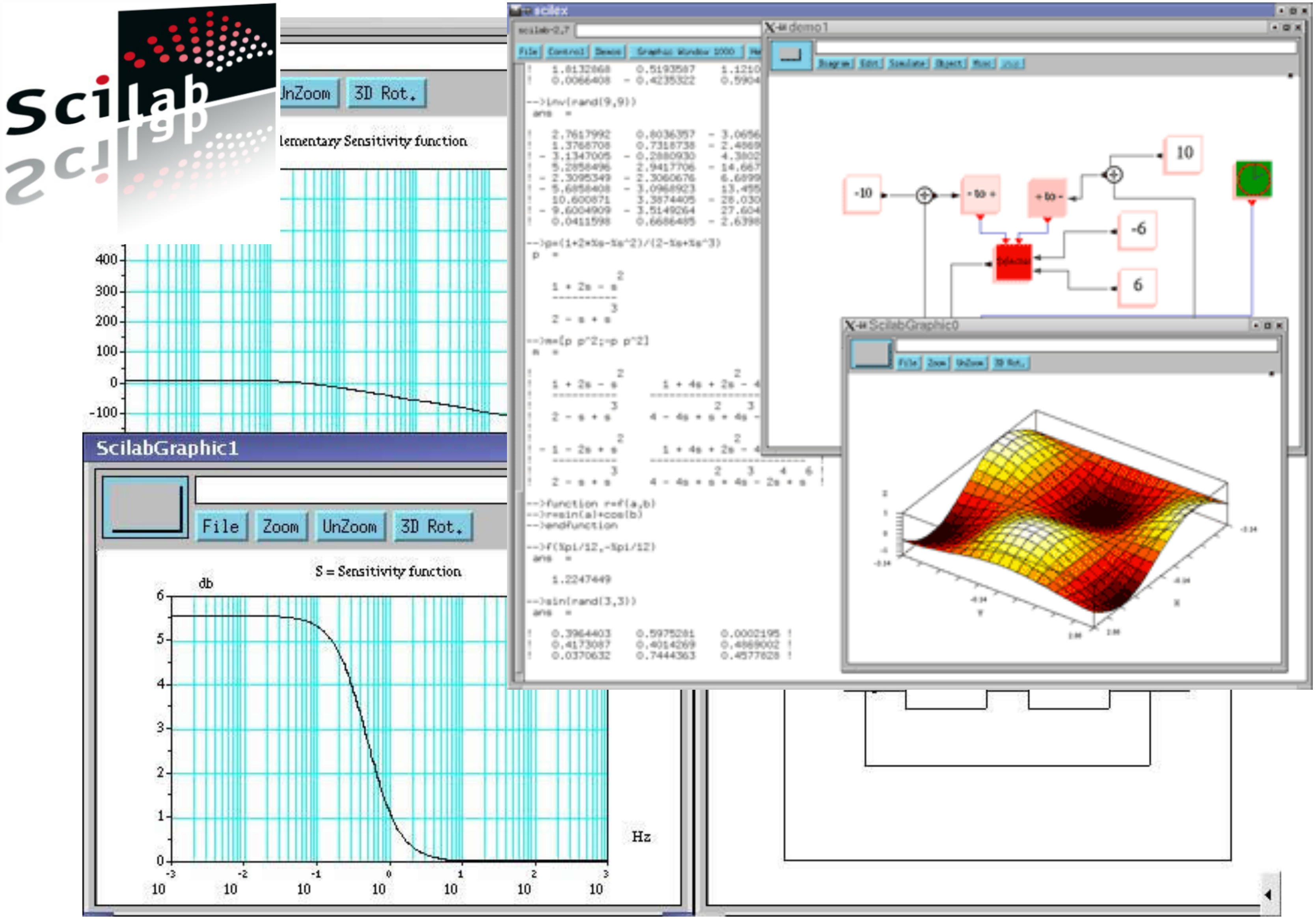
INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA



http://www.mathworks.com

Scilab

INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

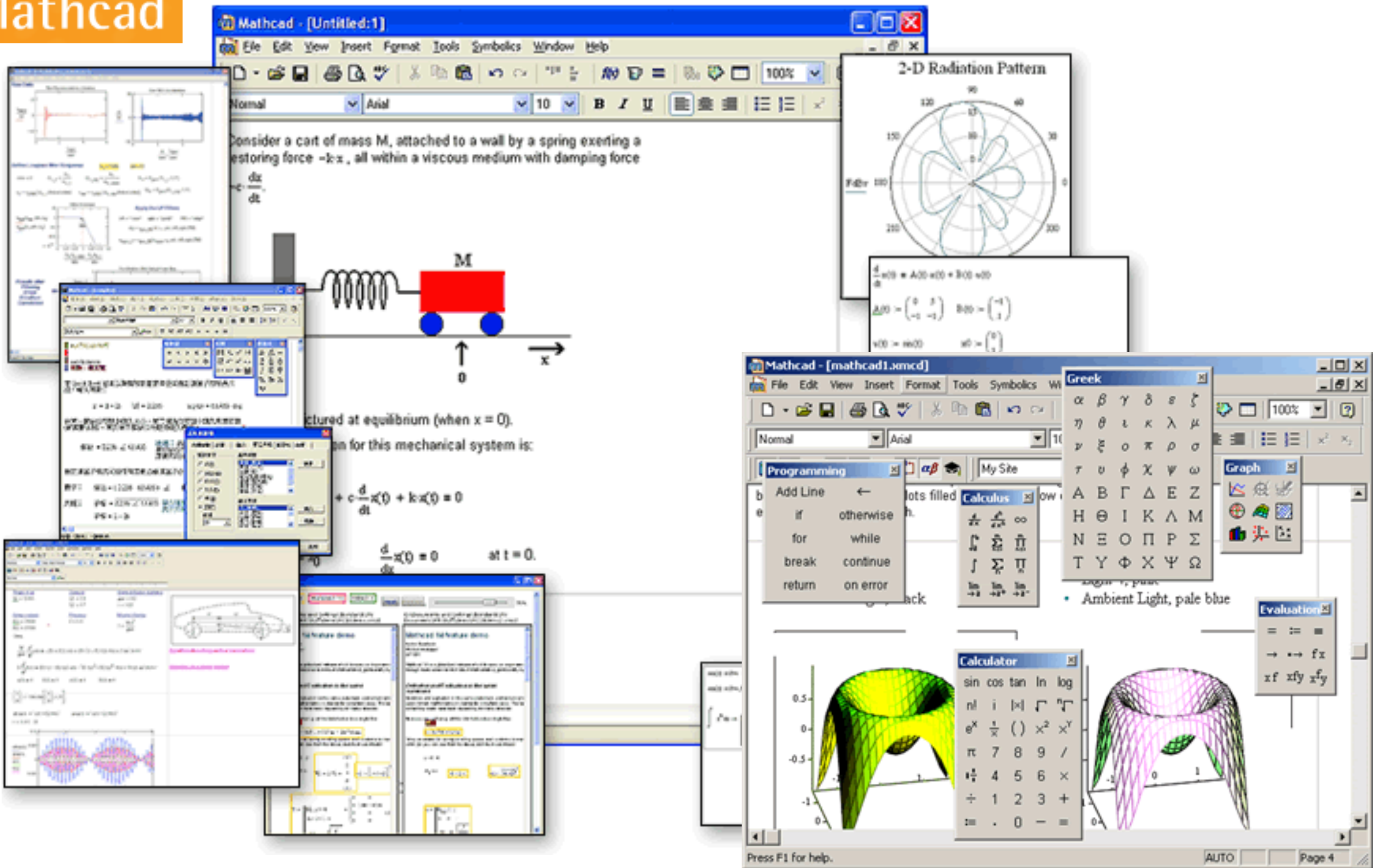


http://www.scilab.org

Mathcad

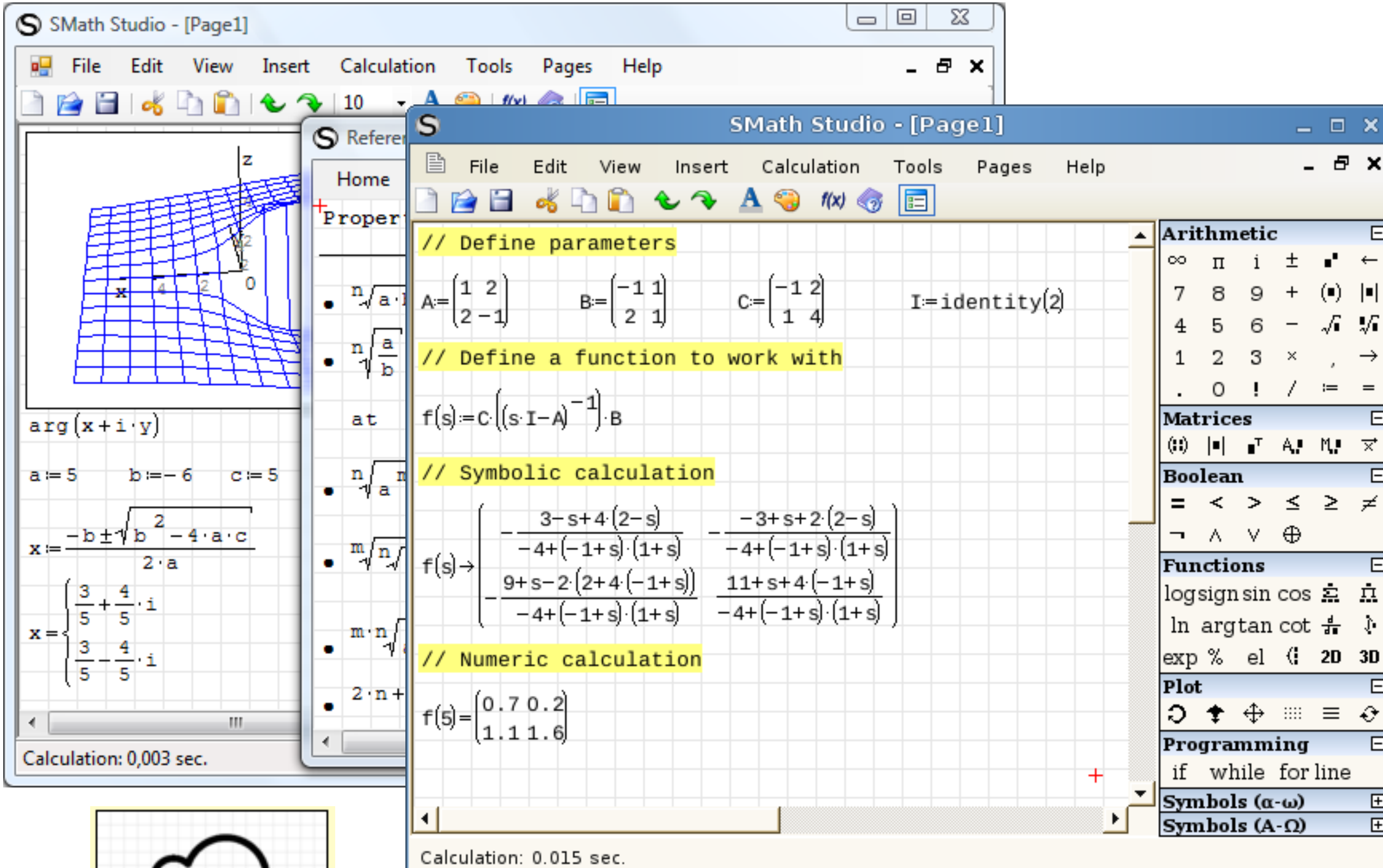
INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

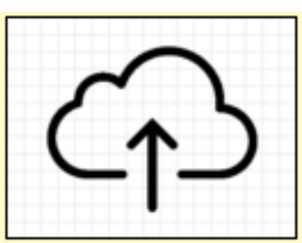
Mathcad



http://www.ptc.com

Smath

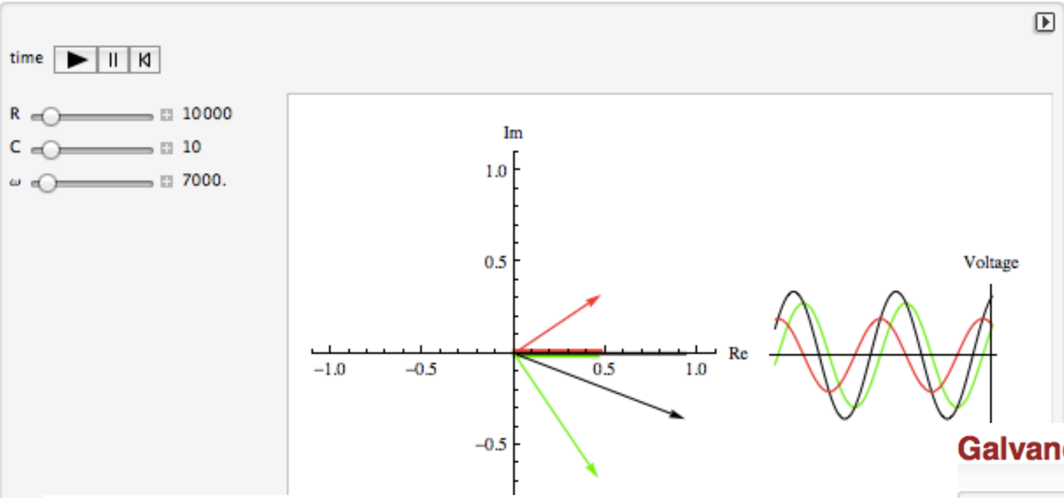




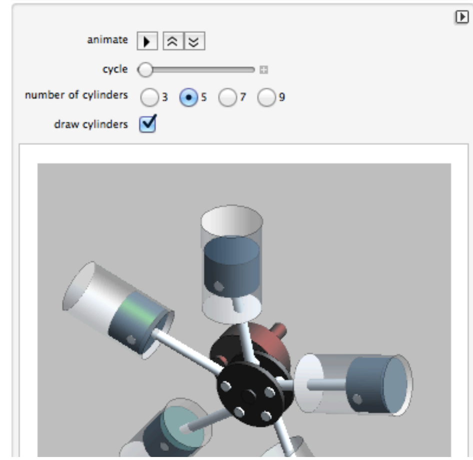
http://en·smath·info/

Mathematica

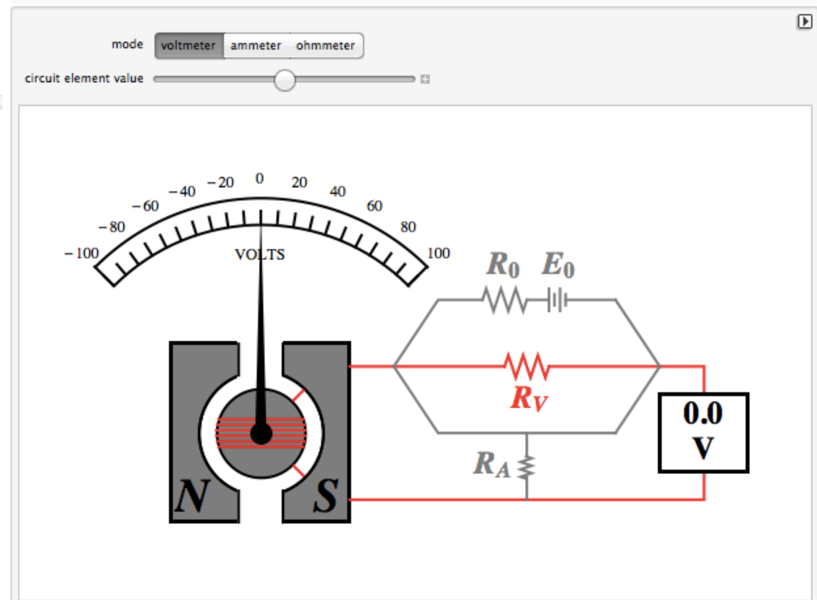
Phasor Model for RC Filter Electronic Circuit




```
Manipulate[
 Grid[{
  {
   Show[
    Graphics[
     {
      {Thickness[0.0075], RGBColor[0, 1, 0],
       Line[{{0, -0.015}, {1/Sqrt[(ω R Cc * 10^-9)^2 + 1] Cos[ωt - π/2], -0.015}}]},
      {Thickness[0.0075], RGBColor[1, 0, 0],
       Line[{{0, 0.015}, {(ω R Cc * 10^-9)/Sqrt[(ω R Cc * 10^-9)^2 + 1] Cos[ωt], 0.015}}]},
      {Thickness[0.0075], Line[{{0, 0}, {Cos[ωt - ArcTan[1/(ω R Cc * 10^-9)]], 0}}]},
      {RGBColor[1, 0, 0],
       Arrow[{{0, 0}, {(ω R Cc * 10^-9)/Sqrt[(ω R Cc * 10^-9)^2 + 1] Cos[ωt], (ω R Cc * 10^-9)/Sqrt[(ω R Cc * 10^-9)^2 + 1] Sin[ωt]}}]}},
```



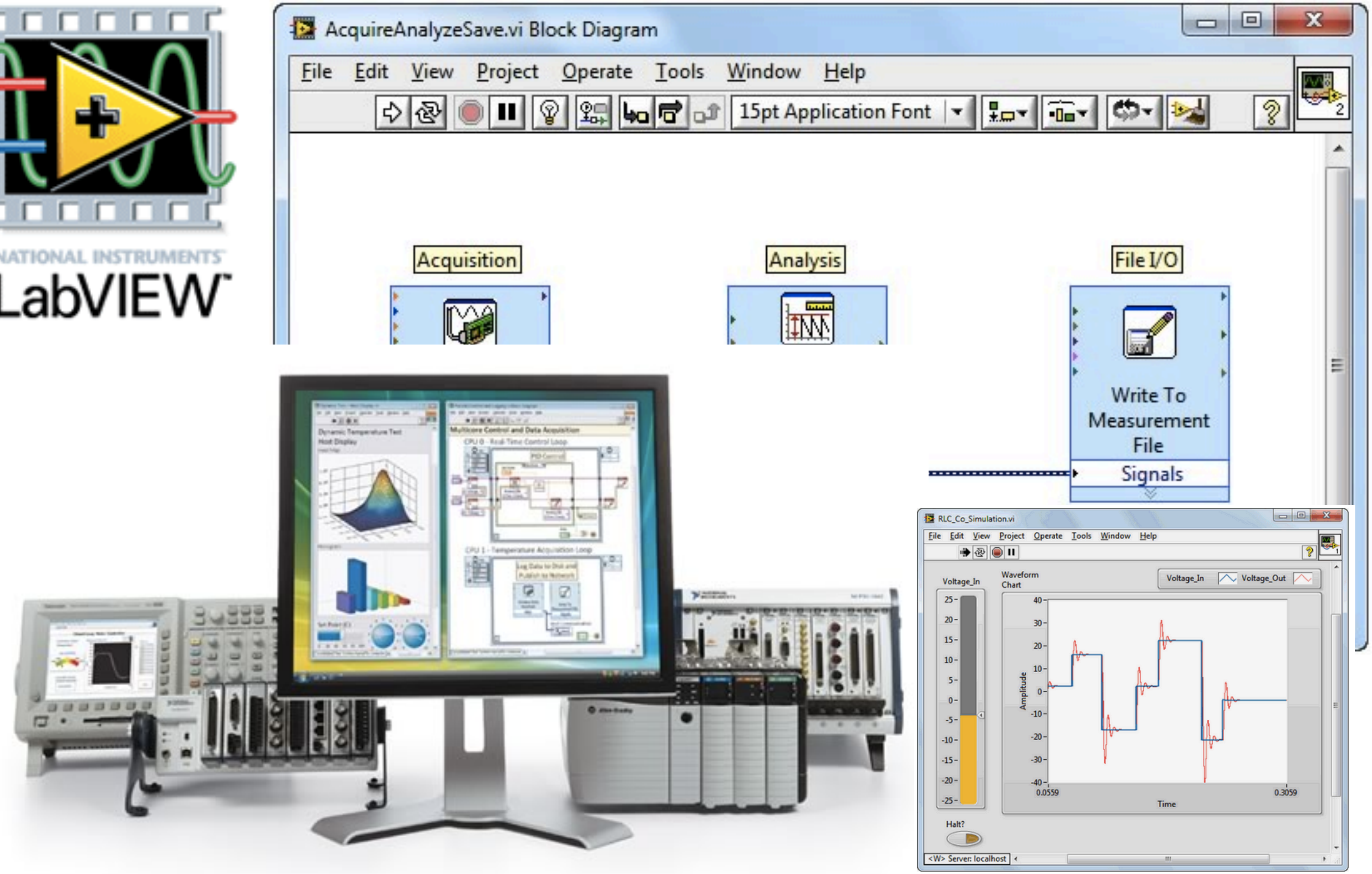
Galvanometer as a DC Multimeter



http://www.wolfram.com

LabVIEW

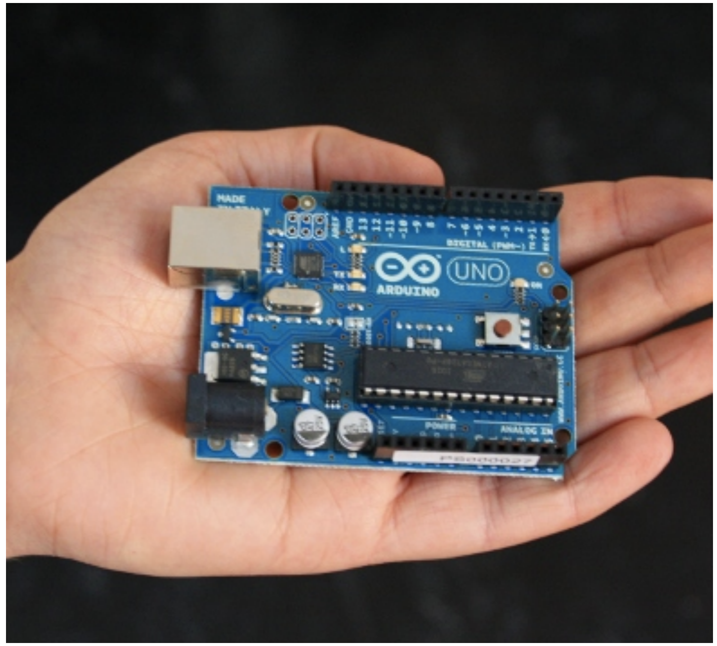
NATIONAL INSTRUMENTS
LabVIEW

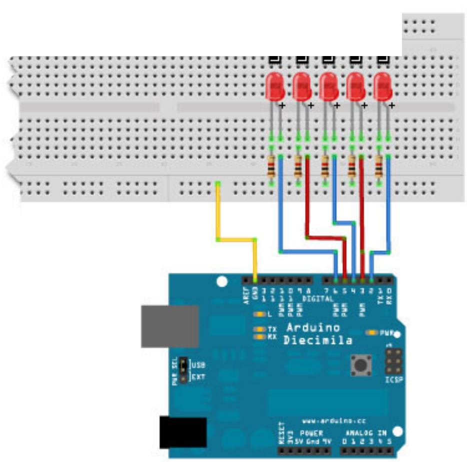


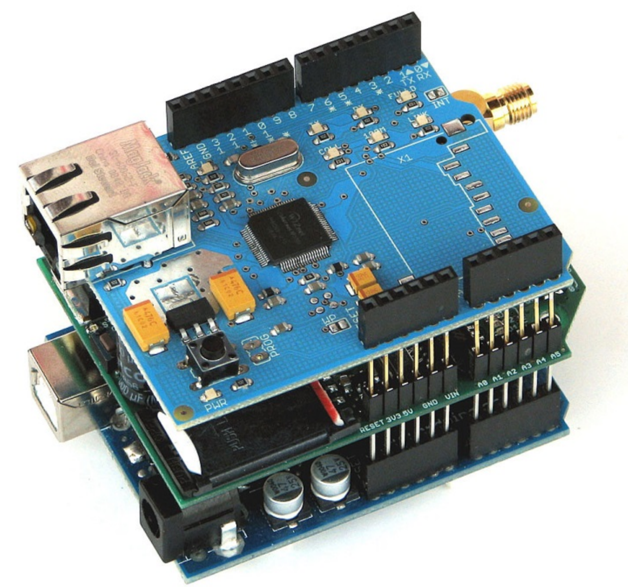
http://www.ni.com

Arduino

INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

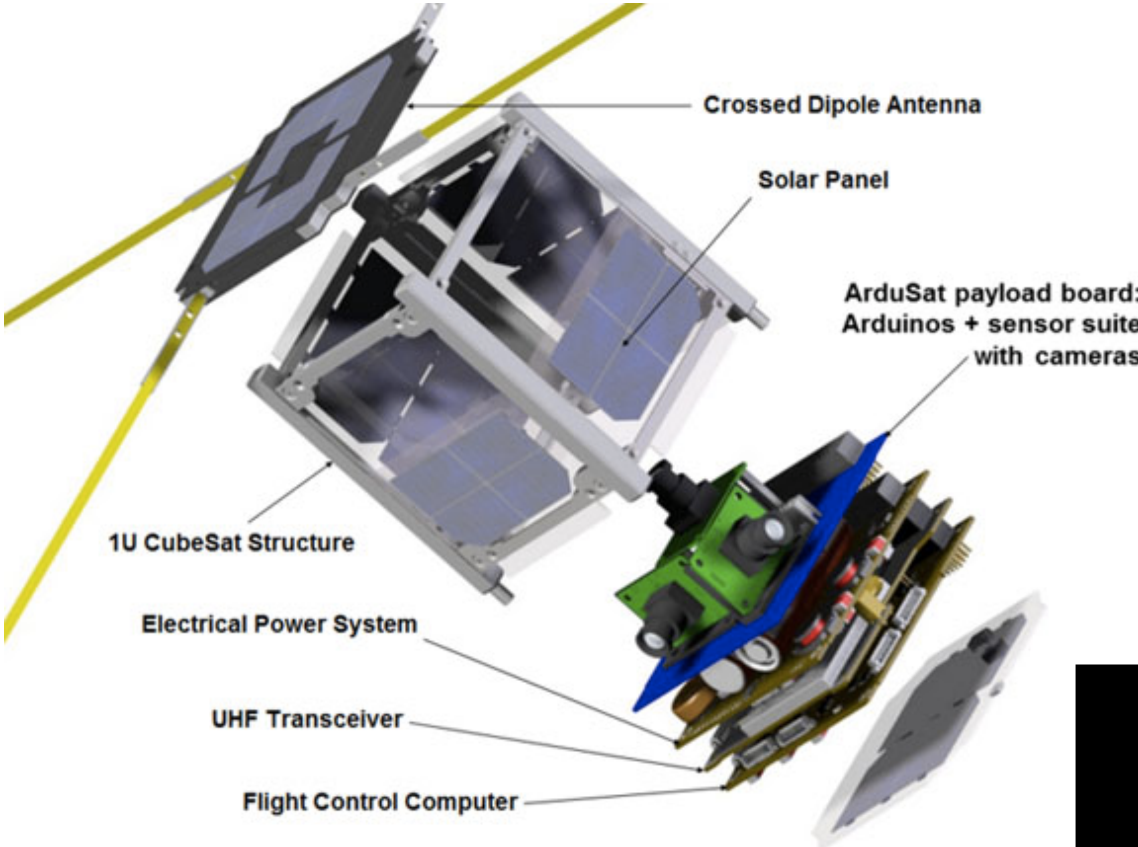


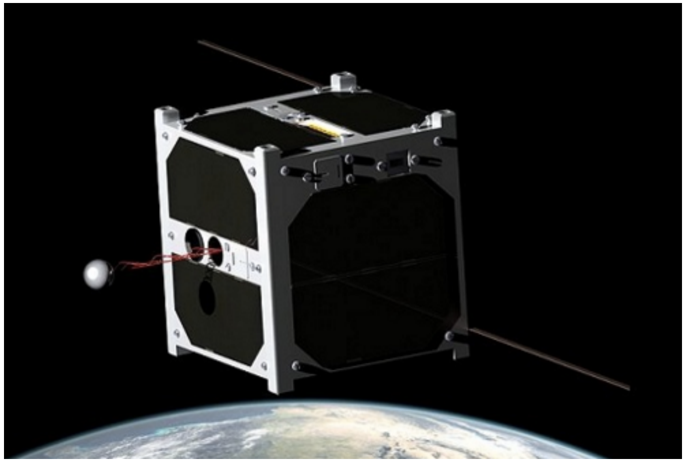




http://www.arduino.cc

Arduino





https://www.ardusat.com/

Agenda para esta aula

Parte 1 (19h até 20h):

- Esposição inicial sobre introdução à eletrônica de potência.

Intervalo

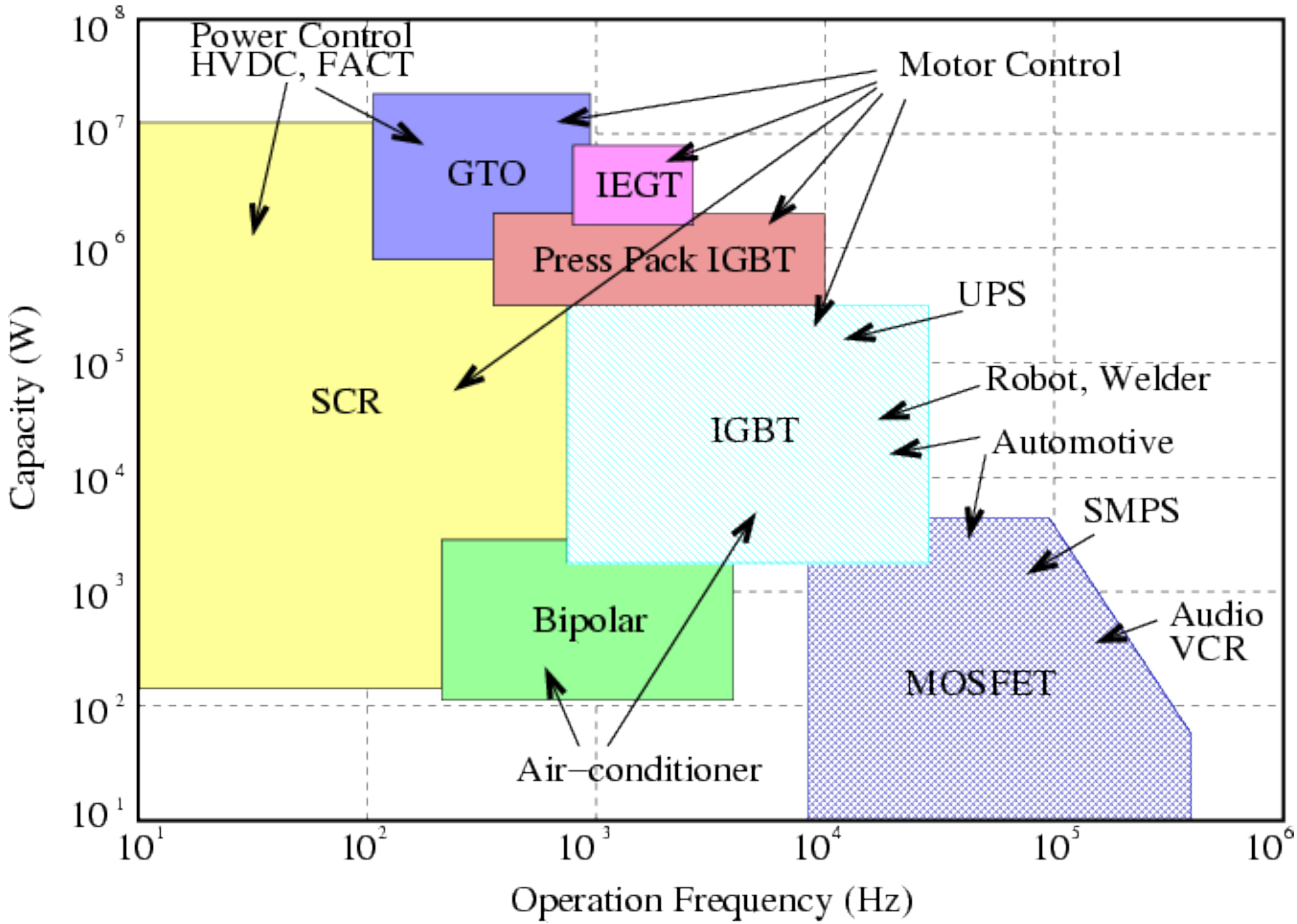
Parte 2 (20h20min até 22h):

- Ferramentas de projeto em eletrônica de potência;
- Tecnologias de componentes eletrônicos.

Parte 3 (22h até 22h20min):

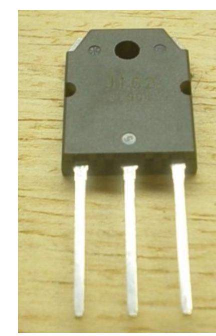
- Acesso ao moodle e trabalho individual.

Semicondutores de potência

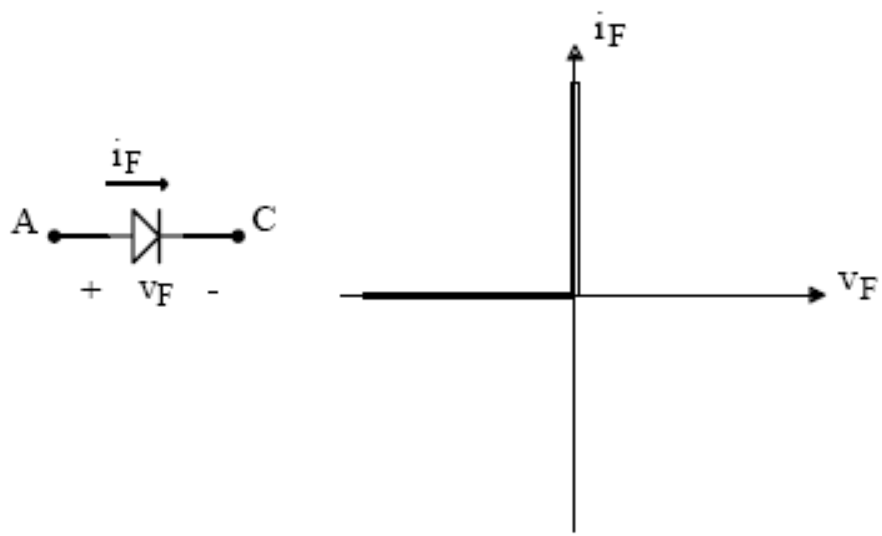


http://www.iue.tuwien.ac.at.

Semicondutores de potência

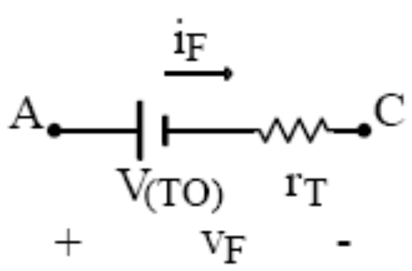


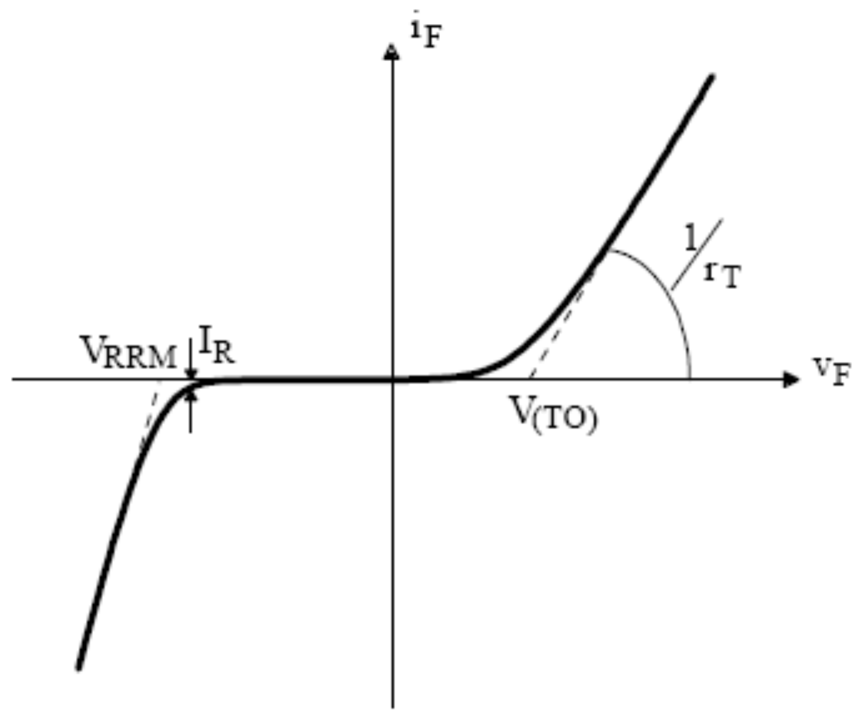
Diodo ideal e real



Exemplo: Diodo SKN20/08

- V_{RRM} = 800 V;
- $V_{(TO)}$ = 0,85 V;
- r_T = 11 mΩ;
- I_{Dmed} = 20 A;
- I_R = 0,15 mA.

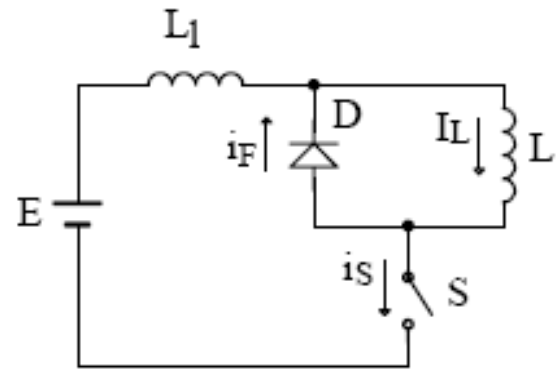




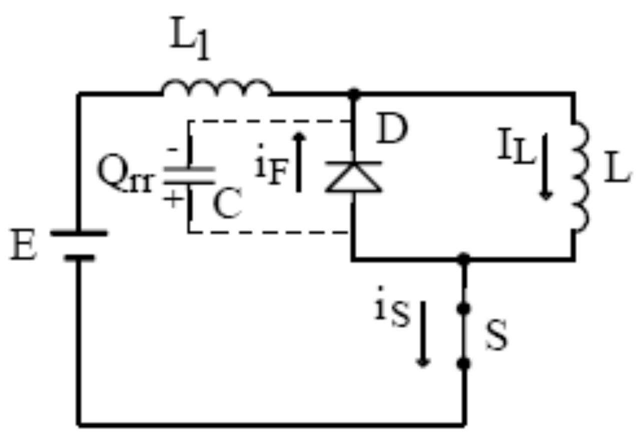
Característica estática

Diodo real - comutação

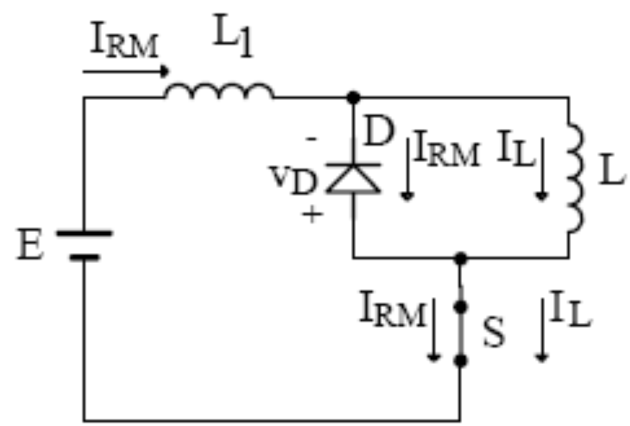
Bloqueio



Circuito para estudo da comutação



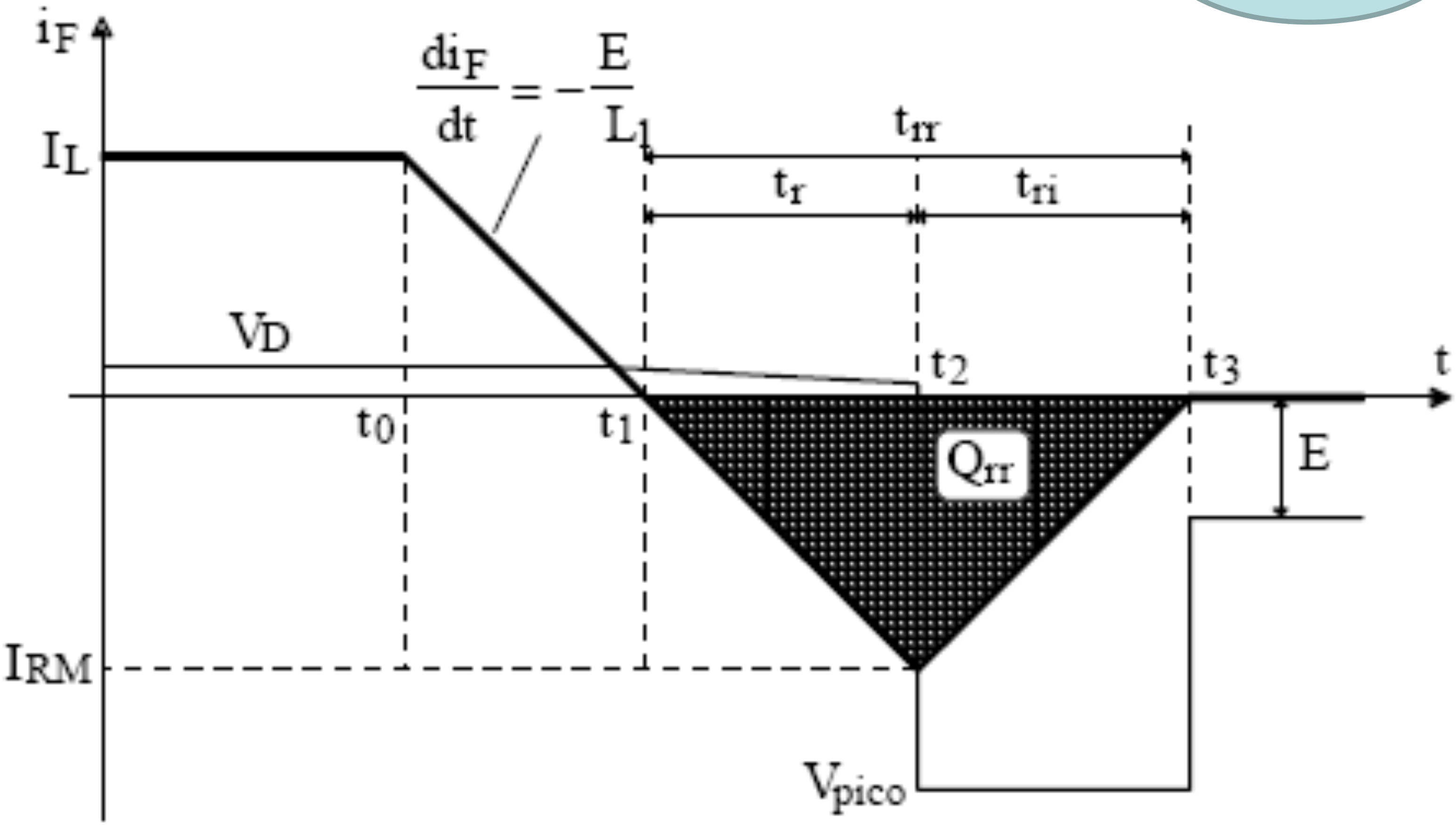
Primeira etapa de comutação



Segunda etapa de comutação

Diodo real - comutação

Bloqueio



Diodo real - comutação

Bloqueio

No bloqueio do diodo (comutação crítica):

$$\frac{di_F}{dt} = -\frac{E}{L_1}$$

Derivada da corrente depende da indutância

$$t_{rr} \cong \sqrt{\left(\frac{3Q_{rr}}{di_F/dt}\right)}$$

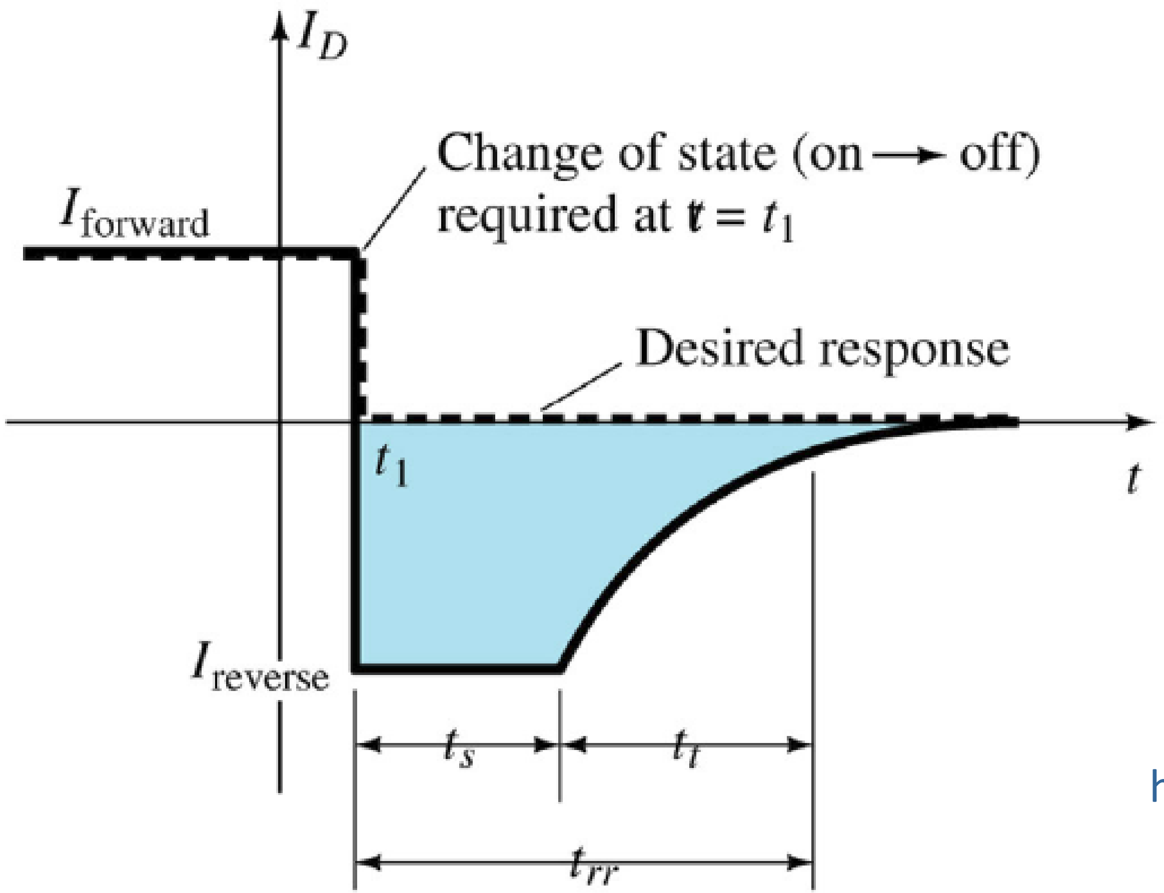
Tempo de recuperação reversa

$$I_{RM} \cong \sqrt{\left(\frac{4}{3}Q_{rr}\frac{di_F}{dt}\right)}$$

Corrente máxima devido a recuperação reversa

Diodo real - comutação

Diodos de carbeto de sílicio (silicon carbide):
Diminuem acentuadamente o fenômeno da **recuperação reversa**.



http://www.infineon.com
http://www.cree.com

Diodo real - comutação

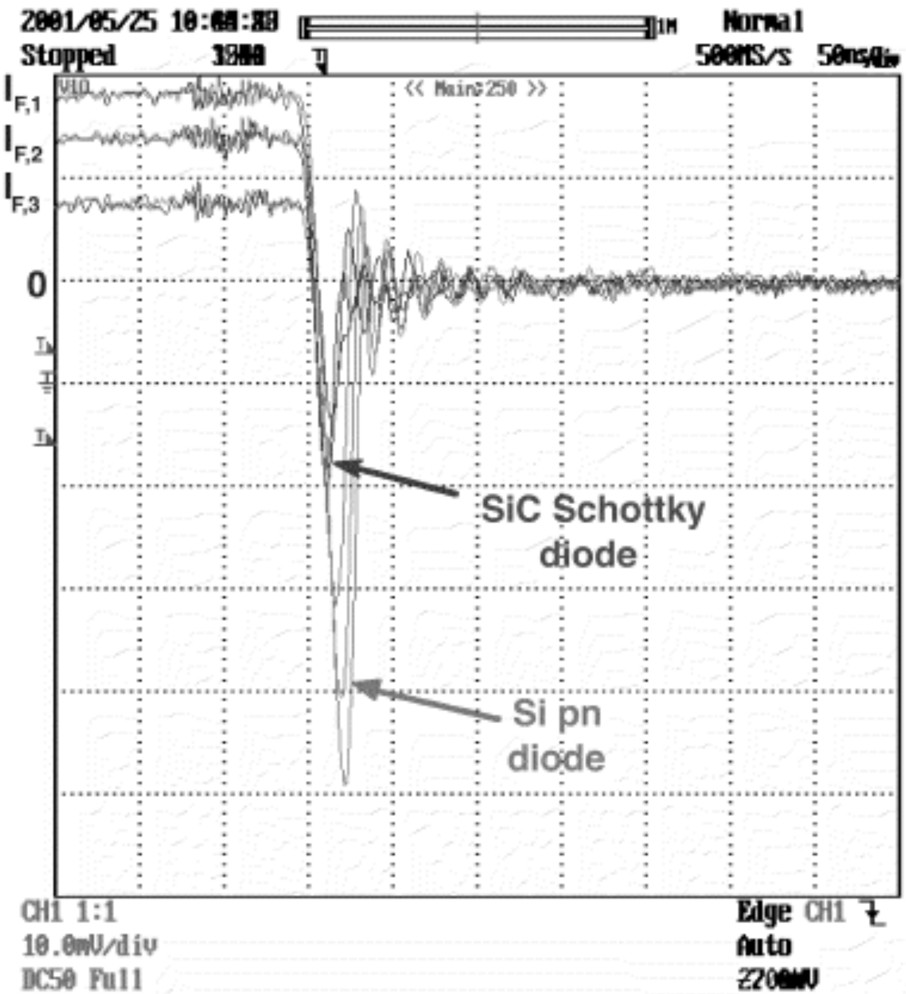


Fig. 5. Typical reverse recovery waveforms of the Si pn and SiC Schottky diode for three different forward currents (2 A/div.).

http://powerelec.ece.utk.edu/pubs/pels_letters_SiC_june_2003.pdf

Diodo real - comutação

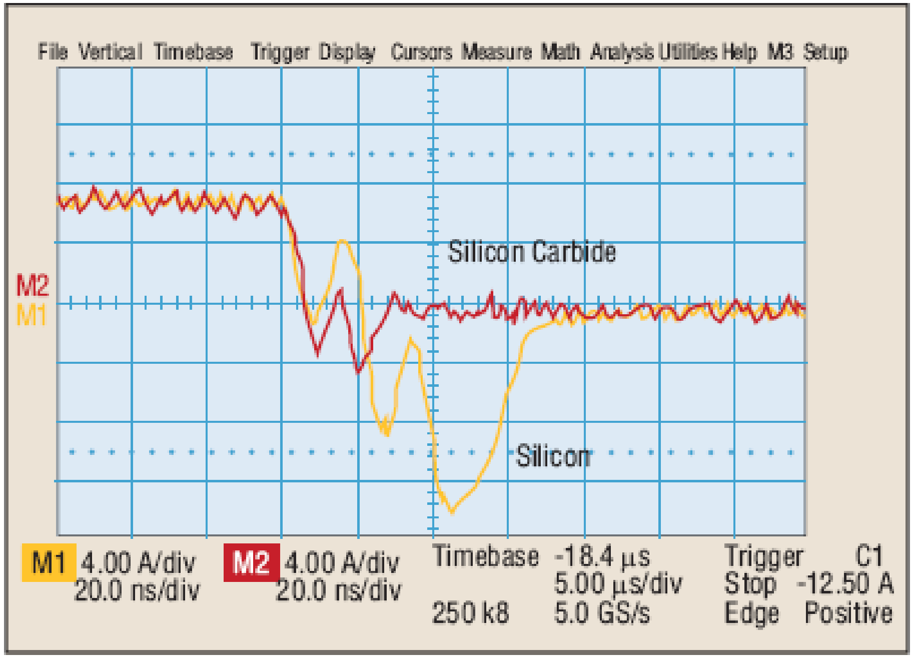


Fig. 4. *Low-line diode recovery currents in PFC front-end converter.*

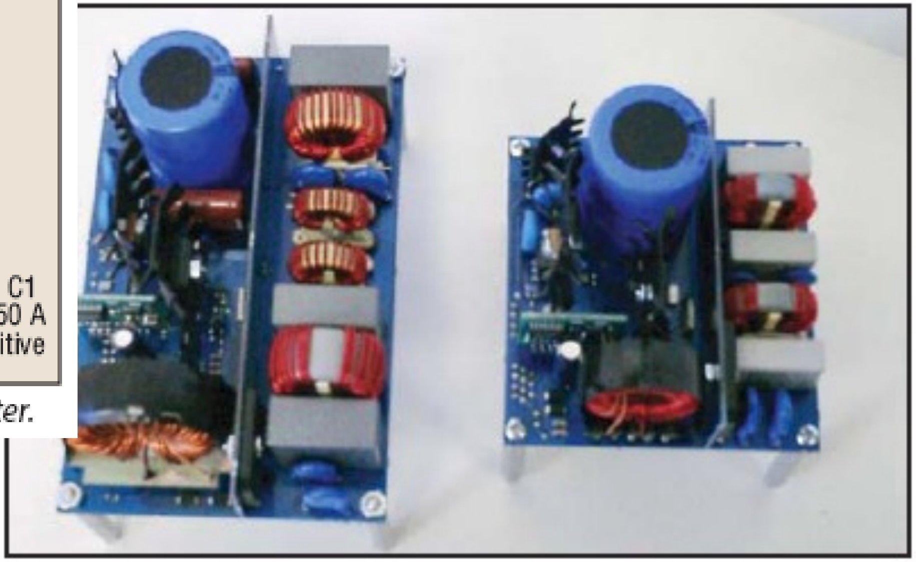


Fig. 8. *A size comparison of an 80-kHz PFC front-end built with Si rectifiers (left) and a 200-kHz PFC front-end with SiC rectifiers.*

http://www.cree.com/Products/pdf/Power_Article_1.pdf

Perdas nos diodos

Classificação das perdas:

1. Condução;

$$P = V_{(TO)} \cdot I_{Dmed} + r_T \cdot I_{Def}{}^2$$

2. Comutação:
   - Entrada em condução;

$$P_1 = 0,5\left(V_{FP} - V_F\right)I_o \cdot t_{rf} \cdot f$$

   - Bloqueio.

$$P_2 = Q_{rr} \cdot E \cdot f$$

Diodos

Tipos de diodos de potência:

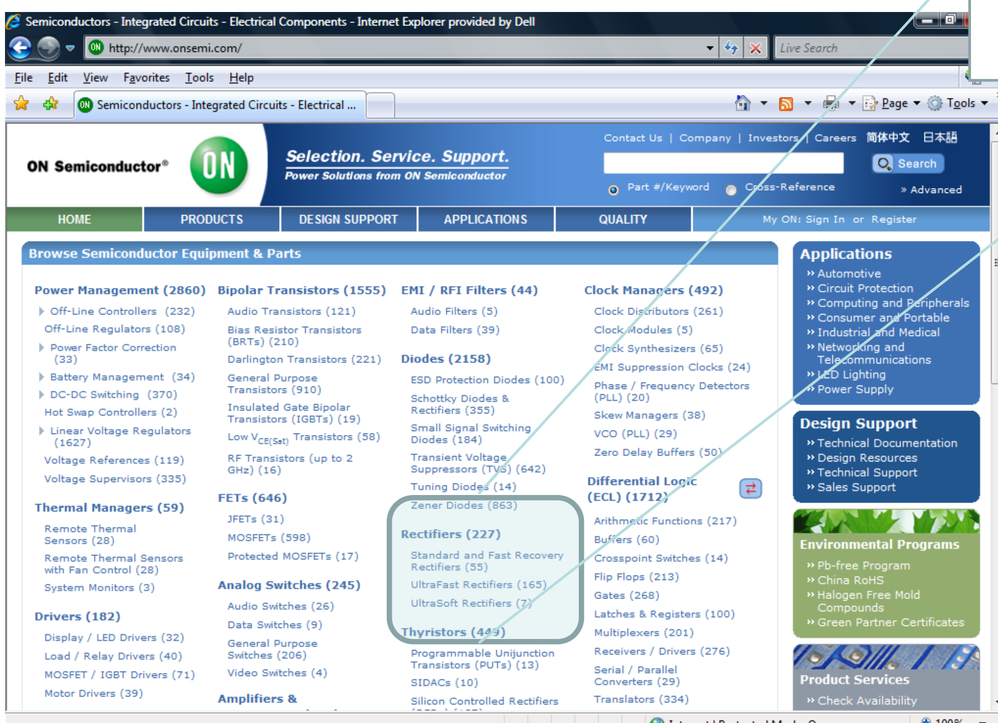
1. Standard and fast recovery;
2. Ultrafast rectifiers;
3. Ultrasoft rectifers;
4. Silicon carbide (zero recovery).

Rectifiers (227)

Standard and Fast Recovery Rectifiers (55)

UltraFast Rectifiers (165)

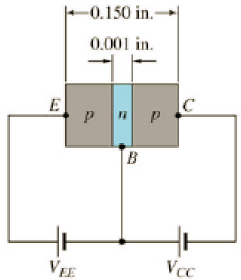
UltraSoft Rectifiers (7)



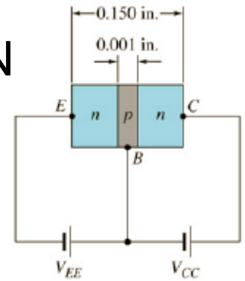
http://www.onsemi.com

BJT

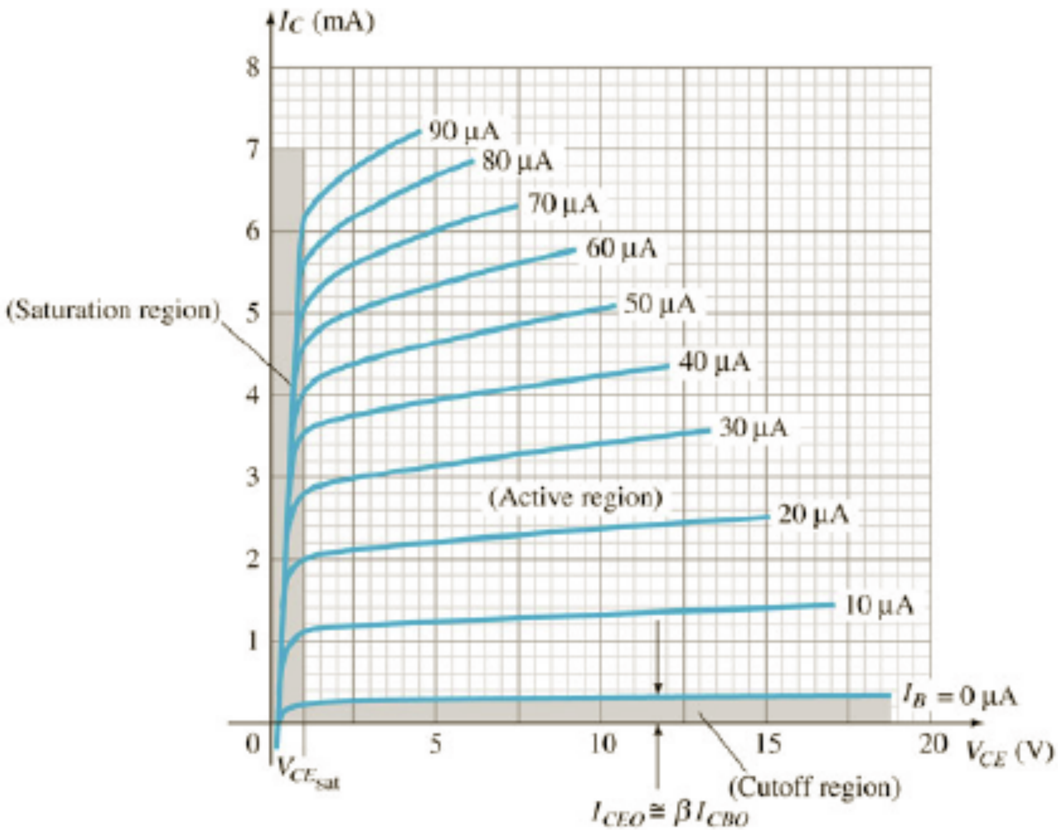
PNP

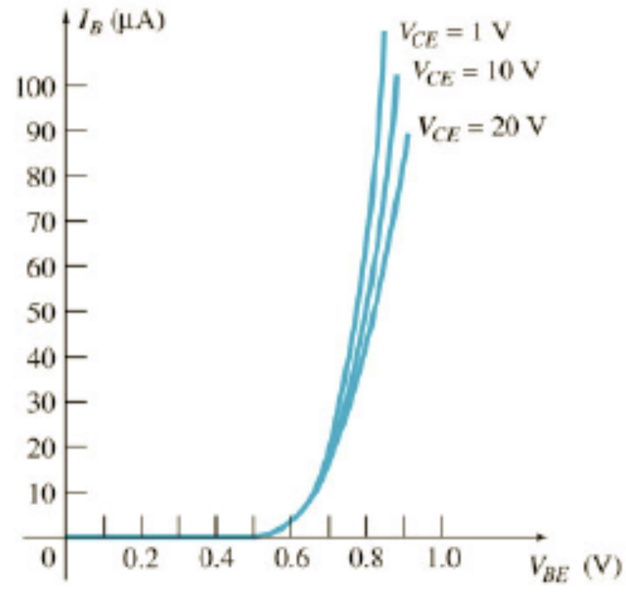


NPN



BJT – Transistor bipolar de junção





SiC BJT

INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

The SiC BJT: Most Efficient 1200 V Power Conversion Switch Ever Made

A growing assortment of power switch technologies are on the market and in development today, including several that leverage the features of silicon carbide. Most promising among these choices are SiC bipolar junction transistors (BJTs). They offer very fast switching speed; the industry's lowest conduction losses; easy high temperature operation; very good robustness; and ease of manufacturing. Working in conjunction with a properly designed gate driver, SiC BJTs also offer safe operation with high ruggedness and reliability.

SiC BJT vs Si IGBT

	V	I	V_{CE}	E_{ON}	E_{OFF}
Si IGBT	1200	40	3	2500	1800
SiC BJT	1200	40	1.6	1000	600
Improvement (lowered by)			47%	60%	67%

SiC BJT Features

Lowest Losses on the Market

- Lowest conduction losses (R_{ON} <2.2 mΩcm^2 @ RT)
- Very low switching losses
- Lowest total losses; including driver losses
- High gain; SiC BJT DC current gain >70

Fast Switching

- Approximately 20 ns for turn-on and turn-off
- Switching behavior is not temperature dependent
- No current tailing for SiC BJT

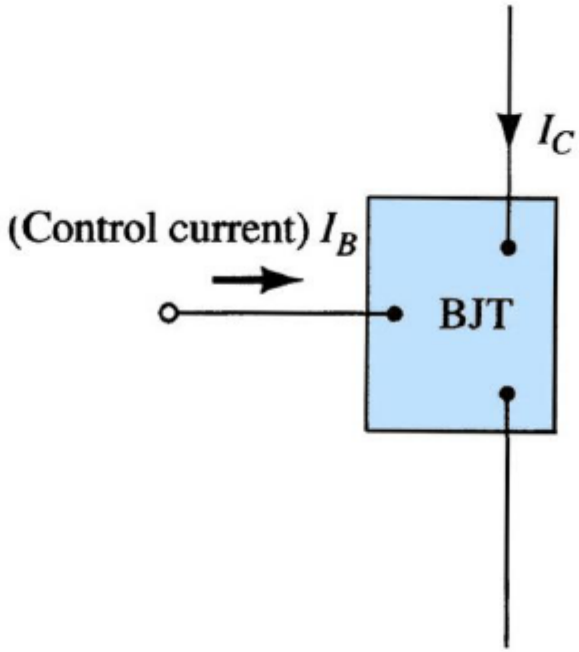
Robust and Reliable

- Normally OFF device
- Highest rated operating temperature; T_J = 175°C
- Positive temperature coefficient (R_{ON}); Easy paralleling
- No secondary breakdown for SiC BJT
- No SiO_2 gate oxide reliability issue
- Short circuit resistant
- Low leakage current

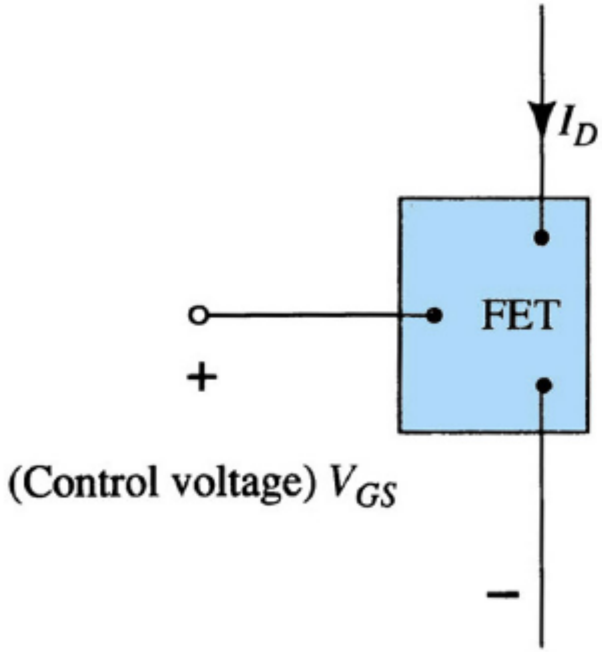
www·fairchildsemi·com

BJT x FET

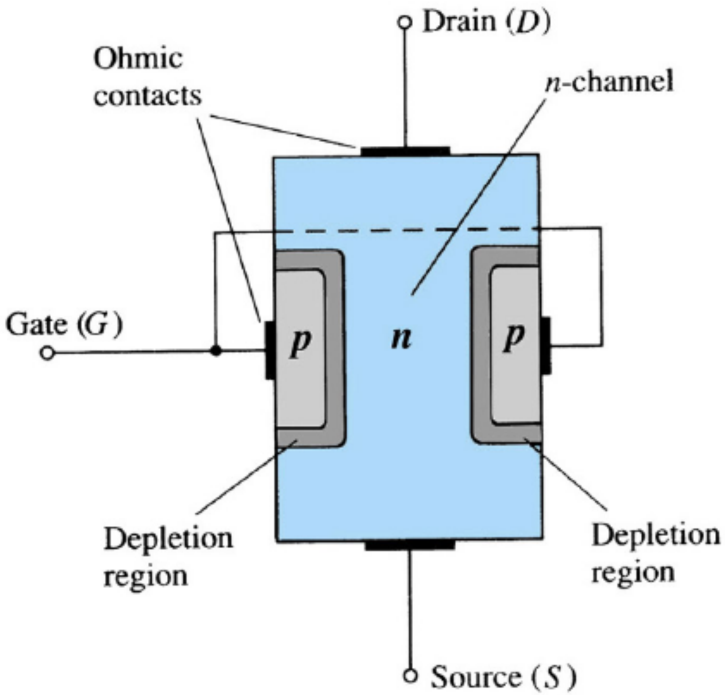
BJT – Transistor bipolar de junção



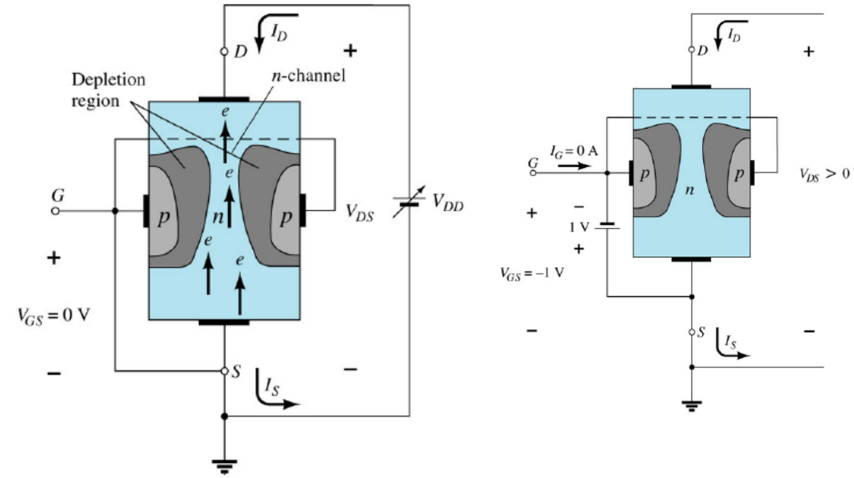
FET – Transistor de efeito de campo

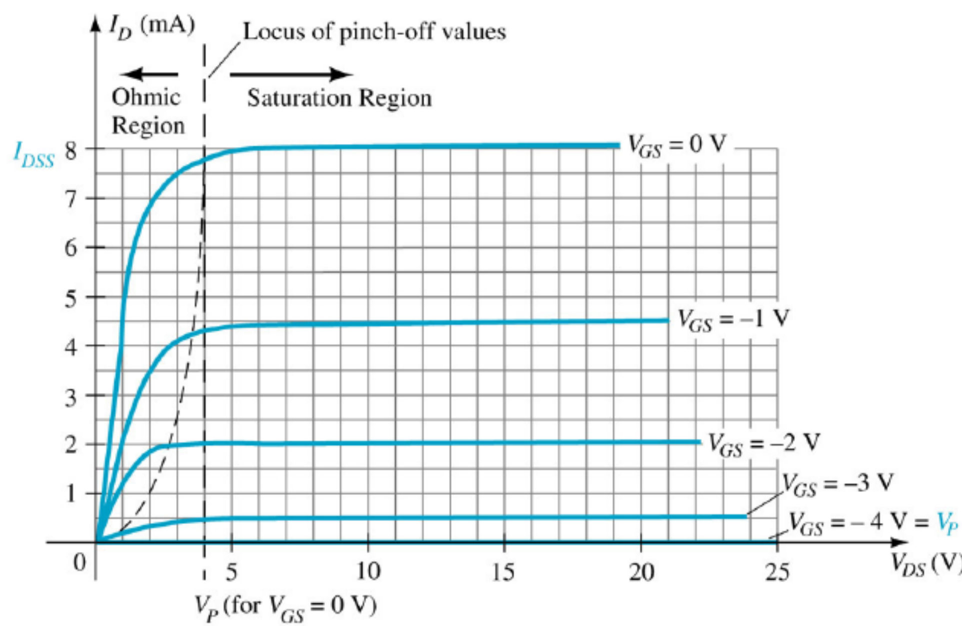


FET

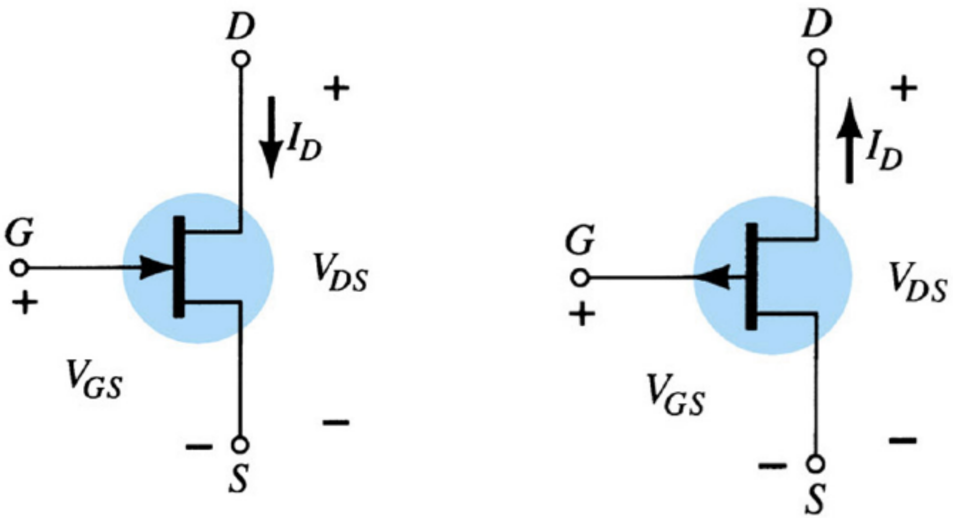


JFET: Operação básica.

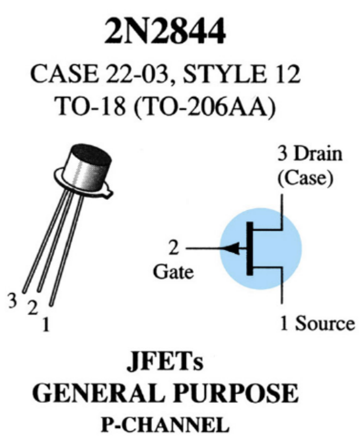


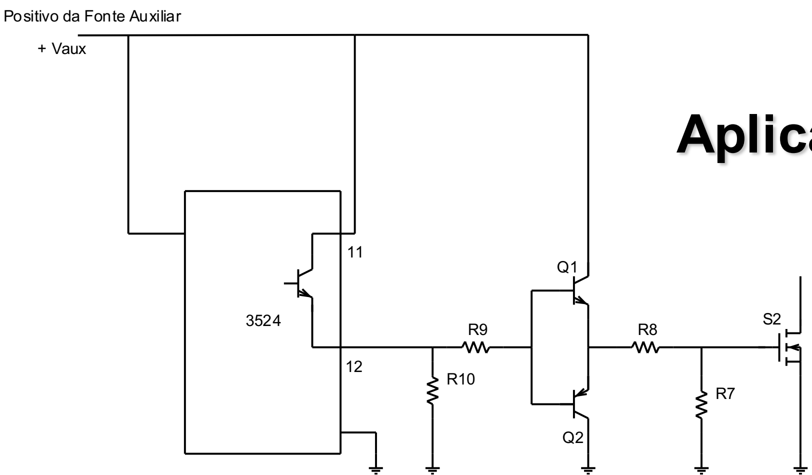


FET



JFET canal n e canal p

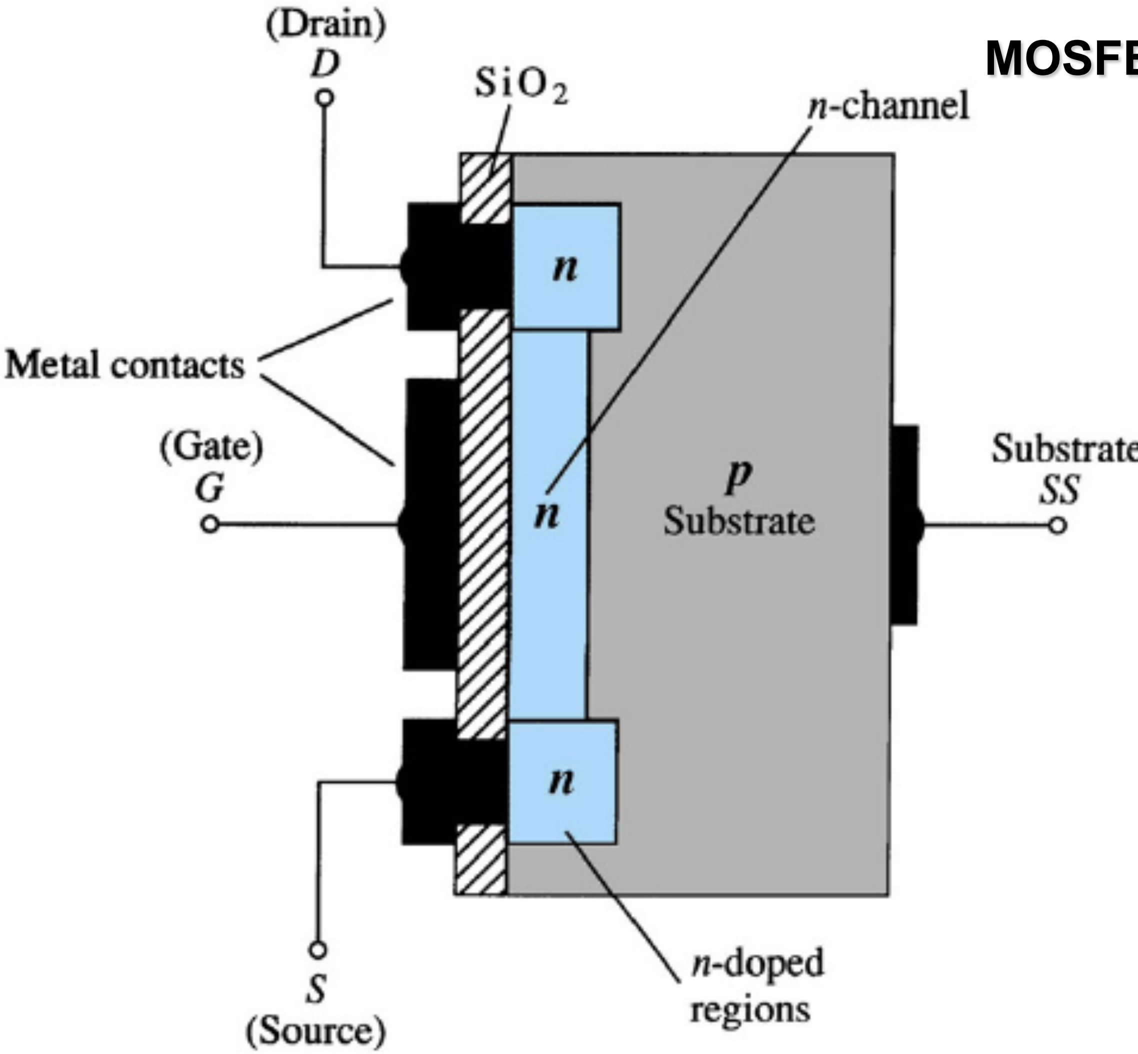




Aplicação do JFET

MOSFET

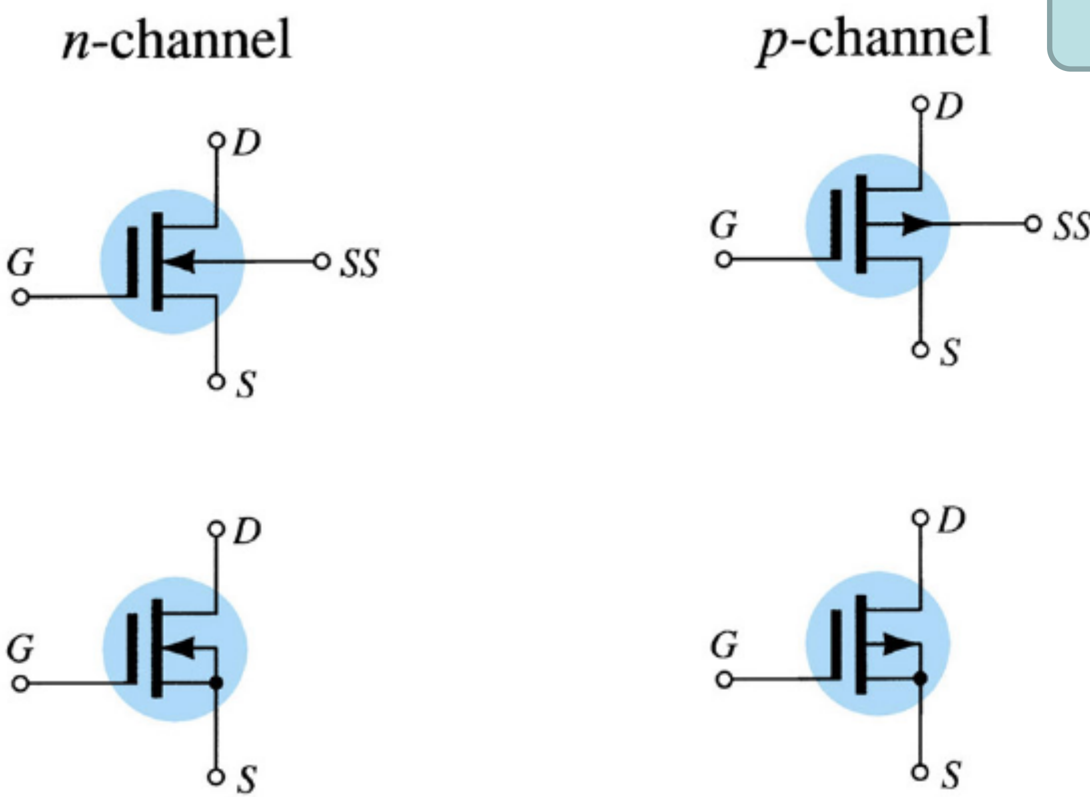
MOSFET tipo Depleção



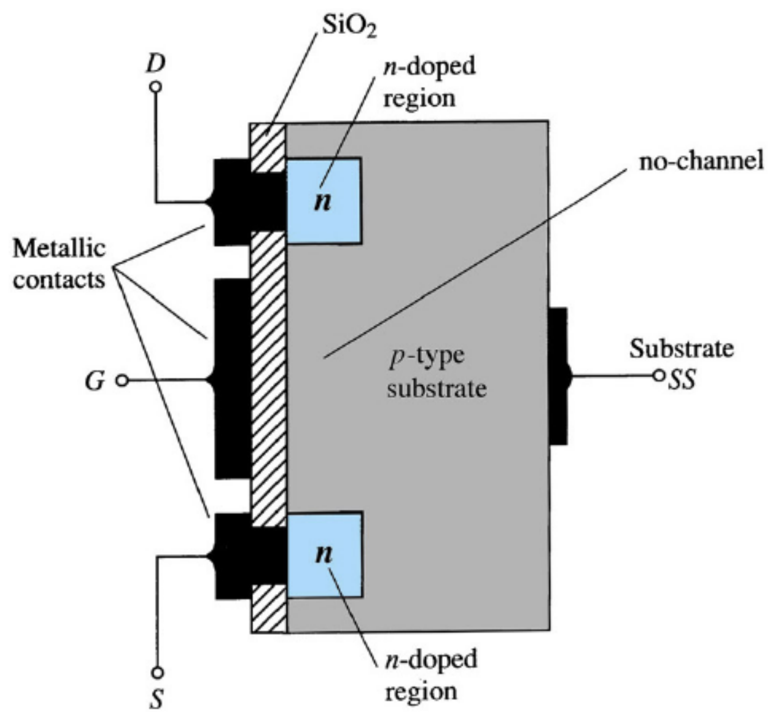
MOSFET – Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

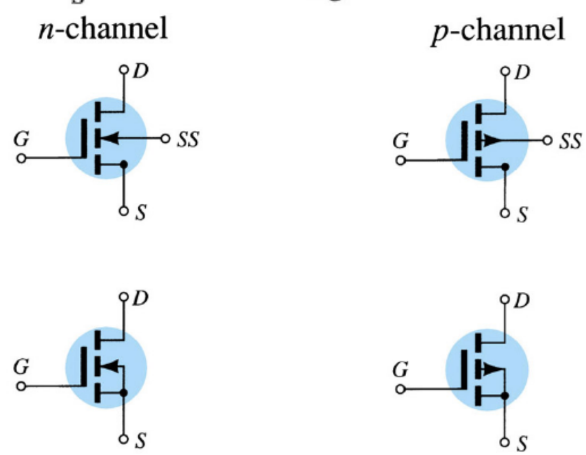
MOSFET

MOSFET tipo Depleção

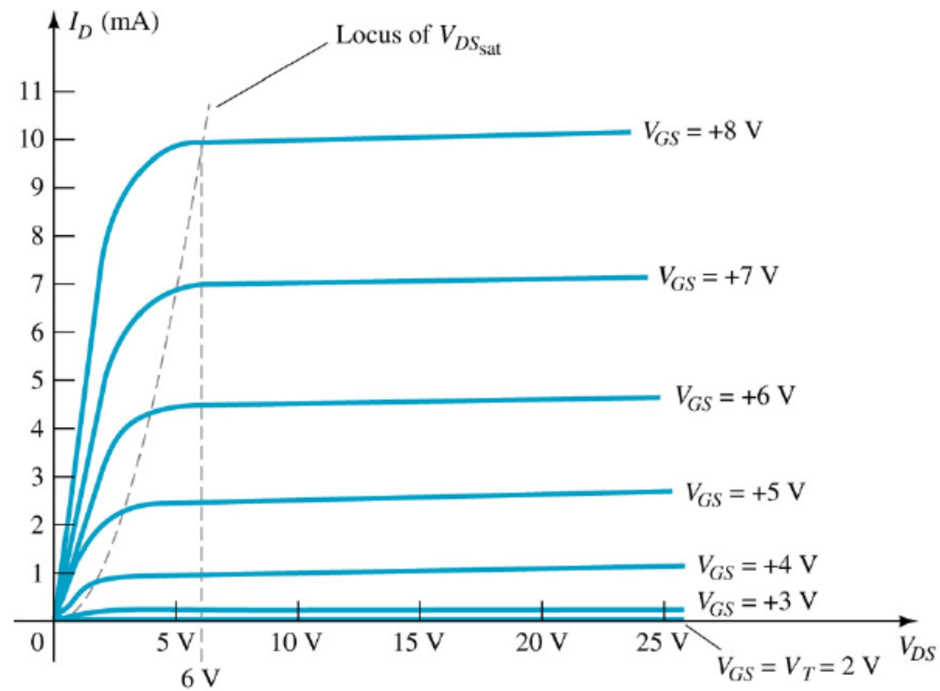


MOSFET



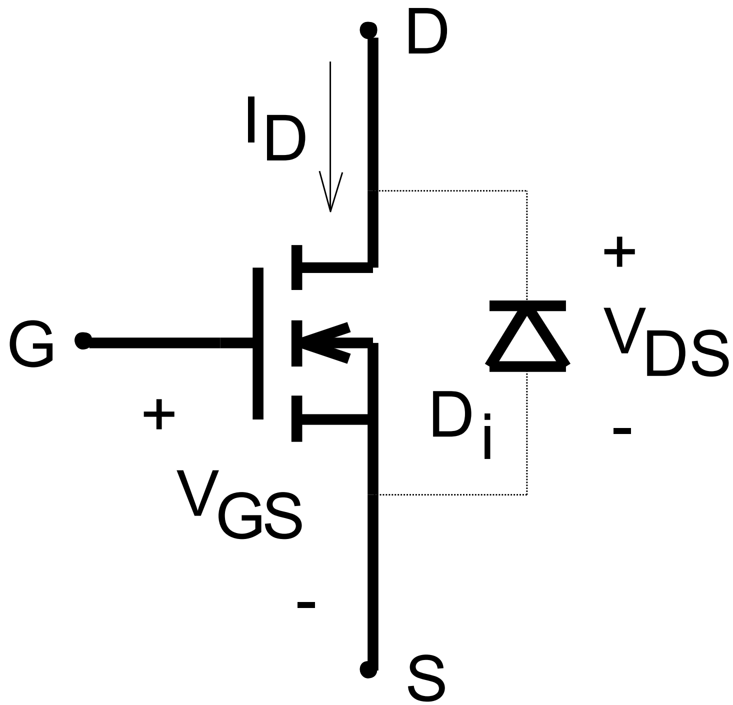


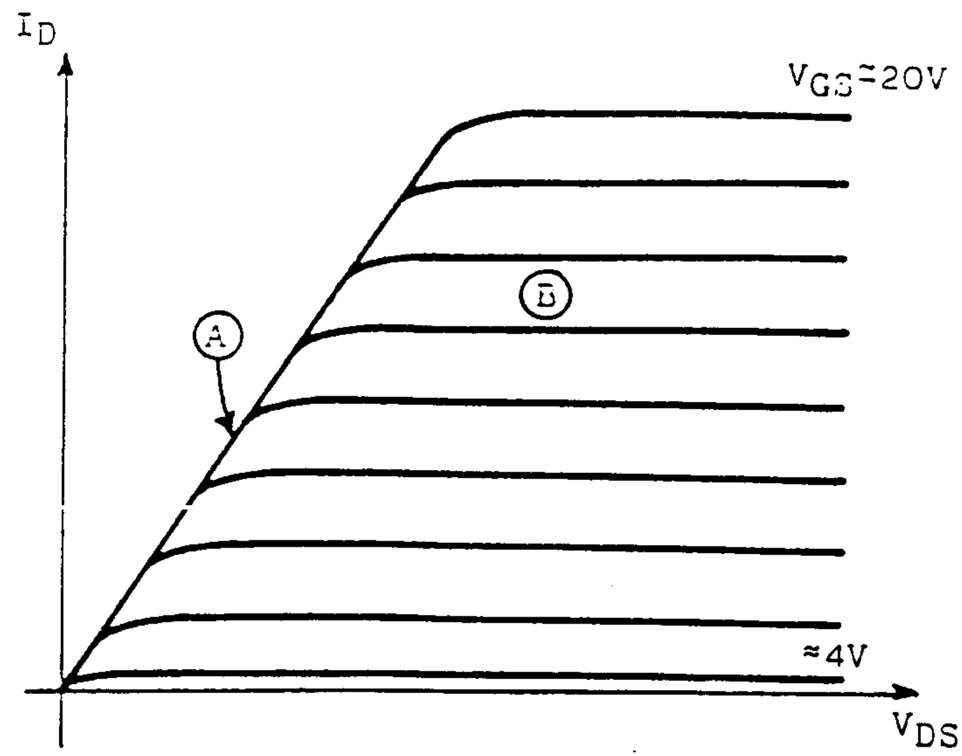
MOSFET tipo Intensificação



Canal n

MOSFET de potência





MOSFET de potência

INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

Classificação das perdas:

1. Condução;

$$P_{cond} = \frac{t_{on}}{T} \cdot r_{ds(on)} \cdot i_{d(on)}{}^2$$

2. Comutação:
   - Entrada em condução e bloqueio;

$$P_{com} = \frac{f}{2}\left(t_r + t_f\right) \cdot i_{d(on)} \cdot v_{ds(off)}$$

   - Onde:

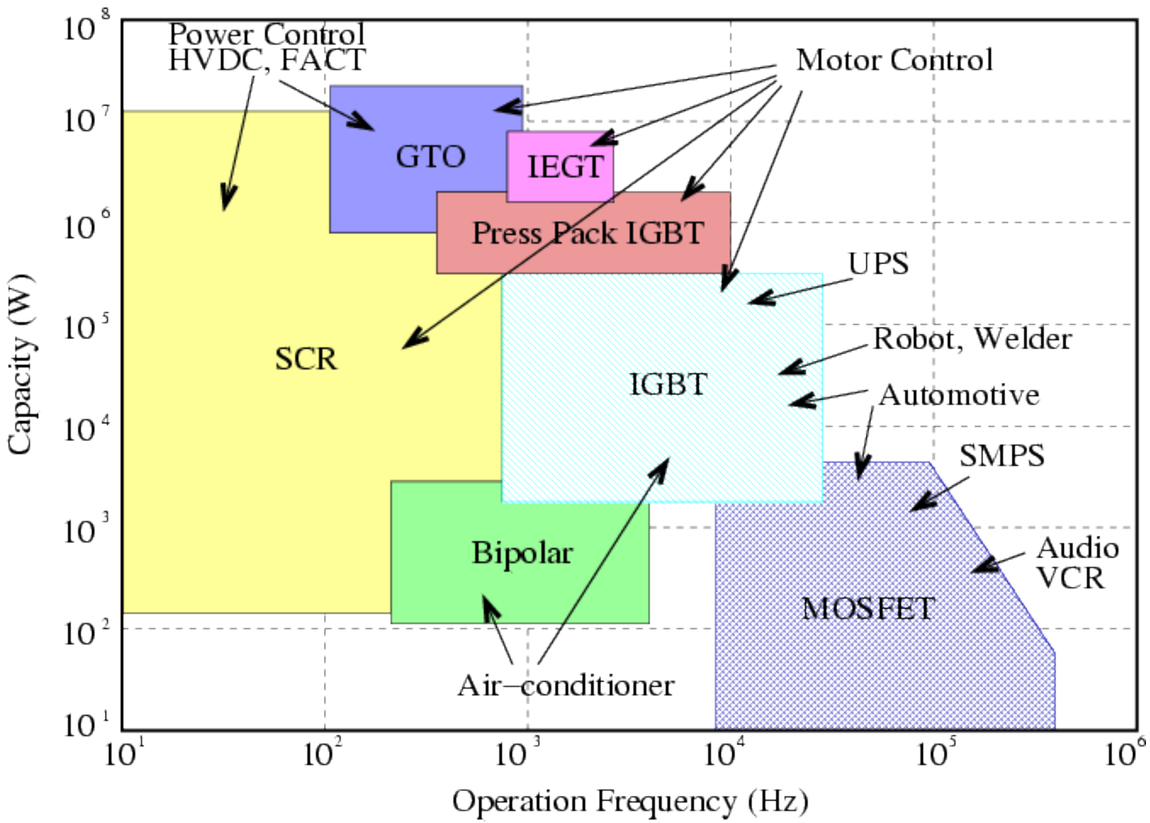
$$t_f \cong t_{on}$$

$$t_r \cong t_{off}$$

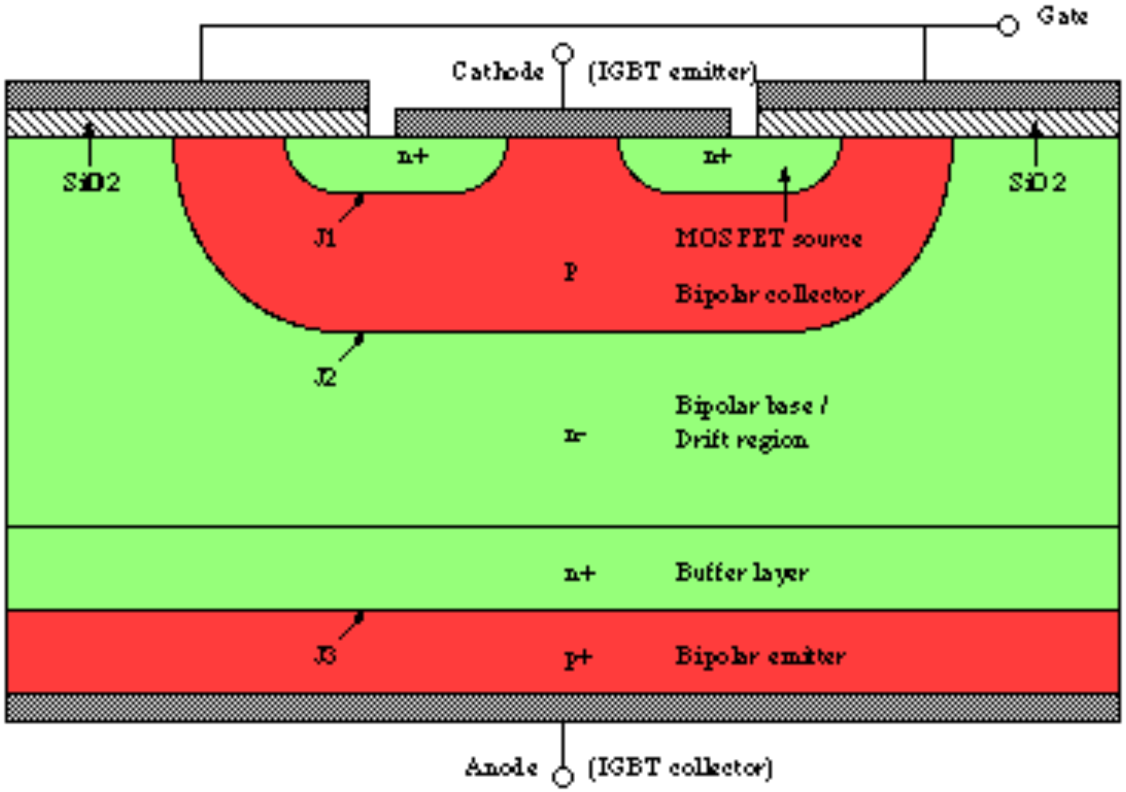
MOSFET de potência

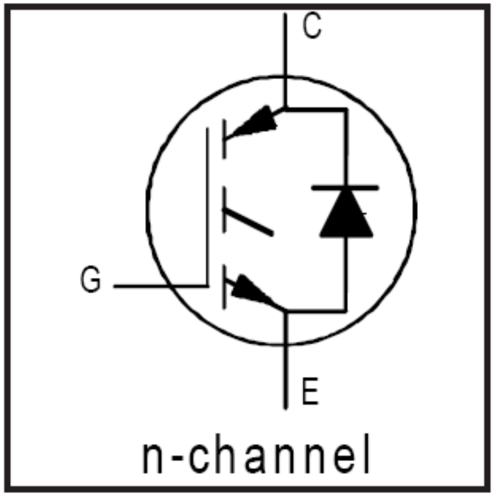
Quando usar MOSFET:

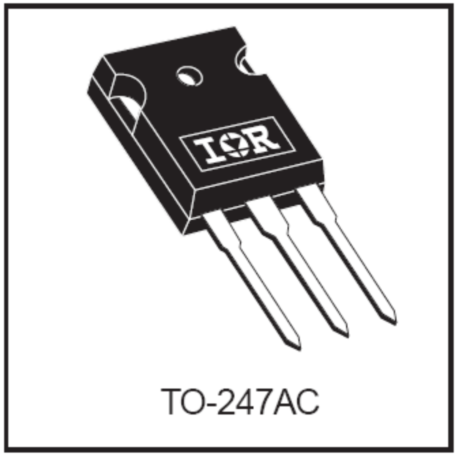
1. Freqüências altas (acima de 50 kHz);
2. Tensões muito baixas (< 500 V);
3. Potências baixas (< 1 kW).



IGBT







Características de BJT e MOSFET

IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor

IGBT

Classificação das perdas:

1. Condução;

0

$$P_{cond} = \left(i_C \cdot V_{CEsat} + i_B \cdot V_{BEsat}\right) \cdot t_{on} \cdot f$$

2. Comutação:
   - Entrada em condução e bloqueio;

$$P_{com} = \frac{1}{2}\left(t_r + t_f\right) \cdot I \cdot E \cdot f$$

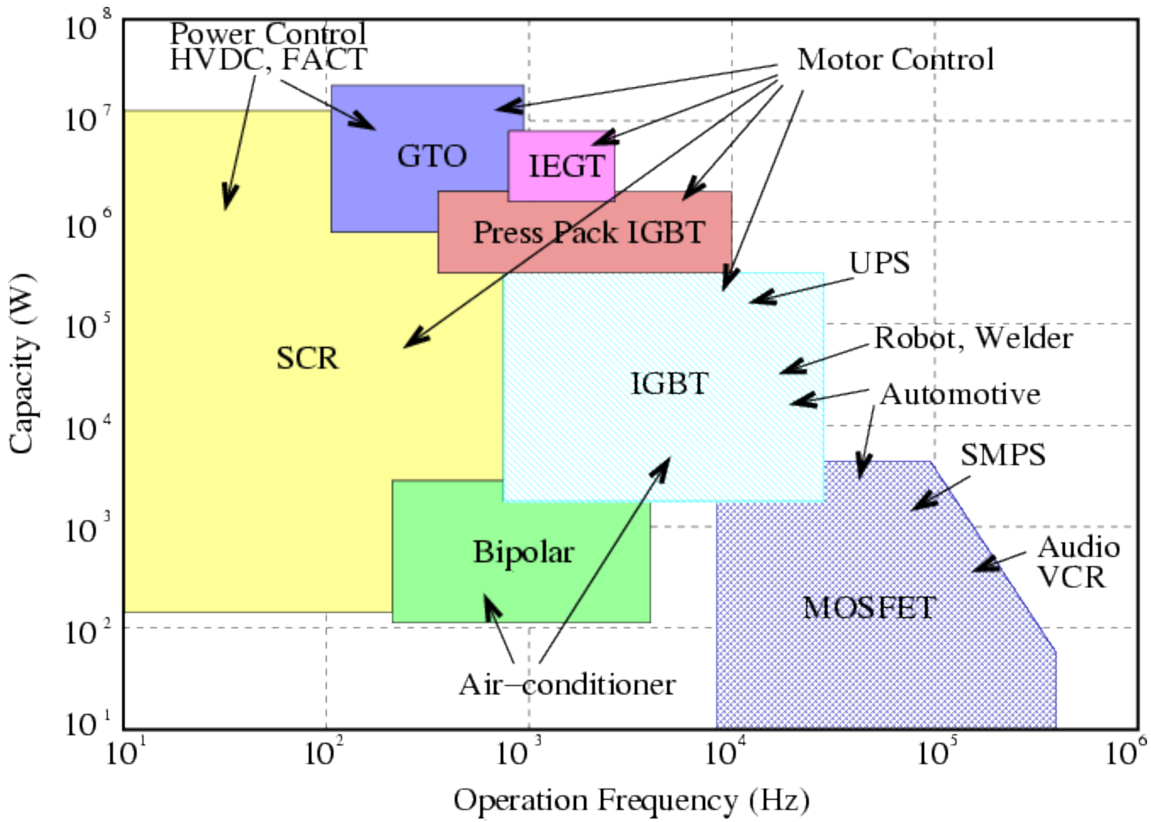
Detalhamento do cálculo de perdas

IGBT

Quando usar IGBT:

1. Frequências baixas (menor que 50 kHz);
2. Tensões altas (> 500 V);
3. Potências altas (> 1 kW).

Part	Family	Package	Circuit	Switching Speed
IRG4PH30K	IGBT Discretes	TO-247AC	Discrete	ULTRAFAST 4-20 kHz
IRG4PC20U	IGBT Discretes	TO-247AC	Discrete	ULTRAFAST 8-60 kHz
IRG4PC30S	IGBT Discretes	TO-247AC	Discrete	DC-1 kHz (STANDARD)
IRG4PC60U	IGBT Discretes	TO-247AC	Discrete	ULTRAFAST 8-60 kHz
IRG4BC30W	IGBT Discretes	TO-220AB	Discrete	WARP 60-150 kHz
IRGB30B60K	IGBT Discretes	TO-220AB	Discrete	ULTRAFAST 10-30 kHz
IRGB8B60K	IGBT Discretes	TO-220AB	Discrete	ULTRAFAST 10-30 kHz
IRGS6B60K	IGBT Discretes	D2-Pak	Discrete	ULTRAFAST 10-30 kHz
IRGS14C40L	IGBT Discretes	D2-Pak	Discrete	Low-Vceon
IRGP4050	IGBT Discretes	TO-247AC	Discrete	Low-Vceon

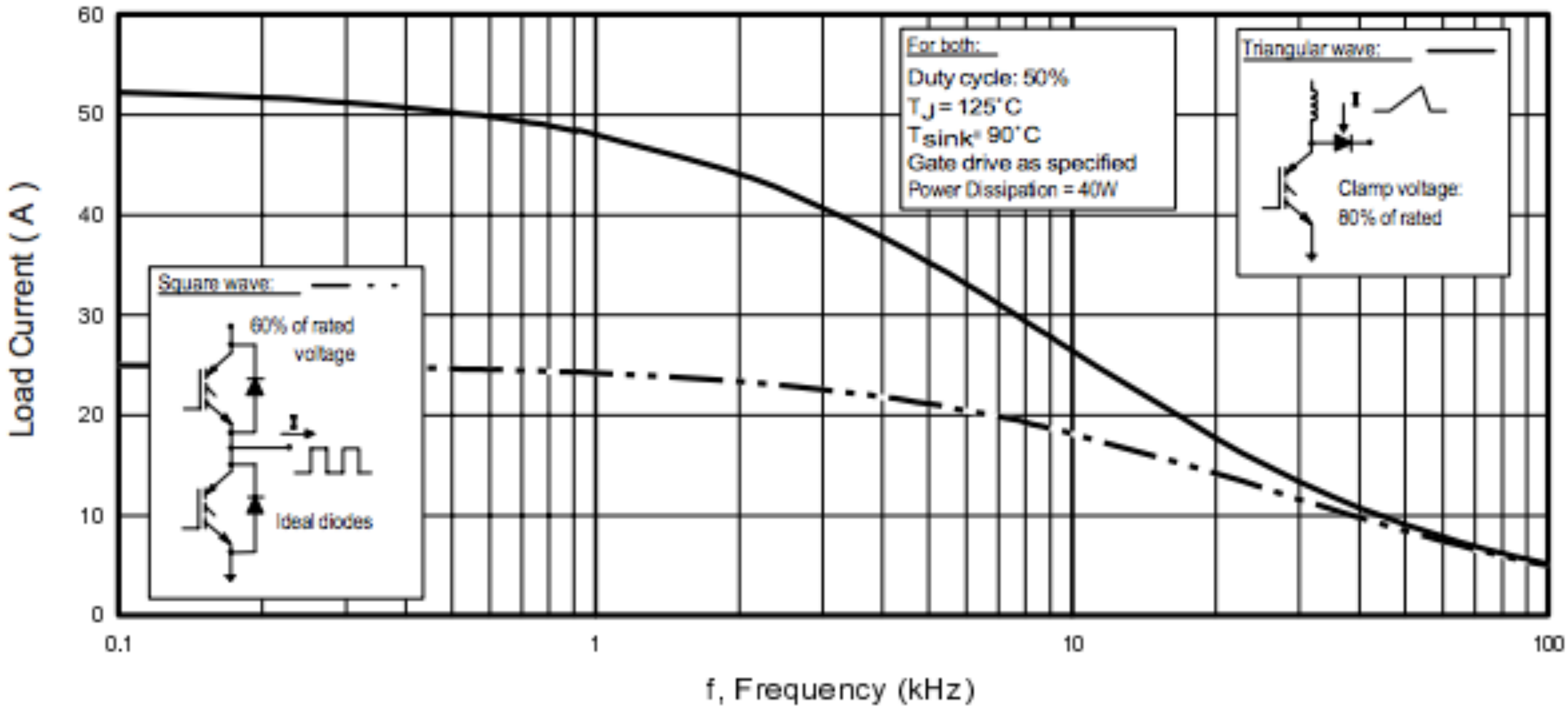


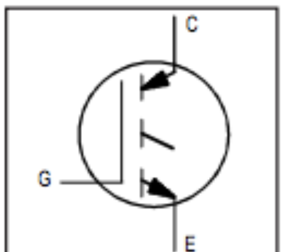
IGBT

Package/Switching	Frequency	Voltage
IGBT SINGLE / Soft	Ultrafast <30kHz	300V
		600V
		1200V
IGBT SINGLE / Hard	Standard <1kHz	600V
		1200V
	Fast 1-8kHz	600V
	Ultra Fast 8-30kHz	300V
		600V
		1200V
	Warp 30-150kHz	600V
		900V
IGBT Co-Pack / Soft	Ultrafast <30kHz	1200V
IGBT Co-Pack / Hard	Standard <1kHz	600V
	Fast 1-8kHz	600V
	Ultra Fast 8-30kHz	300V
		600V
		1200V
	Warp 30-150kHz	600V
		900V

www·irf·com

IRG4PF50W

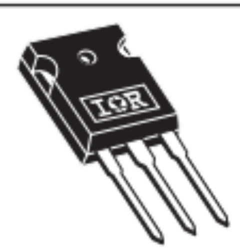




V_{CES} = 900V

$V_{CE(on)\ typ.}$ = 2.25V

@V_{GE} = 15V, I_C = 28A



TO-247AC

www·irf·com

IGBT

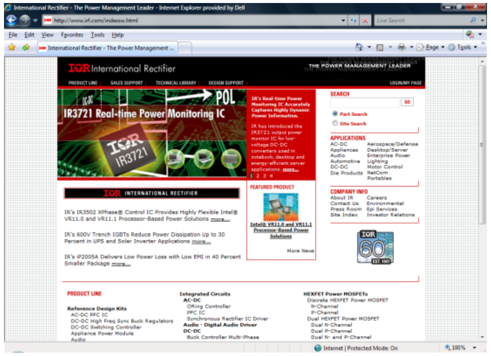
Encapsulamentos:

D-PAK
TO-252AA

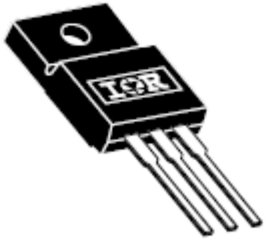
TO-220AB
IRGB6B60K

D^2Pak
IRGS6B60K

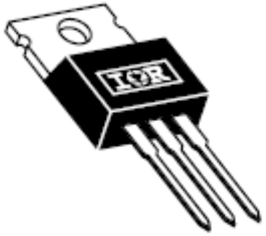
TO-262
IRGSL6B60K



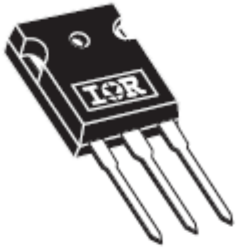
www·irf·com



TO-220 FULLPAK

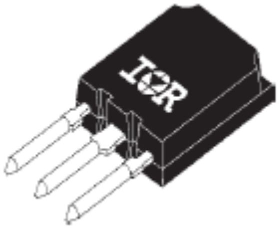


TO-220AB



TO-247AC

TO-247AC



SUPER - 247

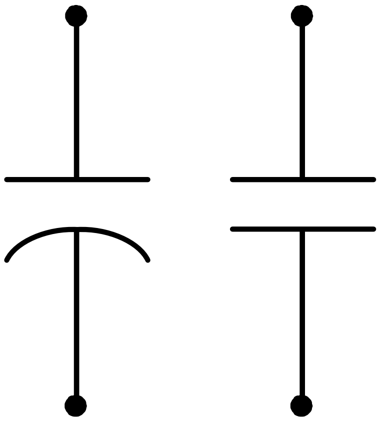
BJT x MOSFET x IGBT

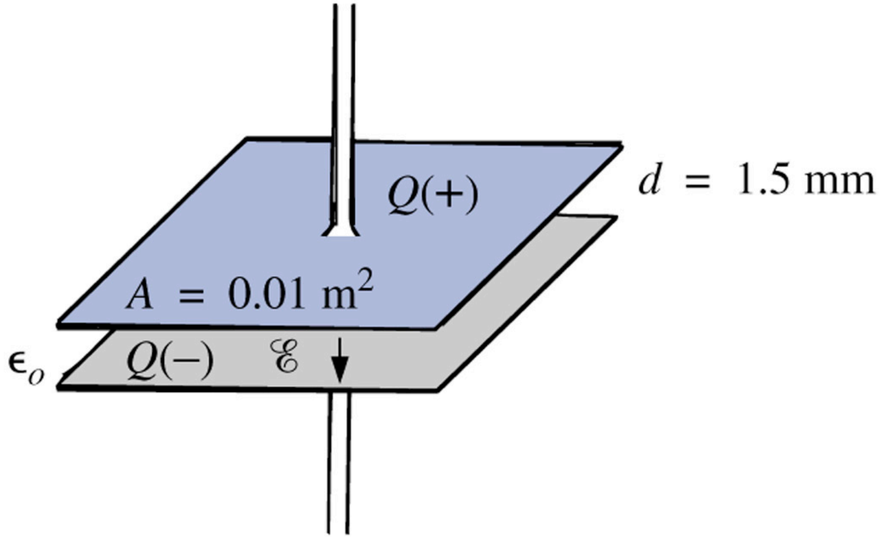
	MOSFET	IGBT	BJT
Tipo de comando	Tensão	Tensão	Corrente
Potência do comando	Mínima	Mínima	Grande
Complexidade do comando	Simples	Simples	Média
Densidade de corrente	Elevada em baixas tensões e Baixa em altas tensões	Muito elevada	Média
Perdas de comutação	Muito baixa	Baixa para Média	Média para Alta

Capacitores

Capacitância depende de:

- Dielétrico (permissividade);
- Área das placas;
- Distância entre as placas.





Capacitores

Modelo equivalente do capacitor

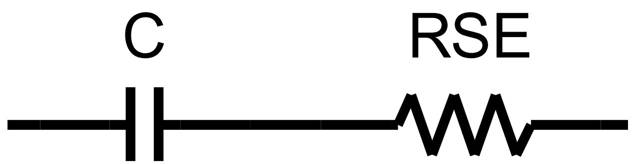
Onde:

- C = Capacitância;
- RSE = Resistência série equivalente;
- LSE = Indutância série equivalente.

Perdas devido à RSE:

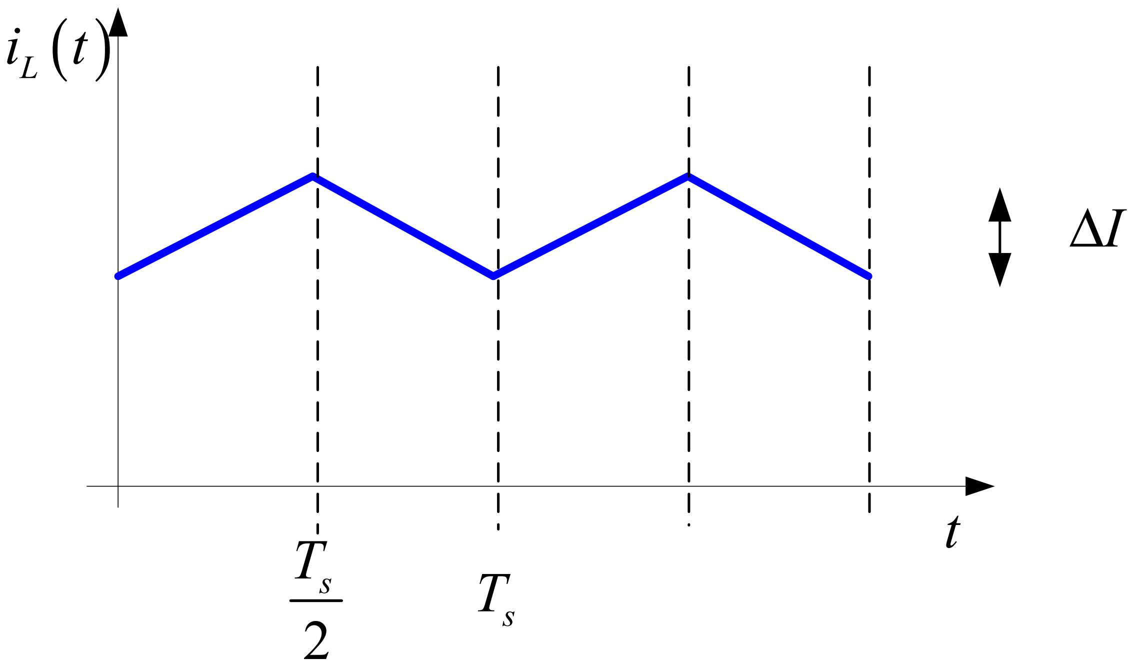
$$P = RSE \cdot I_{ef}^{2}$$

Capacitores



Ondulação da tensão:

$$\Delta V = RSE \cdot \Delta I$$



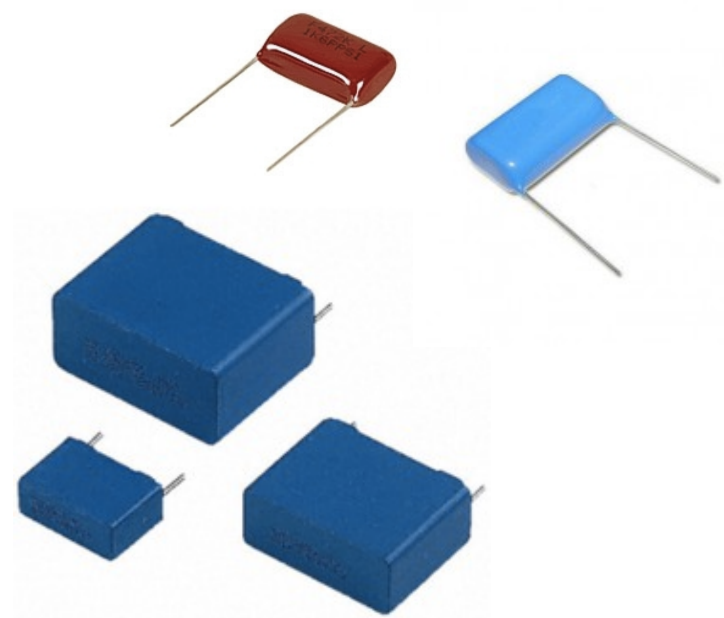
Capacitores

Tecnologias de capacitores:

- Filtro do retificador de entrada – São empregados capacitores eletrolíticos de alta tensão e grandes capacitâncias;

- Filtro de saída dos conversores – Empregam-se capacitores eletrolíticos alumínio com baixa RSE;

- Circuitos de grampeamento (snubber) – São utilizados capacitores com dielétricos de polipropileno para regime intermitente de funcionamento.



Fusíveis

Fusíveis de ação lenta:

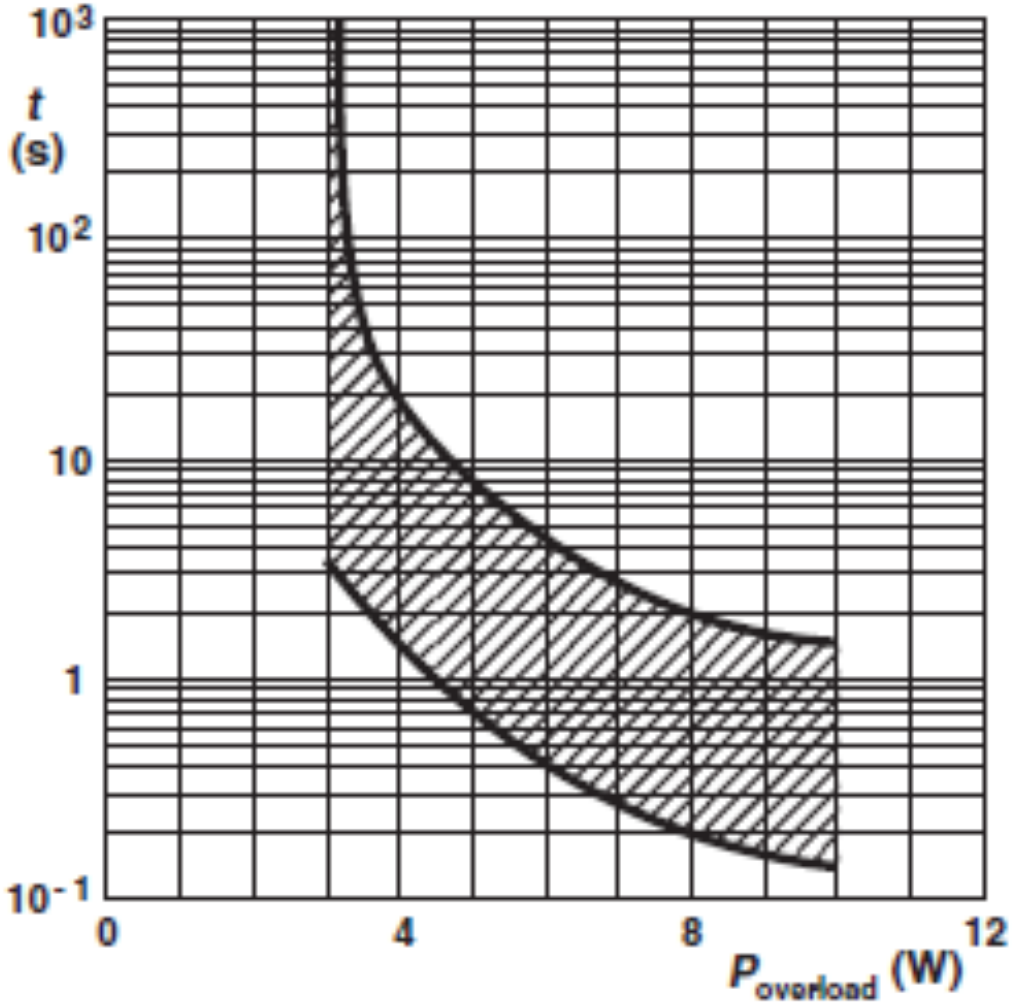
- Vidro;
- Areia;
- Cerâmica.

Fusíveis de ação rápida:

- Vidro;
- Areia;
- Cerâmica.

Resistores fusíveis (fusistor).

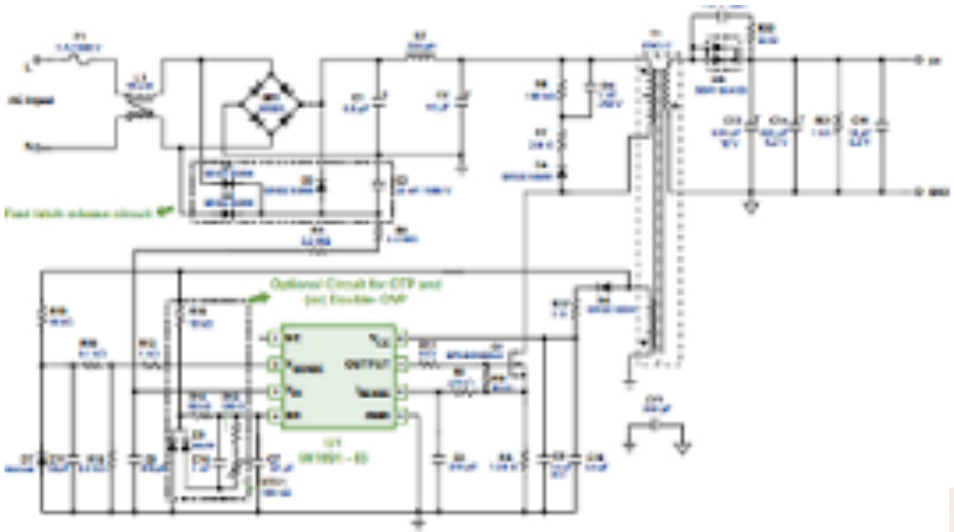
Fusíveis

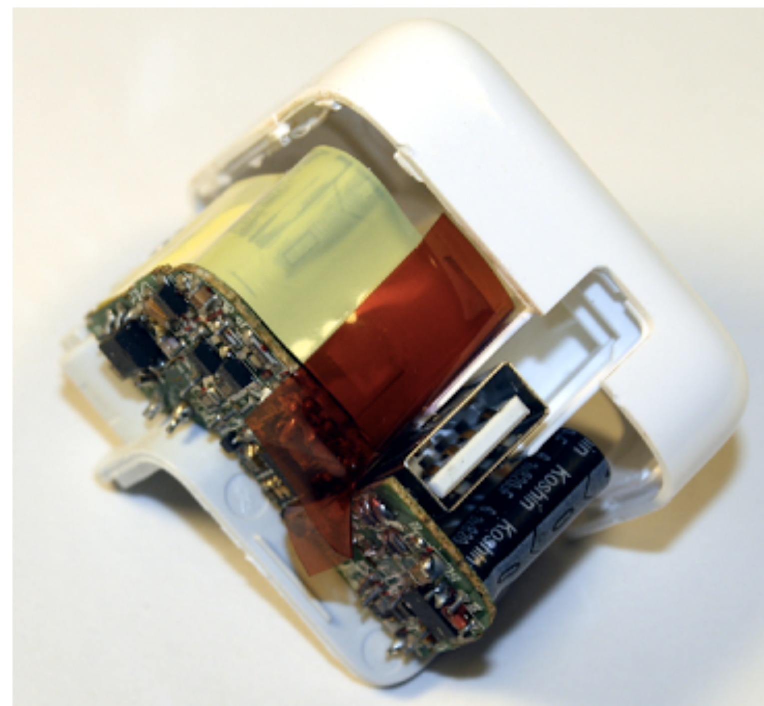


NR25 – 1 Ω < R < 15 Ω

http://www.vishay.com

Considerações Finais





Como sair daqui e chegar ali?

Próxima aula

Conversores ca-cc:

1. Principais topologias e tecnologias envolvidas;
2. Estudo de caso.