

Circuitos Eléctricos e Sistemas Digitais
Circuitos Eléctricos e Sistemas Digitais
&
Circuitos e Eletrónica

2018/19 - 1.º Semestre

José Figueiredo

Professor Auxiliar do Departamento de Física

Gabinete: 8.4.25 Ext. 28485

Email: jose.figueiredo@fc.ul.pt

Páginas oficiais da Disciplina:

<https://moodle.ciencias.ulisboa.pt/t> e <https://fenix.ciencias.ulisboa.pt/>

Página de CESDig/CEleetro docente:

http://webpages.ciencias.ulisboa.pt/~jmfigueiredo/aulas/CESD_CE_1819.html

Programa de CESDig e CEletro

- Elementos de Circuito e Leis Fundamentais
- Análise de Circuitos Dinâmicos (no Tempo e na Frequência)
- Fontes Dependentes e Teoremas de Thévenin e de Norton
- Técnicas Sistemáticas de Análise de Circuitos
- O Díodo e Aplicações
- Amplificador Operacional e Respetivas Aplicações
- Representação de Informação em Sistemas Digitais
- Funções e Portas Lógicas
- Circuitos Combinatórios de Média Dimensão (MSI)
- Introdução aos Circuitos Sequenciais
- Introdução ao Projeto de Máquinas de Estado com Circuitos Sequenciais
- Conversores Analógico-Digitais (ADCs) e Digital-Analógicos (DACs)

Bibliografia: circuitos elétricos

Elementos de Circuito e Leis Fundamentais; Análise de Circuitos Dinâmicos (no Tempo e na Frequência); Fontes Dependentes e Teoremas de Thévenin e de Norton; Técnicas Sistemáticas de Análise de Circuitos

- Notas do docente.
- Irwin, *Basic Engineering Circuit Analysis*, 7th ed., Wiley, 2002.
- Floyd & Buchla, *Electronics Fundamentals*, Pearson Education, 2010.
- Spence, *Introductory Circuits*, Wiley, 2008.
- Spencer, Ghausi, *Introduction to Electronic Circuit Design*, Prentice-Hall, 2003.
- Agarwal, Lang, *Foundations of Analog and Digital Electronic Circuits*, Morgan- Kaufman/Elsevier, 2005.
- Medeiros Silva, *Introdução aos Circuitos Eléctricos e Electrónicos*, Fundação Calouste Gulbenkian, 2ª Ed., 2001.
- J. A. Brandão Faria, *Análise de Circuitos*, IST Press, 2013.

O Díodo e Aplicações

- Notas do docente.
- Irwin, *Basic Engineering Circuit Analysis*, 7th ed., Wiley, 2002.
- Floyd & Buchla, *Electronics Fundamentals*, Pearson Education, 2010.
- Sedra, Smith, *Microelectronic Circuits*, Oxford University Press, 5th Ed., 2004.
- Medeiros Silva, *Introdução aos Circuitos Eléctricos e Electrónicos*, Fundação Calouste Gulbenkian, 2ª Ed., 2001.
- J. A. Brandão Faria, *Análise de Circuitos*, IST Press, 2013.

Bibliografia: Sistemas Digitais

Amplificador Operacional e Respetivas Aplicações

- Notas do docente.
- Irwin, *Basic Engineering Circuit Analysis*, 7th ed., Wiley, 2002.
- Floyd & Buchla, *Electronics Fundamentals*, Pearson Education, 2010.
- Spence, *Introductory Circuits*, Wiley, 2008.
- Medeiros Silva, *Introdução aos Circuitos Eléctricos e Electrónicos*, Fundação Calouste Gulbenkian, 2ª Ed., 2001.
- J. A. Brandão Faria, *Análise de Circuitos*, IST Press, 2013.
- Sedra, Smith, *Microelectronic Circuits*, Oxford University Press, 5th Ed., 2004.

Representação de Informação em Sistemas Digitais; Funções e Portas Lógicas; Circuitos Combinatórios de Média Dimensão (MSI); Introdução aos Circuitos Sequenciais; Introdução ao Projeto de Máquinas de Estado com Circuitos Sequenciais

- Notas do Docente
- Floyd, *Digital Fundamentals - Global Edition*, Pearson Education, 2010.
- Arroz, Monteiro, Oliveira, *Arquitectura de Computadores*, IST Press, 2006.
- Morris, Kime, *Logic and Computer Design Fundamentals*, 4th Edition, Pearson Education Limited, 2014.

Simulador PSPICE (P Spice 9.1 student version):

http://webpages.ciencias.ulisboa.pt/~jmfigueiredo/aulas/PSPICE_W7_ps9_1.zip

http://webpages.ciencias.ulisboa.pt/~jmfigueiredo/aulas/Introducao_PSPICE_9_1.pdf

Modo de funcionamento e avaliação

A disciplina tem a carga horário semanal de 5 horas, correspondentes a 2 aulas teóricas (T), 1 aula teórico-prática (TP), e uma aula prática de 2 horas (P).

A frequência das aulas laboratoriais é obrigatória, sendo permitidas duas faltas não justificadas. Considera-se reprovado o aluno que ultrapassar o número de faltas permitidas. **A participação em pelo menos 2/3 das aulas TP é valorizada até 1 valor.**

A aprovação na UC pressupõe a classificação final mínima de 9,5 valores obtida pela média ponderada das diferentes componentes de avaliação (testes/exames, TPs, series de exercícios, práticas e apresentação oral). Os alunos com aproveitamento na componente prática nos anos letivos 2016/17 e 2017/18 estão dispensados da prática. A nota da apresentação oral de 2016/17 e de 2017/18 é válida para o presente ano letivo.

A nota final da UC obtém-se considerando as seguintes componentes e respectivos pesos:

- Média dos 2 Testes ou nota do Exame - **nota mínima = 8,5 valores**: 50% ou 65%.
- Participação nas TPs – avaliação contínua: 5%.
- Séries de Exercícios (problemas e/ou simulações PSpice) - (opção): 15% ou 0%.
- Nota do Laboratório (nota mínima = 10 valores): 20%.
- Apresentação Oral (correspondente às atividades de 2 aulas práticas): 10%.

Nota 1: A média dos testes ou a nota do exame terá um peso de 70% para quem optar por não fazer as séries de exercícios.

Nota 2: As séries só serão consideradas para a média final se forem todas entregues dentro do prazo definido para cada série.

Avaliação

A avaliação compreenderá uma componente teórica, uma componente teórico-prática (TPs e séries) e a componente laboratorial. A nota da componente teórica será obtida através da realização de duas frequências, cada uma avaliando cerca de metade da matéria tratada nas aulas teóricas.

A nota final da componente teórica será a média das notas das frequências ou a nota do exame. A nota mínima em cada frequência é de 8,0 valores. A segunda frequência será realizada na data do exame normal. O aluno pode optar por fazer o exame ou apenas a parte correspondente à matéria da segunda frequência, se e só se tiver realizado a primeira frequência. A componente teórico-prática da avaliação compreende a participação nas TPs e entrega das séries de exercícios (optativa). A componente laboratorial da avaliação corresponderá à apreciação do desempenho do aluno nas aulas práticas e à nota atribuída à apresentação oral de dois trabalhos.

A nota final será obtida considerando os seguintes pesos:

- Média das 2 Frequências ou nota do Exame - **nota mínima 8,5 valores**: 50% ou 65%.
- Participação nas TPs – avaliação contínua: 5%
- Séries de Exercícios (problemas e/ou simulações PSpice) - (opção): 15% ou 0%.
- Nota do Laboratório (nota mínima = 10 valores): 20%.
- Apresentação Oral (correspondente às atividades de 2 aulas práticas): 10%.

Data da primeira frequência: 2 de novembro de 2018, das 14h30-16h30.

Data da segunda frequência: data definida para o exame da época normal.

Docentes

Teóricas: José Figueiredo,

Teórico-práticas: José Figueiredo

Laboratoriais:

- Agostinho da Silva Gomes, PL13, PL15
- José Ricardo Morais Silva Gonçalo, PL11
- Luís Filipe dos Santos Garcia Peralta, PL14
- João Lourenço, PL11(CEletro)
- José Figueiredo, PL14

Turnos	Data	Sala	Turmas
• PL11	Qua, 11:00 — 13:00	1.4.12	EBB
• PL13	Qua, 11:00 — 13:00	1.4.13	EBB
• T11	Sex, 14:30 — 15:30	3.2.14	EBB, EF, F
• T11	Ter, 15:00 — 16:00	6.2.53	EBB, EF, F
• TP12	Qui, 16:30 — 17:30	1.3.33A	EBB, EF
• PL12	Qua, 17:30 — 19:30	1.4.13	EBB, EF
• TP11	Sex, 15:30 — 16:30	8.2.39	EBB, EF, F
• PL14	Qua, 17:30 — 19:30	1.4.12	EF
• PL15	Sex, 16:30 — 18:30	1.4.12	EBB, EF
• PL11(CE)	Sex, 16:30 — 18:30	1.4.12	EBB, EF

Calendarização das aulas laboratoriais

# sem	Data/semana	# P	Descrição	*
1. ^a S	17-21 set		Apresentação da componente laboratorial da UC	
2. ^a S	24-28 set	P1	Fontes DC, multímetro e resistências	
3. ^a S	1-5 out	P2	Gerador de sinal, osciloscópio, condensadores	
4. ^a S	8-12 out	P3	Simulador PSpice	
5. ^a S	15-19 out	P4	Resistência interna voltí-/amperímetro, ponte Wheatstone	X
6. ^a S	22-26 out	P5	Circuitos RC, filtros, função de transferência	X
7. ^a S	29 out – 2 nov	P6	Circuitos com díodos e aplicações	X
8. ^a S	5 – 9 nov	P7	Circuitos com amplificadores operacionais (AmpOps)	X
9. ^a S	12-15 nov	P8	Circuitos com AmOps – filtros ativos	X
10. ^a S	19-23 nov	P9	Circuitos com díodos e AmpOps – retificação amplificadores	X
11. ^a S	26-30 nov	P10	Circuitos com AmpOps – comparadores e geradores de sinal	X
12. ^a S	3-7 dez	P11	Circuitos digitais	
13. ^a S	10-14 dez		Apresentação oral de trabalhos	
14. ^a S	17-19 dez		Apresentação oral de trabalhos	

* Trabalhos para apresentação oral - a sortear para cada grupo.

Circuitos Eléctricos e Sistemas Digitais

1.º Semestre 2018-2019

Circuitos Eléctricos e Sistemas Digitais

- Notas iniciais, convenções de escrita.
- Símbolos e unidades eléctricas SI, prefixos métricos
- Notações científica e em engenharia.
- Desvio/erro, exatidão, precisão
- Arredondamentos e algarismos significativos

Nota: Este conjunto de slides de CESDig 2018/2019 poderá ter (e tem com certeza) erros involuntários. Agradece-se a sua comunicação, bem como o envio de comentários para jmfigueiredo@fc.ul.pt. Os slides não dispensam (e aliás recomendam) a consulta de outras fontes, nomeadamente, as indicadas na bibliografia recomendada.

Convenções de escrita

A utilização de caracteres na representação de grandezas, constantes, parâmetros, coeficientes e unidades eléctricas e magnéticas rege-se pelas seguintes convenções:

- As grandezas escalares constantes no tempo, mas também o valor médio e a amplitude das grandezas variáveis no tempo representam-se por caracteres maiúsculos em itálico. Exemplos: U , V , Q , I , $I_m \sin(\omega t)$.
- Para os valores instantâneos das grandezas escalares usam-se caracteres minúsculos em itálico. Exemplos: $i(t)$, $v(t)$. Por vezes, com o intuito de simplificar a representação das equações, omite-se a variação temporal, escrevendo-se apenas i e v em vez de $i(t)$ e $v(t)$.
- As grandezas vectoriais, como, por exemplo, o vector campo eléctrico \vec{E} , e o vector força eléctrica, \vec{F} , são representadas com caracteres maiúsculos em estilo romano.
- As grandezas e as funções complexas, como a **impedância**, os fasores da tensão e da corrente, a função de transferência, também se representam em estilo romano (Z , V , I , ...). No entanto, o módulo e a fase das grandezas complexas são representados em itálico.
- as constantes, parâmetros e coeficientes são representados com caracteres gregos ou latinos, minúsculos ou maiúsculos em itálico, de acordo com as convenções internacionais. Por exemplo, a resistência eléctrica, R , a capacidade eléctrica, C , a indutância electromagnética, L , a mobilidade dos electrões, m , a permissividade do vazio, ϵ_0 , etc.

[http://webpages.ciencias.ulisboa.pt/~jmfigueiredo/aulas/Ensino Teaching SI.html](http://webpages.ciencias.ulisboa.pt/~jmfigueiredo/aulas/Ensino_Teaching_SI.html)

Convenções de escrita

Um sinal $v(t)$ elétrico pode conter uma componente independente do tempo (a componente contínua ou dc) e uma componente que é uma função periódica com valor médio nulo.

As componentes dc representam-se por caracteres maiúsculos em itálico com índices maiúsculos (V_{IN}). (O valor médio de um sinal puramente alternado é nulo.)

As componentes puramente alternadas representam-se por caracteres minúsculos em itálico com índices minúsculos (v_{in}).

Assim, e em geral, um dado sinal $v(t)$ é descrito como $v(t) = v_{IN} = V_{IN} + v_{in}$, onde o sinal $v(t)$ é representado por caracteres minúsculos em itálico com índices maiúsculos v_{IN} , o valor médio (ou componente contínua) do sinal $v(t)$ é $\langle v(t) \rangle = \langle v_{IN} \rangle = V_{IN}$.

No caso de um sinal de corrente $i(t)$ escreve-se $i_{IN} = I_{IN} + i_{in}$.

http://webpages.ciencias.ulisboa.pt/~jmfigueiredo/aulas/Ensino_Teaching_SI.html

Símbolos e Unidades eléctricas SI

- diferença de potencial ou (de) tensão constantes: ΔU , U , ΔV , V ; unidade: volt, V
- diferença de potencial ou de tensão variável no tempo: Δv , v ; unidade: volt, V
- quantidade de carga eléctrica constante no tempo: Q ; unidade: coulomb, C
- quantidade de carga eléctrica variável no tempo: q ; unidade: coulomb, C
- intensidade de corrente eléctrica constante: I ; unidade: ampere, A
- intensidade de corrente eléctrica variável no tempo: i ; unidade: ampere, A
- resistência eléctrica: R ; unidade: ohm; Ω
- condutância (inverso da resistência): G ; unidade: siemens, S
- capacidade: C ; unidade: farad, F (não confundir com a unidade faraday)
- indutância: L ; unidade: henry, H
- impedância: Z ; unidade: ohm, Ω
- reactância: X ; unidade: ohm, Ω .

http://webpages.ciencias.ulisboa.pt/~jmfigueiredo/aulas/Ensino_Teaching_SI.html

Unidades SI Fundamentais

Grandeza	Unidade	Símbolo
Comprimento	meter	m
Massa	quilograma	kg
Tempo	segundo	s
Intensidade de corrente	ampere	A
Temperatura	kelvin	K
Intensidade luminosa	candela	cd
Quantidade de substância	mole	mol

http://webpages.ciencias.ulisboa.pt/~jmfigueiredo/aulas/Ensino_Teaching_SI.html

Unidades SI: Eletricidade

Grandeza	Unidade	Símbolo
Corrente	ampere	A
Carga	coulomb	C
Tensão	volt	V
Resistência	ohm	Ω
Potência	watt	W

Estas unidades são definidas a partir das unidades fundamentais metro-quilograma-segundo, conhecidas como sistema de unidades m-k-s.

Com exceção da unidade de intensidade de corrente elétrica (unidade SI fundamental), todas as unidades elétricas e magnéticas são derivadas das unidades fundamentais do SI.

http://webpages.ciencias.ulisboa.pt/~jmfigueiredo/aulas/Ensino_Teaching_SI.html

Prefixos métricos

Prefixo	Símbolo	Valor
peta	P	10^{15}
tera	T	10^{12}
giga	G	10^9
mega	M	10^6
quilo	k	10^3

Ver os significados dos vocábulos.

Muitas vezes para se perceber o real significado de alguns termos científicos/técnicos é importante conhecer a sua origem.

Eis um exemplo:

O que é que estuda a **tribologia**?

O que é que estuda a **triboelectricidade**?

Porque será que o símbolo de quilo se escreve em minúsculas?

http://webpages.ciencias.ulisboa.pt/~jmfigueiredo/aulas/Ensino_Teaching_SI.html

Prefixos métricos

Prefixo	Símbolo	Valor
mili	m	10^{-3}
micro	μ	10^{-6}
nano	n	10^{-9}
pico	p	10^{-12}
femto	f	10^{-15}

Escreve-se femto e não fento.

Ver o significado dos vocábulos.

http://webpages.ciencias.ulisboa.pt/~jmfigueiredo/aulas/Ensino_Teaching_SI.html

Notações científica e engenharia

$$47\ 000\ 000 = 4.7 \times 10^7 \text{ (notação científica)}$$
$$= 47 \times 10^6 \text{ (notação em engenharia)}$$

$$0.000\ 027 = 2.7 \times 10^{-5} \text{ (notação científica)}$$
$$= 27 \times 10^{-6} \text{ (notação em engenharia)}$$

$$0.605 = 6.05 \times 10^{-1} \text{ (notação científica)}$$
$$= 605 \times 10^{-3} \text{ (notação em engenharia)}$$

Ter em atenção que nestas notas/slides o separador decimal tanto por ser o ponto como a vírgula.

Ver:

http://webpages.ciencias.ulisboa.pt/~jmfigueiredo/aulas/Ensino_Teaching_SI.html

Conversões métricas:

$$0.47 \text{ MW} = 470 \text{ kW}$$

$$10\ 000 \text{ pF} = 0.01 \text{ }\mu\text{F}$$

Aritméticas métricas:

$$10,000 \text{ }\Omega + 22 \text{ k}\Omega =$$

$$10,000 \text{ }\Omega + 22\ 000 \text{ }\Omega = 32\ 000 \text{ }\Omega$$

$$\text{ou } 10 \text{ k}\Omega + 22 \text{ k}\Omega = 32 \text{ k}\Omega$$

$$200 \text{ }\mu\text{A} + 1.0 \text{ mA} =$$

$$200 \text{ }\mu\text{A} + 1\ 000 \text{ }\mu\text{A} = 12\ 000 \text{ }\mu\text{A}$$

$$\text{ou } 0.200 \text{ mA} + 1.0 \text{ mA} = 1.2 \text{ mA}$$

Ter em atenção que nestas notas/slides o separador decimal tanto por ser o ponto como a vírgula.

Erro/desvio, exatidão, precisão

A incerteza é parte dos processos de medida experimentais.



O desvio/erro é a diferença entre o valor verdadeiro/real ou mais aceite e o valor medido.

A exatidão é uma indicação do grau do desvio que afetas as medidas.

A precisão é uma indicação da repetibilidade das medidas.

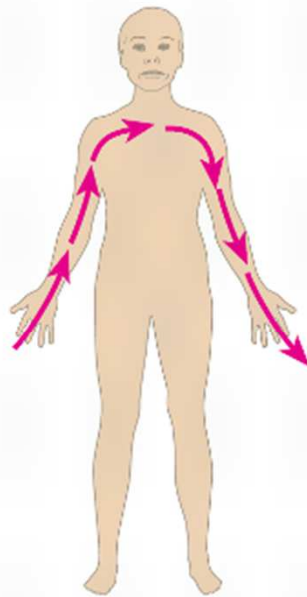
Efeitos da Corrente Elétrica no Corpo Humano

Choque elétrico

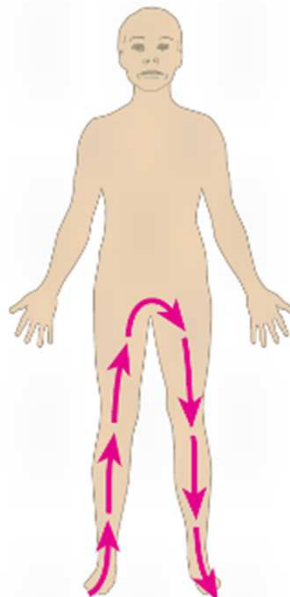
Regras e Comportamentos de Segurança

Choque elétrico

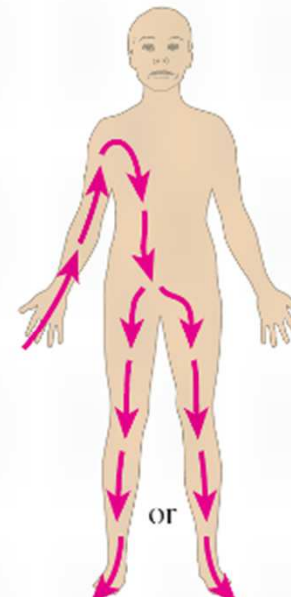
É a intensidade de corrente através do corpo, e não a tensão, que provoca o choque elétrico. Claro que a corrente é induzida pela tensão a que o corpo fica sujeito. Quando dois pontos do corpo ficam sujeitos a uma diferença de potencial (ddp) estabelece-se uma corrente entre esses dois pontos. O percurso da corrente depende dos pontos de contacto.



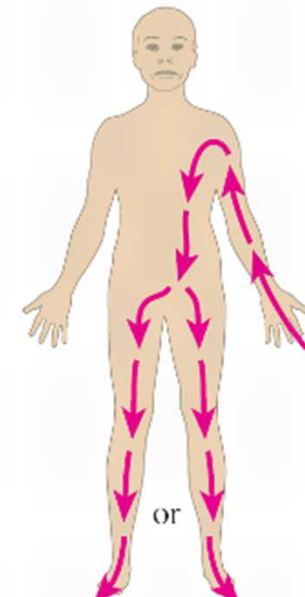
Touch potential



Step potential



Touch/Step potential



A severidade do choque elétrico depende da ddp, dos pontos de contato e do caminho que a corrente toma através do corpo. O percurso da corrente determina que tecidos e órgãos são afetados. Os choques que envolvem passagem de corrente pelo coração ou/e pelos pulmões são os mais perigosos.

Efeitos da Corrente Elétrica no Corpo Humano

Choque elétrico

É a corrente e não a tensão que causa o choque. A severidade do choque depende, é claro, do valor da diferença de potencial e do caminho percorrido pela corrente no corpo.

A resistência típica do corpo humano varia entre 10 kΩ e 50 kΩ; $220\text{ V}/10\text{ k}\Omega = 22\text{ mA}$.

Efeitos no corpo humano

- 2 mA, começo da percepção
- 10 mA, choque sem dor e sem perda de controlo muscular
- 20 mA, choque com dor
- 30 mA, choque com dor severa, contracção muscular, dificuldades de respiração
- 75 mA, fibrilação fibrilação
- 250 mA (0,25 A), fibrilação ventricular, usualmente fatal após 5 s
- 4000 mA (4 A), paragem cardíaca
- 5000 mA (5 A), queimadura dos tecidos

Efeito térmico (queimaduras) - Temperaturas elevadas

Os componentes electrónicos em operação, em geral, atingem elevadas temperaturas para o ser humano ($\sim 373\text{ K}$), o que pode originar queimaduras e causar incêndios se não estiverem correctamente acondicionados.

Regras e Comportamentos de Segurança

- Não trabalhar em piso molhado;
- Evitar contacto com os terminais das fontes;
- Manter a bancada de trabalho limpa e arrumada;
- Desligar as fontes antes de trabalhar nos circuitos;
- Não manusear instrumentos com as mãos molhadas;
- Não levar comida ou bebidas para a bancada de trabalho;
- Descarregar os condensadores antes de tocar nos circuitos;
- Não usar valores de corrente superiores às necessidades dos circuitos;
- Fazer em último lugar a conexão ao ponto de maior tensão dos circuitos;
- Não trabalhar com equipamentos sem conhecer os procedimentos e os cuidados a ter;
- Conhecer os locais onde se encontram os interruptores de segurança e as saídas de emergência;

Circuitos Elétricos e Sistemas Digitais

2018-2019 - 1.º Semestre

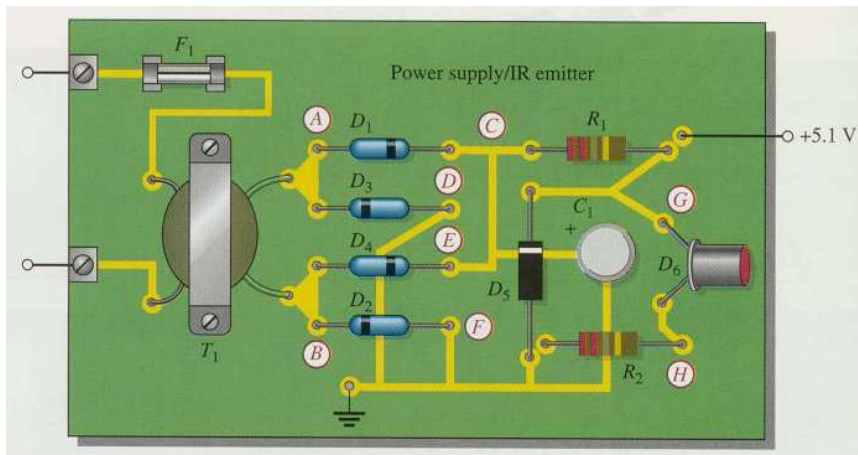
Elementos de circuitos e leis fundamentais

- Corrente elétrica, tensão, fontes de tensão e de corrente independentes, convenção de sinais, elementos de um circuito, potência elétrica,
- Lei de Ohm, resistência, efeito de Joule, código de cores - resistências, resistências variáveis, associação de resistências, leis de Kirchhoff
- Software de simulação de circuitos elétricos
- Geradores de tensão e de corrente, tensões e correntes sinusoidais
- Condensadores, capacidade, associação de condensadores, impedância de um condensador
- Indutores/bobines, indutância, associação de indutores, impedância de um indutor

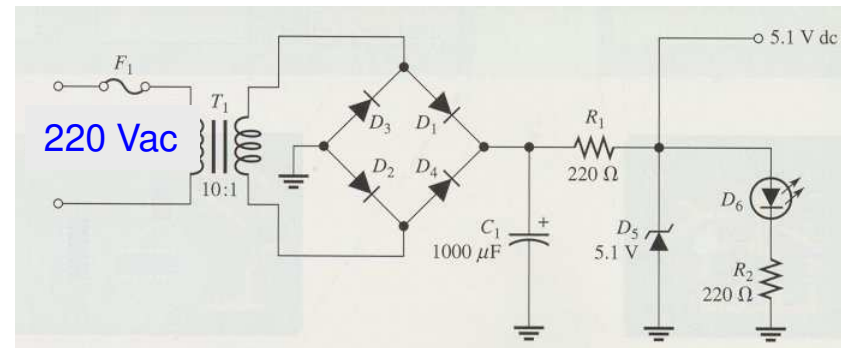
Circuito Elétrico

Um circuito elétrico é formado por um conjunto de condutores e componentes elétricos (como, por exemplo, resistências, condensadores, bobines, geradores, recetores, etc.) onde há pelo menos um percurso fechado para que possa haver fluxo de carga elétrica (corrente elétrica).

Placa de circuito impresso



Esquema do circuito



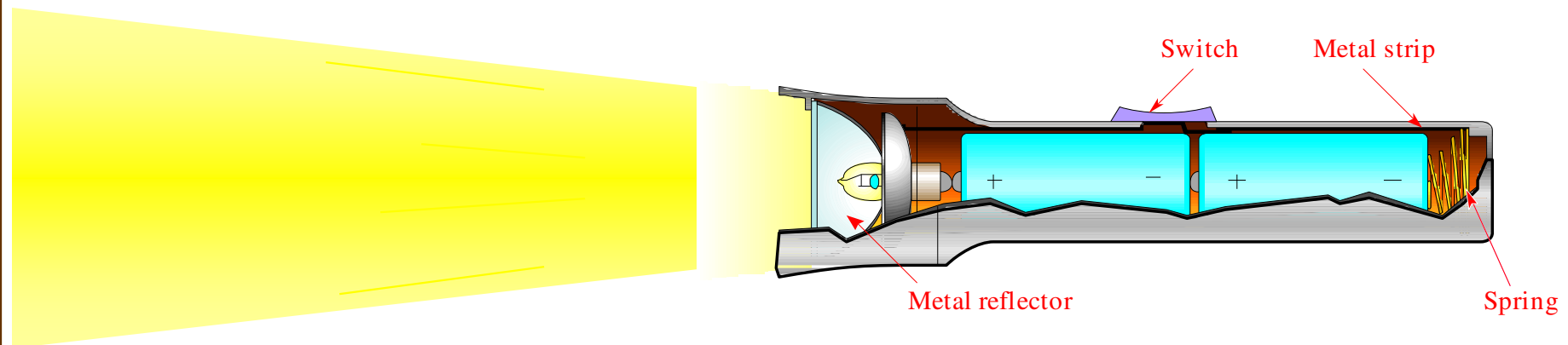
Elementos de um circuito elétrico

Elementos básicos de um circuito elétrico

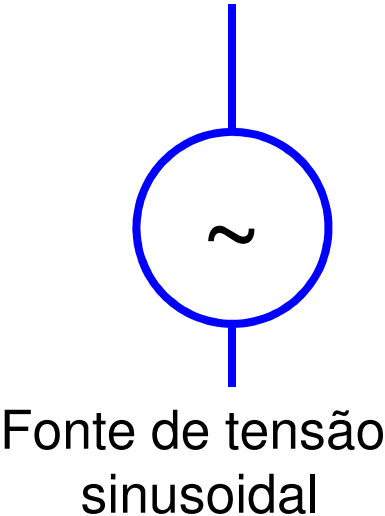
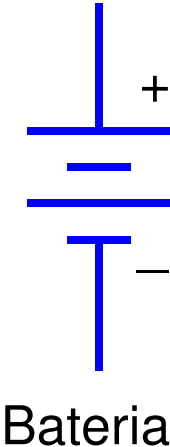
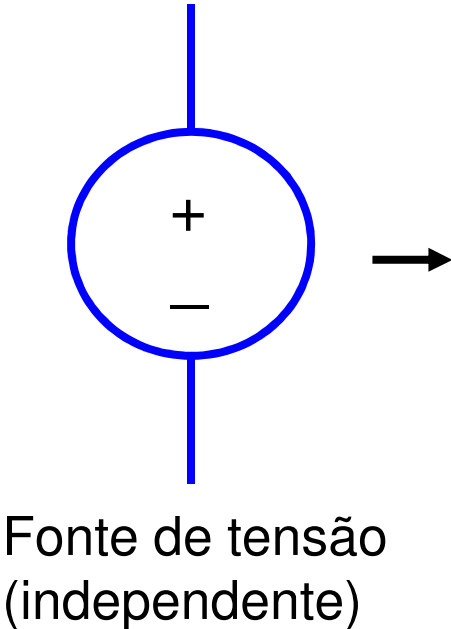
Um circuito básico consiste em:

- 1) Uma fonte de tensão
- 2) Um percurso condutor
- 3) Uma carga

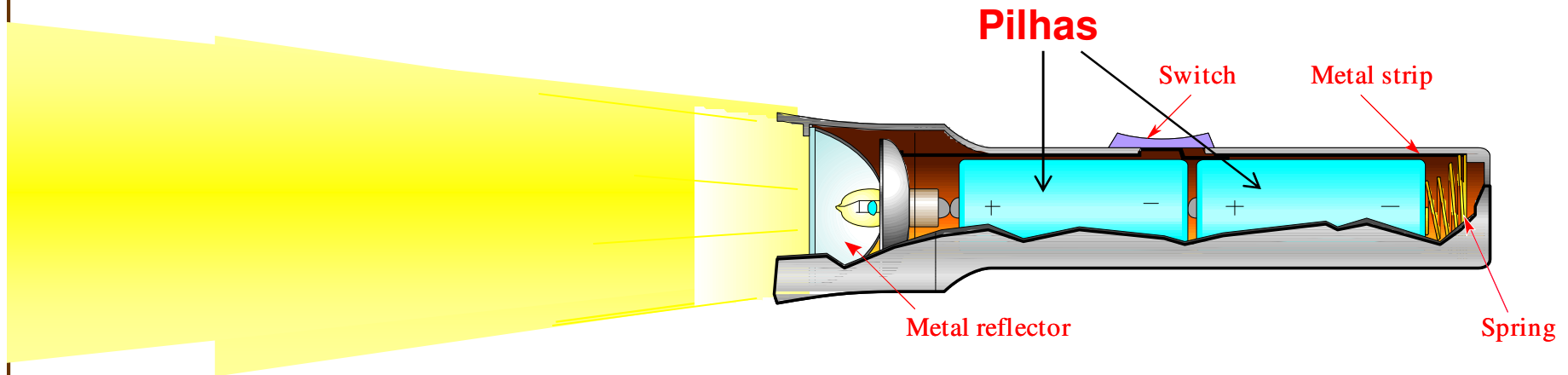
Uma lanterna é um exemplo de um circuito básico, que tem para além dos componentes acima, um elemento adicional de controlo, o interruptor.



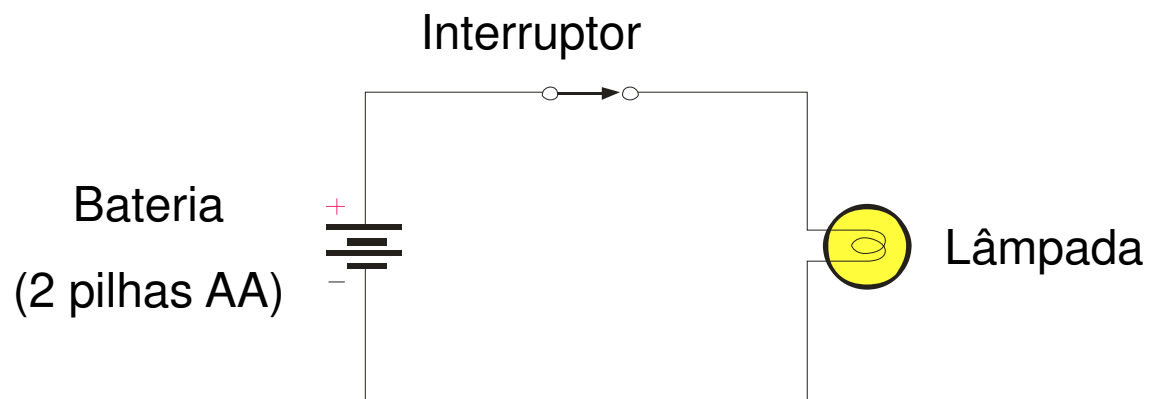
Símbolos de fontes de tensão independentes



Representação esquemática



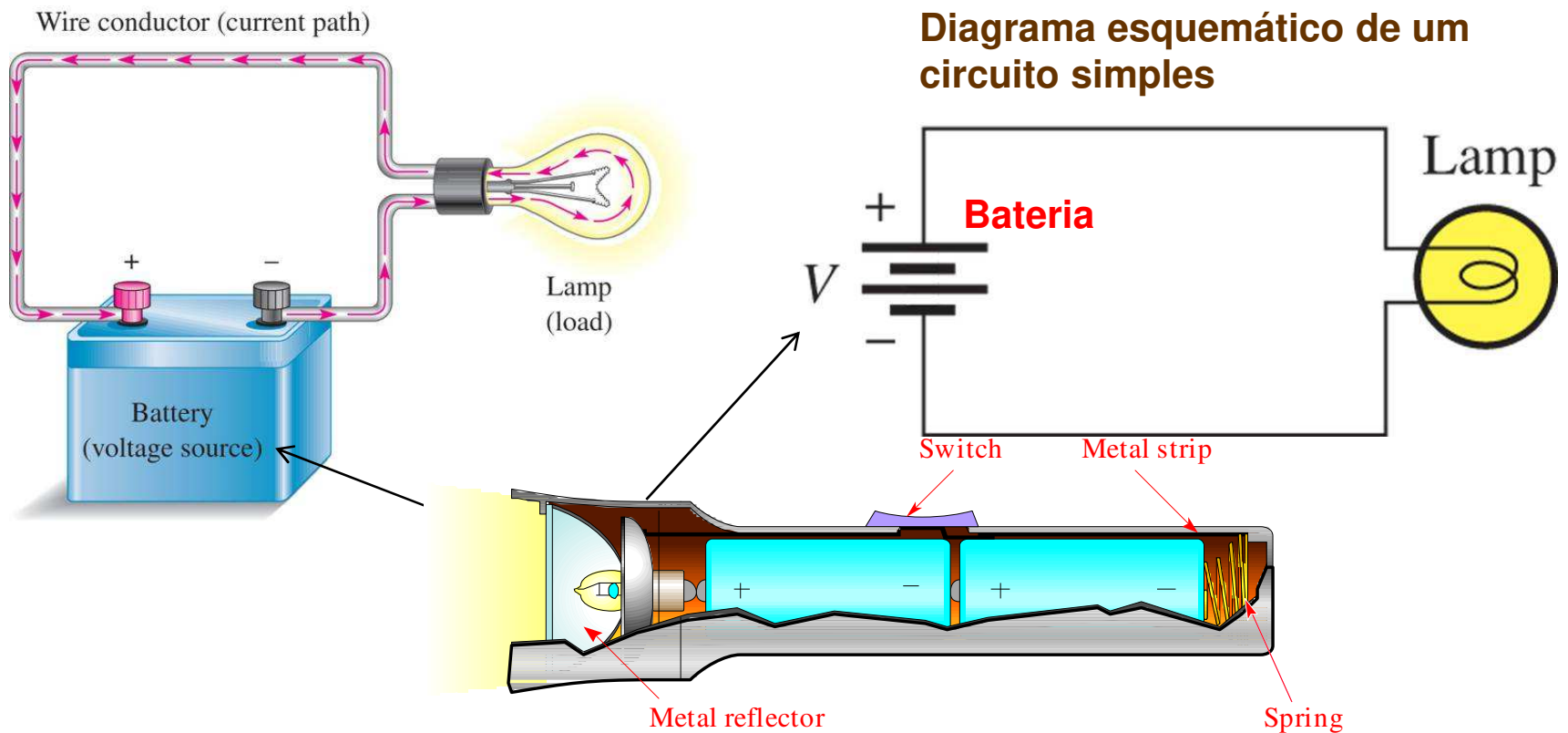
Os circuitos elétricos são descritos por diagramas esquemáticos. Por exemplo, o circuito da lanterna pode ser representada pelo esquema:



Circuito elétrico simples

Para que haja uma corrente elétrica entre dois pontos é necessário que exista uma diferença de potencial elétrico (tensão) entre esses dois pontos.

Uma bateria é uma fonte de força eletromotriz, i.e., é capaz de manter uma diferença de potencial (tensão) aos seus terminais.



LEAP Online © 2002 BostonUniversity

Corrente elétrica: fluxo de carga elétrica

Considere um fio metálico (de cobre, por exemplo) cujas extremidades estão submetidas a uma diferença de potencial elétrico V .



Define-se intensidade de corrente elétrica (I) como a razão entre a quantidade de carga elétrica (ΔQ) que flui através de uma dada superfície do fio num dado intervalo de tempo (Δt):

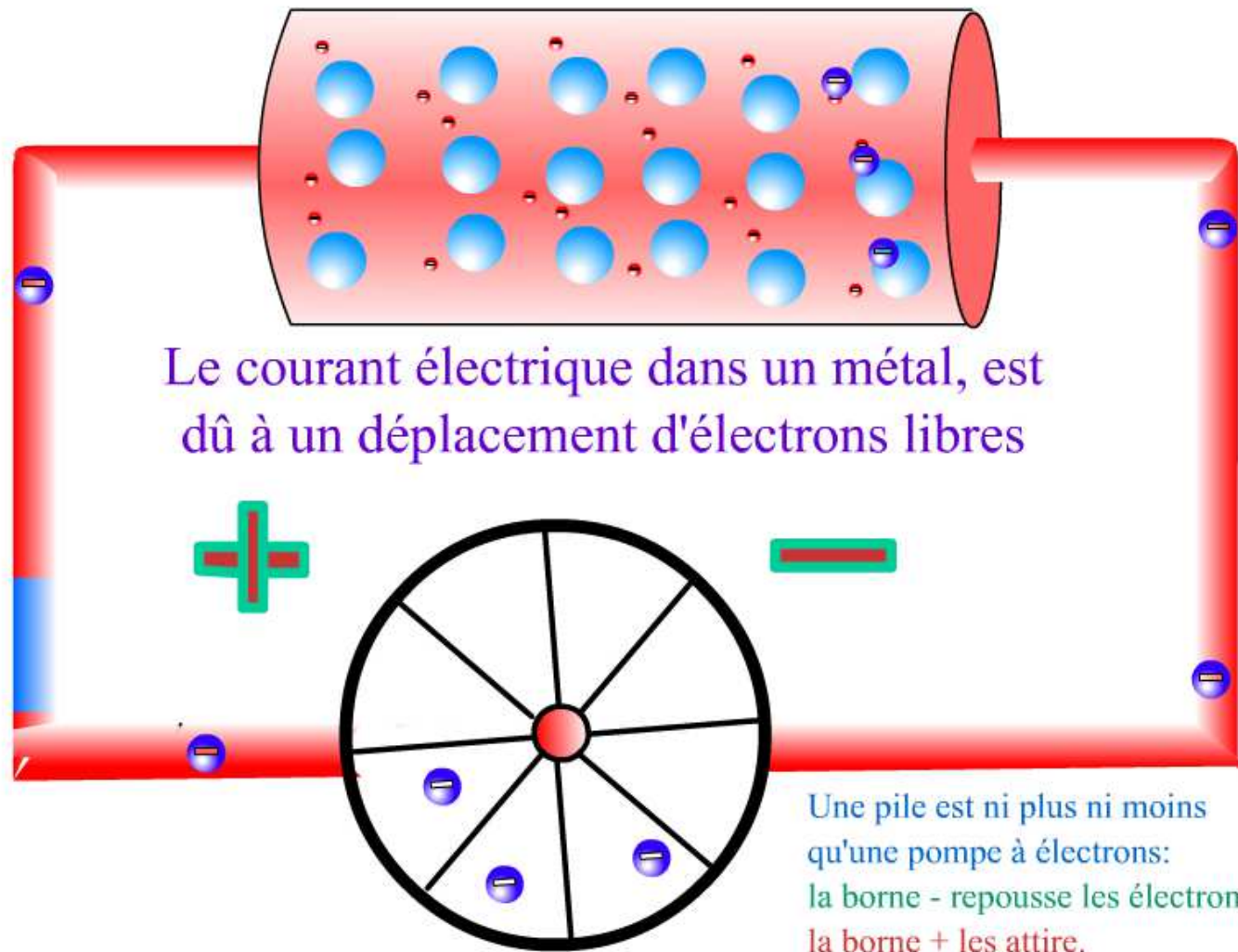
$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

Um ampere (1 A) é a intensidade de corrente elétrica que percorre um elemento quando um coulomb (1 C) atravessa a secção transversal desse elemento num segundo (1 s).

Qual é intensidade de corrente elétrica se 2 C atravessarem uma dada superfície em 5 s? **0.4 A (400 mA)**

(Em electrónica, as correntes são, normalmente, da ordem alguns mA.)

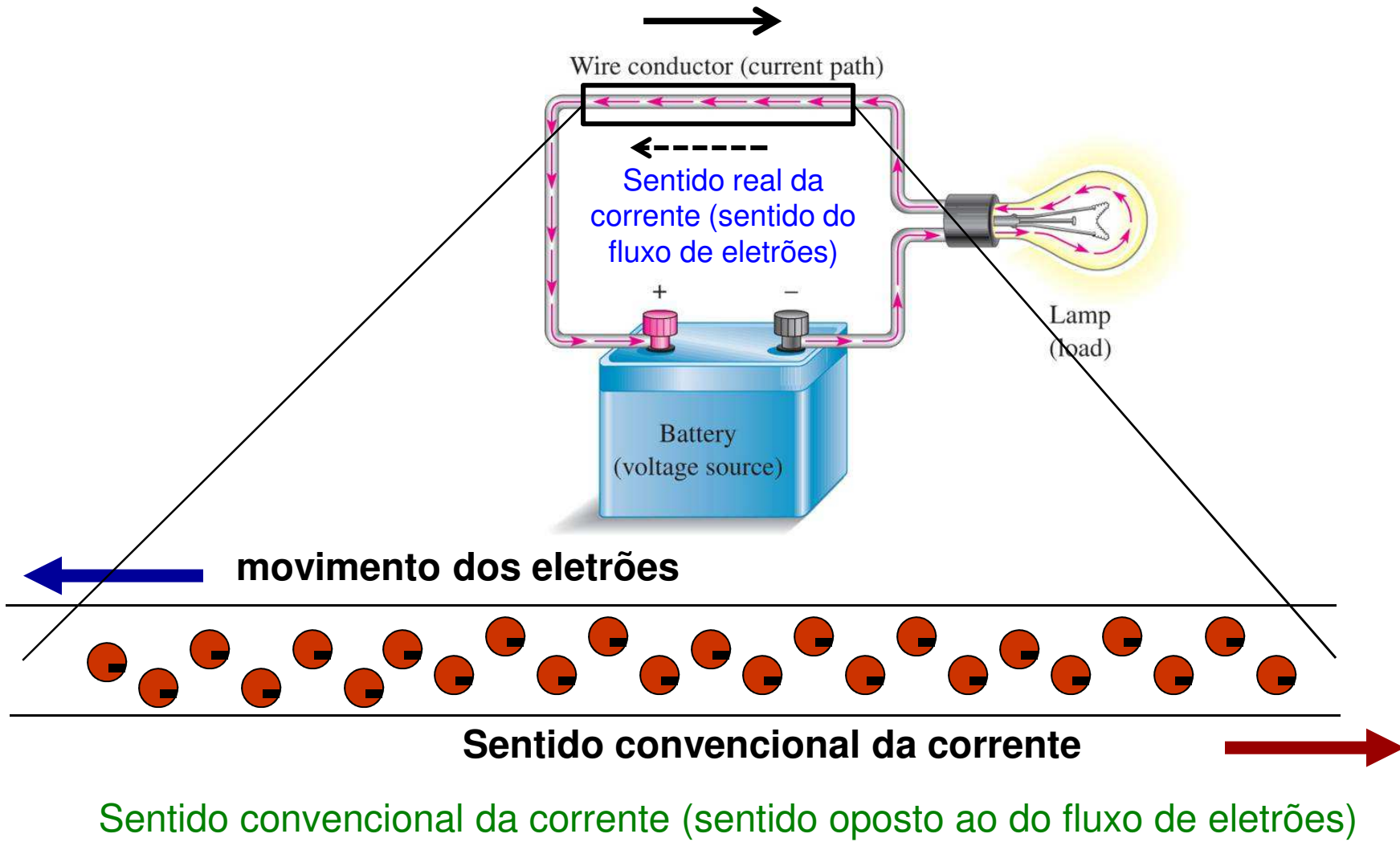
Portadores de carga em condutores metálicos



<http://webpages.ciencias.ulisboa.pt/~jmfigueiredo/aulas/condutoelectrico.swf>

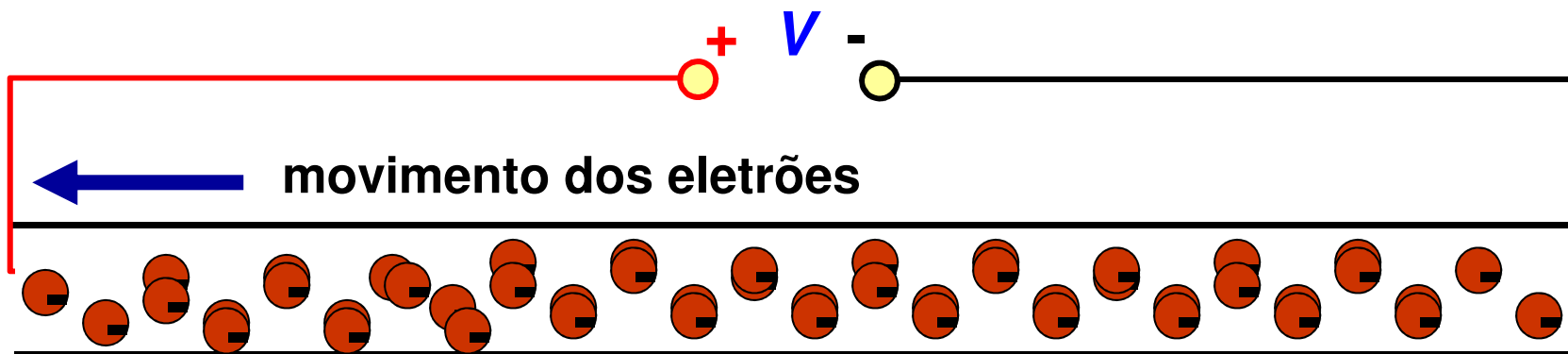
É a tensão elétrica que gera a corrente elétrica

Sentido convencional da corrente (sentido oposto ao do fluxo de elétrons)



É a tensão elétrica que gera a corrente elétrica

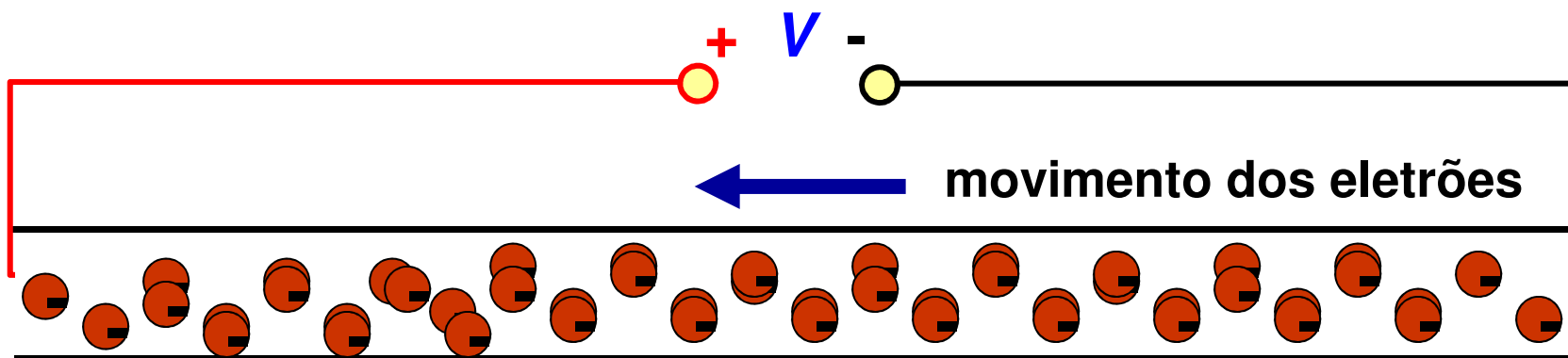
Para que haja uma corrente elétrica entre dois pontos é necessário que exista uma **diferença de potencial elétrico (tensão)** entre esses pontos. O sentido convencional da corrente é o sentido das cargas positivas, que se deslocam da região de maior potencial para a região de menor potencial. O sentido convencional é oposto ao das cargas negativas.



Num condutor metálico, os portadores de carga móveis são os elétrons, e portanto, o sentido real da corrente num metal é o sentido do movimento dos elétrons, que é no sentido dos potenciais crescentes.

Sentidos real e convencional da corrente elétrica

O sentido convencional da corrente é o sentido das cargas positivas, que se deslocam da região de maior potencial para a região de menor potencial, isto é, o sentido convencional da corrente elétrica é o sentido dos potenciais decrescentes. Portanto, o sentido convencional é oposto ao das cargas negativas.

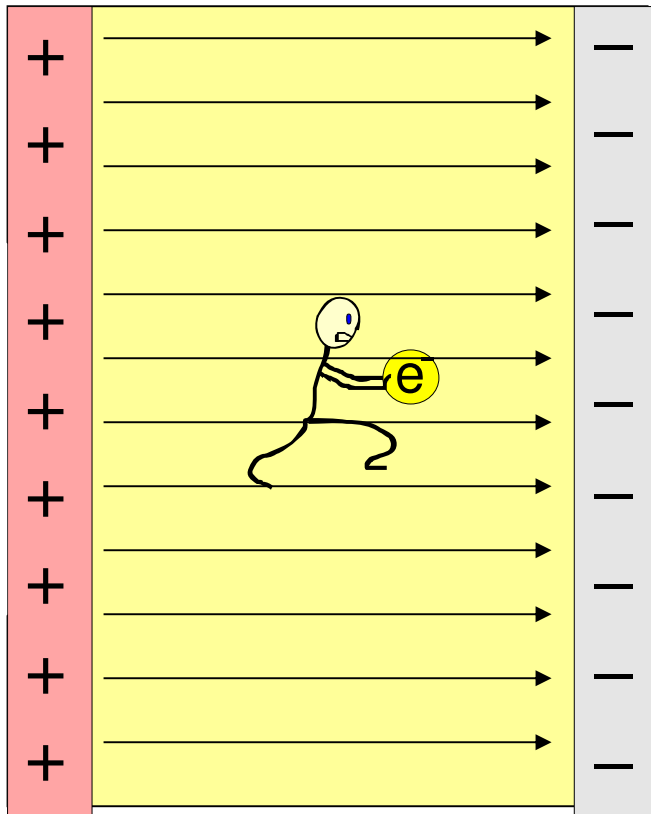


Sentido convencional da corrente →

Na análise de circuitos o uso do sentido convencional da corrente (sentido oposto ao do fluxo de elétrons) é praticamente universal. Contudo, pode-se usar o sentido real da corrente, obtendo-se resultados equivalentes.

Tensão elétrica

Para mover uma carga elétrica (positiva) contra o campo elétrico é necessário realizar trabalho (i.e., é tem de se aplicar uma força na carga para a mover contra o campo elétrico).



Define-se diferença de potencial (tensão) V como o trabalho W realizado por unidade de carga elétrica Q contra o campo elétrico:

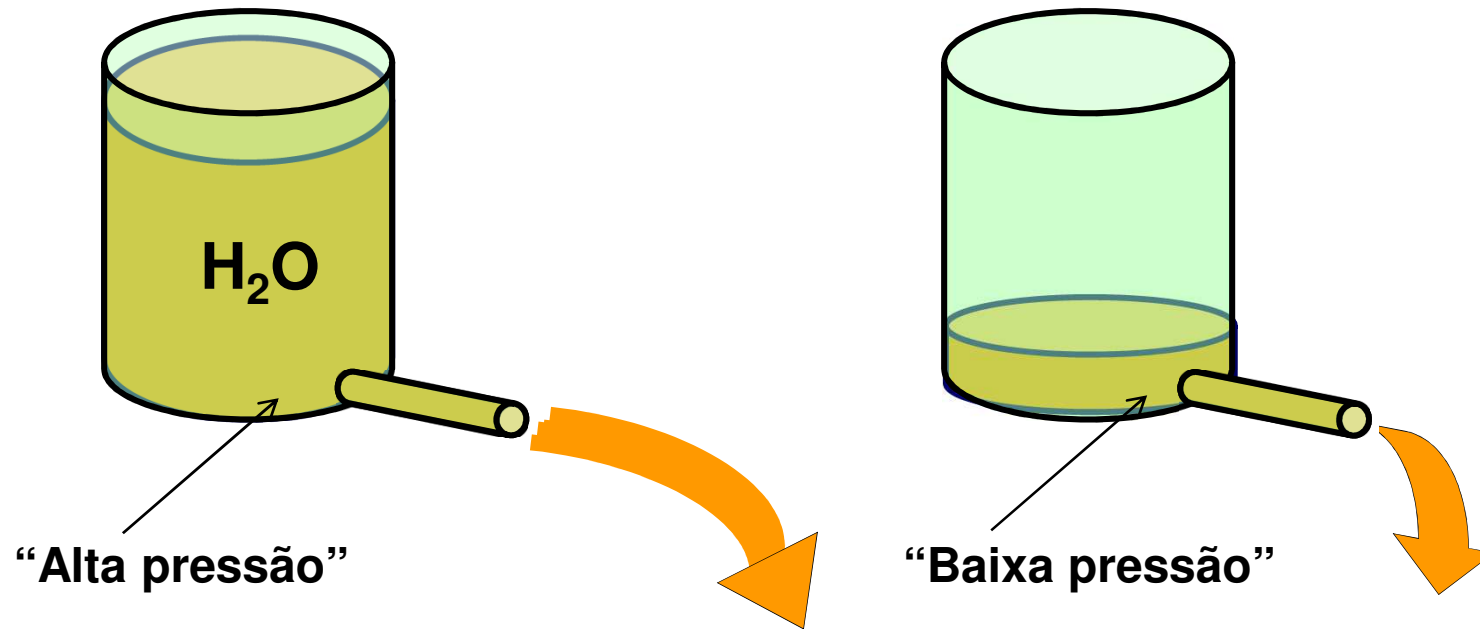
$$V = \frac{W}{Q}$$

1 volt é a diferença de potencial (tensão) V entre dois pontos quando para mover a carga de 1 coulomb (1 C) entre esses dois pontos é usado um joule (1 J) de energia.

Define-se tensão elétrica V como a diferença de potencial entre dois pontos.

LEAP Online © 2002 BostonUniversity

Analogia entre a tensão e a pressão hidráulica



Tensão elétrica (ddp) = “pressão elétrica” – mede-se em volt

Intensidade de corrente elétrica – fluxo de água

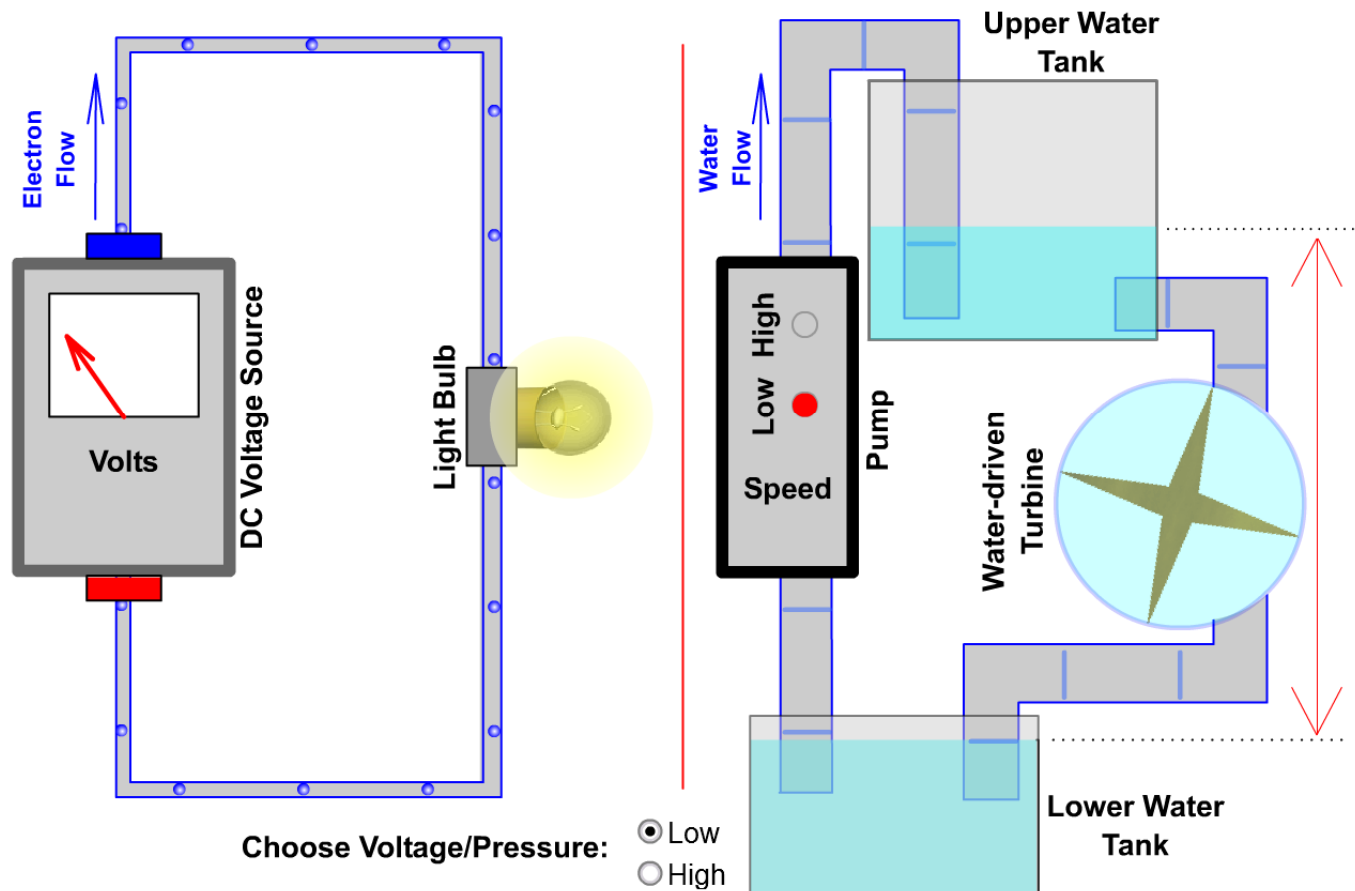
Para que haja uma corrente elétrica entre dois pontos é necessário que exista uma diferença de potencial elétrico (ddp) ou tensão entre esses dois pontos.

A **tensão** entre dois pontos corresponde à energia potencial elétrica por unidade de carga elétrica, $U=V=E_p/Q$, que pode ser transformada noutra forma de energia. Em geral, quanto maior for a tensão maior será a corrente (fluxo de carga)

Analogia entre a tensão e a pressão hidráulica

Tensão (elétrica): diferença de potencial entre dois pontos.

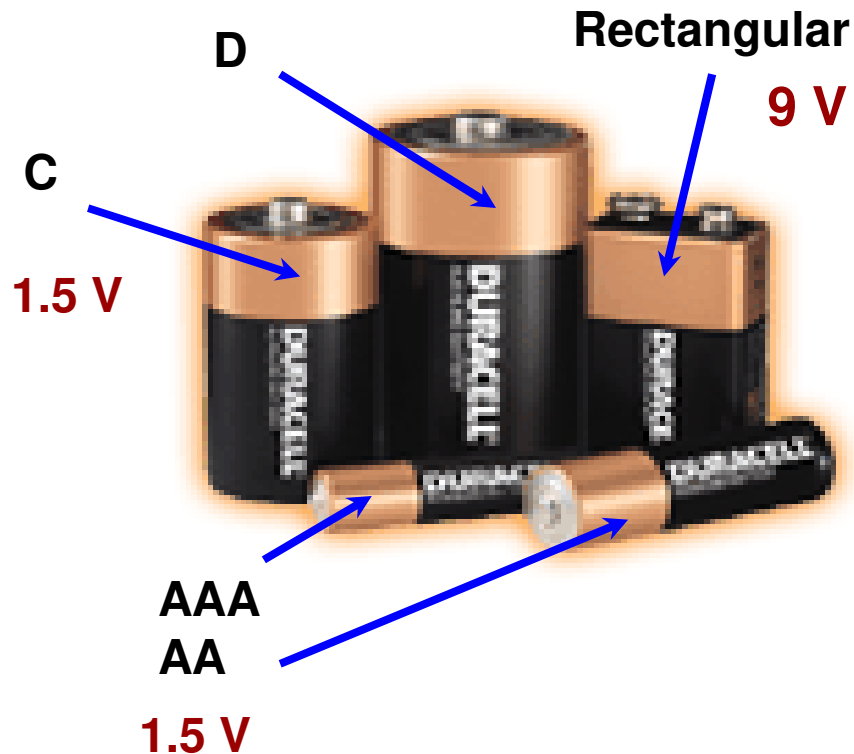
Comparing a DC Circuit to the Flow of Water



<http://webpages.ciencias.ulisboa.pt/~jmfigueiredo/aulas/WaterAnalogy.swf>

Pilhas e baterias são fontes de força eletromotriz

Pilhas



A tensão aos terminais de uma pilha/bateria pode ser inferior ao indicado quando ligada a uma carga ou após ter sido usada por algum tempo.

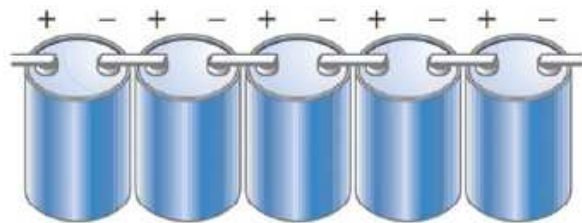
A bateria de um automóvel (12 V) é um exemplo de uma bateria com multicélulas.



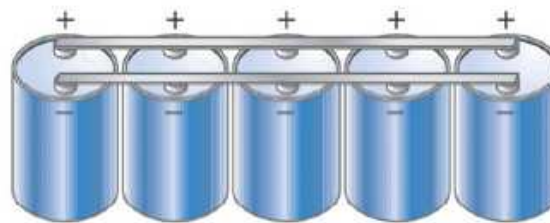
Como todas as baterias, a bateria automóvel não armazena carga elétrica. Armazena energia química que pode ser convertida em energia elétrica quando se providencia um percurso externo para a corrente, permitindo que a reação ocorra.

Em vez de dizermos “carregar” a bateria, deveríamos dizer “reverter a reação química” na bateria.

Associação de pilhas/baterias em série e em paralelo

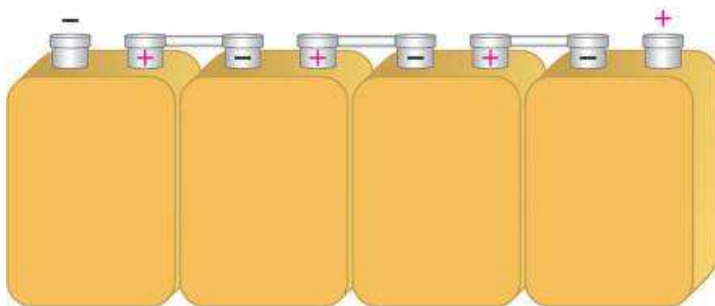


(a) Series-connected battery



(b) Parallel-connected battery

Associação de células/baterias/pilhas em **série aumenta a tensão**. Associação em **paralelo aumenta a corrente que pode ser fornecida à carga**.



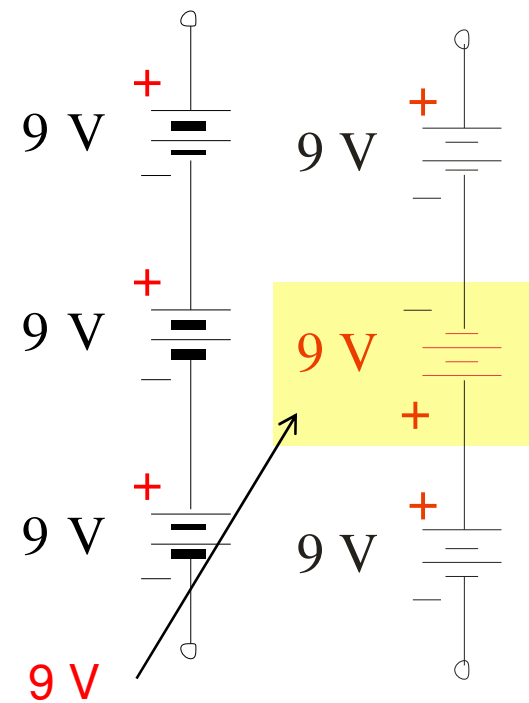
(a) Series-connected cells increase voltage.



(b) Parallel-connected cells increase current capacity.

A tensão de fontes de tensão associadas em série adiciona-se algebricamente. Por exemplo, a tensão total é: **27 V**

Qual é a tensão se uma das baterias for invertida?



Fontes e geradores de tensão

As fontes de tensão incluem baterias, células nervosas, células de combustível, geradores, etc.

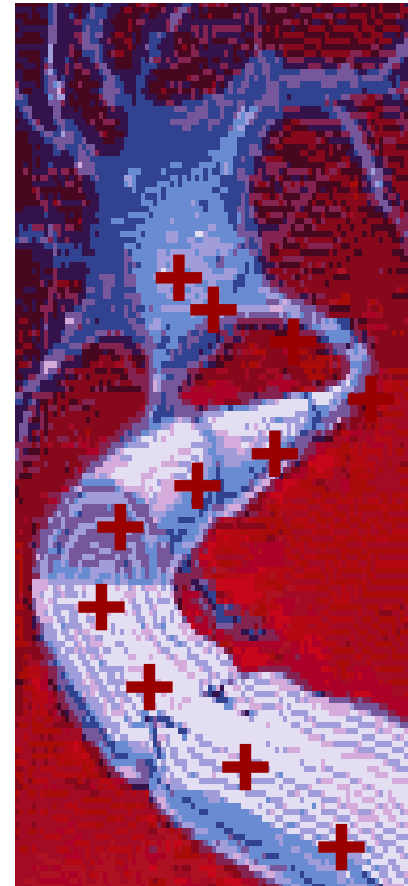
Baterias



Fonte de tensão



Células nervosas



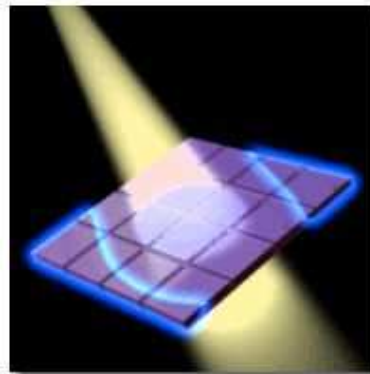
As células nervosas geram impulsos elétricos (“spikes”) – potencial de ação – de alguns milivolt (mV) quando atividades por sinapses

$$1 \text{ mV} = 10^{-3} \text{ V}$$

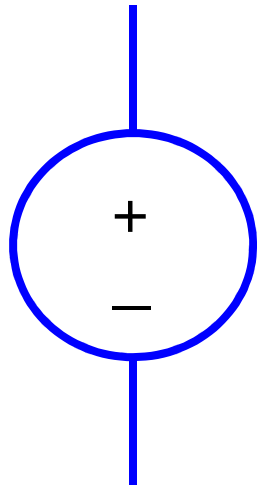
Centrais elétricas



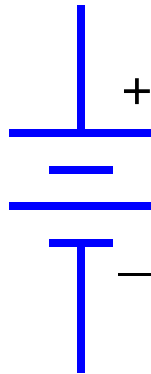
Célula solar



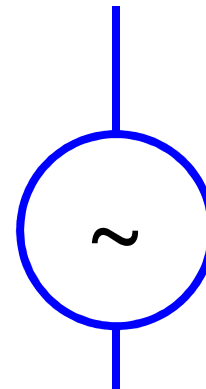
Símbolos de fontes de tensão



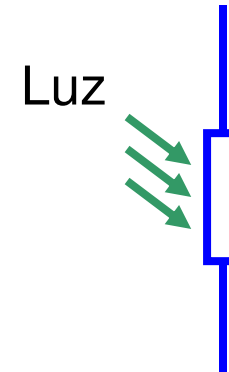
Fonte de tensão
(independente)



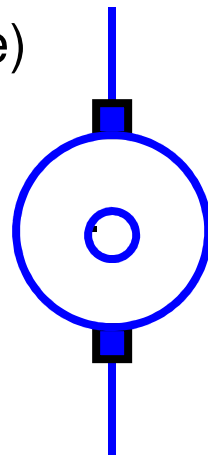
Bateria



Fonte de tensão
sinusoidal



Célula solar
(fotocélula)



Gerador
(central elétrica)

Componentes de um circuito

- **Um circuito pode conter componentes ativos e passivos**
- **Os componentes ativos** transformam energia não elétrica em energia elétrica que fornecem ao circuito (e.g. fonte de tensão ou de corrente). Têm a capacidade de promover o movimento de portadores de carga elétrica livres pelas diferentes partes do circuito.
- **Os componentes passivos não têm** capacidade de adicionar energia ao circuito. Podem contudo armazenar energia eletromagnética (e.g. condensadores e bobines) ou transformar energia elétrica noutras formas de energia (e.g. resistências).
- **Fonte de tensão/corrente:** pode ser independente (impõe aos seus terminais uma diferença de potencial (ddp)/corrente pré-estabelecida) ou dependente (impõe aos seus terminais uma ddp/corrente que é dependente do valor da ddp ou da corrente noutra parte do circuito).
- As fontes **independentes** são representadas por **círculos** e as fontes **dependentes** por **losangos**. Como veremos uma bateria tem um símbolo próprio.

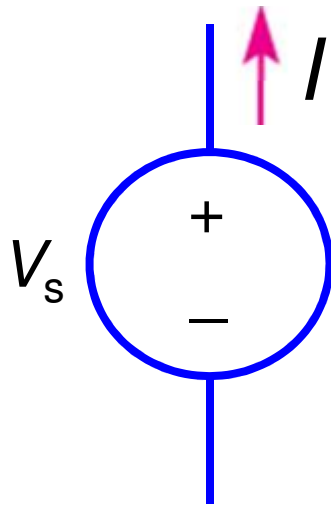
Fontes ideais vs fontes reais

- As fontes de tensão/corrente podem ser modelizadas por uma associação de fontes ideais de tensão/corrente com uma resistência (dita resistência interna).
- Não existem fontes ideais (de tensão ou de corrente), pois, por definição, forçam uma tensão ou uma corrente quaisquer que sejam as características do circuito elétrico a que estão ligadas, o que levaria a algumas impossibilidades físicas.
- Uma fonte de tensão/corrente real também dissipa energia, embora se pretenda que, comparativamente aos outros elementos do circuito dissipe muito menos.
- Numa fonte de tensão real a resistência “em associação” está em série com a fonte ideal.
- Numa fonte de corrente real a resistência em associação está em paralelo com a fonte de corrente ideal.

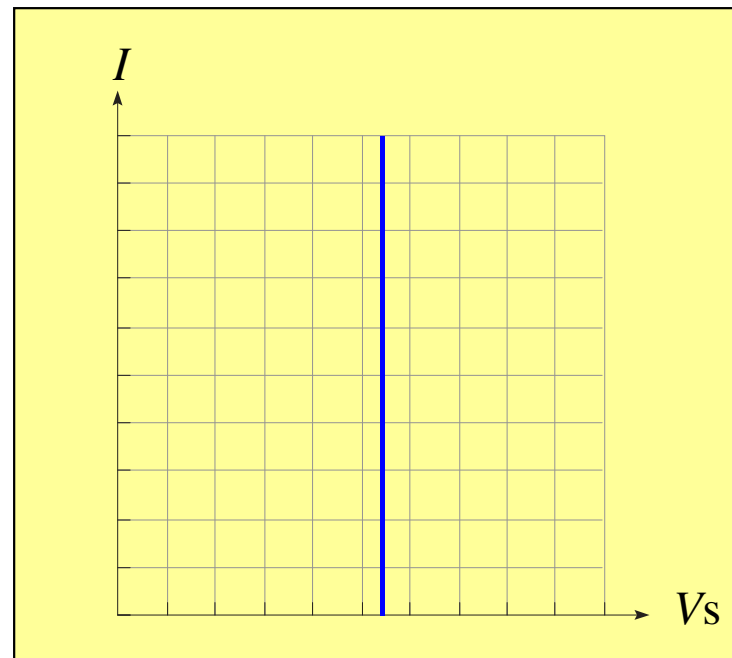
Atenção: os elementos ativos podem comportar-se em certas circunstâncias como elemento passivos, absorvendo energia em vez de fornecerem energia ao circuito (e.g. bateria automóvel ou pilhas a recarregarem).

Fonte ideal de tensão

Uma fonte de tensão ideal providencia uma tensão constante qualquer que seja a corrente “requerida” pelo circuito.

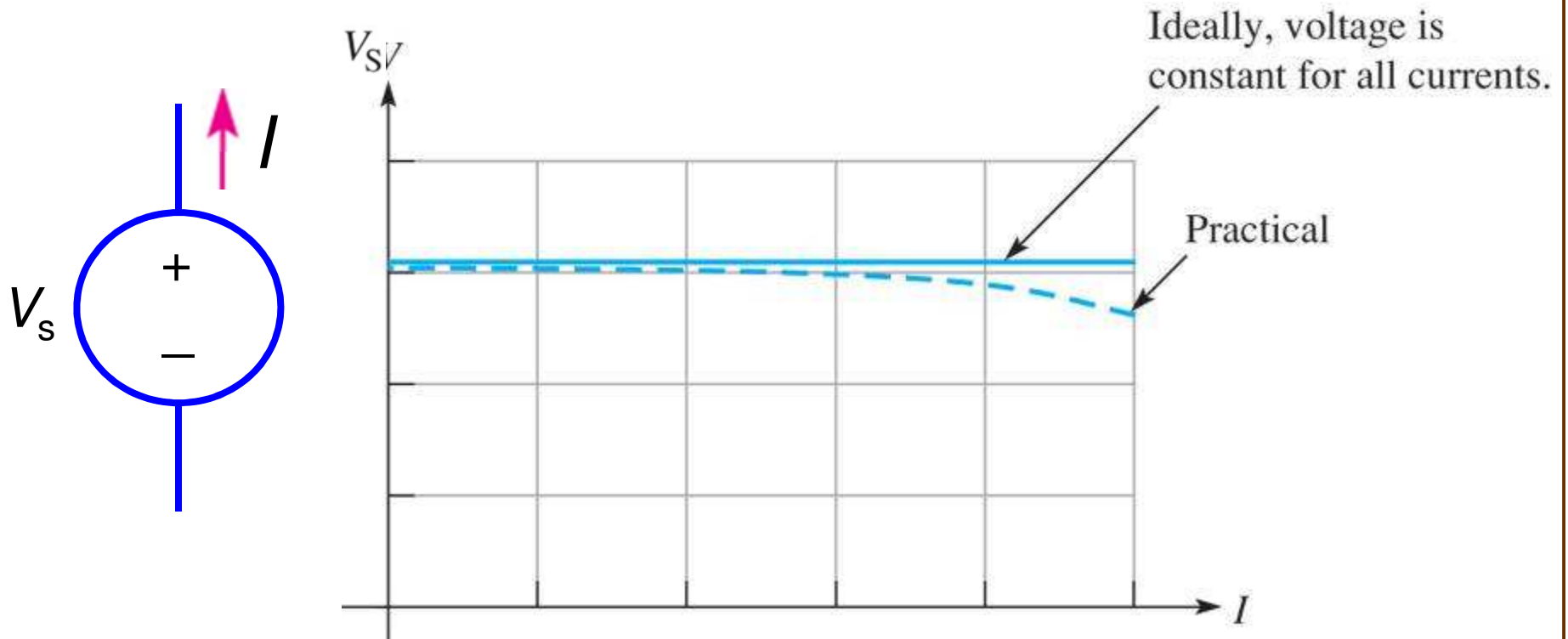


Caraterística corrente-tensão (I-V) da fonte



A caraterística corrente-tensão (I-V), representação gráfica da relação corrente-tensão (I-V) de um componente/elemento de circuito, de uma fonte de tensão ideal corresponde a uma linha vertical.

Fonte de tensão real.

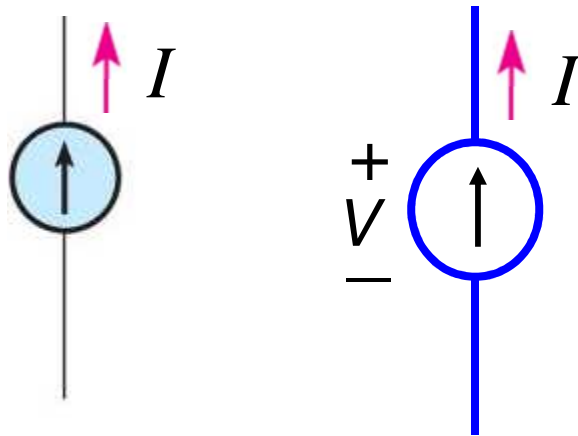


Não existem fontes de tensão ideais. Porém, as fontes de tensão comuns são, em geral, boas aproximações de uma fonte de tensão ideal, na gama de valores de corrente/carga para que foram desenhadas.

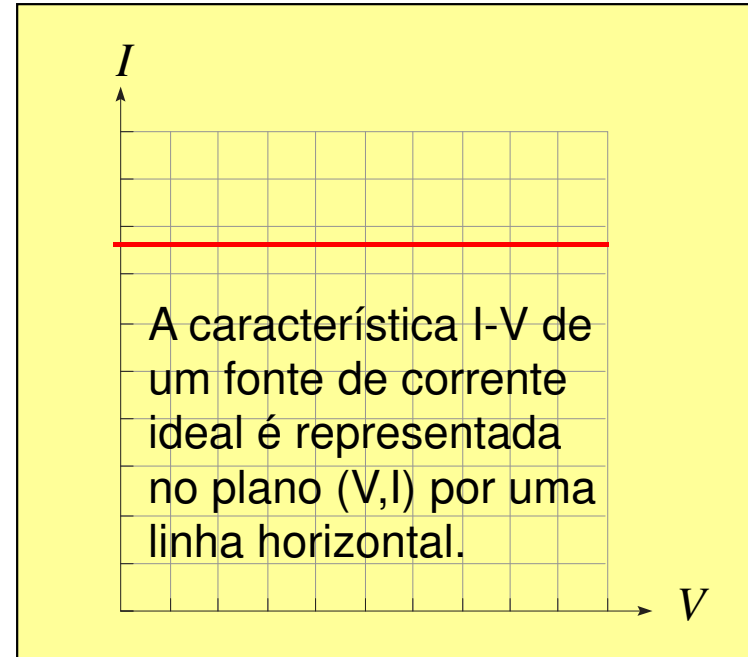
(Na figura acima está representada a características V-I, contudo, é mais comum fazer a representação I-V, onde a corrente é representada no eixo das ordenadas e a tensão no eixo das abscissas.)

Fonte de corrente ideal

Uma fonte de corrente ideal fornece uma corrente constante qualquer que seja o circuito a que se encontre ligada, isto é, qualquer que seja a carga e/ou a diferença de potencial aos seus terminais.



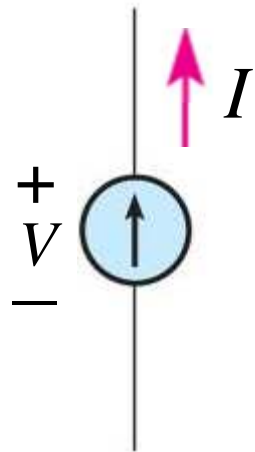
(a) Symbol



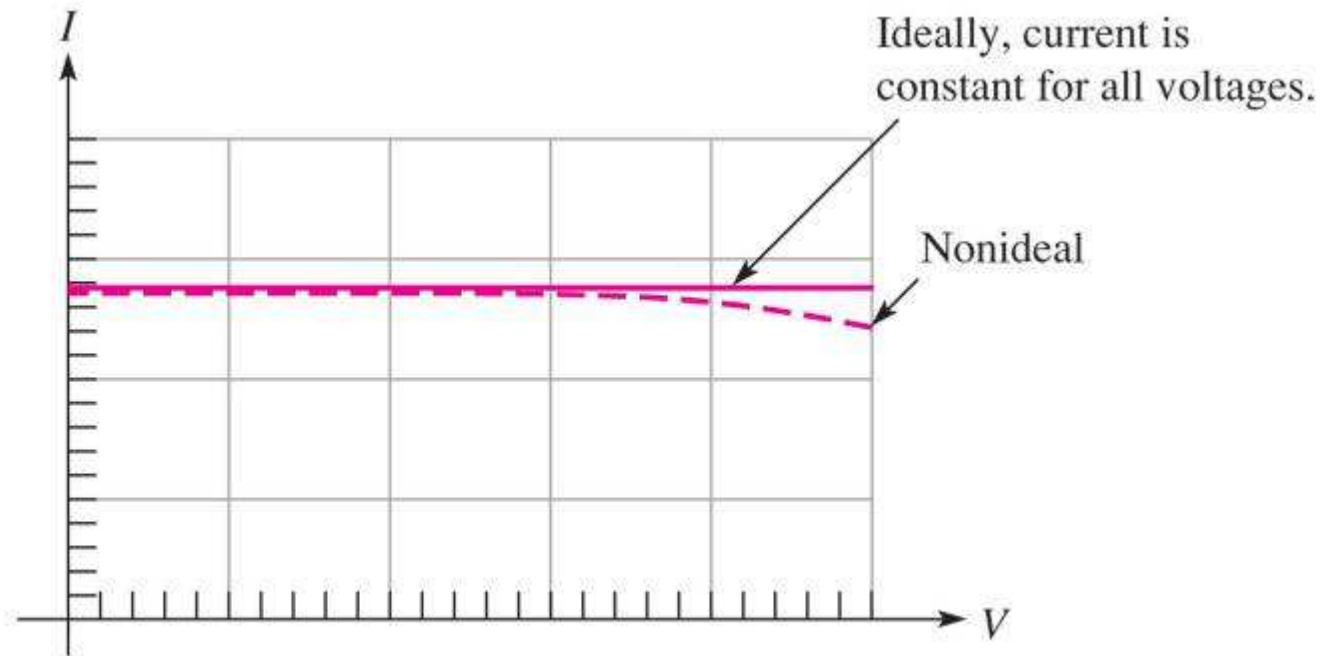
As fontes de corrente:

- fornecem uma corrente constante, que flui do seu terminal positivo
- Não ocorrem “naturalmente”, como acontece com fontes de tensão, e não são tão comuns como estas
- São sintetizadas a partir de outros circuitos elétricos contendo fontes de tensão
- Muito úteis para modelar certos dispositivos eletrônicos
- Como as fontes de tensão, também fornecem potencia elétrica ao circuito

Fonte de corrente real



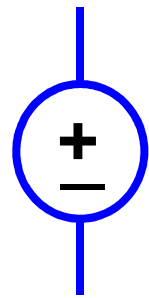
(a) Symbol



(b) IV characteristic

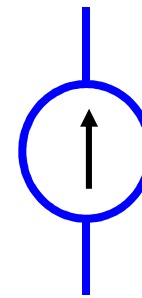
Também não existem fontes de corrente ideais. Porém, as fontes de corrente comuns são boas aproximações de uma fonte ideal, dentro da gama de valores de carga para que foram concebidas.

Fontes independentes e fontes dependentes



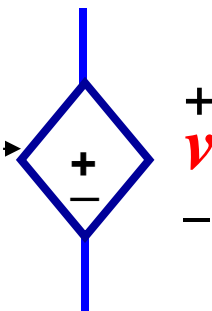
Fonte de tensão independente

Valor fixo



Fonte de corrente independente

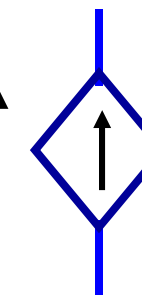
Variável de controlo



Fonte de tensão dependente

Os valores de v e i depende do valor da variável de controlo

i

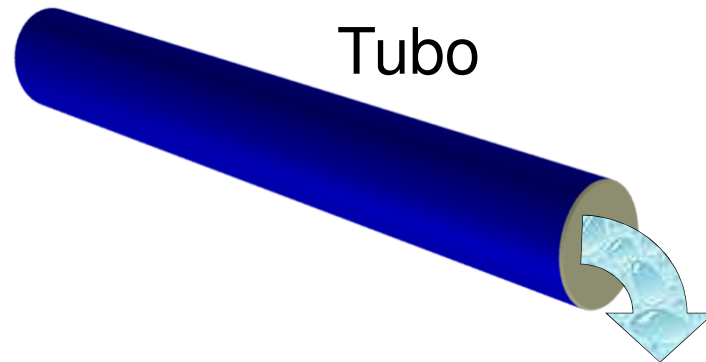


Fonte de corrente dependente

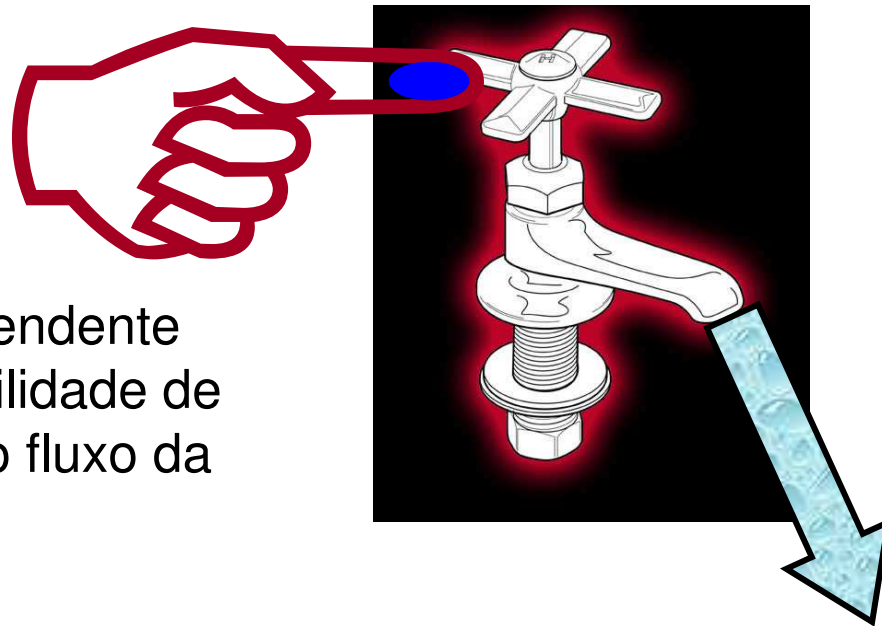
Variável de controlo

Analogia com sistemas hidráulicos

Fonte independente
(não há possibilidade de
controlar o fluxo da água
no tubo de controlo)



torneira

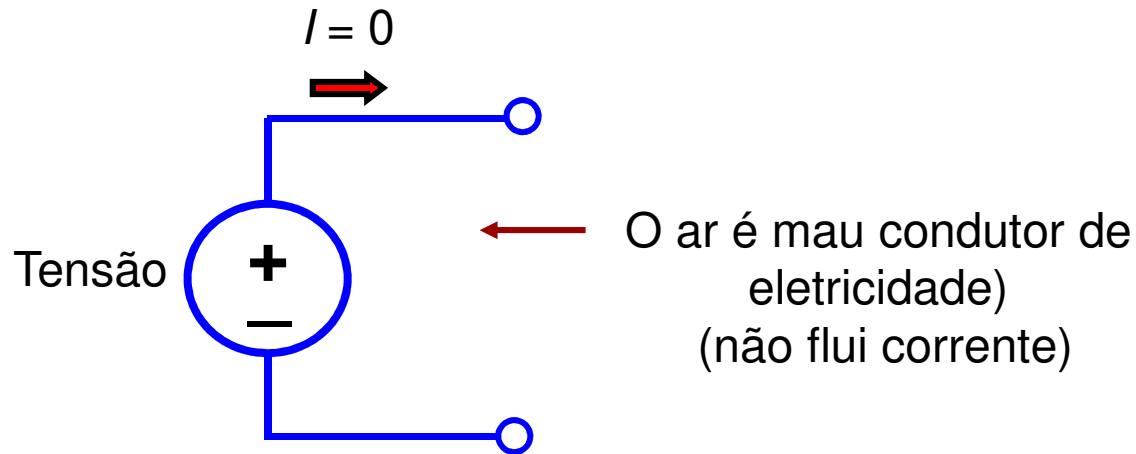


Fonte dependente
(há possibilidade de
controlo do fluxo da
água)

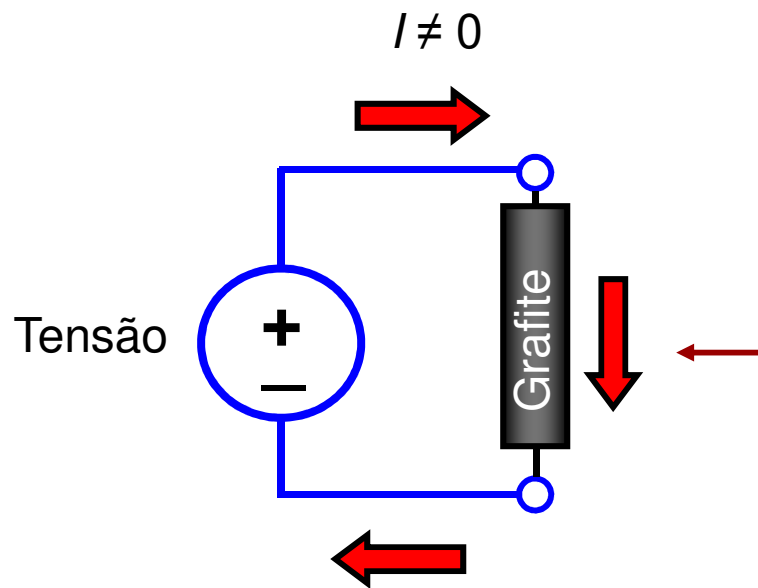
(c) 2003 Trustees of Boston University

Lei de Ohm

Condutores e isoladores

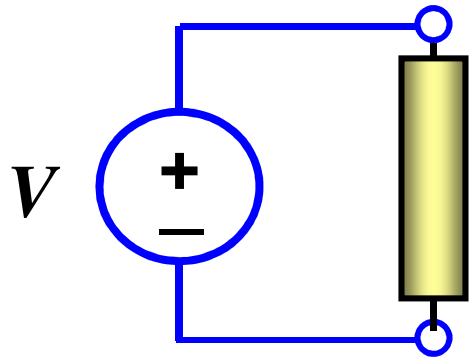


É por isso que as baterias não descarregam facilmente quando não são usadas.



Da aplicação de uma ddp resulta o movimento dos portadores de carga livres existentes no material, i.e., a aplicação de uma diferença de potencial dá origem a uma corrente que percorre a porção de grafite: a grafite é um condutor de eletricidade

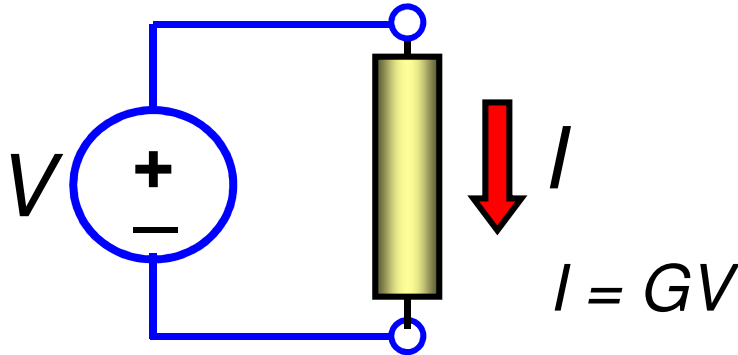
Lei de Ohm



Componente “resistivo” desconhecido
(Assume-se que os fios são “condutores perfeitos”)

- Aplica-se uma tensão V aos terminais do elemento desconhecido.
- A aplicação da tensão V induz uma corrente i no circuito: $i = f(V)$
- Verifica-se que o elemento desconhecido limita a quantidade de corrente que flui no circuito (se, por exemplo, duplicarmos o comprimento do elemento, a intensidade da corrente reduz-se a metade do valor anterior)
- Porque o elemento limita a corrente no circuito diz-se que se opõe à passagem de corrente, atuando como uma **resistência** ao fluxo de carga.
- Um elemento com este comportamento é caracterizado por uma grandeza designada **condutância**, símbolo G e unidade SI siemens, símbolo S.

Lei de Ohm



- Fonte de tensão – ddp V
- Elemento – condutância G
- Efeito da ddp – corrente I

$$I = G V$$

condutância



- A **resistência** (R) de um elemento é definida como o recíproco (inverso) da condutância G (unidade SI: ohm, símbolo Ω):

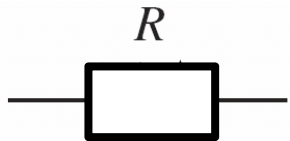
$$R = \frac{1}{G} \text{ (ohm)}$$

- A lei de Ohm também pode ser escrita usando R em vez de G :

$$I = \frac{V}{R}$$

Resistência e condutância, símbolos de resistência

Símbolos comuns para resistência



A grandeza resistência é uma medida da oposição à passagem de corrente, e tem como unidade SI o ohm (Ω).

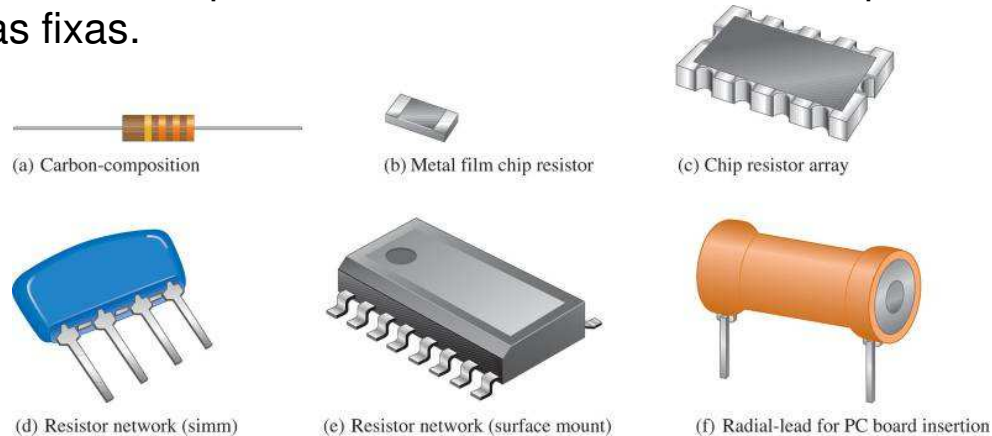
A condutância é o recíproco (inverso) da resistência:

$$\text{siemens (S)} \longrightarrow G = \frac{1}{R} \longleftarrow \text{ohm } (\Omega)$$

Um ohm (1Ω) é a resistência de um elemento quando a aplicação da ddp de um volt (1 V) resulta na corrente de um ampere (1 A) através do elemento.

Resistências fixas

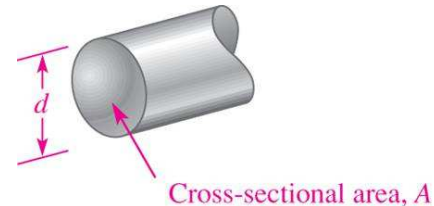
Componentes desenhados para ter um valor de resistência específico são conhecidos como resistências fixas.



Resistência de um fio

Às vezes, a resistência dos fios condutores deve ser tida em conta. A resistência de um fio de um material com resistividade ρ pode ser estimada usando a equação:

$$R = \frac{\rho l}{A}$$



onde ρ é resistividade expressa em $\Omega\cdot\text{m}$
 l é o comprimento do fio
 A é a área da secção transversal do fio

Qual é a resistência de um fio de cobre com diâmetro de **0,644 mm** e **100 m** de comprimento?

A área da secção reta do fio é $0,326 \text{ mm}^2$; assumindo que a resistividade do cobre é $1,72 \times 10^{-6} \Omega\cdot\text{cm}$, obtém-se:

$$R = \frac{\rho l}{A} = \frac{1,72 \times 10^{-6} \Omega\text{m} \times 100 \text{ m}}{0,326 \times 10^{-6} \text{ m}^2} = 5,28 \Omega$$

Condutividade e resistividade elétricas

Classificação dos materiais quanto à condutividade elétrica:

- Condutores (prata, cobre, alumínio, ouro, ...)
- Semicondutores (silício, germânio, arsenieto de gálio, ...)
- Isoladores (madeira, sílica, plástico, ...)

Resistividade (recíproco da condutividade) elétrica de algumas substâncias:

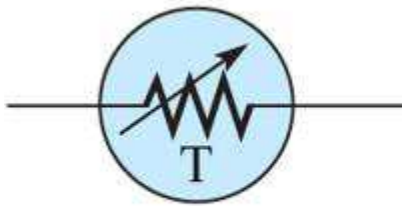
Condutores: prata ($1,47 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$), cobre ($1,72 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$), ouro ($2,44 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$), alumínio ($2,75 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$), tungstênio ($5,25 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$), aço ($20 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$), chumbo ($22 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$), mercúrio ($95 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$).

Semicondutores: grafite pura ($3,5 \times 10^{-5} \Omega \cdot m$), germânio puro ($0,6 \Omega \cdot m$), silício puro ($2300 \Omega \cdot m$).

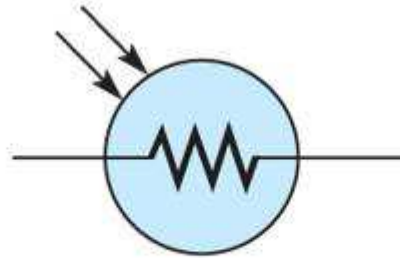
Isoladores: âmbar ($5 \times 10^{14} \Omega \cdot m$), vidro ($10^{10} - 10^{14} \Omega \cdot m$), quartzo fundido ($75 \times 10^{16} \Omega \cdot m$), mica ($10^{11} - 10^{15} \Omega \cdot m$), madeira ($10^8 - 10^{11} \Omega \cdot m$).

As características eletrônicas/optoeletrônicas dos materiais dependem das condutividades elétrica e térmica, capacidade de emissão e detecção de luz, etc, que por sua vez dependem das estruturas atômica e cristalina, da densidade de elétrons livres, etc.

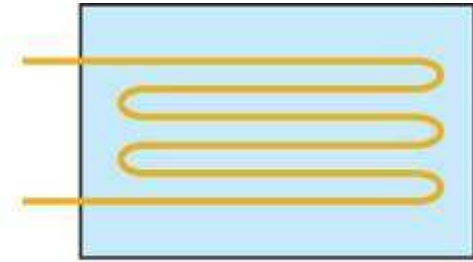
Símbolos de resistências sensíveis à temperatura, à luz e à pressão



(a) Thermistor

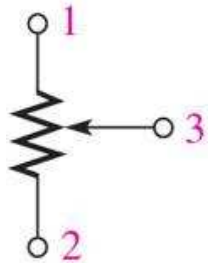


(b) Photoconductive cell



(c) Strain gauge

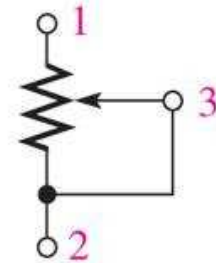
Símbolos de potenciómetro e reóstato



(a) Potentiometer

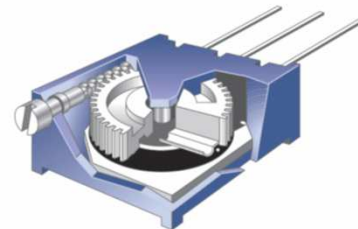
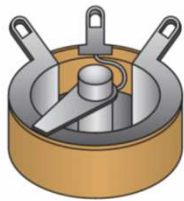
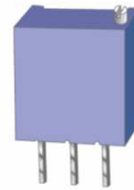
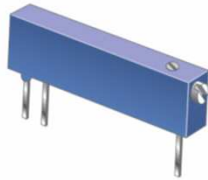


(b) Rheostat



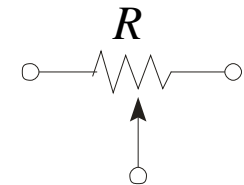
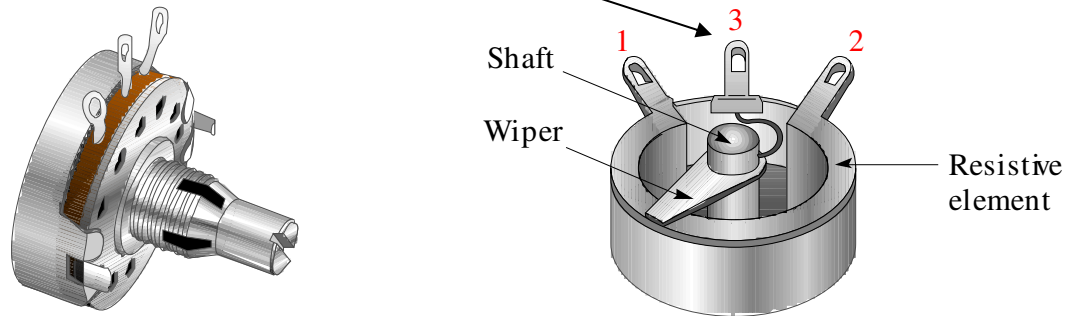
(c) Potentiometer connected as a rheostat

Tipos de potenciómetro e de reóstato

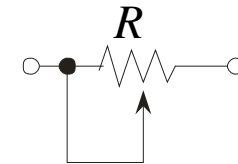


Resistências variáveis

Potenciômetros e reóstatos. O terminal central de uma resistência variável está ligado à palheta (“wiper”).



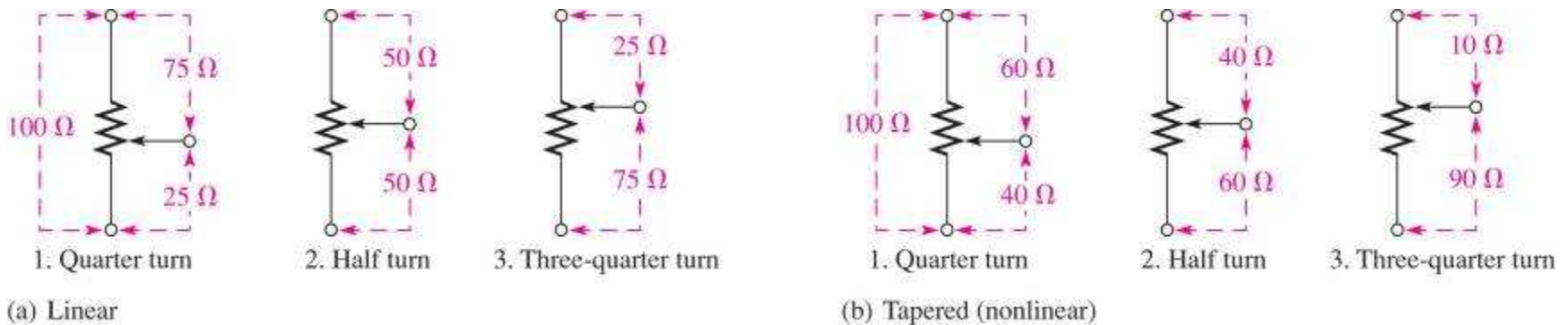
Potenciômetro



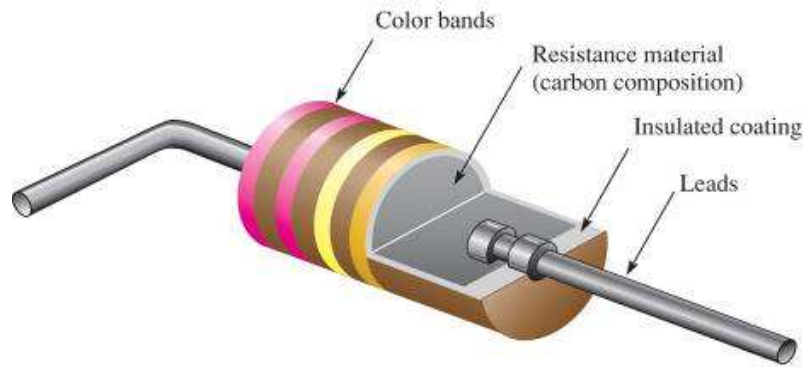
Reóstato

Para transformar um potenciômetro num reóstato, curto circuita-se um dos terminais laterais com o central (“wiper”).

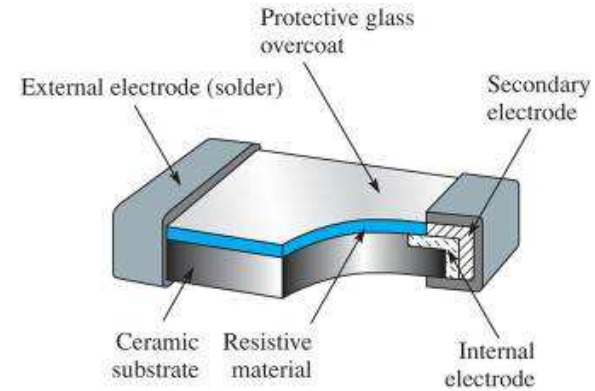
Exemplos de potenciômetros: (a) linear (b) não-linear



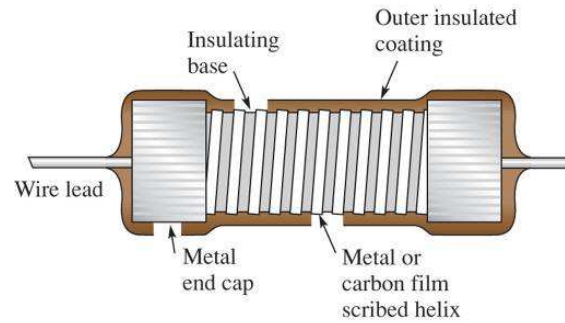
Diferentes tipos de resistência



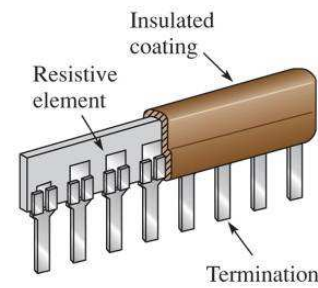
(a) Cutaway view of a carbon-composition resistor



(b) Cutaway view of a tiny chip resistor



(a) Film resistor showing spiraling technique



(b) Resistor network



Fluxo de potência (energia) em circuitos elétricos

Energia e potência

A potencia (P) de um sistema corresponde à taxa temporal com que esse sistema realiza trabalho (W).

$$P = \frac{W}{t}$$

A unidade SI de potência é o watt (símbolo W), joule/segundo (J/s)

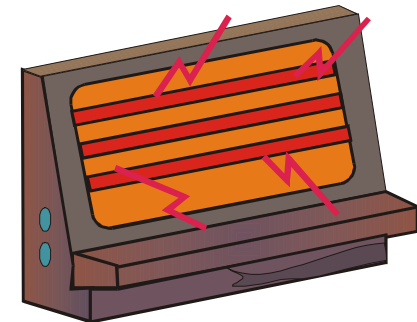
Uma unidade de energia muito comum nas nossas vidas é o quilowatt-hora (kWh): 1 kWh correspondem a 3.6×10^6 J. Ter em atenção que o kWh não é uma “unidade” de potência.

Quantos kWh consume um aquecedor de 1200 W durante 20 minutos?

$$1200 \text{ W} = 1.2 \text{ kW}$$

$$20 \text{ min} = 1/3 \text{ h}$$

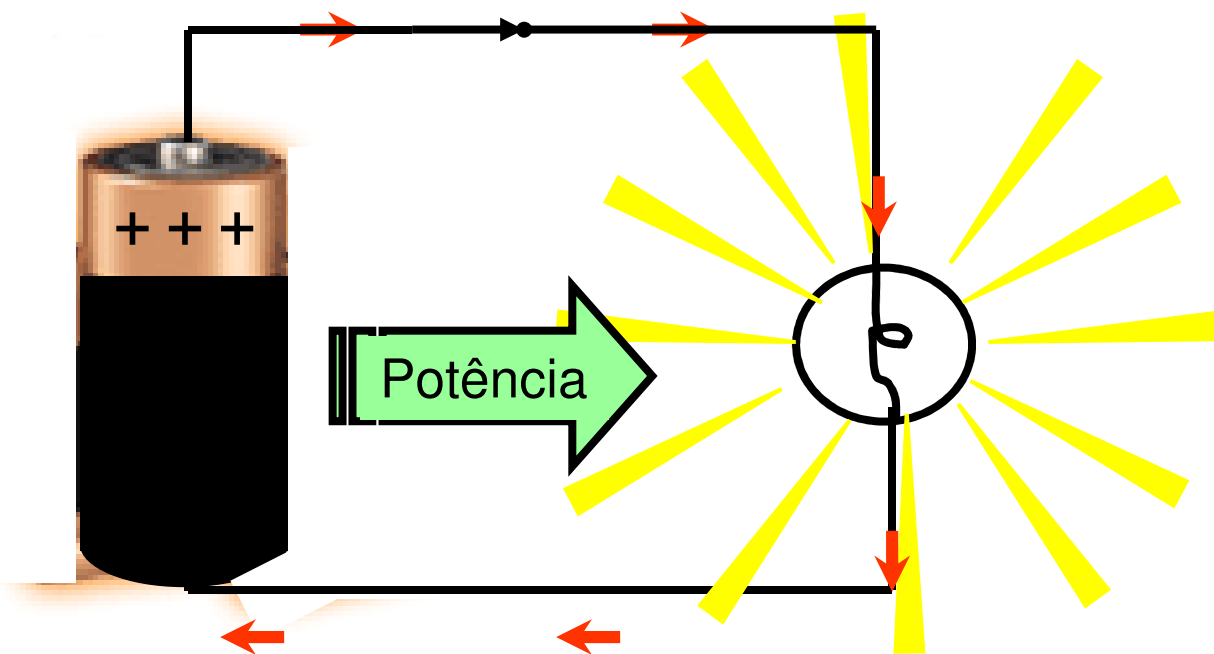
$$1.2 \text{ kW} \times 1/3 \text{ h} = 0.4 \text{ kWh}$$



Fluxo de potência num circuito elétrico

Em circuitos elétricos: Energia = tensão \times carga $W = V Q$

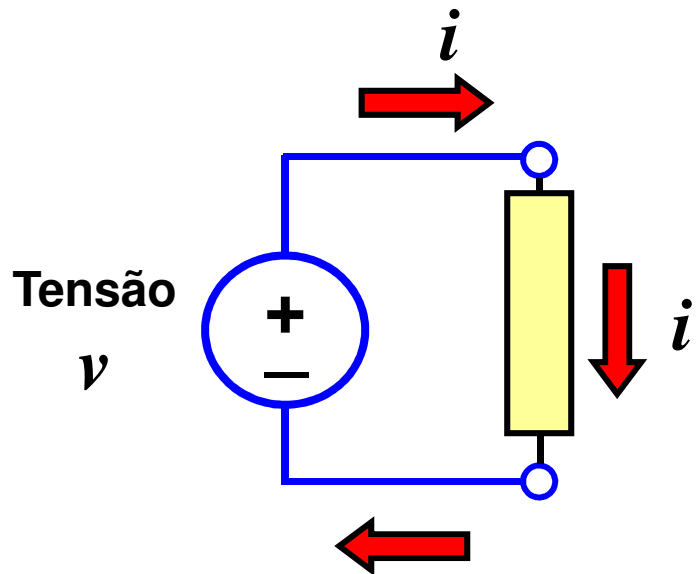
O fluxo de potência é igual à taxa de transferência de energia



$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{dVQ}{dt} = \frac{VdQ}{dt} = VI$$

Fluxo de potência =
tensão \times corrente

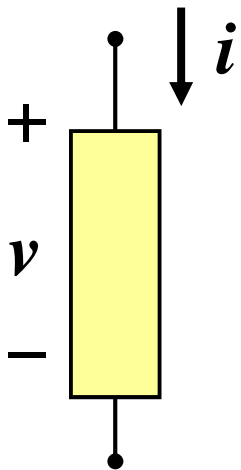
Potência elétrica



Da aplicação de uma ddp v resulta o movimento dos portadores de carga livres existentes no circuito, i.e., a aplicação de uma diferença de potencial dá origem a uma corrente que percorre o elemento i .

Convenção:

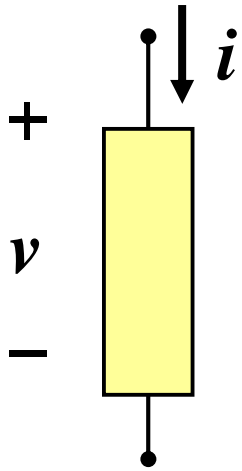
a variável corrente i é considerada positiva quando entra pelo terminal positivo (+) do componente/elemento.



Potência fornecida ao componente $P = v i$

Como a corrente entra pelo terminal positivo é fornecida energia/potência ao elemento.

Potência elétrica



Potência fornecida ao componente

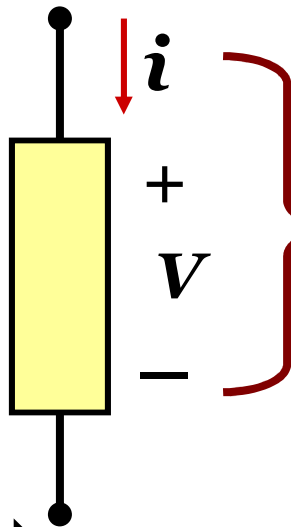
$$P = v i$$

A variável corrente i é considerada positiva quando entra pelo terminal positivo (+) do componente.

- A unidade SI de tensão é o **volt (V)**
- A unidade SI de corrente é o **ampere (A)**
- Como as correntes em eletrônica são geralmente pequenas, normalmente são referidas em **miliampere (mA)**
- A unidade SI de potência é o **watt (W)**
- 1 watt “=“ 1 volt \times 1 ampere

$$1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}$$

Fluxo de potência: convenção de sinais

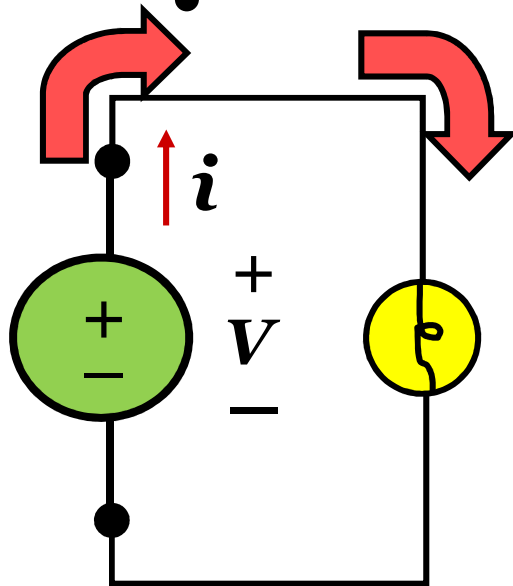


A variável corrente i é considerada positiva quando entra pelo terminal positivo (+) do componente.

Convenção de sinal para componentes passivos

$$P = Vi$$

Se a corrente é positiva é fornecida potência ao componente (a potência *flui* para o componente)



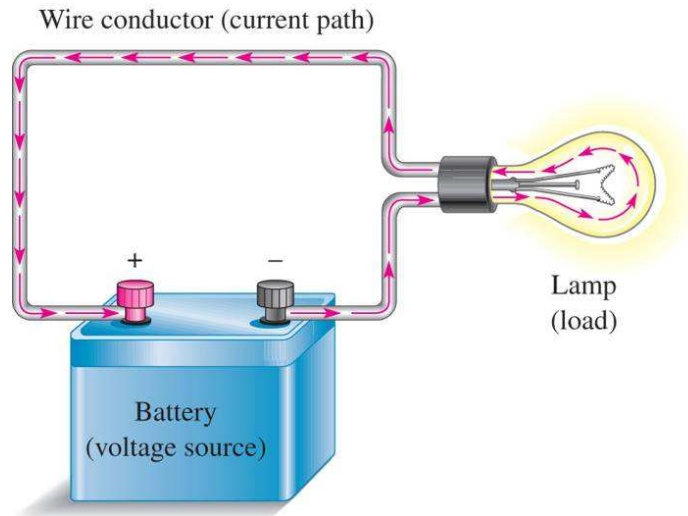
Como a variável corrente i é considerada positiva quando entra pelo terminal positivo (+) do componente, numa fonte de tensão a corrente fornecida pela fonte é, portanto, negativa. Neste caso, a potência é negativa e, portanto, **a potência flui para “fora” da fonte**. É para isso que a fonte está no circuito.

$$P = Vi$$

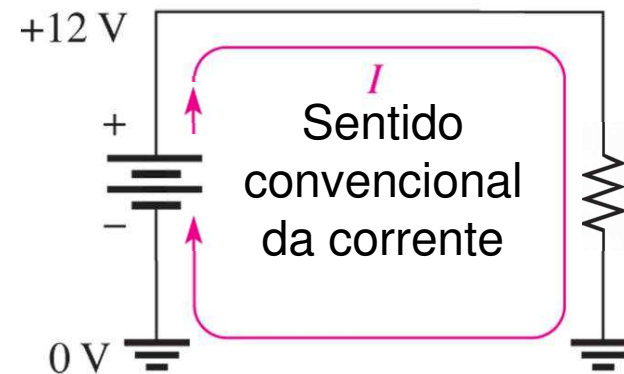
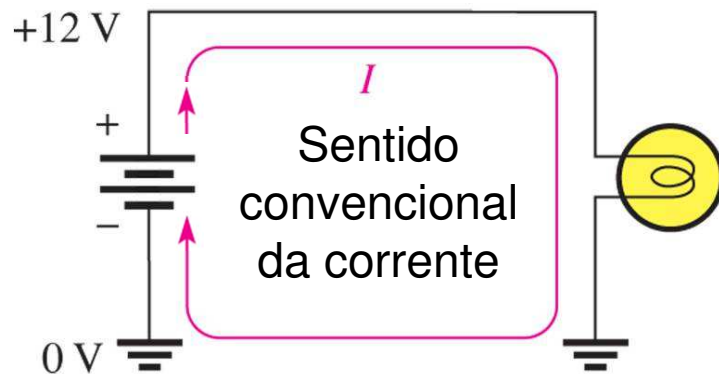
A potência de uma fonte de tensão é negativa (a corrente tem o sentido oposto ao da queda de tensão): **a fonte fornece energia ao circuito (carga)**.

Potência dissipada numa resistência

Circuito elétrico simples com uma resistência



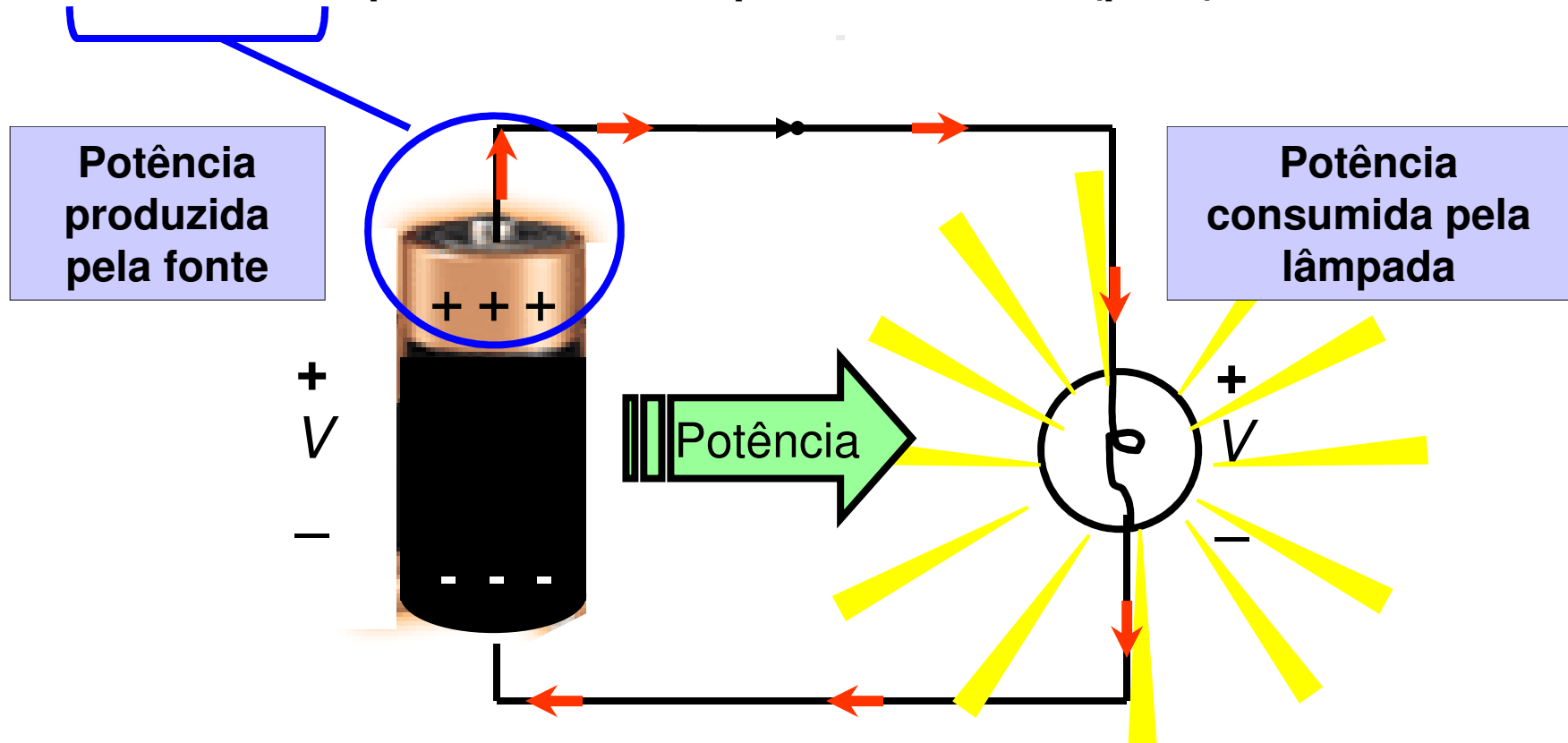
Uma lâmpada pode ser representada por uma resistência.



Fluxo de potência

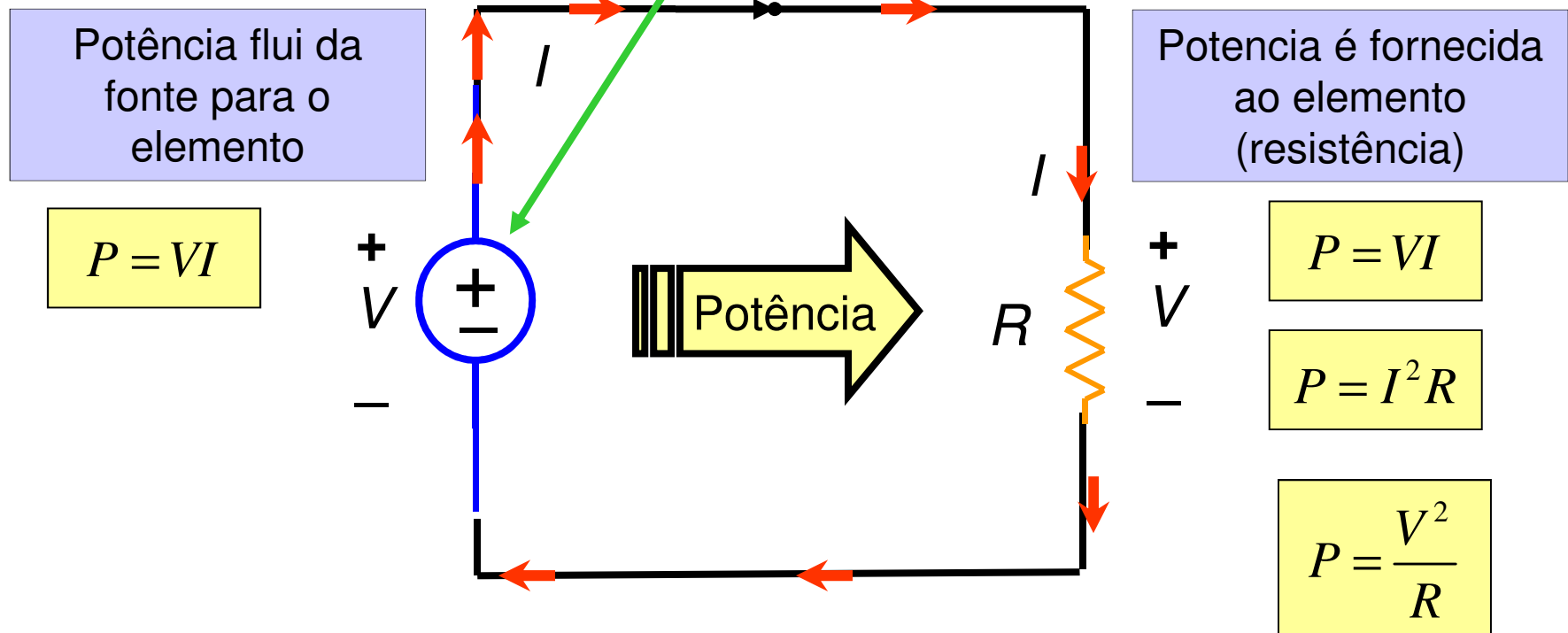
Fluxo de potência = tensão \times corrente $P = V I$

A corrente flui a partir do terminal positivo da fonte (pilha)



Fluxo de potência num circuito

Numa fonte de tensão a corrente flui do terminal positivo para o negativo.



Fluxo de potência = tensão \times corrente: $P = VI$

Potência, tensão, corrente e resistência

A taxa a que a energia é dissipada numa resistência pode ser determinada por uma das seguintes expressões matemáticas:

$$P = I^2 R$$

$$P = VI$$

$$P = \frac{V^2}{R}$$

Estas expressões são por vezes designadas por lei de Watt.

Qual é a potencia dissipada numa resistência de 27Ω se a corrente que a percorre é 0.135 A ?

Substituindo os valores da corrente e da resistência na primeira expressão $P = I^2 R$, obtém-se:

$$\begin{aligned} P &= I^2 R \\ &= (0.135 \text{ A})^2 (27 \Omega) \\ &= 0.49 \text{ W} \end{aligned}$$

Qual é a potencia dissipada num aquecedor percorrido por uma corrente de 12 A fornecida por uma fonte de tensão 230 V ?

A resolução direta faz-se usando a expressão $P = IV$.

$$P = I \cdot V = (12 \text{ A})(230 \text{ V}) = 2760 \text{ W}$$

Potência, tensão, corrente e resistência

Qual é a potencia dissipadas num resistência de 100Ω quando existe uma ddp de 5 V aos seus terminais?

A resolução direta tira partido da expressão: $P = \frac{V^2}{R}$

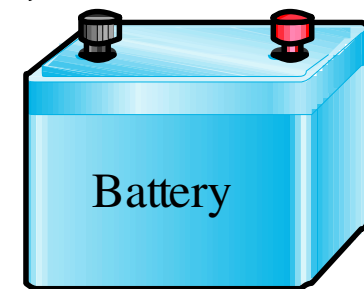
$$P = \frac{V^2}{R}$$
$$= \frac{(5 \text{ V})^2}{100 \Omega} = 0.25 \text{ W}$$

É importante ter presente que as resistências usadas para operação em sistemas de baixa tensão devem ser capazes de suportar os níveis de dissipação de energia típicos destes sistemas. As resistências usadas nas atividades laboratoriais da UC podem dissipar até 330 mW

Potência vs energia: ampere-hora

A vida útil de uma bateria é dada geralmente em ampere-hora (Ah). Vários fatores influenciam a vida útil da bateria (incluindo a corrente debitada, a idade da bateria, a temperatura de operação, etc.), sendo por isso uma aproximação.

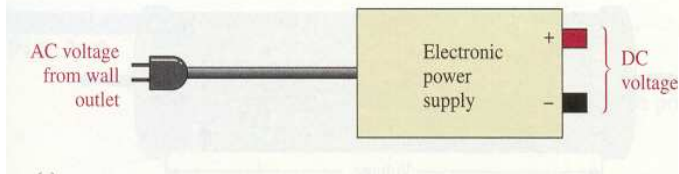
Quanto tempo se pode uma bateria automóvel com a capacidade de 10 Ah debitar uma corrente de 0.5 A ? **20 h**



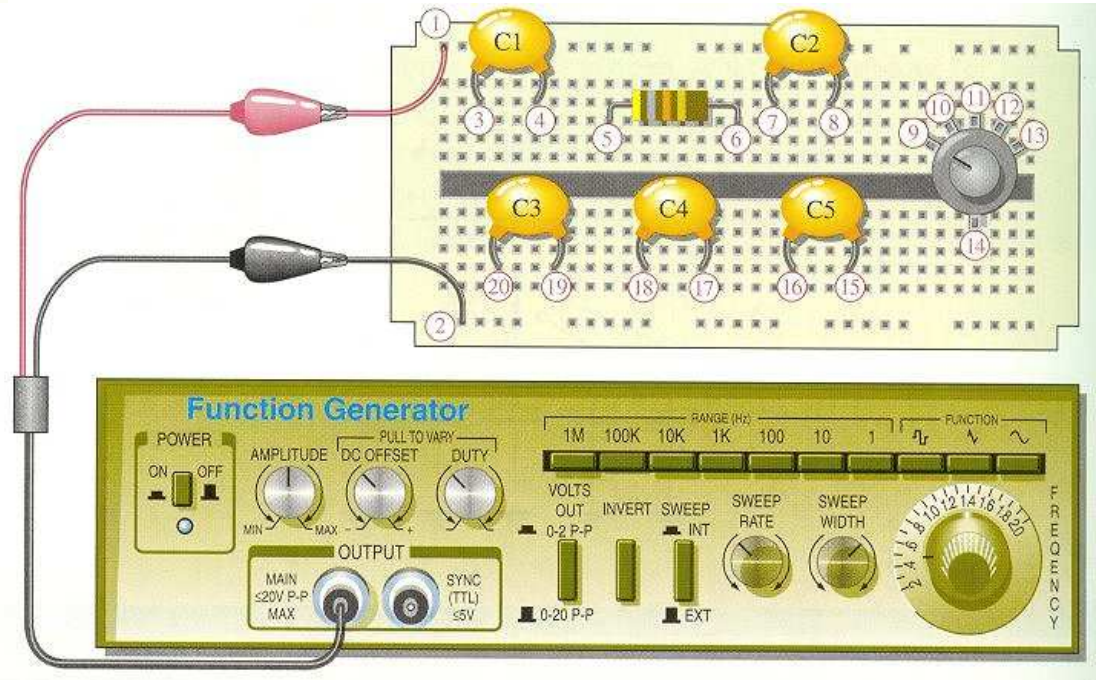
Medir tensão
o ponto de referência (terra/comum) do circuito

Fontes dc, geradores de sinais, pontas de prova, placa de teste, resistências e condensadores ...

Fonte cc (dc)

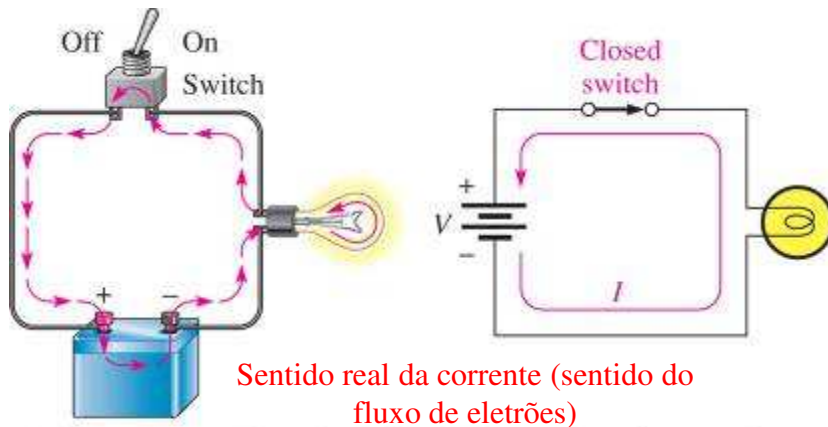


Placa de teste



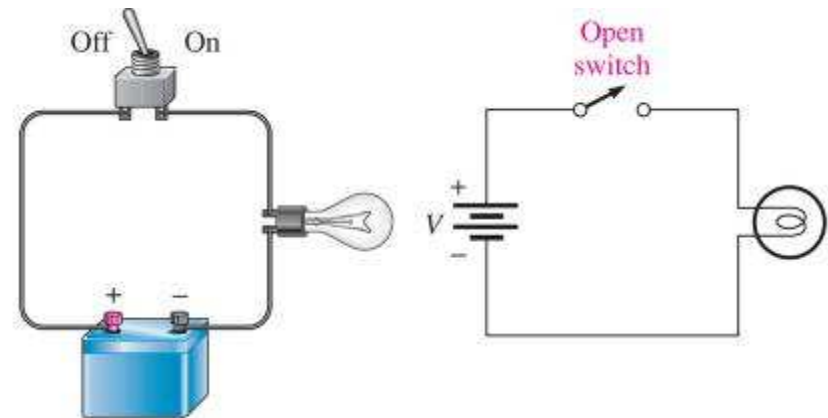
Gerador de sinais/funções

Circuito elétrico simples com “ponto de terra”



Sentido real da corrente (sentido do fluxo de elétrons)

(a) There is current in a *closed* circuit because there is a complete current path (switch is ON or in the *closed* position). Current is always indicated by a red arrow in this text.



(b) There is no current in an *open* circuit because the path is broken (switch is OFF or in the *open* position).

Símbolos de ponto de terra



(a)

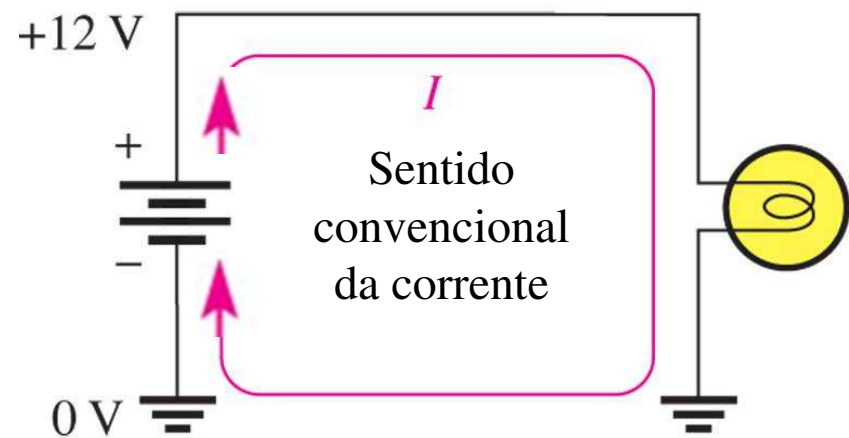


(b)



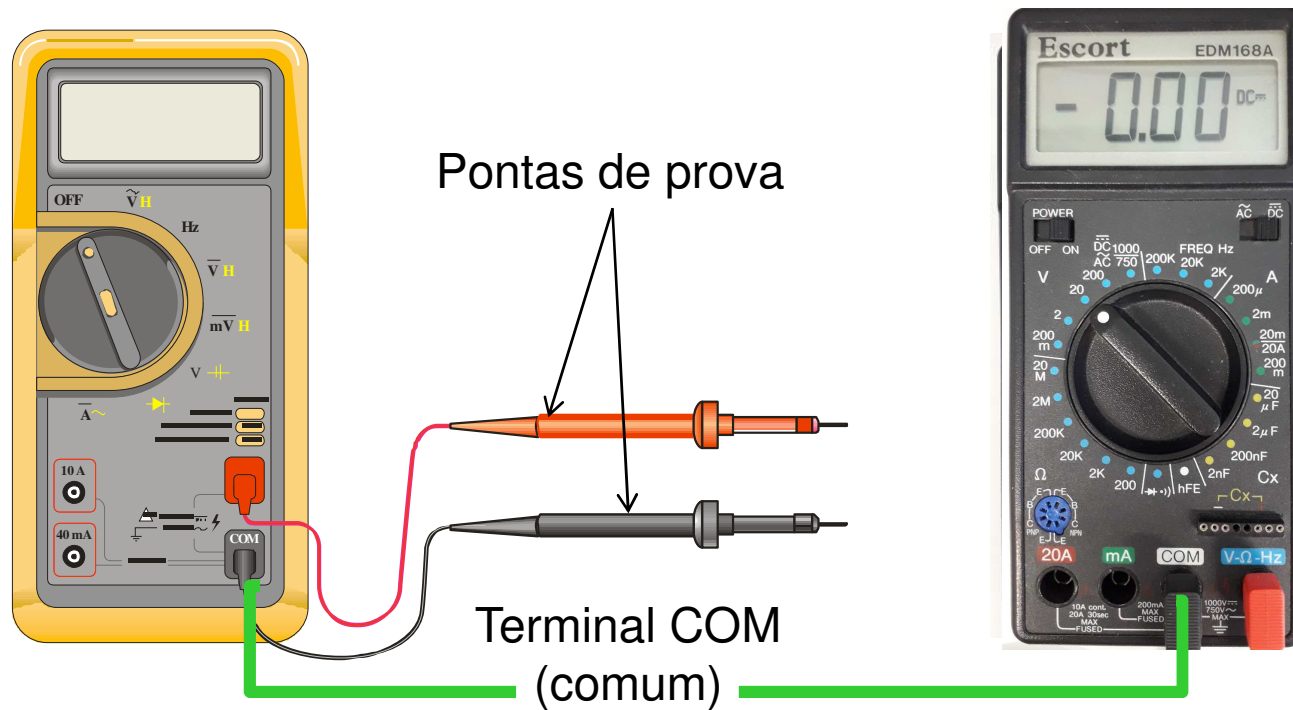
(c)

Diagrama do circuito com terra



Multímetro digital

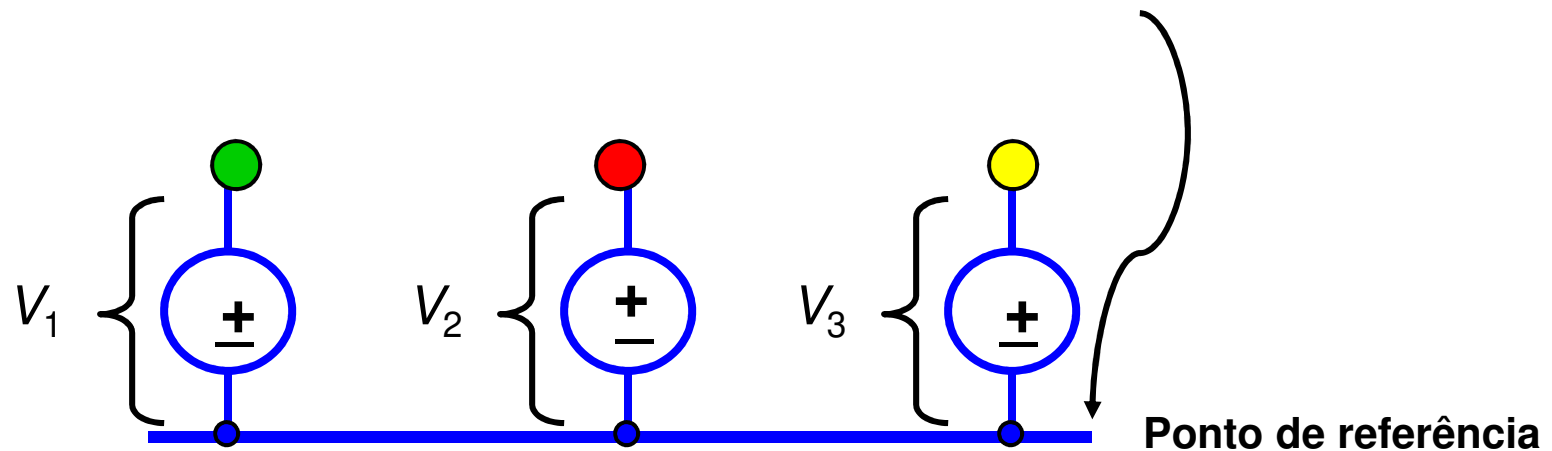
Podemos medir a tensão num circuito usando um **multímetro**.



O multímetro reúne num só aparelho a possibilidade de medir tensão, corrente [alternada (ca/ac) ou contínua (cc/dc)], resistência Nas aulas laboratoriais são usados multímetros digitais Escort EDM168A. A utilização de multímetros pressupõe conhecimentos básicos sobre escolha de terminais, selecção de grandezas a medir (tensão, intensidade de corrente, resistência, capacidade, ...), escalas e factores de escala, funcionamento em modo DC e AC.

O que é o comum/terra (“ground”) do circuito?

O comum/terra/“ground/GND” de um circuito refere-se ao terminal de referência relativamente ao qual as tensões num circuito são medidas.



Exercício: medir tensões

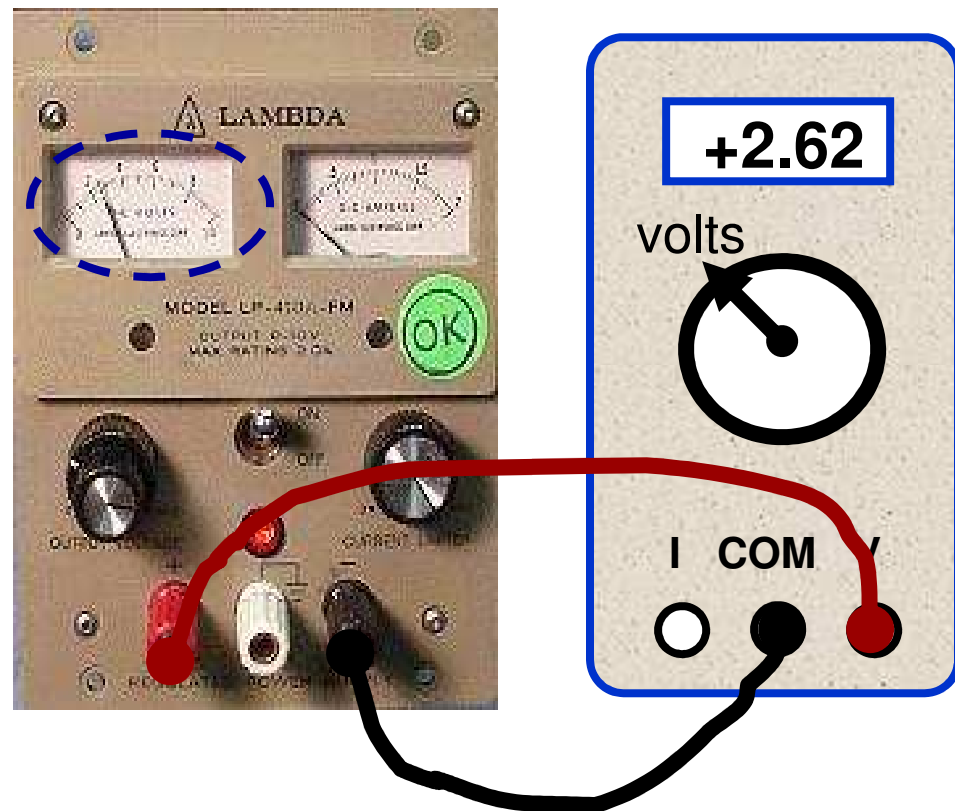
Podemos medir a tensão entre dois pontos usando um **multímetro**

Selecionar o modo voltímetro do multímetro

Conectar o terminal V do multímetro aos terminal vermelho da fonte de tensão.

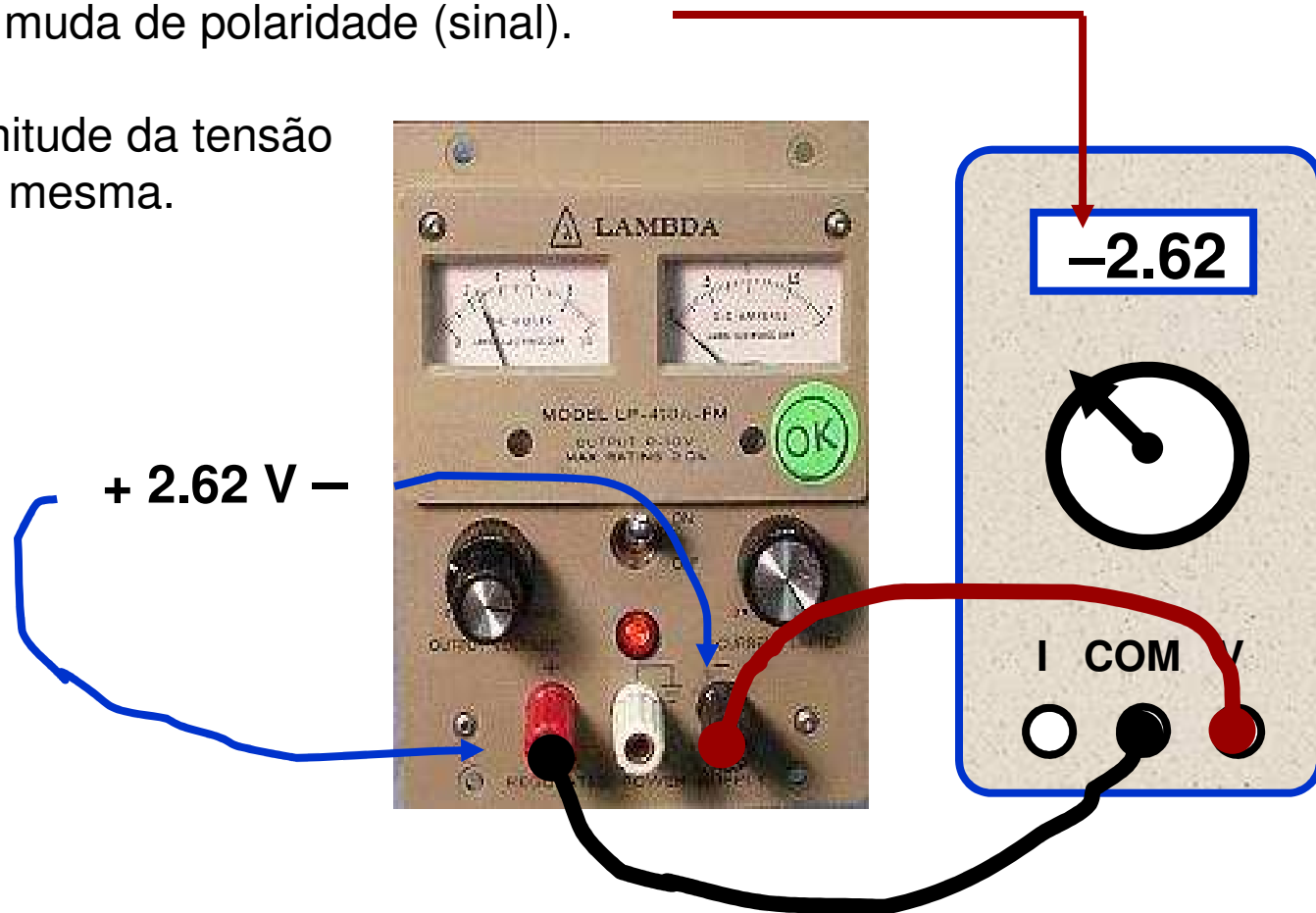
Ligar o terminal COM (comum) do multímetro ao conector de cor preta (COM) da fonte de tensão

Ler a tensão.



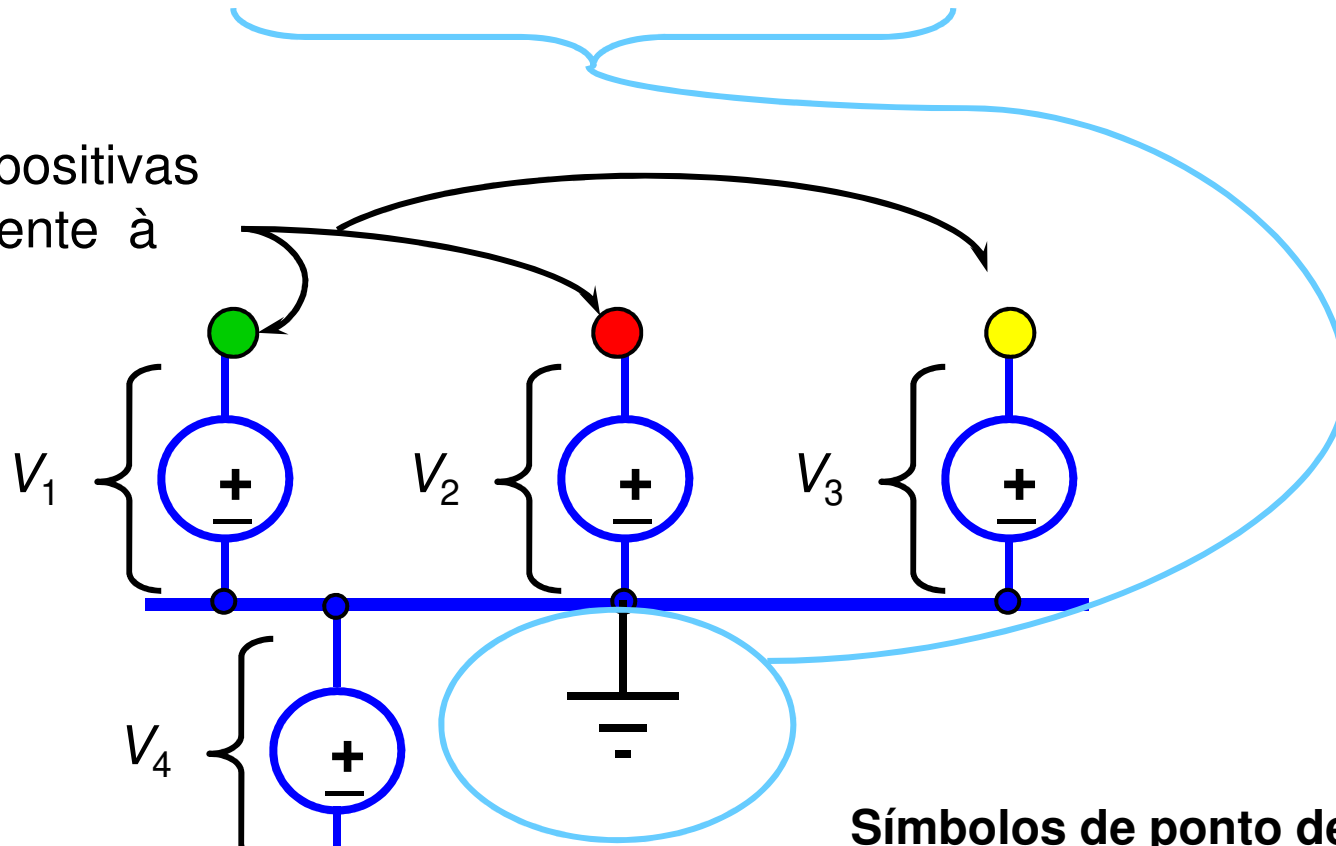
A ordem das ligações é importante?

- Se trocarmos a ordem das ligações/conexões
- O valor lido muda de polaridade (sinal).
- Mas a magnitude da tensão medida é a mesma.



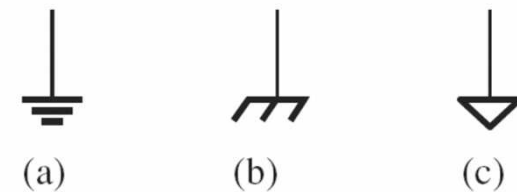
Símbolo de terra/comum num circuito

Tensões positivas relativamente à terra



Tensão negativa em relação à terra

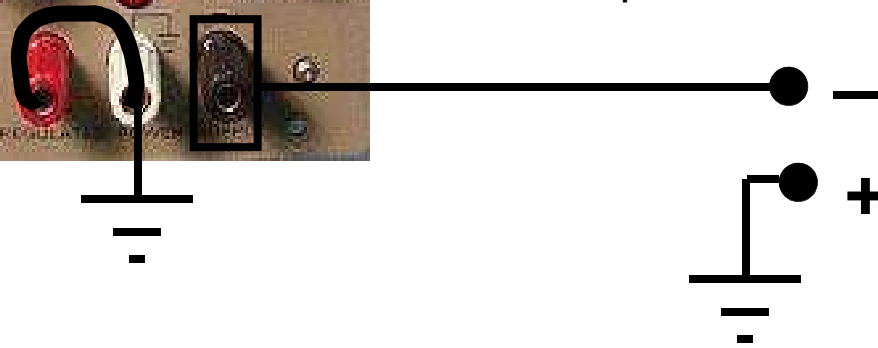
Símbolos de ponto de terra



Polaridade negativa relativamente ao comum



Se ligarmos o conector de cor vermelha à terra da fonte, os terminais de cor preta ficam com polaridade negativa.



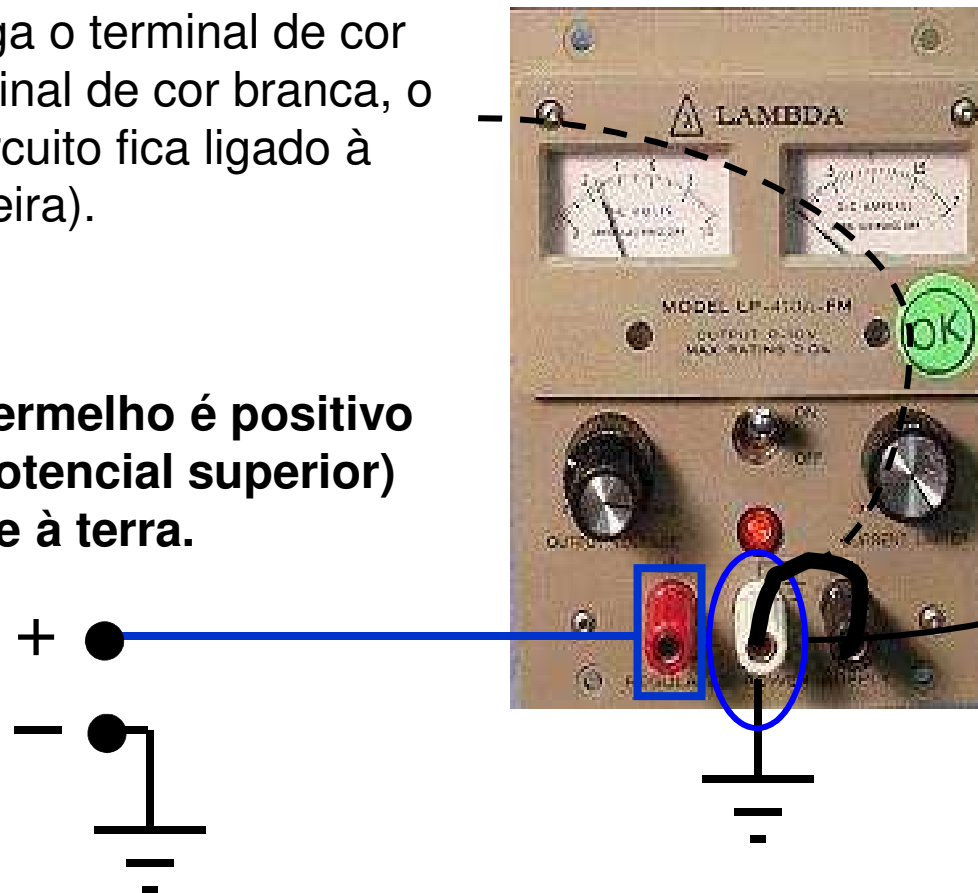
IMPORTANTE: Não realizar esta operação sem se certificar que a fonte em causa suporta esta funcionalidade.

Terra vs comum

Há fontes de tensão que apresentam, para além de terminais de cor vermelha e preta, terminais de cor branca. Os terminais de cor branca estão ligados ao cabo de terra (cabo que liga a instalação elétrica fisicamente à terra).

Quando se liga o terminal de cor preta ao terminal de cor branca, o comum do circuito fica ligado à terra (verdadeira).

O terminal vermelho é positivo (está a um potencial superior) relativamente à terra.

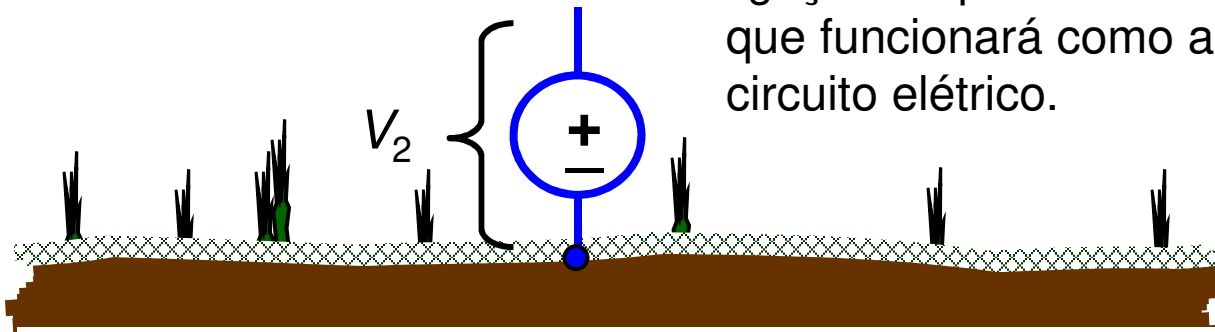


Comum e a “terra da Terra”



A Terra funciona como um grande nó que pode ser considerado um “comum”/“terra”.

Por isso, é sempre desejável que haja uma ligação do ponto comum do circuito à **terra**, que funcionará como a terra/comum do circuito elétrico.



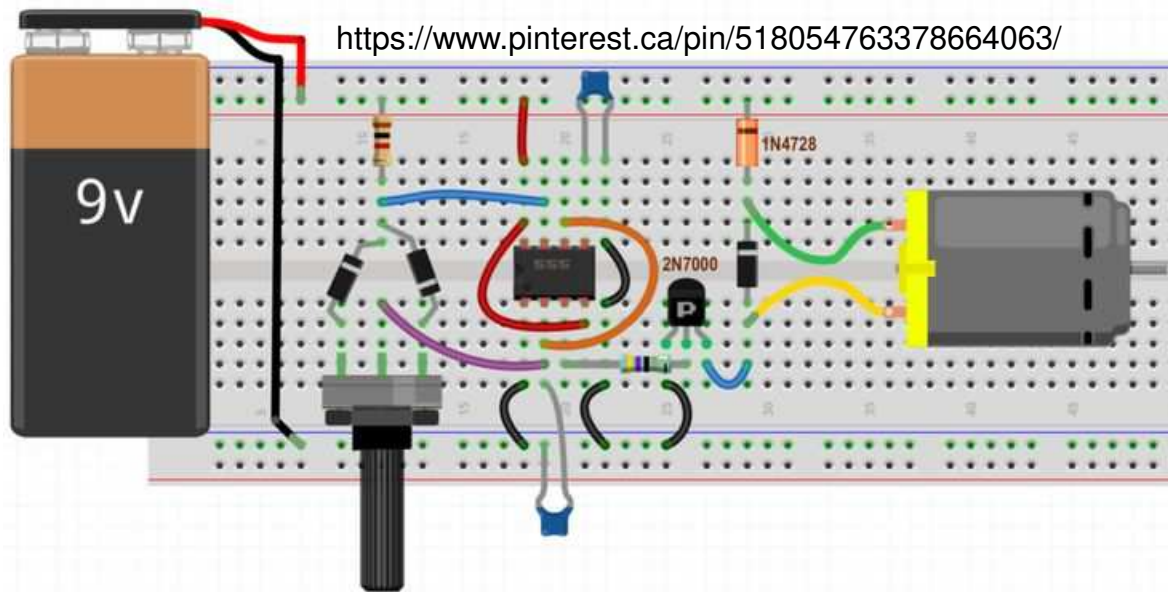
Nos equipamentos elétricos a ligação do comum do respectivo circuito à terra é geralmente realizada via um terceiro fio nos cabos de alimentação dos equipamentos.



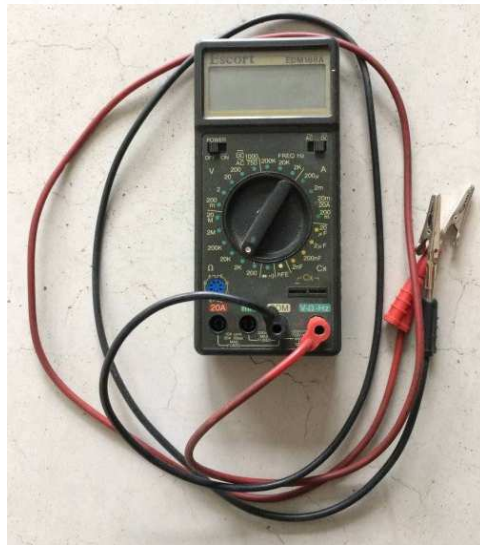
LEAP Online © 2002 BostonUniversity

Medir resistências

Medir a resistância de uma resistência



Para medir o valor da resistância de uma resistência, retira-se o componente do circuito ou coloca-se pelo menos um dos seus terminais “flutuante”.



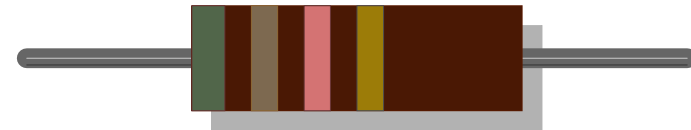
Falha de resistências

A falha de resistências é rara exceto quando são submetidas a stress térmico elevado. A falha devido a efeitos térmicos tende a descolorir ou queimar a resistência.

Pode testar-se o estado da resistência medindo o valor da resistência usando um ohmímetro, desconectando um dos contatos do circuito, por forma a que fique isolada.



Normal



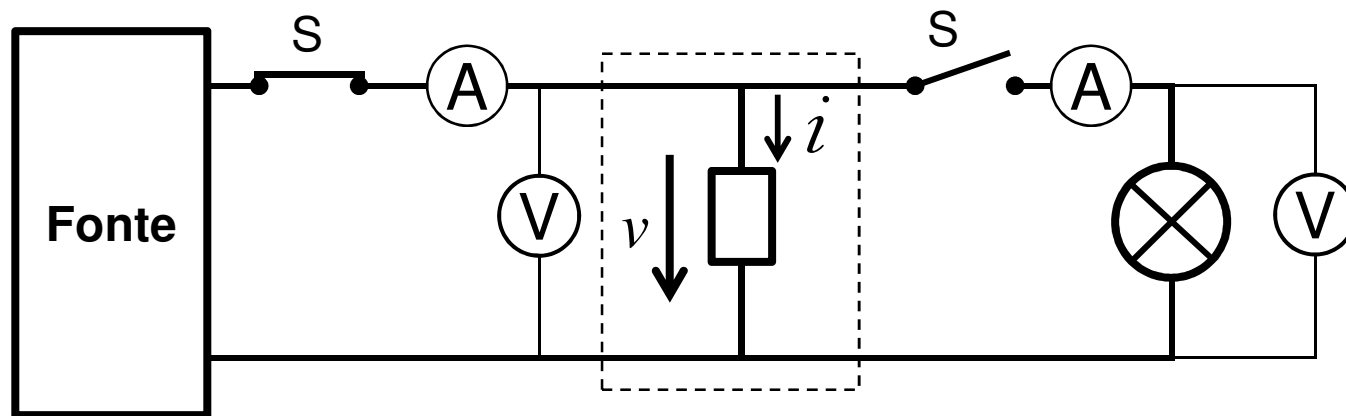
sobreaquecida

Se a falha é devida a efeitos térmicos, escolher uma resistência capaz de dissipar níveis mais elevados de potência.

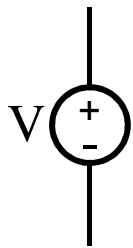
As resistências da série E12, usadas nos trabalhos, podem dissipar até 330 mW (0.33 W) de potência.

Circuito Elétrico

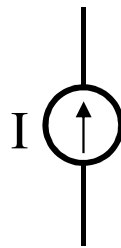
- Em muitos exemplos iremos considerar circuitos simples constituídos por uma fonte ideal (de tensão ou de corrente), componente(s), e uma lâmpada cujo símbolo é \otimes , ou elementos equivalente e ainda um ou mais interruptores (representados geralmente pela letra S) e aparelhos de medida (voltímetros – V - que medem ddp; e amperímetros - A - que medem intensidade de corrente elétrica. (Num circuito elétrico uma lâmpada comporta-se como um elemento resistivo, i.e., uma resistência).



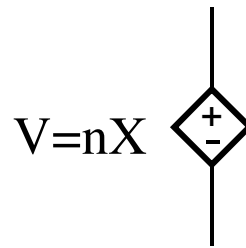
Alguns símbolos elétricos correntemente usados nos diagramas elétricos



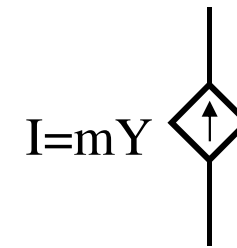
Fonte de tensão independente



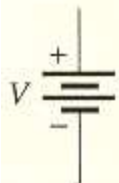
Fonte de corrente independente



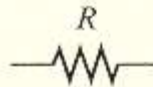
Fonte de tensão dependente controlada por X (tensão/corrente)



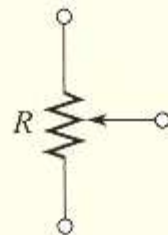
Fonte de corrente dependente controlada por Y (tensão/corrente)



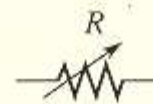
Battery



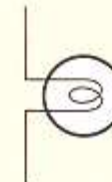
Resistor



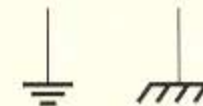
Potentiometer



Rheostat



Lamp



Terra/comum/massa
Ground



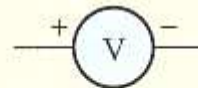
Interruptor



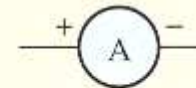
fusível



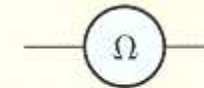
disjuntor



voltímetro

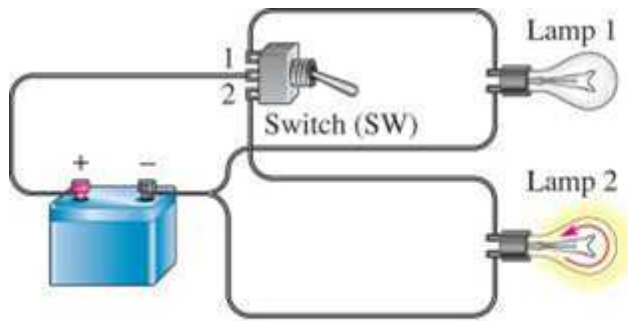


amperímetro

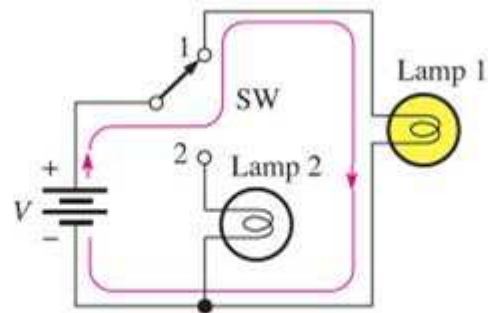


ohmímetro

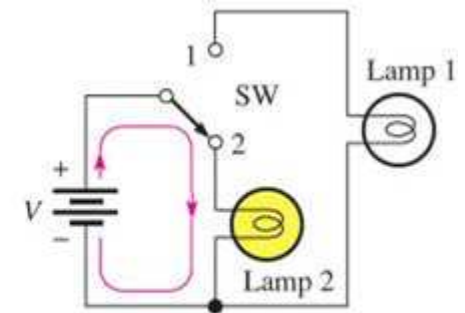
Tipos de interruptor



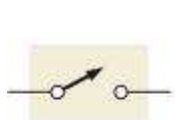
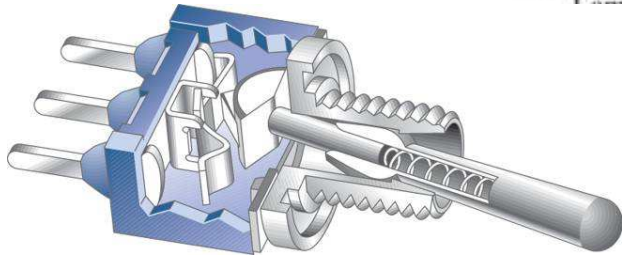
(a) Pictorial



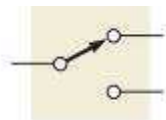
(b) A schematic showing Lamp 1 on and Lamp 2 off



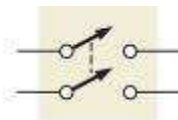
(c) A schematic showing Lamp 2 on and Lamp 1 off



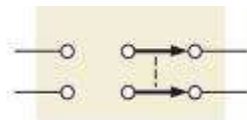
(a) SPST



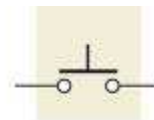
(b) SPDT



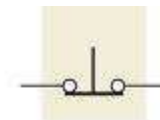
(c) DPST



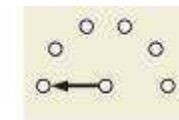
(d) DPDT



(e) NOPB



(f) NCPB



(g) Single-pole rotary (6-position)

Tipos de interruptores mecânicos



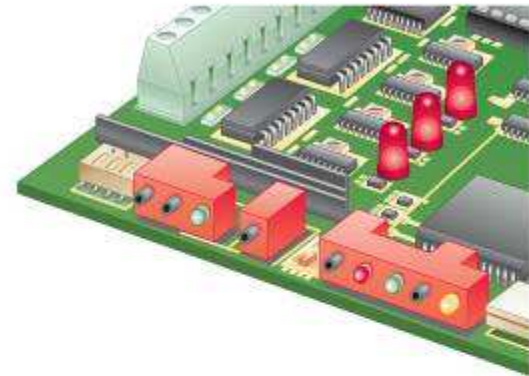
Toggle switch



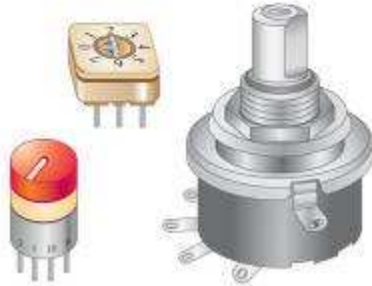
Rocker switch



Push-button switches



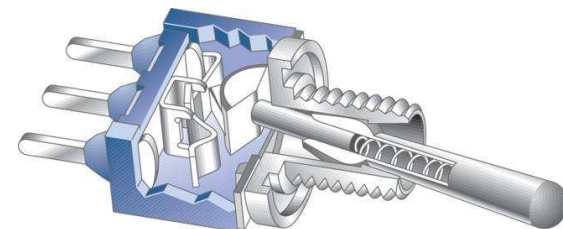
PC board mounted push-button switches



Rotary switches



DIP switches for mounting on PC boards



Fusíveis

Um circuito elétrico pode ainda conter fusíveis, que servem para proteger os circuitos de correntes elevadas não planejadas.



(a) Cartridge fuses



(b) Plug fuse

(c) Circuit breakers



(d) Fuse symbol



(e) Circuit breaker symbol

Equipamento do laboratório

Representação de geradores e instrumentos de medida

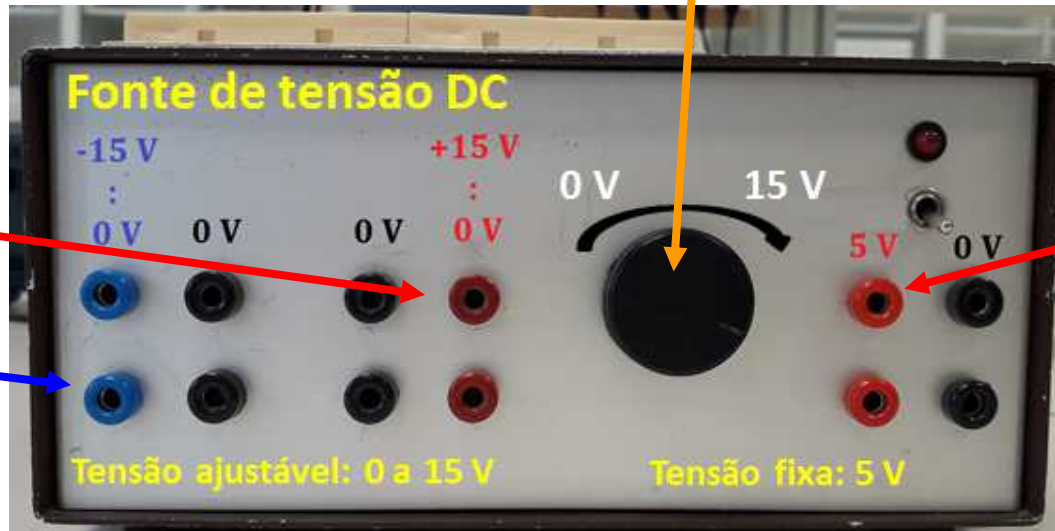
- Modelos de geradores de tensão e de corrente
- Modelos de voltímetro e de amperímetro
- Resistências/impedâncias (interna) do voltímetro e do amperímetro
- Impedância do osciloscópio

Fonte de tensão do laboratório

A tensão é **ajustável** através do botão rotativo.

Fonte bipolar regulável
Tensão regulável pode atingir 15 V.

Tensão regulável pode atingir -15 V.



Fonte unipolar fixa
Tensão fixa de 5 V.

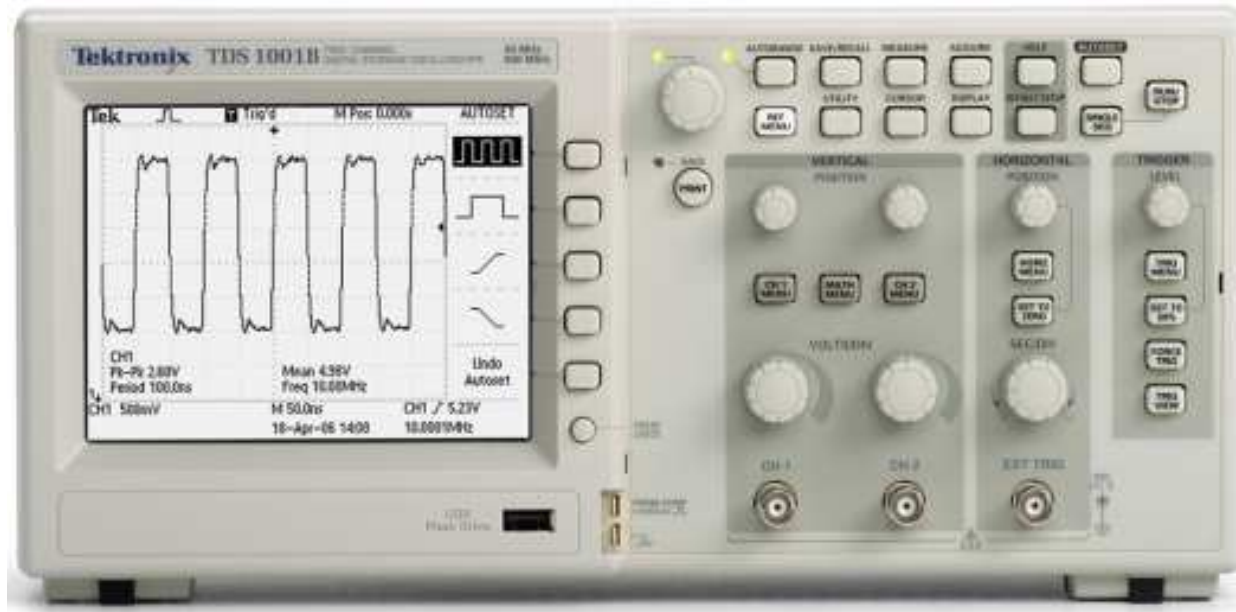
Ter presente que a tensão é sempre medida entre dois pontos.

Os **terminais/conectores de cor preta** (terminal comum da fonte) emulam o ponto relativamente ao qual é medida a diferença de potencial ou tensão da fonte. Por convenção, os terminais de cor vermelha indicam pontos de tensão positiva, e os terminais de cor azul referem-se a pontos de tensão negativa. Os terminais vermelho e preto do lado direito emulam uma fonte de tensão de 5 V.

Geradores de sinal do laboratório

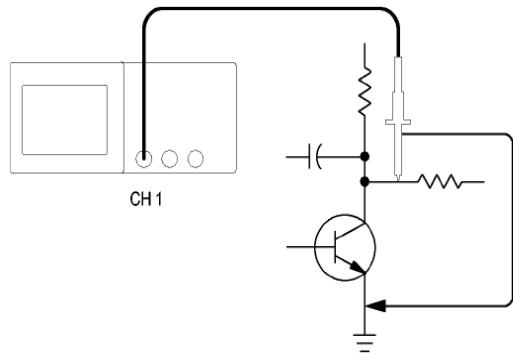


Osciloscópio



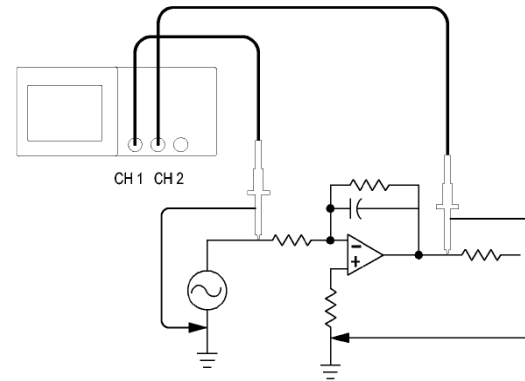
Taking Simple Measurements

You need to see a signal in a circuit, but you do not know the amplitude or frequency of the signal. You want to quickly display the signal and measure the frequency, period, and peak-to-peak amplitude.



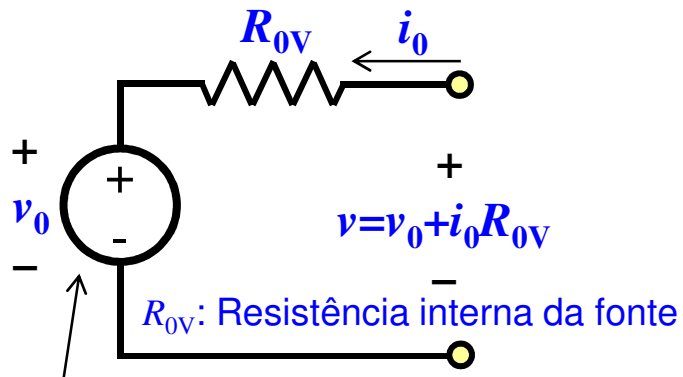
Measuring Two Signals

If you are testing a piece of equipment and need to measure the gain of the audio amplifier, you will need an audio generator that can inject a test signal at the amplifier input. Connect two oscilloscope channels to the amplifier input and output as shown next. Measure both signal levels and use the measurements to calculate the gain.



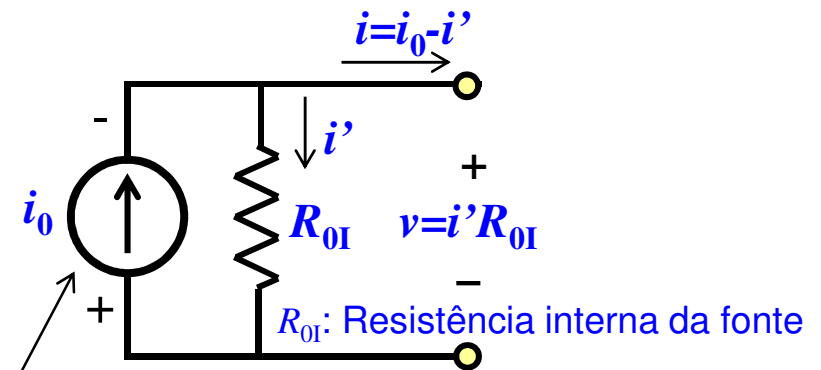
Modelos dos geradores de tensão e de corrente

Fonte de tensão



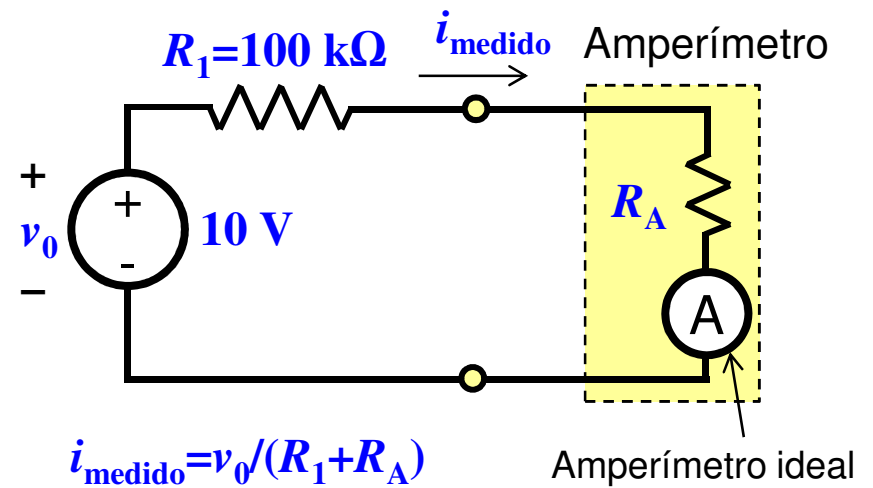
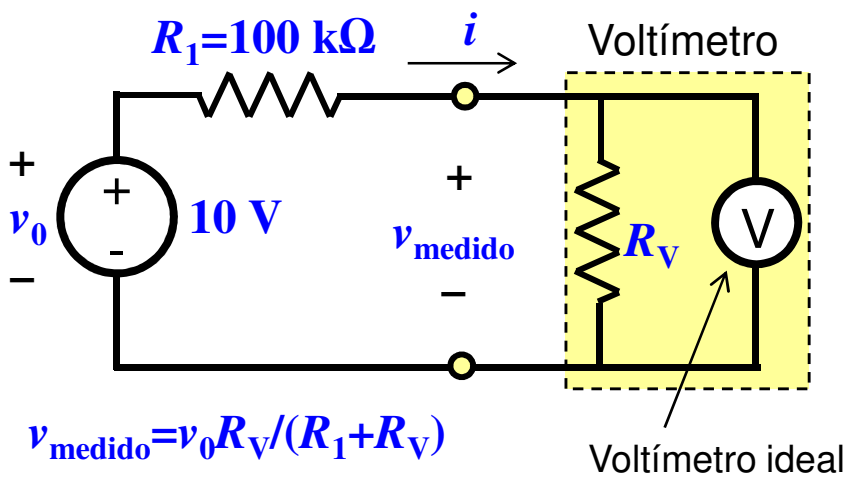
Fonte de tensão ideal

Fonte de corrente



Fonte de corrente ideal

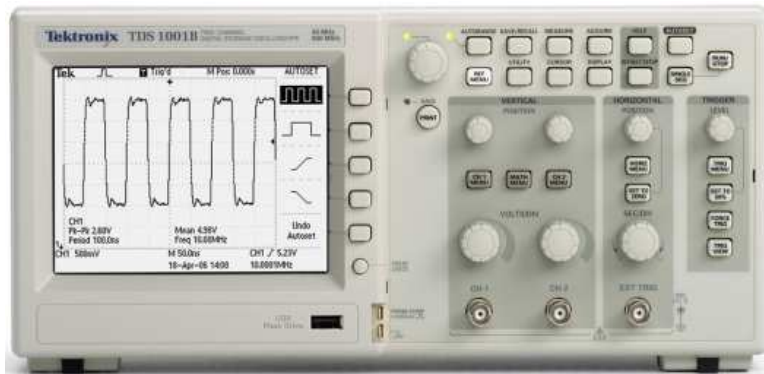
Modelos do voltímetro e do amperímetro



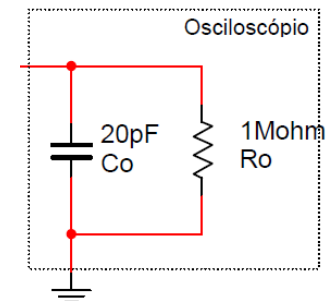
Impedância do osciloscópio

O **osciloscópio** é um [instrumento de medida](https://pt.wikipedia.org/wiki/Instrumento_de_medida) de sinais elétricos/eletrônicos que apresenta representações gráficas duas dimensões de um ou mais sinais elétricos (de acordo com a quantidade de canais de entrada). O eixo vertical (y) do ecrã representa a magnitude do sinal ([tensão](https://pt.wikipedia.org/wiki/Tens%C3%A3o)) e o eixo horizontal (x) representa o tempo, tornando o instrumento útil para visualizar sinais periódicos ou sinais variáveis no tempo.

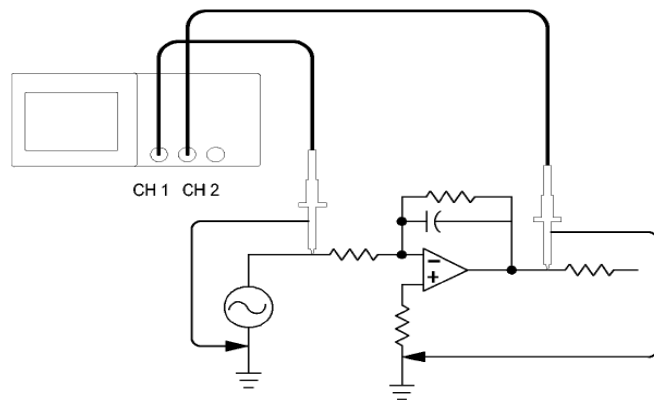
<https://pt.wikipedia.org/wiki/Oscilosc%C3%B3pio>



Cada uma das entradas do osciloscópio possui uma impedância, normalmente uma resistência em paralelo com um condensador. A impedância de um osciloscópio deve ser a maior possível. Os valores típicos da resistência e da capacidade são da ordem de 1 MΩ e de 10 a 80 pF, respectivamente.



Usando os dois canais do osciloscópio é possível observar no canal 1 o sinal aplicado ao circuito e no canal 2 a resposta do circuito ao sinal aplicado.



“The input impedance is made a specific nominal value, rather than arbitrarily high, because of the common use of [X10 probes](https://en.wikipedia.org/wiki/X10_probes). With a known input impedance to the oscilloscope, the probe designer can ensure that the probe input impedance is exactly ten times this figure (actually oscilloscope plus probe cable impedance). Since the impedance included the input capacitance and the probe is an impedance divider circuit, the result is that the waveform being measured is not distorted by the RC circuit formed by the probe resistance and the capacitance of the input (or the cable capacitance which is generally higher).”

https://en.wikipedia.org/wiki/Nominal_impedance#Oscilloscopes

Impedâncias características “padrão”

Após o advento do radar [técnica de localização e determinação de distância de um objeto afastado (avião, submarino etc.) por meio da emissão de ondas radioelétricas e a detecção e análise do pulso refletido pelo objeto], a indústria sentiu necessidade de definir uma “impedância padrão” para os sistemas de transmissão, em particular para os cabos coaxiais usados para conduzir os sinais. O padrão mais usado corresponde à **impedância de 50 Ω** , e este valor resulta da satisfação do compromisso entre dois requisitos: i) perdas de transmissão mínimas; ii) capacidade de transmitir a maior potência possível.

Atualmente, os sistemas de medição e caracterização mais avançados em eletrônica e optoeletrônica empregam componentes (equipamentos, cabos, conectores, circuitos, etc.) cuja impedância de entrada (e de saída) e/ou característica é 50 Ω . Alguns dos osciloscópio e geradores de sinais mais comuns permitem definir as impedâncias de entrada e de saída, respectivamente, em função da análise que se pretende fazer. Antes de começar a utilizar um dado equipamento devemos verificar qual é a impedância que está a ser considerada pelo equipamento.

No campo da radiofrequência, das micro-ondas e das ondas milimétricas os sistemas são desenhados, quase sem exceção com impedâncias de entrada e de saída (sempre que for aplicável) de 50 Ω , e transmissão guiada de sinais é feita usando linhas de transmissão (cabos coaxiais, linhas “micro-strip”, linhas “coplanar waveguide (CPW)”, etc.) com impedância característica de 50 Ω .

Impedância dos cabos de vídeo:

Os sinais de vídeo são geralmente transmitidos usando cabos coaxiais com impedância igual a 75 Ω , fazendo com que 75 Ω se tenha tornado um padrão quase universal para os cabos coaxiais para vídeo.

Impedância de altifalantes e colunas:

As impedâncias de alto-falante são mantidas relativamente baixas em comparação com outros componentes de áudio, de modo que a potência de áudio necessária pode ser transmitida sem o uso inconveniente (e perigoso) de altas tensões. A impedância nominal mais comum para alto-falantes é de 8 Ω .

Exercícios de aplicações da lei de Ohm

Aplicação da lei de Ohm

A lei de Ohm (a “mais fundamental” lei dos circuitos elétricos) relaciona as grandezas corrente I , tensão V e resistência R . Foi formulada por Georg Simon Ohm (1787-1854) e toma a forma da equação que leva o seu nome:

$$I = \frac{V}{R}$$

V é a tensão aplicada aos terminais do componente.

I é a corrente que percorre o componente na sequência da aplicação da tensão.

Qual é a corrente num circuito alimentado por uma fonte de 12 V se a resistência for 10 Ω ? **1.2 A**

Se conhecermos a corrente e a resistência podemos resolver em ordem à tensão, e a expressão da lei de Ohm toma a forma:

$$V = IR$$

Qual é a tensão aos terminais de uma resistência de 680 Ω se a corrente que a percorre for 26.5 mA? **18 V**

Aplicação da lei de Ohm

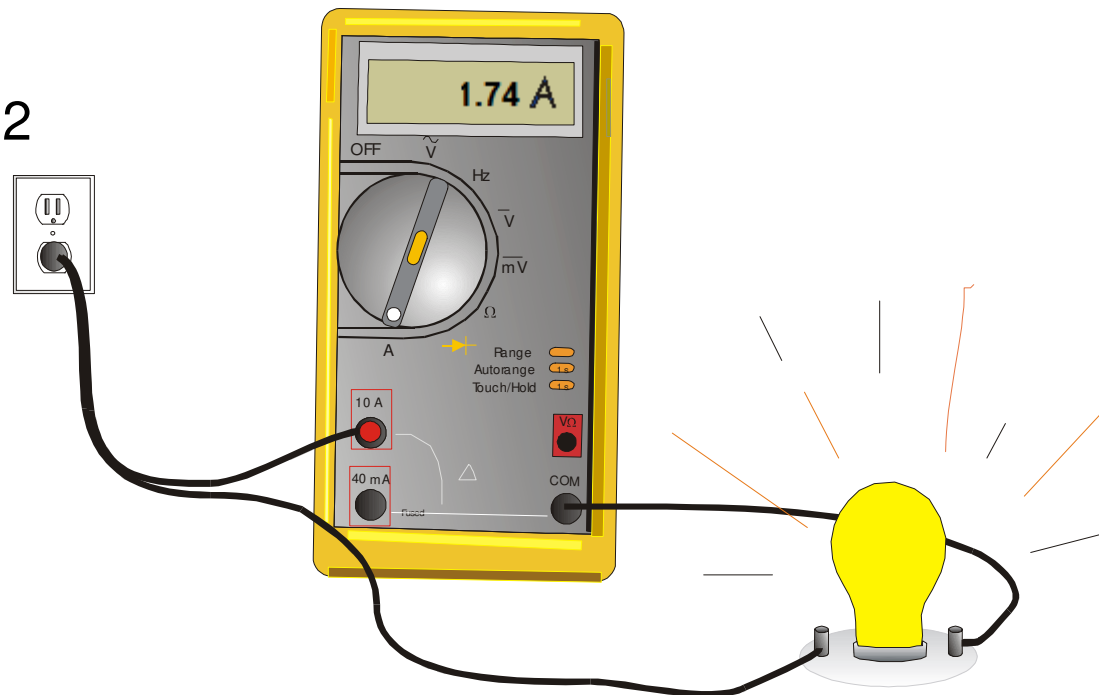
Se conhecermos a tensão e a corrente, podemos usar a lei de Ohm

para determinar o valor da resistência: $R = \frac{V}{I}$

Qual é a resistência de uma lâmpada de eliminação quando se encontra ligada às tomadas do laboratório? **132 Ω**

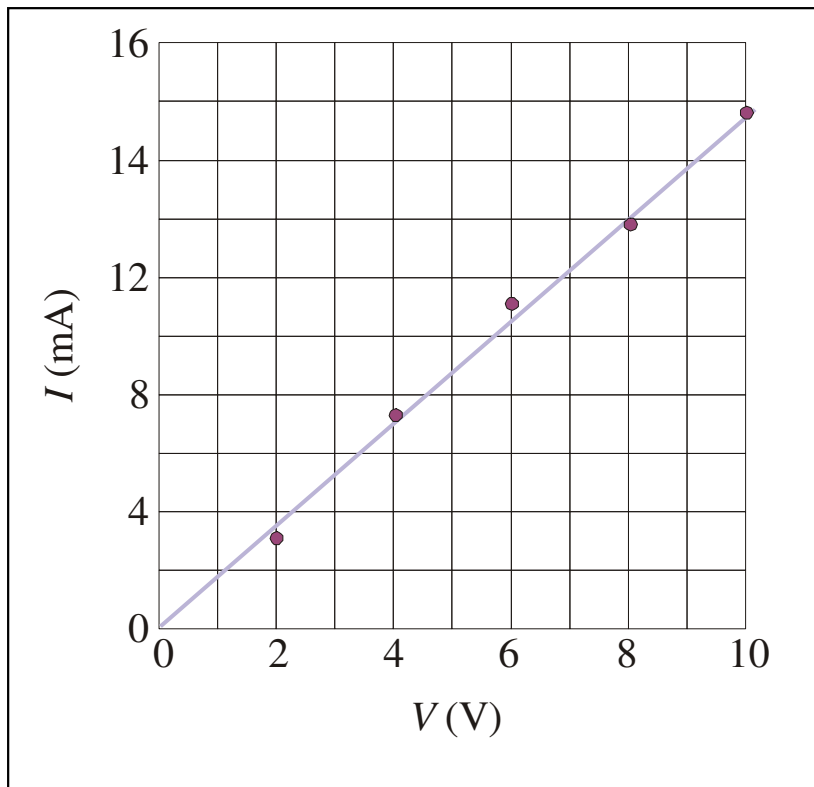
Sala C1.4.12

230 V



Verificação da lei de Ohm

Um investigador determina experimentalmente a relação entre a corrente e a tensão aplicada a um componente, e verifica que o melhor ajuste aos pontos do gráfico obtido é uma linha reta. Qual é a condutância e a resistência do componente?



O declive da reta representa a condutância

$$G = \frac{14.8 \text{ mA} - 0 \text{ mA}}{10.0 \text{ V} - 0 \text{ V}} = 1.48 \text{ mS}$$

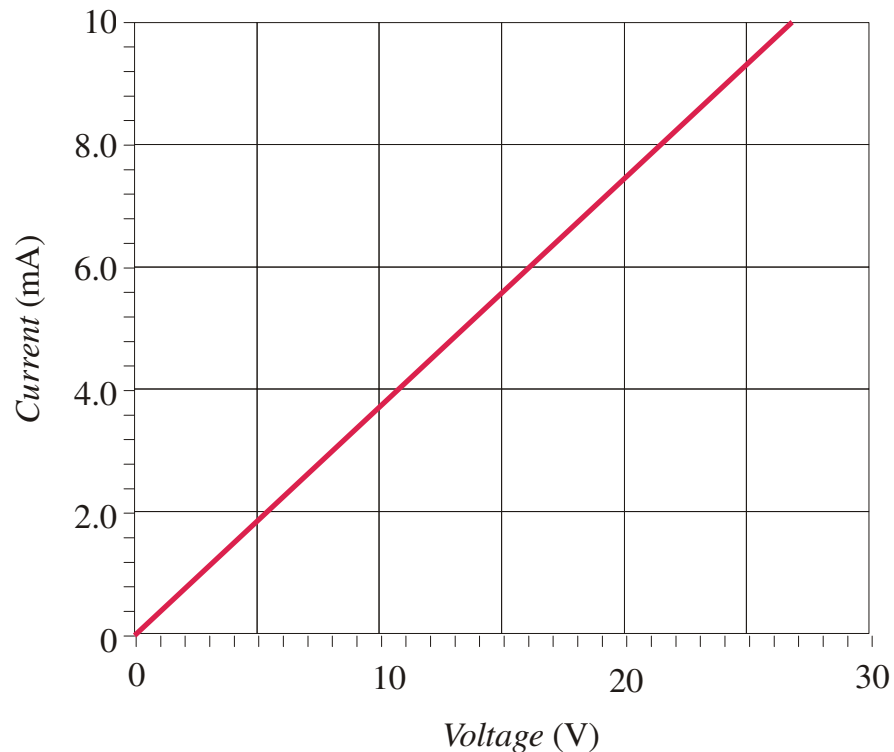
O recíproca da condutância é a resistência

$$R = \frac{1}{G} = \frac{1}{1.48 \text{ mS}} = 676 \Omega$$

Uma vez que a relação I-V é linear o componente comporta-se como uma resistência.

Lei de Ohm: gráfico corrente vs tensão

A característica corrente-tensão (I-V) - gráfico da corrente em função da tensão - de uma resistência fixa é uma linha reta com declive positivo.



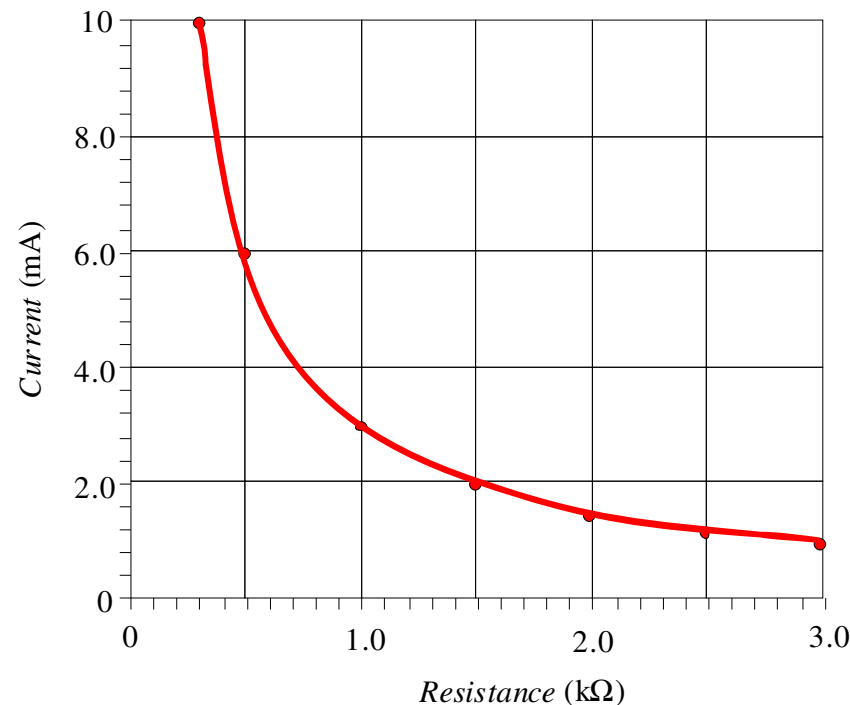
Qual é a resistência correspondente à característica I-V do gráfico? **2.7 k Ω**

Qual é a condutância? **0.37 mS**

Lei de Ohm: gráfico corrente vs resistência

Seja um circuito resistivo (resistência R) alimentado com uma fonte de tensão constante V . Se se variar a resistência R do circuito a **característica I-R do circuito é** uma hipérbole.

Qual é a curva se a força eletromotriz da fonte for 3 V?



Exercício : Divisor de tensão

Qual é a tensão aos terminais de R_2 ?

Trata-se de um com apenas um percurso para a corrente (circuito série). As duas resistências são equivalentes a uma resistência cujo valor é igual à soma das duas resistências.

A Resistência total é 25 k Ω .

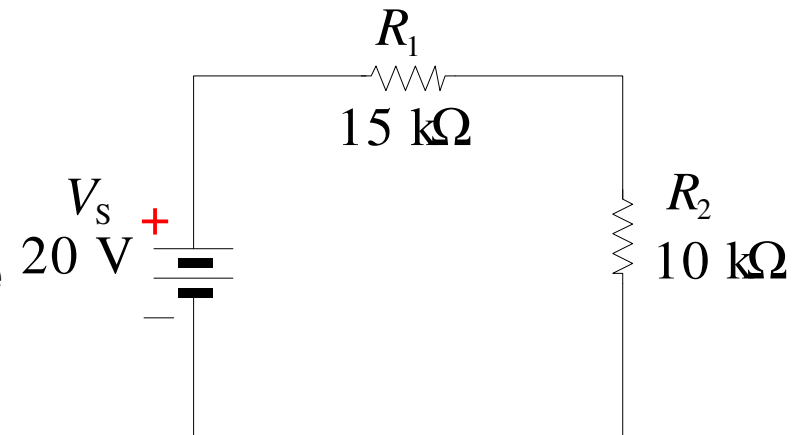
Há apenas um percurso para a corrente, a fonte “vê” duas resistências em série, que para o cálculo da corrente se podem substituir pela resistência soma. (Mais adiante veremos com detalhe a associação de resistências em série). Aplicando a lei de Ohm, considerando a resistência total, obtém-se a expressão para a corrente que percorre as resistências. Aplicando agora a lei de Ohm a cada uma das resistências, neste caso à R_2 , obtém-se para queda de tensão em R_2 :

$$V_2 = \left(\frac{R_2}{R_T} \right) V_S = \left(\frac{10 \text{ k}\Omega}{25 \text{ k}\Omega} \right) 20 \text{ V} = 8.0 \text{ V}$$

Note que 40% da tensão da fonte aparece aos terminais de R_2 , que representa 40% da resistência total do circuito.

A fórmula anterior corresponde, como iremos ver, à expressão para um divisor de tensão de duas resistências

Calcule a tensão aos terminais de R_1 .



Circuitos Elétricos e Sistemas Digitais

2018-2019 - 1.º Semestre

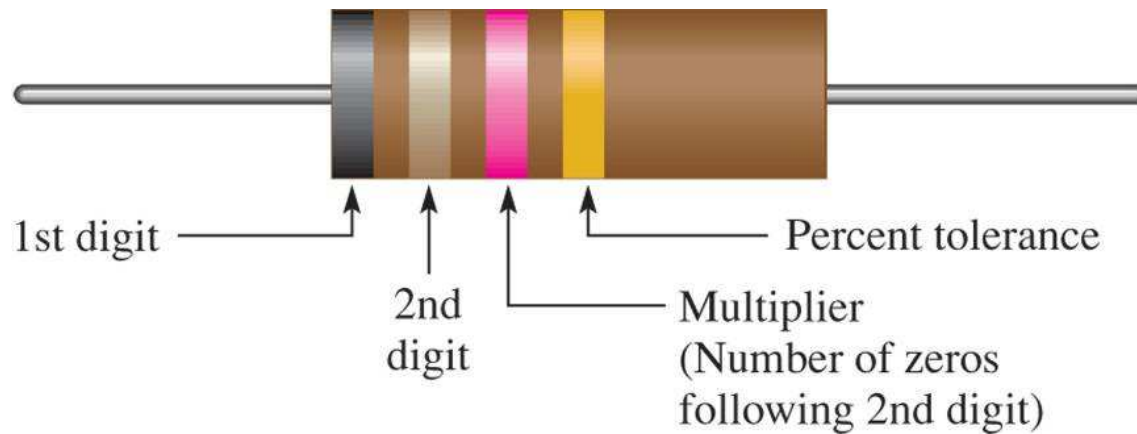
Elementos de circuitos e leis fundamentais

- Código de cores de resistências
- Circuitos resistivos série, paralelo, série-paralelo
- Associação de resistência em série e em paralelo
- Potência em circuitos série e circuitos paralelo
- Medição de tensão, ponto comum
- Divisor de tensão
- Efeito da carga no divisor de tensão
- Efeito de carga do voltímetro (influência da resistência interna do voltímetro no ponto de funcionamento dos circuitos)

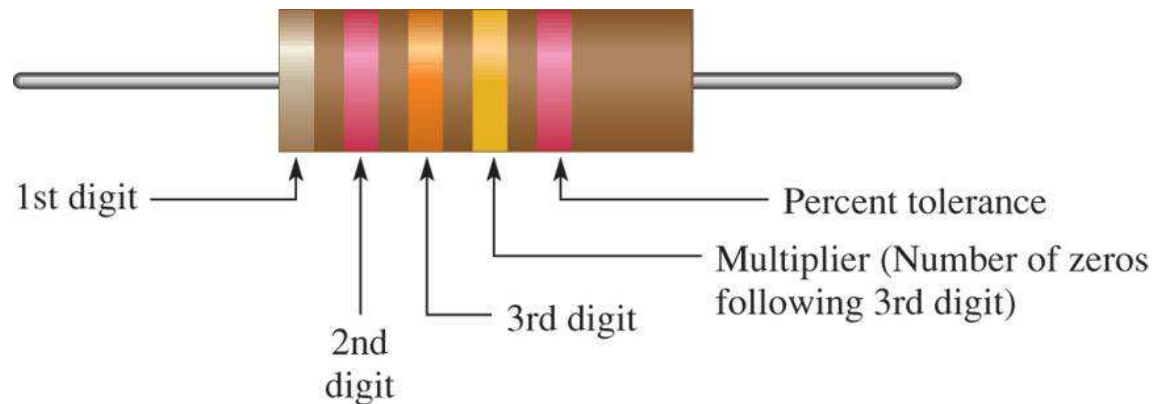
Código de cores para as resistências

Código de cores de resistências

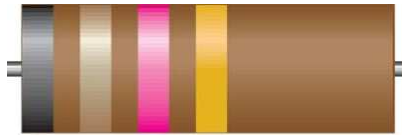
Código de cores de 4 bandas



Código de cores de 5 bandas



Resistências: código de cores de 4 bandas















Valor da resistência, primeiras três bandas:

1.^a banda – 1.^o dígito

2.^a banda – 2.^o dígito

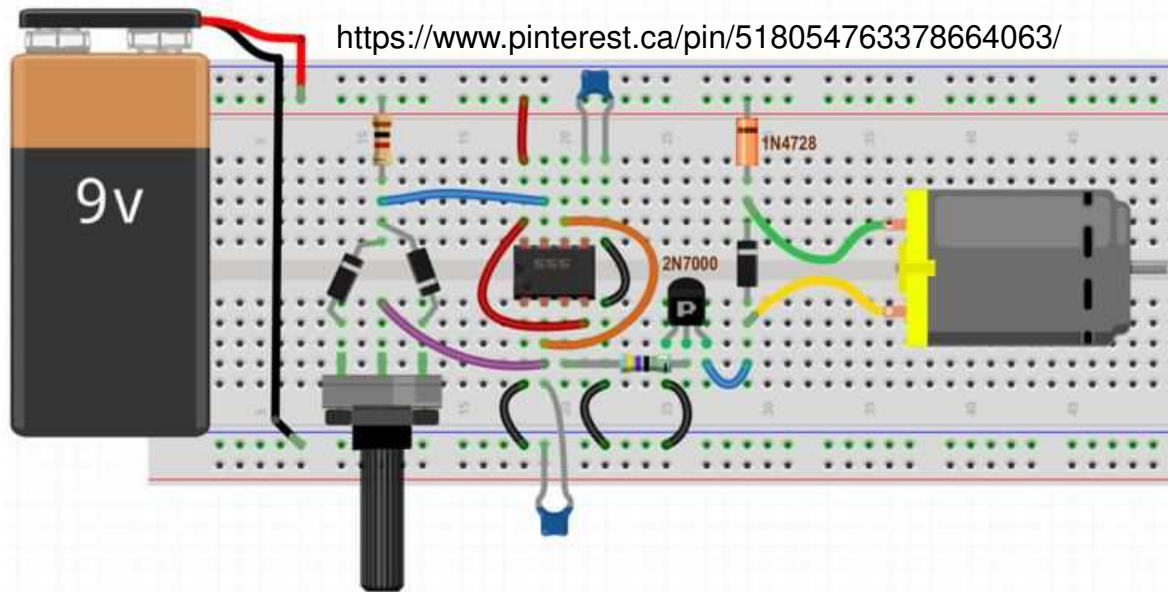
*3.^a banda – Multiplicador (número de zeros que se segue ao 2.^o dígito)

*4.^a banda - tolerância

Color	Digit	Multiplier	Tolerance
	Black	0	10^0
	Brown	1	10^1 1% (five band)
	Red	2	10^2 2% (five band)
	Orange	3	10^3
	Yellow	4	10^4
	Green	5	10^5
	Blue	6	10^6
	Violet	7	10^7
	Gray	8	10^8
	White	9	10^9
	Gold	$\pm 5\%$	10^{-1} 5% (four band)
	Silver	$\pm 10\%$	10^{-2} 10% (four band)
	No band	$\pm 20\%$	

* Para resistências de valor inferior a 10Ω , a 3.^a banda ou é dourada ou prateada. O dourado corresponde ao multiplicador 0.1 e o prateado ao multiplicador 0.01.

Medir a resistância de uma resistência



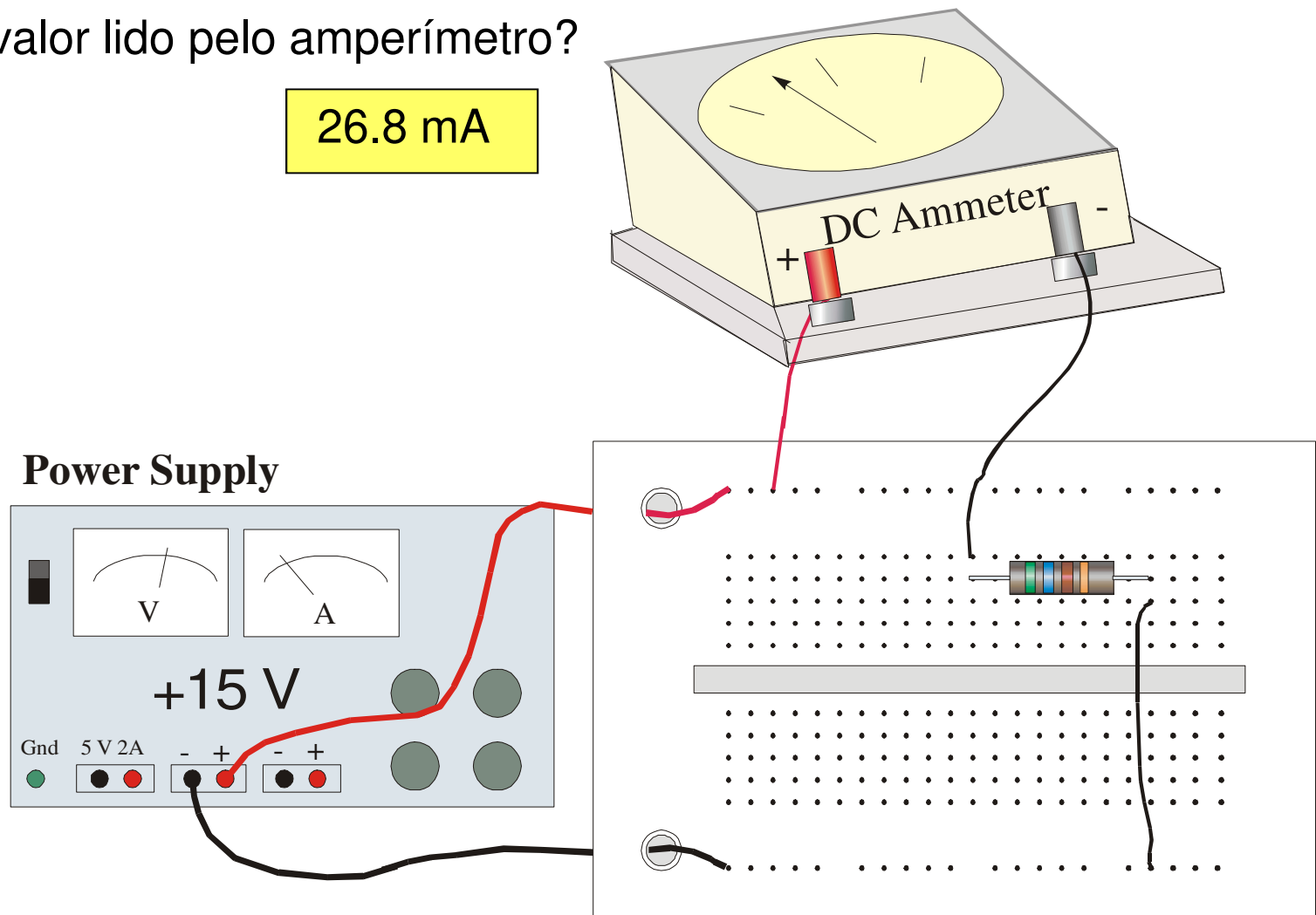
Para medir o valor da resistância de uma resistência, retira-se o componente do circuito ou coloca-se pelo menos um dos seus terminais “flutuante”.



Exercício de aplicação

A resistência tem bandas de core verde-azul-castanho-dourado.
Qual é o valor lido pelo amperímetro?

26.8 mA



Exercícios

Qual é o valor da resistência e da tolerância de cada uma das seguintes resistências de 4 bandas?



Respostas:

47 Ω \pm 10%



1.0 Ω \pm 5%



5.1 k Ω \pm 5%



820 k Ω \pm 10%

Calculadora Gráfica de Resistores de 4 ou 5 Bandas:

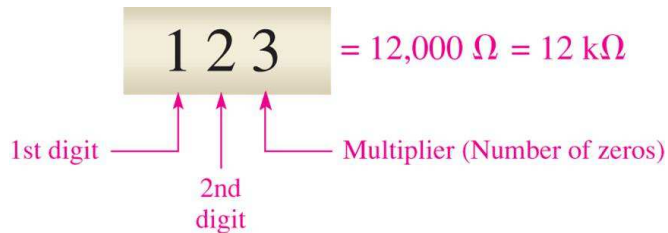
[http://www.audioacustica.com.br/exemplos/Valores Resistores/Calculadora Ohms Resistor.html](http://www.audioacustica.com.br/exemplos/Valores_Resistores/Calculadora_Ohms_Resistor.html)

Qual é o valor da resistência de uma resistência com as bandas de cor cinzento-vermelho-preto-dourado? a. 73 Ω b. 82 Ω c. 680 Ω d. 820 Ω

As banda de cor de uma resistência de 330 k Ω \pm 5% são:

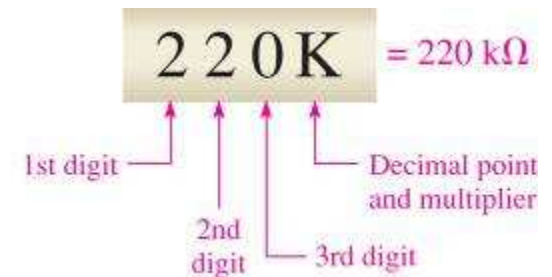
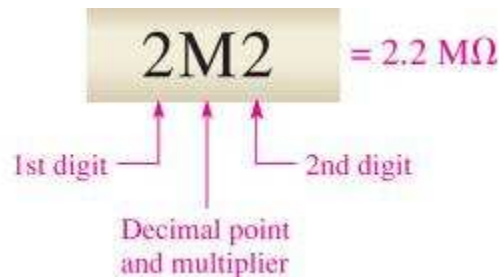
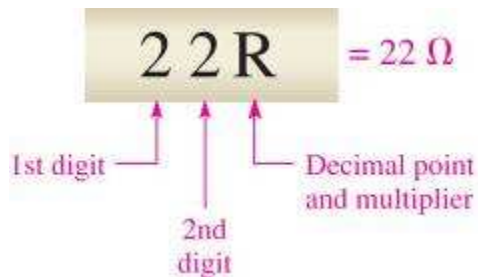
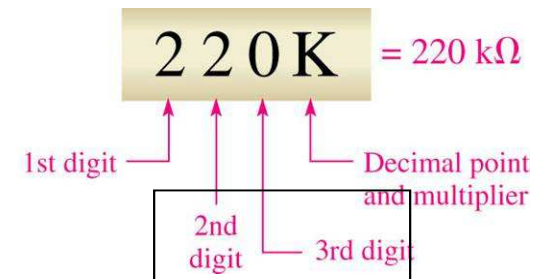
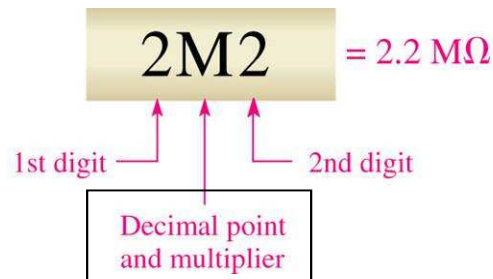
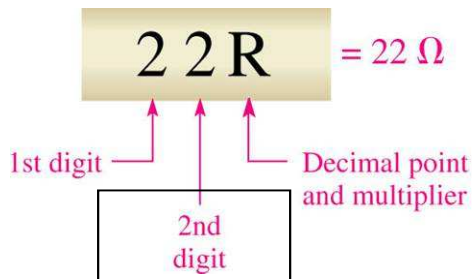
- a. Vermelha-vermelho-castanho-dourado b. laranja-laranja-amarelo-dourado
c. amarelo-amarelo-vermelho-dourado d. amarelo-amarelo-verde-dourado

Código alfanumérico para resistências



Exemplos de etiquetagem com três-dígitos para resistências.

- Dois ou três dígitos, e uma das seguintes letras R, K, ou M são usadas para identificar o valor da resistência.
- A letra é usada para indicar o multiplicador, e a sua posição é usada para indicar o ponto decimal.

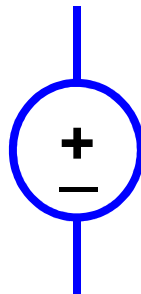


Circuitos resistivos

circuitos série e circuitos paralelo

Circuitos resistivos

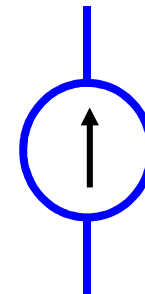
Circuitos que contém apenas fontes de tensão, fontes de corrente, e resistências designam-se **circuitos resistivos**.



Fonte de tensão



Resistência

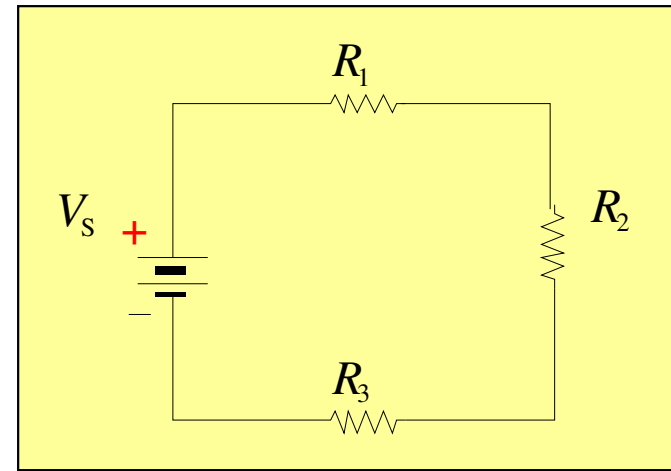


Fonte de corrente

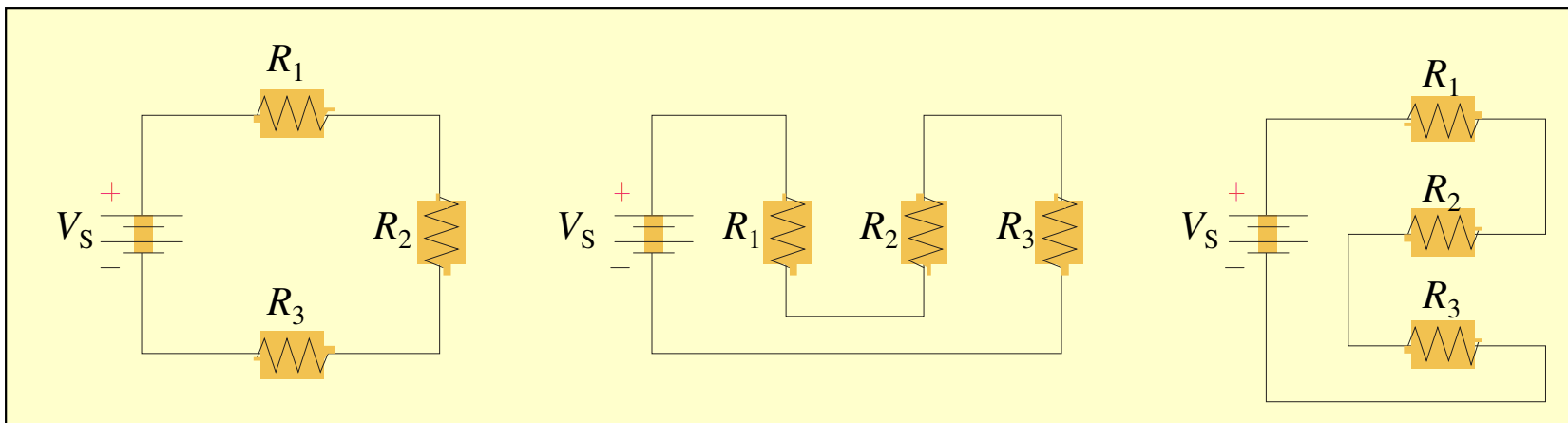
Circuito série

Todos os circuitos têm três atributos em comum:

1. Uma fonte de tensão
2. Uma carga
3. Um percurso completo (fechado)



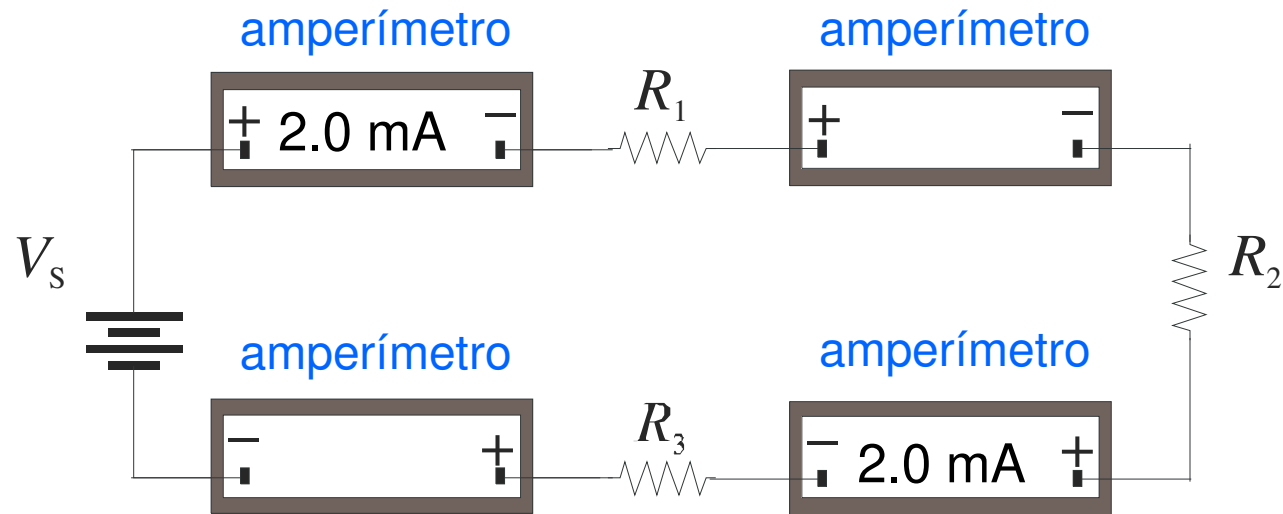
Um circuito série é um circuito que só tem um percurso para a corrente.



Corrente num circuito série

Porque só há um caminho as corrente é a mesmo em todo o circuito.

Por exemplo, o primeiro amperímetro indica 2.0 mA. Qual é o valor indicado pelos outros amperímetros?



a) 2.0 mA

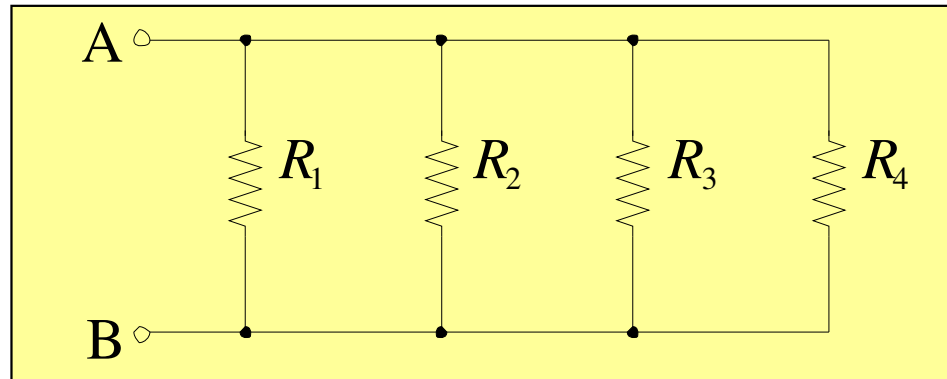
b) 2.0 μ A

c) 2 A

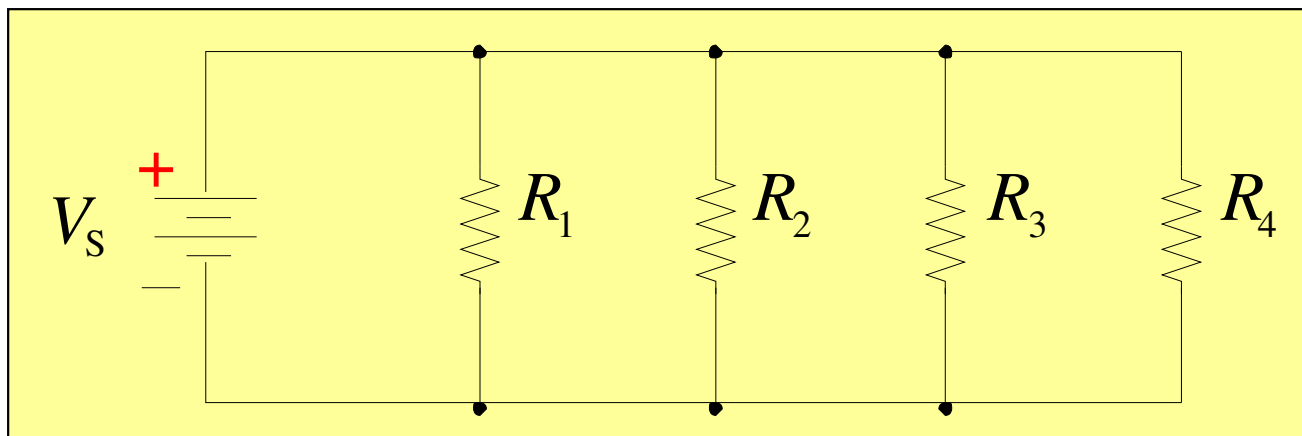
d) 2 nA

Circuitos paralelo

Resistências cujos terminais estão ligados aos mesmos nó estão ligadas em paralelo.



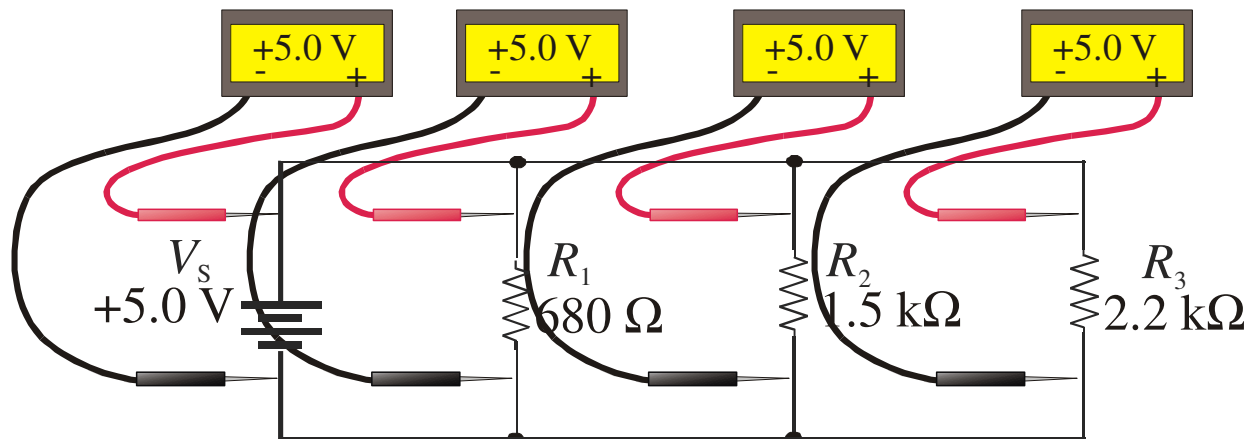
Num circuito paralelo existe mais de um percurso (ramo) para a corrente. A tensão é a mesma para todos os ramos.



Tensão num circuito paralelo

Porque todos os componentes estão ligados aos terminais da mesma fonte de tensão, a tensão aos terminais de cada um é a mesma.

No exemplo abaixo, se a fonte tiver uma f.e.m. de 5.0 V, cada um dos voltímetros irá medir 5 V aos terminais de cada uma resistência.



Associação de resistências em série

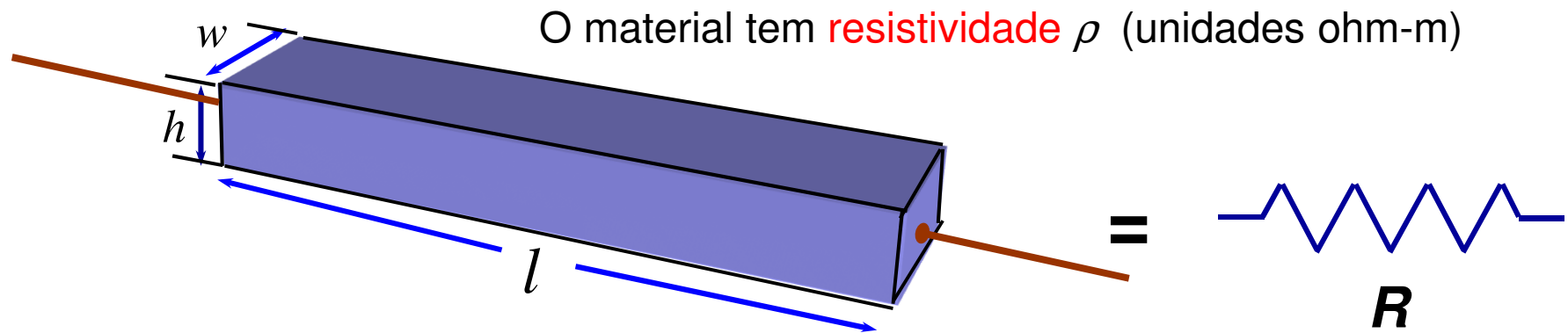
A resistência depende do material e da geometria

$$R = \frac{\rho l}{A}$$

onde ρ é resistividade do material expressa em $\Omega\cdot m$

l é o comprimento do fio

A é a área da secção transversal do fio



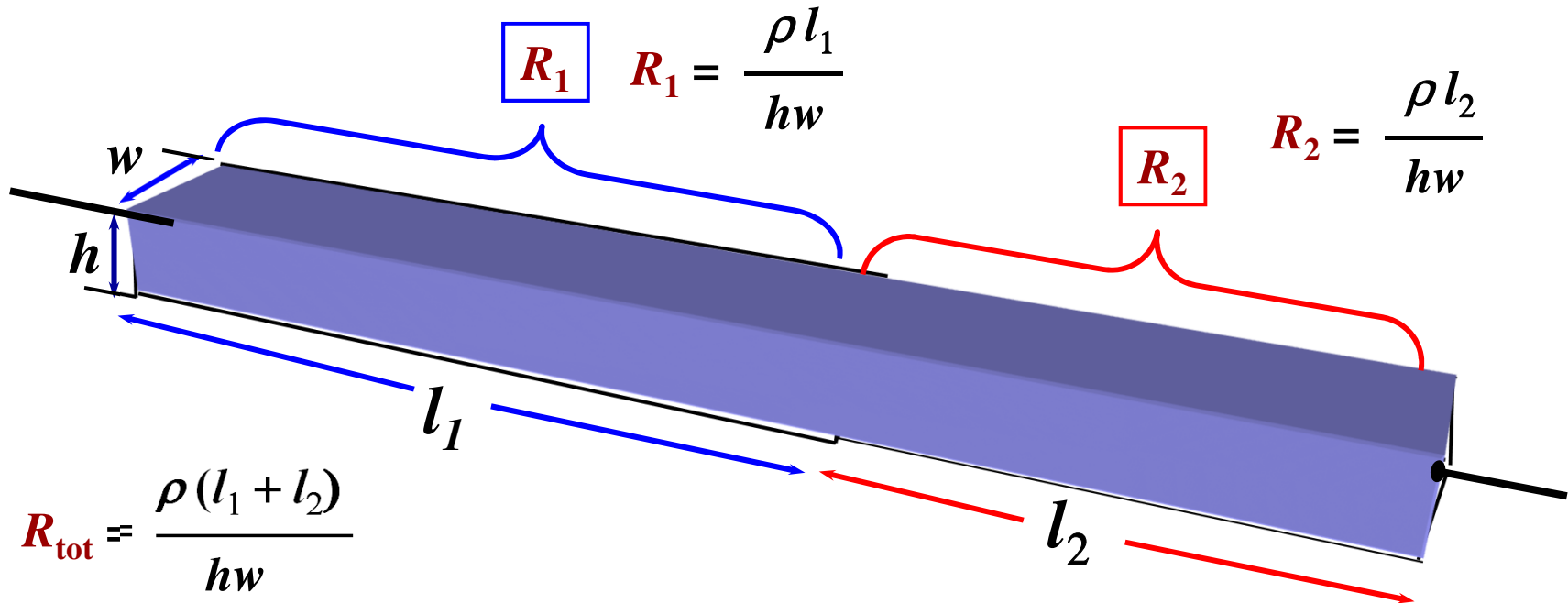
A resistividade é uma **propriedade intrínseca** do material, como a densidade e a cor.

Quando são aplicados fios aos extremos da barra, a resistência entre os fios é dada por:

Resistência entre os fios

$$R = \frac{\rho l}{h w}$$

Associação de resistências em série

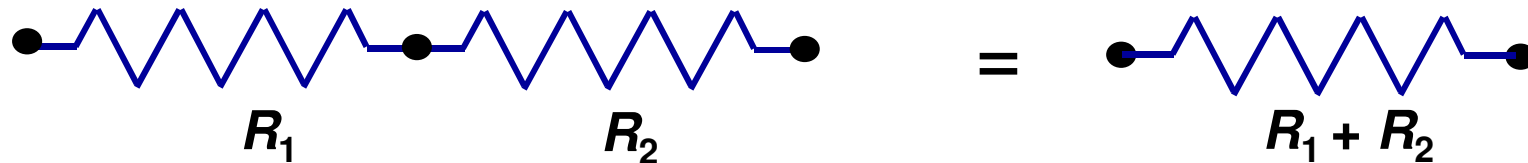
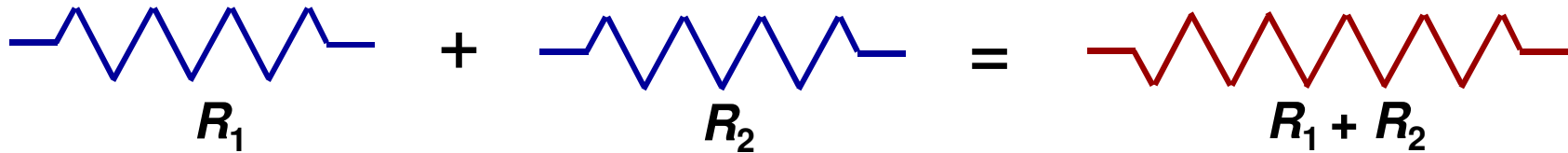


As resistências em série somam-se

Podemos escrever ...

$$R_{tot} = \frac{\rho l_1}{hw} + \frac{\rho l_2}{hw} = \overbrace{R_1 + R_2}$$

Associação de resistências em série

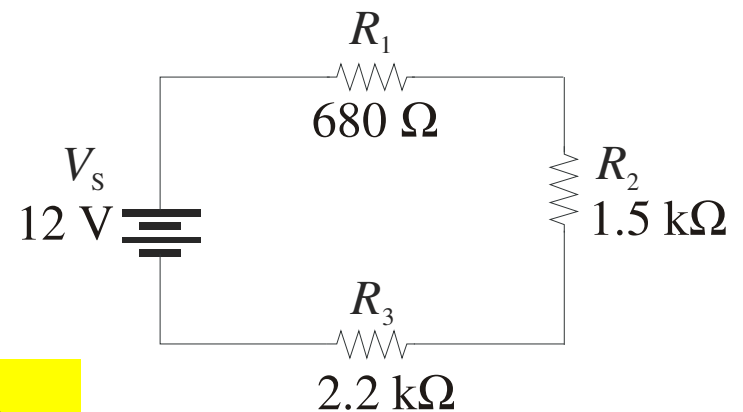


Resistência equivalente

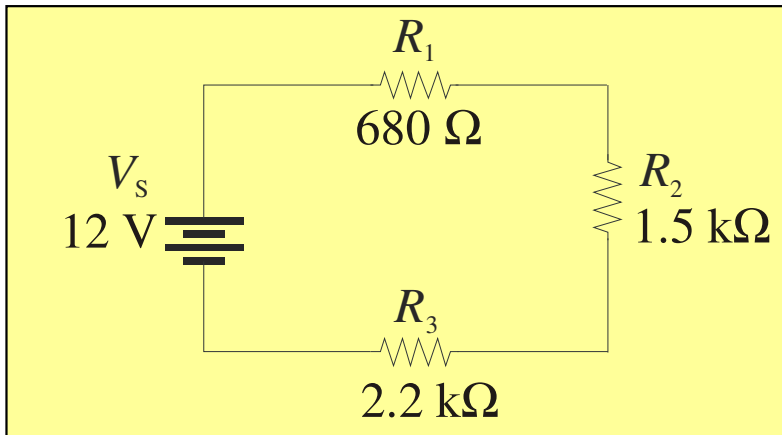
A resistência total de uma série de resistências é a soma das resistências individuais.

Exemplo: no circuito ao lado as resistências têm os seguintes valores 680Ω , $1.5 \text{ k}\Omega$, e $2.2 \text{ k}\Omega$. Qual é o valor da resistência equivalente ?

4.38 k Ω



Corrente, tensão e potência em circuitos série



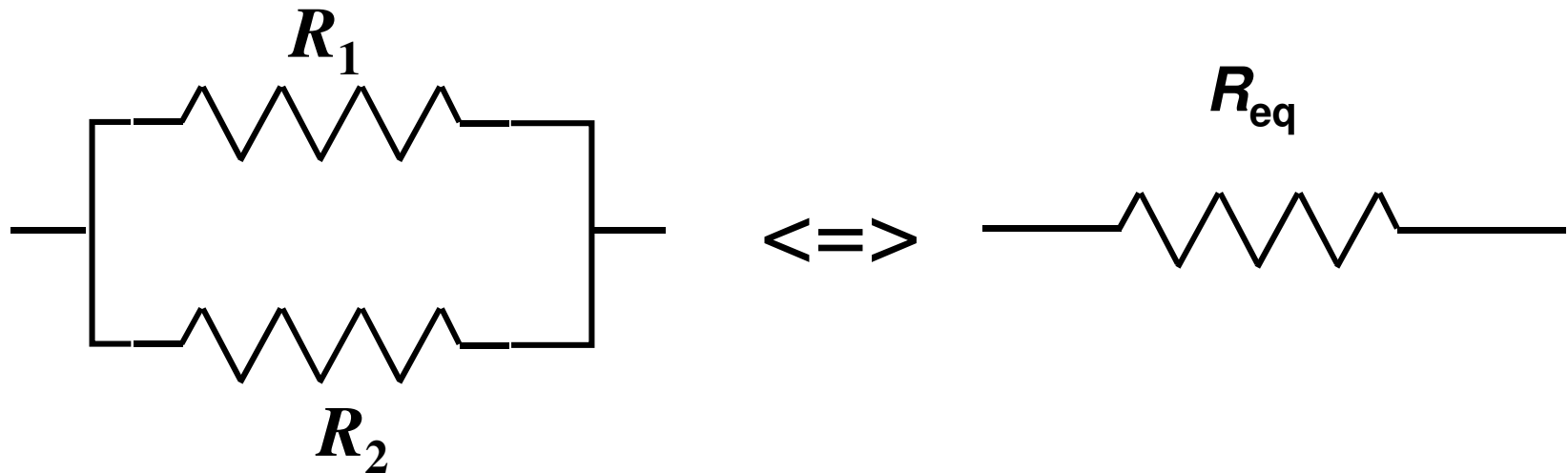
Na tabela abaixo estão indicadas as corrente, as resistências, as tensões e as potências para o circuito série ao lado

Fazendo alguns cálculos obtêm-se:

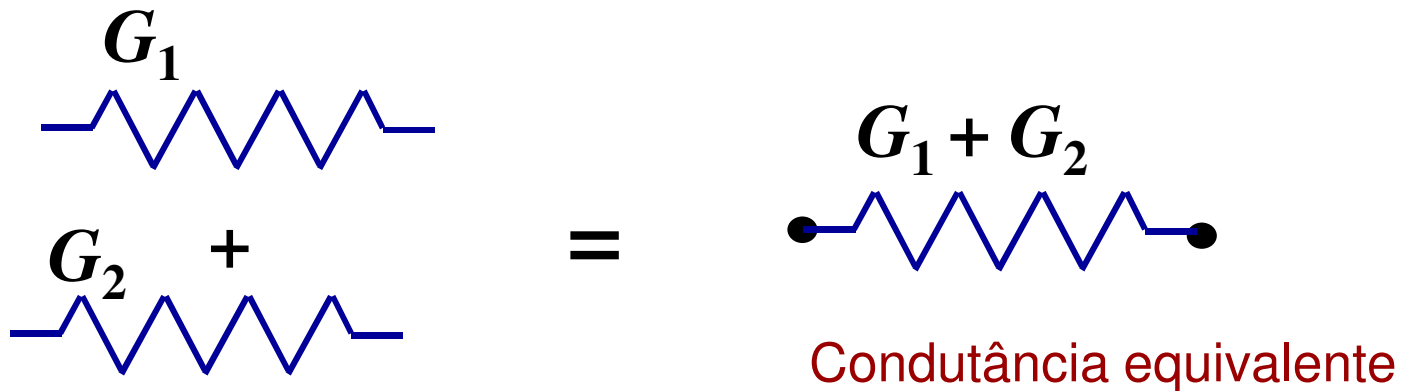
$I_1 = 2.74 \text{ mA}$	$R_1 = 0.68 \text{ k}\Omega$	$V_1 = 1.86 \text{ V}$	$P_1 = 5.1 \text{ mW}$
$I_2 = 2.74 \text{ mA}$	$R_2 = 1.50 \text{ k}\Omega$	$V_2 = 4.11 \text{ V}$	$P_2 = 11.3 \text{ mW}$
$I_3 = 2.74 \text{ mA}$	$R_3 = 2.20 \text{ k}\Omega$	$V_3 = 6.03 \text{ V}$	$P_3 = 16.5 \text{ mW}$
$I_T = 2.74 \text{ mA}$	$R_T = 4.38 \text{ k}\Omega$	$V_S = 12 \text{ V}$	$P_T = 32.9 \text{ mW}$

Associação de resistências em paralelo

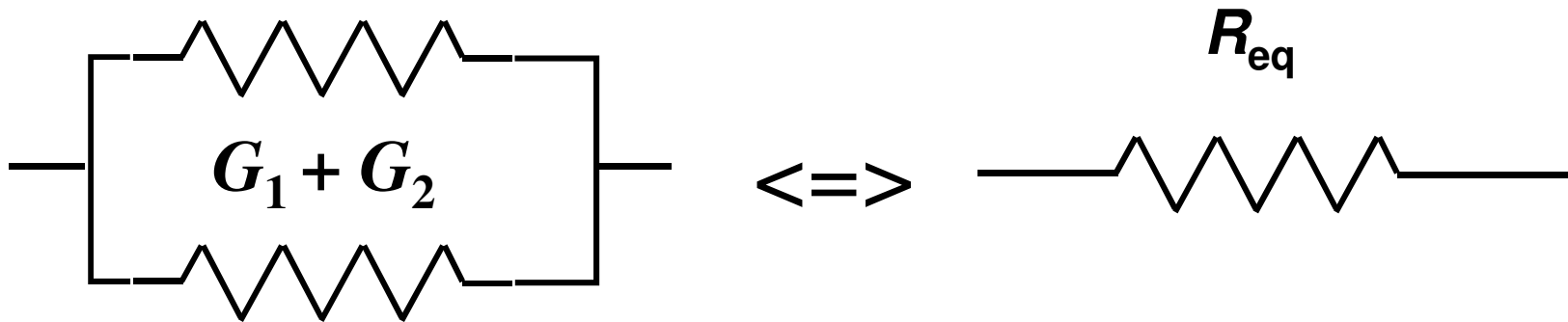
Associação de resistências em paralelo



Expressando em termos da condutância $G = \frac{1}{R}$



Associação de resistências em paralelo



$$G_1 + G_2 = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

$$R_{eq} = \frac{1}{G_1 + G_2} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

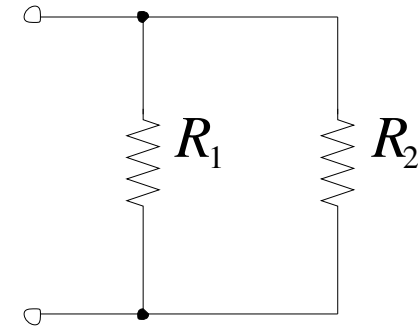
Notação de duas resistências em paralelo:

$$R_1 \parallel R_2$$

Associação de duas resistências em paralelo

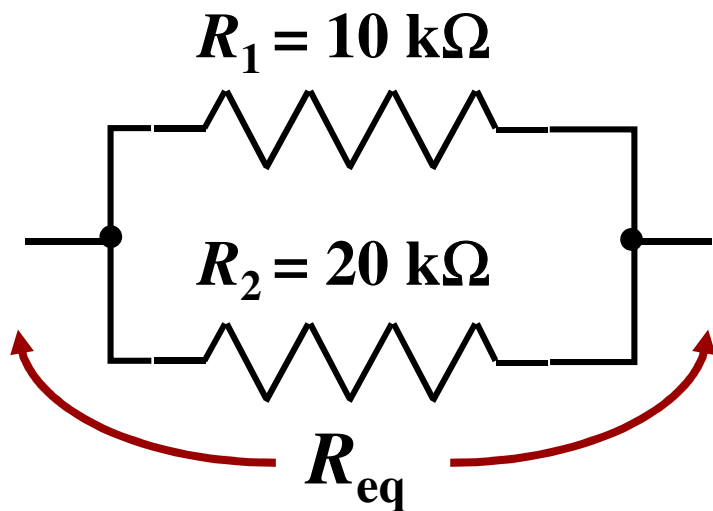
Caso de duas resistências em paralelo:

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \quad \text{or} \quad R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$



Qual é a resistência total se $R_1 = 27 \text{ k}\Omega$ e $R_2 = 56 \text{ k}\Omega$? **18.2 k Ω**

Qual é a resistência equivalente?

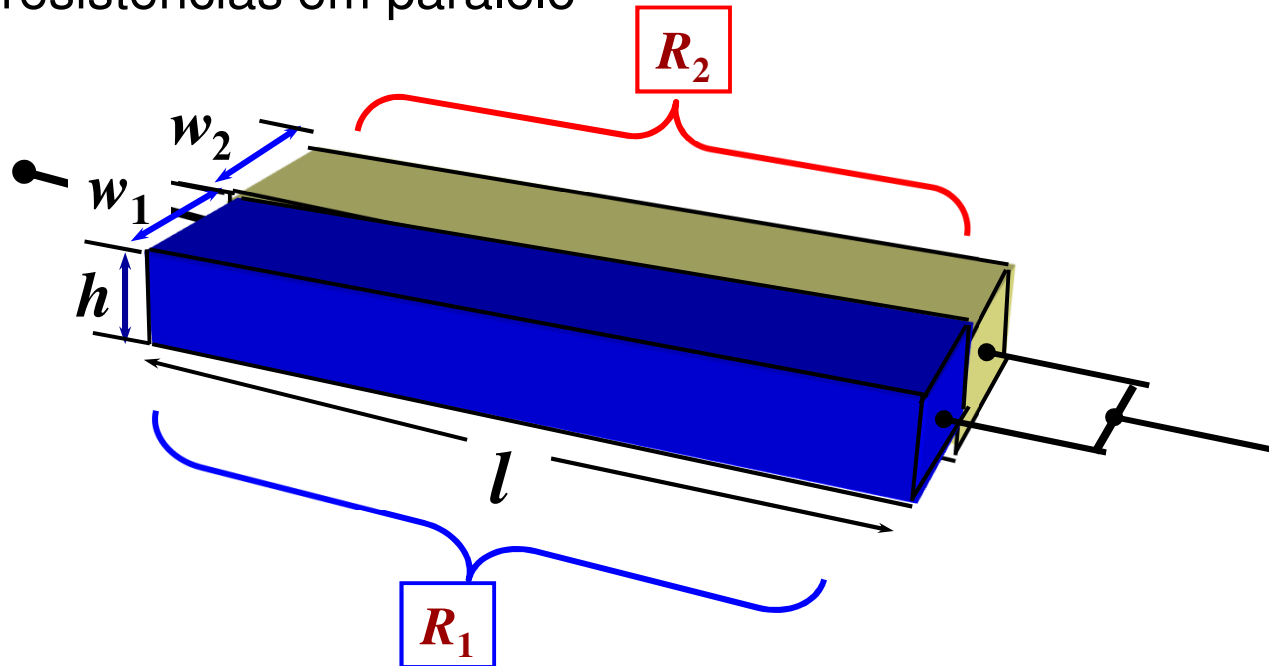


$$R_{eq} = \frac{(10 \text{ k}\Omega)(20 \text{ k}\Omega)}{10 \text{ k}\Omega + 20 \text{ k}\Omega}$$

$$= 6.7 \text{ k}\Omega = 6700 \Omega$$

Associação de resistências em paralelo ("visão" geométrica)

Duas resistências em paralelo



Para as duas barras em paralelo:

$$R_{eq} = \frac{\rho l}{h(w_1 + w_2)}$$

Largura total

Associação de resistências em paralelo ("visão" geométrica)

$$R_{eq} = \frac{\rho l}{h(w_1 + w_2)}$$

Multiplicando o numerador e o denominador por $\frac{\rho l}{(h w_1)(h w_2)}$

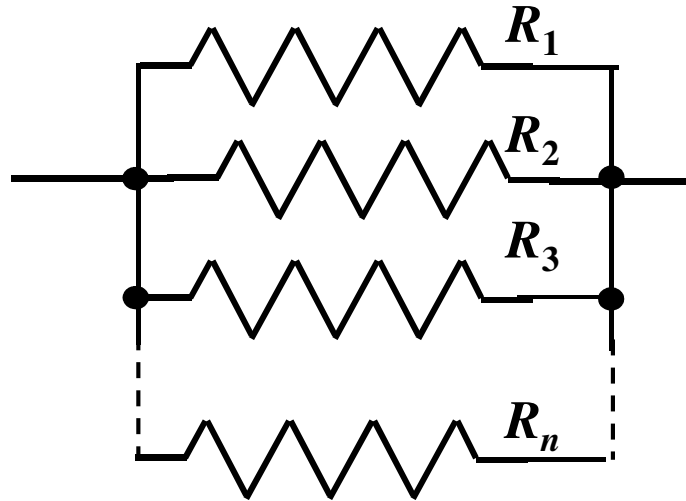
A equação toma a forma...

$$R_{eq} = \frac{(\rho l) [(\rho l) / (h w_1)(h w_2)]}{h(w_1 + w_2) [(\rho l) / (h w_1)(h w_2)]}$$

Duas resistências associadas em paralelo

$$R_{eq} = \frac{[(\rho l) / (h w_1)] [(\rho l) / (h w_2)]}{[\rho l / h w_1] + [\rho l / h w_2]} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Associação de resistências em paralelo



Para n resistências em paralelo:

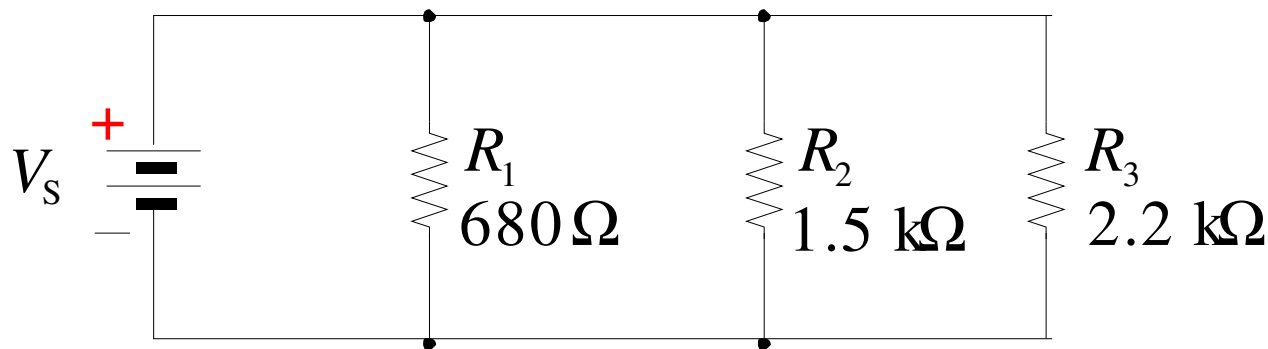
$$R_{\text{eq}} = \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \right]^{-1}$$

Associação de resistências em paralelo

A resistência equivalente de uma associação em série é o recíproco da soma dos recíprocos das resistências individuais.

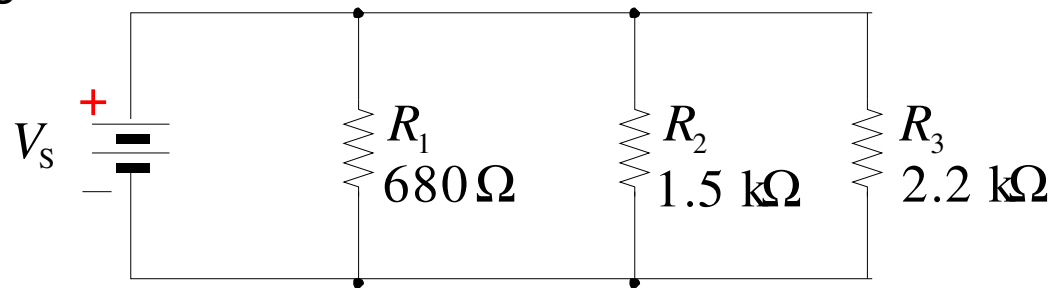
$$R_{\text{eq}} = \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \right]^{-1}$$

A resistência equivalente do paralelo de resistências do circuito abaixo é: **386 Ω**



Corrente, tensão e potência em circuitos paralelo

Na tabela abaixo estão indicadas as corrente, as resistências, as tensões e as potências para o circuito paralelo ao lado



Fazendo alguns cálculos obtêm-se:

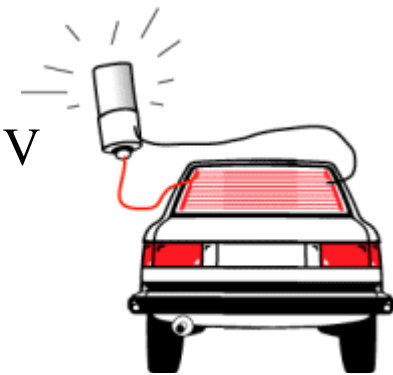
$I_1 = 7.4\ \text{mA}$	$R_1 = 0.68\ \text{k}\Omega$	$V_1 = 5.0\ \text{V}$	$P_1 = 36.8\ \text{mW}$
$I_2 = 3.3\ \text{mA}$	$R_2 = 1.50\ \text{k}\Omega$	$V_2 = 5.0\ \text{V}$	$P_2 = 16.7\ \text{mW}$
$I_3 = 2.3\ \text{mA}$	$R_3 = 2.20\ \text{k}\Omega$	$V_3 = 5.0\ \text{V}$	$P_3 = 11.4\ \text{mW}$
$I_T = 13.0\ \text{mA}$	$R_T = 386\ \Omega$	$V_S = 5.0\ \text{V}$	$P_T = 64.8\ \text{mW}$

Potencia em circuitos paralelo

Assume there are 8 resistive wires that form a rear window defroster for an automobile.

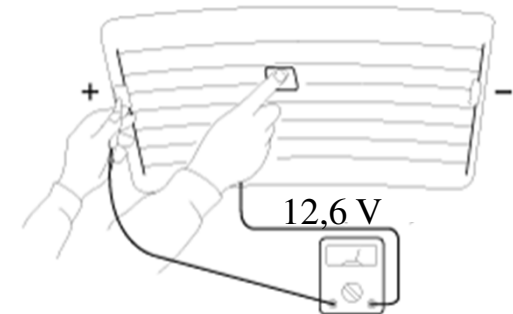
(a) If the defroster dissipates 90 W when connected to a 12.6 V source, what power is dissipated by each resistive wire?

(b) What is the total resistance of the defroster?



(a) Each of the 8 wires will dissipate 1/8 of the total

power or $\frac{90 \text{ W}}{8 \text{ wires}} = 11.25 \text{ W}$



(b) The total resistance is $R = \frac{V^2}{P} = \frac{(12.6 \text{ V})^2}{90 \text{ W}} = 1.76 \Omega$

What is the resistance of each wire? $1.76 \Omega \times 8 = 14.1 \Omega$

Medir tensão

Medição de tensão

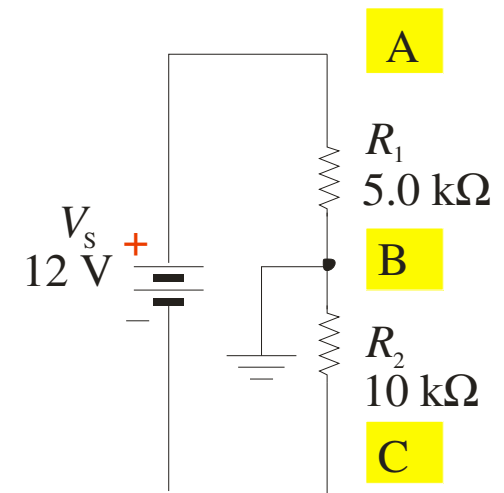
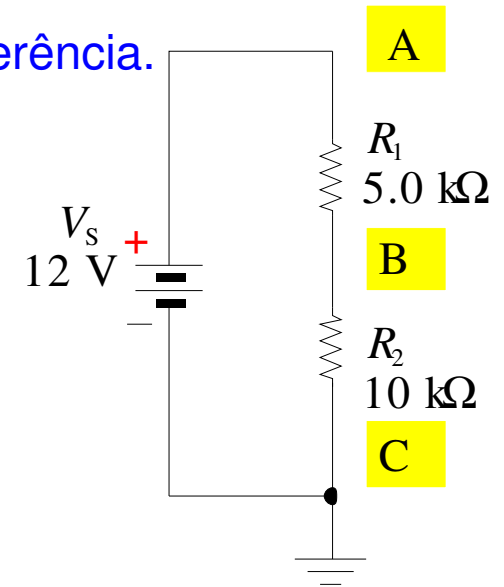
Uma tensão é relativa e medida em relação ao ponto de referência.

As tensões que são dadas com respeito à terra são, em geral, representadas com um único índice: por exemplo, V_A representa a tensão no ponto A com respeito à terra (referência terra); V_B representa a tensão do ponto B relativamente à terra. V_{AB} representa a tensão entre os pontos A e B. Qual é o valor de V_A , V_B , e V_{AB} para o circuito da figura? $V_A = 12\text{ V}$ $V_B = 8\text{ V}$ $V_{AB} = 4\text{ V}$

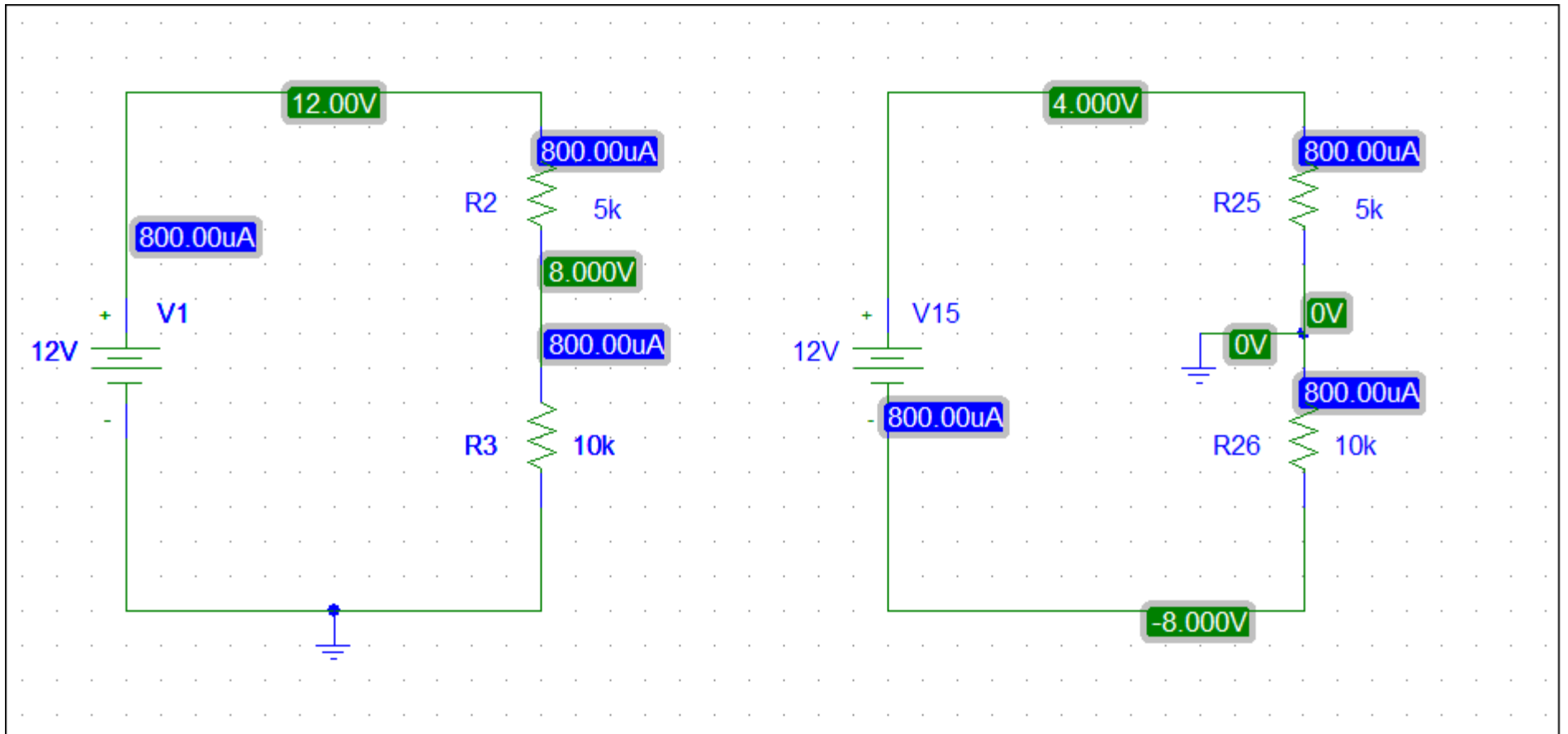
A terra de referência nem sempre é o ponto do circuito de menor potencial. Assuma que o ponto de terra se moveu de A para B. O valor das tensões V_A , V_B , e V_C para o circuito são: $V_A = 4\text{ V}$ $V_B = 0\text{ V}$ $V_C = -8\text{ V}$

O valor V_{AB} mudou em relação ao exemplo anterior?

Não, continua a ser 4 V



Simulação PSPICE

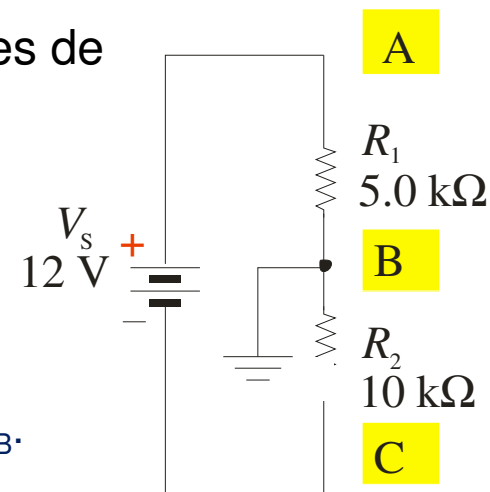


Medição de tensão

Assuma que R_2 está em aberto. Para este caso, os valores de V_A , V_B , e V_C para o circuito

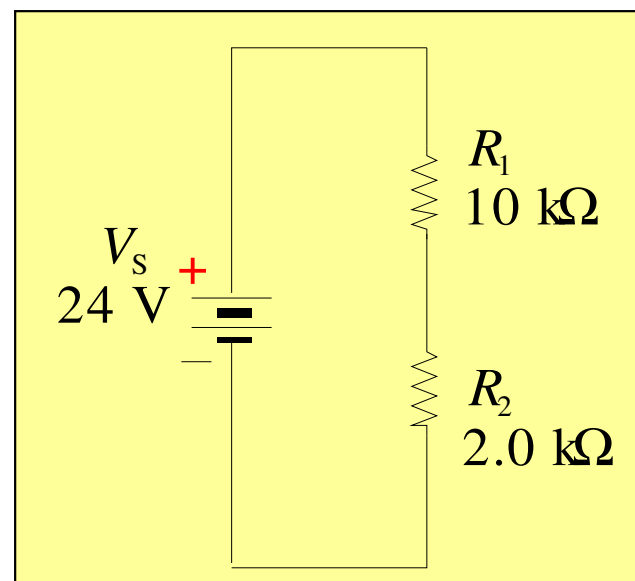
$$V_A = 0 \text{ V}, V_B = 0 \text{ V e } V_C = -12 \text{ V}.$$

Se R_2 está em aberto, não há corrente. Note que $V_B = 0 \text{ V}$ porque está à terra, e $V_A = 0 \text{ V}$ porque tem o mesmo potencial que V_B . $V_C = -12 \text{ V}$ porque a fonte de tensão está flutuante (uma dos terminais não está ligado ao circuito).



A corrente na resistência de $10 \text{ k}\Omega$ é:

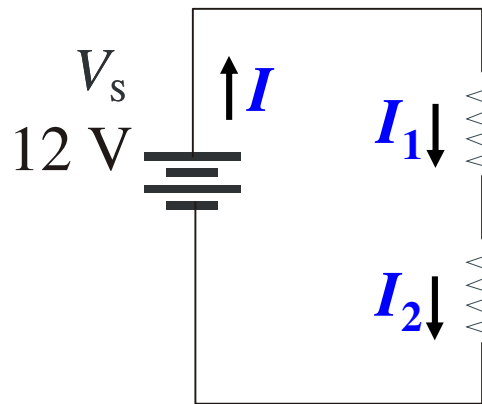
- a. 0.5 mA
- b. 2.0 mA
- c. 2.4 mA
- d. 10 mA



Divisor de tensão

Divisor de tensão

Considere o circuito:



$$I_1 = I_2 = I \longrightarrow I_1 = I = V_S / (R_1 + R_2)$$

$$V_{R1} = I_1 R_1 = V_S R_1 / (R_1 + R_2)$$

$$V_{R2} = I_2 R_2 = V_S R_2 / (R_1 + R_2)$$

Num divisor de tensão a tensão aos terminais de uma resistência é igual à razão entre os valores da resistência e da resistência total equivalente multiplicada pela tensão aplicada ao divisor.

$$V_{Ri} = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^n R_i} V_S$$

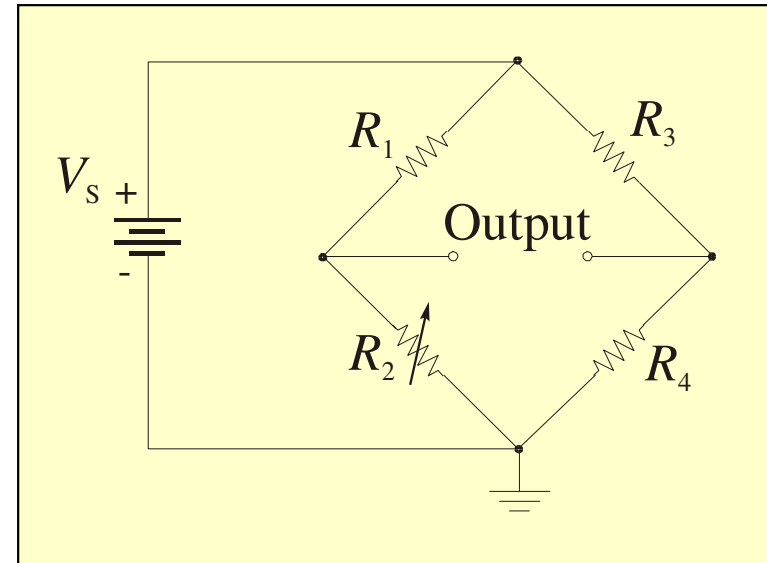
Assuma que o valor de R_1 é duas vezes superior a R_2 . A tensão aos terminais de R_1 é:

$$V_{R1} = \frac{2R_2}{2R_2 + R_2} V_S = \frac{2}{3} 12 \text{ V} = 8 \text{ V}$$

O divisor de tensão é uma topologia/ configuração que aparece em muitas aplicações e/ou porções de circuitos.

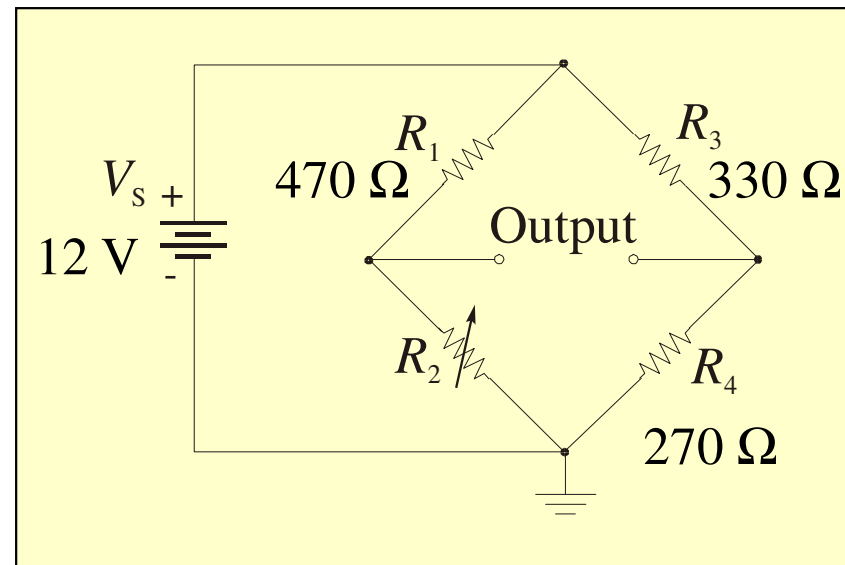
Ponte de Wheatstone

The Wheatstone bridge consists of a dc voltage source and four resistive arms forming two voltage dividers. The output is taken between the dividers. Frequently, one of the bridge resistors is adjustable.

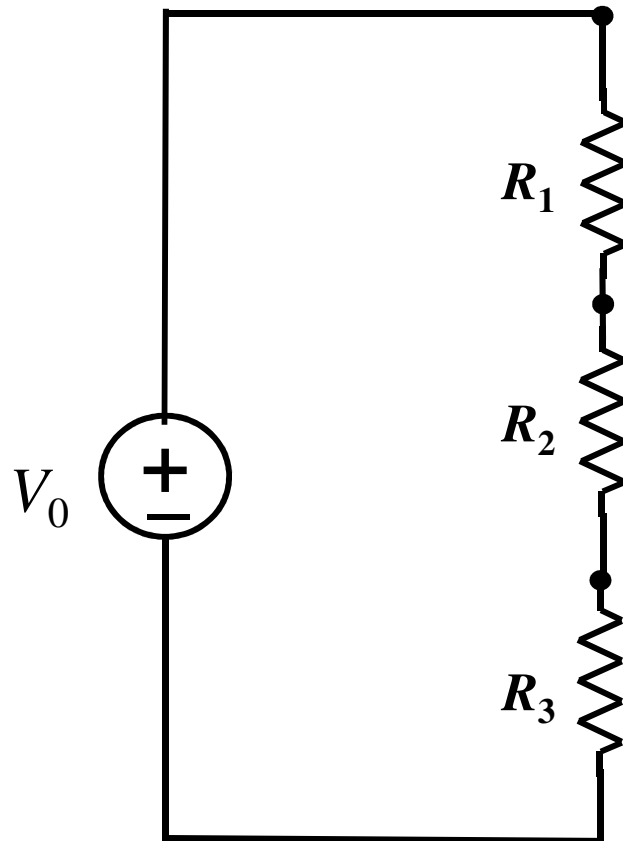


When the bridge is balanced, the output voltage is **zero**, and the products of resistances in the opposite diagonal arms are **equal**.

Example: What is the value of R_2 if the bridge is balanced? **384Ω**



Divisor de tensão com três resistências



$$\begin{array}{l} + \\ V_{R1} = V_0 \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3} \\ - \end{array}$$

“soma de todas as resistências”

$$\begin{array}{l} + \\ V_{R2} = V_0 \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3} \\ - \end{array}$$

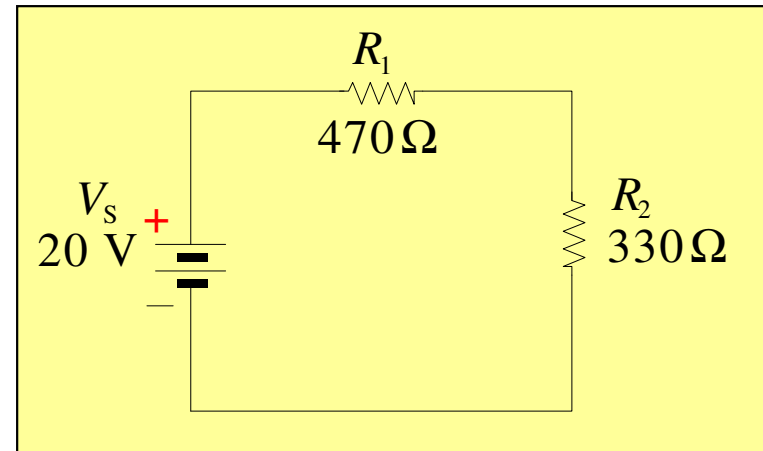
$$\begin{array}{l} + \\ V_{R3} = V_0 \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \\ - \end{array}$$

$$V_{Ri} = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^n R_i} V_0$$

Num divisor de tensão a tensão aos terminais de uma resistência é igual à razão entre os valores da resistência e da resistência total equivalente multiplicada pela tensão aplicada ao divisor.

Potência em circuitos série

Use a regra do divisor de tensão para determinar V_{R1} (tensão aos terminais de R_1) e V_{R2} (tensão aos terminais de R_2).
Determine a potência nas resistências R_1 e R_2 e P_T (potência total). Compare com potência fornecida pela fonte.



Aplicando a regra da divisão de tensão:

$$V_{R1} = \left(\frac{470\ \Omega}{800\ \Omega} \right) 20\ \text{V} = 11.75\ \text{V}$$

$$V_{R2} = \left(\frac{330\ \Omega}{800\ \Omega} \right) 20\ \text{V} = 8.25\ \text{V}$$

A potência dissipada nas resistências e potencia total:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= \frac{(11.75\ \text{V})^2}{470\ \Omega} = 0.29\ \text{W} \\ P_2 &= \frac{(8.25\ \text{V})^2}{330\ \Omega} = 0.21\ \text{W} \end{aligned} \right\} P_T = 0.5\ \text{W}$$

Divisor de tensão

Qual é a tensão através de R_2 ?

A Resistência total R_T é 25 k Ω .

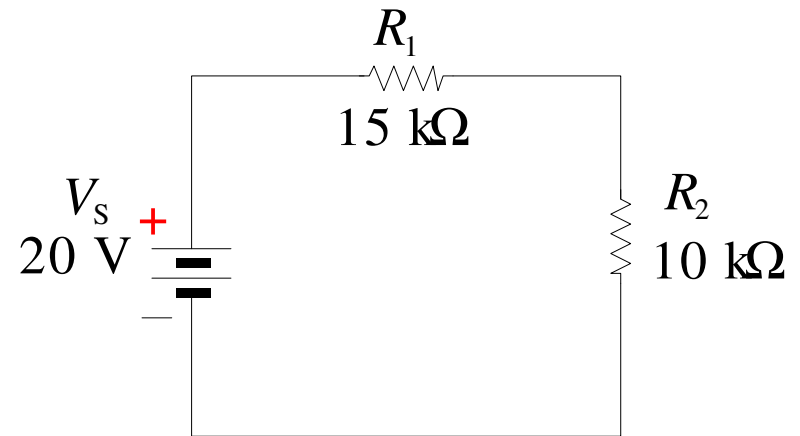
Aplicando a fórmula do divisor de tensão para duas resistências obtém-se:

$$V_2 = \left(\frac{R_2}{R_T} \right) V_S = \left(\frac{10 \text{ k}\Omega}{25 \text{ k}\Omega} \right) 20 \text{ V} = 8.0 \text{ V}$$

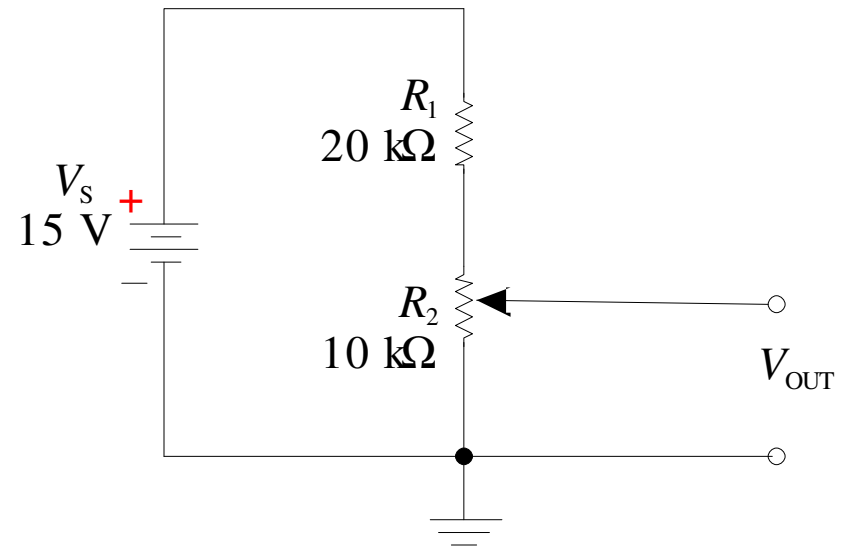
Os divisores de tensão podem ser usados para criar fontes de tensão ajustáveis usando um **potenciômetro**. No circuito ao lado a tensão V_{OUT} é ajustável.

Qual é o valor máximo que a tensão de saída pode tomar?

5.0 V



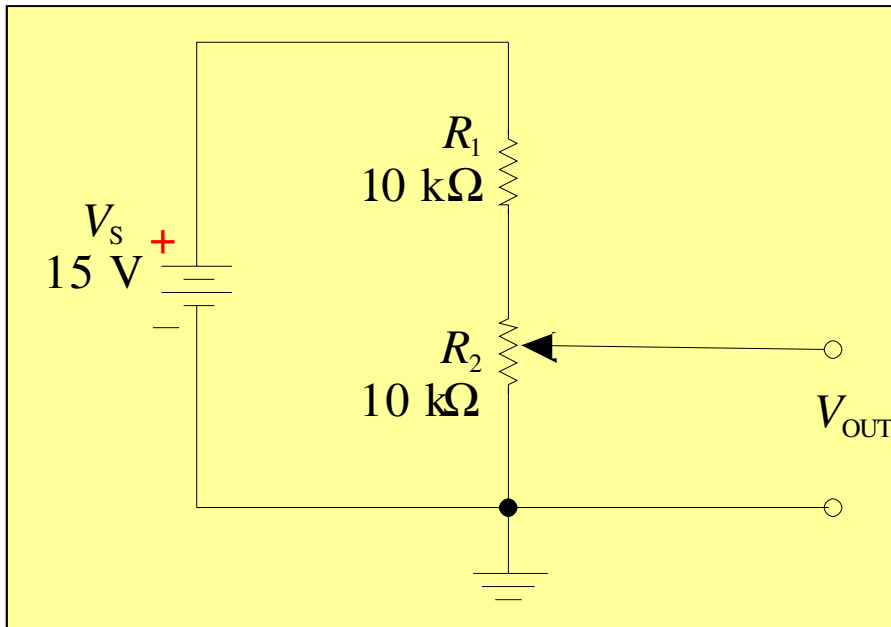
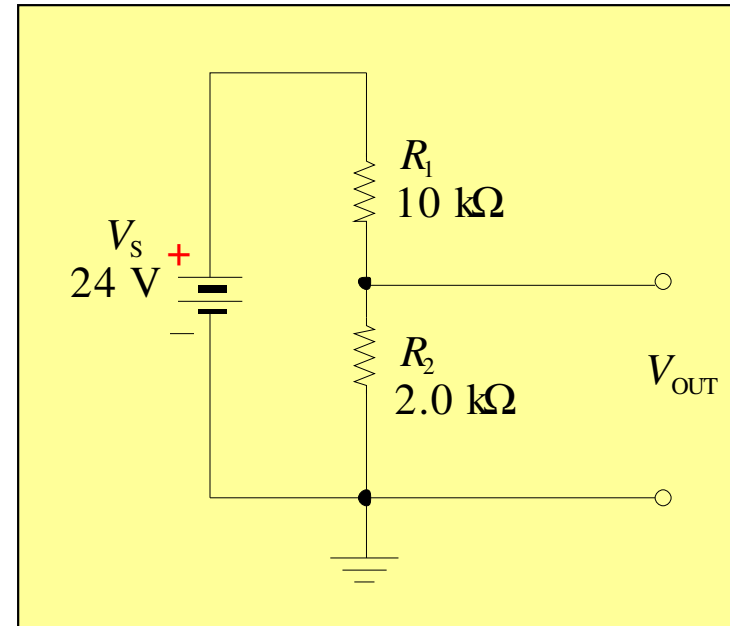
Note que 40% da tensão da fonte aparece ao terminal de R_2 , que representa 40% da resistência total da série.



Exercício

A tensão de saída do divisor de tensão é:

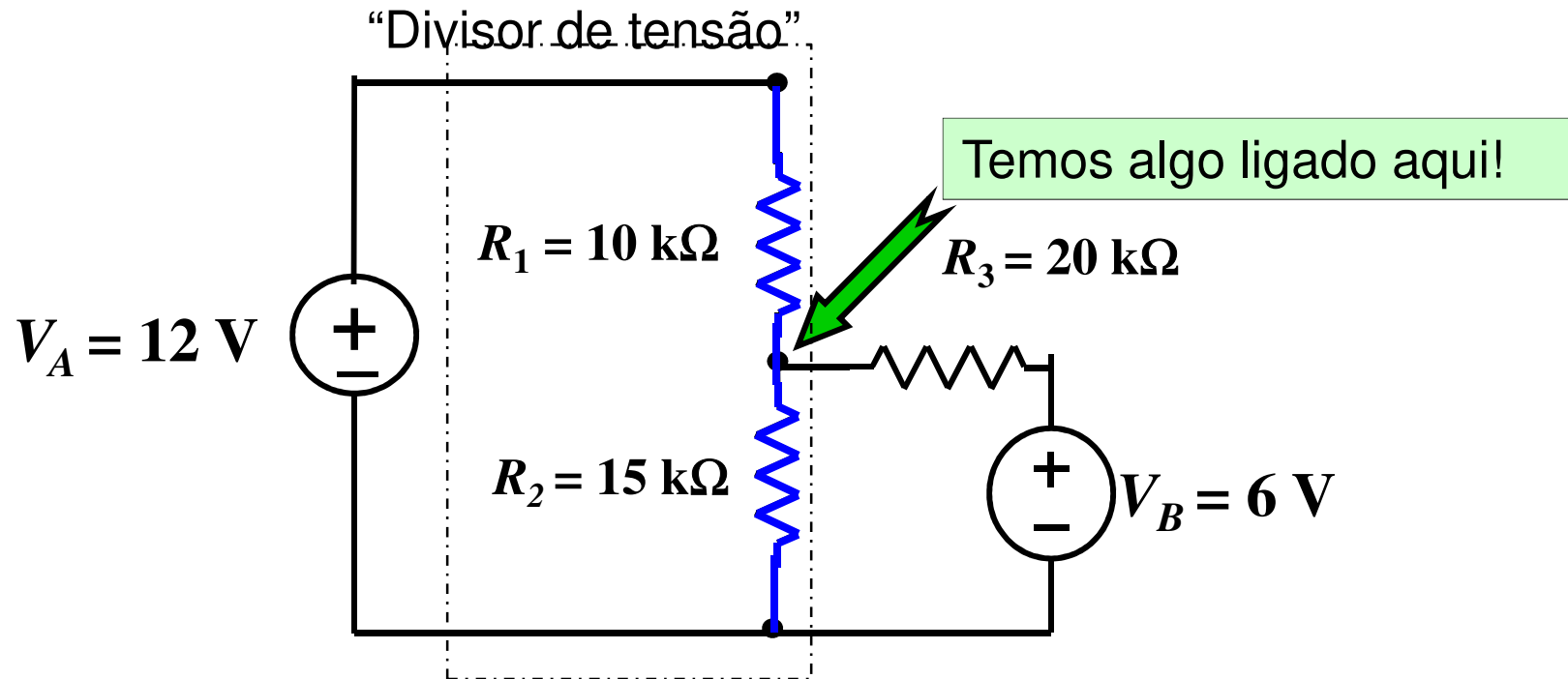
- a. 2.0 V
- b. 4.0 V
- c. 12 V
- d. 20 V



A tensão de saída mais baixa que se pode obter com o divisor de tensão ao lado é:

- a. 0 V
- b. 1.5 V
- c. 5.0 V
- d. 7.5 V

Divisor de tensão com carga

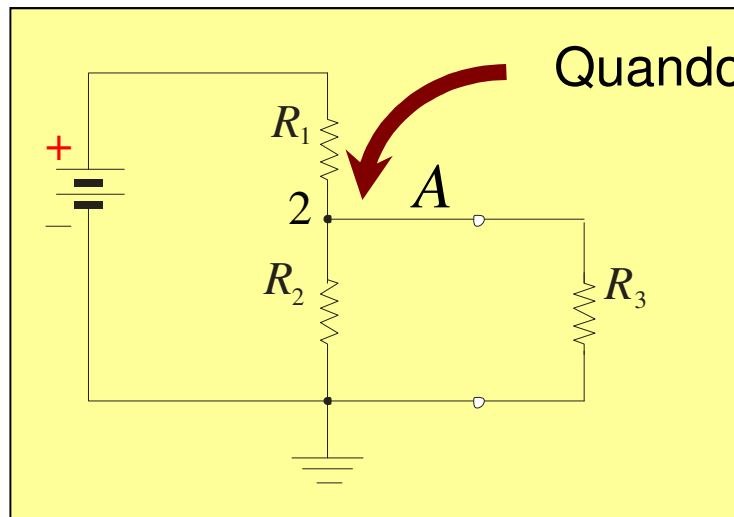


Se se pudesse aplicar a fórmula do divisor de tensão, teríamos:

$$V_2 = V_A \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 12\text{ V} \frac{15\text{ k}\Omega}{10\text{ k}\Omega + 15\text{ k}\Omega} = 7.2\text{ V} \text{ **errado!**}$$

Divisor de tensão com carga

A expressão para o divisor de tensão formado por duas resistências foi obtida para um circuito em série (R_3 não existia, ou assumiu-se que R_3 seria infinita (circuito aberto)):



Quando nada está ligado aqui temos:

$$V_2 = \left(\frac{R_2}{R_T} \right) V_S$$

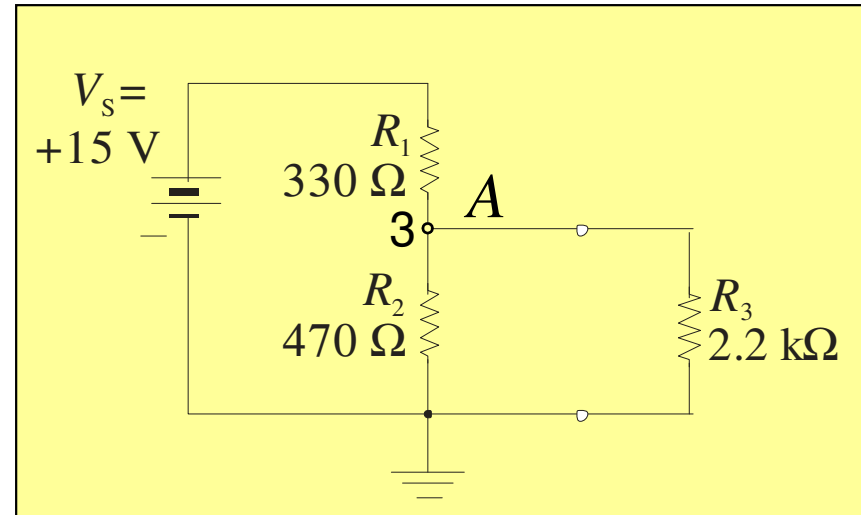
O circuito acima representa um divisor de tensão com uma carga resistiva (resistência). O mesmo é dizer que o divisor de tensão está em carga.

A carga reduz a resistência vista do ponto A e da terra/comum!

Divisor de tensão com carga

Qual é a tensão aos terminais de R_3 ?

R_2 e R_3 formam um paralelo. Para podermos usar a fórmula do divisor de tensão temos de substituir R_2 pelo paralelo de R_2 com R_3 . Agora podemos aplicar a fórmula do divisor de tensão:



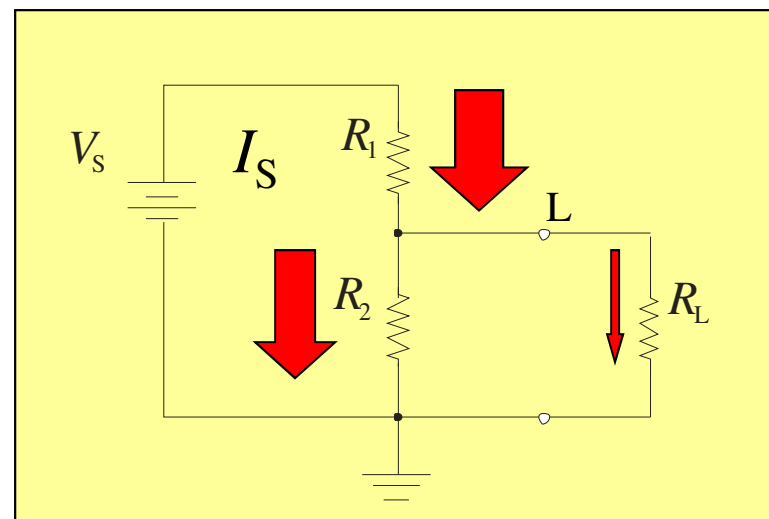
$$R_{2,3} = R_2 \parallel R_3 = 470 \Omega \parallel 2.2 \text{ k}\Omega = 387 \Omega$$

$$V_3 = V_{2,3} = \left(\frac{R_{2,3}}{R_1 + R_{2,3}} \right) V_s = \left(\frac{387 \Omega}{330 \Omega + 387 \Omega} \right) 15 \text{ V} = 8.10 \text{ V}$$

Se R_3 fosse infinita teríamos: $V_2 = 8.81 \text{ V}$. E se R_3 fosse igual a R_2 ?

Divisor de tensão com carga

A **stiff voltage-divider** is one in which the loaded voltage nearly the same as the no-load voltage. To accomplish this, the load current must be small compared to the bleeder current (or R_L is large compared to the divider resistors).



If $R_1 = R_2 = 1.0 \text{ k}\Omega$, what value of R_L will make the divider a stiff voltage divider?

What fraction of the unloaded voltage is the loaded voltage?

$R_L > 10 R_2$; R_L should be $10 \text{ k}\Omega$ or greater. For a $10 \text{ k}\Omega$ load (R_L),

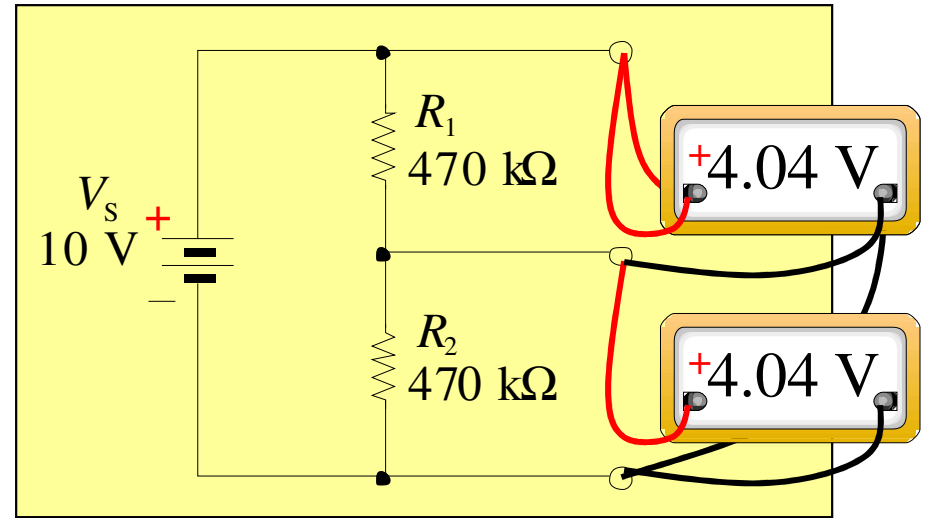
$$V_L = \left(\frac{R_2 \parallel R_L}{R_1 + R_2 \parallel R_L} \right) V_S = \left(\frac{0.91 \text{ k}\Omega}{1.0 \text{ k}\Omega + 0.91 \text{ k}\Omega} \right) V_S = (0.476) V_S$$

This is 95% of the unloaded voltage.

Efeito de carga do voltímetro

Assume $V_S = 10\text{ V}$. The meter reads only 4.04 V when it is across either R_1 or R_2 .

Can you explain what is happening?



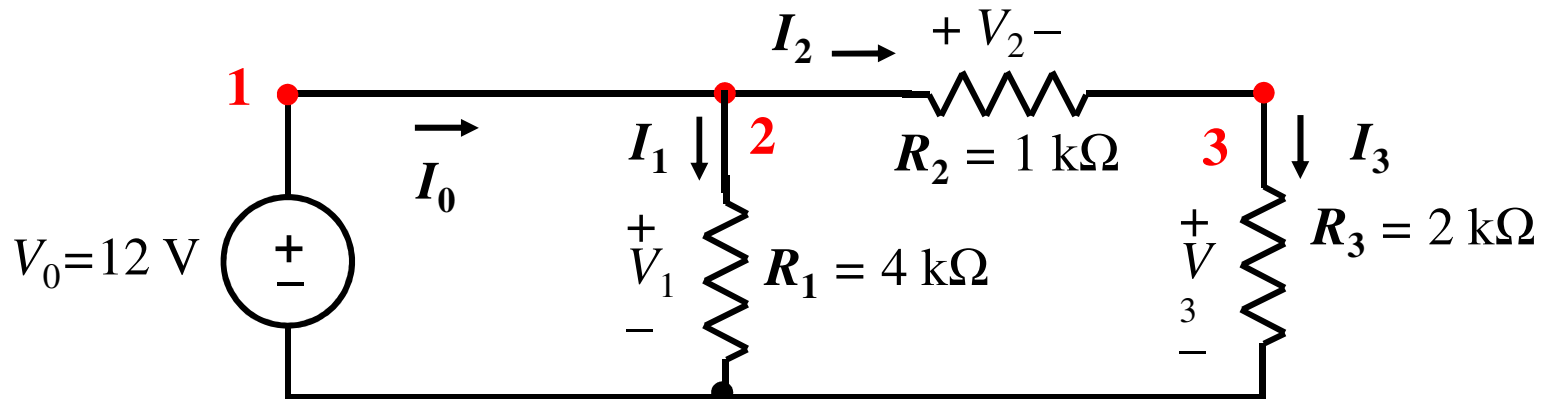
All measurements affect the quantity being measured. A voltmeter has internal resistance, which can change the resistance of the circuit under test. In this case, a $1\text{ M}\Omega$ internal resistance of the meter accounts for the readings.

Calcule a corrente que a fonte V_S fornece ao circuito assumindo que:

- os voltímetros são ideais;
- os voltímetros têm resistência interna $1\text{ M}\Omega$.

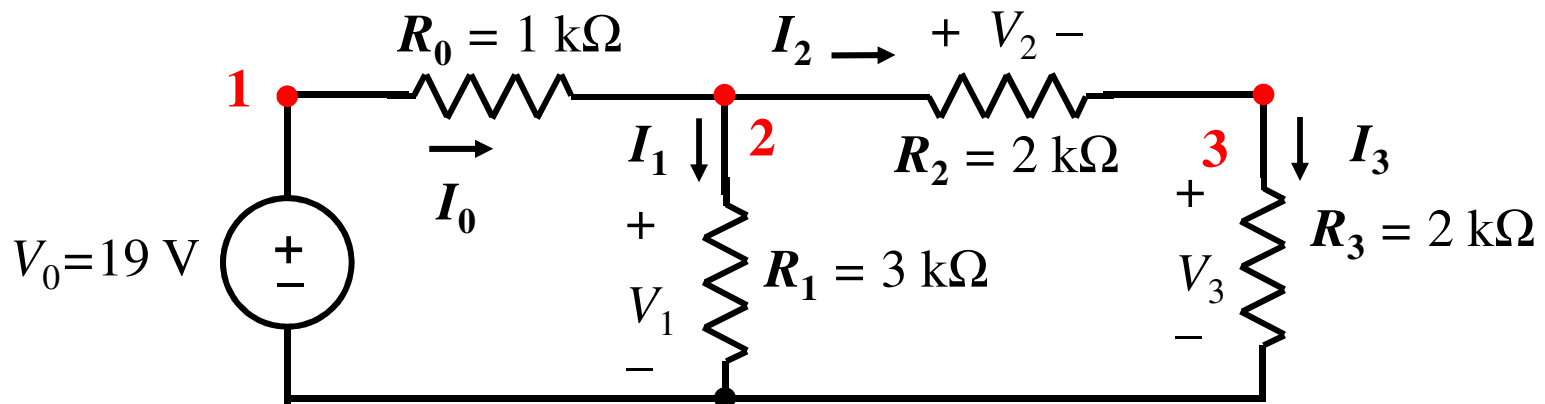
Exercícios: divisor de tensão

Determine as tensões nos nós e as correntes nos ramos do circuito usando apenas o conceito de divisor de tensão, a associação de resistências e a lei de Ohm.



Sol: $V_1 = 12\text{ V}$; $V_2 = 12\text{ V}$; $V_3 = 8\text{ V}$; $I_1 = 3\text{ mA}$; $I_2 = 4\text{ mA}$; $I_3 = 4\text{ mA}$, $I_0 = 7\text{ mA}$

Determine as tensões nos nós e as correntes nos ramos do circuito usando apenas o conceito de divisor de tensão, a associação de resistências e a lei de Ohm.



Circuitos Elétricos e Sistemas Digitais

2018-2019 - 1.º Semestre

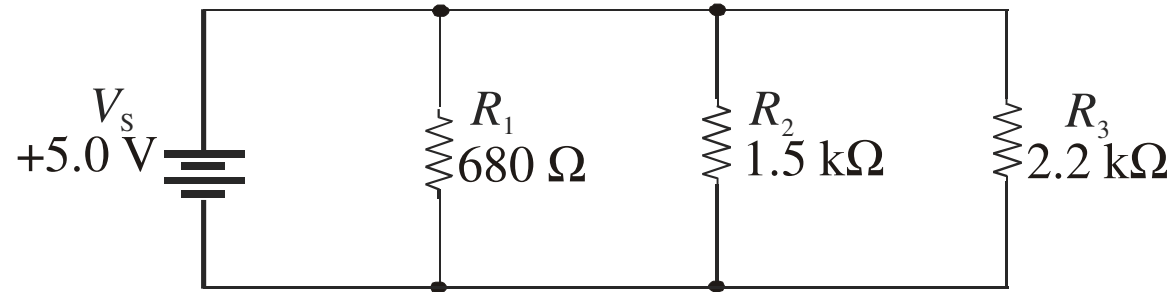
Elementos de circuitos e leis fundamentais

- Divisor de corrente
- Circuitos série-paralelo
- Equivalência entre circuitos
- Topologias de rede elétricas: nós e ramos
- Leis de Kirchhoff da corrente e da tensão
- Exemplos de aplicação das leis de Kirchhoff da corrente e da tensão
- Ponte de Wheatstone

Divisores de corrente

Divisor de corrente

Consideremos o circuito.



Como todos os componentes estão ligados aos terminais da fonte, a tensão aos terminais de cada um deles é a mesma. Qual é o valor de corrente em cada um dos ramos do circuito abaixo?

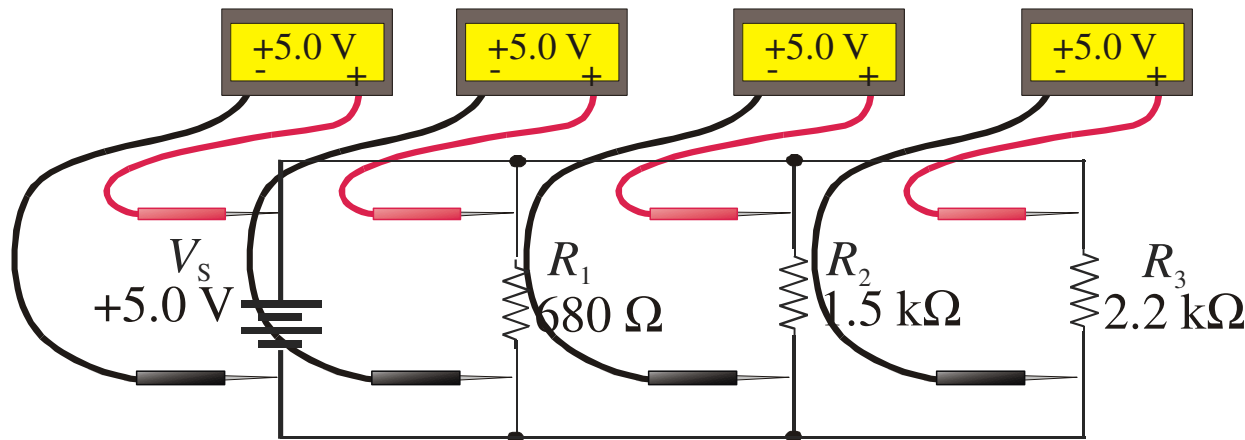
Cálculo simples:

$$i_1 = 5 \text{ V} / 680 \text{ } \Omega = 7.35 \text{ mA};$$

$$i_2 = 5 \text{ V} / 1.5 \text{ k}\Omega = 3.33 \text{ mA};$$

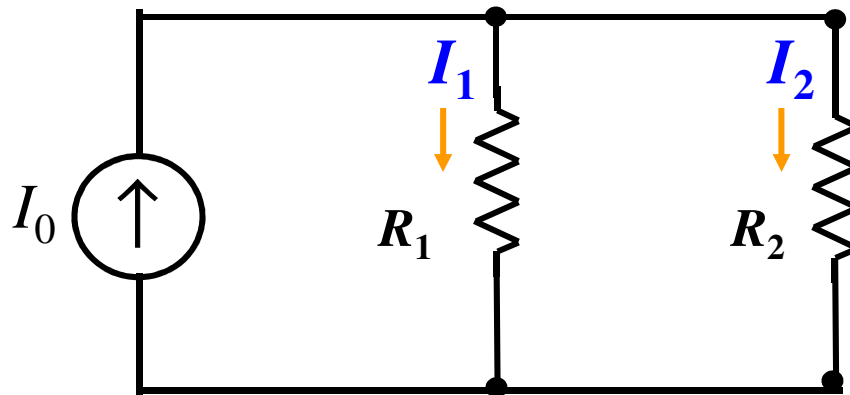
$$i_3 = 5 \text{ V} / 2.2 \text{ k}\Omega = 2.27 \text{ mA};$$

E se a fonte de tensão for substituída por uma fonte de corrente?



Divisor de corrente com duas resistências

Consideremos o seguinte circuito resistivo com uma fonte de corrente I_0 . A fonte de corrente modela a corrente I_0 , que pode ser produzida por outro circuito, por exemplo.



Esta topologia/configuração aparece em muitas aplicações e/ou porções de circuitos

- Pretendemos determinar como é que I_0 se divide entre I_1 e I_2

Divisor de corrente com duas resistências

Quando a corrente I_T entra no nó (junção) divide-se nas correntes I_1 e I_2 .

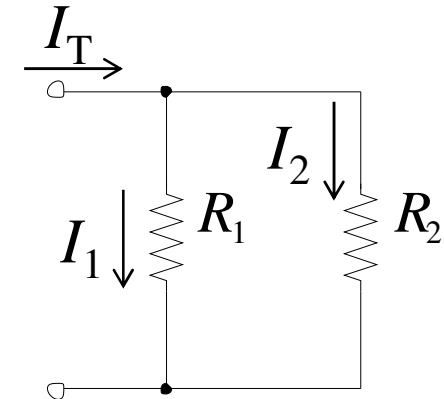
Tendo presente que

$$I_T = I_1 + I_2 \text{ (Eq. 1) , e}$$

$$R_1 I_1 = R_2 I_2 \text{ (Eq. 2),}$$

a resolução das equações (1) e (2) em ordem a I_1 e a I_2 , resulta:

$$I_1 = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) I_T \quad \text{e} \quad I_2 = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) I_T$$



Note a diferença nos índices, e que o numerador é o mesmo nas duas equações.

Ter presente que a resistência equivalente do paralelo de duas resistências é dada por:

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \quad \text{ou} \quad R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Exercício: Divisor de corrente

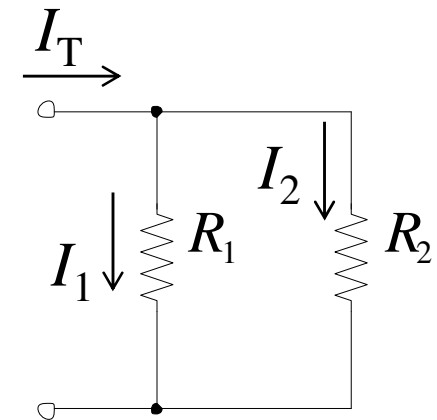
Assuma que R_1 é uma resistência de 2.2 k Ω que está em paralelo com R_2 , que cuja resistência é 4.7 k Ω . Se a corrente que percorre o paralelo for 8.0 mA, qual é o valor da resistência do paralelo, a corrente em cada resistência e a tensão aos terminais de cada resistência?

$$R_1 // R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 1,5 \text{ k}\Omega$$

$$I_1 = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) I_T = \left(\frac{4.7 \text{ k}\Omega}{6.9 \text{ k}\Omega} \right) 8.0 \text{ mA} = 5.45 \text{ mA}$$

$$I_2 = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) I_T = \left(\frac{2.2 \text{ k}\Omega}{6.9 \text{ k}\Omega} \right) 8.0 \text{ mA} = 2.55 \text{ mA}$$

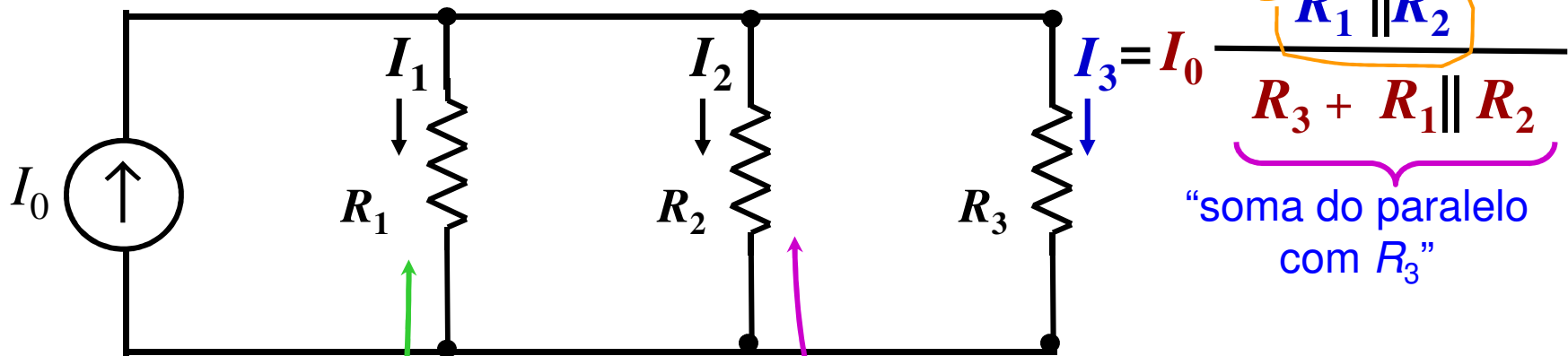
$$V(R_1 // R_2) = R_1 // R_2 I_T = 1,5 \text{ k}\Omega \times 8.0 \text{ mA} = 12 \text{ V}$$



Num divisor de corrente, quanto maior for o valor da resistência menor será a corrente que a percorre.

Divisor de corrente com três resistências

“paralelo que queremos simplificar”



$$I_3 = I_0 \frac{R_1 \parallel R_2}{R_3 + R_1 \parallel R_2}$$

“soma do paralelo com R_3 ”

$$I_1 = I_0 \frac{R_2 \parallel R_3}{R_1 + R_2 \parallel R_3}$$

“soma do paralelo com R_1 ”

$$I_2 = I_0 \frac{R_1 \parallel R_3}{R_2 + R_1 \parallel R_3}$$

“paralelo que queremos simplificar”

“paralelo que queremos simplificar”

Exercício

The current divider formula to find I_1 for the special case of two resistors is

a.
$$I_1 = \left(\frac{R_1}{R_T} \right) I_T$$

b.
$$I_1 = \left(\frac{R_2}{R_T} \right) I_T$$

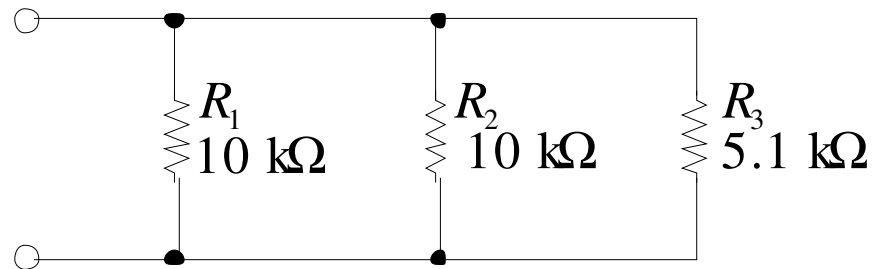
c.
$$I_1 = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) I_T$$

d.
$$I_1 = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) I_T$$

Exercício

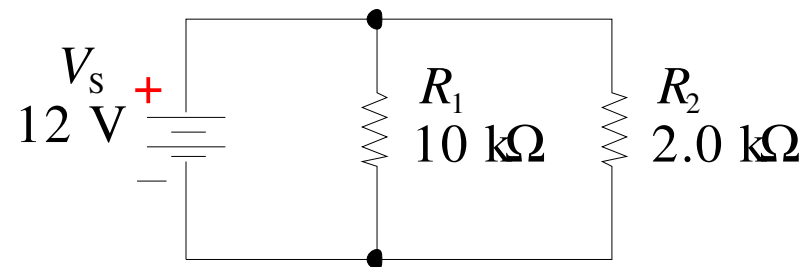
The total resistance of the parallel resistors is

- a. 2.52 k Ω
- b. 3.35 k Ω
- c. 5.1 k Ω
- d. 25.1 k Ω



The total current leaving the source is

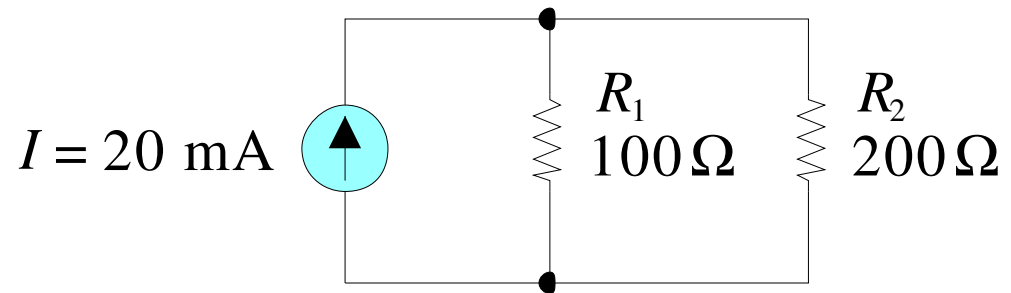
- a. 1.0 mA
- b. 1.2 mA
- c. 6.0 mA
- d. 7.2 mA



Exercício

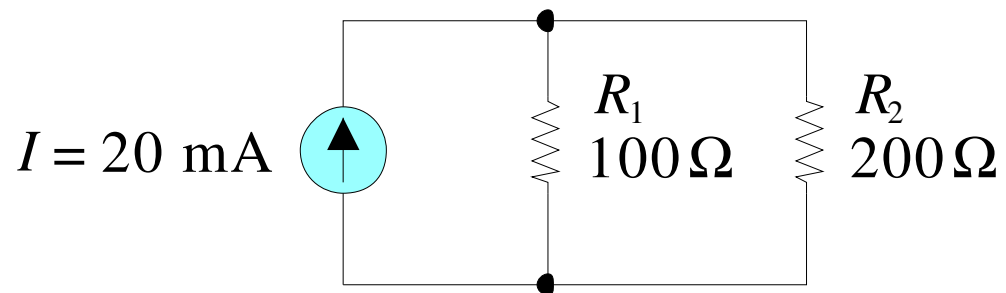
The current in R_1 is

- a. 6.7 mA
- b. 13.3 mA
- c. 20 mA
- d. 26.7 mA



The voltage across R_2 is

- a. 0 V
- b. 0.67 V
- c. 1.33 V
- d. 4.0 V

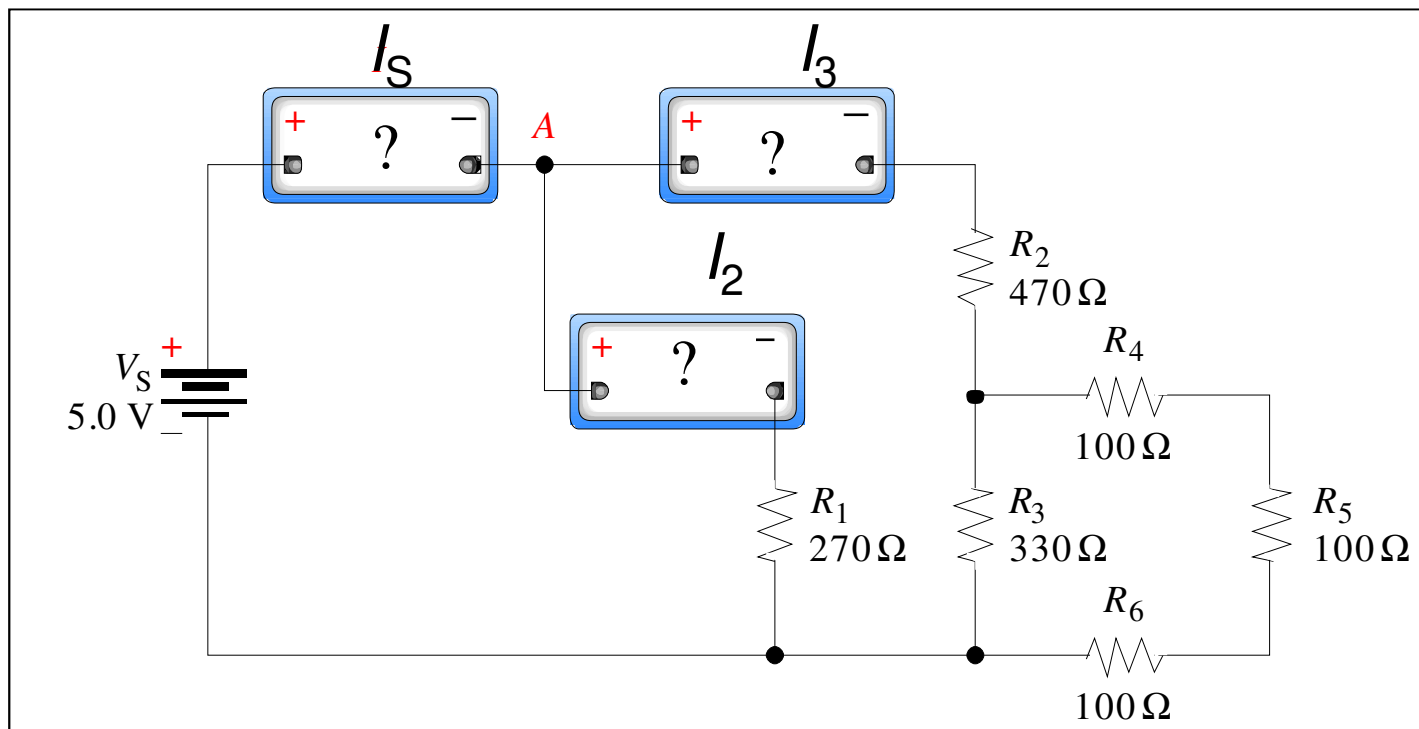


Circuitos série-paralelo

Circuitos série-paralelo

Em geral os circuitos compreendem combinações de componentes associados em série e em paralelo.

Simplificando as associações em série e em paralelo obtém-se as correntes que percorrem os amperímetros inseridos no ramos S, 2 e 3:

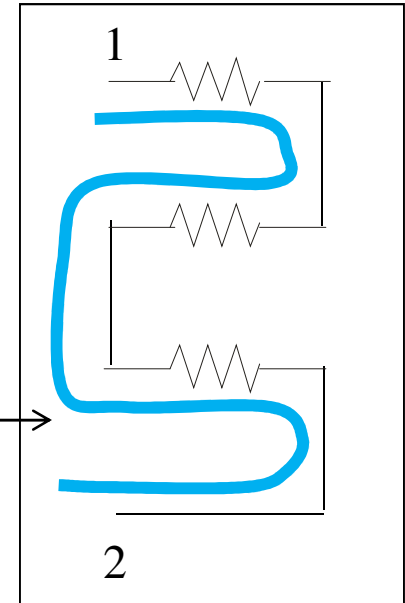


26,5 mA, 8,0 mA, 18,5 mA

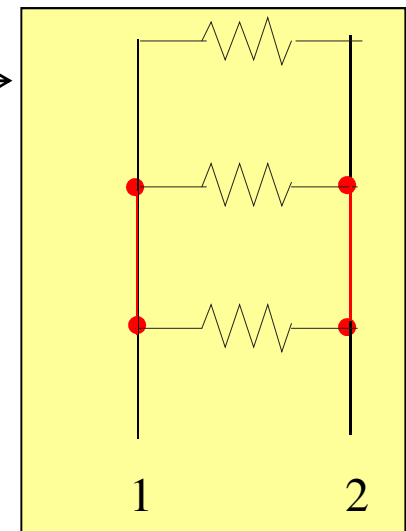
Circuitos série-paralelo

Most practical circuits have various combinations of series and parallel components. You can frequently simplify analysis by combining series and parallel components.

Components that are connected in series will share a common path.



Components that are connected in parallel will be connected across the same two nodes.

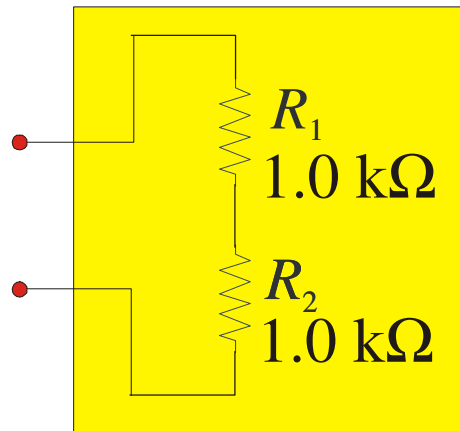


An important analysis method is to form an **equivalent circuit**.

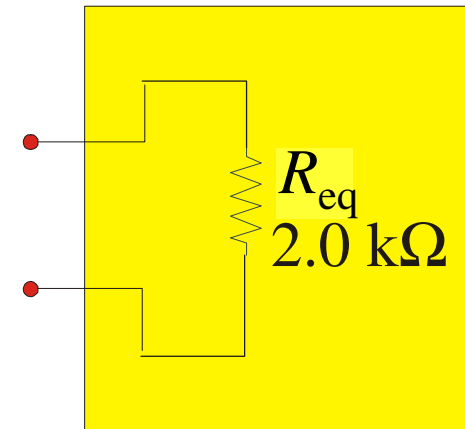
An equivalent circuit is one that has **characteristics that are electrically the same as another circuit but is generally simpler.**

Circuitos equivalentes

For example:



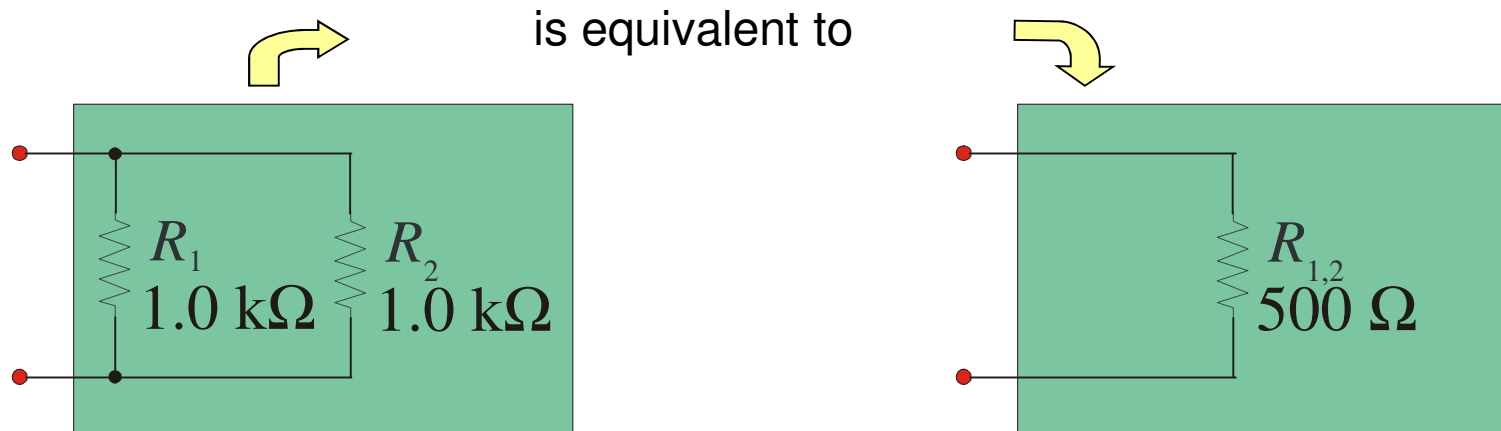
is equivalent to



There are no electrical measurements that can distinguish the boxes.

Circuitos equivalentes

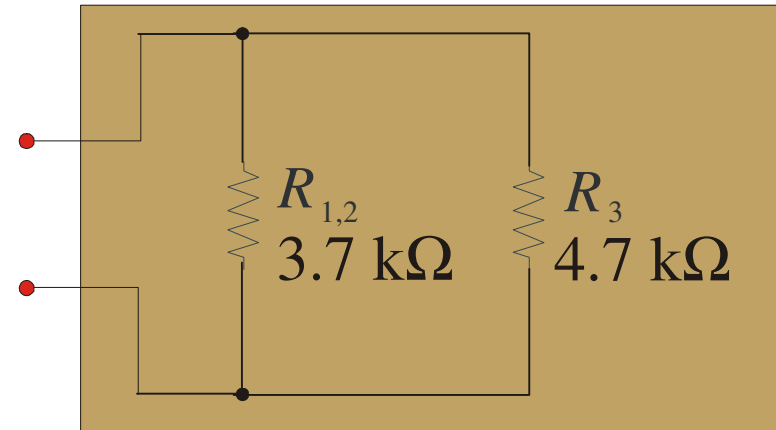
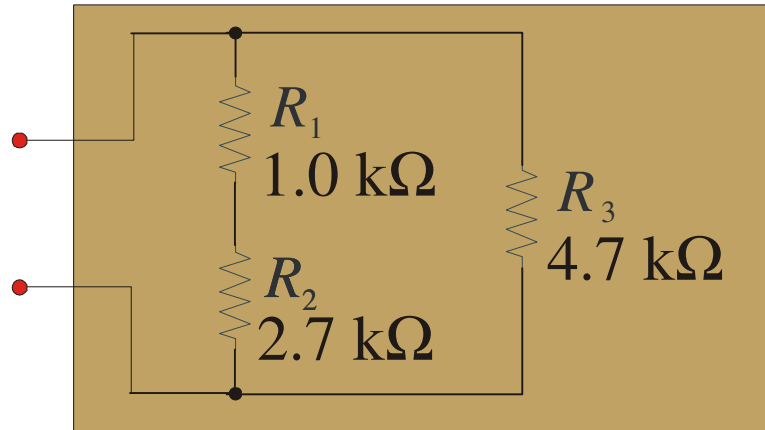
Another example:



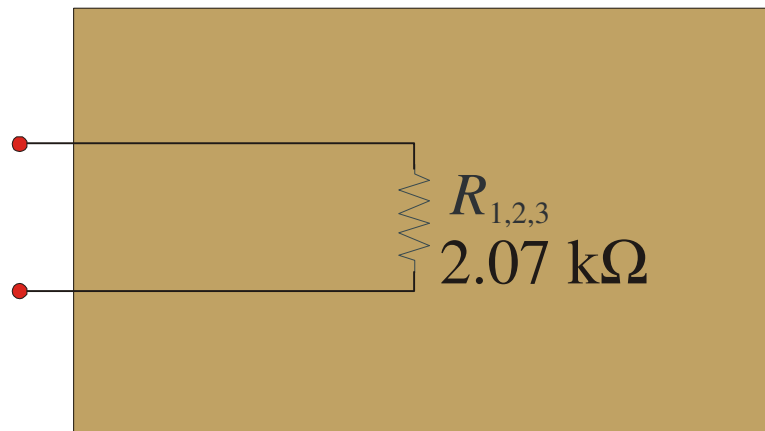
There are no electrical measurements that can distinguish the boxes.

Circuitos equivalentes

↪ is equivalent to ↩



↪ is equivalent to ↩

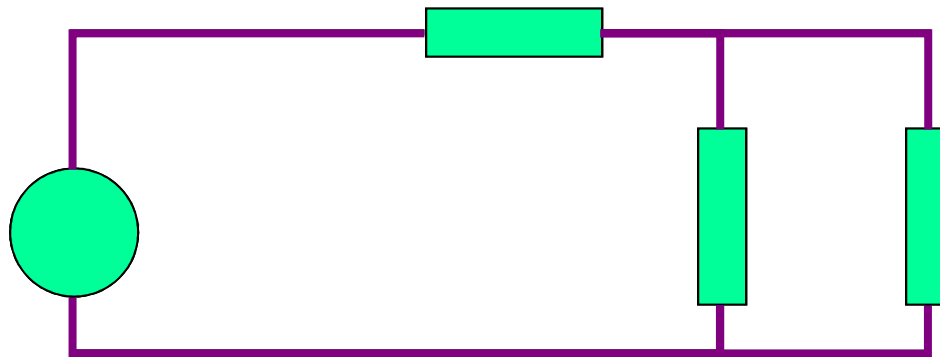


There are no electrical measurements that can distinguish between the **three** boxes.

Rede elétrica: nós e ramos

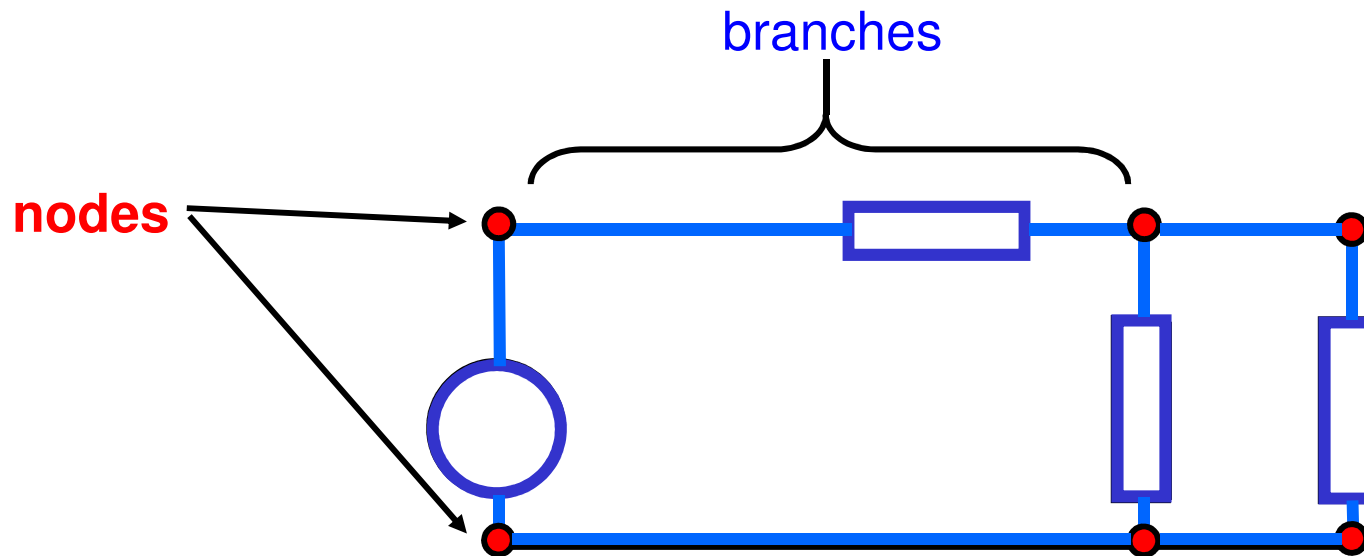
Topologia da rede

- Um conjunto de componentes elétricos interligados chama-se **rede**.
- Cada componente da rede é um **elemento**.
- Os elementos são ligados por **fiões** elétricos (condutores metálicos).



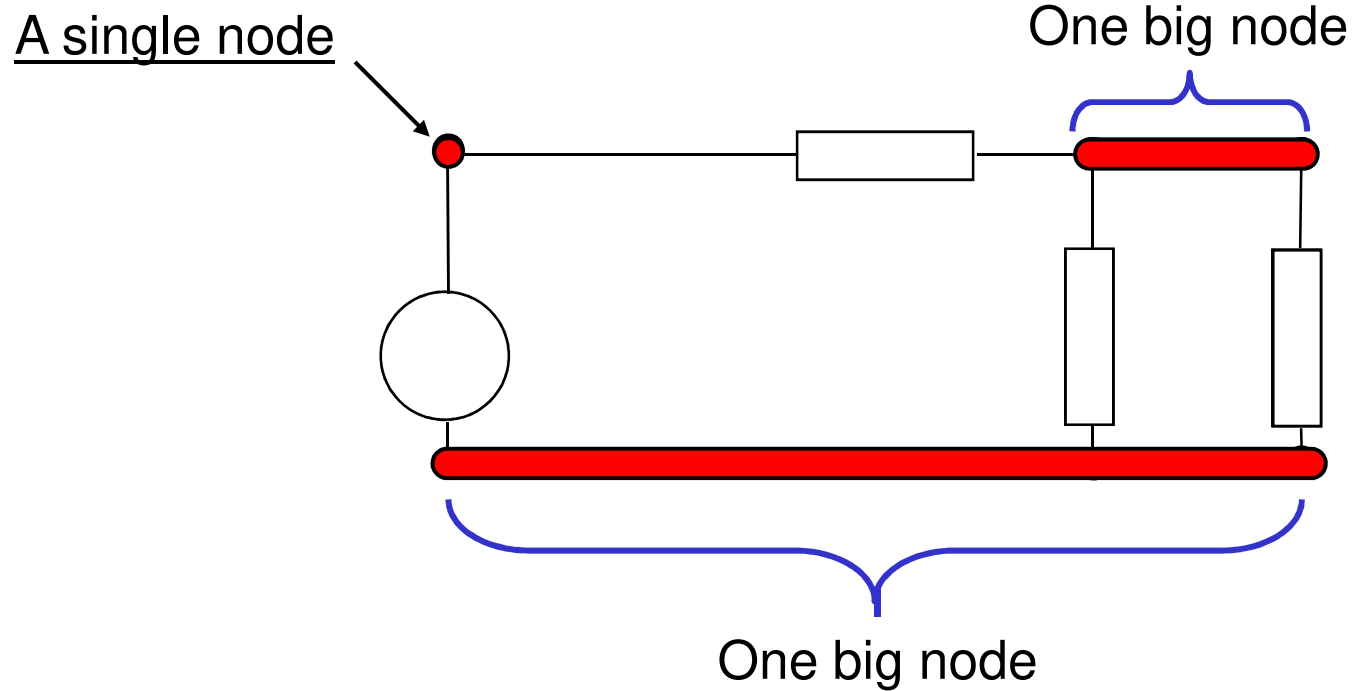
Nós e ramos

- As interligações entre fios são chamadas **nós**.
- Os percurso de fio entre nodos são designados **ramos**.



Os nós ligam-se apenas por fios

- Dois ou mais nós/nodos ligados apenas por **fios** podem ser considerados como **um único só nó**.

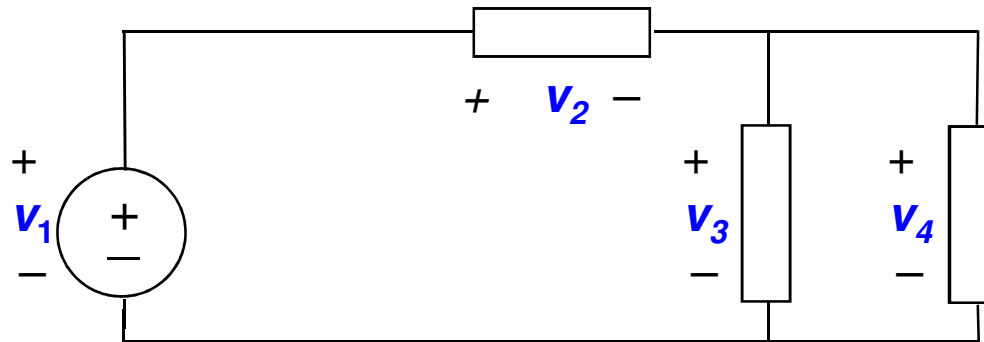


This network as **three** nodes

Leis de Kirchhoff da corrente e da tensão

Tensão

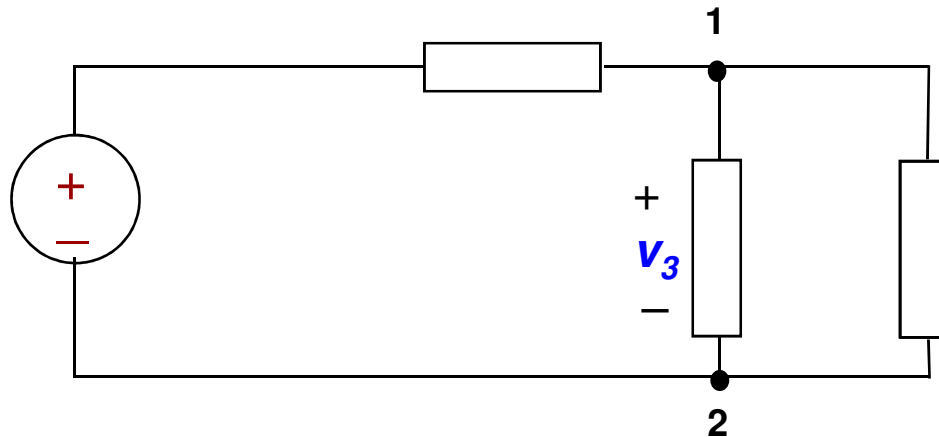
- **Voltages** are measured *across* the branches of a network, from one node to another.
- The **direction (polaridade)** of a voltage is indicated by + and – signs.



- Relembrar:
As fontes de tensão num circuito asseguram o fluxo de corrente através dos ramos do circuito.

Toda a tensão tem um valor e uma polaridade

- The polarity is defined by the **person** drawing the network.
- The value is determined by the **properties of the circuit**.



Example:

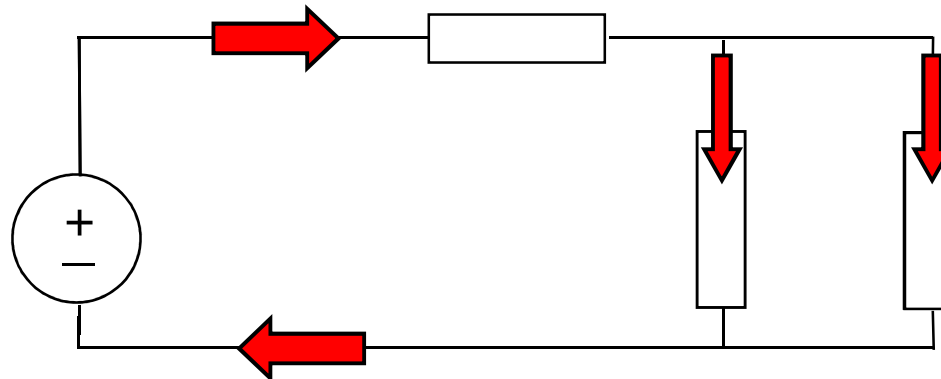
Suppose that +5 V appears physically from node 1 to node 2. Then $v_3 = v_{12} = 5 \text{ V}$.

Converse:

Suppose that +5 V appears physically from node 2 to node 1. Then $v_3 = v_{12} = -5 \text{ V}$.

Fluxo de corrente

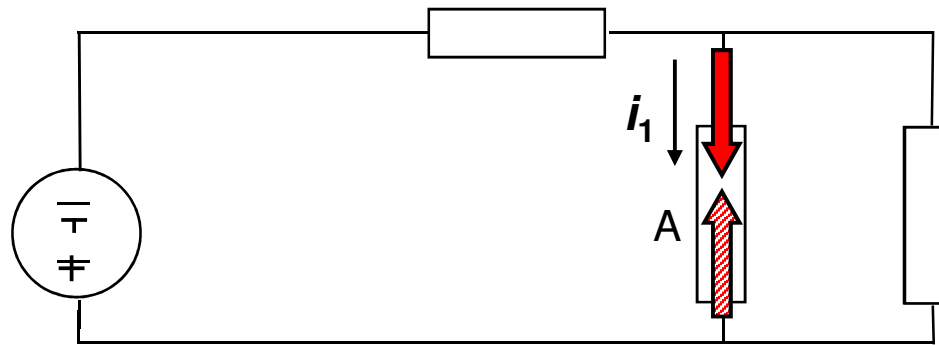
- **Current** can flow through the branches of a network.
- The **direction** of current flow is indicated by an arrow.



- Note: The **voltage sources** in the network drive the flow of current through its branches. (More on this idea later.)
- Relembrar:
As fontes de tensão num circuito asseguram o fluxo de corrente através dos ramos do circuito.

Toda a corrente tem um valor e uma direção

- The direction is defined by the **person** drawing the network.
- The value is determined by the **properties of the circuit**.



Example:

The arrow above defines “positive” current flow i_1 as downward in branch A.

Suppose that 4 mA of current flows physically downward in branch A. Then $i_1 = 4$ mA.

Converse:

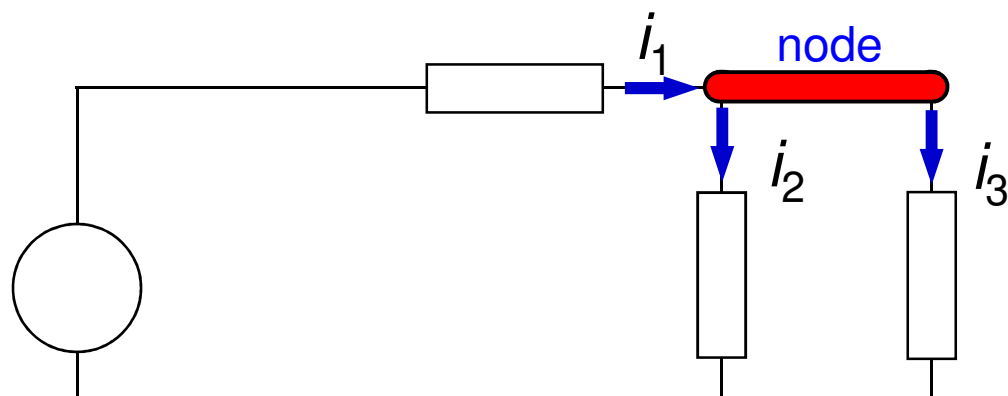
Suppose that 4 mA of current flows physically upward in branch A. Then $i_1 = -4$ mA.

**Lei dos nós
ou
lei de Kirchoff da correntes**

Lei dos nós ou lei das correntes

Kirchhoff's Current Law (KCL)

- The sum of currents flowing **into** a node must be balanced by the sum of currents flowing **out** of the node.



i_1 flows **into** the node

i_2 flows **out** of the node

i_3 flows **out** of the node

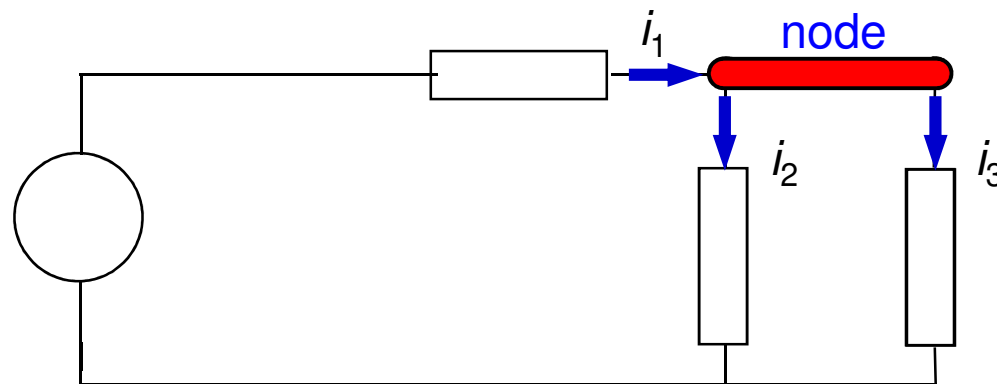
$$i_1 = i_2 + i_3$$

Lei de Kirchhoff da corrente

Kirchhoff's Current Law (KCL)

- Kirchhoff's Current Law: $i_1 = i_2 + i_3$
- This equation can also be written in the following form:

$$i_1 - i_2 - i_3 = 0$$



A formal statement of **Kirchhoff's Current Law**:

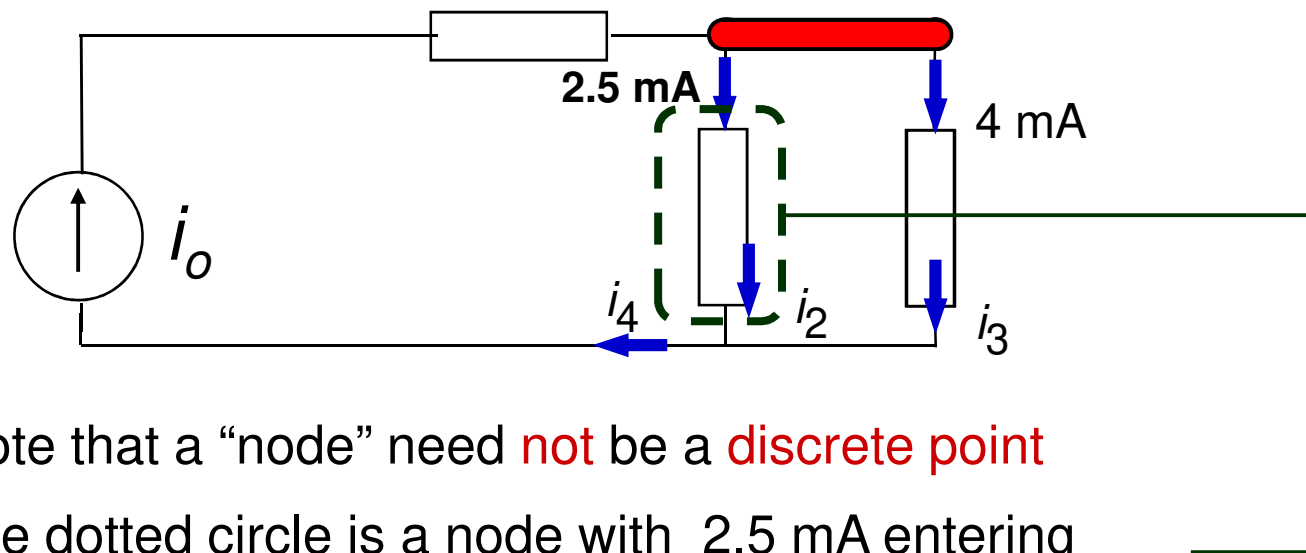
The sum of *all* the currents **entering** a node is zero.

(i_2 and i_3 **leave** the node, hence currents $-i_2$ and $-i_3$ **enter** the node.)

Exemplo 1: Lei de Kirchhoff da corrente

Q: How much is the current I_o ?

A: $i_o = 2.5 \text{ mA} + 4 \text{ mA} = 6.5 \text{ mA}$



- Note that a “node” need **not** be a **discrete point**
- The dotted circle is a node with 2.5 mA entering
- Hence $i_2 = 2.5 \text{ mA}$ **exits** the “node”.

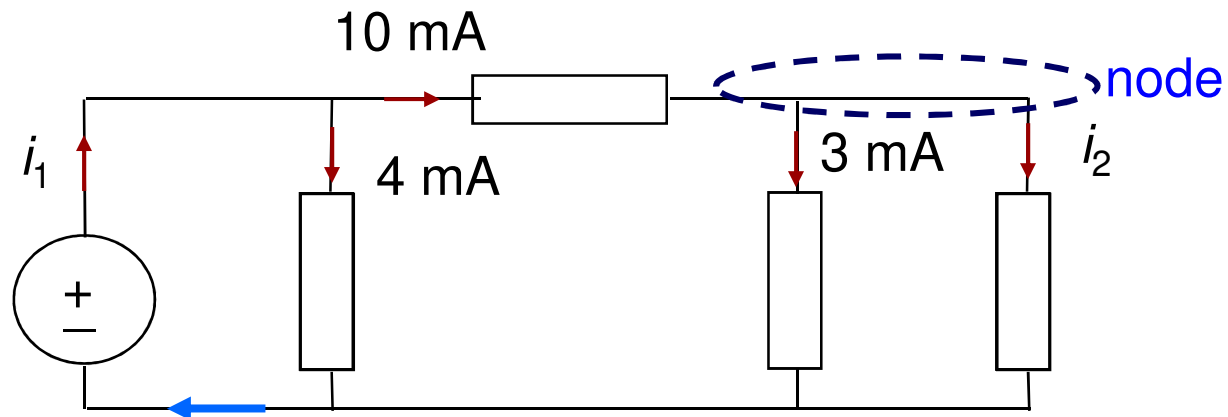
Similarly, $i_3 = 4 \text{ mA}$.

- From KCL, $i_4 = i_2 + i_3 = 6.5 \text{ mA}$, and $I_o = i_4$

Exemplo 2: Lei de Kirchhoff da corrente

Q: How much are the currents i_1 and i_2 ?

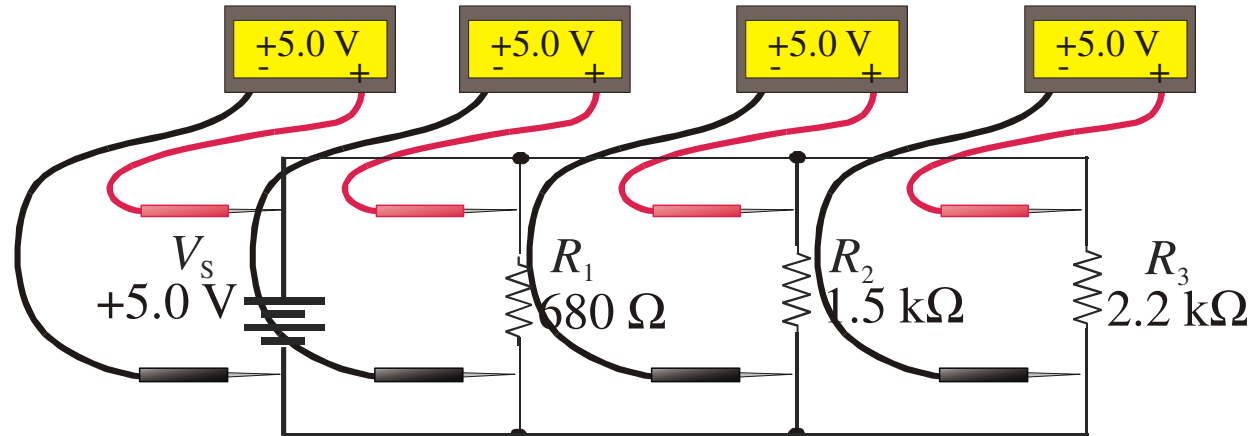
A: $i_2 = 10 \text{ mA} - 3 \text{ mA} = 7 \text{ mA}$
 $i_1 = 10 \text{ mA} + 4 \text{ mA} = 14 \text{ mA}$



$$4 \text{ mA} + 3 \text{ mA} + 7 \text{ mA} = 14 \text{ mA}$$

Exercício: lei do nós

No exemplo abaixo, a fonte tem uma f.e.m. de 5.0 V. Cada um dos voltímetros irá medir 5 V aos terminais de cada uma resistência. Qual é a corrente fornecida pela fonte ao circuito?



Kirchhoff's current law (KCL) is generally stated as: The sum of the currents entering a node is equal to the sum of the currents leaving the node.

$I_1 =$	7.4 mA	$R_1 =$	0.68 k Ω	$V_1 =$	5.0 V	$P_1 =$	36.8 mW
$I_2 =$	3.3 mA	$R_2 =$	1.50 k Ω	$V_2 =$	5.0 V	$P_2 =$	16.7 mW
$I_3 =$	2.3 mA	$R_3 =$	2.20 k Ω	$V_3 =$	5.0 V	$P_3 =$	11.4 mW
$I_T =$	13.0 mA	$R_T =$	386 Ω	$V_S =$	5.0 V	$P_T =$	64.8 mW

Lei de Kirchhoff para a corrente

Kirchhoff's current law (KCL) is generally stated as:

The sum of the currents entering a node is equal to the sum of the currents leaving the node:

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0$$

$I_1 = 7.4 \text{ mA}$	$R_1 = 0.68 \text{ k}\Omega$	$V_1 = 5.0 \text{ V}$	$P_1 = 36.8 \text{ mW}$
$I_2 = 3.3 \text{ mA}$	$R_2 = 1.50 \text{ k}\Omega$	$V_2 = 5.0 \text{ V}$	$P_2 = 16.7 \text{ mW}$
$I_3 = 2.3 \text{ mA}$	$R_3 = 2.20 \text{ k}\Omega$	$V_3 = 5.0 \text{ V}$	$P_3 = 11.4 \text{ mW}$
$I_T = 13.0 \text{ mA}$	$R_T = 386 \text{ }\Omega$	$V_S = 5.0 \text{ V}$	$P_T = 64.8 \text{ mW}$

Tipos de redes

There are many **kinds** of networks:

Elements

- Electrical components
- Computers
- Organs

Network

Circuit
Internet
Circulatory System

Connection Paths

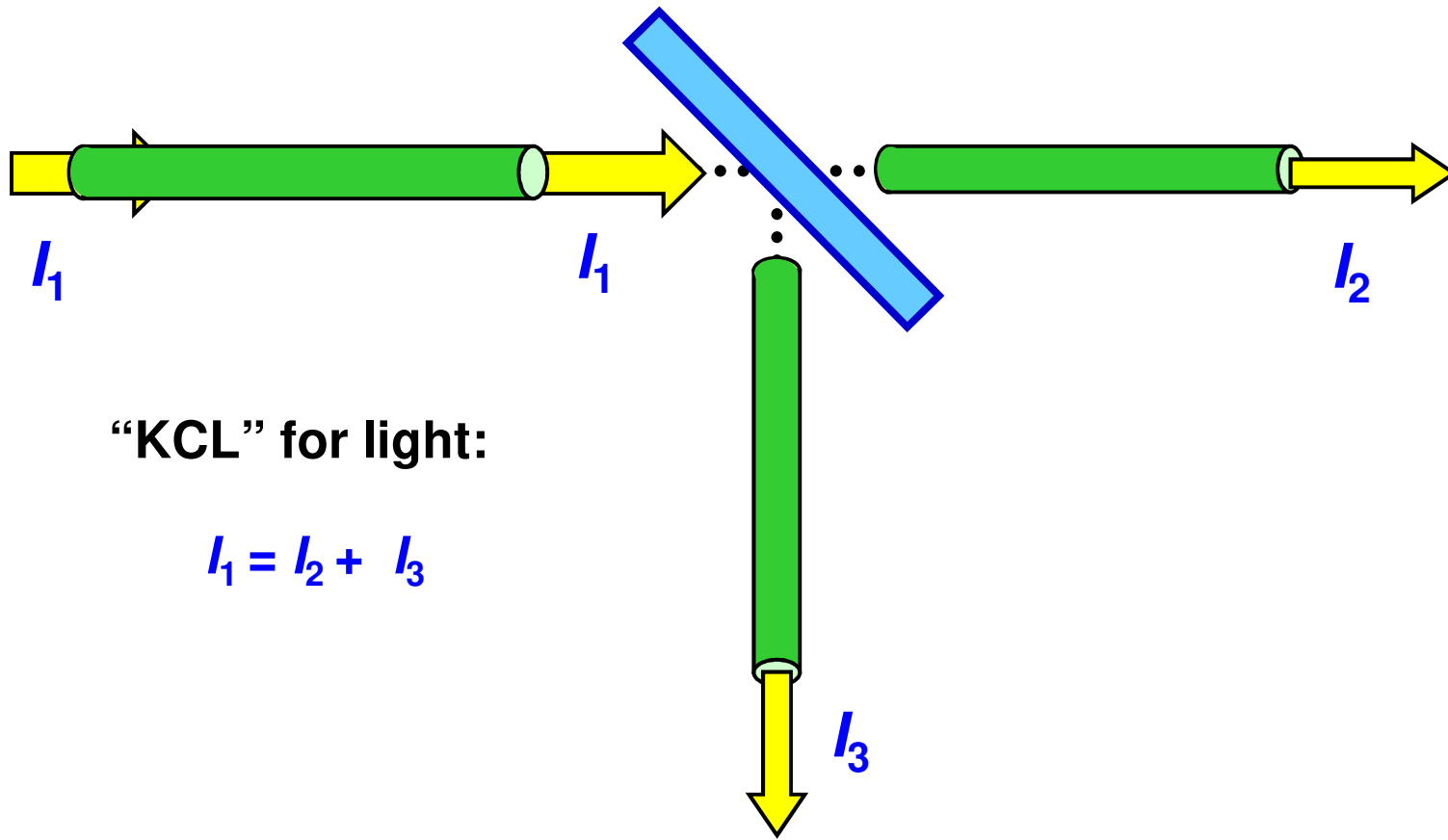
Wires
Fiber Optics
Blood Vessels

A lei de Kirchhoff da corrente aplica-se a todos estes tipos de redes!

A lei de Kirchhoff da corrente aplica-se a todos os tipos de redes!

Kirchhoff's Current Law (KCL) applies to all types of networks

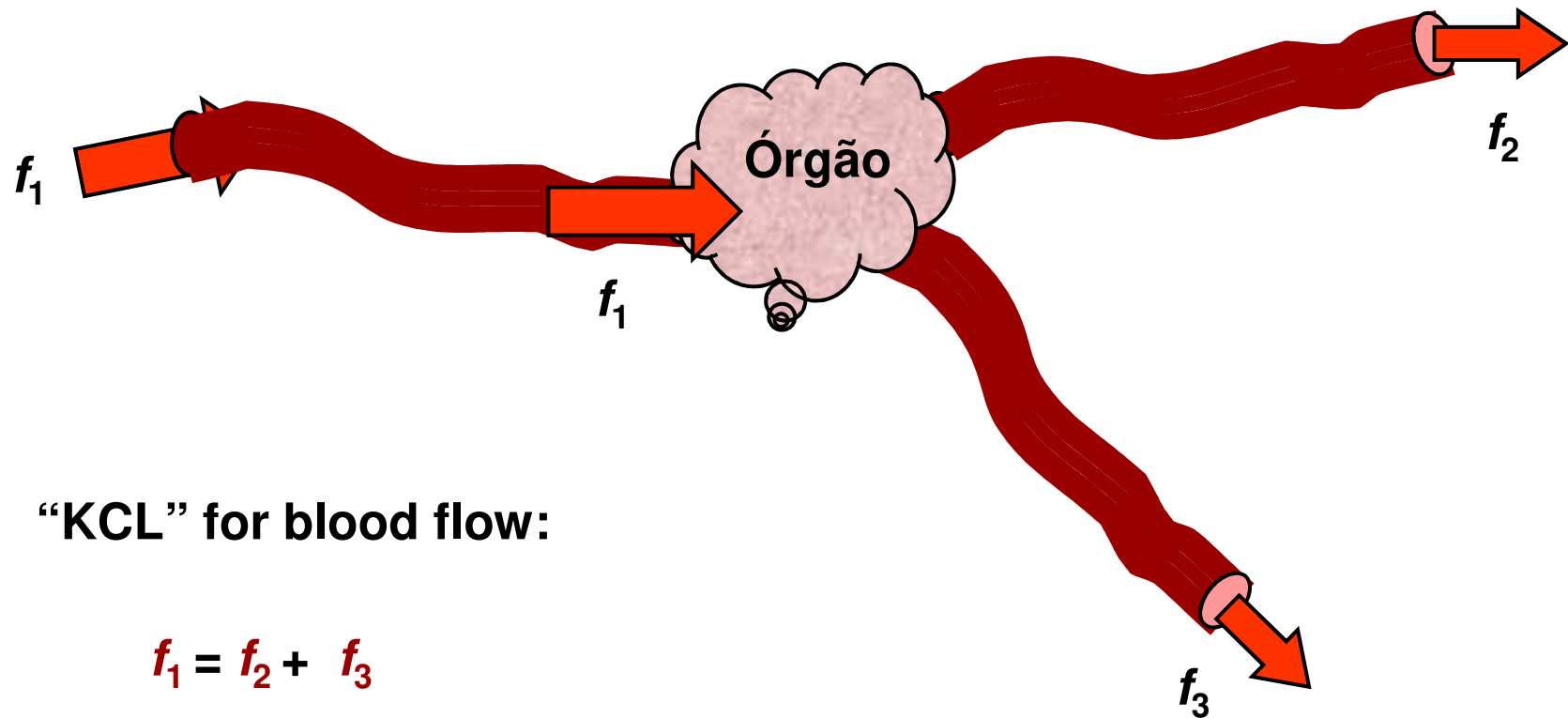
Fiber optic network (I is light intensity)



A lei de Kirchhoff da corrente aplica-se a todos os tipos de redes!

Kirchhoff's Current Law applies to all types of networks

Human Blood Vessels (f is **blood flow rate**)



“KCL” for blood flow:

$$f_1 = f_2 + f_3$$

Lei das malhas
ou
lei de Kirchoff da tensão

Lei de Kirchhoff para a tensão (lei das malhas)

Kirchhoff's voltage law (KVL) is generally stated as:

A soma das quedas de tensão ao longo de uma **malha fechada** é igual à soma algébrica das forças eletromotrizes das fontes existentes nessa malha fechada ou a soma de todas das **variações de tensão** ao longo de uma malha fechada é igual a zero.

The sum of all the voltage drops around a single closed path in a circuit is equal to the total source voltage in that closed path.

Formulação equivalente:

A soma de todas das **variações de tensão** V_i ao longo de uma malha fechada é igual a zero.

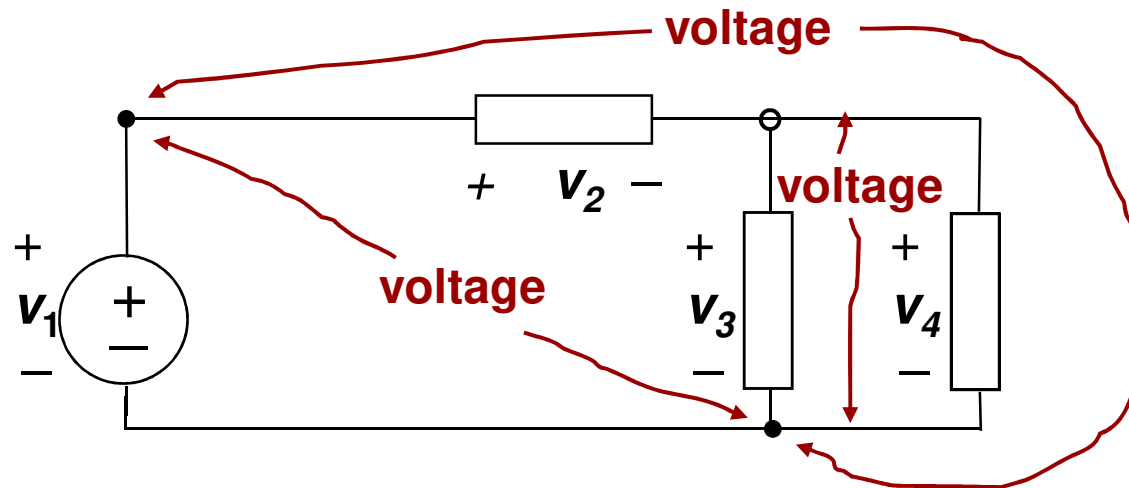
A mathematical shorthand way of writing KVL is:
$$\sum_{i=1}^n V_i = 0$$

KVL applies to all circuits, but you must apply it to only one closed path. In a series circuit, this is (of course) the entire circuit.

Lei da malhas ou lei de Kirchoff da tensão Kirchhoff's Voltage Law (KVL)

Aspetos importantes a reter:

The voltage measured between any two nodes does not depend of the path taken.



Example of KVL: $V_1 = V_2 + V_3$

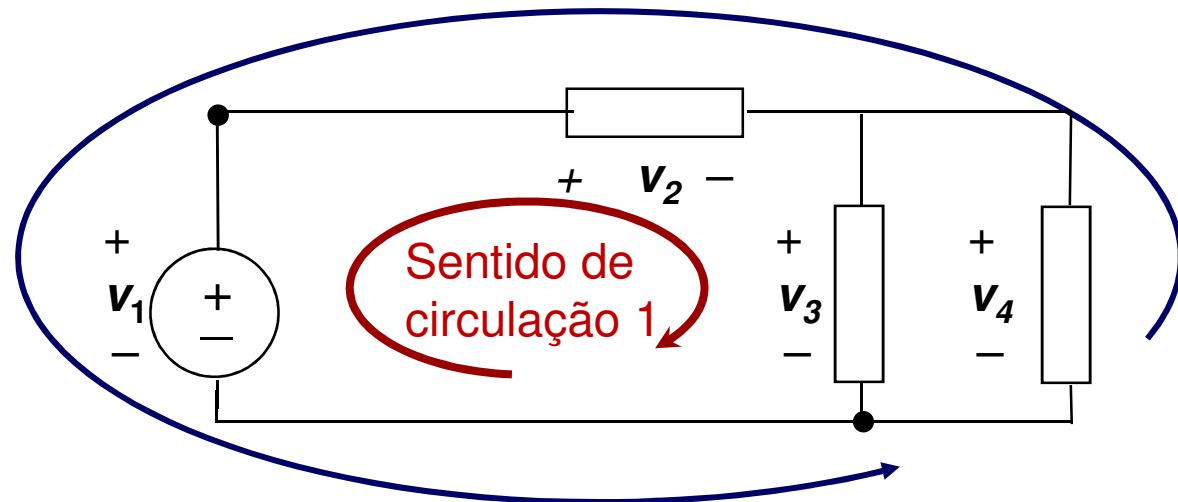
Similarly: $V_1 = V_2 + V_4$

and: $V_3 = V_4$

Using the formal definition of KVL

“The sum of all voltages changes around a closed loop is zero.”

- Define an arrow direction around a closed loop – sentido geral de circulação.
- Sum the voltages as they are encountered in going around the loop.
- If the arrow first encounters a **plus** sign, enter that voltage with a (+) into the KVL equation.
- If the arrow first encounters a **minus** sign, enter that voltage with a (–) into the KVL equation.



For the inside arrow shown above (1): $-v_1 + v_2 + v_3 = 0$ Sentido de circulação 2

For the outer arrow (2): $-v_4 - v_2 + v_1 = 0$

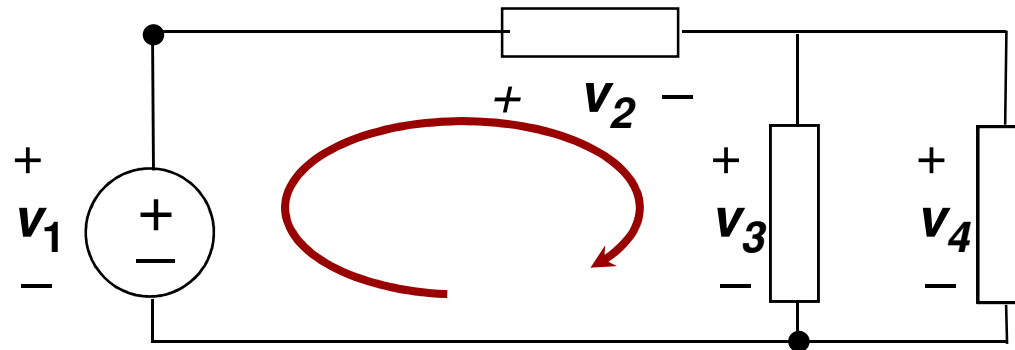
Lei da malhas ou lei de Kirchoff da tensão

Kirchhoff's Voltage Law

Kirchhoff's Voltage Law (KVL): $v_1 = v_2 + v_3$

- This equation can also be written in the following form:

$$-v_1 + v_2 + v_3 = 0$$

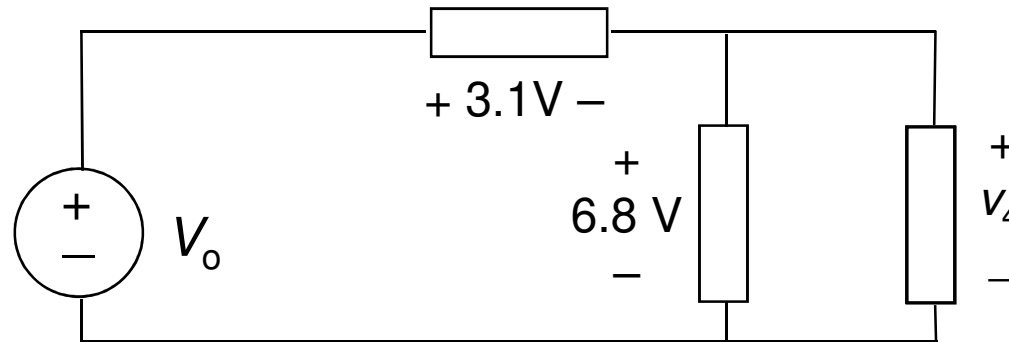


A formal statement of **Kirchhoff's Voltage Law**:

The sum of **voltages changes** around a **closed loop** is zero.

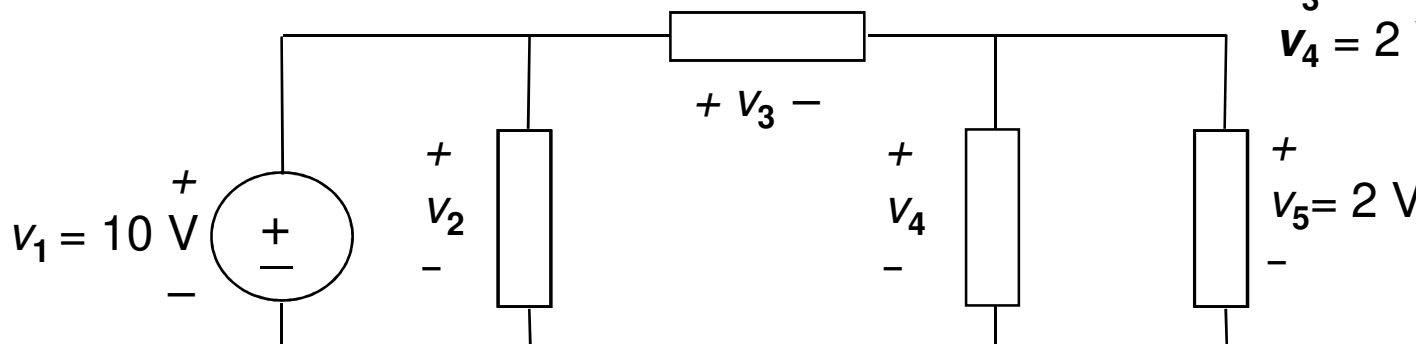
Exemplos de aplicação das leis de Kirchhoff 1

Q: How much is the voltage V_o ? **A:** $V_o = 3.1 \text{ V} + 6.8 \text{ V}$



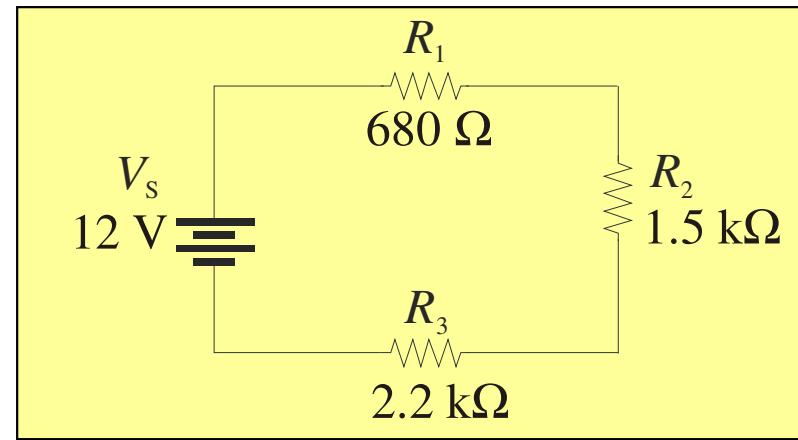
Q: How much is the voltage v_4 ? **A:** $v_4 = 6.8 \text{ V}$

Q: If $v_1 = 10 \text{ V}$ and $v_5 = 2 \text{ V}$, what are v_2 , v_3 , and v_4 ? **A:** $v_2 = 10 \text{ V}$;
 $v_3 = 10 \text{ V} - 2 \text{ V} = 8 \text{ V}$
 $v_4 = 2 \text{ V}$



Exemplo de aplicação das leis de Kirchhoff 2

Notice in the series example given earlier that the sum of the resistor voltages is equal to the source voltage.

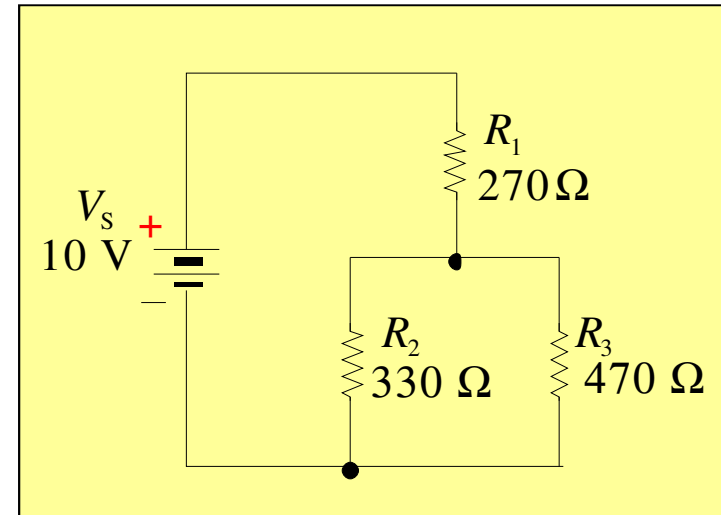


$I_1 = 2.74 \text{ mA}$	$R_1 = 0.68 \text{ k}\Omega$	$V_1 = 1.86 \text{ V}$	$P_1 = 5.1 \text{ mW}$
$I_2 = 2.74 \text{ mA}$	$R_2 = 1.50 \text{ k}\Omega$	$V_2 = 4.11 \text{ V}$	$P_2 = 11.3 \text{ mW}$
$I_3 = 2.74 \text{ mA}$	$R_3 = 2.20 \text{ k}\Omega$	$V_3 = 6.03 \text{ V}$	$P_3 = 16.5 \text{ mW}$
$I_T = 2.74 \text{ mA}$	$R_T = 4.38 \text{ k}\Omega$	$V_S = 12 \text{ V}$	$P_T = 32.9 \text{ mW}$

Exemplo de aplicação das leis de Kirchhoff 3

Tabulating current, resistance, voltage and power is a useful way to summarize parameters.

Construa uma tabela com os valores da corrente em cada ramo, da tensão aos terminais de cada elemento e da potencia dissipada em cada elemento.



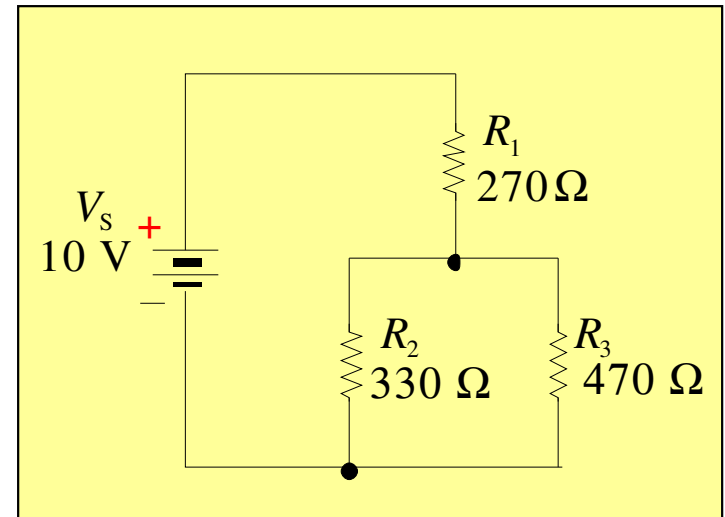
$I_1 =$	$R_1 = 270 \Omega$	$V_1 =$	$P_1 =$
$I_2 =$	$R_2 = 330 \Omega$	$V_2 =$	$P_2 =$
$I_3 =$	$R_3 = 470 \Omega$	$V_3 =$	$P_3 =$
$I_T =$	$R_T =$	$V_S = 10 \text{ V}$	$P_T =$

Exemplo de aplicação das leis de Kirchhoff 4

Tabulating current, resistance, voltage and power is a useful way to summarize parameters. Solve for the unknown quantities in the circuit shown.

Kirchhoff's laws can be applied as a check on the answer.

Notice that the current in R_1 is equal to the sum of the branch currents in R_2 and R_3 .

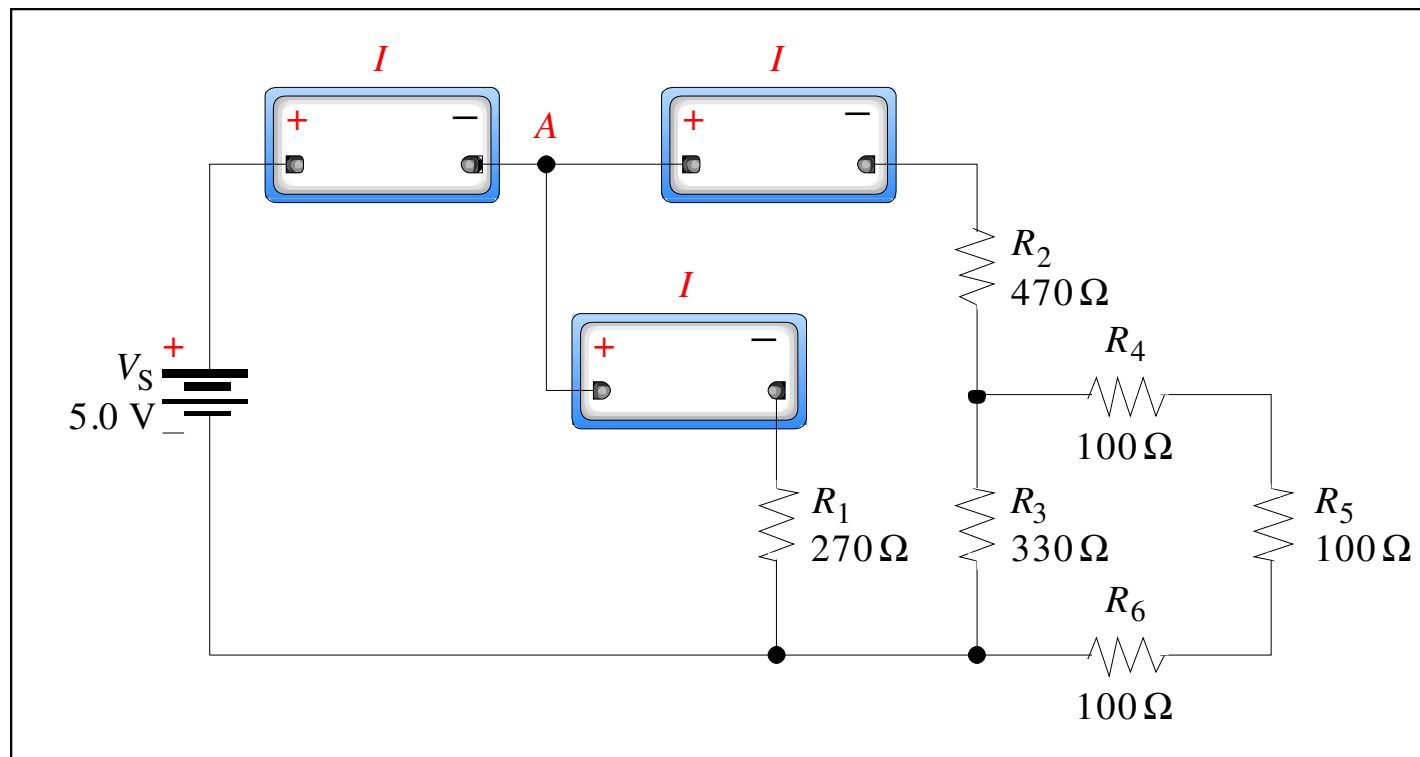


The sum of the voltages around the outside loop is zero.

$I_1 = 21.6 \text{ mA}$	$R_1 = 270 \Omega$	$V_1 = 5.82 \text{ V}$	$P_1 = 126 \text{ mW}$
$I_2 = 12.7 \text{ mA}$	$R_2 = 330 \Omega$	$V_2 = 4.18 \text{ V}$	$P_2 = 53.1 \text{ mW}$
$I_3 = 8.9 \text{ mA}$	$R_3 = 470 \Omega$	$V_3 = 4.18 \text{ V}$	$P_3 = 37.2 \text{ mW}$
$I_T = 21.6 \text{ mA}$	$R_T = 464 \Omega$	$V_S = 10 \text{ V}$	$P_T = 216 \text{ mW}$

Exemplo de aplicação das leis de Kirchhoff 5

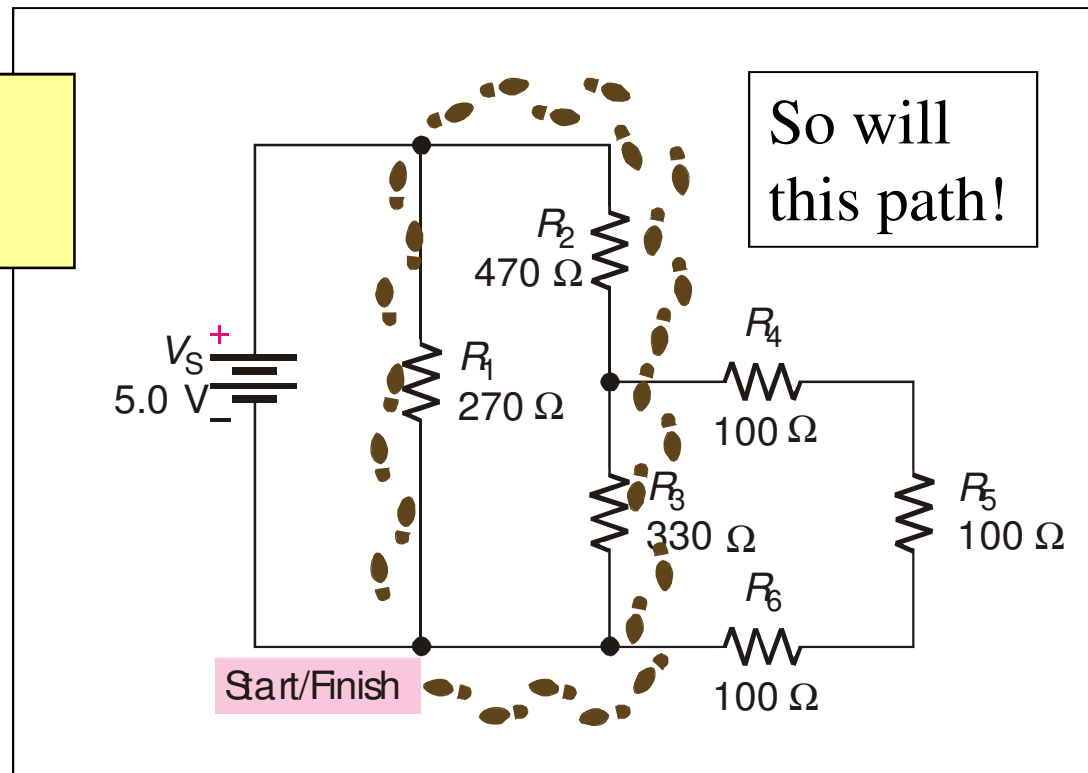
Kirchoff's current law can also be applied to the same circuit. What are the readings for node A?



Aplicação das leis de Kirchhoff

Kirchhoff's voltage law and **Kirchhoff's current law** can be applied to any circuit, including combination circuits.

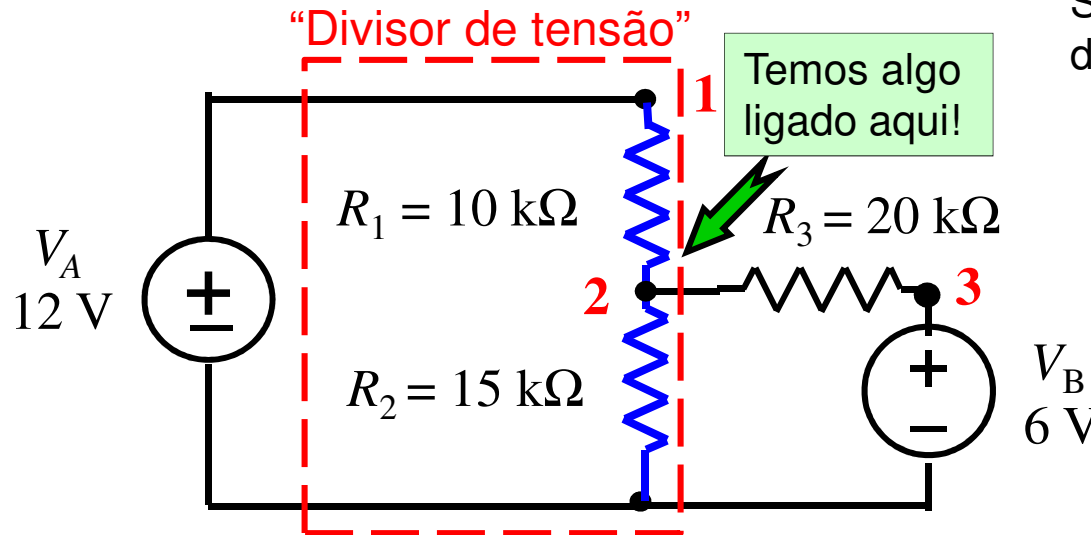
For example, applying KVL, the path shown will have a sum of 0 V.



Exemplo de aplicação das leis de Kirchhoff 6

(rever divisor de tensão com carga)

Considere o circuito abaixo. Qual é a tensão no nó 2?



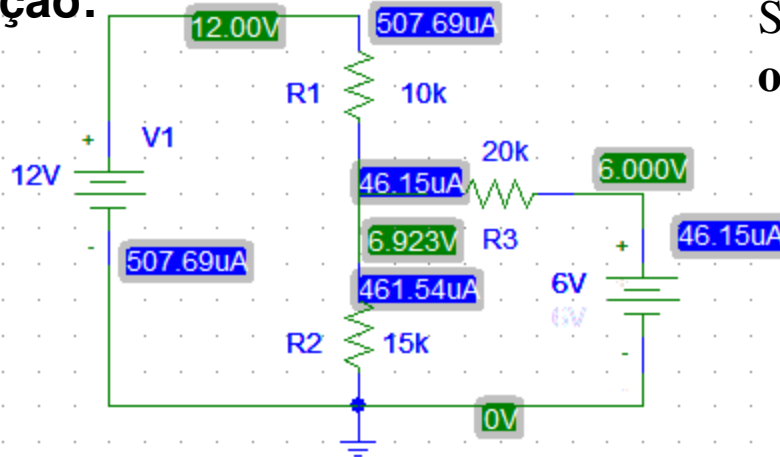
Se pudéssemos aplicar a fórmula do divisor de tensão, teríamos:

$$V_2 = V_A \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

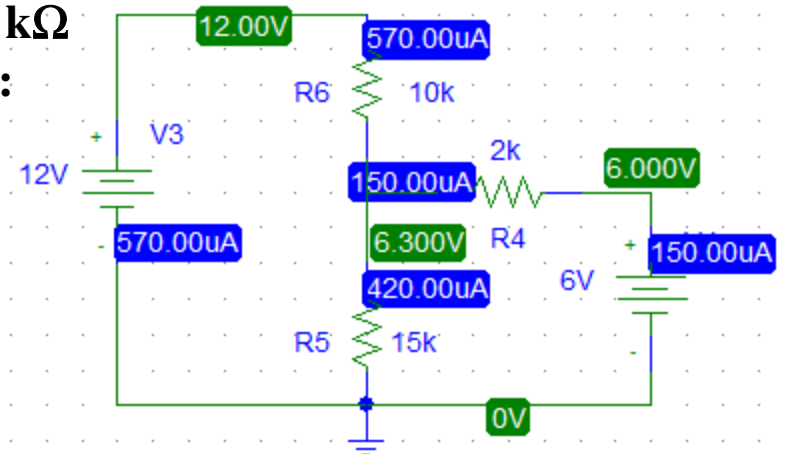
$$= 12 \text{ V} \frac{15 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega + 15 \text{ k}\Omega}$$

$$= 7,2 \text{ V (errado!)}$$

Solução:



Se $R_3 = 2 \text{ k}\Omega$ obtém-se:



Aplicação das leis de Kirchhoff: Ponte de Wheatstone

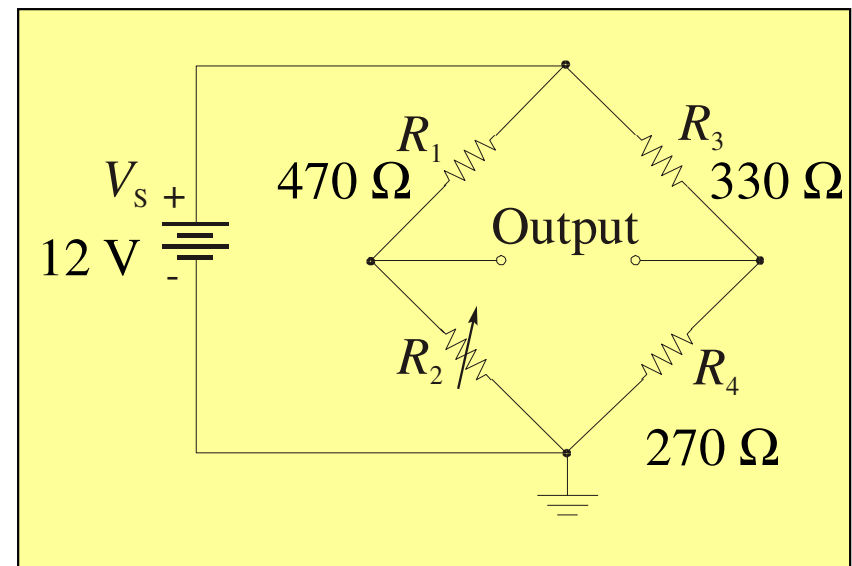
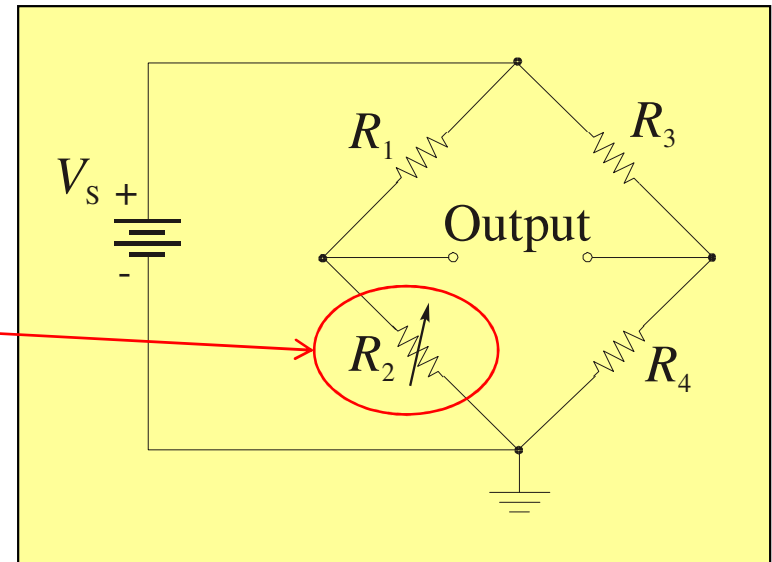
The **Wheatstone bridge** consists of a dc voltage source and four resistive arms forming two voltage dividers. The output is taken between the dividers. Frequently, one of the bridge resistors is **adjustable**.

When the bridge is balanced (**balanceada**), the output voltage is **zero**,

and the products of resistances in the opposite diagonal arms are **equal**:

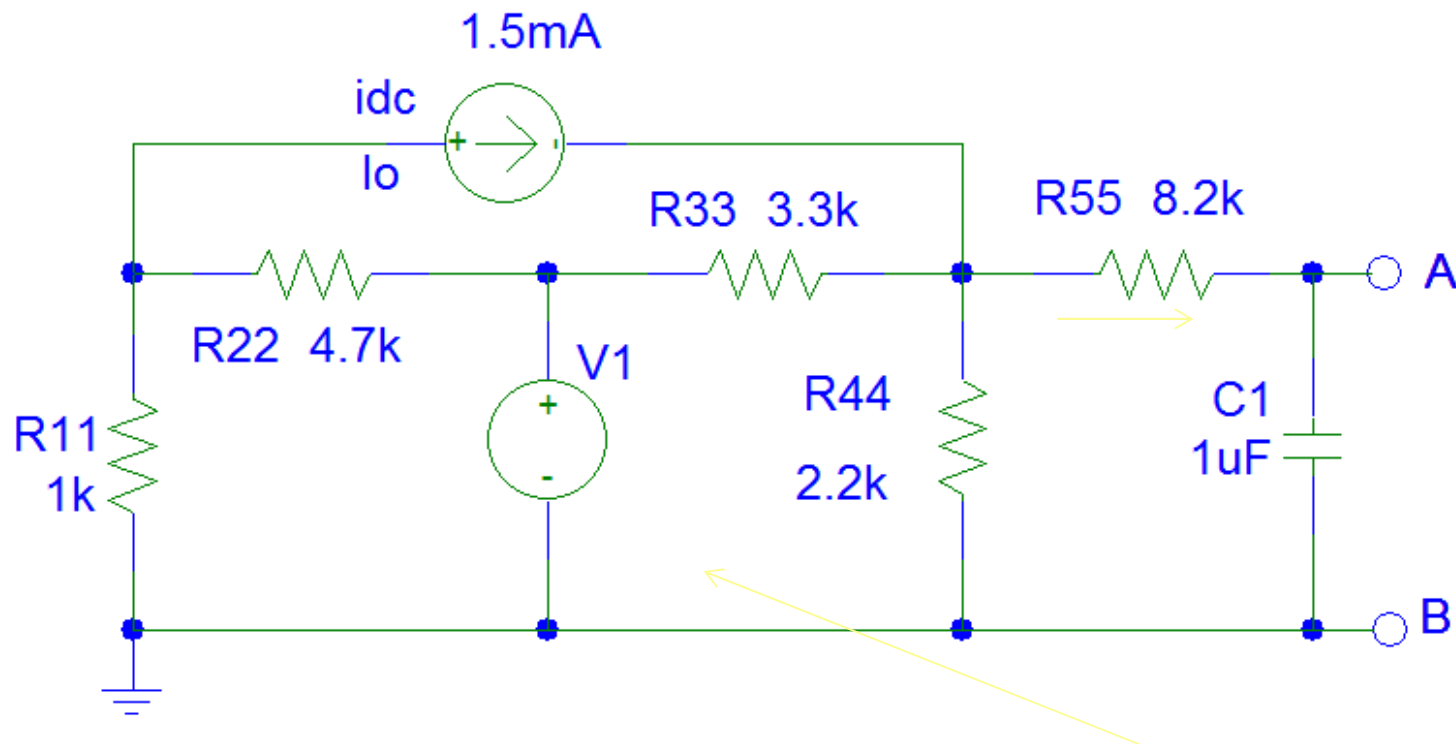
$$R_1 R_4 = R_3 R_2 \text{ (ponte balanceada)}$$

Example: What is the value of R_2 if the bridge is balanced? **384 Ω** .



Exemplo: TP_03_CE-CESDig 11e12_de_Outubro_de_2018

i) Calcule a corrente em todos os elementos do circuito da Figura abaixo. ii) Substitui-se o condensador por uma resistência de 1 k Ω em série com um amperímetro de resistência interna 150 Ω . Qual é o valor da corrente que percorre o amperímetro?



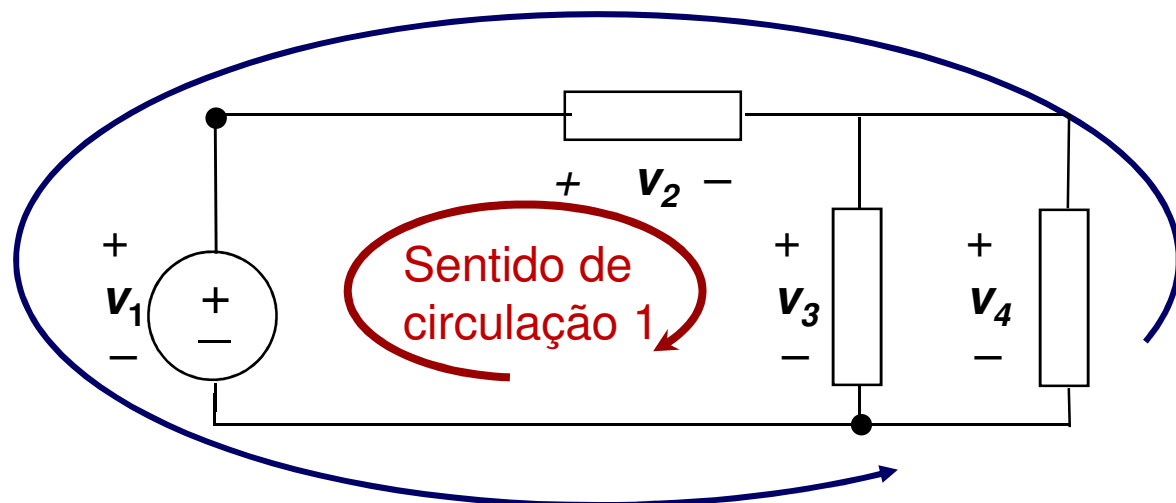
Redes elétricas – leis de Kirchhoff - Convenções

- **Lei dos nodos:** A soma algébrica das intensidades de corrente que concorrem num nodo é nula, considerando positivas as que se aproximam e negativas as que se afastam do nodo. A marcação dos sentidos das correntes é arbitrária. No final dos cálculos, se a intensidade da corrente resultar negativa, isso significa que o sentido das respetiva corrente é oposto ao assinalado.
- **Lei das malhas (versão “f.e.ms.” e “quedas de tensão”):** *Numa malha qualquer, a soma algébrica das f.e.ms. é igual à soma algébrica das quedas de tensão nos vários ramos que constituem a malha.*
- OU (versão apenas “quedas de tensão”)
- **A soma das quedas de tensão (ddp) ao longo de uma malha (fechada) é igual a zero.**
- **Convenção das malhas (versão “f.e.ms.”):**
 - *escolhe-se um sentido qualquer para positivo, a que se dá o nome de **sentido de circulação**:*
 - às correntes que, **na malha**, têm **esse sentido** atribui-se o *senal +*, e o *senal –* às que têm o **sentido contrário**;
 - as **f.e.ms.** que tendem a debitar corrente que, *na malha*, têm o **sentido de circulação** vêm afetadas do *senal +*, e do *senal –* no caso contrário.

Using the formal definition of KVL

“The sum of all voltages changes around a closed loop is zero.”

- Define an arrow direction around a closed loop – sentido geral de circulação.
- Sum the voltages as they are encountered in going around the loop.
- If the arrow first encounters a **plus** sign, enter that voltage with a (+) into the KVL equation.
- If the arrow first encounters a **minus** sign, enter that voltage with a (–) into the KVL equation.

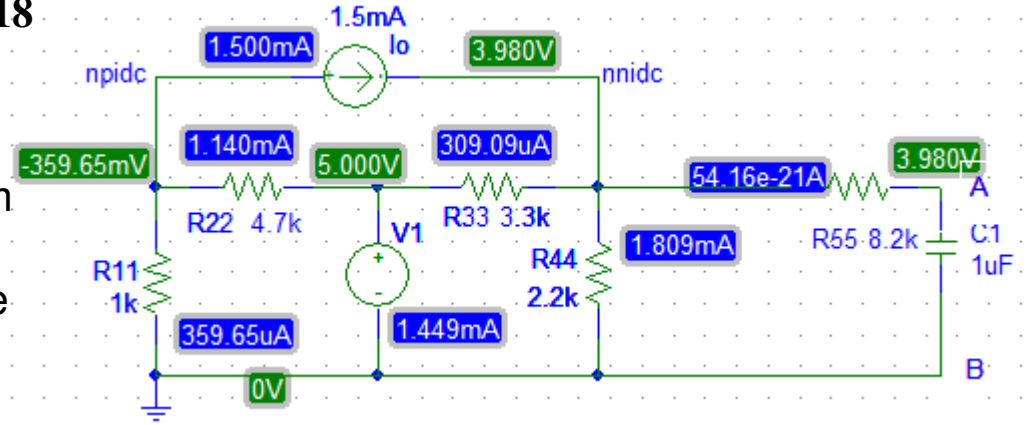


For the inside arrow shown above (1): $-v_1 + v_2 + v_3 = 0$ Sentido de circulação 2

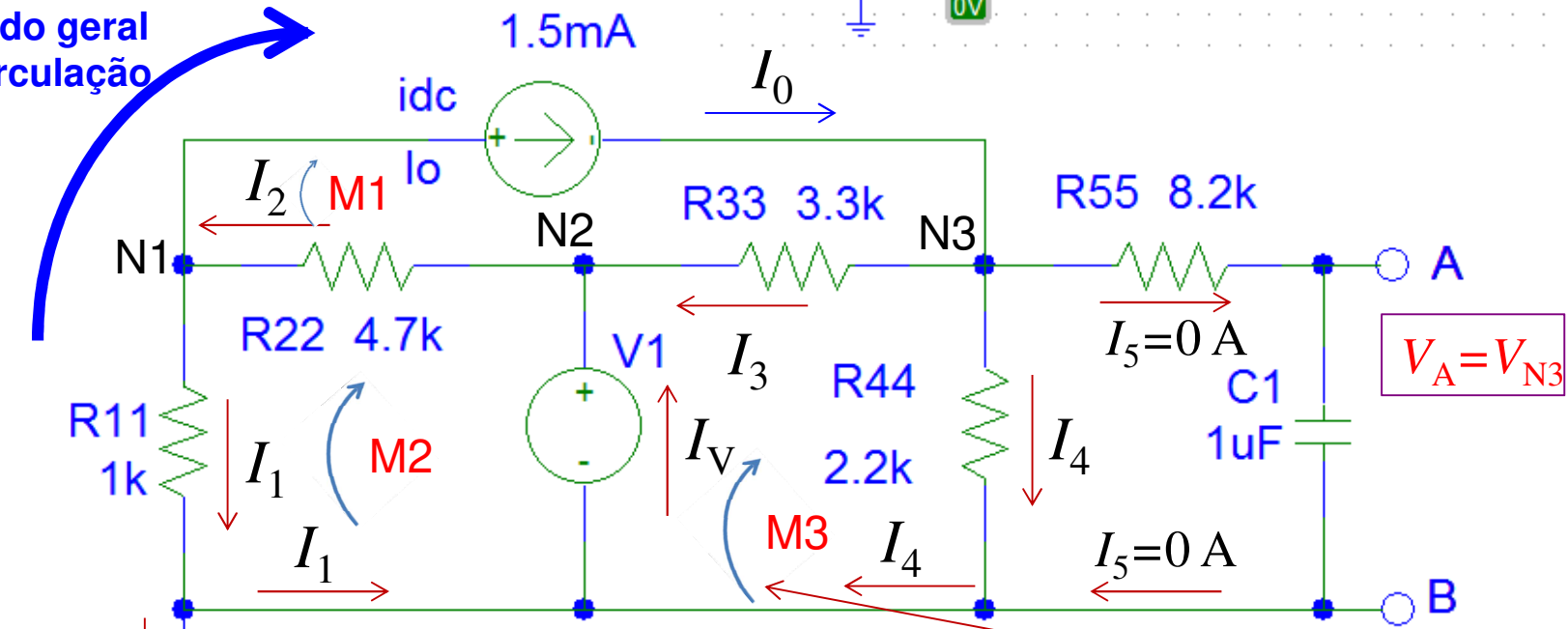
For the outer arrow (2): $-v_4 - v_2 + v_1 = 0$

TP_03_CE-CESDig_11e12_de_Outubro_de_2018

i) Calcule a corrente em todos os elementos do circuito da Figura abaixo. ii) Substitui-se o condensador por uma resistência de 1 kΩ em série com um amperímetro de resistência interna 150 Ω. Qual é o valor da corrente que percorre o amperímetro?



Sentido geral de circulação



$I=0\text{ A}$

N1: $I_2 = I_0 + I_1$
 N2: $I_2 = I_V + I_3$
 N3: $I_0 = I_3 + I_4$
 N0: $I_V = I_1 + I_4$
 ...

M1: $V_{fc} + R_{33}I_3 + R_{22}I_2 = 0$
 M2: $-R_{11}I_1 - R_{22}I_2 - V_1 = 0$
 M3: $+V_1 - R_{33}I_3 + R_{44}I_4 = 0$

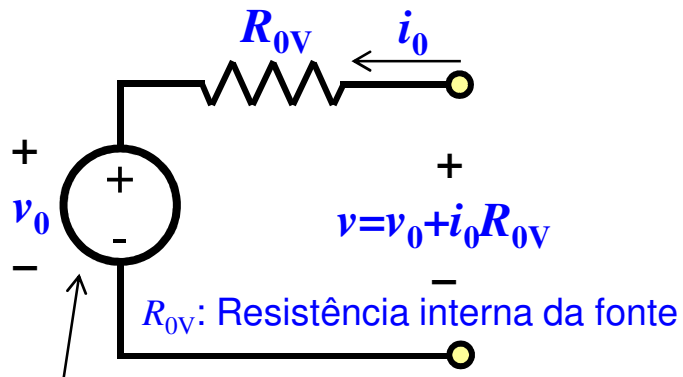
Sentido de circulação na malha M3

Representação de geradores e instrumentos de medida

- Modelos de geradores de tensão e de corrente
- Modelos de voltímetro e de amperímetro
- Resistências/impedâncias (interna) do voltímetro e do amperímetro
- Impedância do osciloscópio

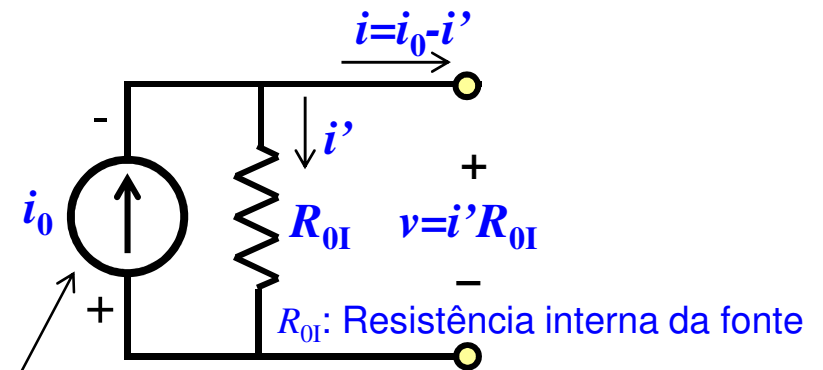
Modelos dos geradores de tensão e de corrente

Fonte de tensão



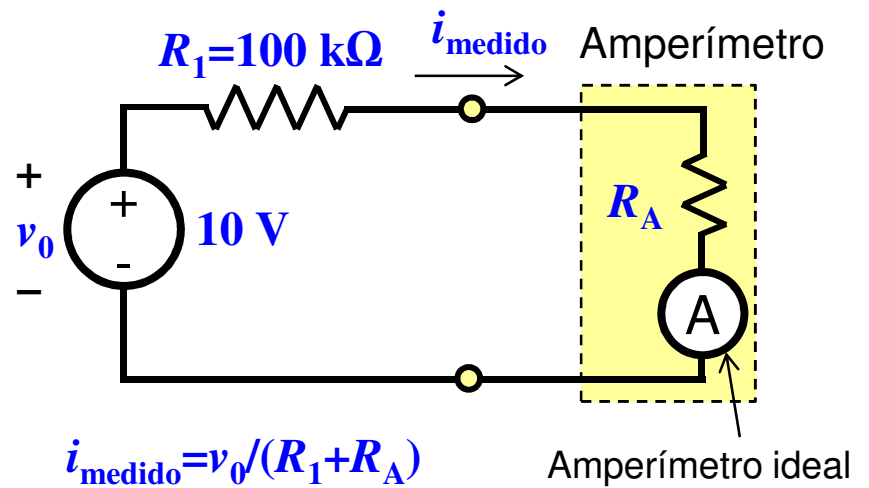
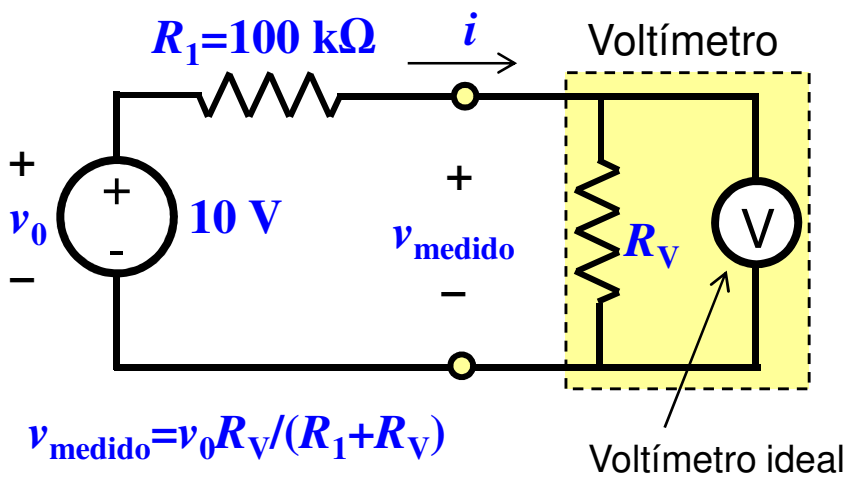
Fonte de tensão ideal

Fonte de corrente



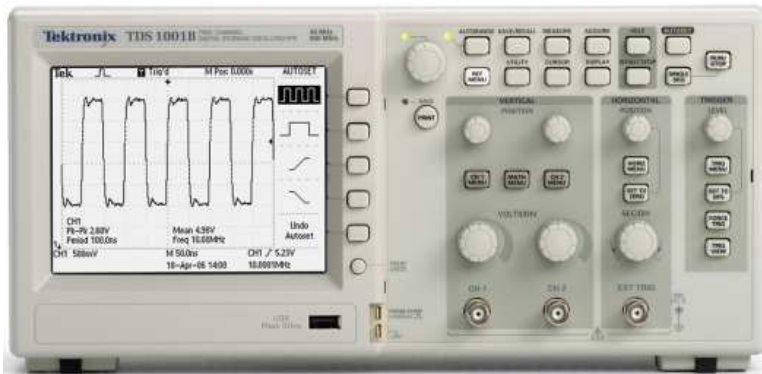
Fonte de corrente ideal

Modelos do voltímetro e do amperímetro



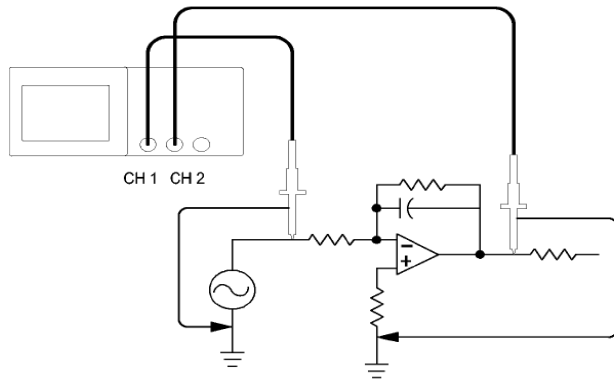
Impedância do osciloscópio

O **osciloscópio** é um [instrumento de medida](https://pt.wikipedia.org/wiki/Instrumento_de_medida) de sinais elétricos/eletrônicos que apresenta representações gráficas duas dimensões de um ou mais sinais elétricos (de acordo com a quantidade de canais de entrada). O eixo vertical (y) do ecrã representa a magnitude do sinal ([tensão](https://pt.wikipedia.org/wiki/Tens%C3%A3o)) e o eixo horizontal (x) representa o tempo, tornando o instrumento útil para visualizar sinais periódicos ou sinais variáveis no tempo. <https://pt.wikipedia.org/wiki/Oscilosc%C3%B3pio>



Measuring Two Signals

If you are testing a piece of equipment and need to measure the gain of the audio amplifier, you will need an audio generator that can inject a test signal at the amplifier input. Connect two oscilloscope channels to the amplifier input and output as shown next. Measure both signal levels and use the measurements to calculate the gain.



Cada uma das entradas do osciloscópio possui uma impedância de entrada, normalmente correspondente a uma resistência em paralelo com um condensador. A impedância de um osciloscópio deve ser a maior possível. Os valores típicos da resistência e da capacidade são da ordem de 1 M Ω e de 10 a 80 pF, respectivamente.

“The input impedance is made a specific nominal value, rather than arbitrarily high, because of the common use of [X10 probes](https://en.wikipedia.org/wiki/X10_probes). With a known input impedance to the oscilloscope, the probe designer can ensure that the probe input impedance is exactly ten times this figure (actually oscilloscope plus probe cable impedance). Since the impedance included the input capacitance and the probe is an impedance divider circuit, the result is that the waveform being measured is not distorted by the RC circuit formed by the probe resistance and the capacitance of the input (or the cable capacitance which is generally higher).”

https://en.wikipedia.org/wiki/Nominal_impedance#Oscilloscopes

Impedâncias características “padrão”

Após o advento do radar [técnica de localização e determinação de distância de um objeto afastado (avião, submarino etc.) por meio da emissão de ondas radioelétricas e a detecção e análise do pulso refletido pelo objeto], a indústria sentiu necessidade de definir uma “impedância padrão” para os sistemas de transmissão, em particular para os cabos coaxiais usados para conduzir os sinais. O padrão mais usado corresponde à **impedância de 50 Ω** , e este valor resulta da satisfação do compromisso entre dois requisitos: i) perdas de transmissão mínimas; ii) capacidade de transmitir a maior potência possível.

Atualmente, os sistemas de medição e caracterização mais avançados em eletrônica e optoeletrônica empregam componentes (equipamentos, cabos, conectores, circuitos, etc.) cuja impedância de entrada (e de saída) e/ou característica é 50 Ω . Alguns dos osciloscópio e geradores de sinais mais comuns permitem definir as impedâncias de entrada e de saída, respectivamente, em função da análise que se pretende fazer. Antes de começar a utilizar um dado equipamento devemos verificar qual é a impedância que está a ser considerada pelo equipamento.

No campo da radiofrequência, das micro-ondas e das ondas milimétricas os sistemas são desenhados, quase sem exceção com impedâncias de entrada e de saída (sempre que for aplicável) de 50 Ω , e transmissão guiada de sinais é feita usando linhas de transmissão (cabos coaxiais, linhas “micro-strip”, linhas “coplanar waveguide (CPW)”, etc.) com impedância característica de 50 Ω .

Impedância dos cabos de vídeo:

Os sinais de vídeo são geralmente transmitidos usando cabos coaxiais com impedância igual a 75 Ω , fazendo com que 75 Ω se tenha tornado um padrão quase universal para os cabos coaxiais para vídeo.

Impedância de altifalantes e colunas:

As impedâncias de alto-falante são mantidas relativamente baixas em comparação com outros componentes de áudio, de modo que a potência de áudio necessária pode ser transmitida sem o uso inconveniente (e perigoso) de altas tensões. A impedância nominal mais comum para alto-falantes é de 8 Ω .

Circuitos Elétricos e Sistemas Digitais

2018-2019 - 1.º Semestre

Fontes dependentes e teoremas de Thévenin e de Norton

- Fontes independentes
- Fontes dependentes
- Circuitos lineares
- Princípio da sobreposição
- Teorema de Thévenin
- Teorema de Norton
- Teorema da máxima transferência de potência

Componentes de um circuito

- **Um circuito pode conter componentes ativos e passivos**
- **Os componentes ativos** transformam energia não elétrica em energia elétrica que fornecem ao circuito (e.g. fonte de tensão ou de corrente). Têm a capacidade de promover o movimento de portadores de carga elétrica livres pelas diferentes partes do circuito.
- **Os componentes passivos não têm** capacidade de adicionar energia ao circuito. Podem contudo armazenar energia eletromagnética (e.g. condensadores e bobines) ou transformar energia elétrica noutras formas de energia (e.g. resistências).
- **Fonte de tensão/corrente:** pode ser **independente** (impõe aos seus terminais uma diferença de potencial (ddp)/corrente pré-estabelecida) ou **dependente** (impõe aos seus terminais uma ddp/corrente que é dependente do valor da ddp ou da corrente noutra parte do circuito).
- As fontes **independentes** são representadas por **círculos** e as fontes **dependentes** por **losangos**. Como vimos, uma bateria tem um símbolo próprio.

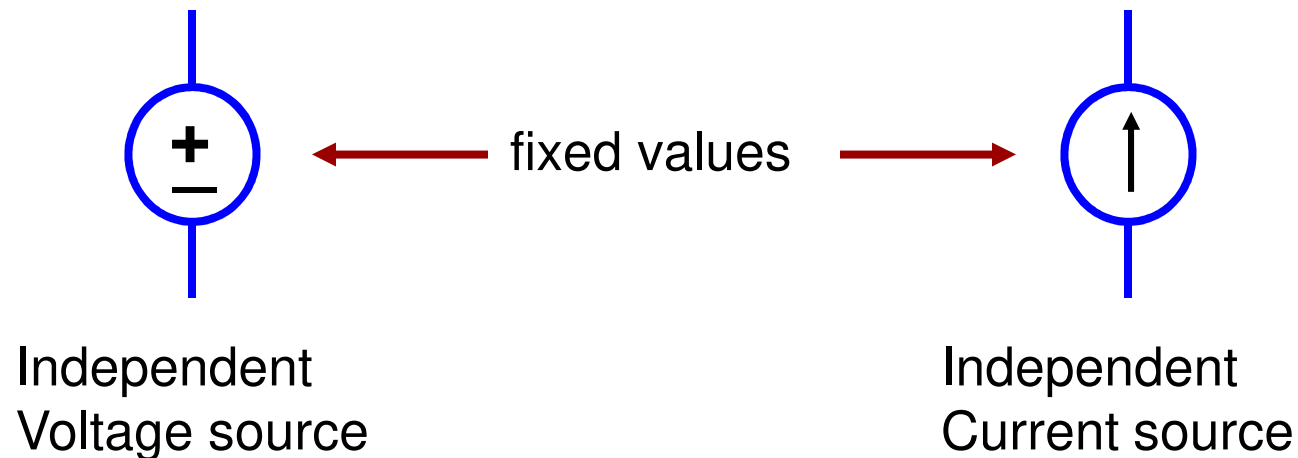
Fontes ideais vs fontes reais

- As fontes de tensão/corrente podem ser modelizadas por uma associação de fontes ideais de tensão/corrente com uma resistência (dita **resistência interna**).
- Não existem fontes ideais (de tensão ou de corrente), pois, por definição, forçam uma tensão ou uma corrente quaisquer que sejam as características do circuito elétrico a que estão ligadas, o que levaria a algumas impossibilidades físicas.
- Uma fonte de tensão/corrente real também dissipa energia, embora se pretenda que, comparativamente aos outros elementos do circuito dissipe muito menos.
- Numa fonte de tensão real a resistência “em associação” está em série com a fonte ideal.
- Numa fonte de corrente real a resistência em associação está em paralelo com a fonte de corrente ideal.
- **Os elementos ativos podem comportar-se em certas circunstâncias como elemento passivos, absorvendo energia em vez de fornecerem energia ao circuito (e.g. bateria automóvel ou pilhas a recarregarem).**

Fontes independentes

Up to now, we have only considered **independent sources**.

- The value of an independent source is fixed and does *not* depend on *anything else* in the circuit.

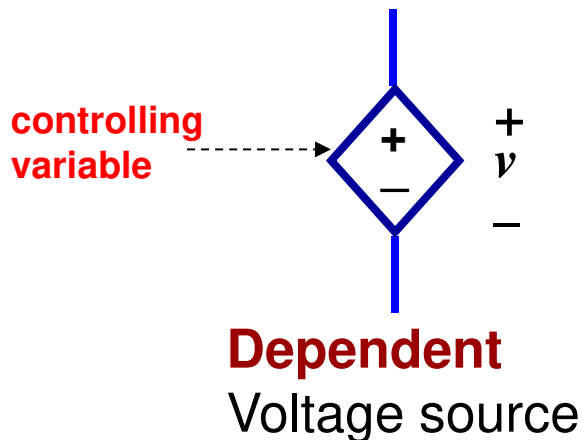


- A dependent source depends on ***something else*** in the circuit.

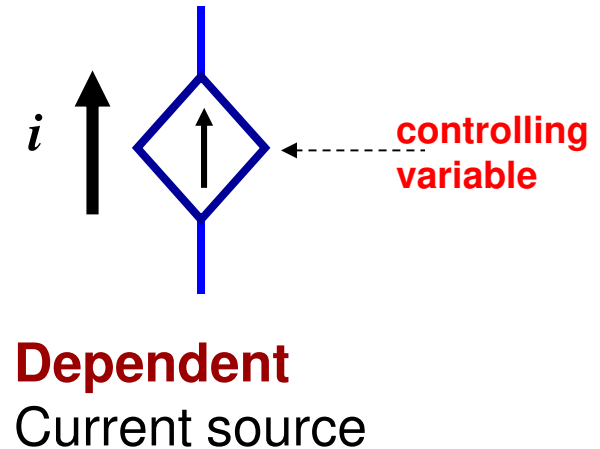
Fontes dependentes

We will now discuss the concept of a **dependent source**.

- A dependent source depends on **something else** in the circuit.
- “Something else” (**the controlling variable**) can be a voltage, current, or other variable **anywhere** in the circuit.



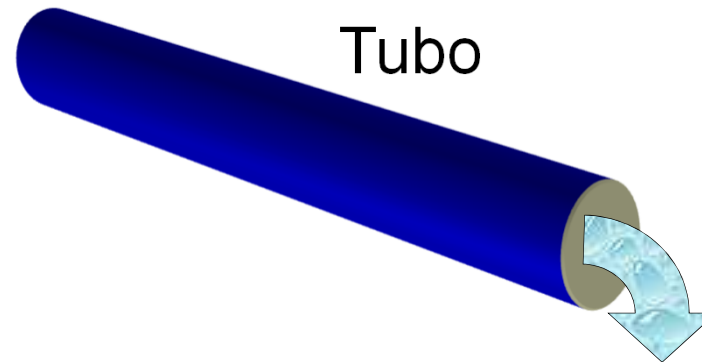
Values depends on controlling variable



Analogia com sistemas hidráulicos

Fonte independente

(não há possibilidade de controlar o fluxo da água no tubo de controlo)

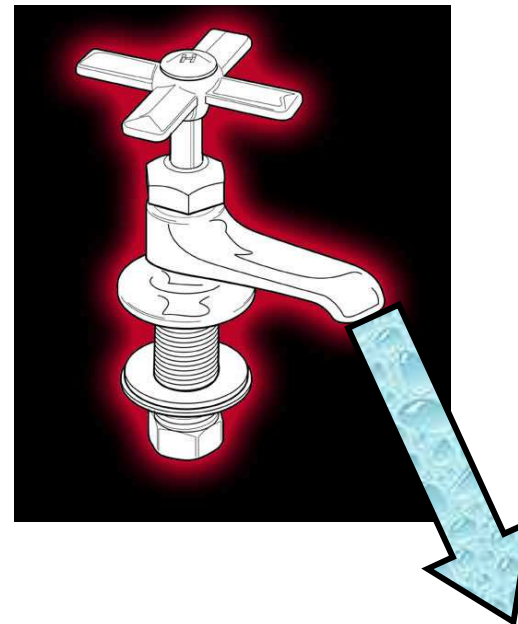


torneira

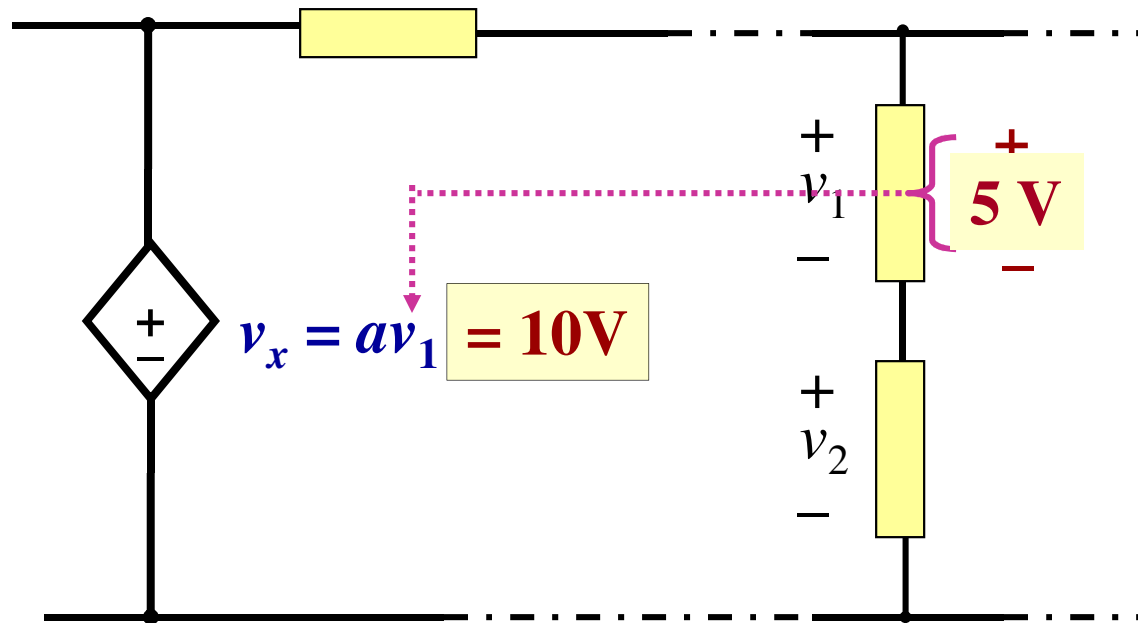


Fonte dependente

(há possibilidade de controlo do fluxo da água)



Exemplo de um circuito com uma fonte dependente



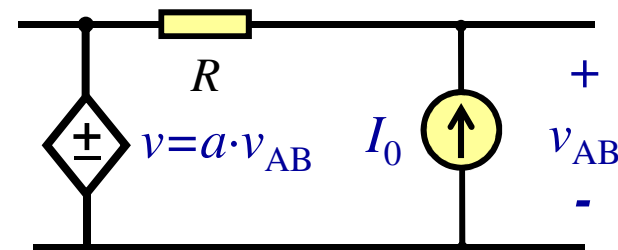
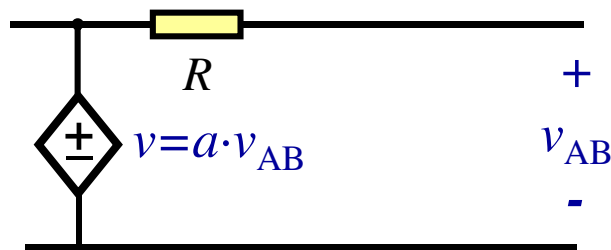
Q: If $v_1 = 4\text{ V}$ and $a = 2$, what is v_x ?

A: $v_x = av_1 = 2 \cdot 4V = 8\text{ V}$

If v_1 changes, then v_x will change also

Resistência/impedância das fontes dependentes

- Tal como acontece com as fontes independentes, a impedância das fontes de tensão/corrente dependentes reais não é necessariamente nula/zero.
- Considere-se um circuito formado por uma fonte de tensão dependente em série com uma resistência. Se se pretender determinar a resistência entre o terminal da resistência e o terminal da fonte, pode aplicar-se uma corrente ao circuito através de uma fonte de corrente ou de uma fonte de tensão. No caso de se usar uma fonte de corrente, tem-se o circuito abaixo, a direita.



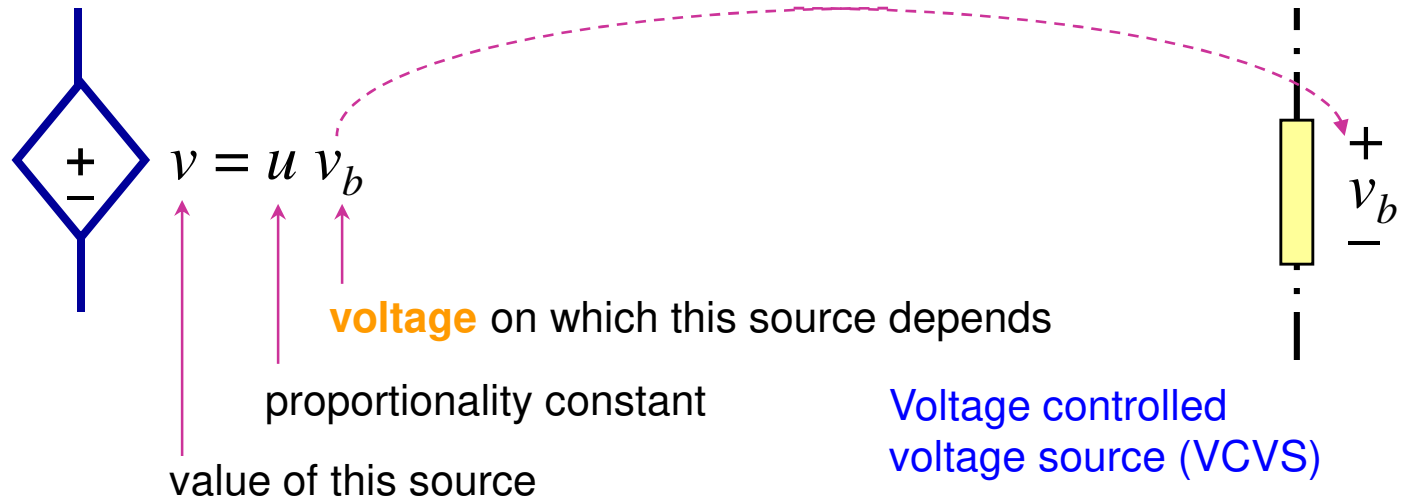
- A resistência vista dos terminais referidos determina-se através da expressão:

$$R_{AB} = \frac{dv_{AB}}{di_0}. \text{ Tendo em conta que } i_0 = \frac{U_{AB} - aU_{AB}}{R} = U_{AB} \frac{1-a}{R}, \text{ obtém-se } R_{AB} = \frac{R}{1-a}. \text{ De}$$

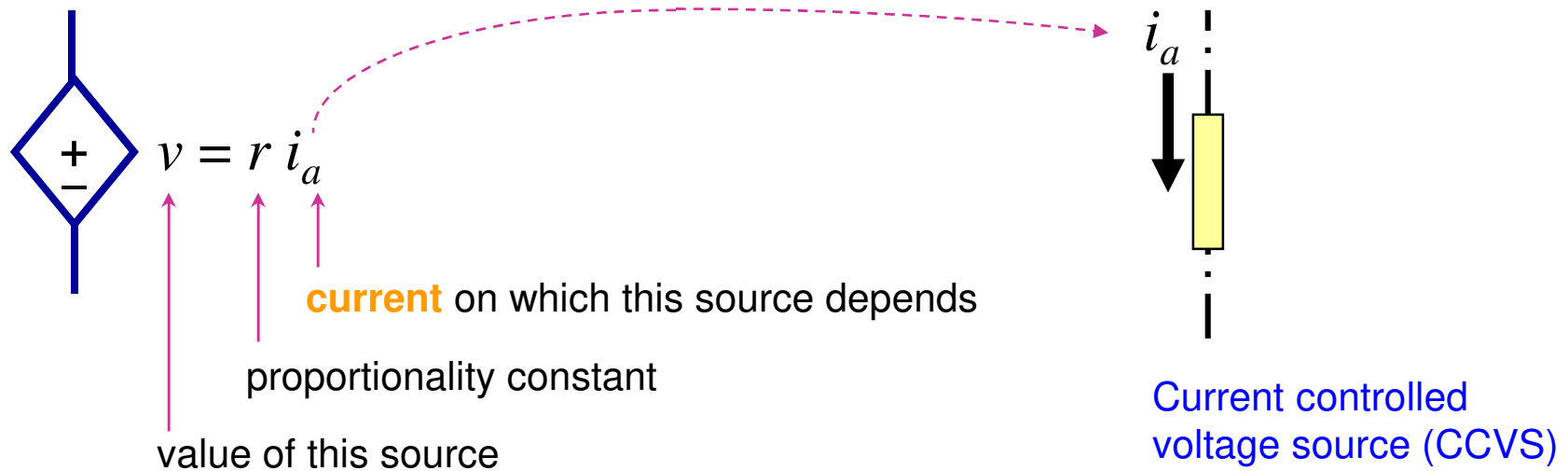
onde resulta que a resistência da fonte dependente é, neste caso:

$$R_{fd} = R_{AB} - R = \frac{a}{1-a} R.$$

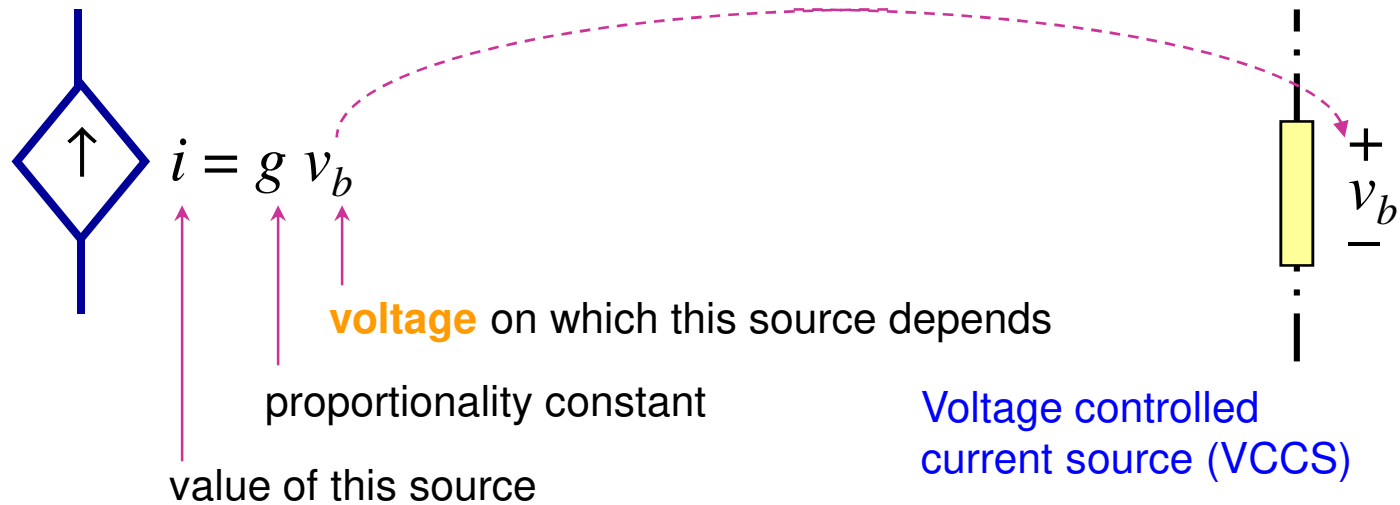
A dependent **voltage** source can depend on a **voltage**:



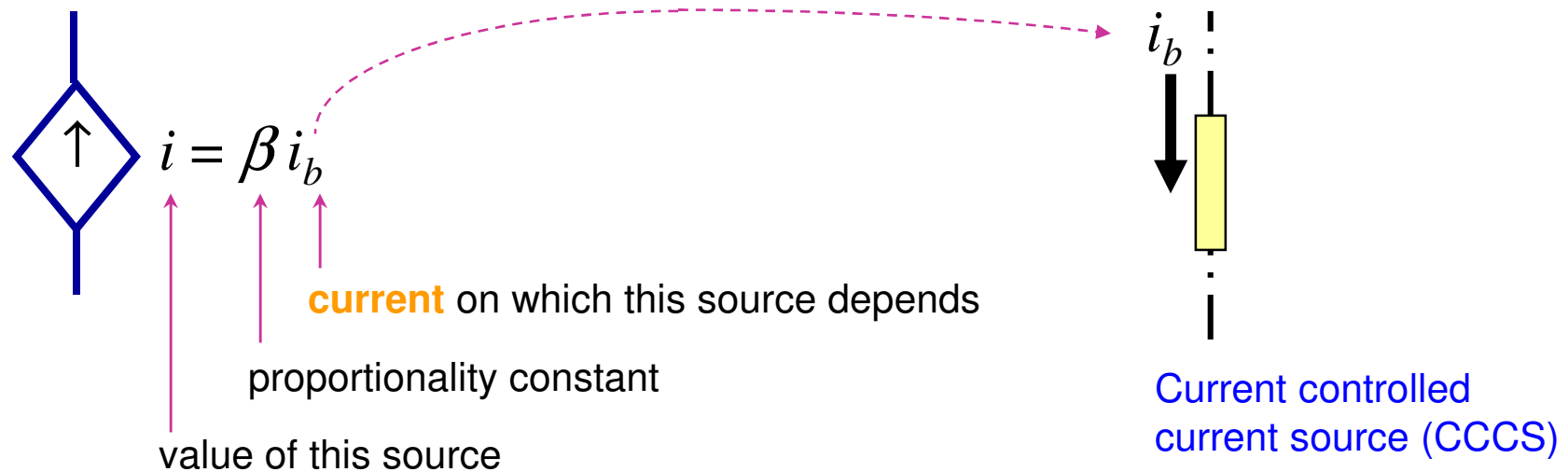
A dependent **voltage** source can depend on a **current (CCVS)**:



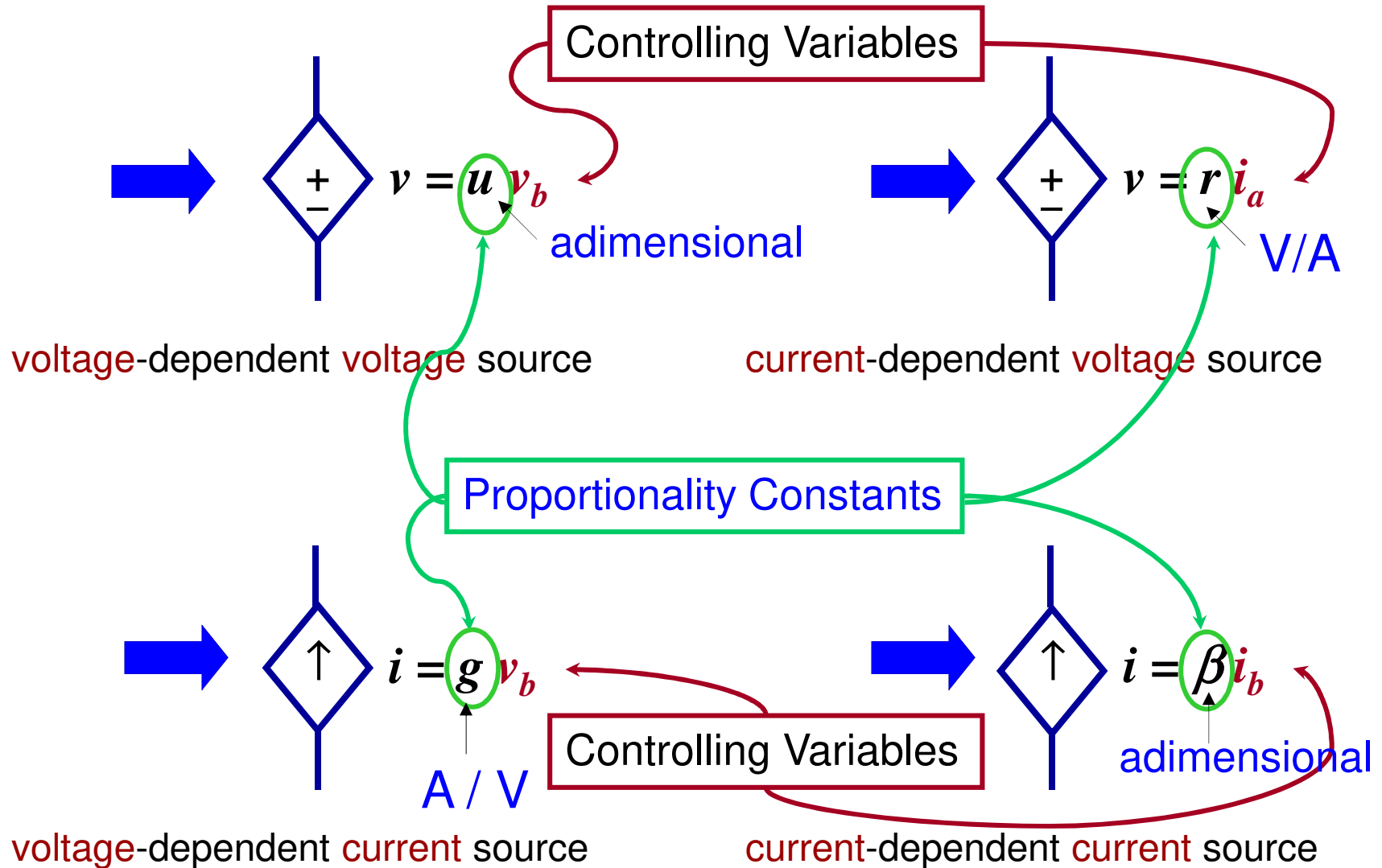
A dependent **current** source can depend on a **voltage**:



A dependent **current** source can depend on a **current**:



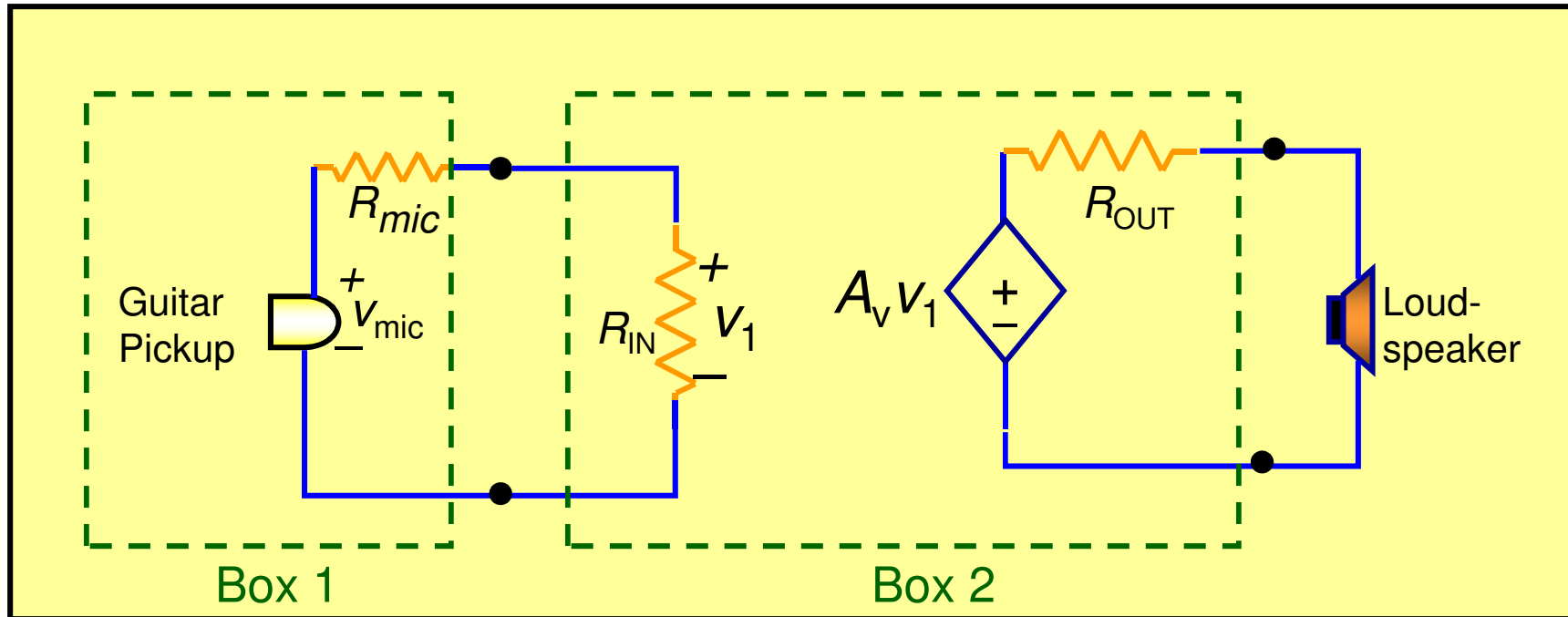
Os quatro tipos de fontes dependentes



Exemplos de circuitos com fontes dependentes

Circuito amplificador

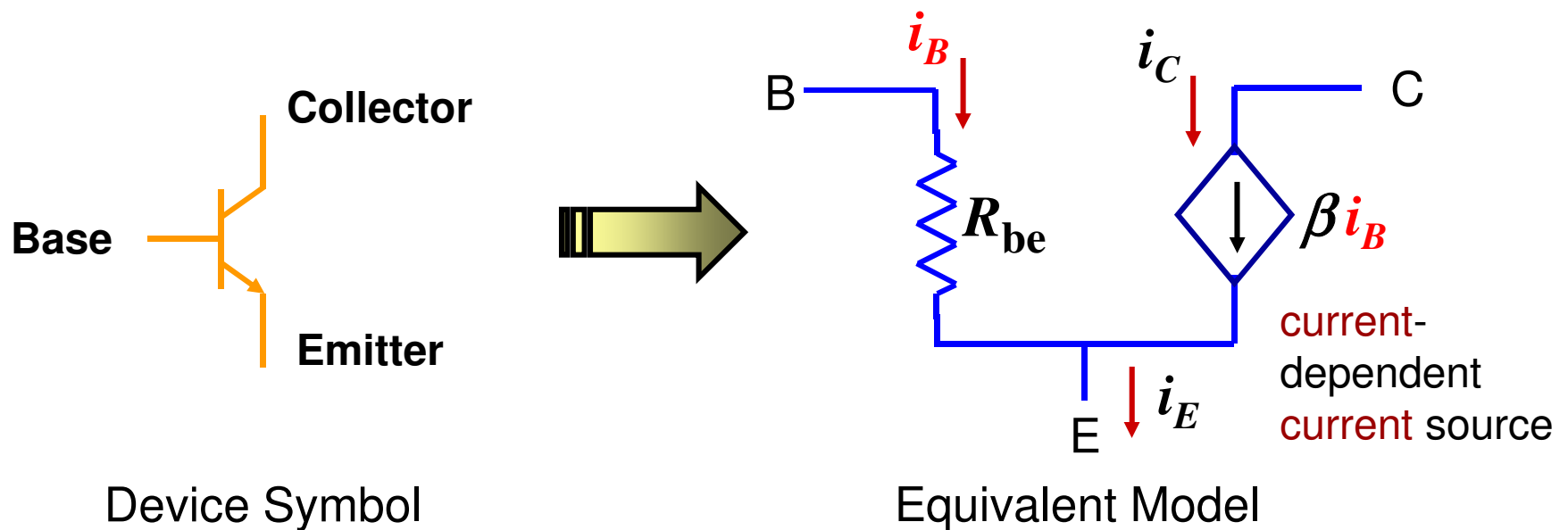
This circuit is a model for a guitar amplifier system:



- Multiply v_{mic} by a large number
- Apply as “amplified” voltage to loudspeaker
- Sound comes out

Modelo de um Transistor Bipolar

Um novo dispositivo: o transistor bipolar de junção (BJT):



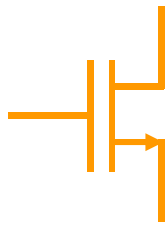
Transistor bipolar:

$$i_E = i_B + i_C$$

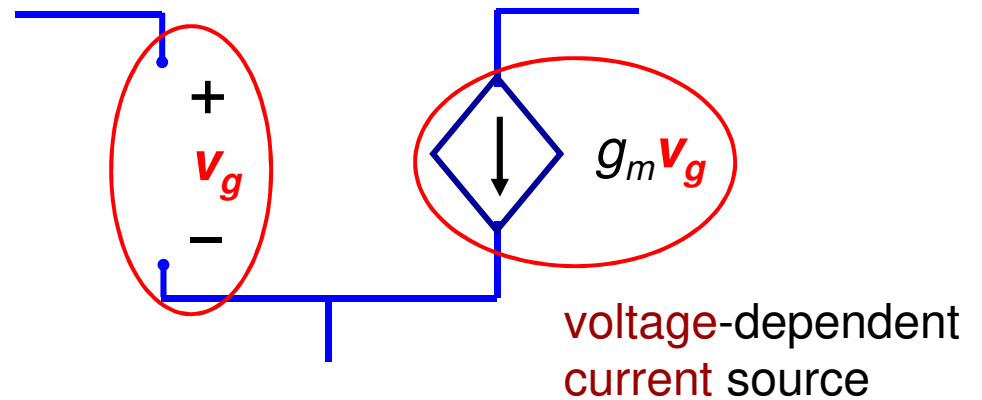
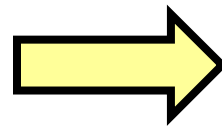
Do ponto de vista da corrente, o transistor bipolar (BJT) comporta-se como um nodo

Modelo do MOSFET

Outro novo dispositivo: MOSFET (acrónimo de “Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor”, ou transístor de efeito de campo metal - óxido – semicondutor)



MOSFET



Equivalent Model

Características tensão-corrente de um elemento, de um circuito ou de parte de um circuito

Definição da característica tensão-corrente (característica I-V)

A **característica tensão-corrente** de um elemento ou de uma porção de um circuito descreve a relação entre a corrente que flui através do componente/circuito e a tensão aos seus terminais. A tensão é a variável independente; a corrente é a variável dependente.

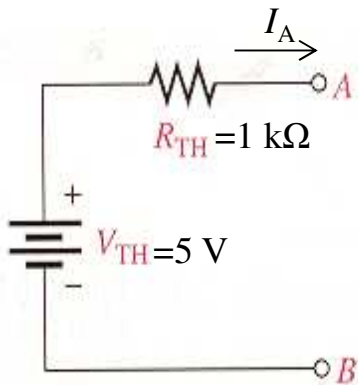
A representação gráfica da característica I-V mostra os pares de valores de tensão e de corrente permitidos na operação pelo dito elemento/circuito; os valores de tensão são representados no eixo horizontal (abscissas) e os valores de corrente são representados no eixo vertical (ordenadas).

Uma resistência, por exemplo, tem uma característica I-V que segue a lei de Ohm: $I=V/R$. O gráfico desta característica I-V passa pela origem e tem um declive $dI/dV=1/R$.

O conceito de característica tensão-corrente pode ser usado para descrever a relação entre a corrente e a tensão entre dois pontos (**porto**) quaisquer de um circuito ou de uma porção de um circuito. Esta porção de circuito pode ser considerada como um elemento com a sua própria característica I-V. O conceito de equação de tensão-corrente pode ser aplicado a qualquer par de terminais de uma rede de vários elementos, tal como mostra o exemplo que se segue.

Determinação da característica tensão-corrente de um “circuito”

O conceito de uma equação de tensão-corrente pode ser aplicado a qualquer par de terminais (ou porto) de qualquer rede de vários elementos. Deduzir e representar graficamente a relação I-V para o porto A-B do circuito representado abaixo.



Em aberto, a tensão aos terminais A-B será V_{TH} , e a corrente I_A será nula. Quando se liga outro elemento aos terminais A-B do circuito como uma resistência finita, por exemplo, fluirá uma corrente I_A “para fora” do terminal A, isto é, no sentido A→B. (Este “dispositivo” não é passivo, porque contém uma fonte de tensão independente.)

Da aplicação da lei de Kirchhoff obtém-se a equação: $V_A = V_{TH} - I_A R_{TH}$, resultando na relação: $I_A = -$
 $V_A/R_{TH} + V_{TH}/R_{TH}$.

O declive da relação $I_A = f(V_A)$ é dado por $dI_A/dV_A = -1/R_{TH}$.

Representando graficamente a relação $I_A = f(V_A)$ obtida, vemos que a característica I-V do “circuito” intercepta o eixo I_A (ordenadas) no ponto V_{TH}/R_{TH} e o eixo V_A (abcissas) no ponto V_{TH} .

Circuitos lineares

Circuitos lineares

Um elemento de um circuito diz-se linear se tiver uma característica I-V da forma:

$$V = ai_1 + bi_2 \quad \text{ou}$$

$$I = cv_1 + dv_2.$$

Nestas equações a , b , c , e d são constantes.

De uma forma mais geral, estes coeficientes também poderiam ser operadores lineares como, por exemplo, derivadas ou integrais. Assim, **um elemento de um circuito que tenha uma característica V-I que possa ser escrita na forma:**

$$V = a \frac{di_1}{dt} + b \int i_2 dt$$

também é um elemento de circuito linear.

Qualquer circuito formado a partir de elementos cujas características I-V possam ser expressas nas formas descritas acima, obedecerá ao **princípio da sobreposição**.

Princípio da sobreposição

Princípio da sobreposição

O princípio da sobreposição estabelece que a resposta de um **circuito linear** em resultado da ação de todas fontes de tensão independentes presentes será igual à soma das respostas devidas a cada fonte atuando isoladamente.

Seja, por exemplo, um circuito que produz uma corrente i_1 em resposta a uma tensão aplicada v_1 , $i_1 = f(v_1)$, onde $f(v)$ é uma **função linear da forma expressa atrás**; Se for aplicada uma tensão distinta v_2 , é gerada uma corrente i_2 da forma $i_2 = f(v_2)$.

Se o **circuito for linear**, a corrente total resultante da aplicação simultânea de v_1 e v_2 , resulta numa corrente i_3 da forma:

$$i_3 = f(v_1 + v_2) = f(v_1) + f(v_2) = i_1 + i_2.$$

Pode-se utilizar o princípio da sobreposição para conhecer qualquer tensão ou corrente **num circuito linear**, incluindo quando **existem diversas fontes de tensão e de corrente (lineares) no circuito**.

Princípio da Sobreposição

Alguns circuitos possuem mais que uma fonte de tensão. Por exemplo, certo tipo de amplificadores requerem para operação **fontes de tensão com ambas as polaridades (fontes bipolares)**.

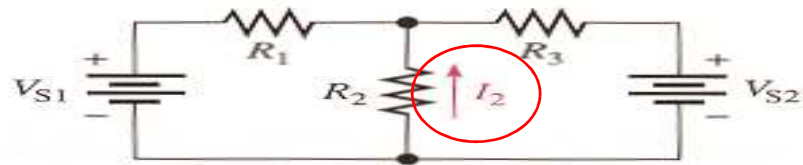
O princípio da sobreposição permite determinar correntes e tensões em circuitos lineares com várias fontes de tensão, considerando uma fonte de cada vez, com as outras fontes substituídas pelas respectivas resistências/impedâncias internas.

Isto é, a corrente em qualquer ramo de um circuito linear com várias fontes pode ser obtida determinando a corrente em cada ramo produzida por cada fonte actuando isoladamente, com todas as outras fontes substituídas pelas suas resistências/impedâncias internas.

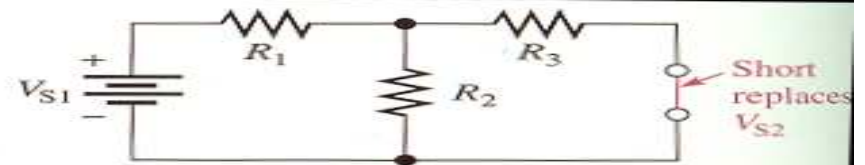
A corrente em cada ramo será a soma algébrica das correntes nesse ramo devidas às fontes individuais.

Exemplo: Circuito com duas fontes de tensão independentes

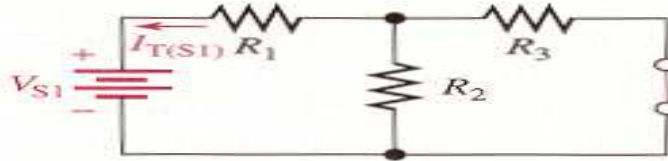
Queremos determinar I_2 :



(a) Problem: Find I_2 .



(b) Replace V_{S2} with zero resistance (short).



(c) Find R_T and I_T looking from V_{S1} :

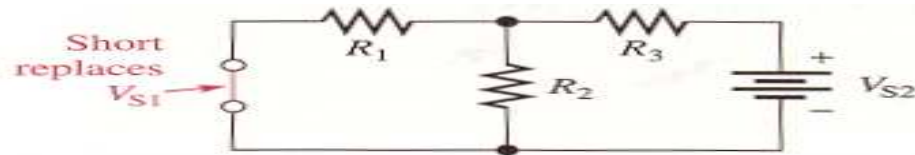
$$R_{T(S1)} = R_1 + R_2 \parallel R_3$$

$$I_{T(S1)} = V_{S1} / R_{T(S1)}$$



(d) Find I_2 due to V_{S1} :

$$I_{2(S1)} = \left(\frac{R_3}{R_2 + R_3} \right) I_{T(S1)}$$



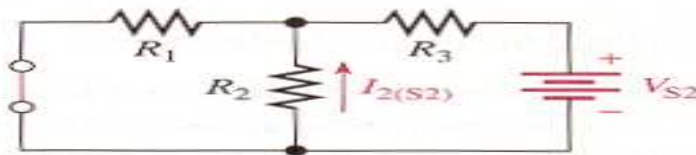
(e) Replace V_{S1} with zero resistance (short).



(f) Find R_T and I_T looking from V_{S2} :

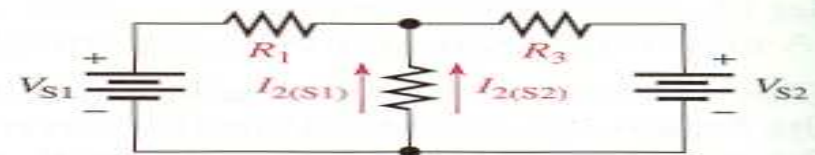
$$R_{T(S2)} = R_3 + R_1 \parallel R_2$$

$$I_{T(S2)} = V_{S2} / R_{T(S2)}$$



(g) Find I_2 due to V_{S2} :

$$I_{2(S2)} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) I_{T(S2)}$$



(h) Restore the original sources. Add $I_{2(S1)}$ and $I_{2(S2)}$ to get the actual I_2 (they are in same direction):

$$I_2 = I_{2(S1)} + I_{2(S2)}$$

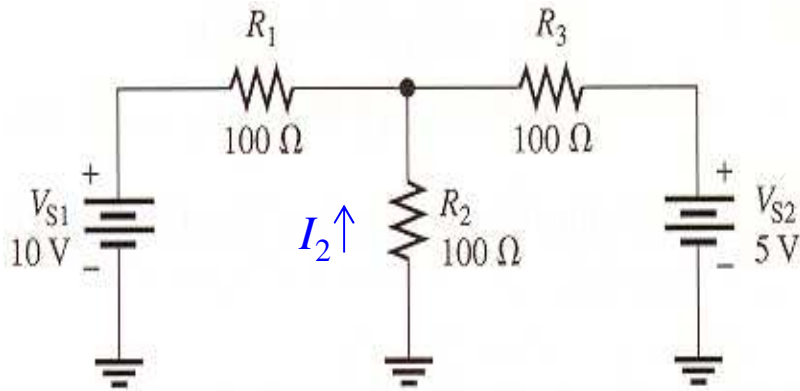
Aplicação do princípio da Sobreposição

Metodologia:

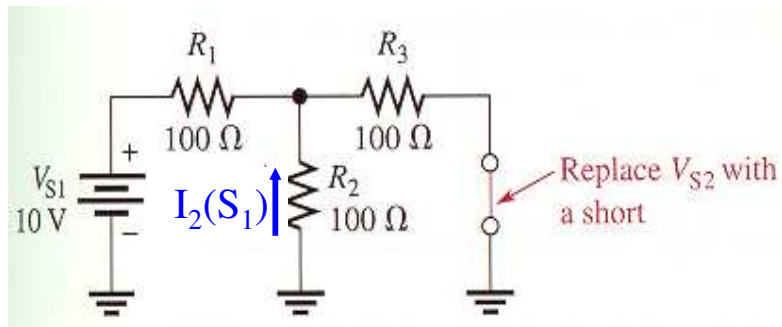
- Considera-se uma fonte de tensão/corrente de cada vez, substituindo as outras fontes de tensão por curto-circuitos e pelas respectivas resistências/impedâncias internas, e as outras fontes de corrente substituídas por circuitos-abertos em paralelo com as respectivas resistências/impedâncias internas; **as fontes dependentes continuam a ser tidas em conta**, a menos que não façam parte da secção do circuito em consideração.
- determinar cada corrente e tensão particular, para cada fonte considerada;
- considerar nova fonte e repetir os passos anteriores;
- adicionar ou subtrair as componentes das correntes em cada ramo devidas a cada fonte individual;
- uma vez conhecida a corrente obtém-se a tensão, usando a lei de Ohm.

Exemplo: Circuito com duas fontes de tensão independentes

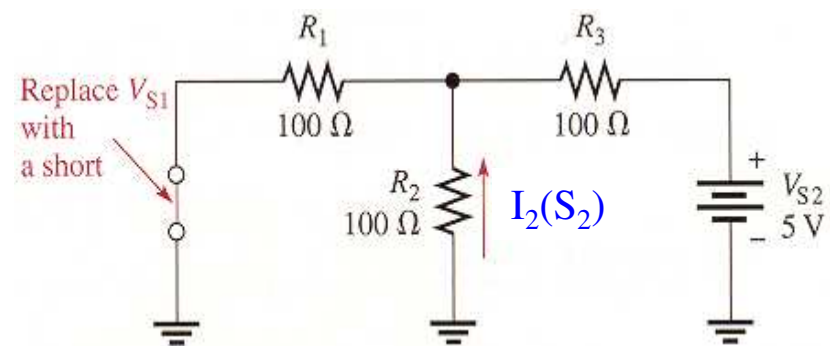
Determinar a corrente que percorre R_2 , $I_2 = I_2(S_2) + I_2(S_1)$



Efeito de V_{s1}



Efeito de V_{s2}

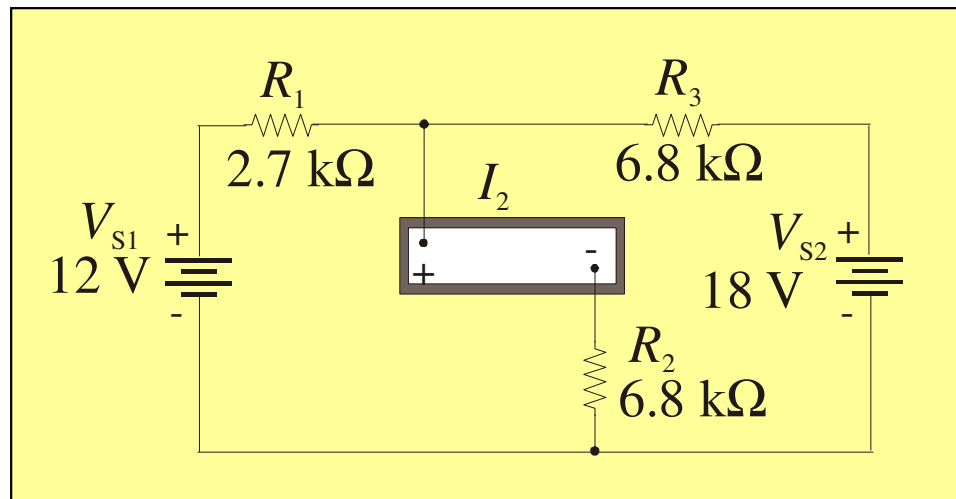


A corrente no ramo com a R_2 é dada por $I_2 = I_2(S_2) + I_2(S_1)$

Princípio da sobreposição

The **superposition theorem** is a way to determine currents and voltages in a linear circuit that has multiple sources by taking one source at a time and algebraically summing the results.

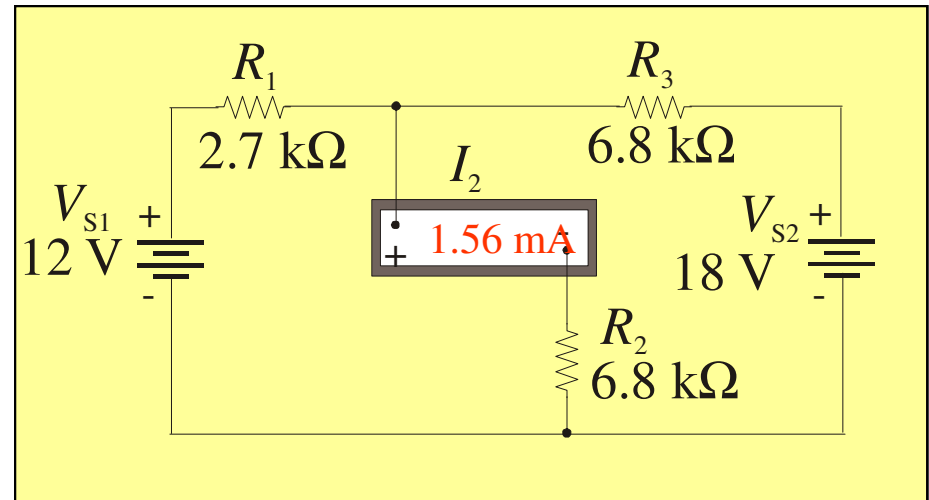
What does the ammeter read for I_2 ?



Princípio da sobreposição

Qual é o valor da corrente I_2 medido pelo amperímetro?

- 1) Efeito de V_{S1} : substitui-se V_{S2} por um curto, determina-se a resistência vista por V_{S1} , $R_{T(S1)}$ e a corrente que percorre V_{S1} , 1.97 mA; pelo divisor de corrente determina-se $I_{2(S1)}$.
- 2) Efeito de V_{S2} : idem.



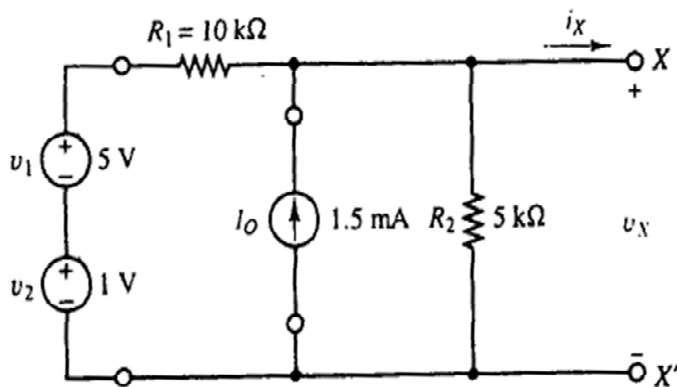
Set up a table of pertinent information and solve for each quantity listed:

Source 1:	$R_{T(S1)} = 6.10 \text{ k}\Omega$	$I_1 = 1.97 \text{ mA}$	$I_2 = 0.98 \text{ mA}$
Source 2:	$R_{T(S2)} = 8.73 \text{ k}\Omega$	$I_3 = 2.06 \text{ mA}$	$I_2 = 0.58 \text{ mA}$
Both sources			$I_2 = 1.56 \text{ mA}$

The total current is the algebraic sum.

Exercício de aplicação do princípio da sobreposição

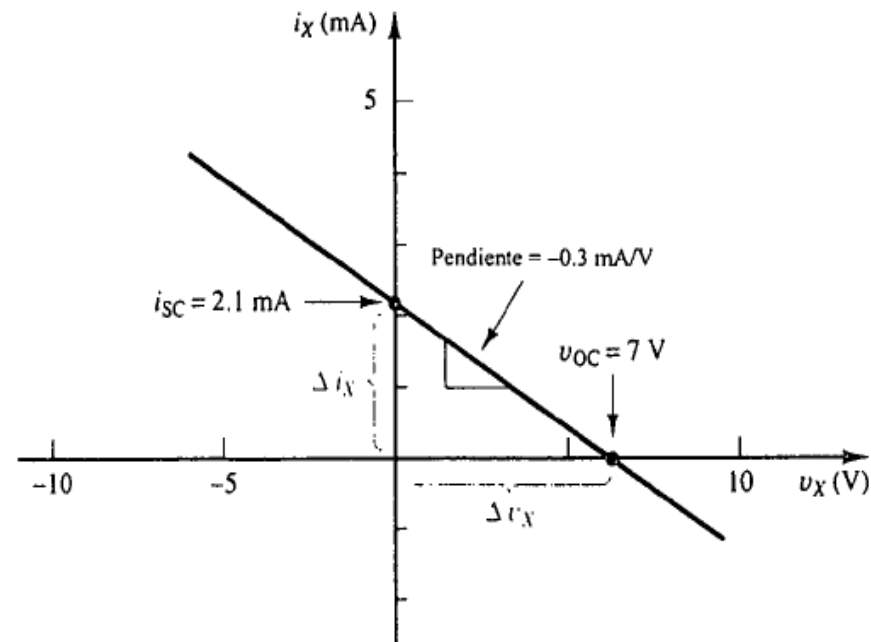
1. Considere o circuito da figura. i) Usando o princípio da sobreposição determine a tensão v_x (tensão em circuito aberto, v_{oc} , i.e., sem carga). ii) Determine a corrente de curto circuito i_{sc} entre X e X'. iii) Represente graficamente a característica tensão-corrente $i_x - v_x$. Res: i) $1,67\text{ V} + 0,33\text{ V} + 5\text{ V} = 7\text{ V}$; ii) 2.1 mA ;



$$i_x = m v_x + i_{sc} = (-0.3 \text{ mA/V}) v_x + 2.1 \text{ mA}$$

$$v_x = \frac{i_x}{m} + v_{oc}$$

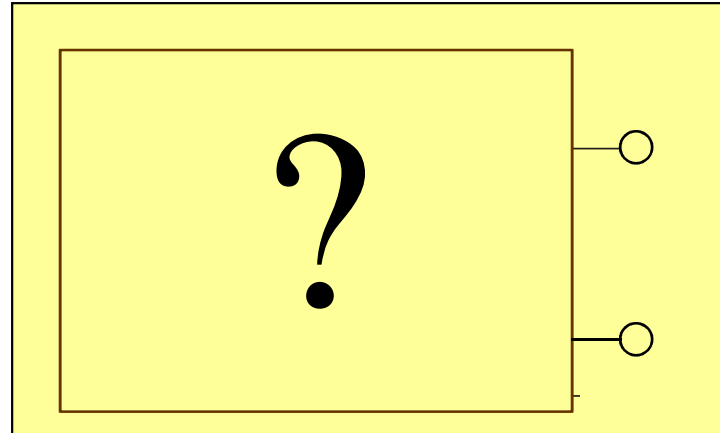
$$= (-3.33 \text{ V/mA}) i_x + 7 \text{ V}$$



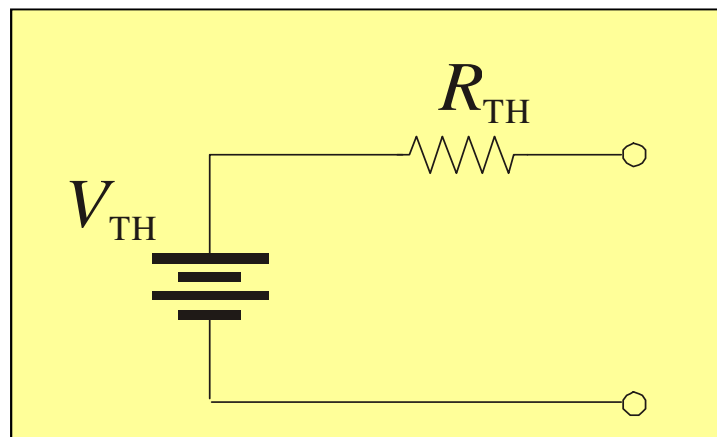
2. Determine o valor e o sentido da corrente que percorre a resistência R_2 , se $v_1=10\text{ V}$, $v_2= 4\text{ V}$, $I_0=4\text{ mA}$, e $R_1=R_2=10\text{ k}\Omega$. Res: $2,7\text{ mA}$.
3. Determine o valor e o sentido da corrente que percorre a resistência R_2 , se $v_1=10\text{ V}$, $v_2= 4\text{ V}$, $I_0=-4\text{ mA}$, e $R_1=R_2=10\text{ k}\Omega$. Res: $-1,3\text{ mA}$.

Teorema de Thévenin

Teorema de Thévenin



Thevenin's theorem states that any two-terminal, resistive circuit can be replaced with a simple equivalent circuit when viewed from two output terminals. The equivalent circuit is:

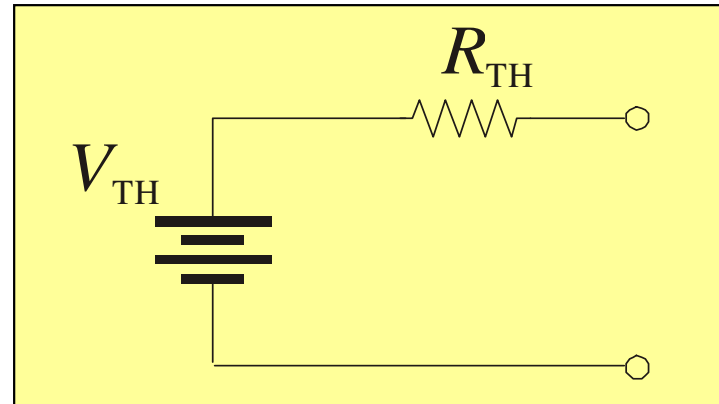


Teorema de Thévenin

O teorema de Thévenin permite transformar um circuito complexo num circuito bastante mais simples. A forma equivalente de Thévenin de qualquer circuito relativamente a dois pontos (terminais/porto) do circuito consiste numa fonte de tensão (equivalente), V_{TH} , em série com uma resistência/impedância (equivalente), R_{TH}/Z_{TH} .

A tensão equivalente de Thévenin, V_{TH} , é a tensão em circuito aberto (sem carga) entre os dois pontos (terminais/porto) especificados do circuito. A resistência/impedância equivalente de Thévenin, R_{TH}/Z_{TH} , é a resistência/impedância “vista” do porto especificado, quando as fontes existentes no circuito são substituídas pelas respectivas resistências/impedâncias internas (zero no caso de fontes ideais de tensão, e infinito no caso de fontes ideais de corrente). **Esta equivalência só é válida relativamente aos terminais/porto em causa. Se for considerado outro porto do circuito as características (V_{TH} e R_{TH}) do equivalente de Thévenin serão diferentes.**

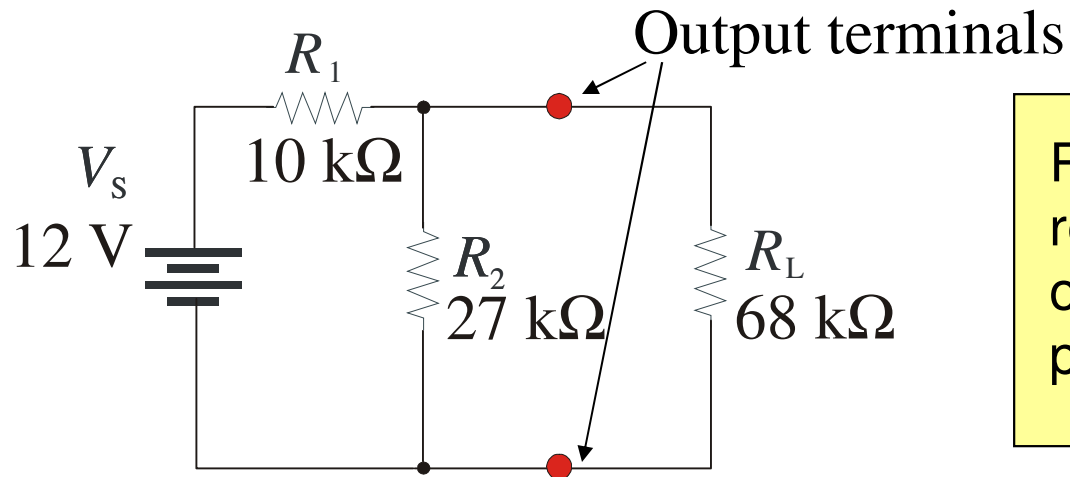
Equivalente de Thévenin



V_{TH} is defined as the **open circuit voltage** between the two output terminals of a circuit.

R_{TH} is defined as the **total resistance appearing between the two output terminals** when all sources have been replaced by their internal resistances.

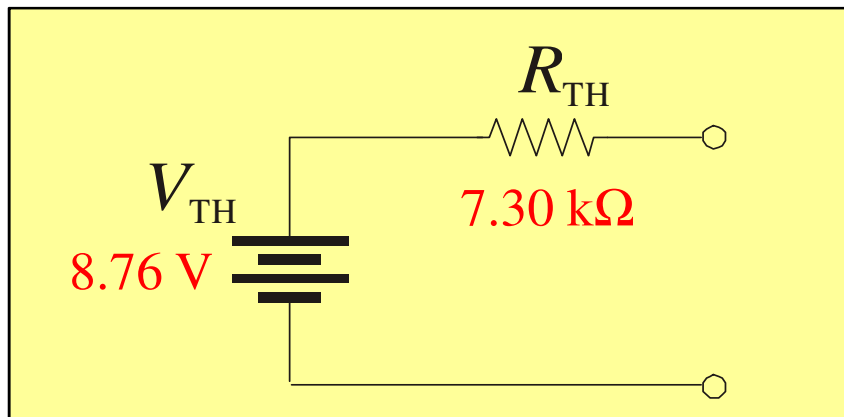
Equivalente de Thévenin



Remember, the load resistor has no affect on the Thevenin parameters.

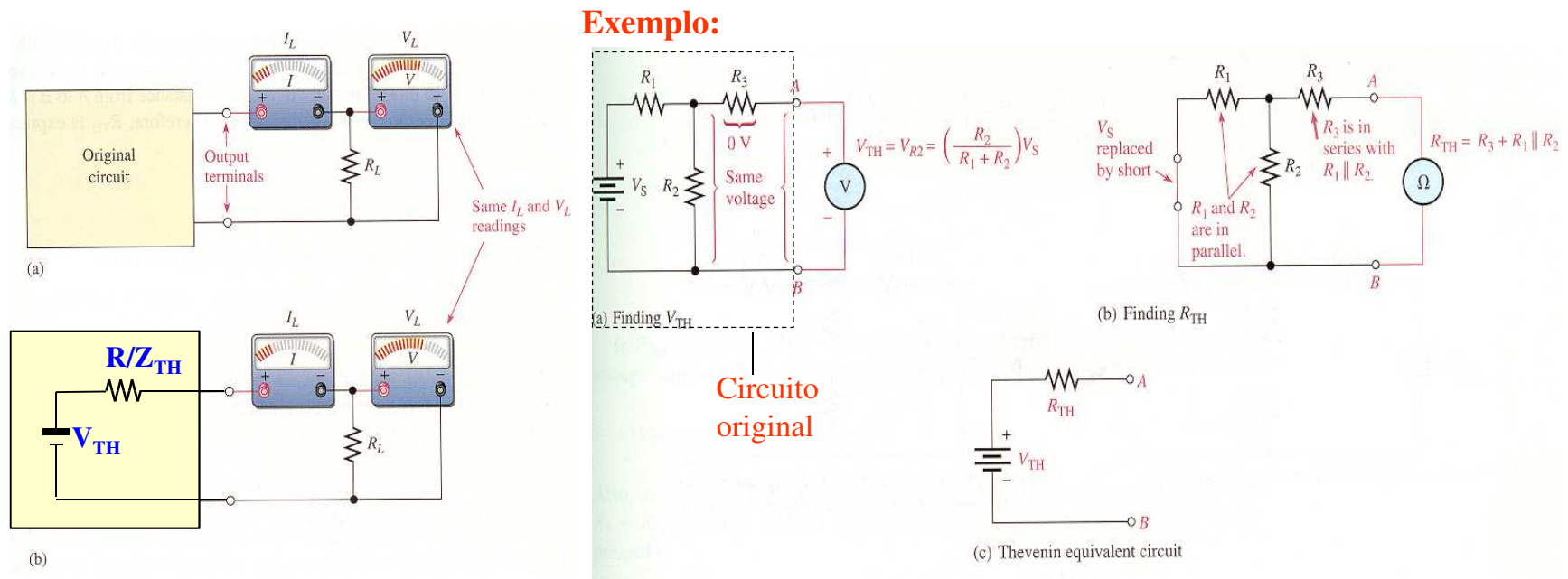
What is the Thevenin voltage for the circuit?

What is the Thevenin resistance for the circuit?



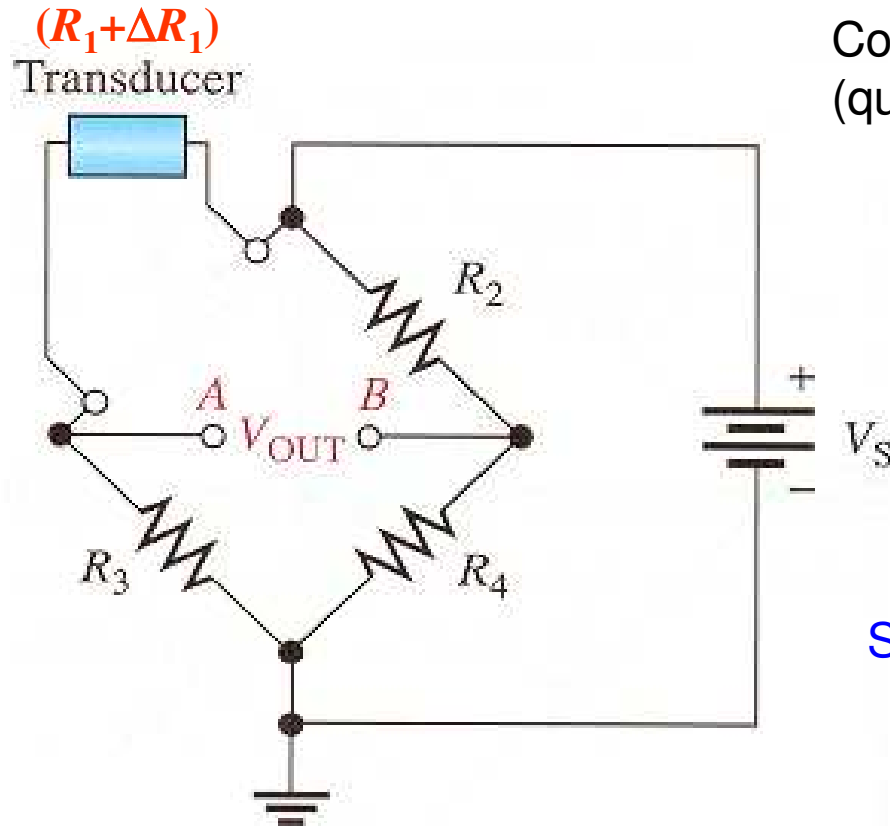
Teorema de Thévenin

O teorema de Thévenin permite transformar um circuito complexo num circuito bastante mais simples equivalente. **Esta equivalência só é válida relativamente aos terminais/porto em causa. Se for considerado outro porto do circuito as características (V_{TH} e R_{TH}) do equivalente de Thévenin serão diferentes.**



Exemplo de aplicação do teorema de Thévenin

Ponte Wheatstone.



Condição de **balanceamento** da ponte (quando $V_{AB}=0$ V):

$$R_1/R_3 = R_2/R_4$$

ou

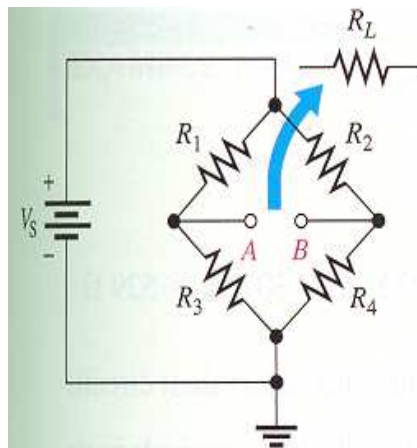
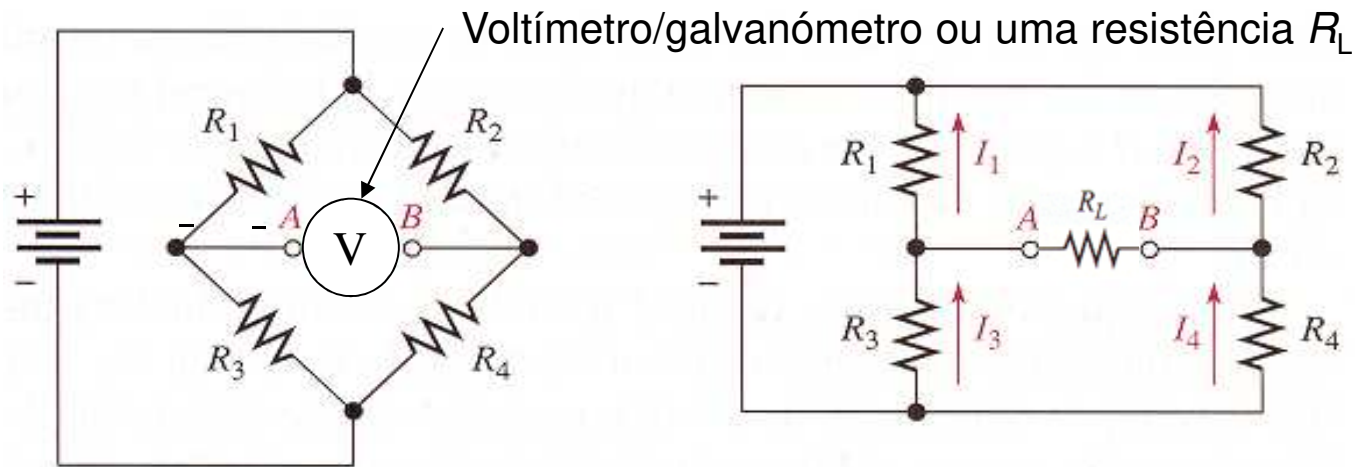
$$R_1 R_4 = R_2 R_3$$

Se $R_1=R_2=R_3=R_4$ e $\Delta R_1=0$: $V_{AB}=0$ V;

Se $R_1=R_3=R_2=R_4=R$ e $\Delta R_1 \neq 0$: $\Delta V_{AB} = \Delta R_1 (V_S / 4R)$

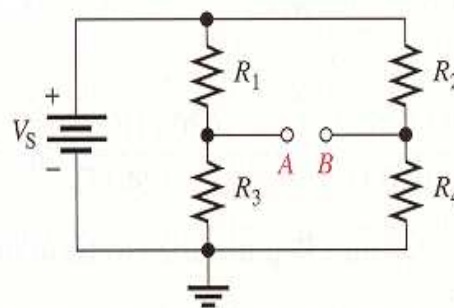
Exemplo de aplicação do teorema de Thévenin

Determinação do equivalente de Thévenin da ponte de Wheatstone do porto AB.

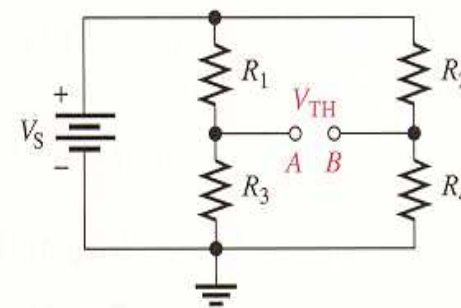


(a) Remove R_L to create an open circuit between the output terminals A and B.

Cálculo da tensão de Thévenin:



(b) Redraw (if you wish).



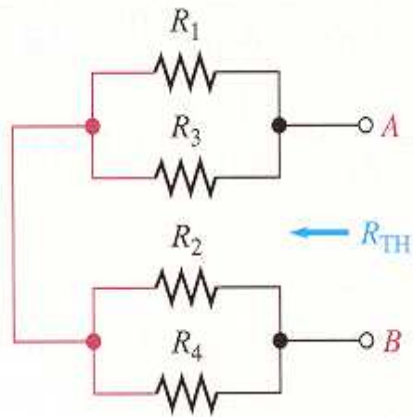
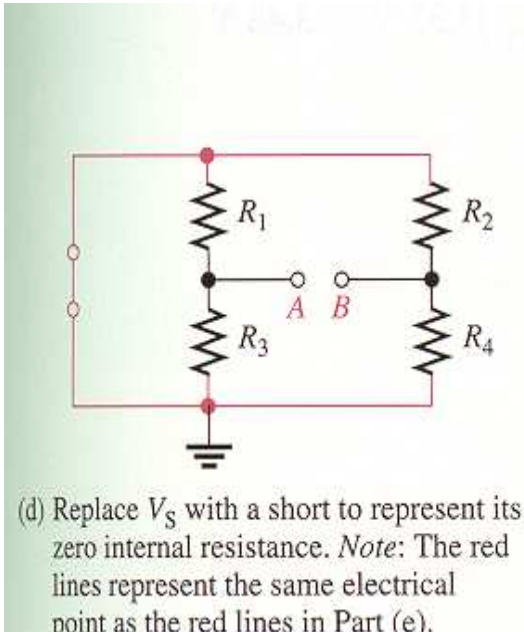
(c) Find V_{TH} :

$$V_{TH} = V_A - V_B = \left(\frac{R_3}{R_1 + R_3} \right) V_S - \left(\frac{R_4}{R_2 + R_4} \right) V_S$$

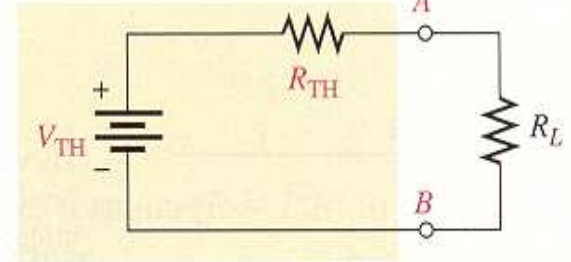
Exemplo de aplicação do teorema de Thévenin

Determinação do equivalente de Thévenin da ponte de Wheatstone do porto AB.

Cálculo da resistência de Thévenin:



Equivalente de Thévenin do porto AB:



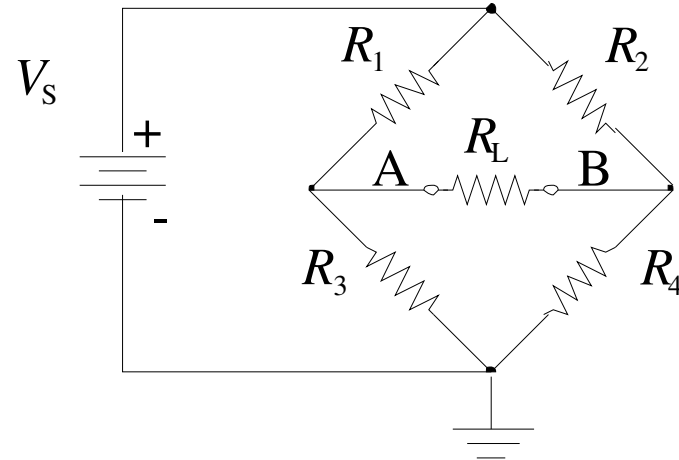
(f) Thevenin's equivalent circuit (beige block) with R_L reconnected

Exemplo de aplicação do teorema de Thévenin

Thevenin's theorem is useful for solving the Wheatstone bridge. One way to Thevenize the bridge is to create two Thevenin circuits - from A to ground and from B to ground.

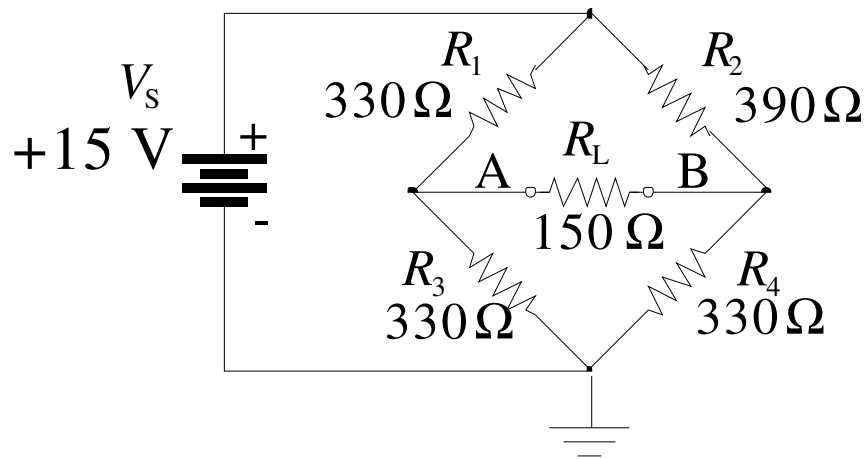
Como determinar a corrente que percorre R_L :

The resistance between point A and ground is $R_1 || R_3$ and the resistance from B to ground is $R_2 || R_4$. The voltage on each side of the bridge is found using the voltage divider rule.

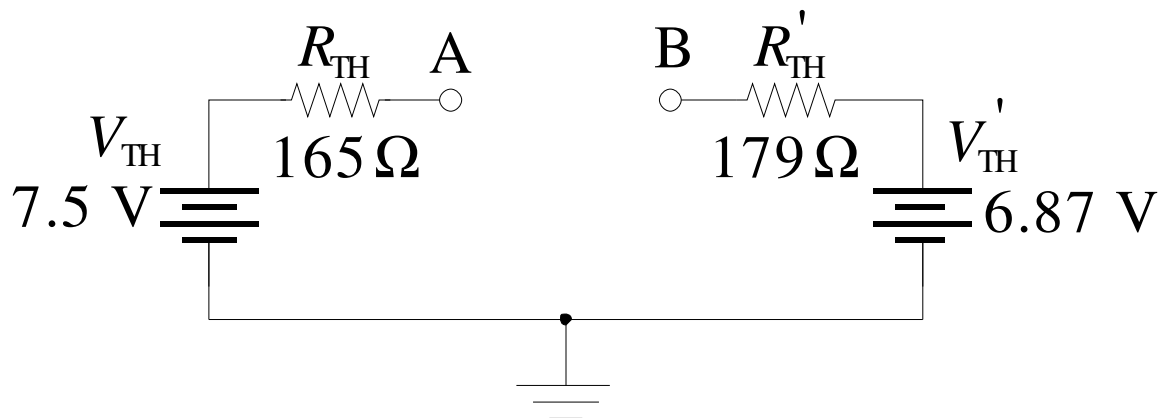


Exemplo de aplicação do teorema de Thévenin

Como determinar a corrente que percorre R_L :

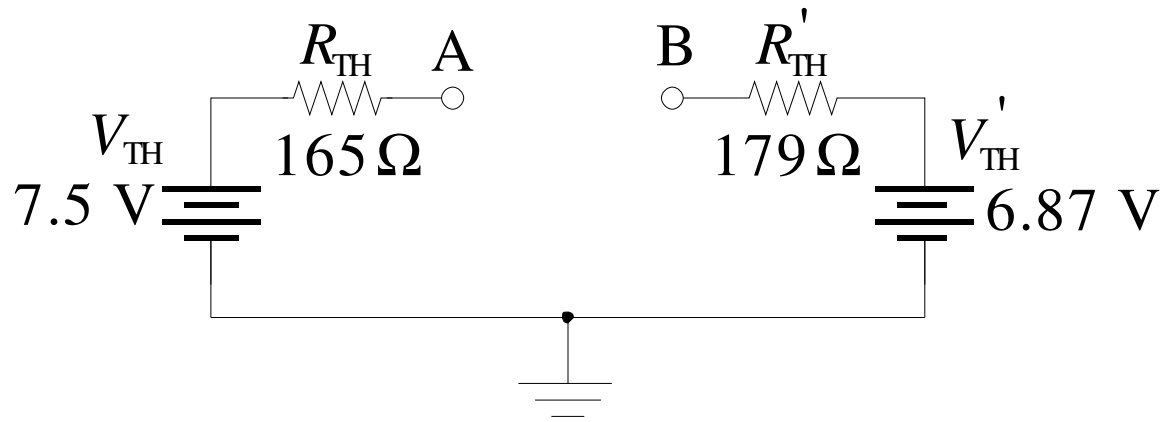


For the bridge shown, $R_1 \parallel R_3 = 165\ \Omega$ and $R_2 \parallel R_4 = 179\ \Omega$. The voltage from A to ground (with no load) is $7.5\ \text{V}$ and from B to ground (with no load) is $6.87\ \text{V}$.

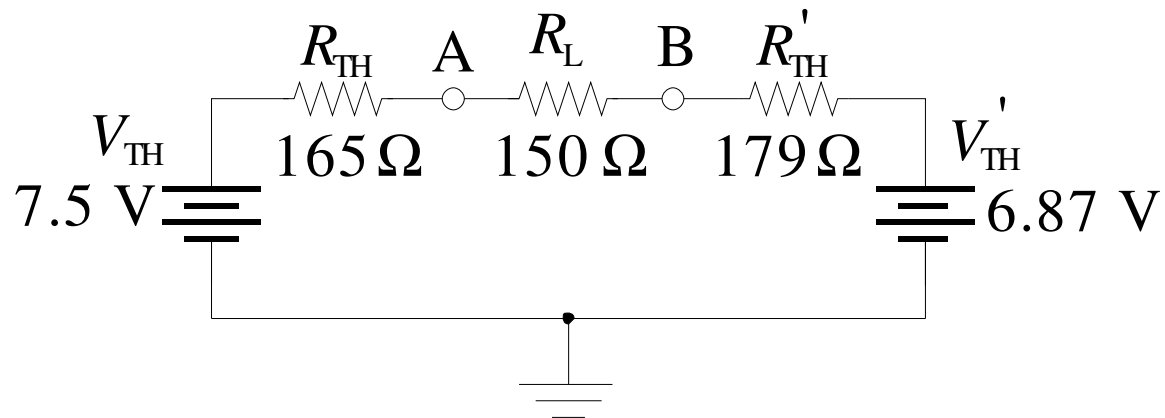


Exemplo de aplicação do teorema de Thévenin

Determinar a corrente que percorre R_L :



Putting the load on the Thévenin circuits and applying the superposition theorem allows you to calculate the load current.



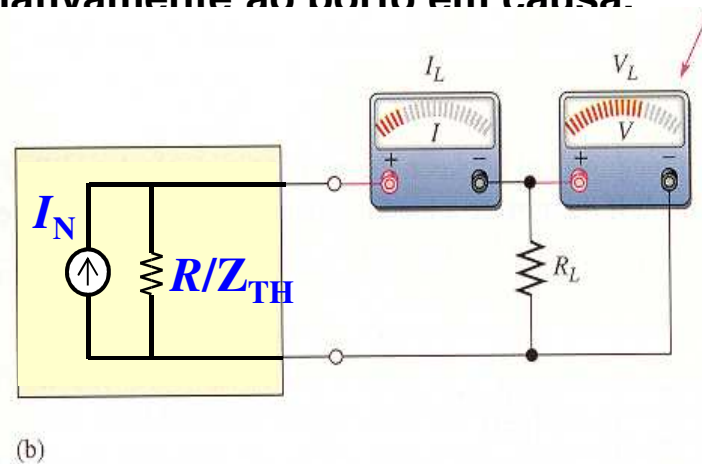
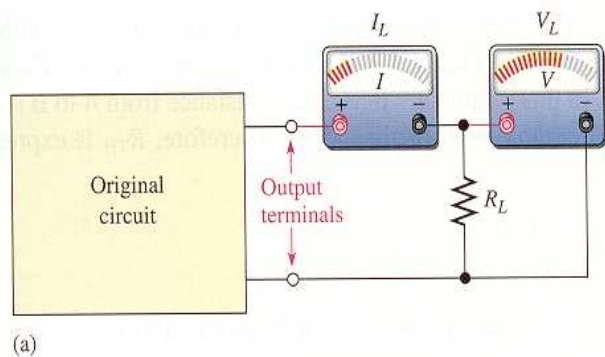
The load current is: **1.27 mA**

Teorema de Norton

Teorema de Norton

A forma equivalente de Norton de qualquer circuito consiste numa **fonte de corrente** (equivalente), I_N , **em paralelo com uma resistência/impedância** (equivalente), R/Z_N . A corrente equivalente de Norton, I_N , é a **corrente em curto circuito** (sem carga) entre os dois pontos especificados (terminais) do circuito. A resistência/impedância equivalente de Norton, R/Z_N , é a resistência “vista” dos dois terminais especificados, e que se obtém, da mesma forma que para o circuito equivalente de Thévenin, quando as fontes no circuito são substituídas pelas respectivas resistências/impedâncias internas (zero no caso de fontes ideais de tensão, e infinito no caso de fontes ideais de corrente).

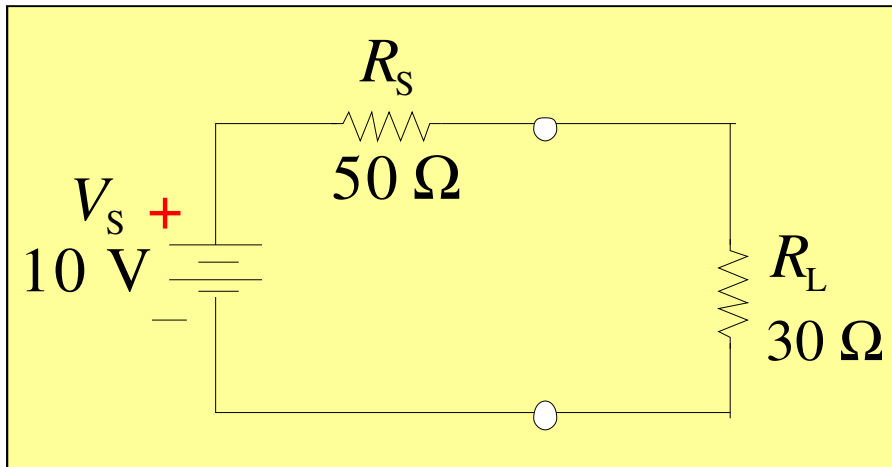
Novamente, esta equivalência só é válida relativamente ao norto em causa.



Teorema da máxima transferida de potência para a carga

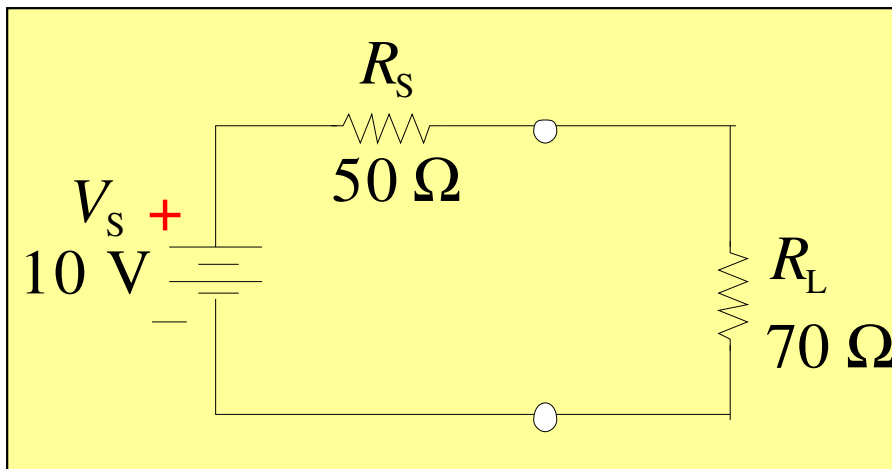
Maximum power transfer

Qual é a potencia fornecida à carga de 30 Ω?



$$P_L = \frac{V_L^2}{R_L} = 0,37 \text{ W}$$

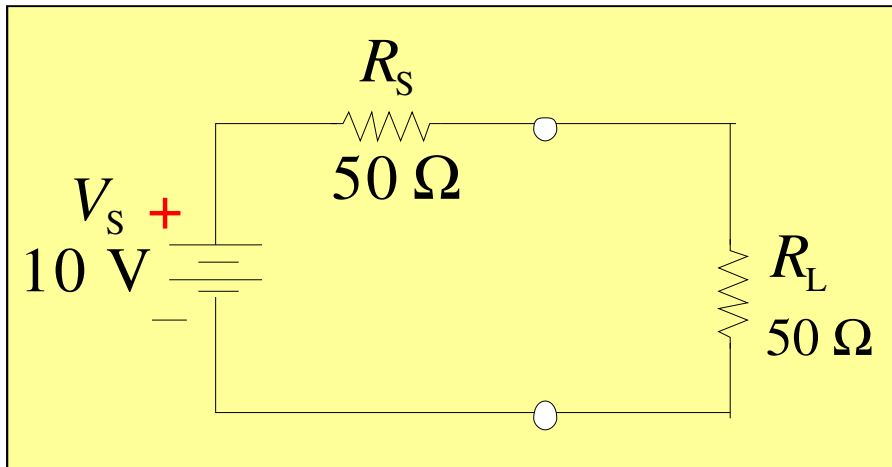
Qual é a potencia fornecida à carga de 70 Ω?



$$P_L = \frac{V_L^2}{R_L} = 0,49 \text{ W}$$

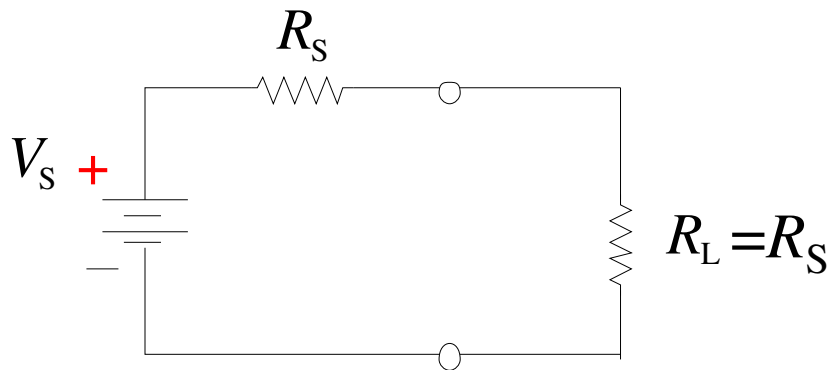
Maximum power transfer

Qual é a potencia fornecida à carga de 50 Ω?



$$P_L = \frac{V_L^2}{R_L} = 0,50 \text{ W}$$

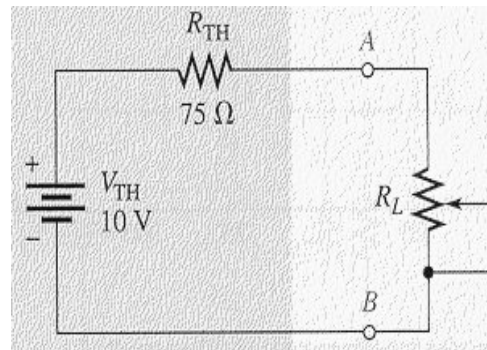
The maximum power is transferred from a source to a load when the load resistance is equal to the internal source resistance. (The maximum power transfer theorem assumes the source voltage and resistance are fixed.)



Quando $R_S = R_L$, diz-se que a carga está adaptada à impedância da fonte, i.e., há **adaptação de impedâncias** entre a carga e a fonte.

Teorema da máxima transferências de potência da fonte para a carga

Seja uma fonte (ou circuito equivalente) caracterizada por V_{TH} e R_{TH} , à qual se liga uma carga R_L . Seja a carga uma resistência variável R_L (por exemplo um reóstato), ver figura. Qual o valor de R_L que maximiza a potência transmitida pela fonte à carga?



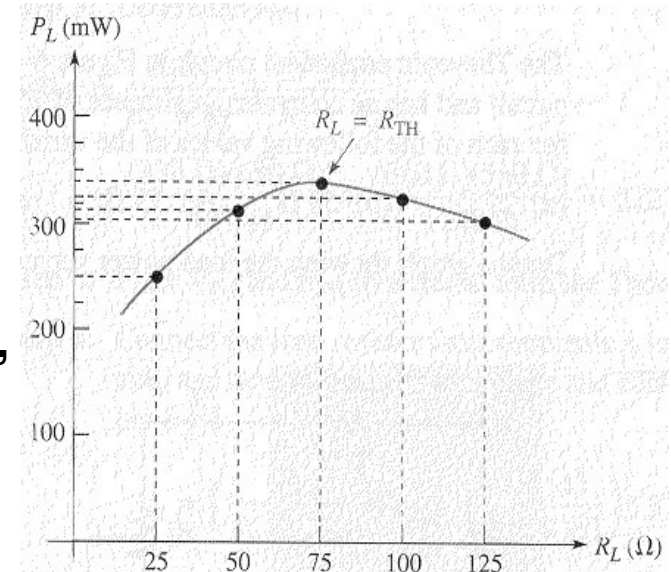
$$P = V \cdot I$$

$$P_L = V_L \cdot I_L = [R_L / (R_{TH} + R_L)] V_{TH} \cdot I_L = [R_L / (R_{TH} + R_L)^2] (V_{TH})^2$$

Se $R_L = 0$, temos $P = 0$ W; se $R_L = \text{infinito}$, $P = 0$ W.

O valor de P_L é máximo quando $dP_L/dR_L = 0$,
donde resulta $R_L = R_{TH}$, e:

$$P_{L \max} = (V_{TH})^2 / 4R_{TH}$$



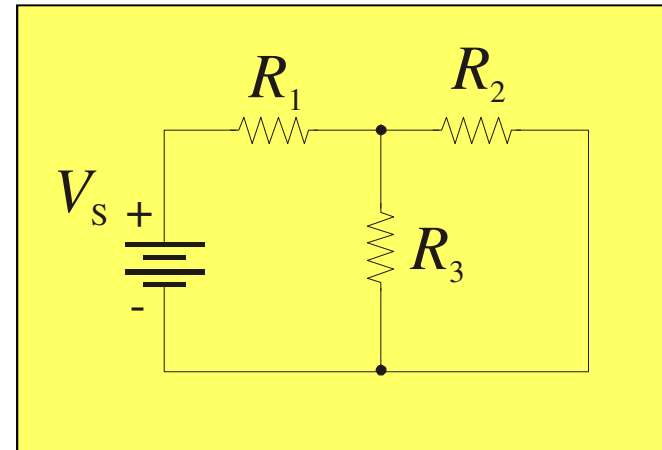
Exercícios

(trabalho de casa)

Exercícios

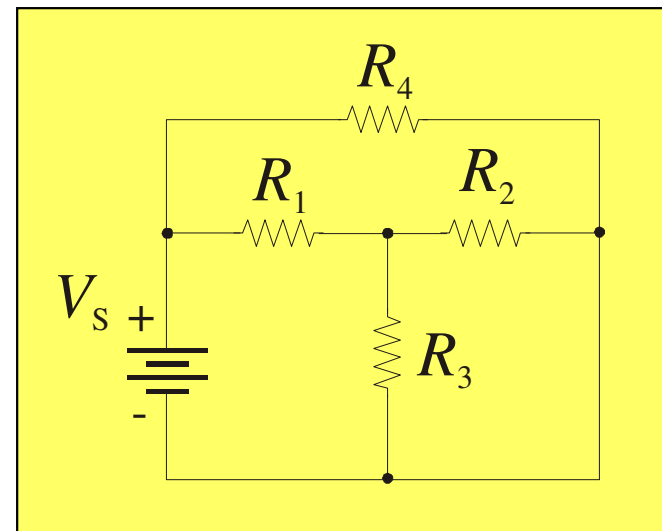
3. For the circuit shown,

- a. R_1 is in series with R_2
- b. R_1 is in parallel with R_2
- c. R_2 is in series with R_3
- d. R_2 is in parallel with R_3



4. For the circuit shown,

- a. R_1 is in series with R_2
- b. R_4 is in parallel with R_1
- c. R_2 is in parallel with R_3
- d. none of the above



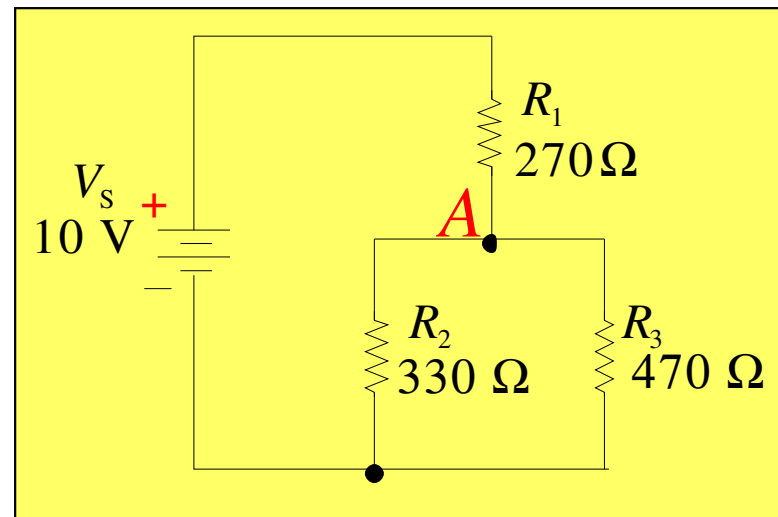
Exercícios

5. A signal generator has an output voltage of 2.0 V with no load. When a 600 W load is connected to it, the output drops to 1.0 V. The Thevenin resistance of the generator is

- a. 300 W b. 600 W c. 900 W d. 1200 W.

6. For the circuit shown, Kirchhoff's voltage law

- a. applies only to the outside loop
b. applies only to the A junction.
c. can be applied to any closed path.
d. does not apply.



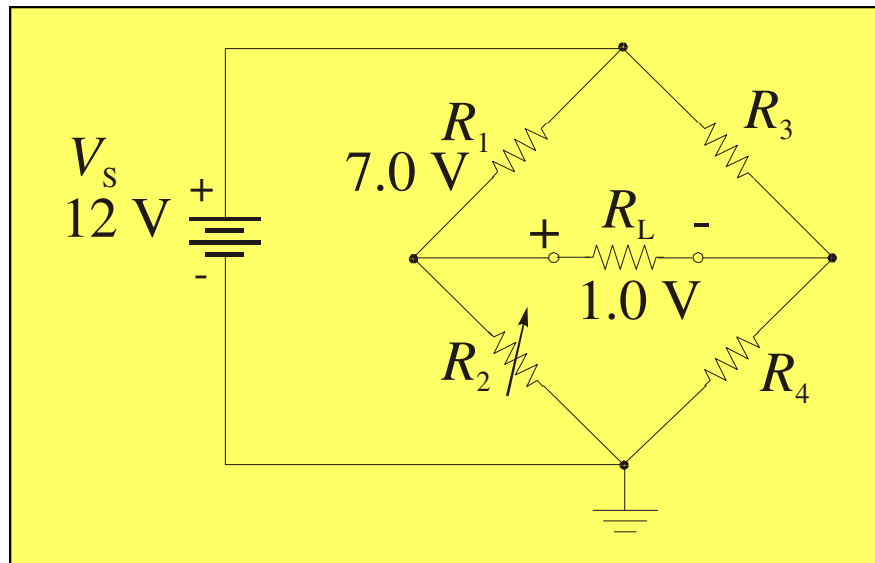
Exercícios

7. The effect of changing a measured quantity due to connecting an instrument to a circuit is called

- a. loading b. clipping c. distortion d. loss of precision

8. An unbalanced Wheatstone bridge has the voltages shown. The voltage across R_4 is

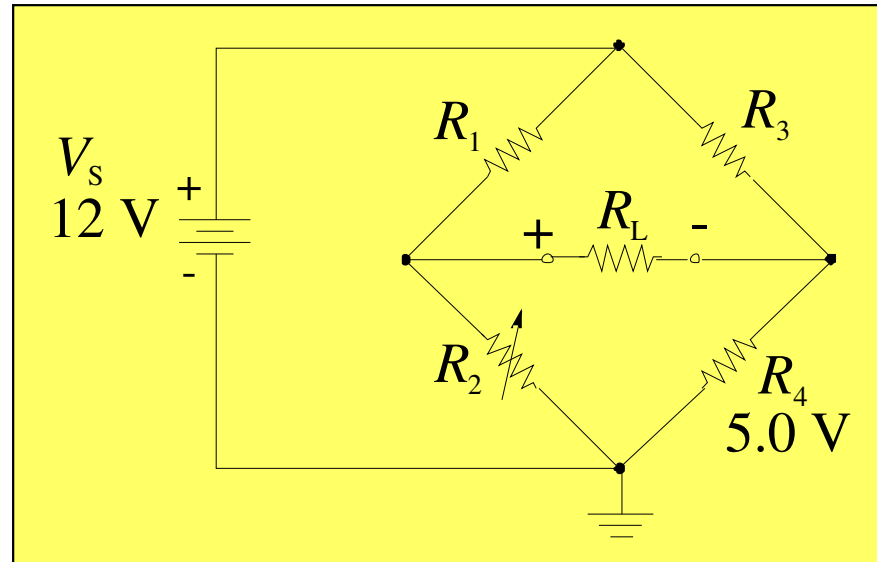
- a. 4.0 V
b. 5.0 V
c. 6.0 V
d. 7.0 V



Exercícios

9. Assume R_2 is adjusted until the Wheatstone bridge is balanced. At this point, the voltage across R_4 is measured and found to be 5.0 V. The voltage across R_1 will be

- a. 4.0 V
- b. 5.0 V
- c. 6.0 V
- d. 7.0 V



10. Maximum power is transferred from a fixed source when

- a. the load resistor is $\frac{1}{2}$ the source resistance
- b. the load resistor is equal to the source resistance
- c. the load resistor is twice the source resistance
- d. none of the above

Circuitos Elétricos e Sistemas Digitais

2018-2019 - 1.º Semestre

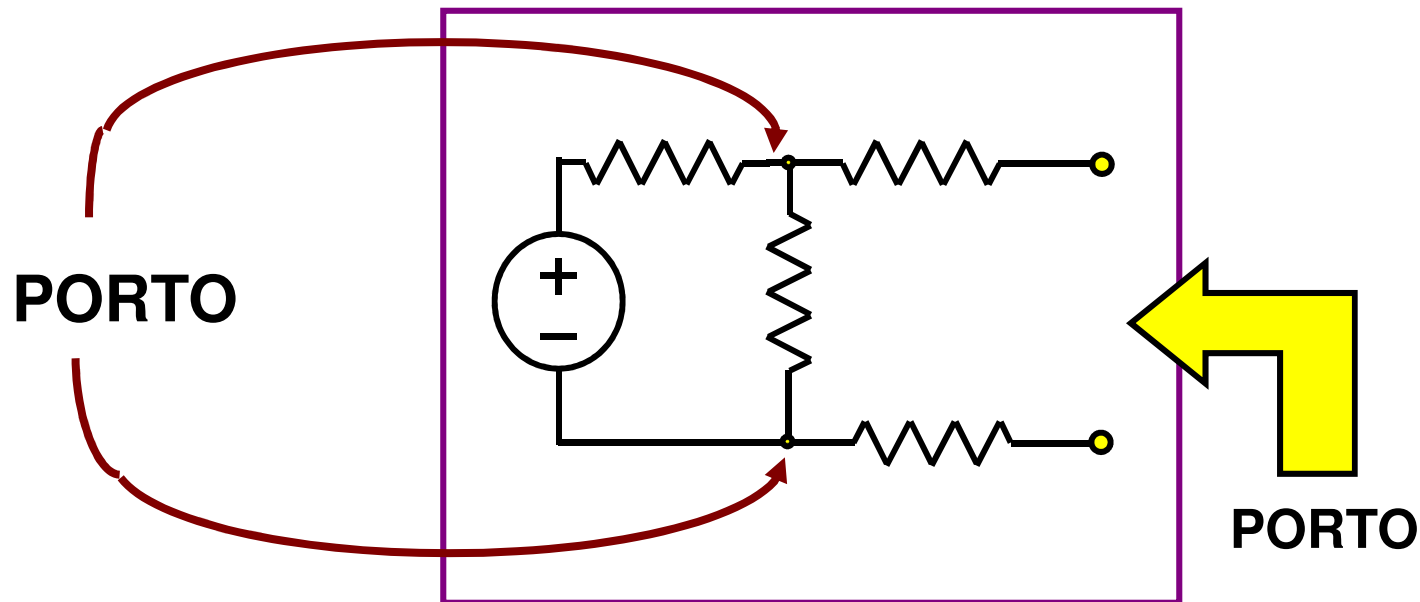
Fontes dependentes e teoremas de Thévenin e de Norton

- Princípio da sobreposição
- Teorema de Thévenin
- Teorema de Norton
- Metodologias para aplicação do princípio da sobreposição
- Metodologia para determinação dos equivalentes de Thévenin e de Norton
- Exemplos de aplicação do princípio da sobreposição em circuitos com fontes independentes e fontes dependentes
- Exemplos de determinação dos equivalentes de Thévenin e de Norton em circuitos com fontes independentes e fontes dependentes

Definição de porto

(Definition of a "Port")

Port: Set of *any* two terminals

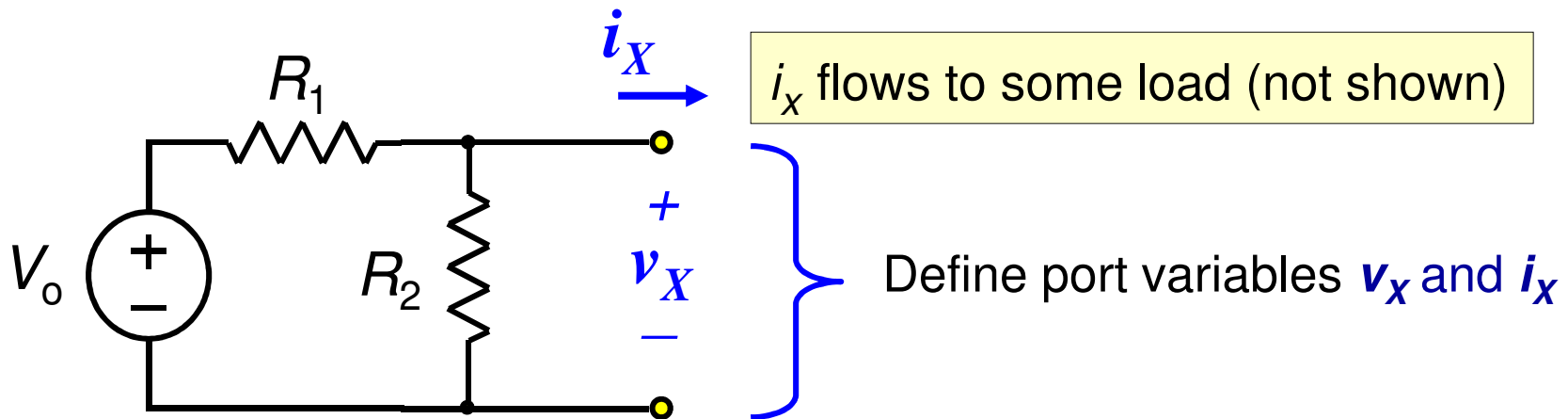


Definição de porto

(Definition of a “Port”)

Illustrate concept with a simple resistive circuit:

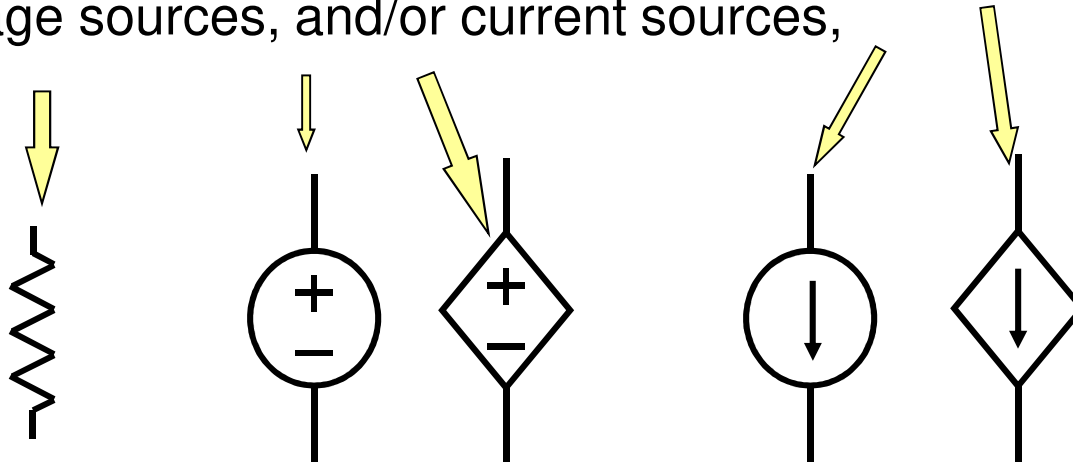
- Any two terminals can be designated as a *port*.
- Our objective: Find the equivalent circuit seen looking into the port



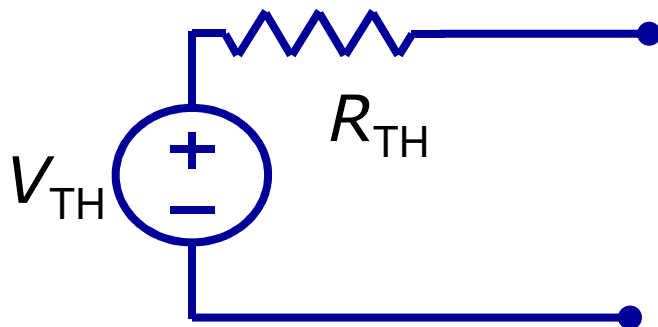
Simple resistive circuit

Circuitos equivalentes de Thévenin e de Norton

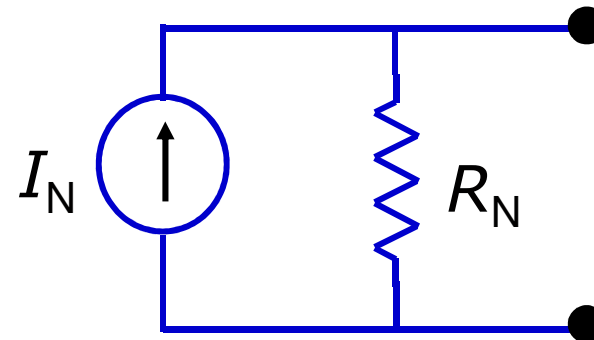
When Thévenin's/Norton's Theorem is applied to circuits containing resistors, voltage sources, and/or current sources,



The circuit's Thévenin Equivalent takes the form:



The circuit's Norton Equivalent takes the form:



Circuitos equivalentes de Thévenin e de Norton



Léon Charles Thévenin ([Meaux](#), [30 de março de 1857](#) – [Paris](#), [21 de setembro de 1926](#)) foi um engenheiro [telegrafista francês](#) que estendeu a [Lei de Ohm](#) à análise de [circuitos elétricos](#) complexos. Nomeado professor e inspetor da École Supérieure em 1882, Thévenin tornou-se cada vez mais interessado em problemas de medidas em [circuitos elétricos](#). Como resultado do estudo das [Leis de Kirchhoff](#) e da [lei de Ohm](#), ele desenvolveu seu famoso teorema, o [Teorema de Thévenin](#), que torna possível calcular correntes em circuitos elétricos complexos. M. Leon Thévenin (1857-1926), published his famous theorem in 1883.

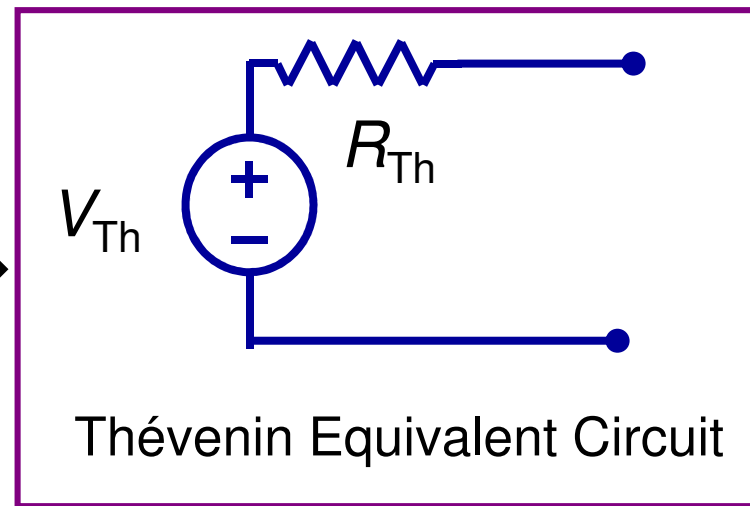
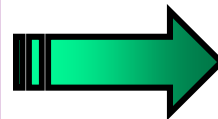
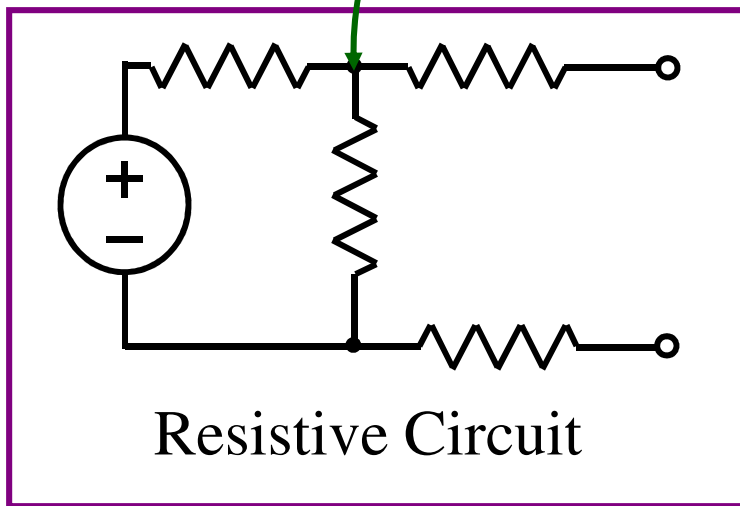


Edward Lawry Norton (28 July 1898, [Rockland, Maine](#) – 28 January 1983, [Chatham, New Jersey](#)) was an accomplished [Bell Labs](#) engineer and scientist famous for [Norton's theorem](#). He attended the [University of Maine](#) for two years before transferring to [M.I.T.](#) and received a [S.B.](#) degree ([electrical engineering](#)) in 1922. He received an [M.A.](#) degree from [Columbia University](#) in 1925. Although interested primarily in a communications circuit theory and the transmission of data at high speeds over telephone lines, [E. L. Norton](#) is best remembered for development of the dual of Thevenin's equivalent circuit, currently referred to as Norton's equivalent Circuit. In fact, Norton and his associates at AT&T in the early 1920s are recognized as some of the first to perform pioneering work applying Thevenin's equivalent circuit and who referred to this concept simply as [Thévenin's theorem](#).

In 1926, he proposed the equivalent circuit using a current source and parallel resistor to assist in the design of recording instrumentation that was primarily current driven. He began his telephone career in 1922 with the western Electric Company's Engineering Department, which later became Bell Laboratories. His areas of active research included network theory, acoustical systems, electromagnetic apparatus, and data transmission. A graduate of MIT and Columbia University, he held nineteen patents on his work.

Circuitos equivalentes de Thévenin e de Norton

Thévenin's Theorem: A **resistive circuit** can be represented by **one voltage source** and **one resistor**:

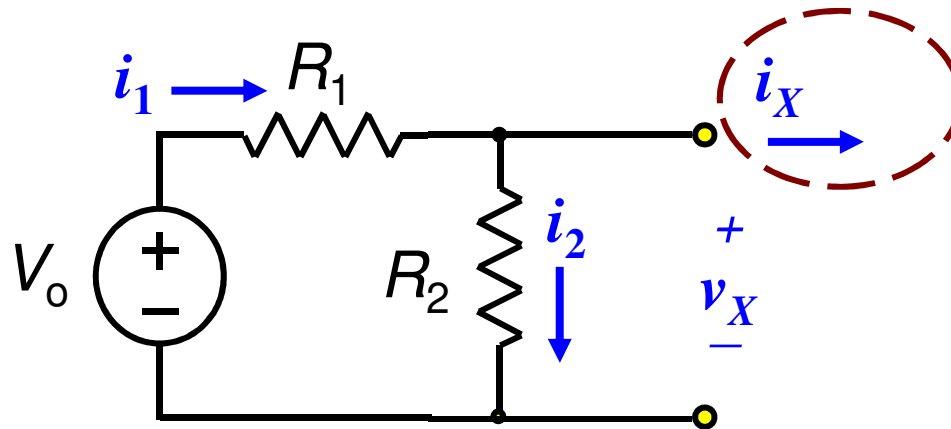


O teorema de Thévenin pode ser generalizado para circuitos de corrente alternada sinusoidal:

Um circuito linear de corrente alternada pode ser representado por uma fonte de tensão sinusoidal em série com uma impedância.

Circuitos equivalentes de Thévenin e de Norton

Find an equation that relates v_X to i_X



KVL: $i_1 R_1 + i_2 R_2 = V_0$ (Each resistor voltage expressed using Ohm's Law)

KCL: $i_1 = i_2 + i_X$

Also note: $v_X = i_2 R_2$

Circuitos equivalentes de Thévenin e de Norton

Solve these equations for v_X versus i_X :

$$i_1 R_1 + i_2 R_2 = V_o$$

$$i_1 = i_X + i_2$$

$$(i_X + i_2) R_1 + i_2 R_2 = V_o$$

$$R_X = i_2 R_2$$

$$(i_X + v_X/R_2) R_1 + v_X = V_o$$

Rearrange the variables...

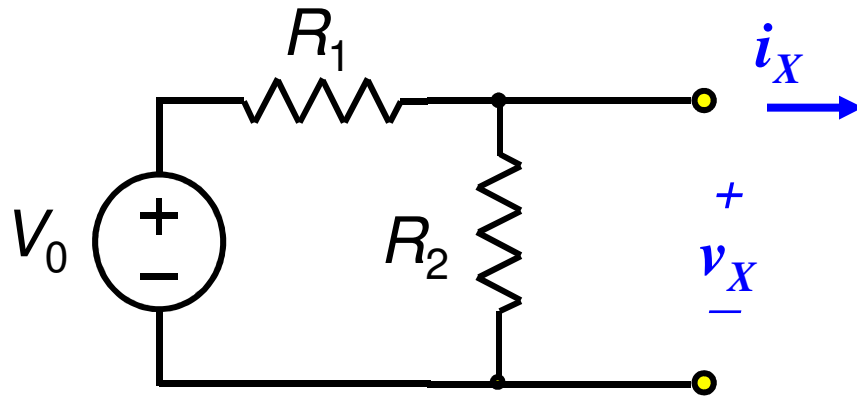
$$i_X R_1 + v_X (R_1/R_2 + 1) = V_o$$

or

$$v_X = \frac{V_o - i_X R_1}{1 + R_1/R_2} \quad \Rightarrow \quad v_X = V_o \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) - i_X \left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right)$$

Circuitos equivalentes de Thévenin e de Norton

Examine this last equation:



$$v_X = V_0 \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) - i_X \left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right)$$

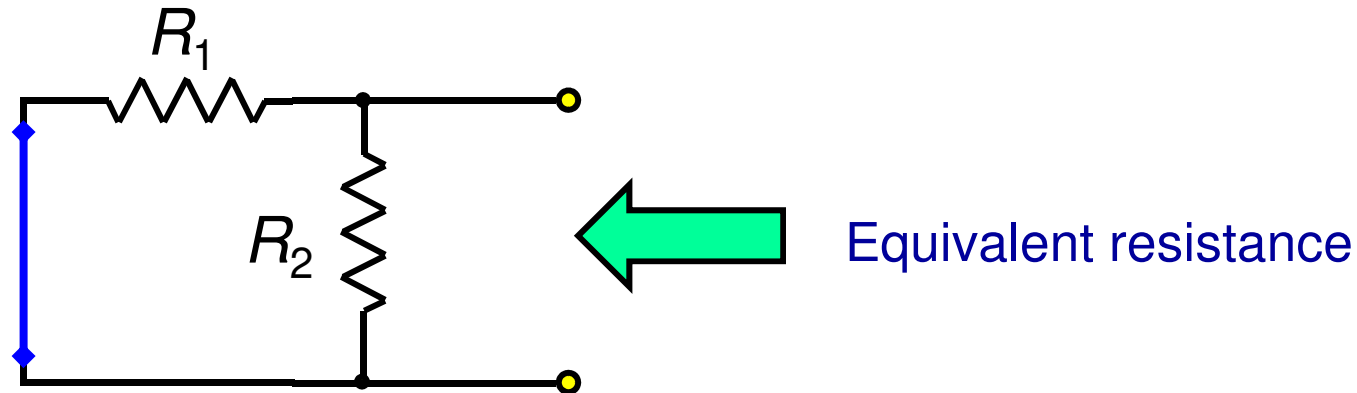
It has the form $v_X = V_{Th} - i_X R_{Th}$

$$V_{Th} = V_0 \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$R_{Th} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

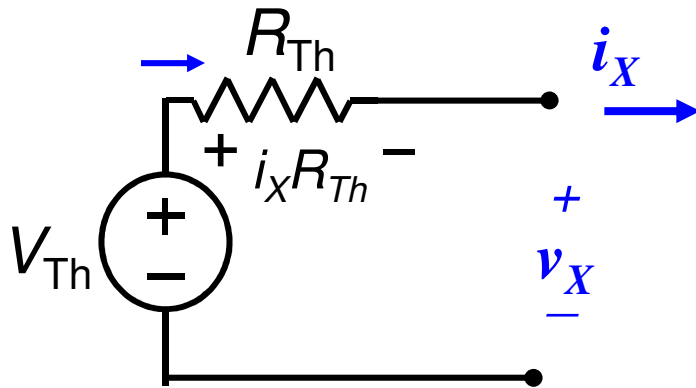
Circuito equivalente de Thévenin

Equivalent resistance



- Set all **independent** sources in the actual circuit to zero.
- For a voltage source, that means substituting a *short circuit*.
- Equivalent resistance $R_{Th} = R_1 || R_2$
- ✓ R_{Th} is the equivalent resistance seen looking into the port with *all independent sources set to zero*.

Circuito equivalente de Thévenin



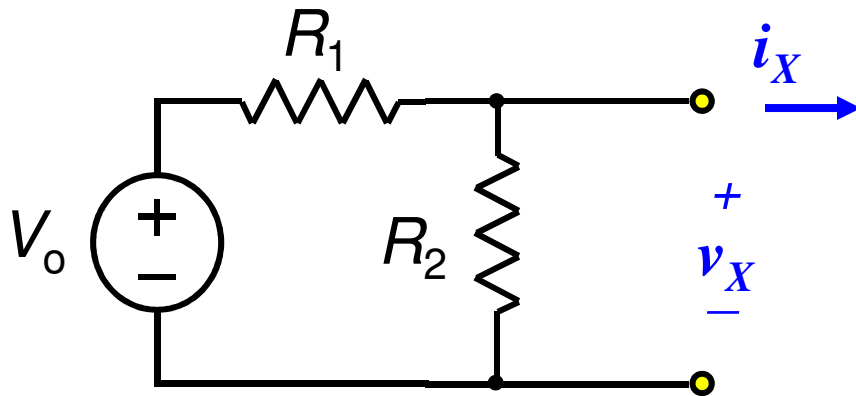
Write down KVL for this circuit:

$$v_X = V_{Th} - i_X R_{Th}$$

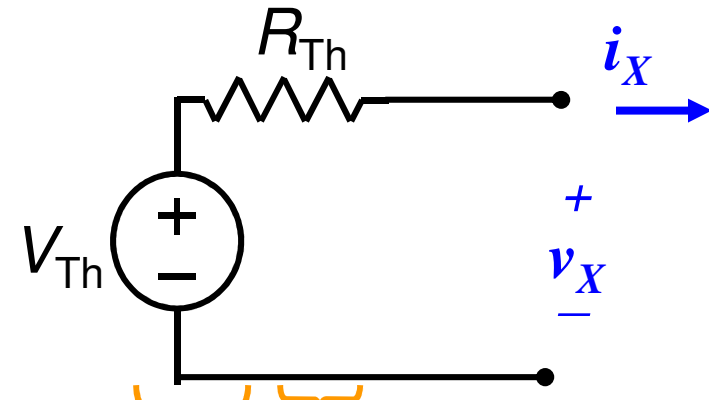
“Output voltage = voltage source – voltage drop across R_{Th} ”

Circuito equivalente de Thévenin

Actual Circuit:



Model:



$$v_X = V_o \frac{R_2}{R_1 + R_2} - i_X \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$v_X = V_{Th} - i_X R_{Th}$$

Choose model parameters V_{Th} and R_{Th} :

$$V_{Th} = V_o \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

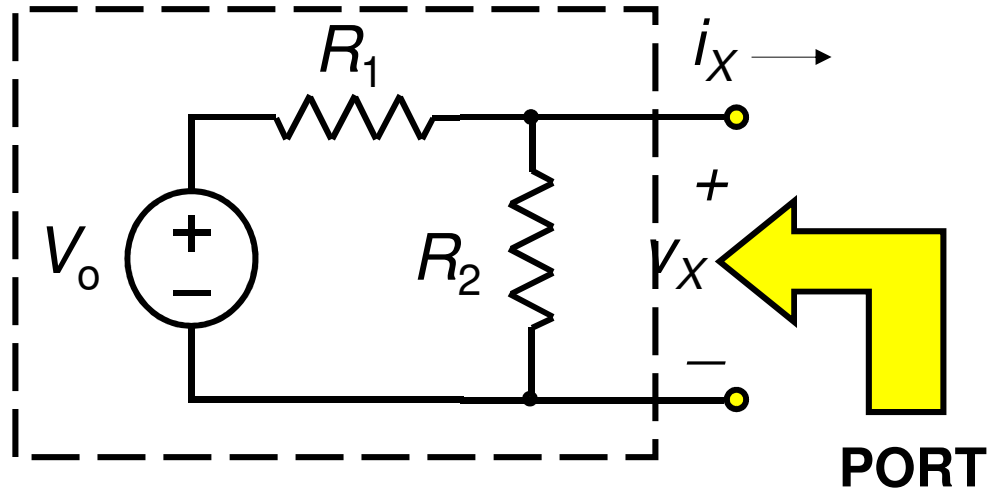
and

$$R_{Th} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = R_1 \parallel R_2$$

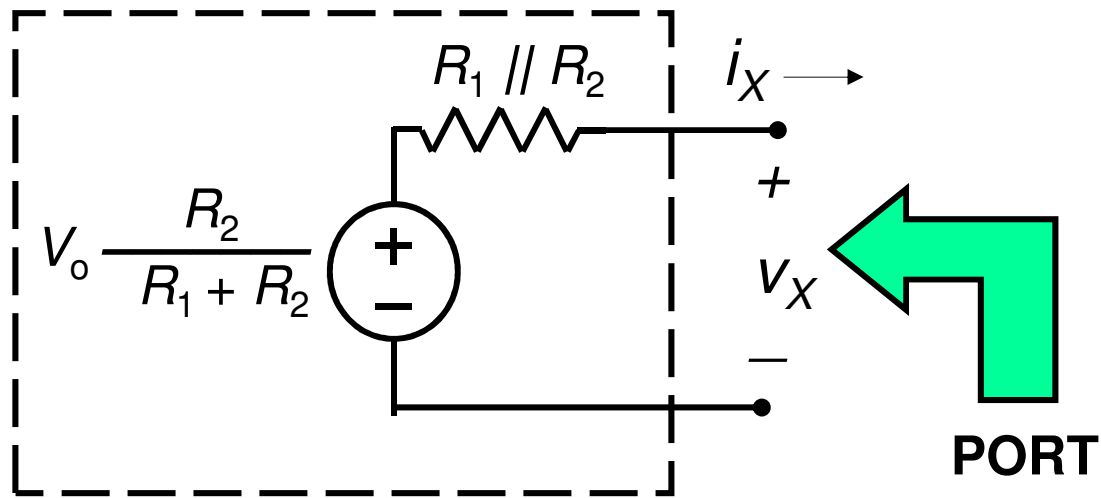
From the point of view of v_x and i_x , the Thévenin circuit models the actual circuit in every way.

Circuito equivalente de Thévenin

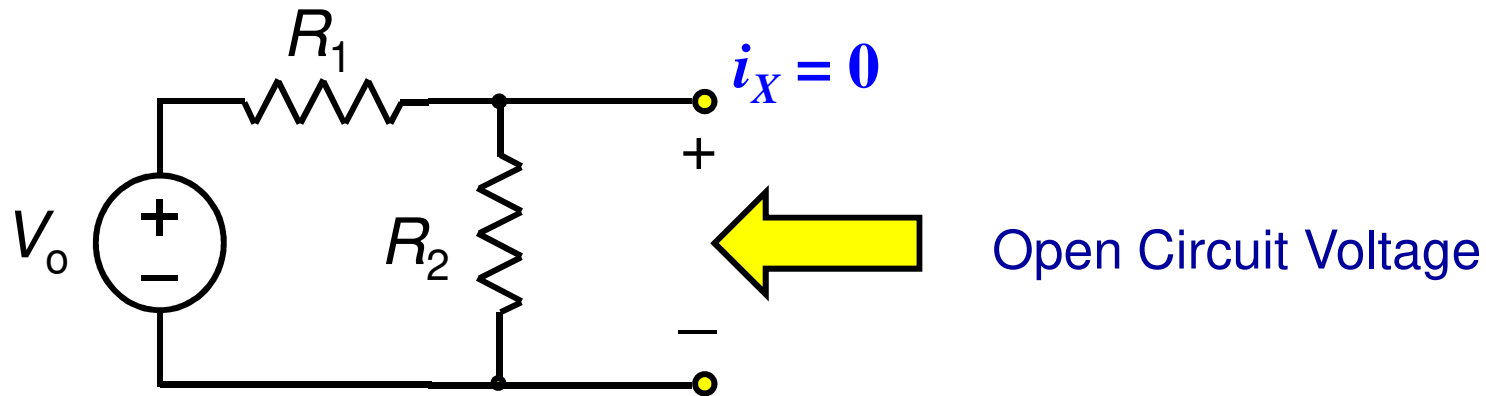
Actual Circuit:



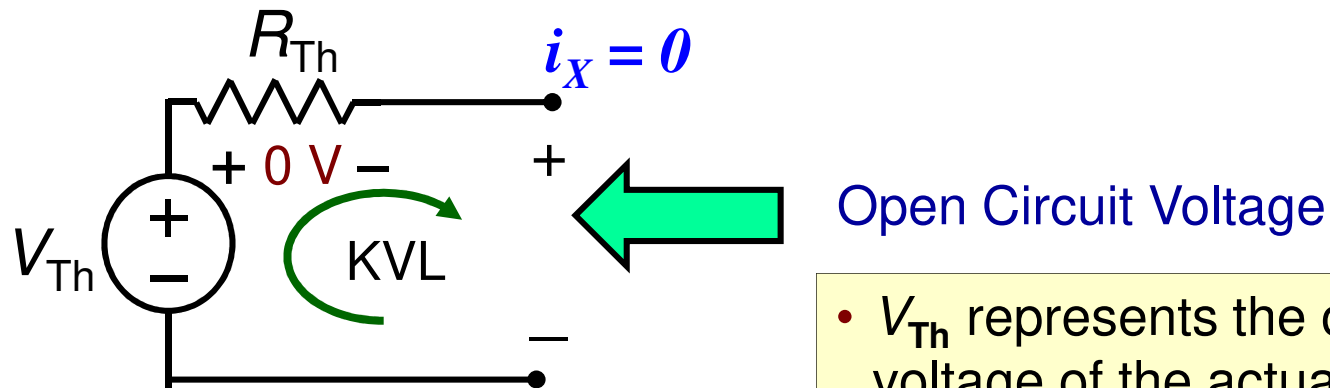
Thévenin Equivalent:



Significado de V_{Th}

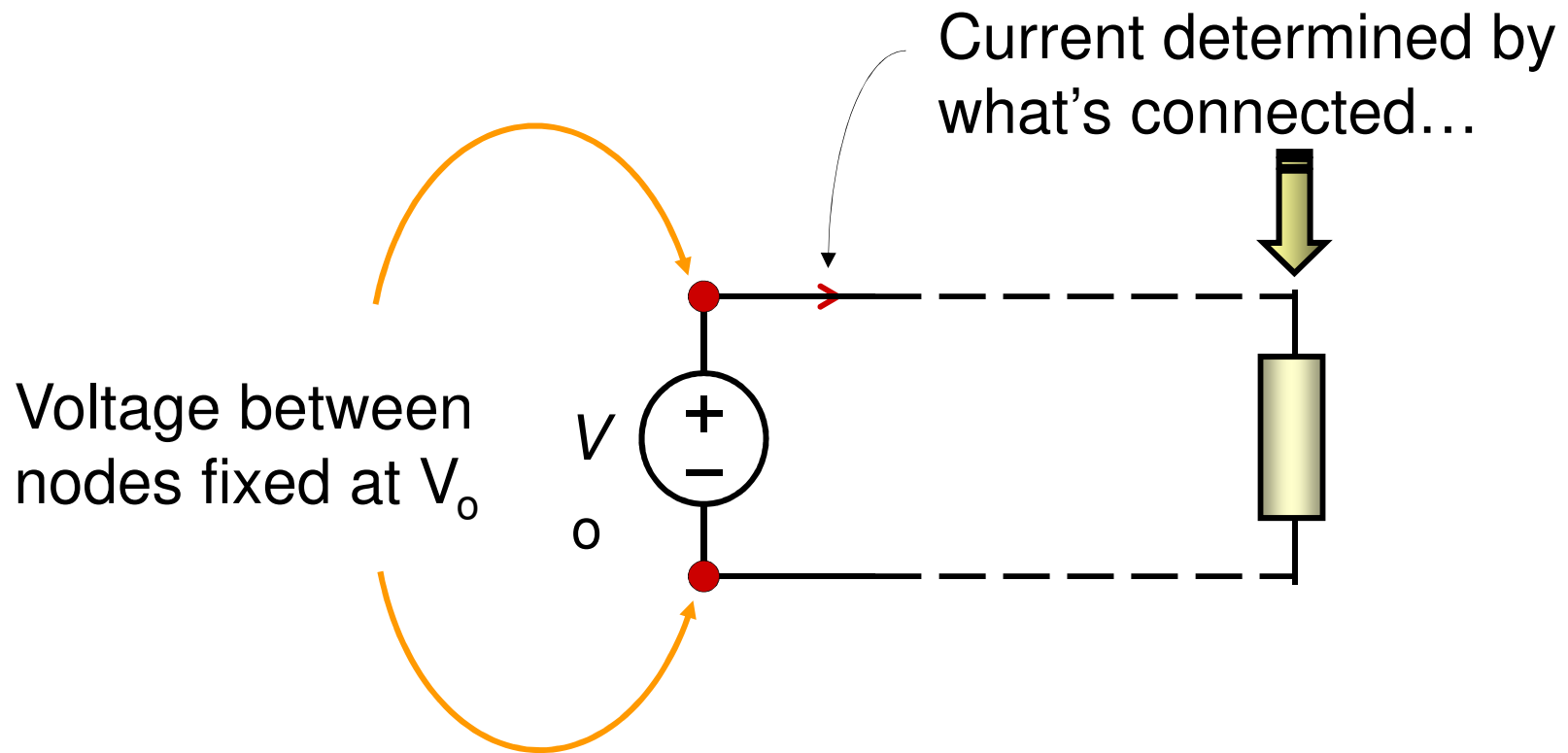


- Connect nothing to the port
- i_x automatically set to zero.
- Port voltage is called the open circuit voltage.

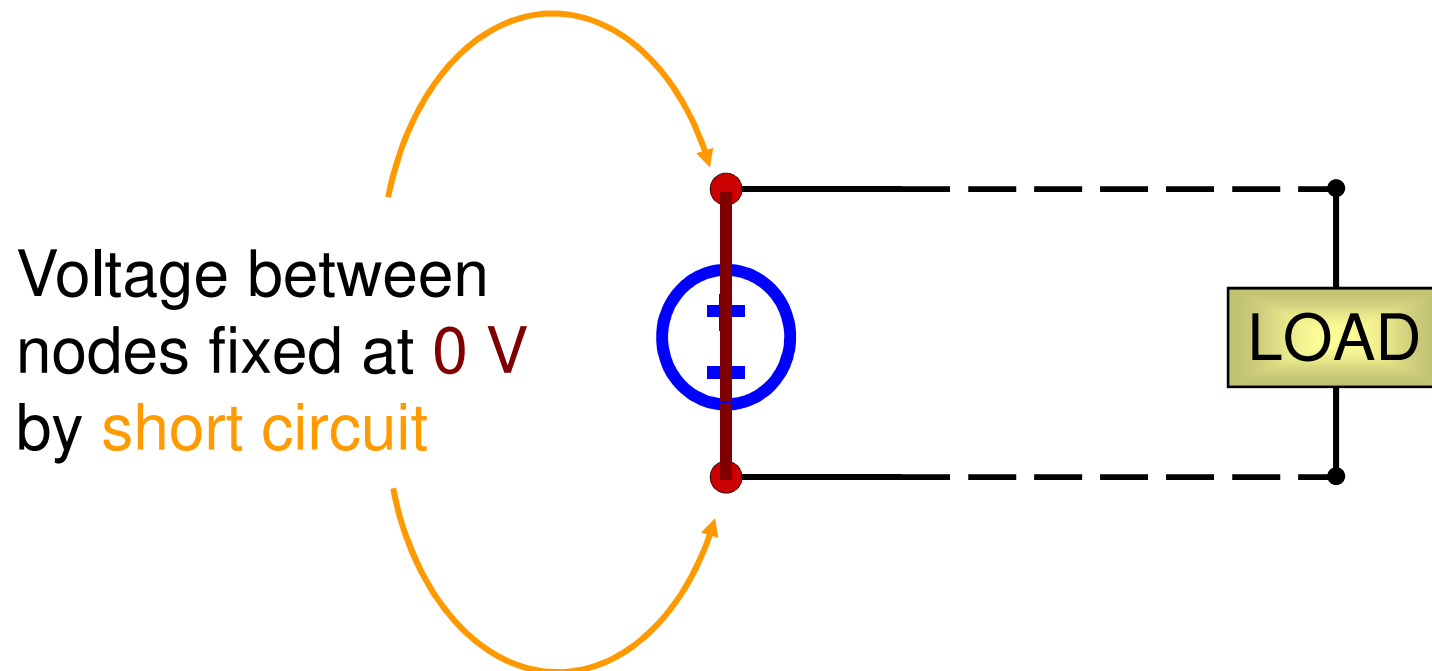


- V_{Th} represents the open circuit voltage of the actual circuit

Substituição de uma fonte de tensão independente pela sua impedância interna (Setting a Voltage Source to “Zero”)

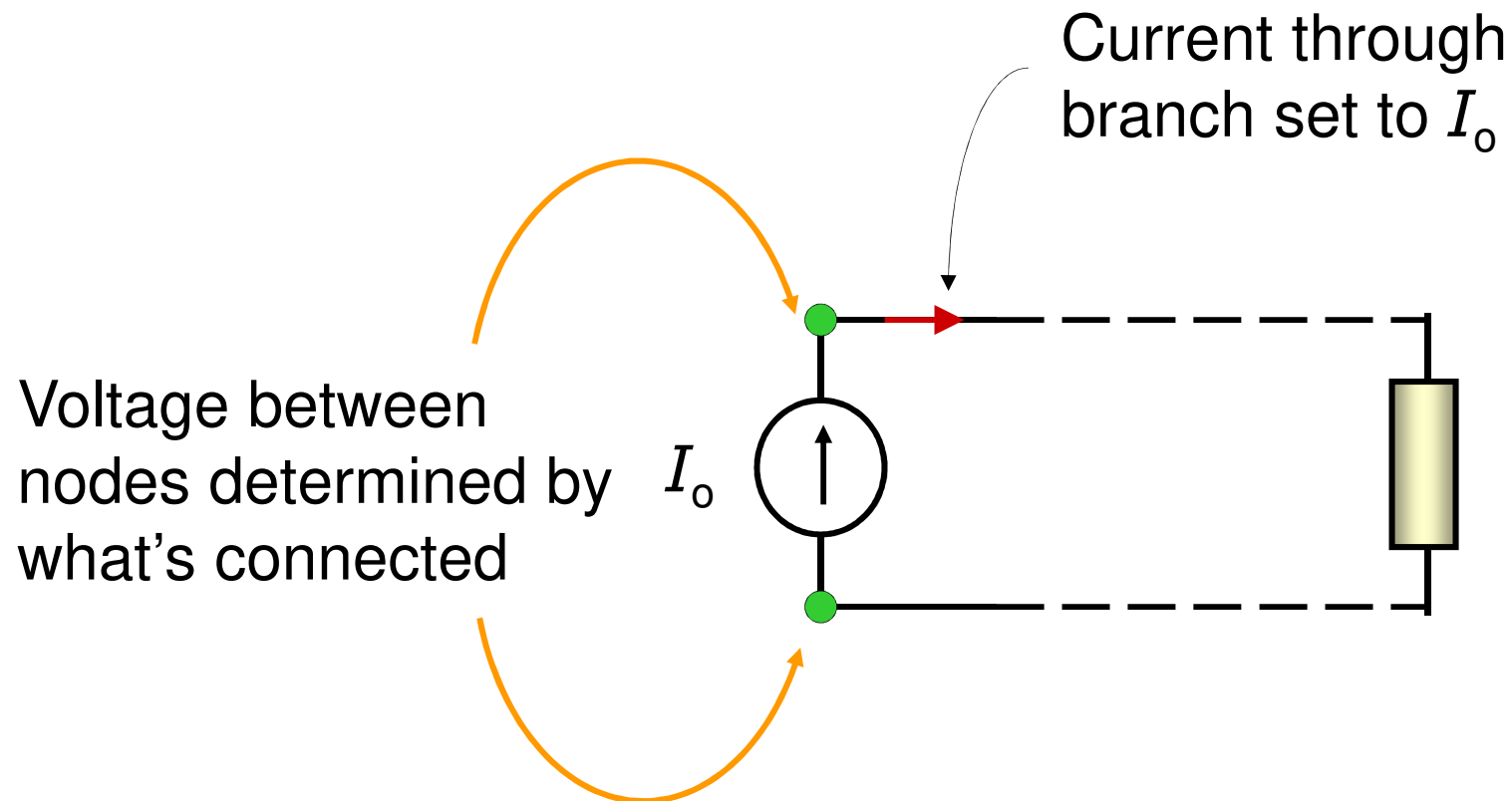


Substituição de uma fonte de tensão independente pela sua impedância interna (Setting a Voltage Source to “Zero”)



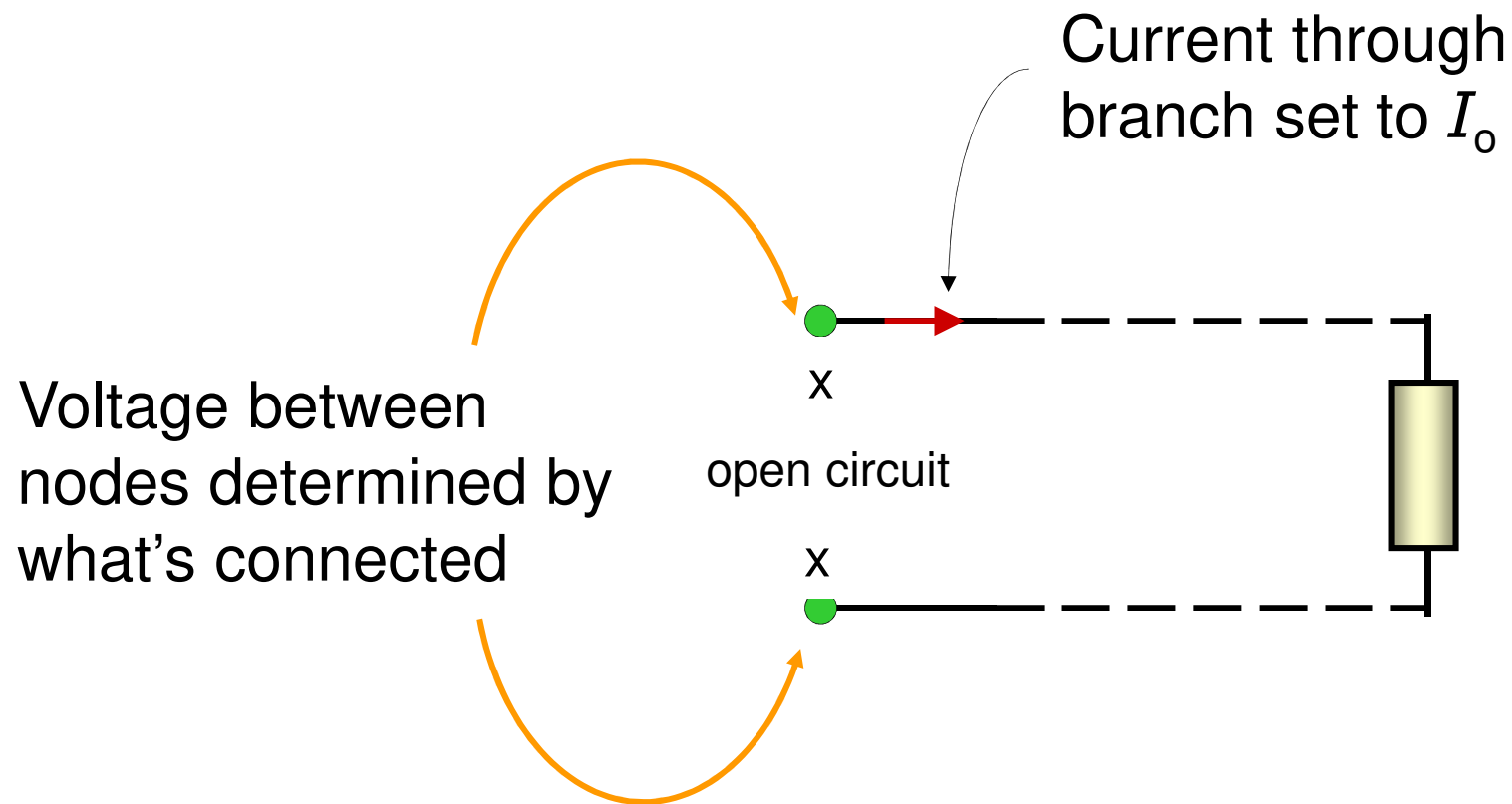
Substituição de uma fonte de corrente independente pela sua impedância interna

(Setting a Current Source to “Zero”)



Substituição de uma fonte de corrente independente pela sua impedância interna

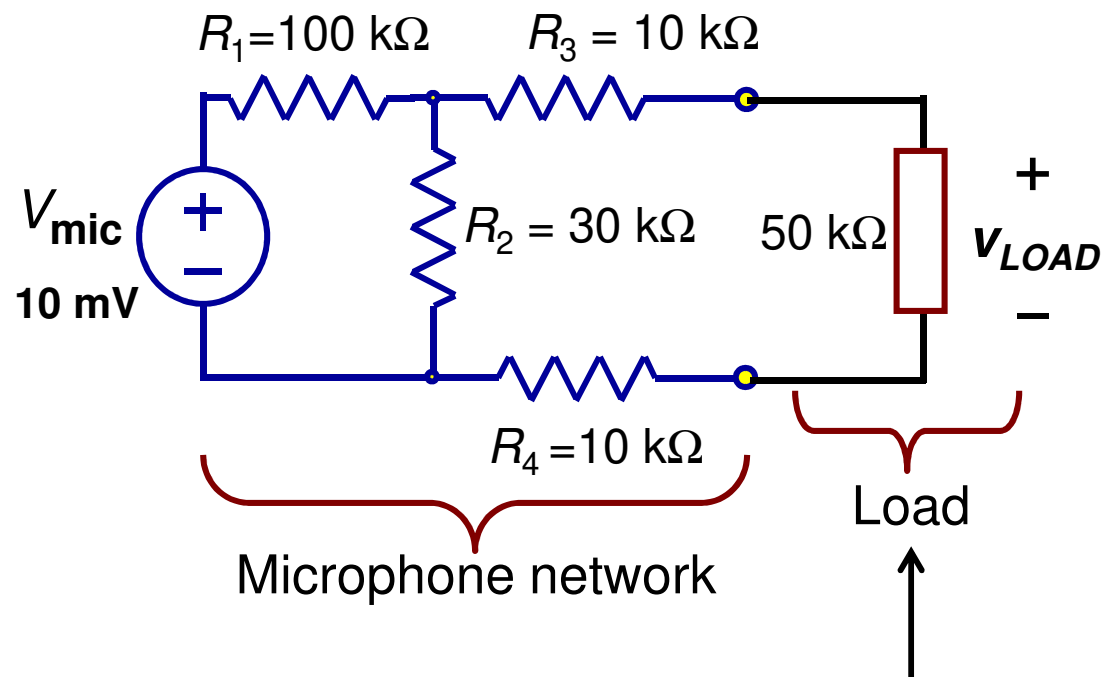
(Setting a Current Source to “Zero”)



Equivalente de Thévenin do circuito representativo de um microfone

Balanced audio microphone system

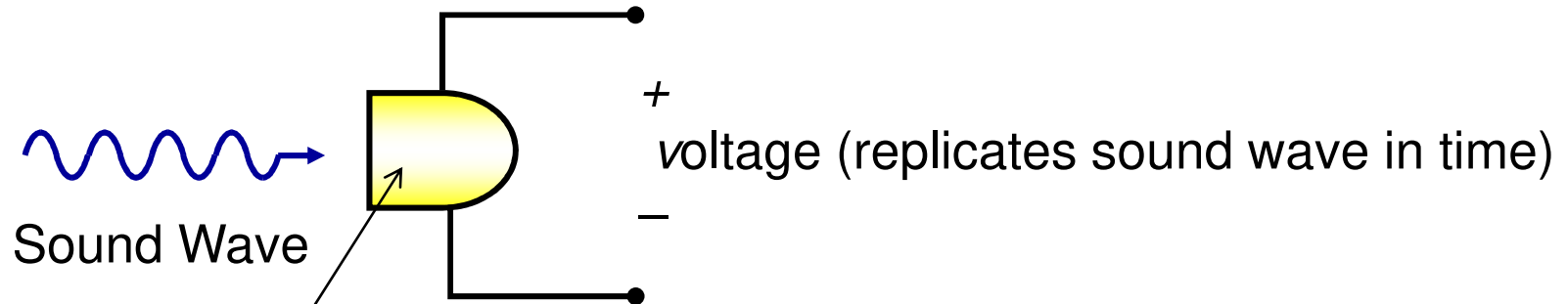
What voltage is developed across a $50\text{ k}\Omega$ resistive load?



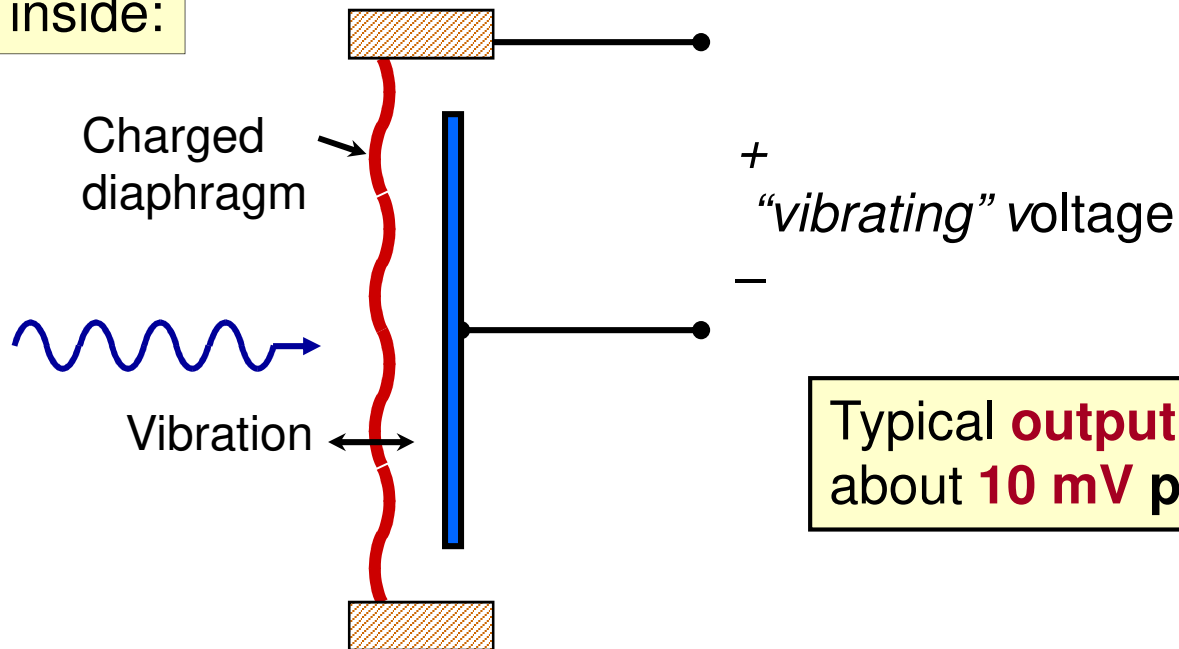
$50\text{ k}\Omega =$ Input resistance of typical audio amplifier

Como funciona um microfone?

Background: How does a microphone or guitar pickup work?



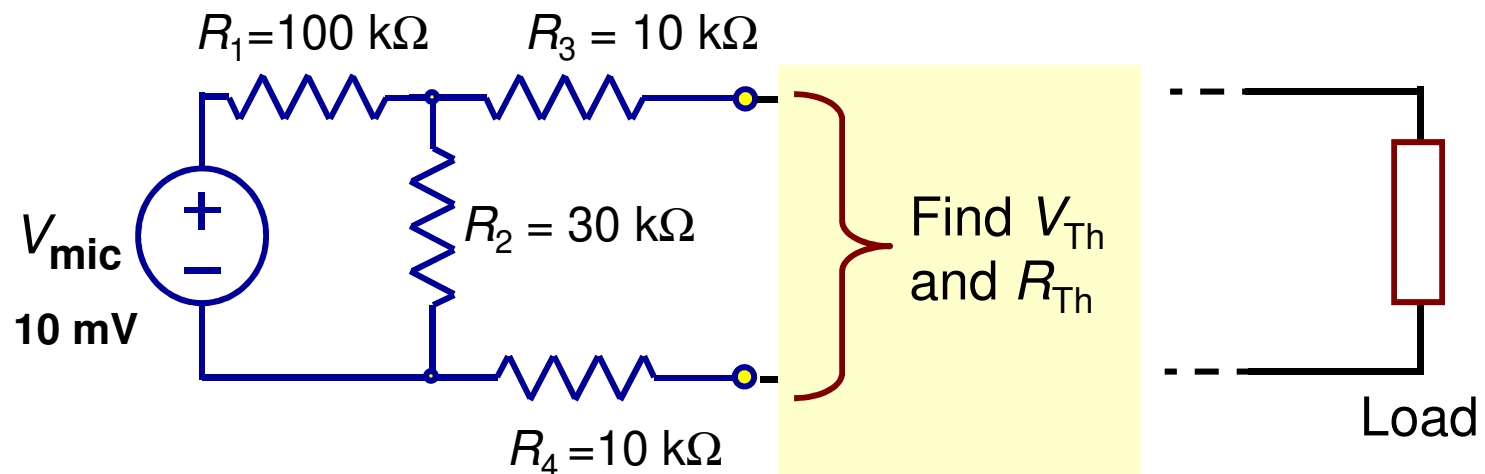
What's inside:



Determinar o equivalente de Thévenin de um microfone

(Find the Thévenin Equivalent of the Microphone Network)

- **Disconnect the load.**
- Find *Thevenin Equivalent* of the remaining circuit.
- Reconnect the load.
- Find v_{LOAD} from simplified circuit.

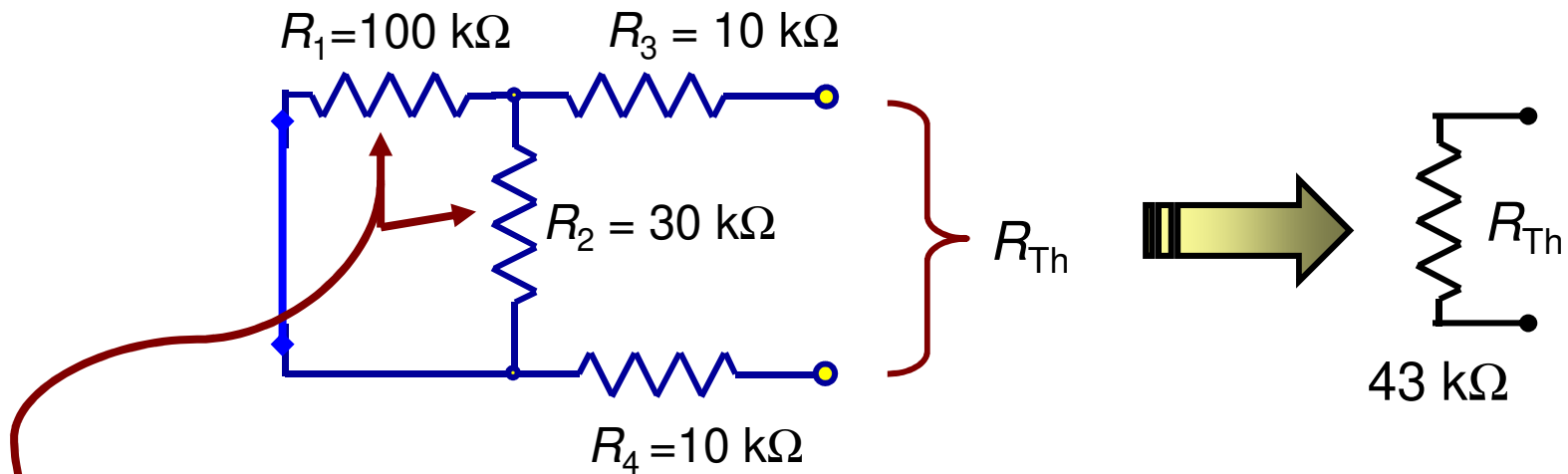


Determinar o equivalente de Thévenin de um microfone

(Find the Thévenin Equivalent of the Microphone Network)

Step 1: Find the Equivalent Resistance

- Set the voltage source to zero. (Substitute a *short circuit*.)
- Find the equivalent resistance R_{Th}
- $R_{Th} = R_3 + R_1 || R_2 + R_4 = 10 \text{ k}\Omega + 23 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega = 43 \text{ k}\Omega$



Note: $R_1 || R_2 = (100 \text{ k}\Omega) || (30 \text{ k}\Omega) = 23 \text{ k}\Omega$

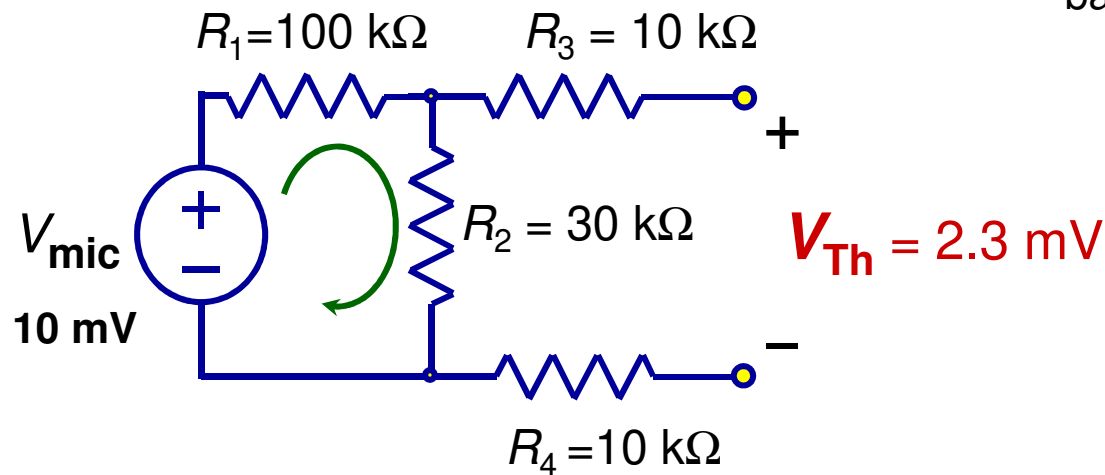
Determinar o equivalente de Thévenin de um microfone

(Find the Thévenin Equivalent of the Microphone Network)

Step 2: Find the Open Circuit Voltage

- Analyze the circuit under no-load conditions.
- Voltage across port terminals will be V_{Th}
- From KVL around the inner loop*: $v_2 = V_{mic} R_2 / (R_1 + R_2) = 2.3 \text{ mV}$

*basically, voltage division

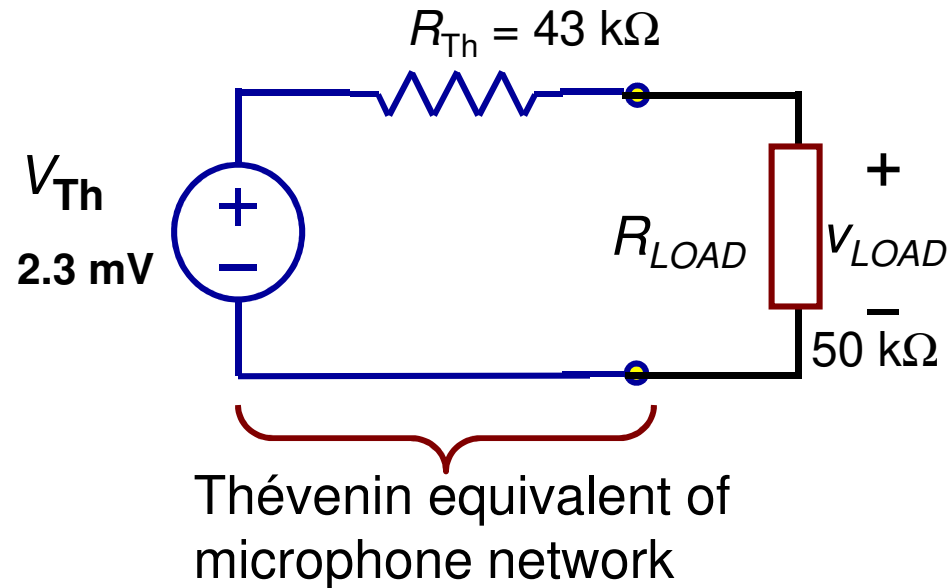


- Note that no current flows through R_3 and R_4 .
 \Rightarrow Voltage across these resistors is **zero**.

Determinar o equivalente de Thévenin de um microfone

(Find the Thévenin Equivalent of the Microphone Network)

Step 3: Reconnect the Load to the Thévenin Equivalent Model

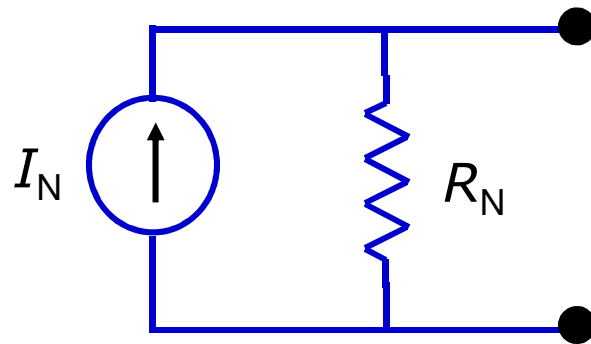


From simple voltage division:

$$\begin{aligned} V_{LOAD} &= V_{Th} (R_{LOAD} / (R_{LOAD} + R_{Th})) \\ &= 2.3 \text{ mV} \times (50 \text{ k}\Omega) / (93 \text{ k}\Omega) = \mathbf{0.54 \text{ mV}} \end{aligned}$$

Answer

Circuito equivalente de Norton



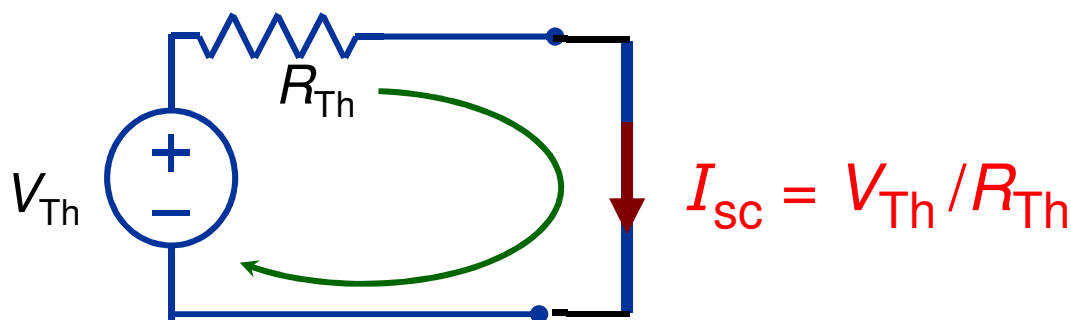
Circuito equivalente de Norton

Corrente de curto-circuito

One important parameter of a circuit is its *short circuit current*

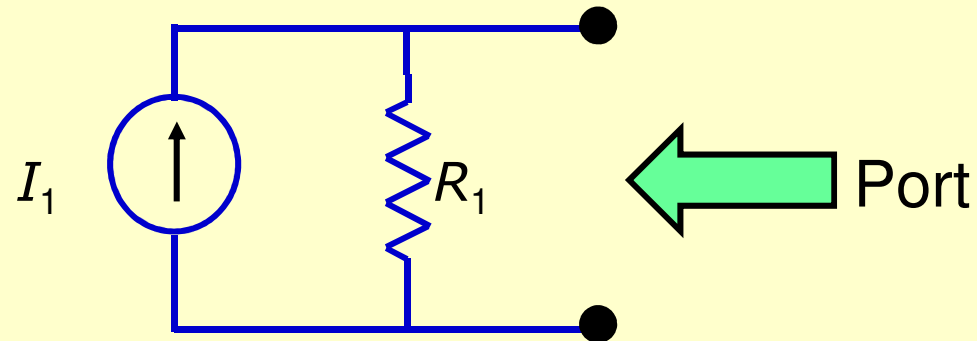
The **short circuit current** of a port is defined as the current that will flow if:

- ✓ The load is disconnected
- ✓ A short circuit is connected instead



Circuitos equivalentes de Norton e de Thevenin de circuitos contendo fontes de corrente

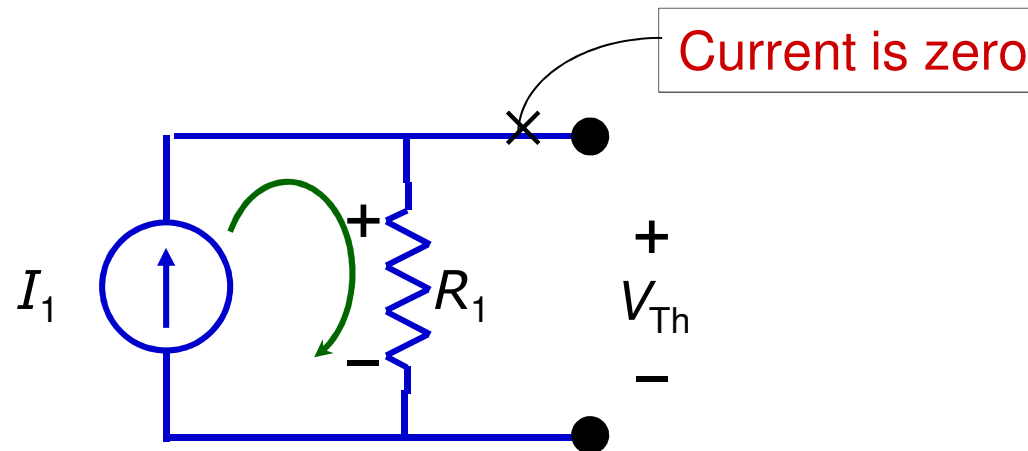
Consider the following simple circuit:



What is the Thévenin equivalent circuit seen looking into the port?

Circuito equivalente de circuitos contendo fontes de corrente independentes

Step 1: Find the **open circuit voltage**:

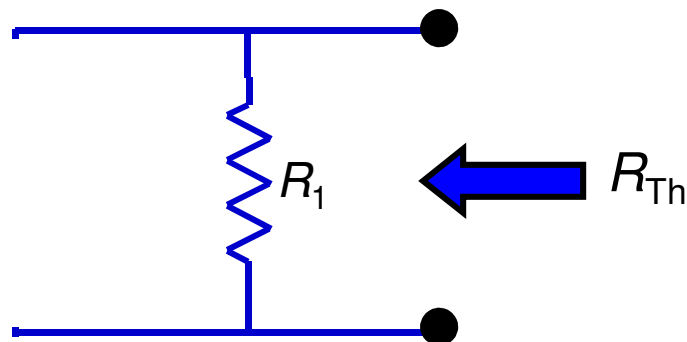


- Open circuit conditions \Rightarrow All of I_1 flows through R_1
- Voltage develops across R_1 with polarity shown.
- From Ohm's Law: $V_{Th} = I_1 R_1$

Circuitos equivalentes de circuitos contendo fontes de corrente

Step 2: Find the **equivalent resistance**

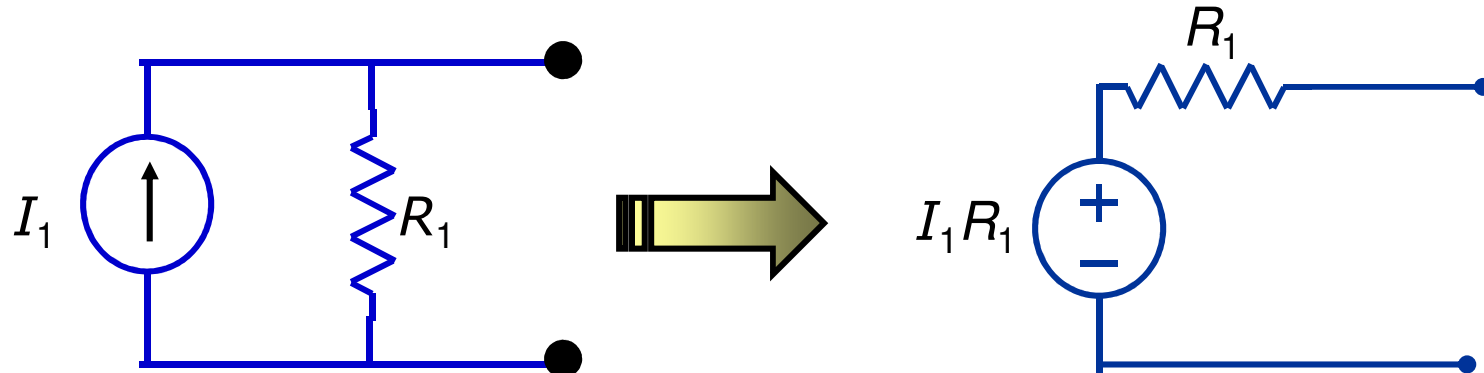
- Set the current source to zero.



- Set the *current source* to zero \rightarrow *open circuit*
- Find the resistance looking into the port.
- By inspection: $R_{Th} = R_1$

Circuitos equivalentes de circuitos contendo fontes de corrente independente

The Thévenin Equivalent Circuit:



Actual Circuit:

$$R_{Th} = R_1$$

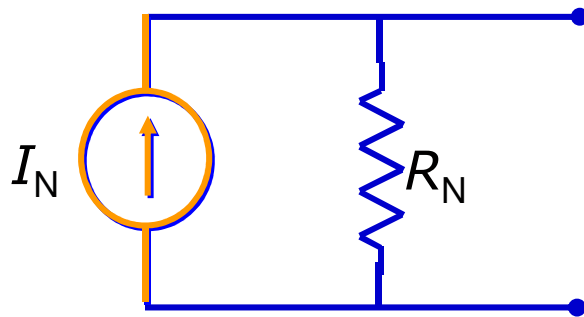
$$V_{Th} = I_1 R_1$$

✓ Done!

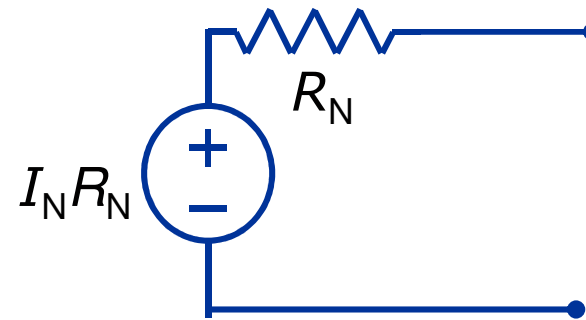
Thévenin Equivalent

Circuitos equivalentes de circuitos contendo fontes de corrente

Norton Equivalent Circuit



Norton Circuit.



Thévenin Circuit.

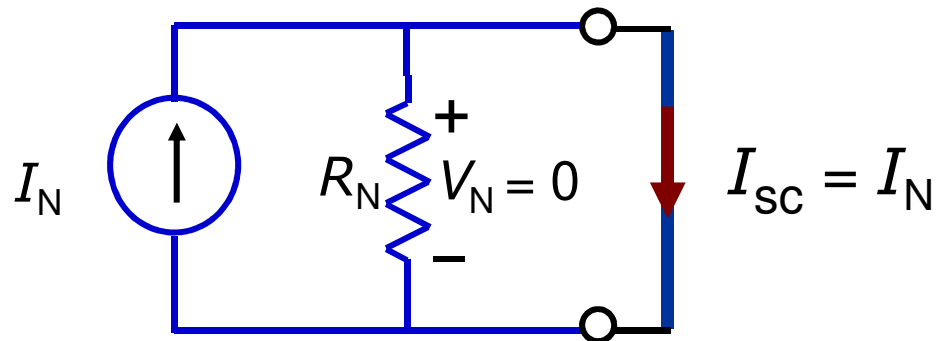
- The Norton and Thévenin equivalents of a circuit are interchangeable.
- The equivalent resistance is the same: $R_N = R_{Th}$
- The open circuit voltage is the same: $V_{Th} = I_N R_N$

Circuitos equivalentes de circuitos contendo fontes de corrente

Norton Equivalent Circuit

What about the short-circuit current from a Norton Circuit?

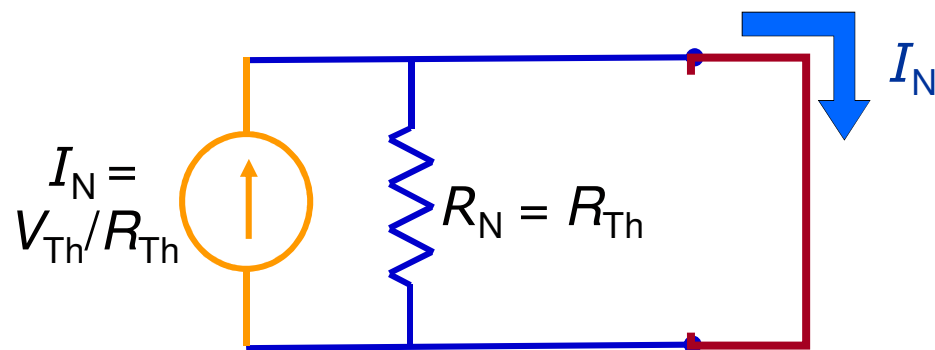
- Apply a short circuit:



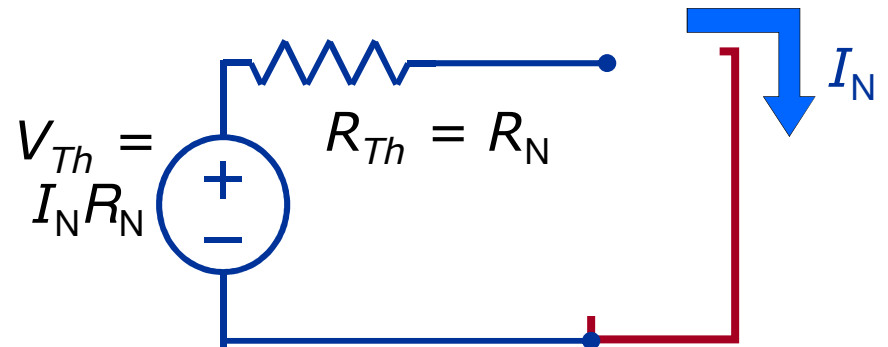
- The voltage across the Norton resistance becomes zero.
- **No current flows through the Norton resistance ($I = V/R$).**
- All the current flows through the short circuit.
- **The short circuit current is the source current I_N .**

Circuitos equivalentes de circuitos contendo fontes de corrente independente

Norton Equivalent Circuit



Norton Circuit



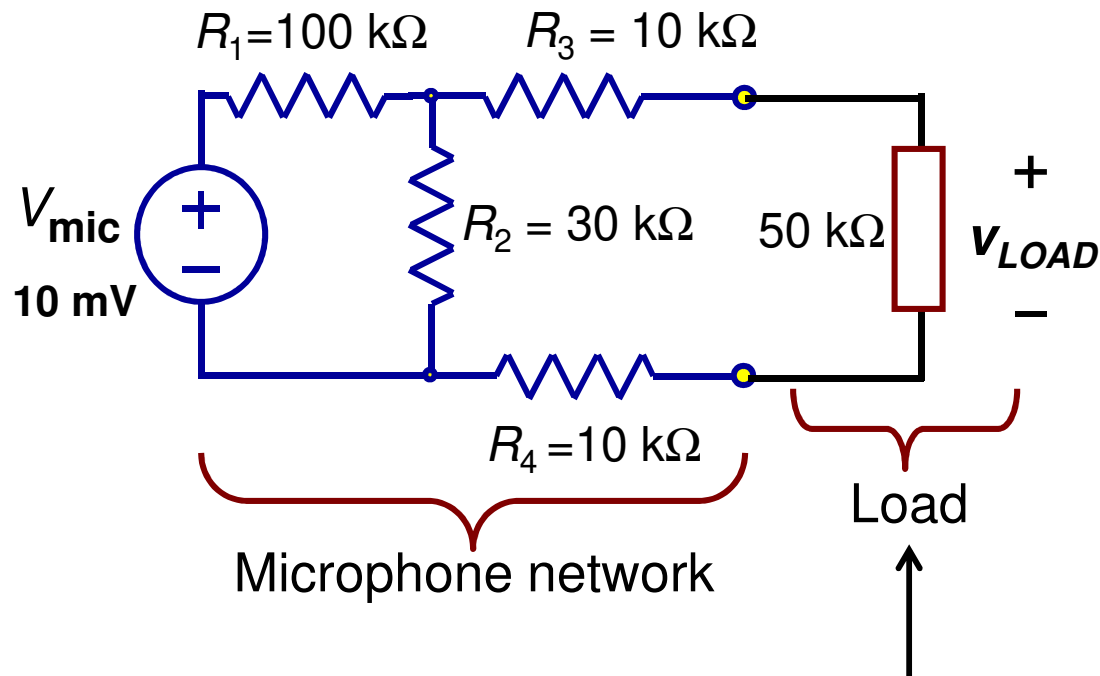
Thévenin Circuit

- The short circuit current is the same in each circuit: $I_N = V_{Th}/R_{Th}$

Equivalente de Norton do circuito representativo de um microfone

Balanced audio microphone system

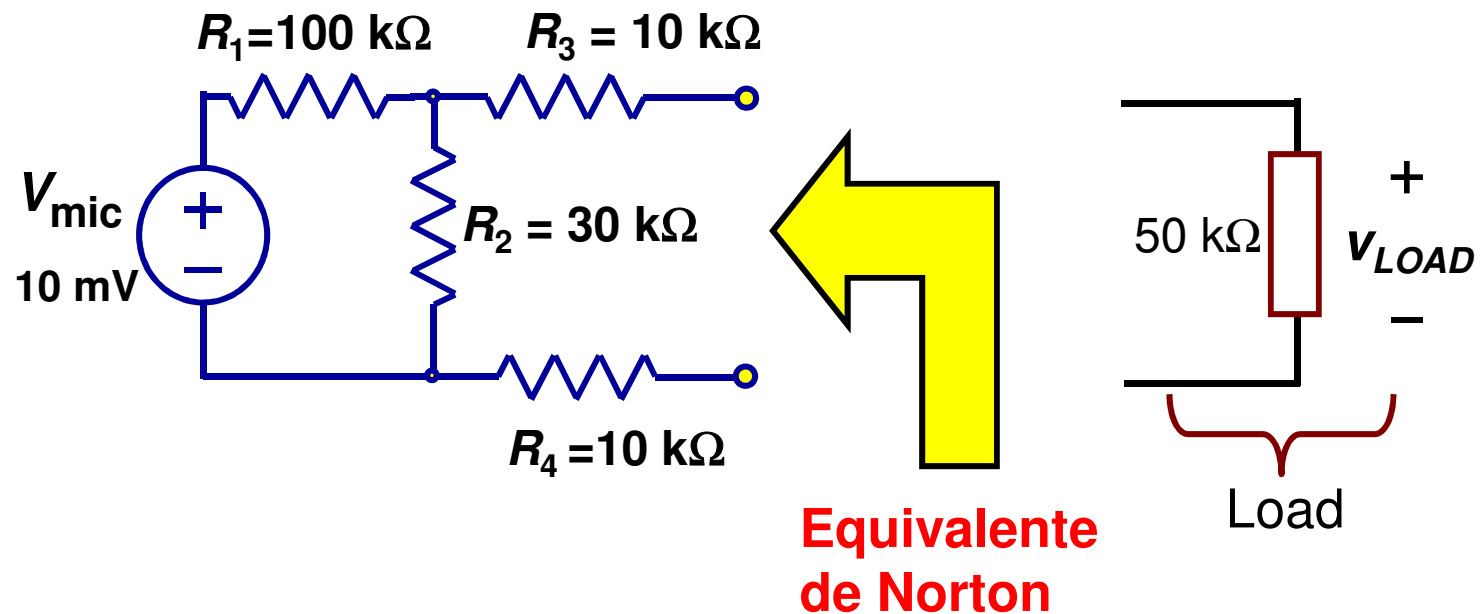
What voltage is developed across a $50\text{ k}\Omega$ resistive load?



$50\text{ k}\Omega =$ Input resistance of typical audio amplifier

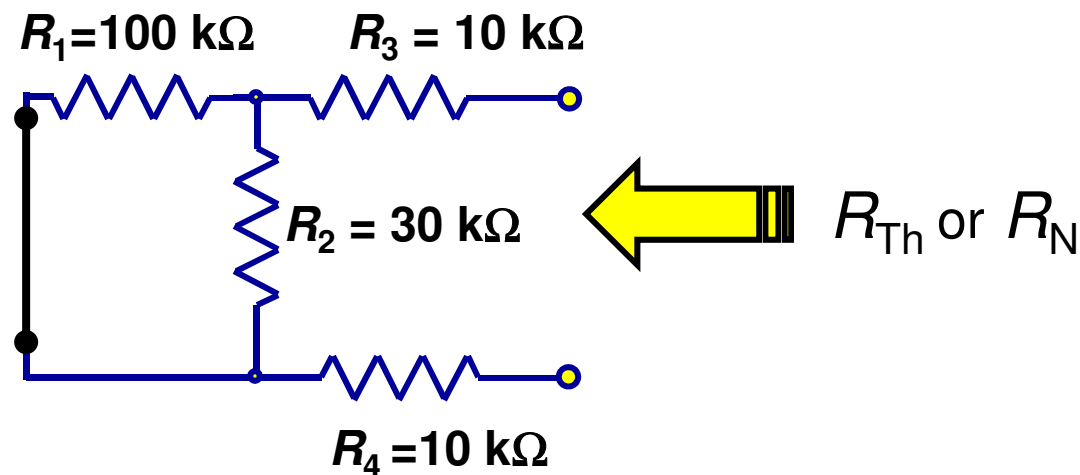
Equivalente de Norton do circuito representativo de um microfone

Find the Norton Equivalent of the following circuit using the **short-circuit current** method:



Equivalente de Norton do circuito representativo de um microfone

Find the Norton Equivalent of the following circuit using the **short-circuit current** method:



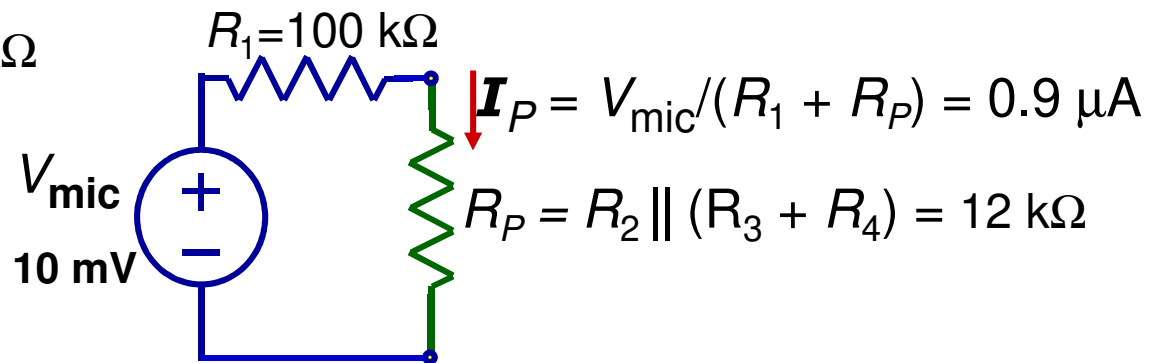
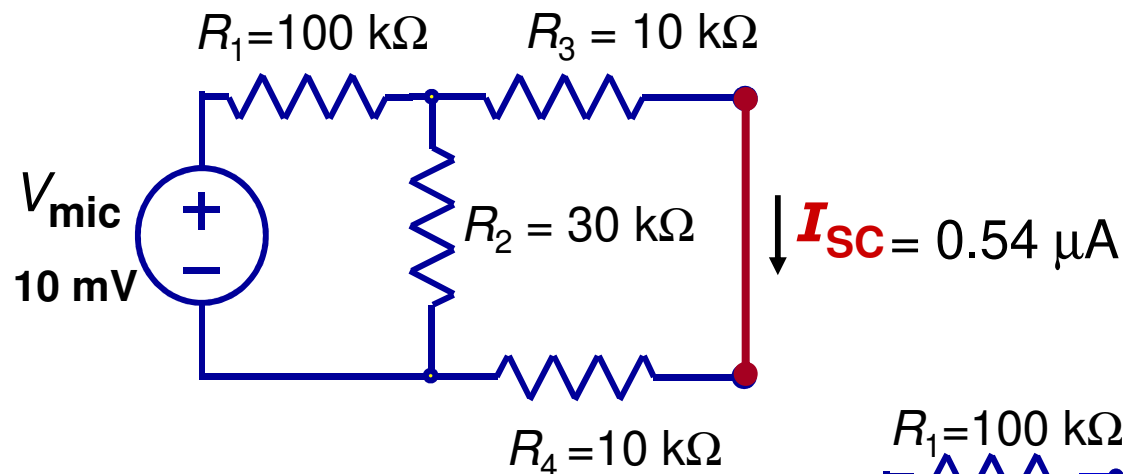
Step 1: Find R_{Th} (same as R_N) by setting the source to zero.

By inspection,

$$R_{Th} = R_3 + R_1 || R_2 + R_4 = 10 \text{ k}\Omega + 23 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega = 43 \text{ k}\Omega$$

Equivalente de Norton do circuito representativo de um microfone

Step 2: Apply a short circuit to the port and compute the **short-circuit current**.



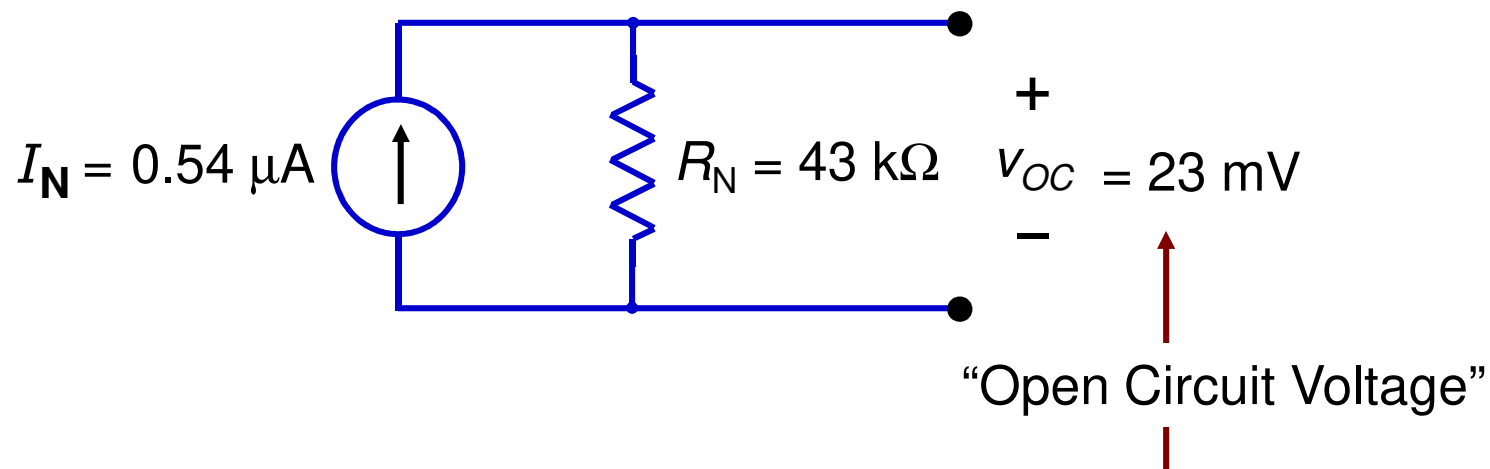
From current division:

$$I_{\text{sc}} = I_P \frac{R_2}{[R_2 + (R_3 + R_4)]} = 0.9 \mu\text{A} \frac{30 \text{ k}\Omega}{50 \text{ k}\Omega} = \mathbf{0.54 \mu\text{A} = I_{\text{sc}}}$$

Find the Norton Equivalent of the Circuit

$$I_{SC} = 0.54 \mu\text{A}$$

$$R_N = 43 \text{ k}\Omega$$

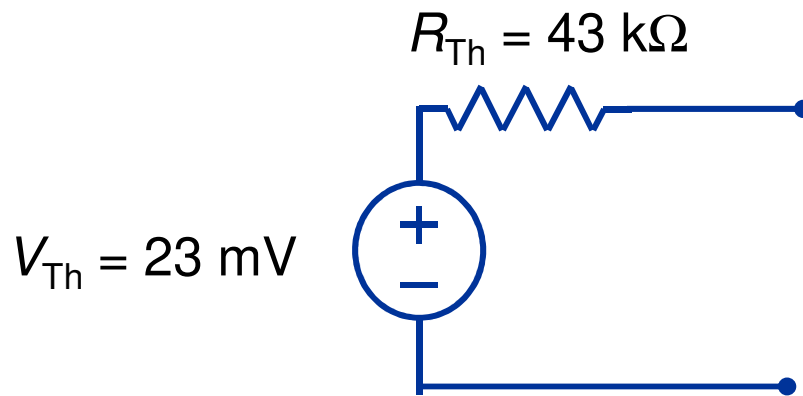


$$v_{OC} = I_N R_N = (0.54 \mu\text{A})(43 \text{ k}\Omega) = 23 \text{ mV}$$

Construct the Thévenin Equivalent of the Circuit

$$I_{\text{SC}} = 0.54 \mu\text{A} \quad R_{\text{Th}} = 43 \text{ k}\Omega$$

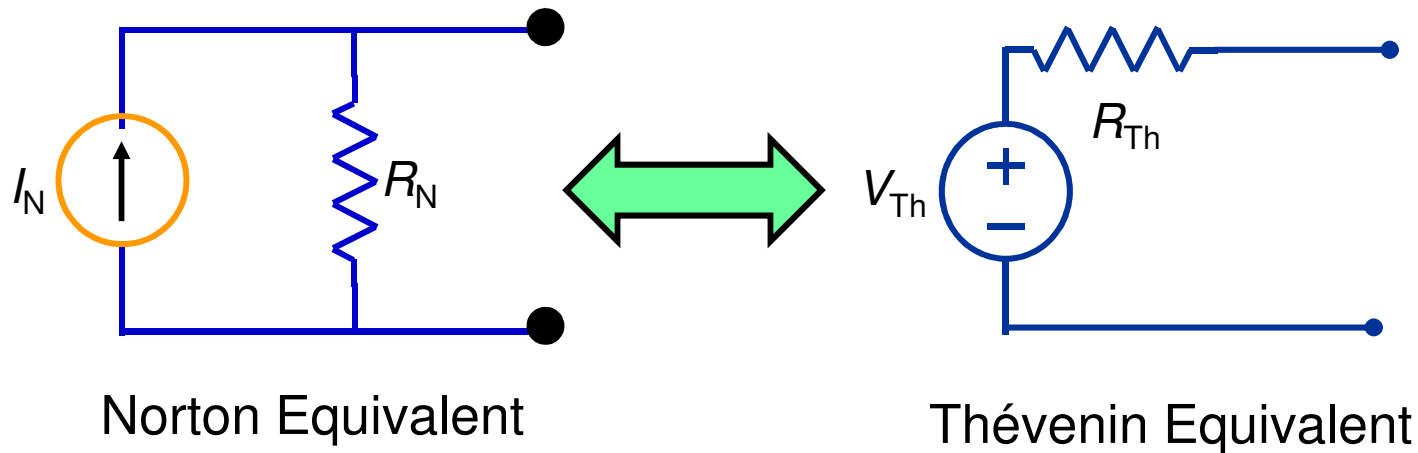
$$V_{\text{Th}} = I_{\text{SC}} R_{\text{Th}} = (0.54 \mu\text{A})(43 \text{ k}\Omega) = 23 \text{ mV}$$



This result is the same one obtained in the previous example.

Equivalence of Thévenin and Norton equivalents of the Circuit

A circuit that can be represented by a Thévenin Equivalent can also be represented by its corresponding Norton circuit



$$V_{Th} = I_N R_N$$

$$R_{Th} = R_N$$

Exemplos de aplicação do princípio da sobreposição

Princípio da sobreposição

Lets now find I_3 using **superposition principle**

Premise:

- I_3 has components contributed by *each* source in the network.
- We can solve for each of the components of I_3 *separately*.
- The total I_3 will be equal to the *sum* of the individual components.

Note:

- Superposition only works on *linear* networks.
- Resistive circuits fall into the class of linear networks.

(Remember that a resistive circuit may contain dependent sources)

Aplicação do princípio da sobreposição

Condições de aplicação

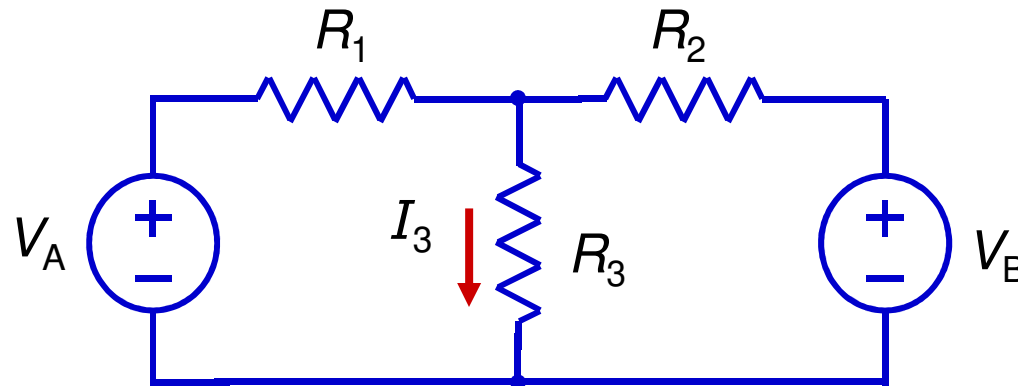
- A linear circuit obeys superposition.
- A linear circuit contains resistors or linear dependent sources.

In a Linear Circuit:

- V and I sources can be evaluated separately.
- Voltage or current = superposition of contributions from each independent source.

Princípio da sobreposição

Consider the following circuit: It has two independent sources



What do we know?

- The circuit is driven by V_A and V_B .
- Both sources contribute to I_3 .
- The circuit contains only sources and resistors.

Q: How can we find the current I_3 ?

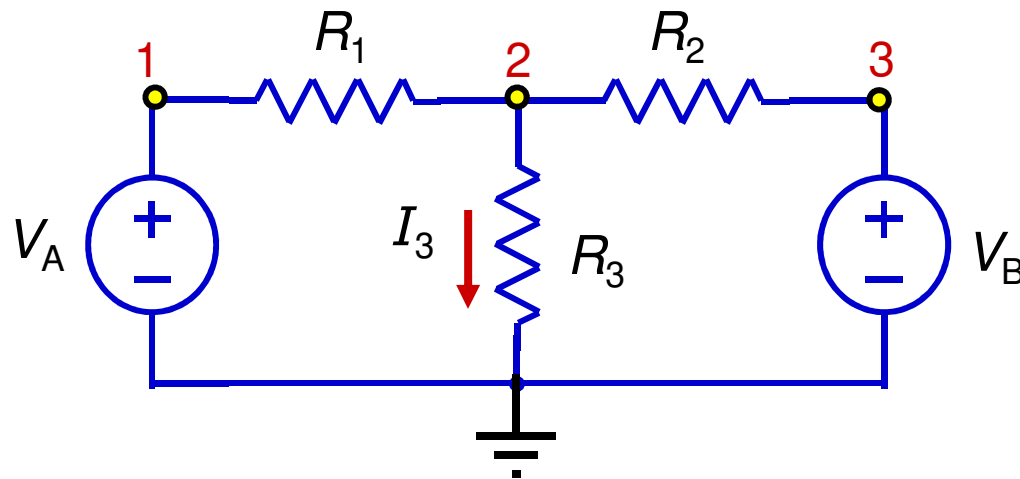
A: One way: Solve for I_3 using KVL and KCL

KVL and KCL: Kirchhoff Voltage and Current laws

Princípio da sobreposição

Let's solve it first using KVL and KCL:

Find I_3 using KVL and KCL

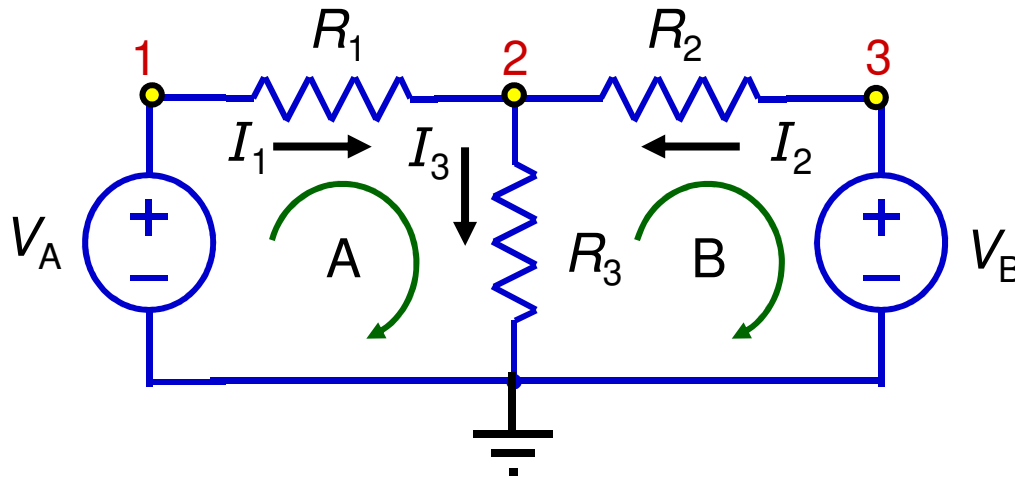


We can solve this circuit using the node and mesh method:

- Choose one node to be “ground”
- Assign numbers to the remaining nodes
- Write down all KVL and KCL equations plus the voltage-current relation for each element in the network.

Princípio da sobreposição

Solving first using KVL and KCL



Example:

- Write down KCL for node **2**:

$$I_1 + I_2 = I_3$$

- Write down KVL for loop **A**:

$$V_A = I_1 R_1 + I_3 R_3$$

- Write down KVL for loop **B**:

$$V_B = I_2 R_2 + I_3 R_3$$

The six equations summarized: $V_A = I_1 R_1 + I_3 R_3$

From Ohm's Law:

$$I_1 = (V_A - V_2)/R_1$$

$$I_2 = (V_B - V_2)/R_2$$

$$I_3 = V_2/R_3$$

$$V_B = I_2 R_2 + I_3 R_3$$

$$I_1 = (V_A - v_2)/R_1$$

$$I_2 = (V_B - v_2)/R_2$$

$$I_3 = v_2/R_3$$

$$I_3 = I_1 + I_2$$

Exercise:

Solve the above equations for I_3 .

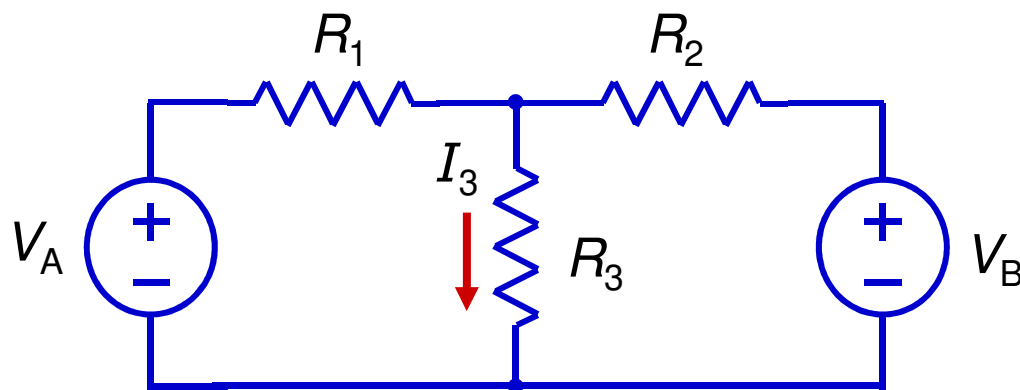
Princípio da sobreposição

Solving first using KVL and KCL

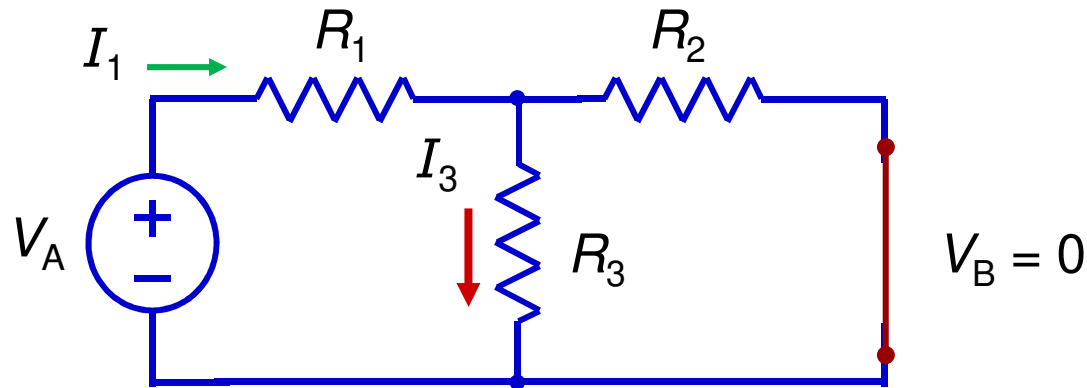
The Solution:

$$I_3 = \frac{V_A R_1 + V_B R_2}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}$$

- Notice that I_3 has components of both V_A and V_B



Princípio da sobreposição



Step 1: Set V_B to zero (short circuit) and solve for first component of I_3 .

- From Ohm's Law:

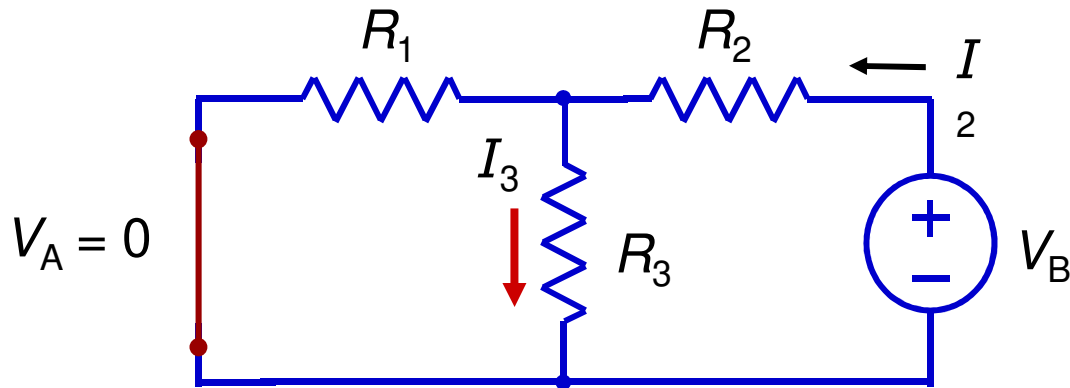
$$I_1 = \frac{V_A}{R_1 + R_2 \parallel R_3} = \frac{V_A}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}} = \frac{V_A (R_2 + R_3)}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}$$

- By Current Division:

Component due to V_A

$$I_3 = I_1 \frac{R_2}{R_2 + R_3} = \frac{V_A R_2}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}$$

Princípio da sobreposição



Step 2: Set V_A to zero (short circuit) and solve for V_B component of I_3 :
(Can evoke symmetry to use equations from last slide)

• Ohm's Law:
$$I_2 = \frac{V_B}{R_2 + R_1 \parallel R_3} = \frac{V_B (R_1 + R_3)}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3}$$

• Current Division:
$$I_3 = I_2 \frac{R_1}{R_1 + R_3} = \frac{V_B R_1}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3}$$

Component due to V_B

Princípio da sobreposição

- Superposition: I_3 has components from both V_A and V_B

From V_A :
$$I_3 = \frac{V_A R_2}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}$$

From V_B :
$$I_3 = \frac{V_B R_1}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}$$

Total Current:
$$I_3 = \frac{V_A R_2 + V_B R_1}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}$$

**Same
Answer!**

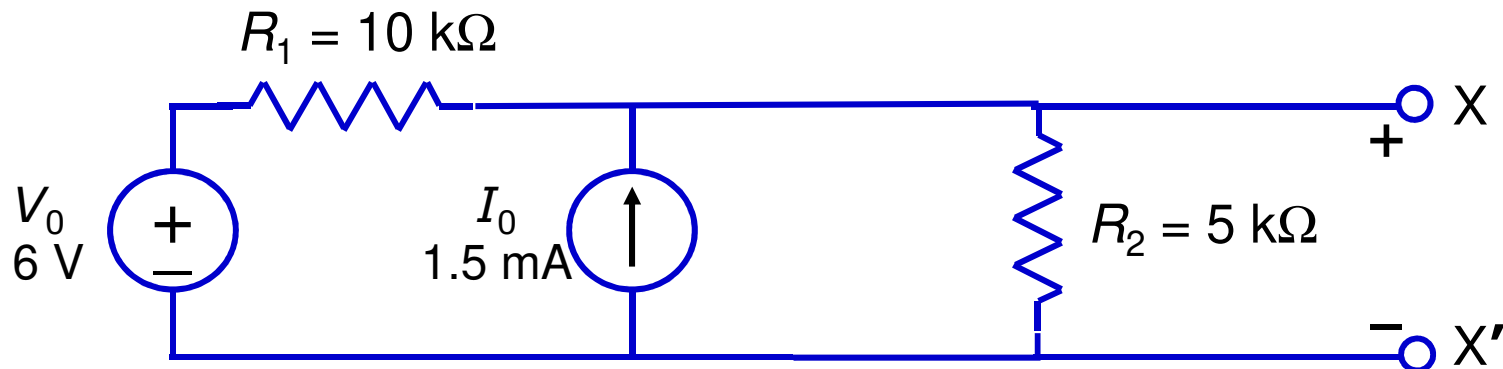


The Solution:

$$I_3 = \frac{V_A R_1 + V_B R_2}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}$$

Aplicação do princípio da sobreposição

- Find the Thévenin Equivalent at X-X' using Superposition

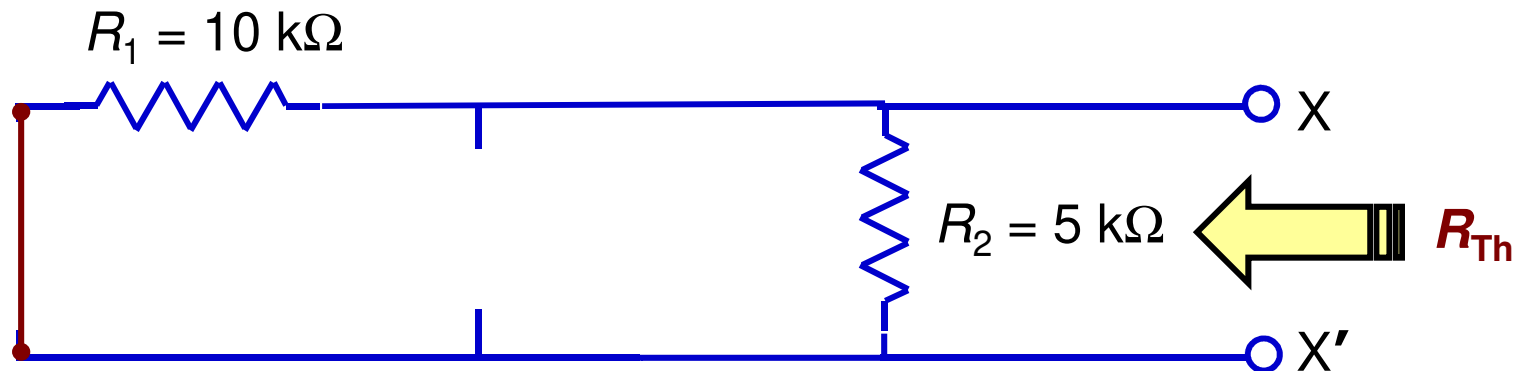


Aplicação do princípio da sobreposição

Step 1: Find the Thévenin Resistance

Set sources to “zero”

- Voltage source → short circuit
- Current source → open circuit



$$R_{Th} = R_1 \parallel R_2 = \frac{(10 \text{ k}\Omega)(5 \text{ k}\Omega)}{10 \text{ k}\Omega + 5 \text{ k}\Omega} = 3.33 \text{ k}\Omega$$

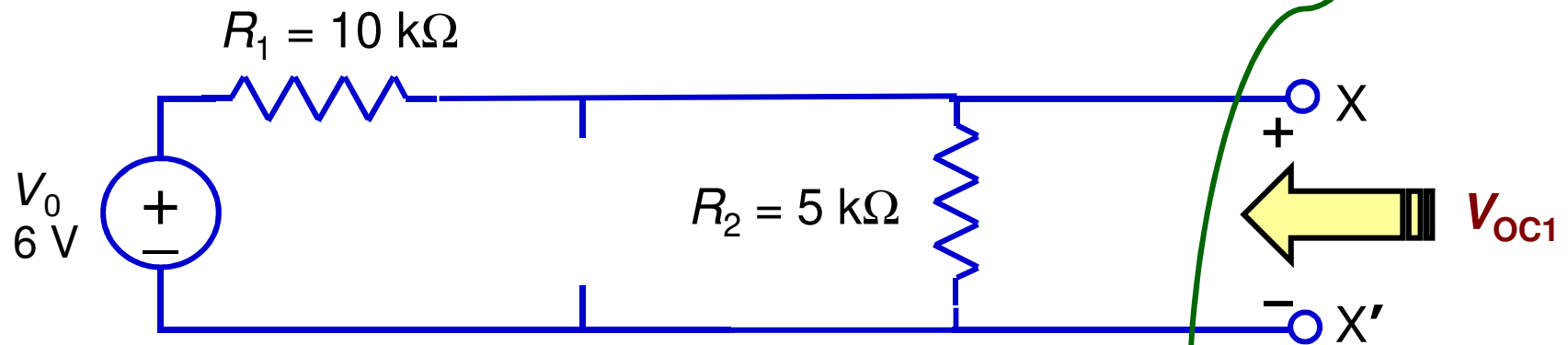
Aplicação do princípio da sobreposição

Step 2: Find component of open circuit voltage due to V_0

(Keep I_0 set to “zero”)

- Remember: Total $V_{OC} =$ Thévenin Voltage

Voltage Division Applies to R_1 and R_2 :



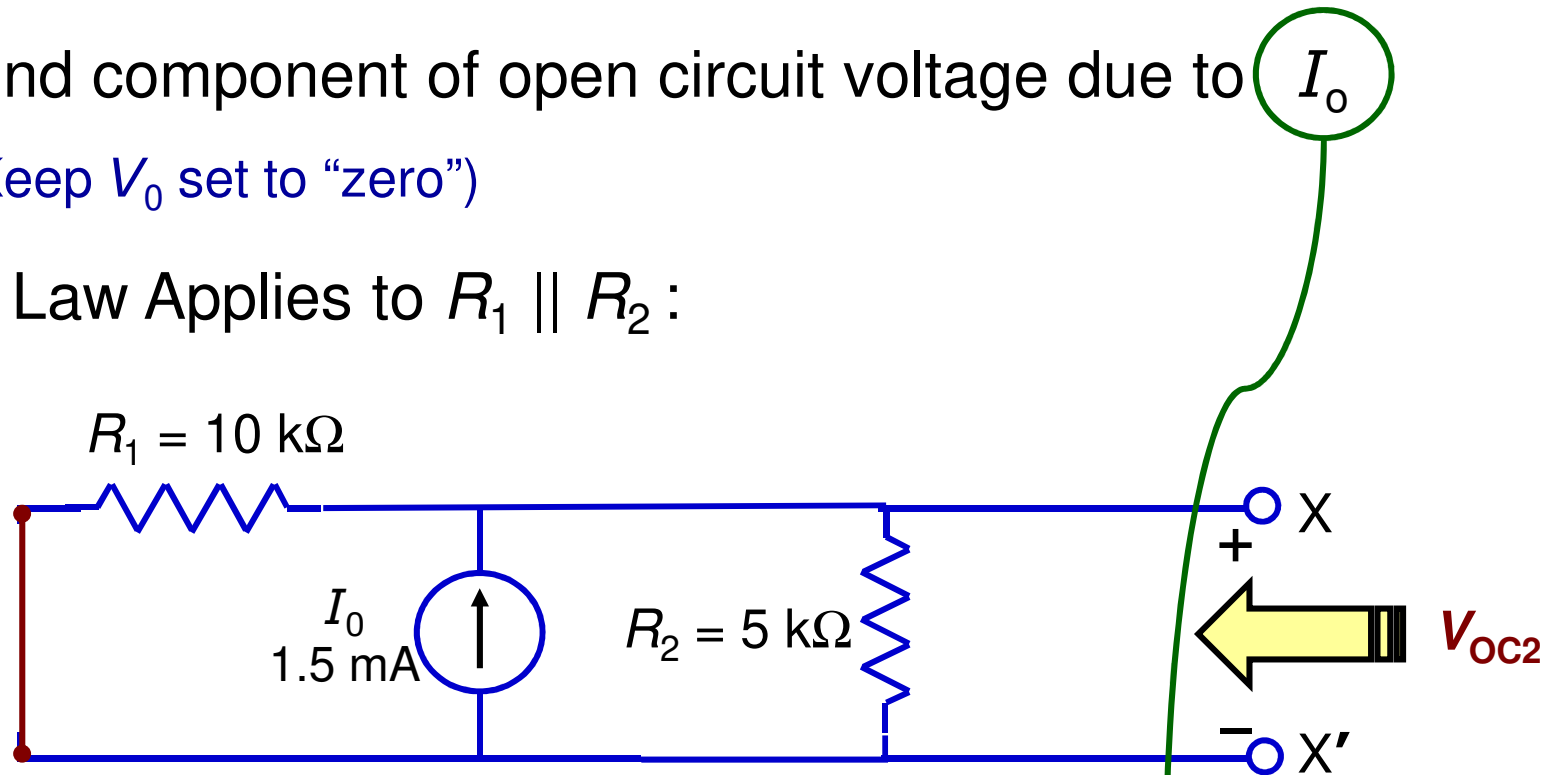
$$V_{oc1} = V_0 \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 6 \text{ V} \frac{5 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega + 5 \text{ k}\Omega} = 2 \text{ V}$$

Aplicação do princípio da sobreposição

Step 3: Find component of open circuit voltage due to I_0

(Keep V_0 set to “zero”)

Ohm's Law Applies to $R_1 \parallel R_2$:



$$V_{oc2} = I_0 \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = (1.5 \text{ mA})(3.33 \text{ k}\Omega) = 5 \text{ V}$$

Aplicação do princípio da sobreposição

Step 3: Find component of open circuit voltage due to I_0

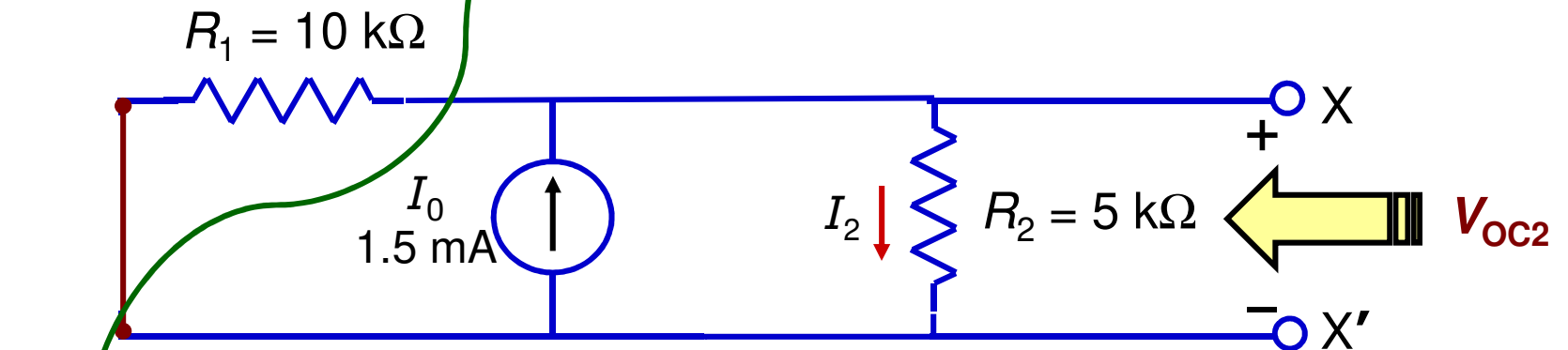
(Alternate Method)

Use Current Division:

$$I_2 = I_0 \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Use Ohm's Law:

$$V_{OC2} = I_2 R_2$$



$$V_{oc2} = I_0 \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = (1.5 \text{ mA})(3.33 \text{ k}\Omega) = 5 \text{ V}$$

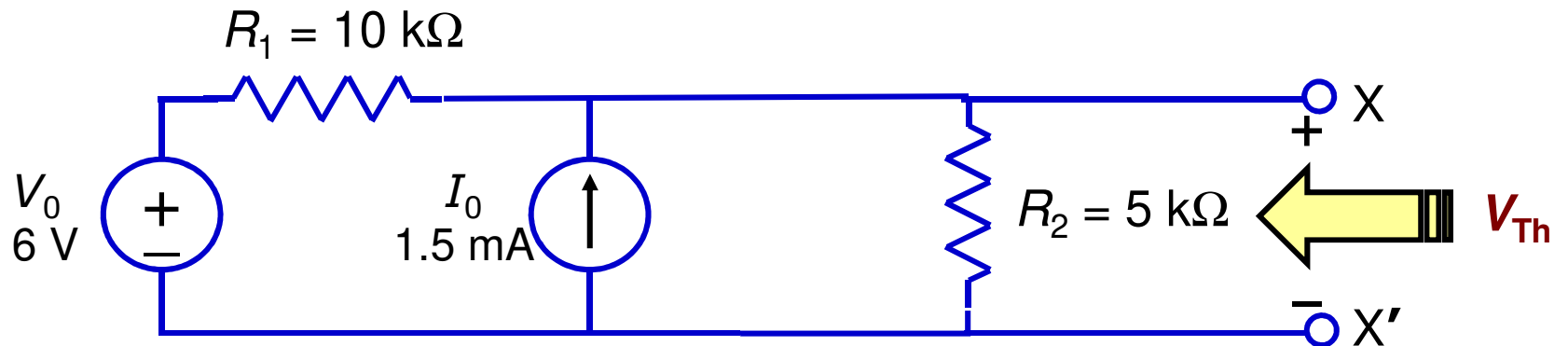
Consistent with previous answer for V_{OC2}

Aplicação do princípio da sobreposição

Step 4: Find Total Thévenin Voltage:

(Turn on both V_0 and I_0)

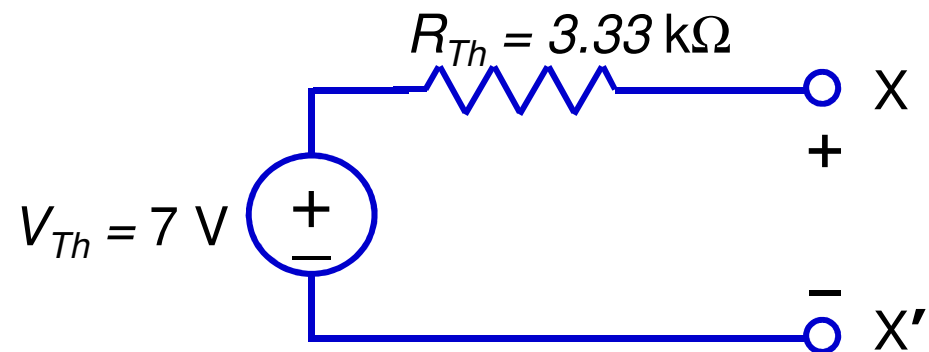
Superimpose V_{OC1} and V_{OC2} :



$$V_{Th} = V_{OC1} + V_{OC2} = 2\text{ V} + 5\text{ V} = \mathbf{7\text{ V}}$$

Aplicação do princípio da sobreposição

Step 5: Draw the Thévenin Equivalent Circuit:



Aplicação do princípio da sobreposição em circuitos com fontes dependentes

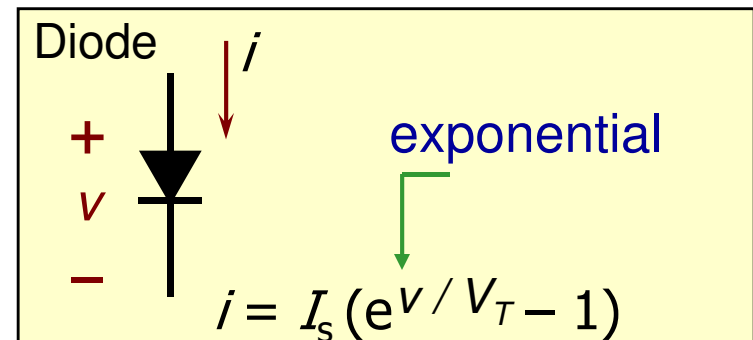
Condições de aplicação do princípio da sobreposição

Superposition cannot be used when:

➤ The circuit **is not linear**

• Linear $\rightarrow \frac{V}{i} = \text{constant}$  Resistor: $\frac{V}{i} = R$

• **Nonlinear** $\rightarrow \frac{V}{i} \neq \text{constant}$



Fontes de tensão e de corrente dependentes lineares

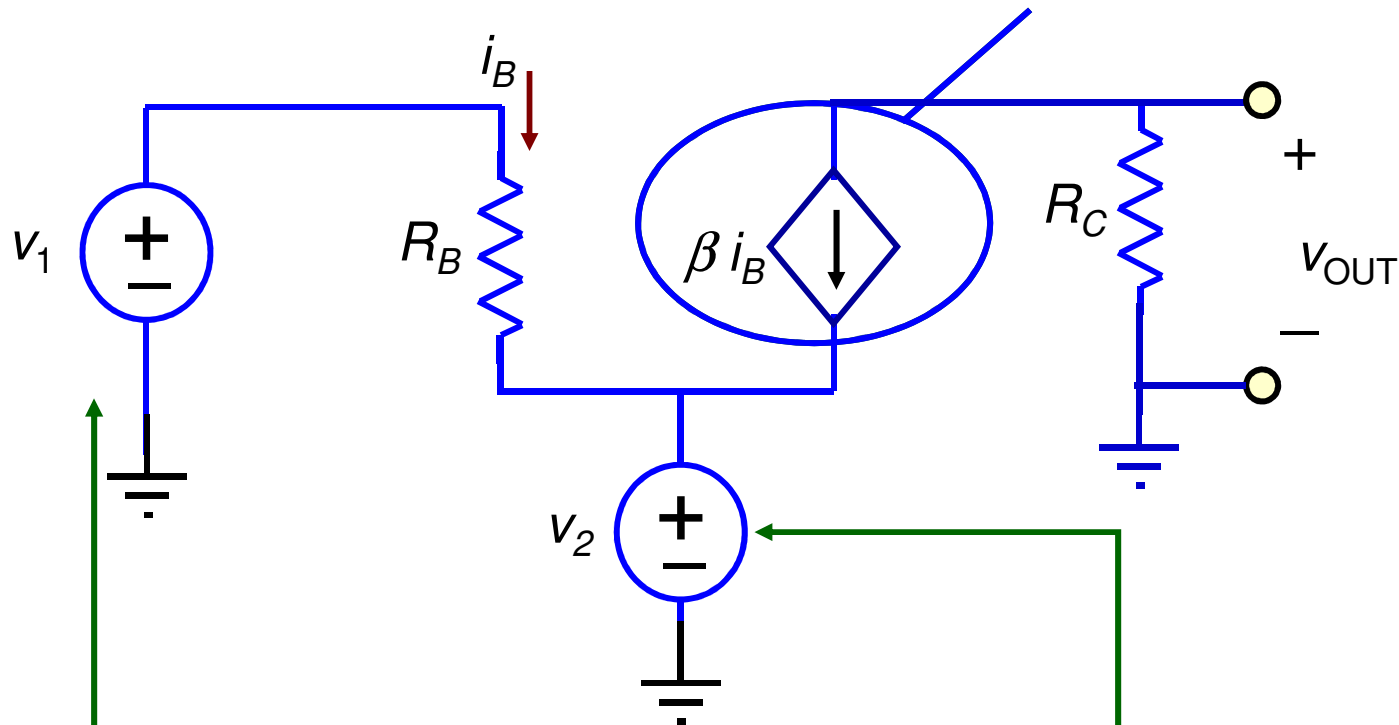
Examples of linear elements:

 Resistor: $\frac{V}{i} = R$

av_1  $\begin{matrix} + \\ v_2 \\ - \end{matrix}$ Dependent Source $\frac{V_2}{V_1} = a$

βv_1  $\begin{matrix} + \\ i_2 \\ - \end{matrix}$ Dependent Source $\frac{i_2}{V_1} = \beta$

Princípio da sobreposição com fontes dependentes



Strategy:

Do *not* set dependent source to zero

Set v_2 to zero; find component v_{OUT1}

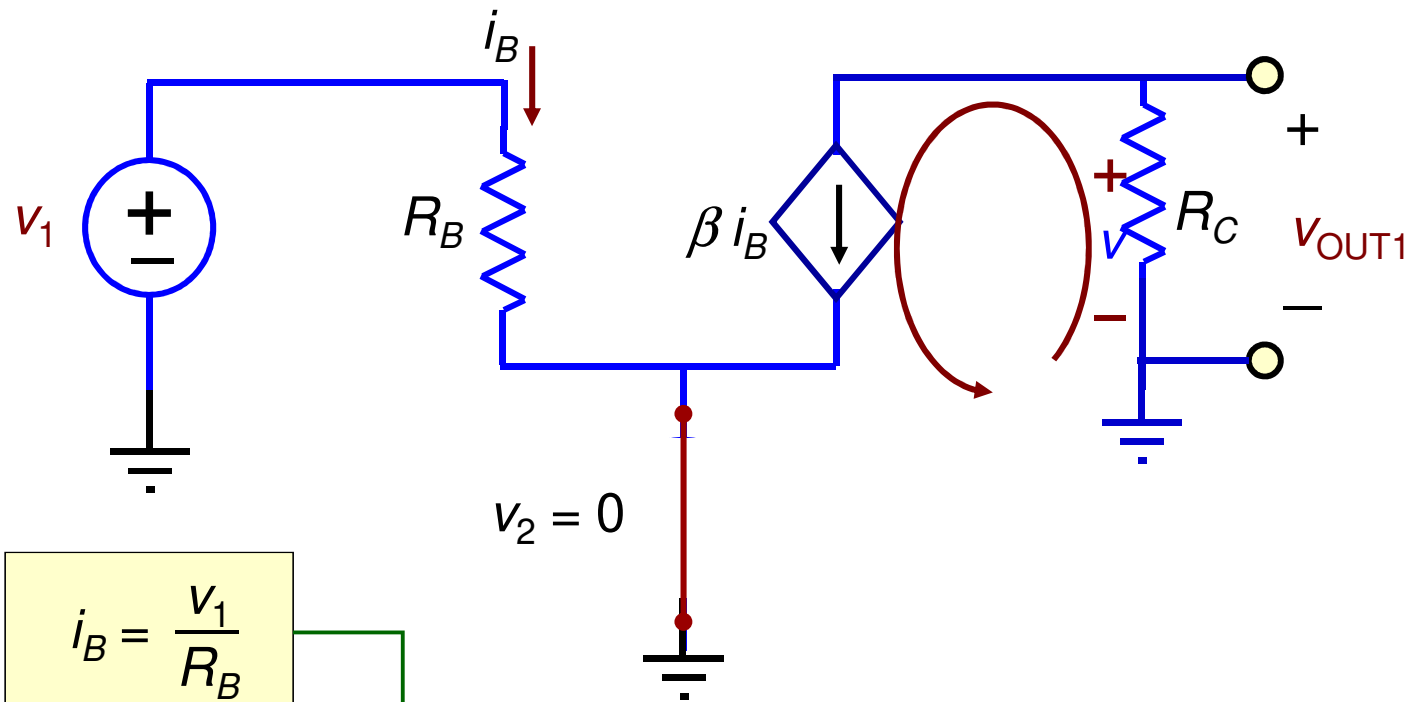
Set v_1 to zero; find component v_{OUT2}

Superimpose v_{OUT1} *and* v_{OUT2}

Dependent source will contribute to v_{OUT1} *and* v_{OUT2}

Princípio da sobreposição com fontes dependentes

Set v_2 to "zero"; find component v_{OUT1}

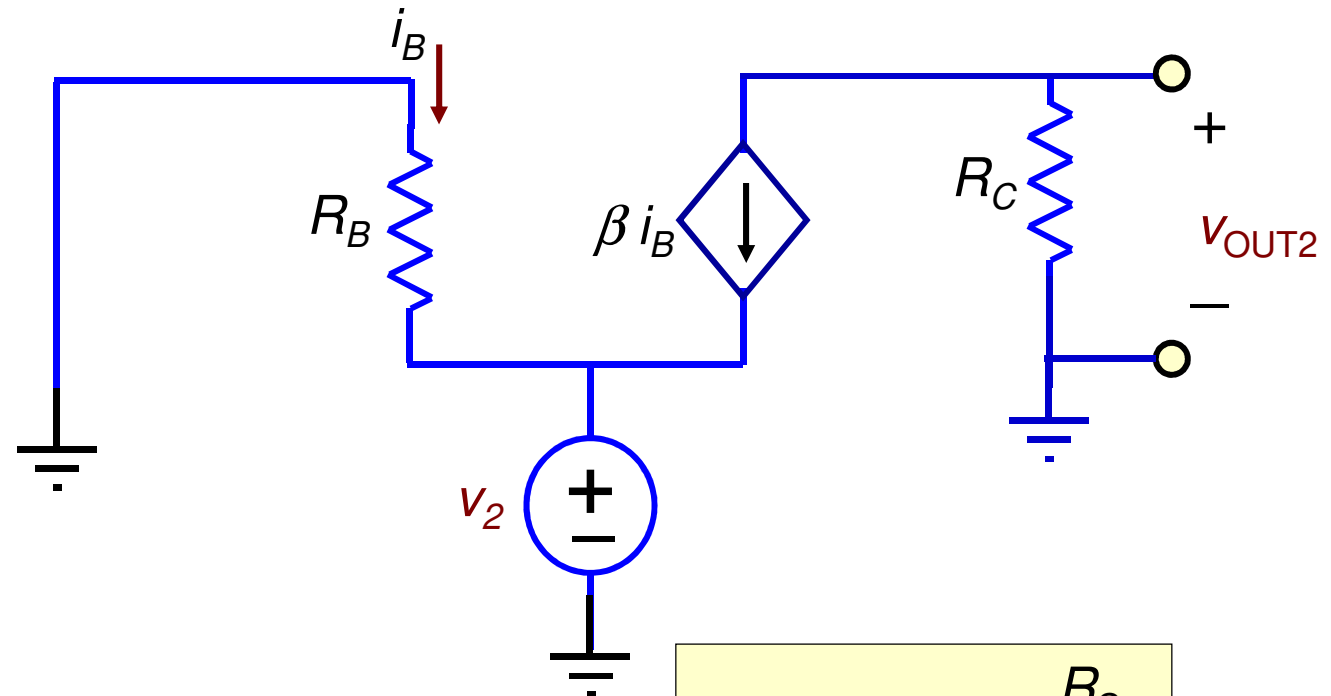


$$i_B = \frac{v_1}{R_B}$$

$$v_{OUT1} = -\beta i_B R_C = -\beta v_1 \frac{R_C}{R_B}$$

Princípio da sobreposição com fontes dependentes

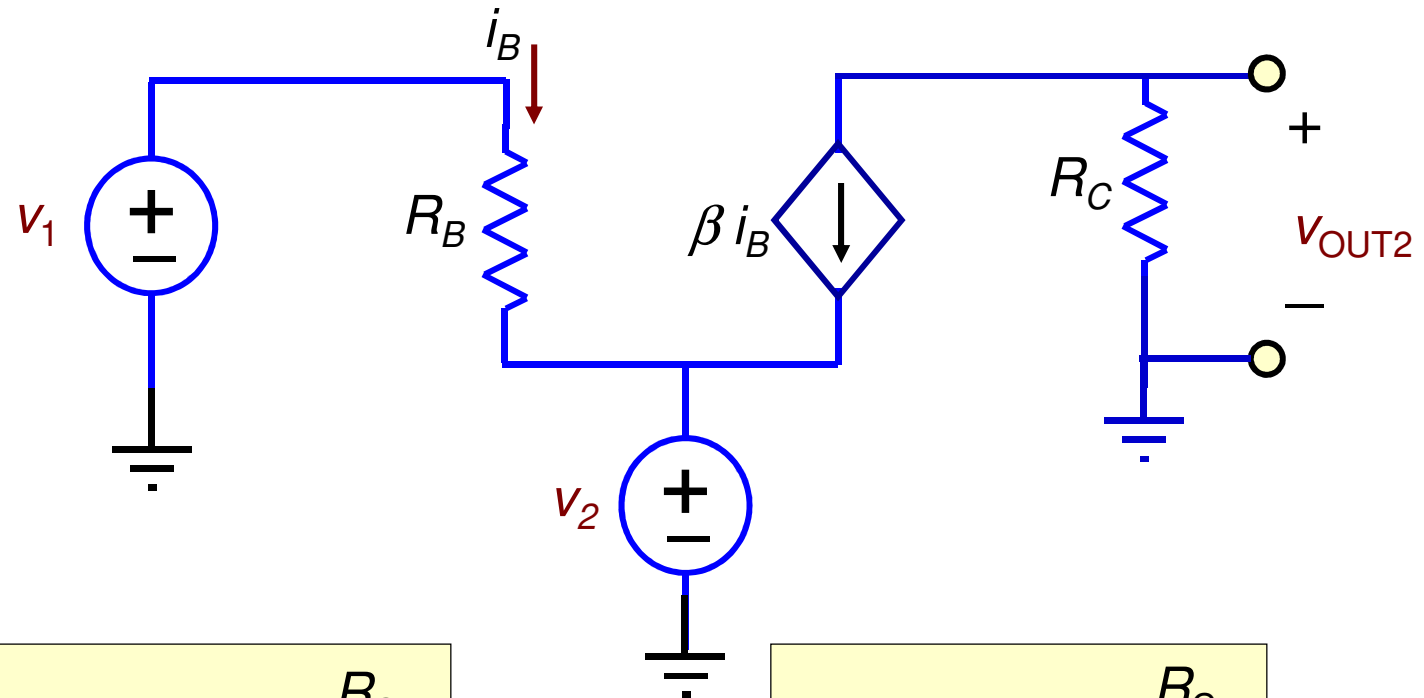
Superimpose v_{OUT1} and v_{OUT2}



$$v_{OUT2} = +\beta v_2 \frac{R_C}{R_B}$$

Princípio da sobreposição com fontes dependentes

Superimpose v_{OUT1} and v_{OUT2}



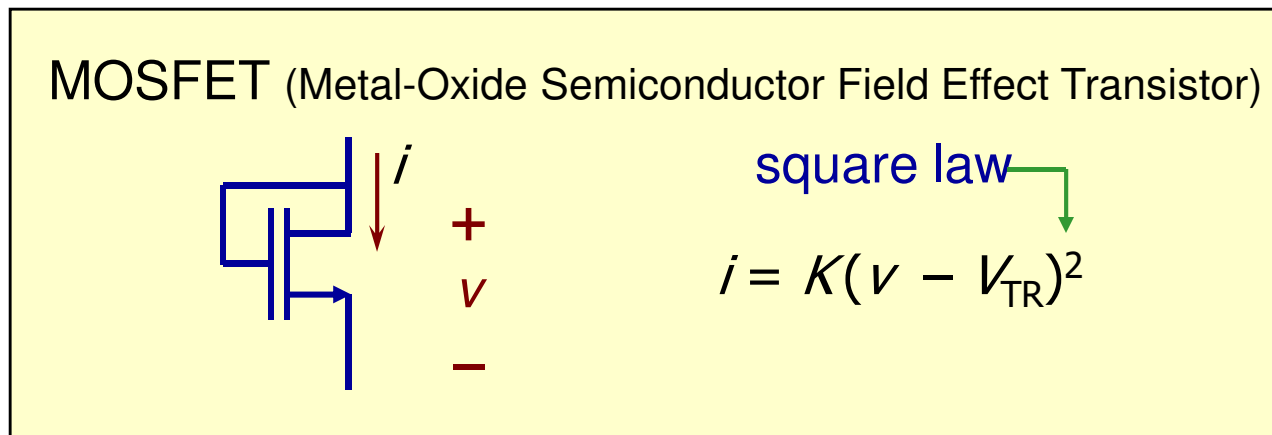
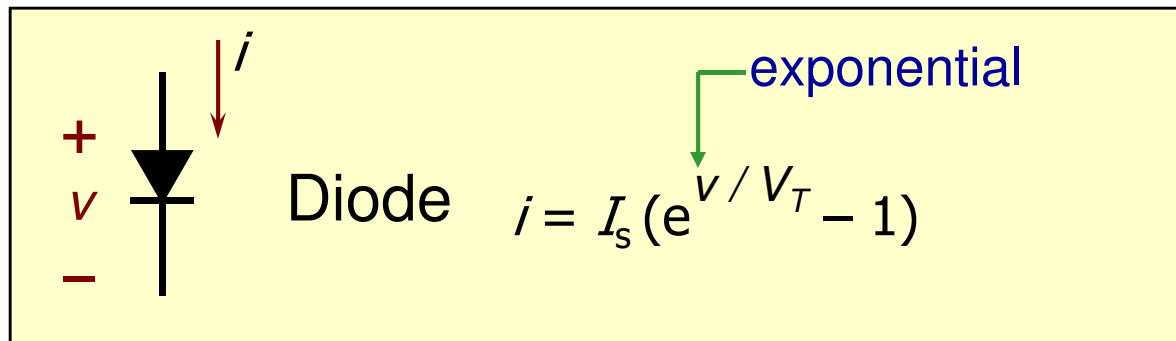
$$v_{OUT1} = -\beta v_1 \frac{R_C}{R_B}$$

$$v_{OUT2} = +\beta v_2 \frac{R_C}{R_B}$$

$$v_{OUT} = v_{OUT1} + v_{OUT2} = \beta \frac{R_C}{R_B} (v_2 - v_1)$$

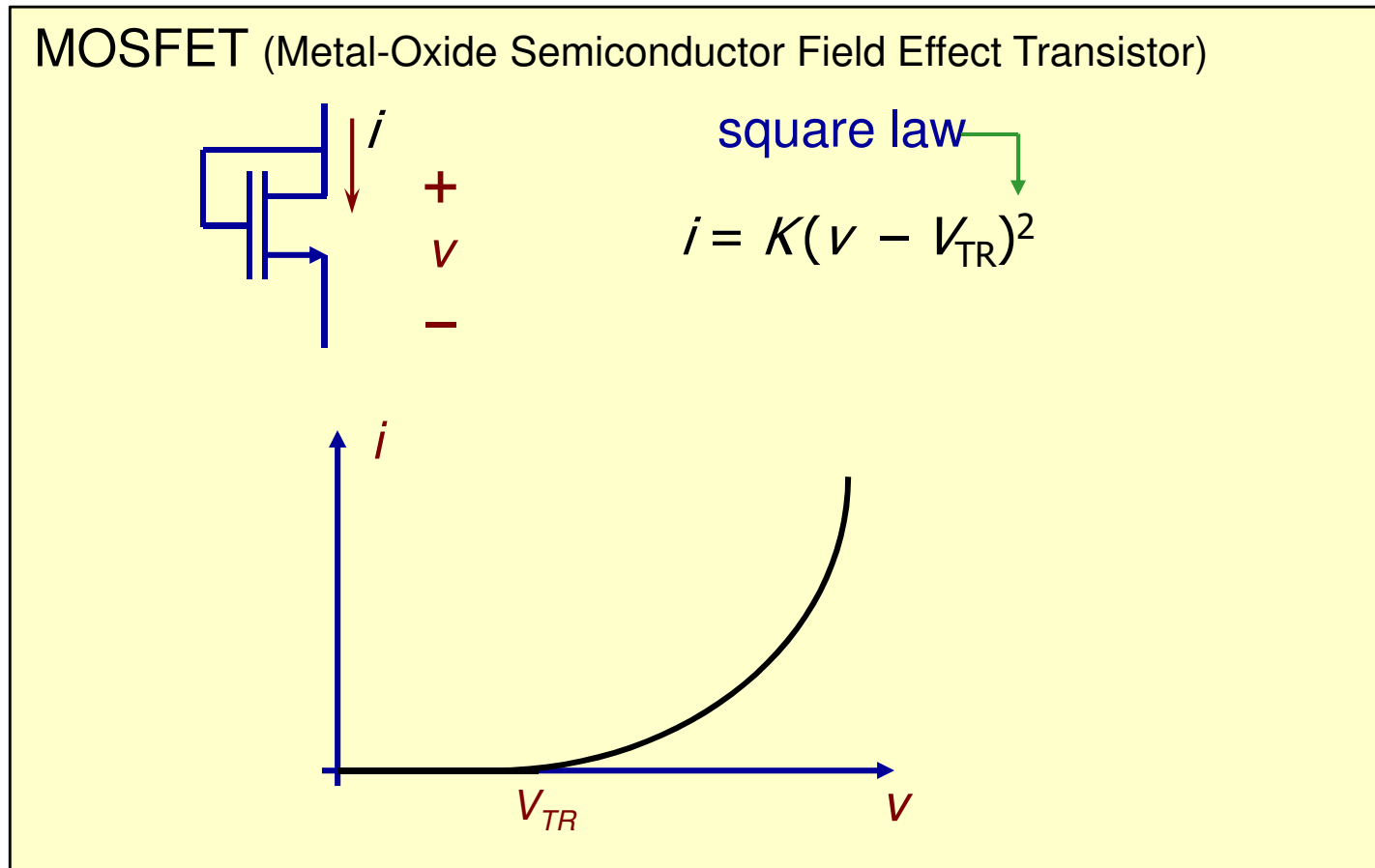
Elementos/componentes não-lineares

Examples of nonlinear elements:



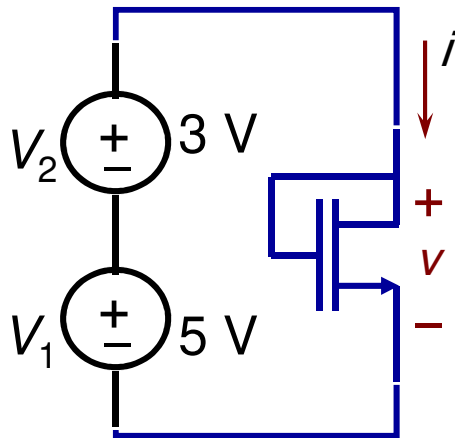
Elementos/componentes não-lineares

Example *with* Nonlinear Element:



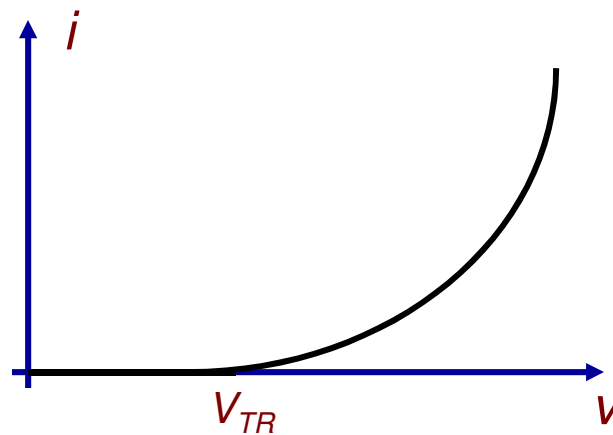
Elementos/componentes não-lineares

MOSFET (Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)



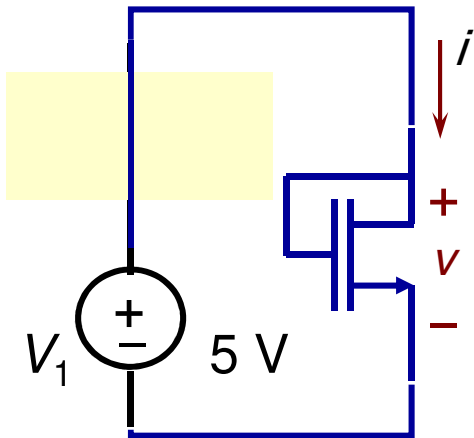
$$i = K(v - V_{TR})^2$$

- ✓ $K = 1 \text{ mA/V}^2$
- ✓ $V_{TR} = 2 \text{ V}$



Elementos/componentes não-lineares

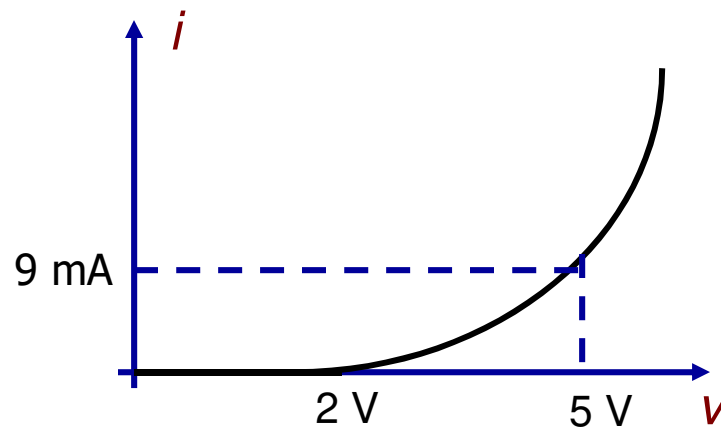
MOSFET (Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)



$$i = K(v - V_{TR})^2$$

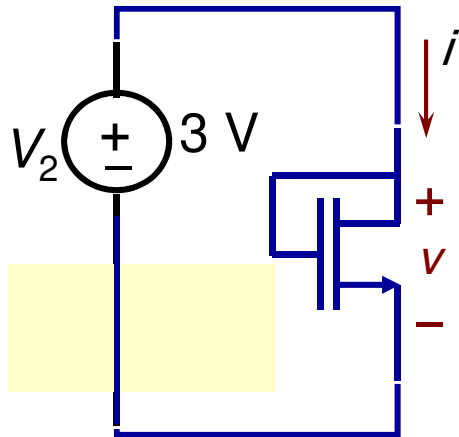
$$K = 1 \text{ mA/V}^2$$
$$V_{TR} = 2 \text{ V}$$

$$i_1 = (1 \text{ mA/V}^2) (5 \text{ V} - 2 \text{ V})^2 = 9 \text{ mA}$$



Elementos/componentes não-lineares

MOSFET (Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)



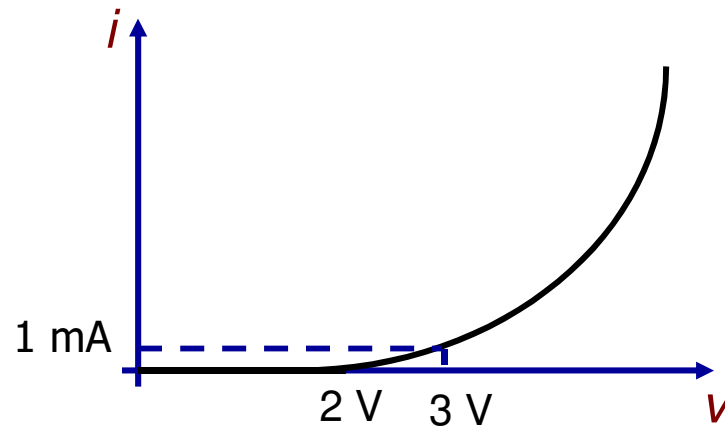
$$i = K(v - V_{TR})^2$$

$$K = 1 \text{ mA/V}^2$$

$$V_{TR} = 2 \text{ V}$$

$$i_1 = (1 \text{ mA/V}^2) (5 \text{ V} - 2 \text{ V})^2 = 9 \text{ mA}$$

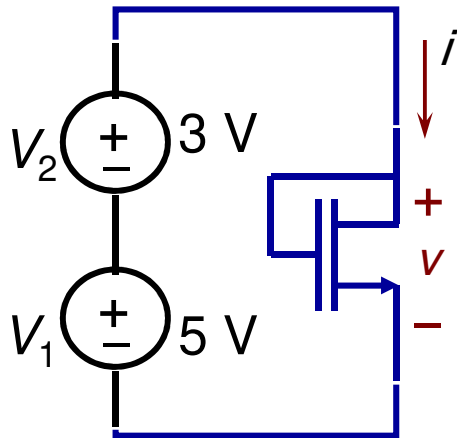
$$i_2 = (1 \text{ mA/V}^2) (3 \text{ V} - 2 \text{ V})^2 = 1 \text{ mA}$$



Apparently, $i_{\text{tot}} = i_1 + i_2 = 10 \text{ mA}$

Elementos/componentes não-lineares

MOSFET (Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)



$$i = K(v - V_{TR})^2$$

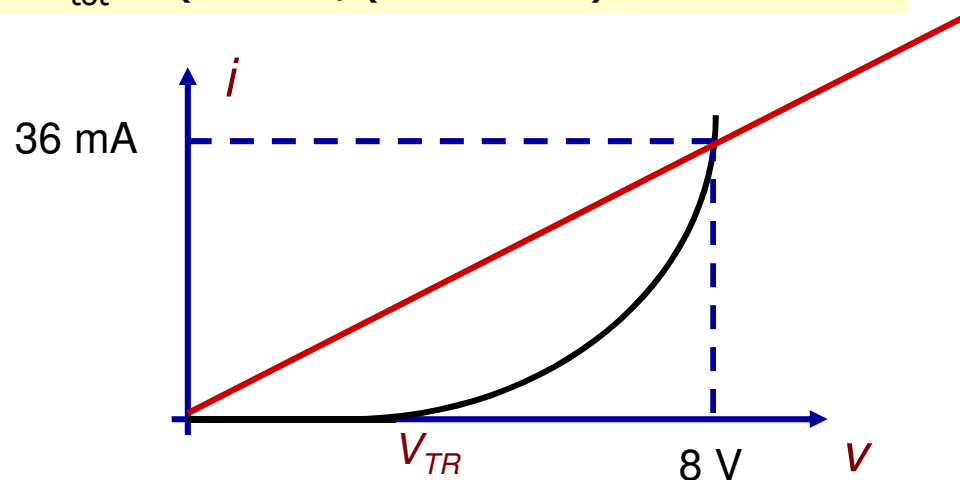
$$K = 1 \text{ mA/V}^2$$

$$V_{TR} = 2 \text{ V}$$

Superposition

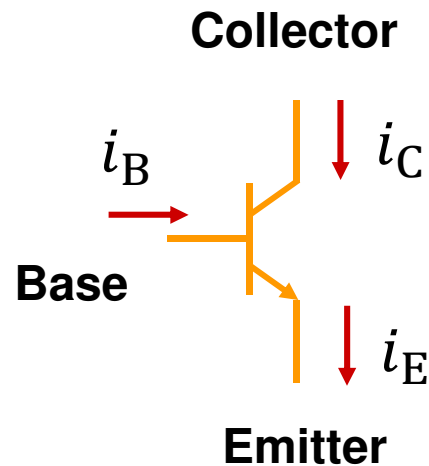
~~Apparently, $i_{tot} = i_1 + i_2 = 10 \text{ mA}$~~

$$i_{tot} = (1 \text{ mA/V}^2) (8 \text{ V} - 2 \text{ V})^2 = 36 \text{ mA}$$



Elementos/componentes não-lineares

The Bipolar Junction Transistor (BJT)



Transístor bipolar *npn*

$$i_E = i_B + i_C$$

Do ponto de vista da corrente, o transístor bipolar (BJT) comporta-se como um nodo

Condições de aplicação do princípio da sobreposição

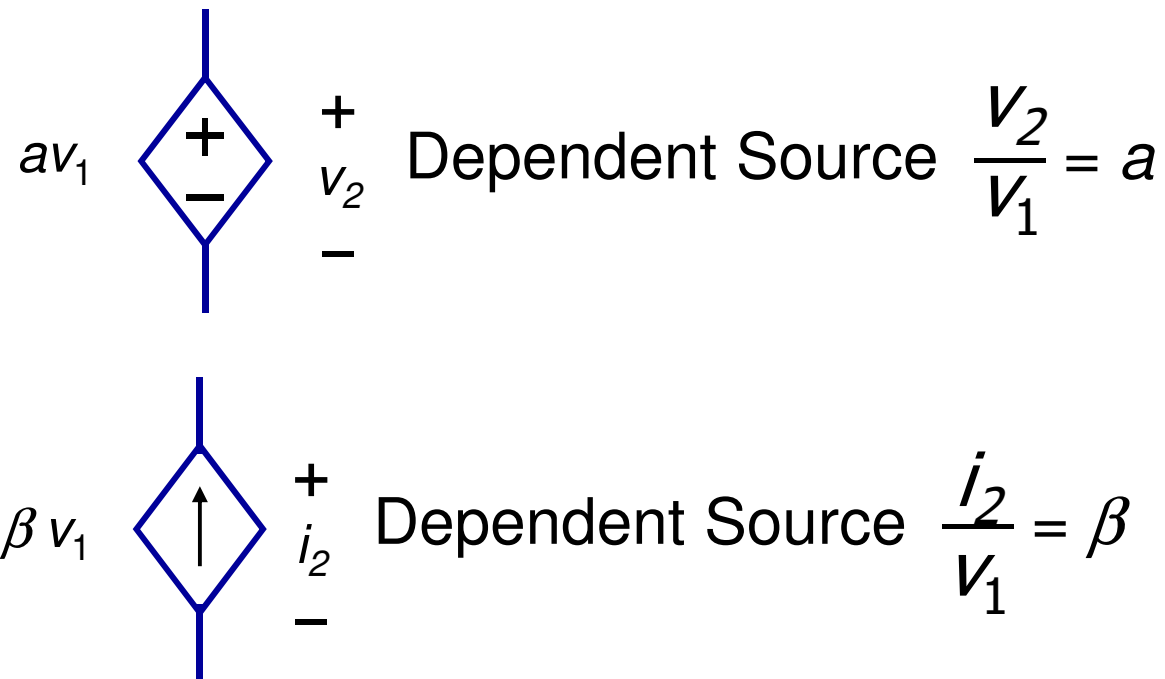
- A linear circuit obeys superposition.
- A linear circuit contains resistors or linear dependent sources.

In a Linear Circuit:

- V and I sources can be evaluated separately.
- Voltage or current = superposition of contributions from each independent source.

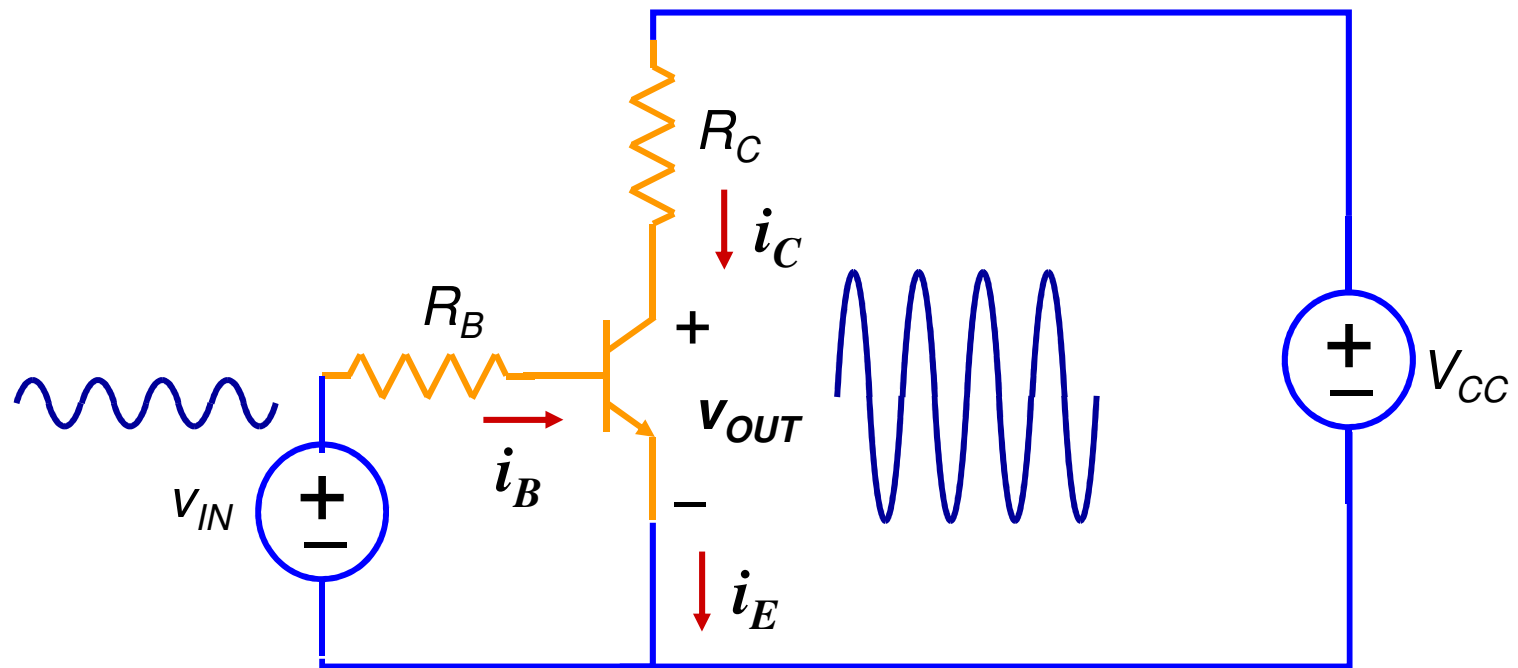
Componentes não-lineares podem ser representados por fontes lineares dependentes

Em certas circunstâncias, numa dada gama de valores de corrente e tensão, um comportamento de componente linear pode ser caracterizado como sendo linear, e representado por uma fonte de tensão dependente ou uma fonte de corrente dependente.



Circuito amplificador com transístor

The following circuit functions a simple transistor amplifier:

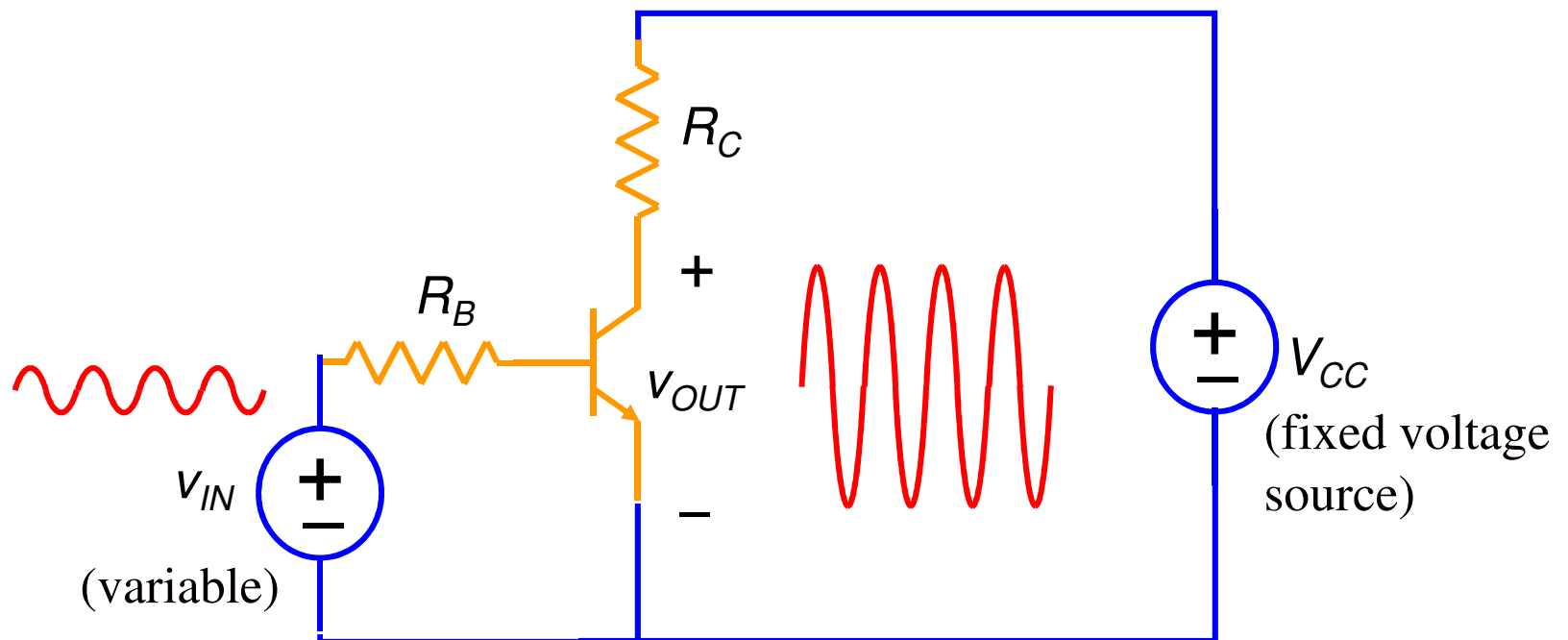


It's purpose is to reproduce v_{IN} at the v_{OUT} terminals, but with a larger amplitude.

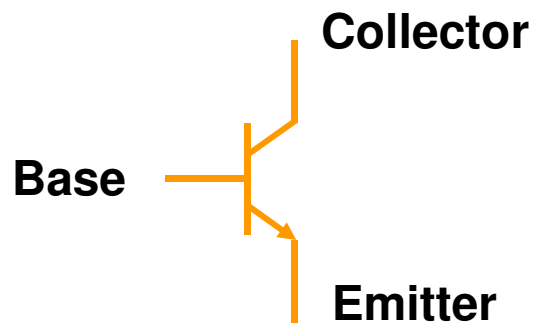
Circuito amplificador com transistor

- V_{IN} is the input source to be amplified
- V_{CC} is a fixed dc source that supplies raw power to the amplifier.

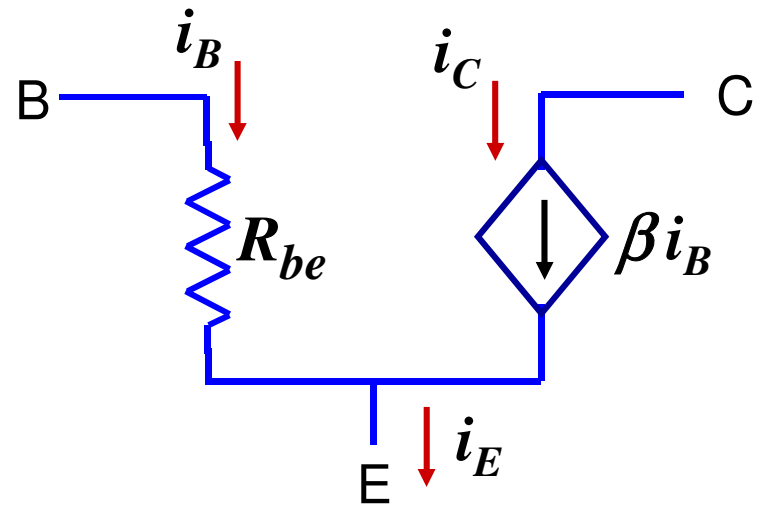
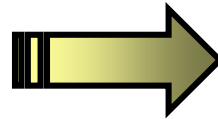
Our Job: Find the relationship between V_{OUT} and V_{IN} when the transistor is represented by its linear model approximation.



Modelo linear de um Transistor npn



Device Symbol

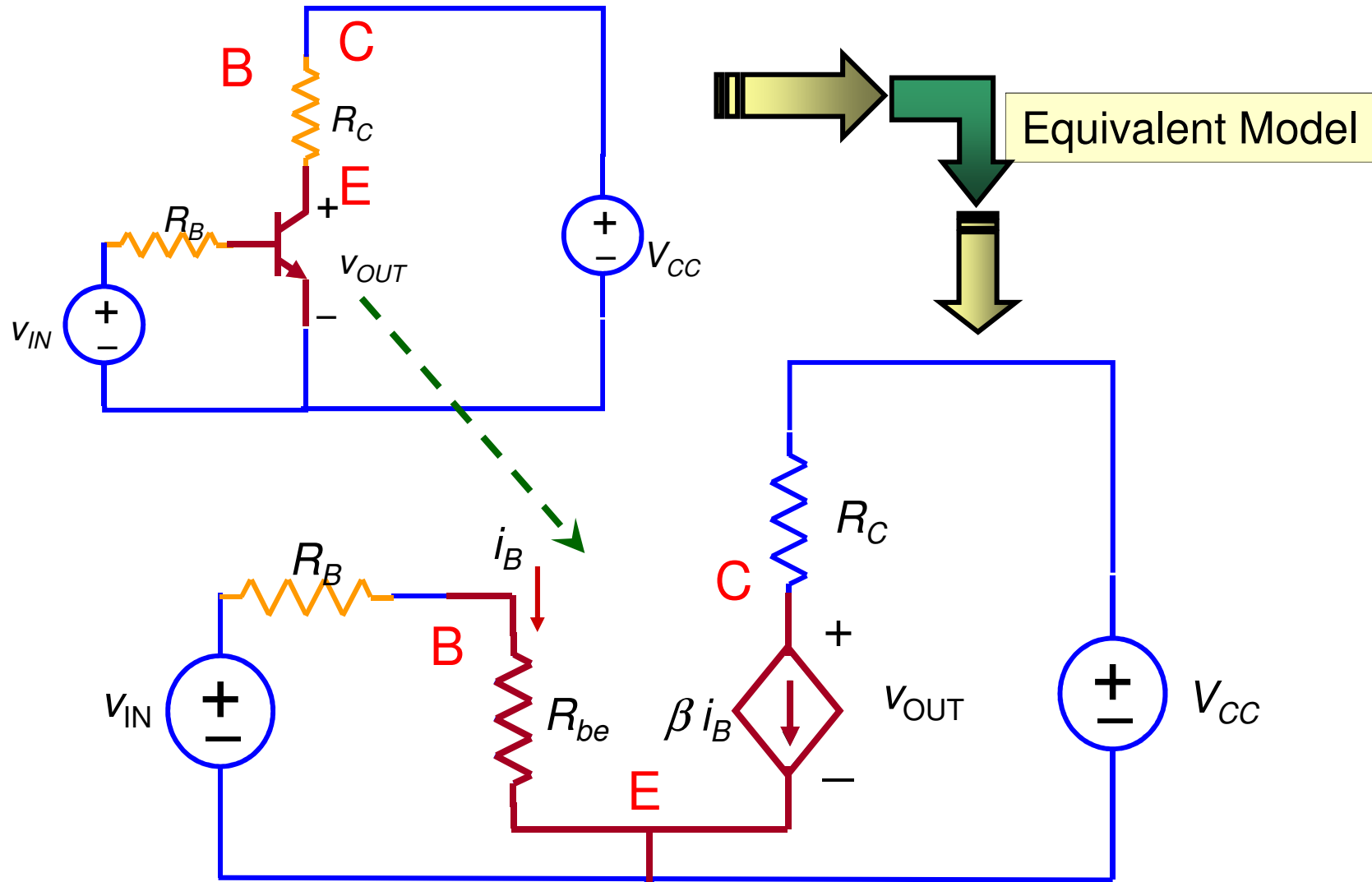


Equivalent Model

Transistor bipolar *npn* $i_E = i_B + i_C$

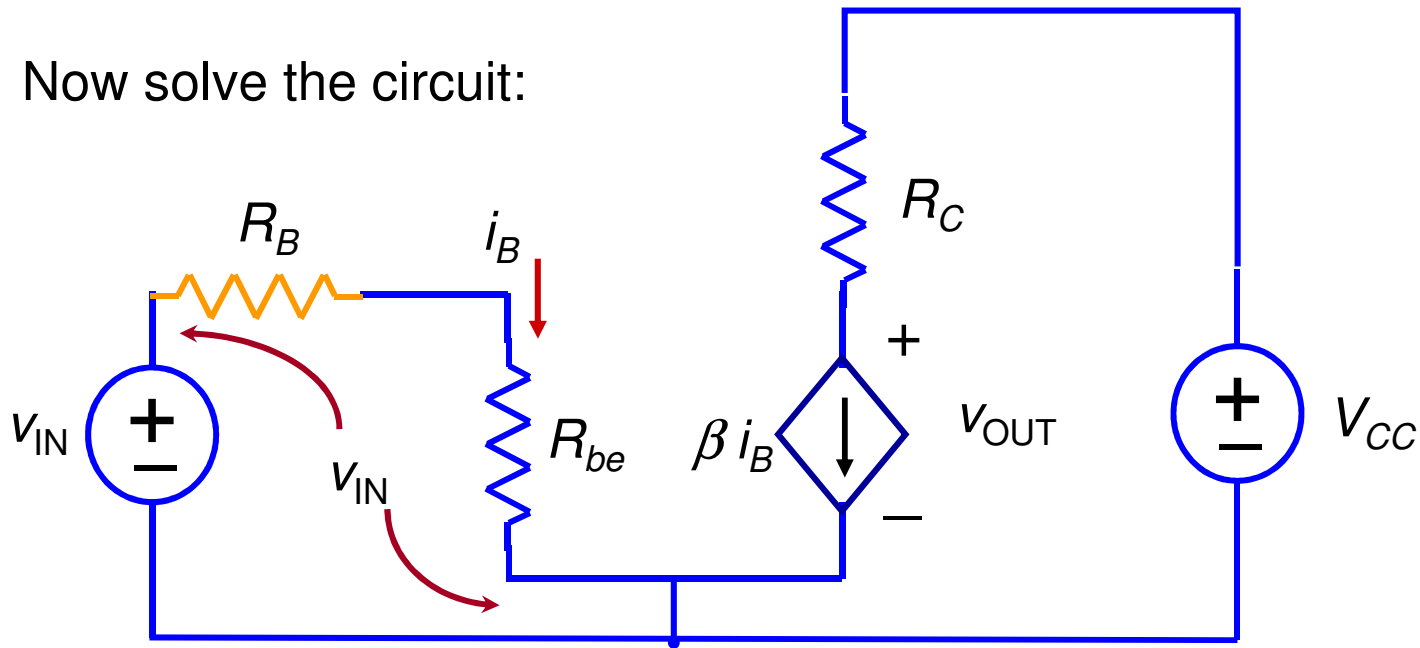
Do ponto de vista da corrente, o transistor bipolar (BJT) comporta-se como um nodo

Circuito amplificador com transístor



Circuito amplificador com transistor

Now solve the circuit:



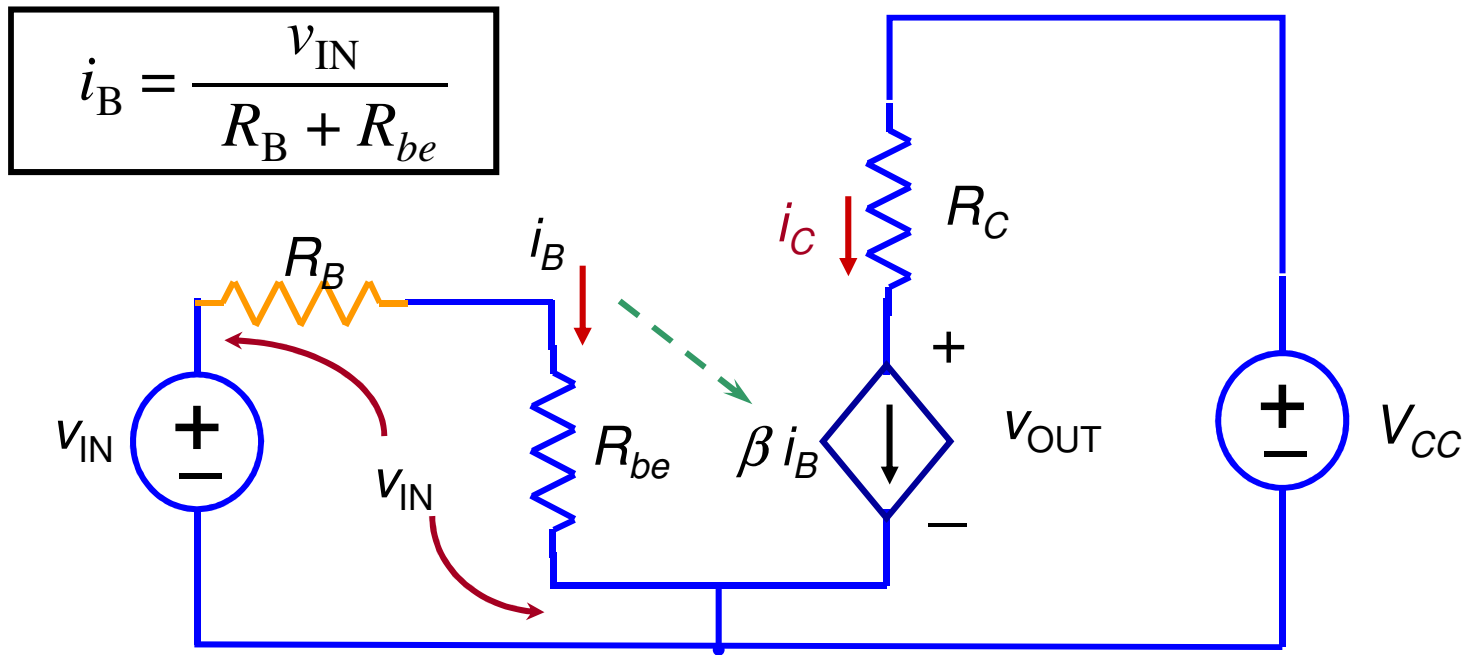
First find i_B using Kirchhoff's Voltage Law and Ohm's Law:

$$v_{IN} = i_B (R_B + R_{be}) \quad (\text{Voltage is independent of path taken})$$



$$i_B = \frac{v_{IN}}{R_B + R_{be}}$$

Circuito amplificador com transístor



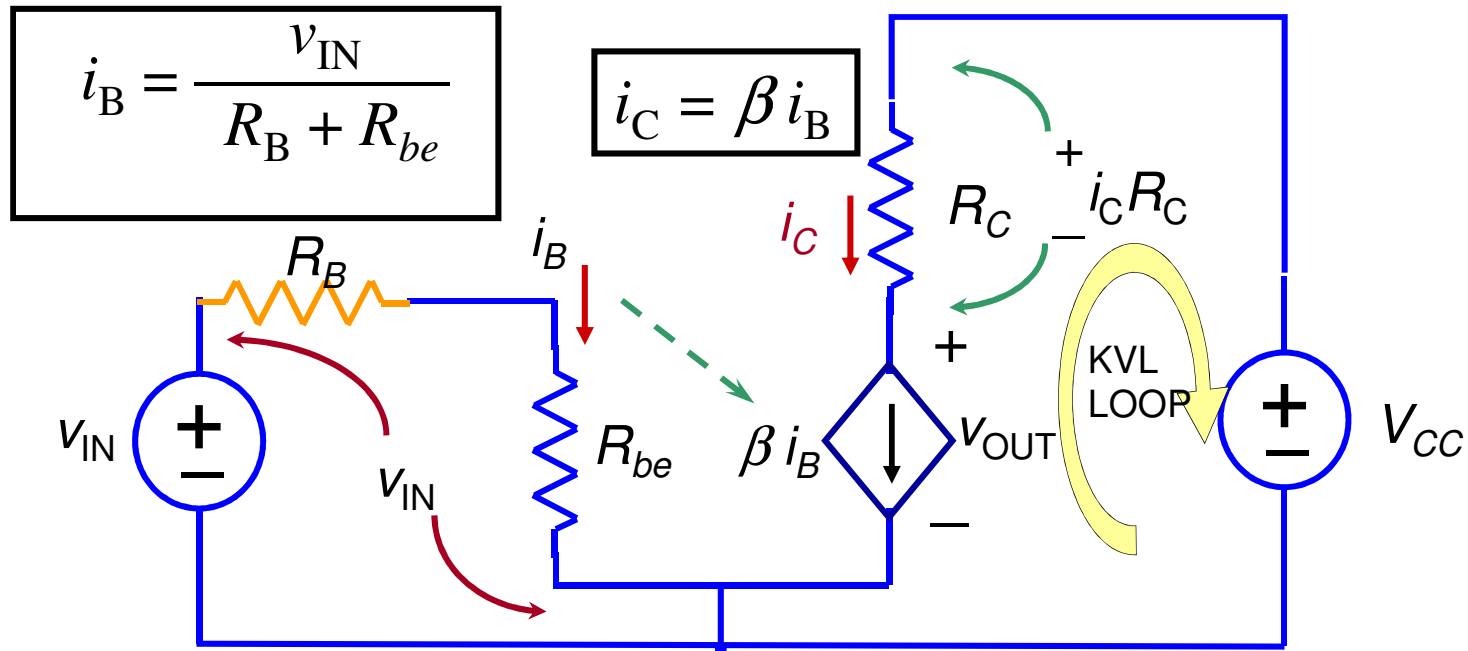
$$i_B = \frac{V_{IN}}{R_B + R_{be}}$$

Next define a current i_C

$$i_C = \beta i_B$$

(Determined by properties of dependent source)

Circuito amplificador com transistor



Finally, use KVL to express v_{OUT} in terms of i_C :

$$v_{OUT} + i_C R_C = V_{CC} \quad (v_{OUT} \text{ and the voltage across } R_C \text{ sum together})$$



$$v_{OUT} = V_{CC} - i_C R_C$$

Circuito amplificador com transistor

$$i_B = \frac{v_{IN}}{R_B + R_{be}}$$

$$i_C = \beta i_B$$

$$v_{OUT} = V_{CC} - i_C R_C$$

Solve these equations:

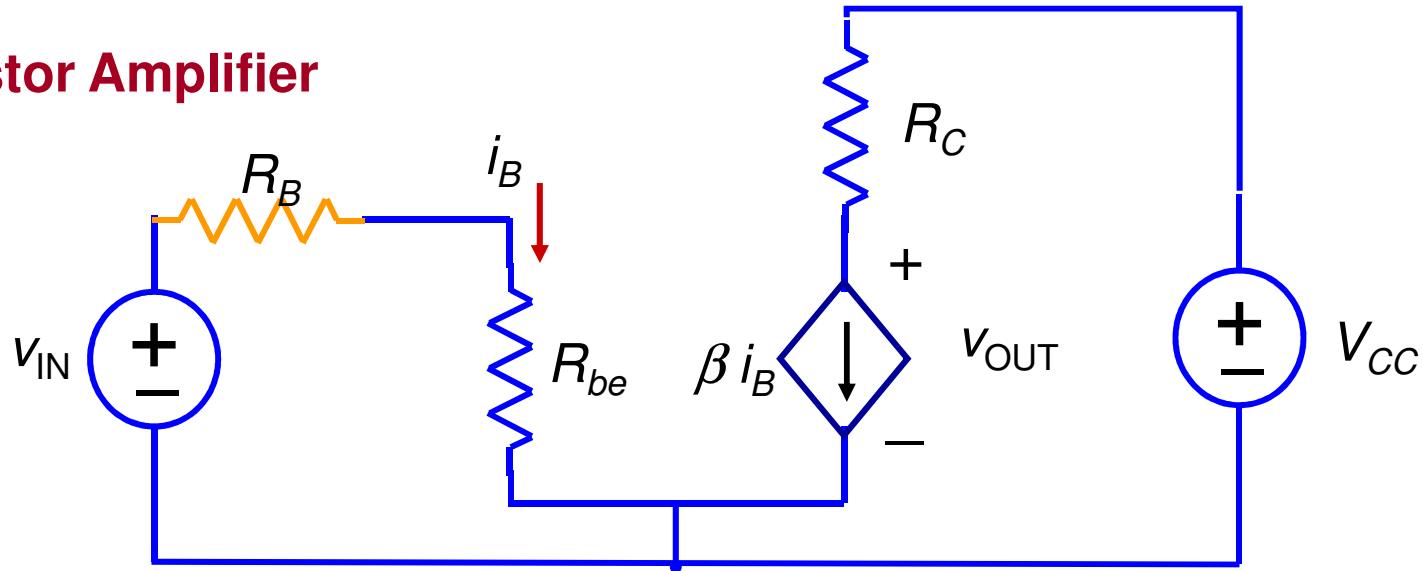
$$i_C = \frac{\beta v_{IN}}{R_B + R_{be}}$$

$$v_{OUT} = V_{CC} - \frac{\beta R_C}{R_B + R_{be}} v_{IN}$$

This is the final result!

Circuito amplificador com transistor

Transistor Amplifier



$$v_{OUT} = V_{CC} - \frac{\beta R_C}{R_B + R_{be}} v_{IN}$$

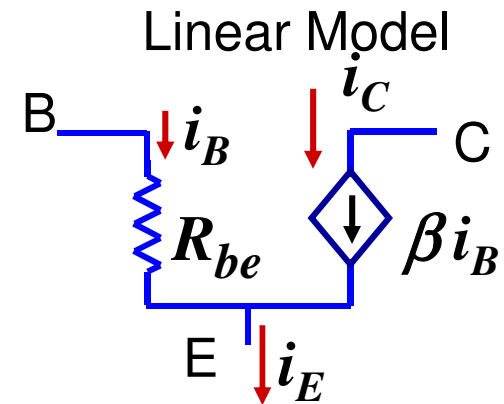
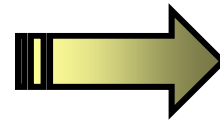
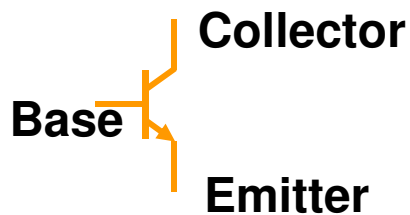
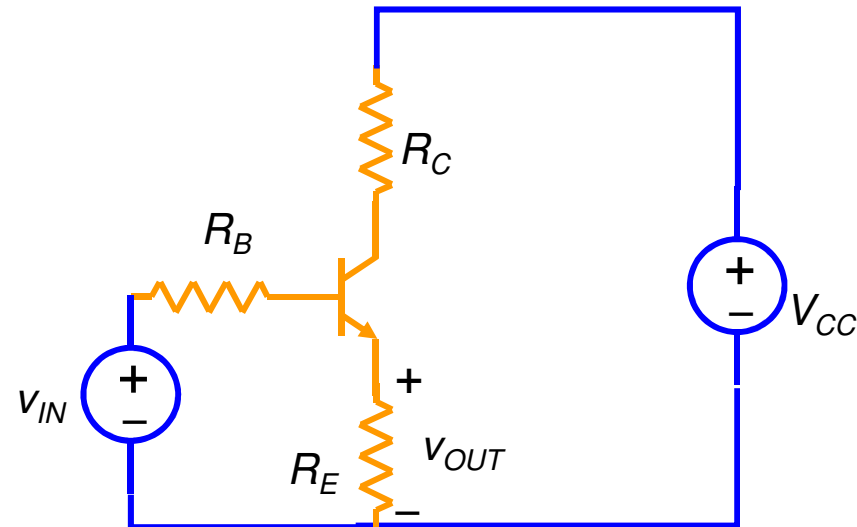
Amplification factor A_V

What this circuit does:

It multiplies v_{IN} by A_V and subtracts it from V_{CC}

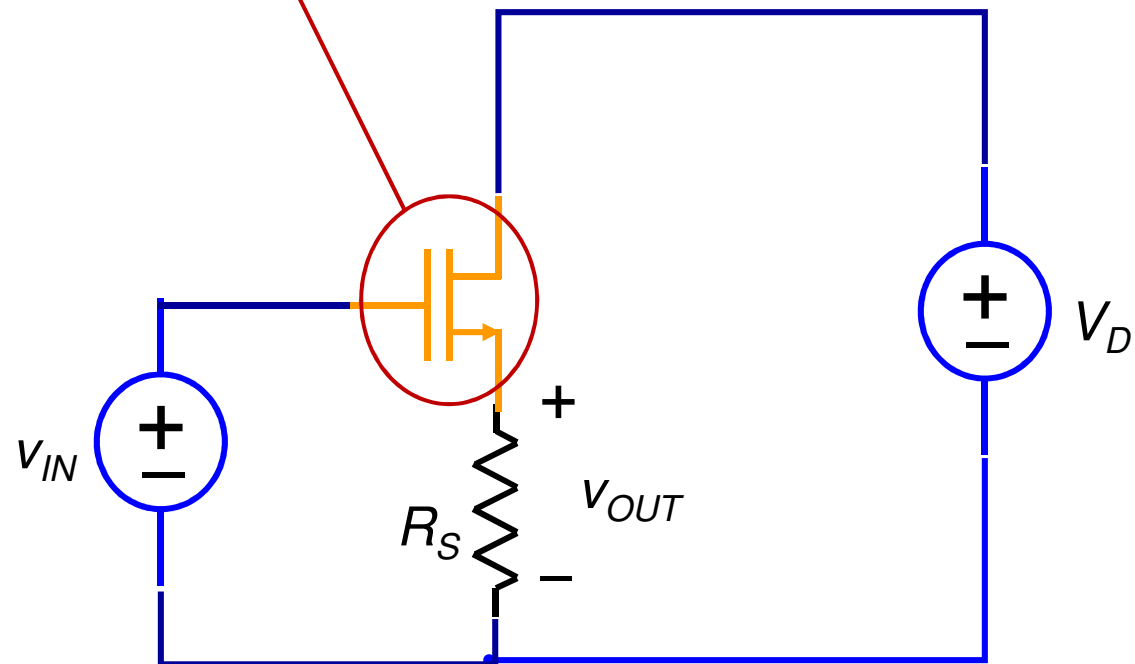
Circuito amplificador com transístor 2

- Find the gain $A = \Delta v_{OUT} / \Delta v_{IN}$ of the BJT circuit shown below, replacing the transistor by its linear model.



Circuito amplificador MOSFET

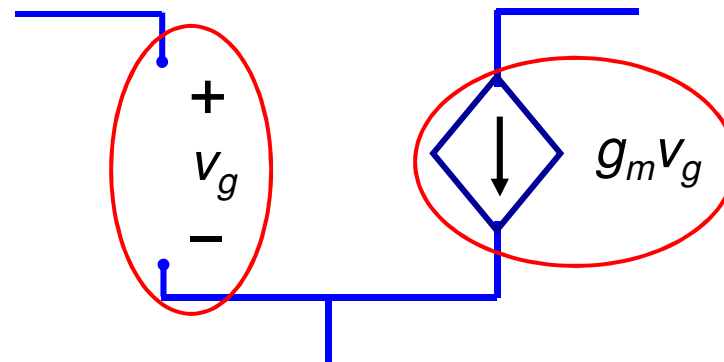
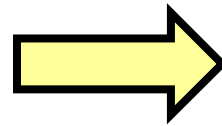
Transistor MOSFET



Modelo do MOSFET

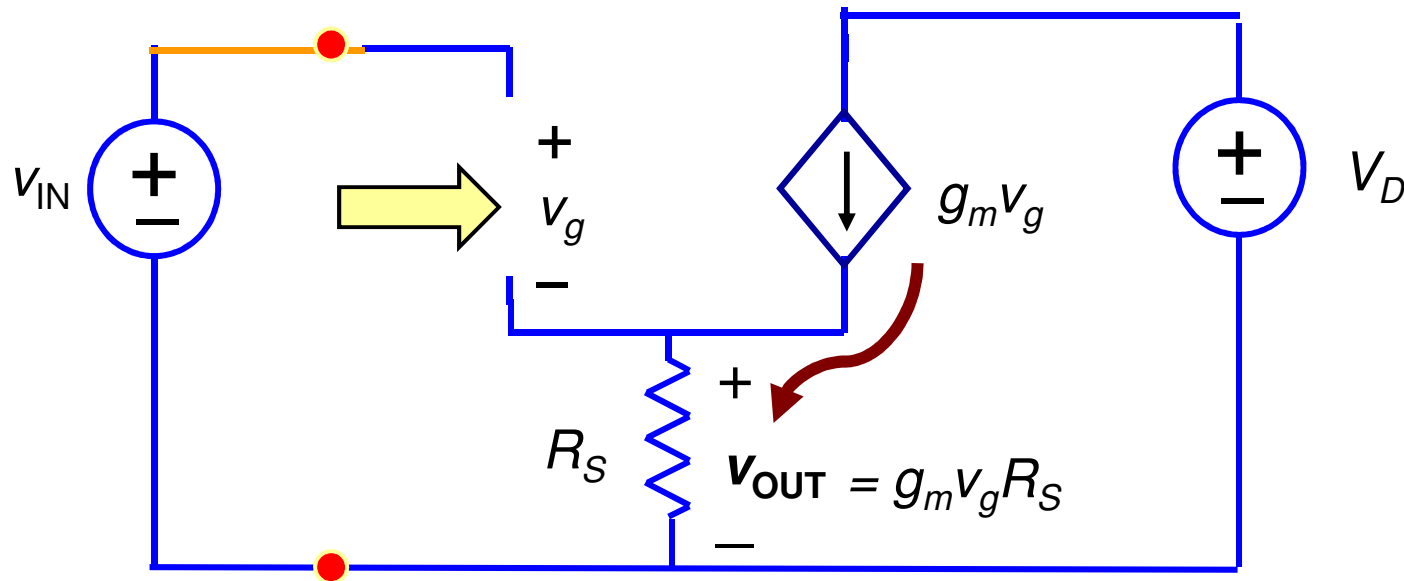


MOSFET



Equivalent Model

Modelo do amplificador MOSFET



$$V_{IN} = v_g + v_{OUT} = v_g + g_m v_g R_S$$

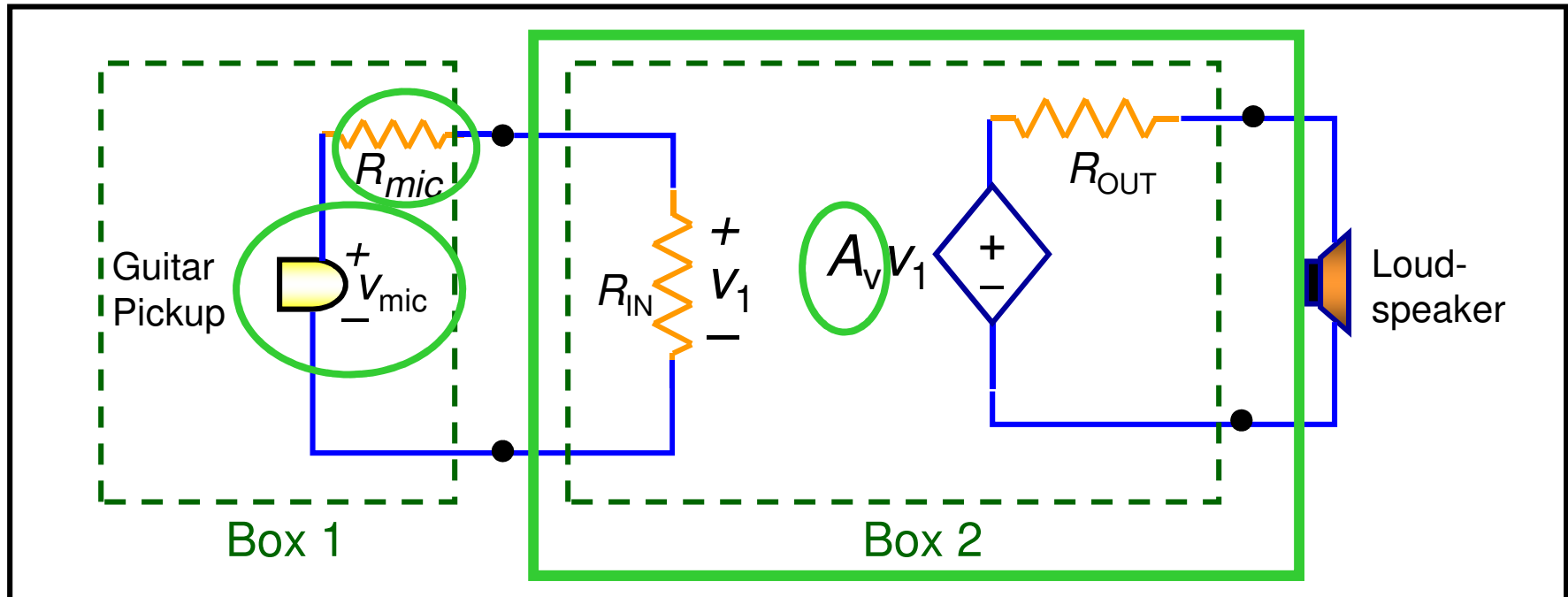
$$v_g = v_{IN} / (1 + g_m R_S)$$

$$v_{OUT} = g_m R_S v_g \quad \rightarrow$$

$$v_{OUT} = v_{IN} [g_m R_S / (1 + g_m R_S)]$$

Circuito amplificador áudio

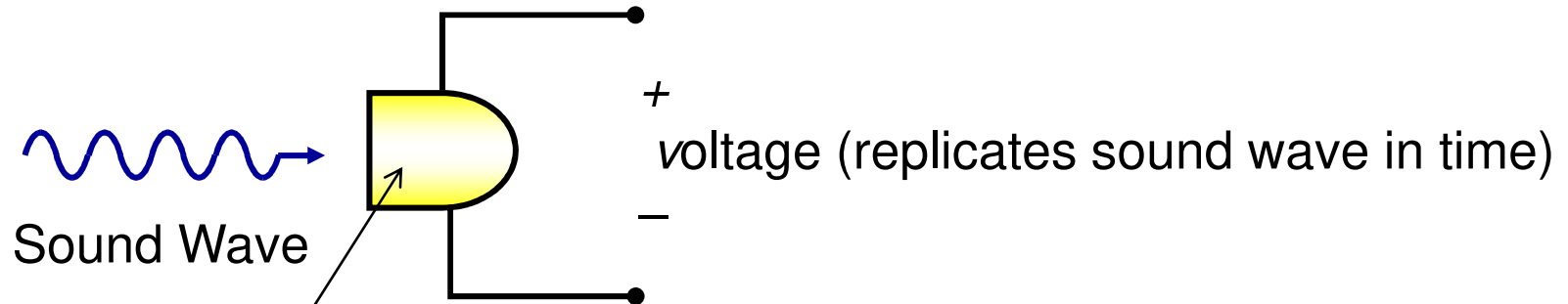
This circuit is a model for a guitar amplifier system:



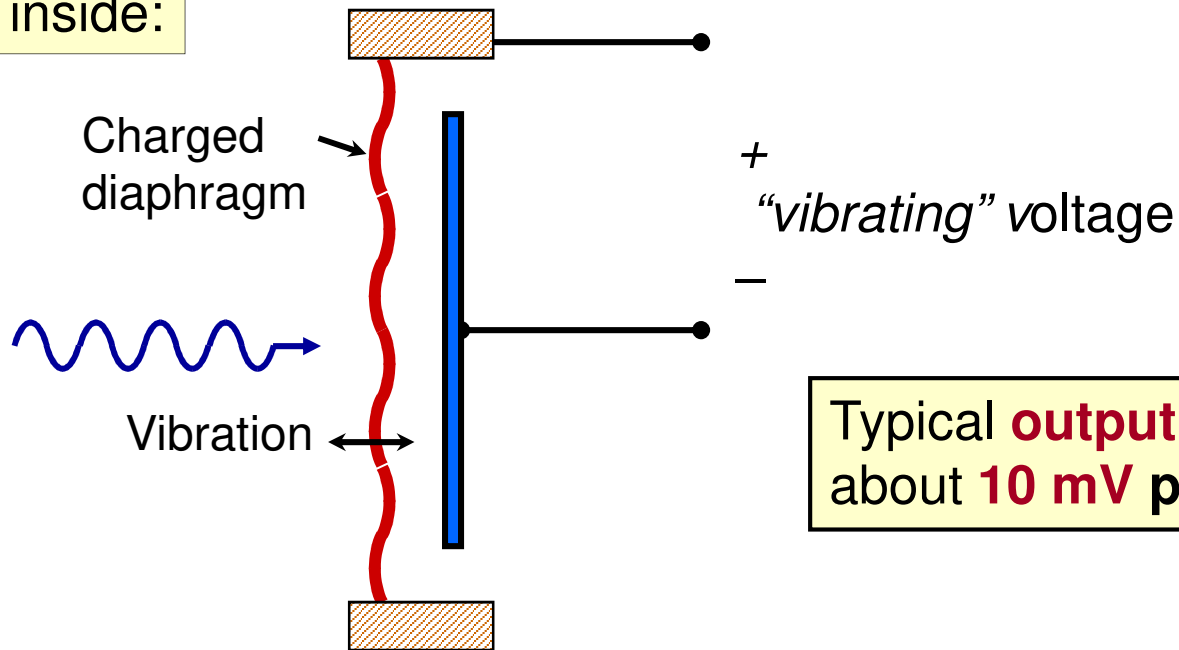
- Multiply v_{mic} by a large number
- Apply as “amplified” voltage to loudspeaker
- Sound comes out

Como funciona um microfone?

Background: How does a microphone or guitar pickup work?

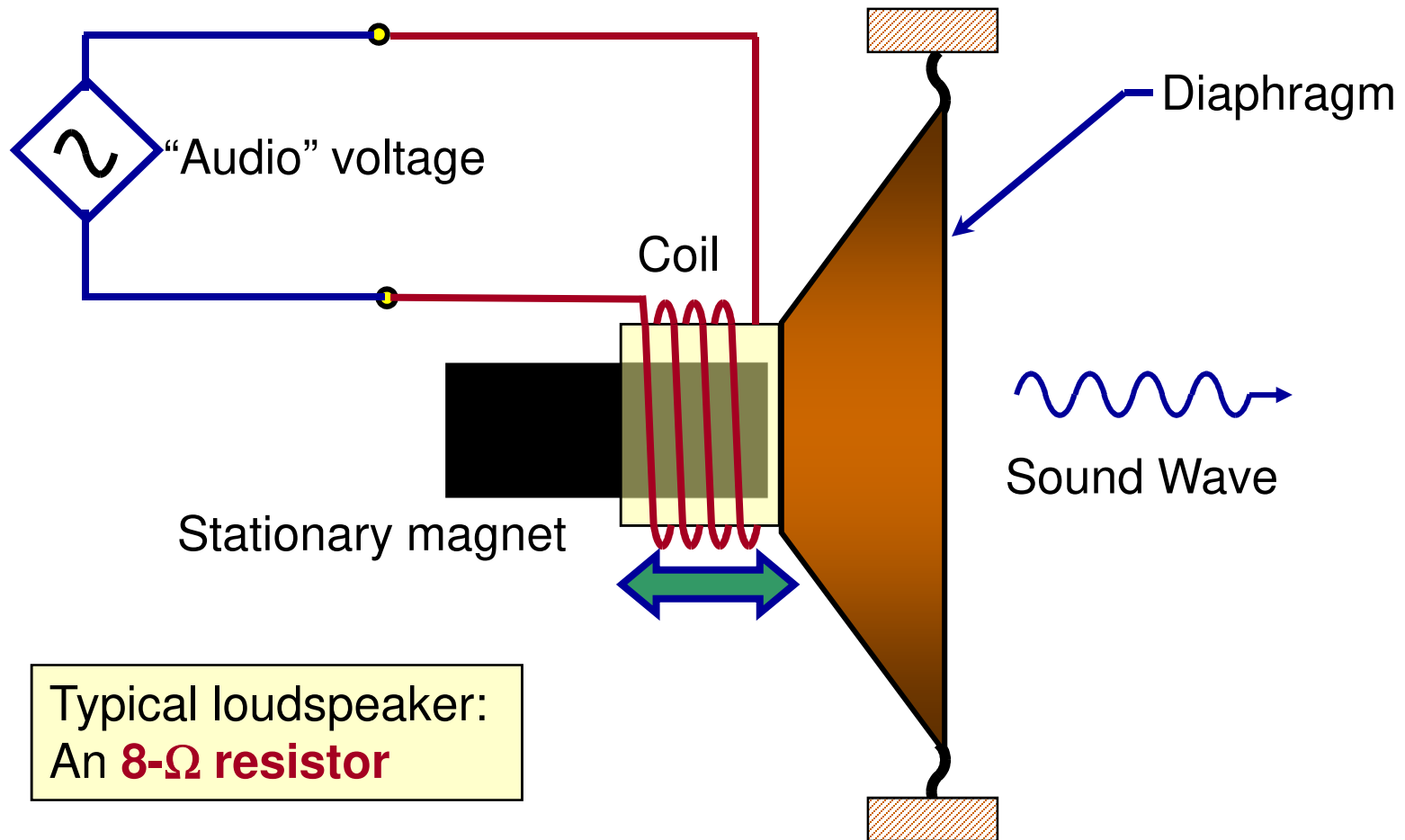


What's inside:



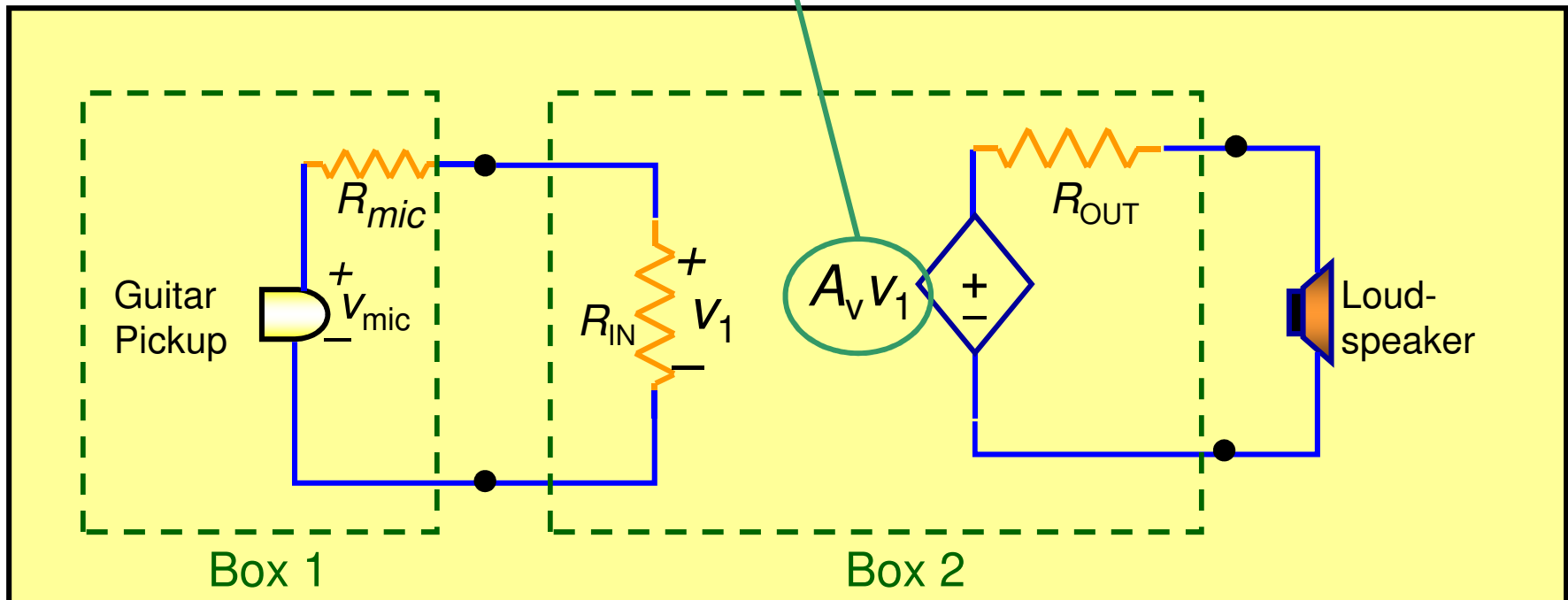
Como funciona um altifalante

How does a loudspeaker work?



Exercício: determinar o ganho do amplificador áudio

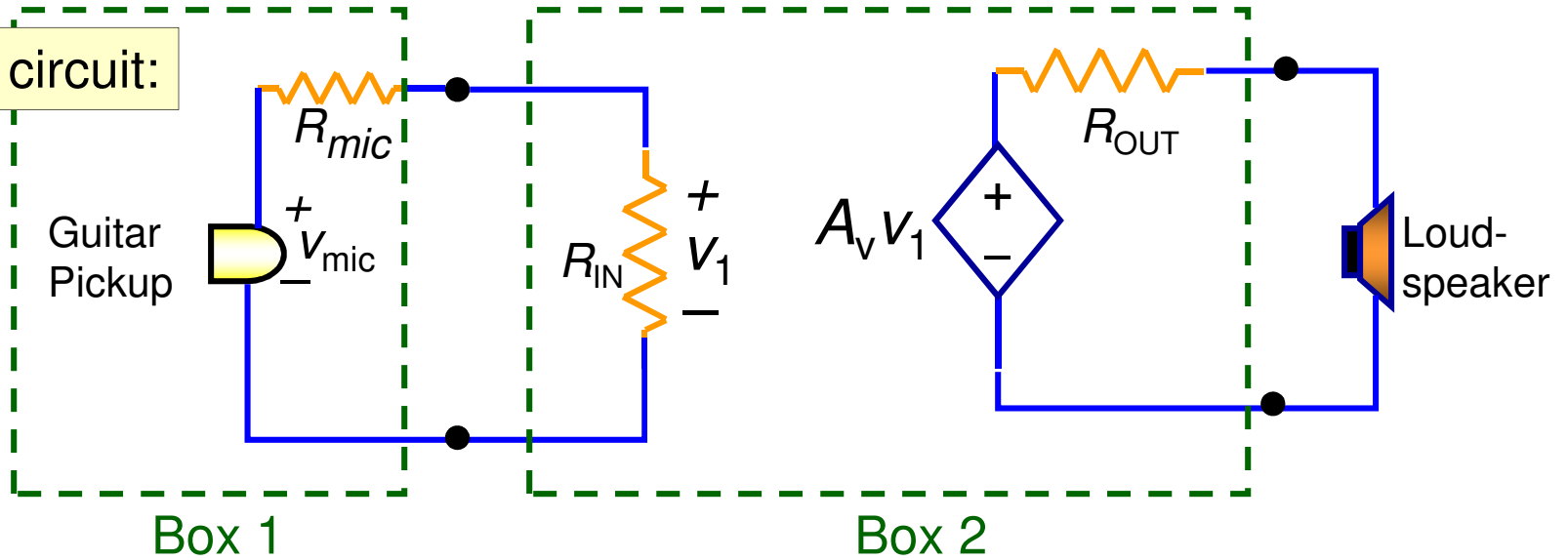
Question: Determine the value of A_v if the amplifier must deliver **10 W** of power to the loudspeaker.



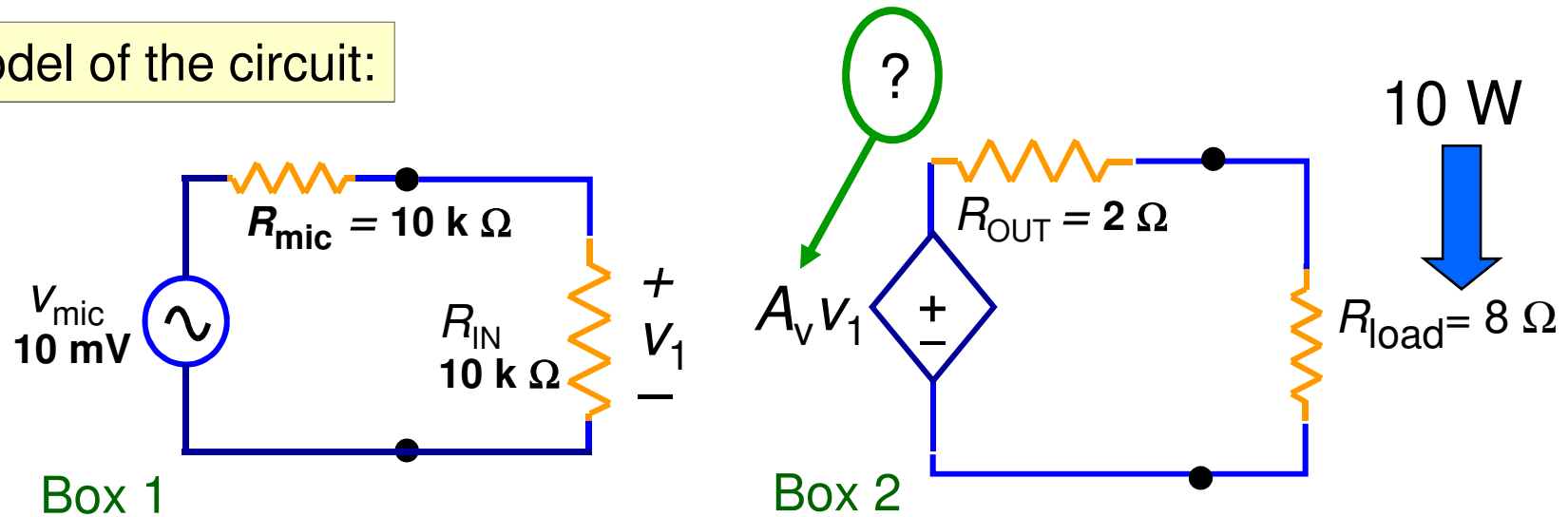
Parameters: $R_{mic} = 10 \text{ k}\Omega$ $R_{IN} = 10 \text{ k}\Omega$ $R_{OUT} = 2 \Omega$

Exercício: determinar o ganho do amplificador áudio

Original circuit:

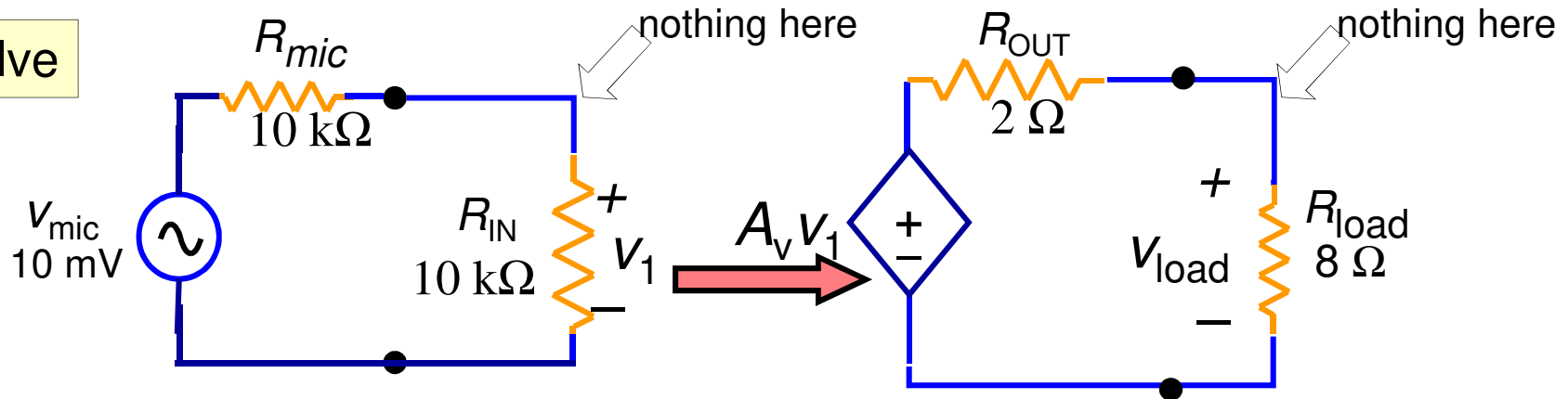


Model of the circuit:



Exercício: determinar o ganho do amplificador áudio

Solve



- Find v_1 using **voltage division**:

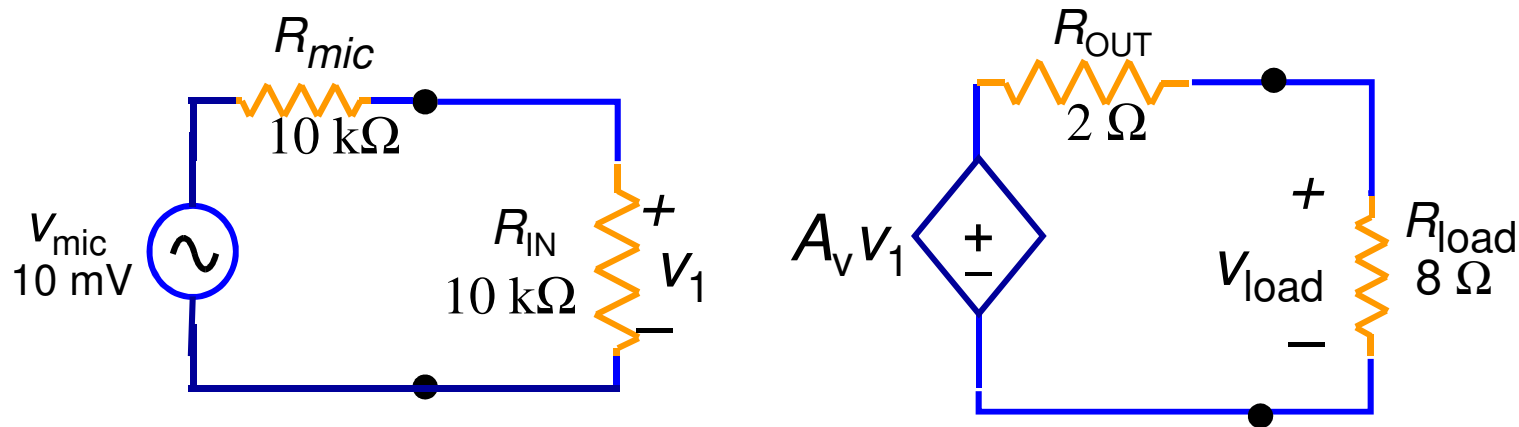
$$v_1 = v_{\text{mic}} \frac{R_{\text{IN}}}{R_{\text{mic}} + R_{\text{IN}}} = 10 \text{ mV} \frac{10 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega} = 5 \text{ mV}$$

This voltage is transferred to the dependent source as $A_v v_1$

- Find v_{load} using **voltage division**:

$$v_{\text{load}} = A_v v_1 \frac{R_{\text{load}}}{R_{\text{OUT}} + R_{\text{load}}} = A_v v_1 \frac{8 \Omega}{2 \Omega + 8 \text{ k}\Omega} = 0.8 A_v (5 \text{ mV})$$

Exercício: determinar o ganho do amplificador áudio



$$v_{\text{load}} = 0.8 A_v (5 \text{ mV}) = 4 A_v \text{ mV}$$

- Find the power into the loudspeaker load:

$$\begin{aligned} P_{\text{load}} &= v_{\text{load}} i_{\text{load}} = (v_{\text{load}})^2 / R_{\text{load}} \\ &= (4 \text{ mV})^2 A_v^2 / (8 \Omega) = 2 \times 10^{-6} A_v^2 \end{aligned}$$

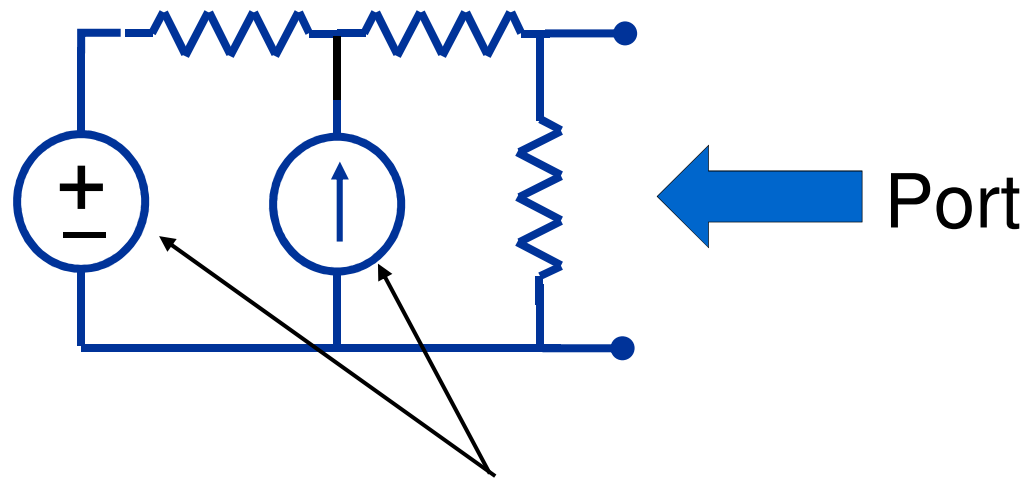
- Finally, compute the A_v required if $P_{\text{load}} = 10 \text{ W}$:

$$A_v = \sqrt{P_{\text{load}} (2 \times 10^{-6})} = \sqrt{(10 \text{ W}) / (2 \times 10^{-6})} \approx 2240$$

Equivalente de Thévenin de circuitos com fontes dependentes

Equivalente de Thévenin de circuitos com fontes independentes

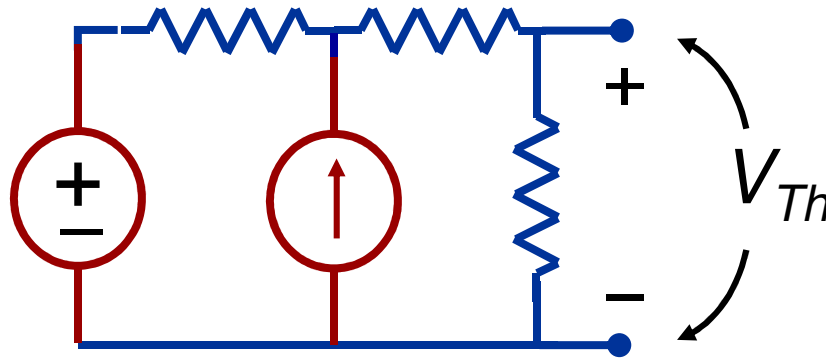
Up until now ... there were resistors and independent sources only



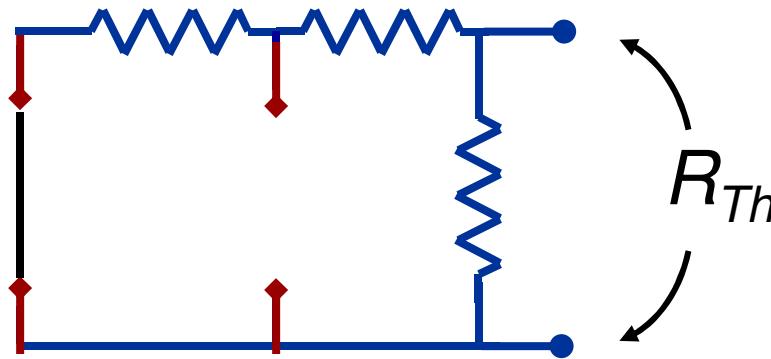
Resistors and Independent Sources Only

Determinar o equivalente de Thévenin de circuitos com fontes independentes

- Find Open Circuit Voltage V_{Th}

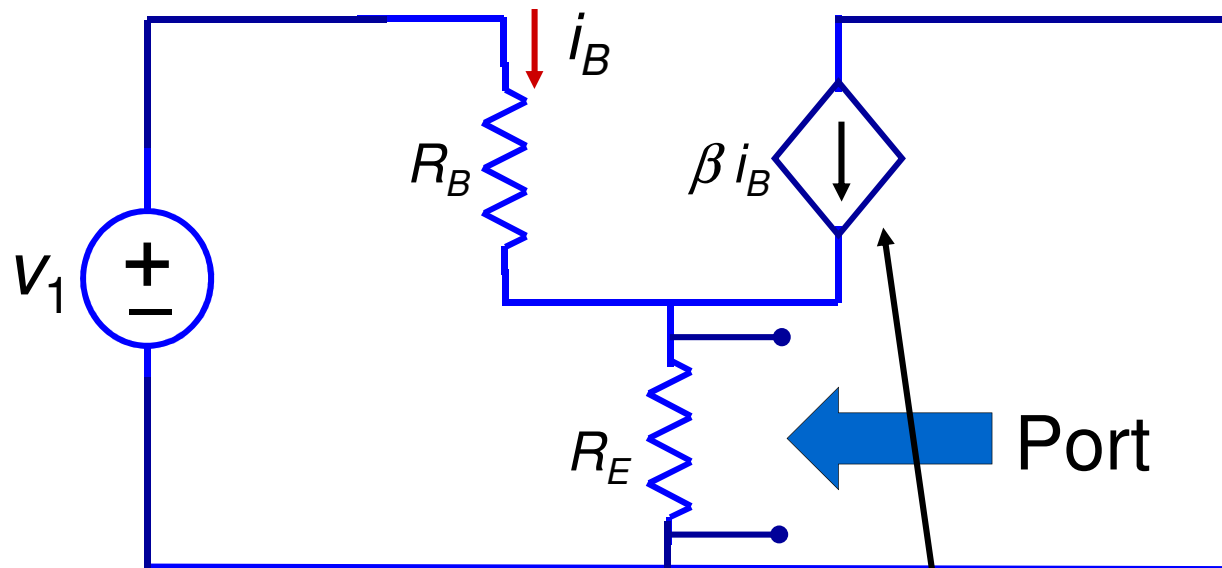


- Set sources to zero
- Find net resistance R_{Th} seen at the port



Qual o procedimento quando existem fontes dependentes no circuito?

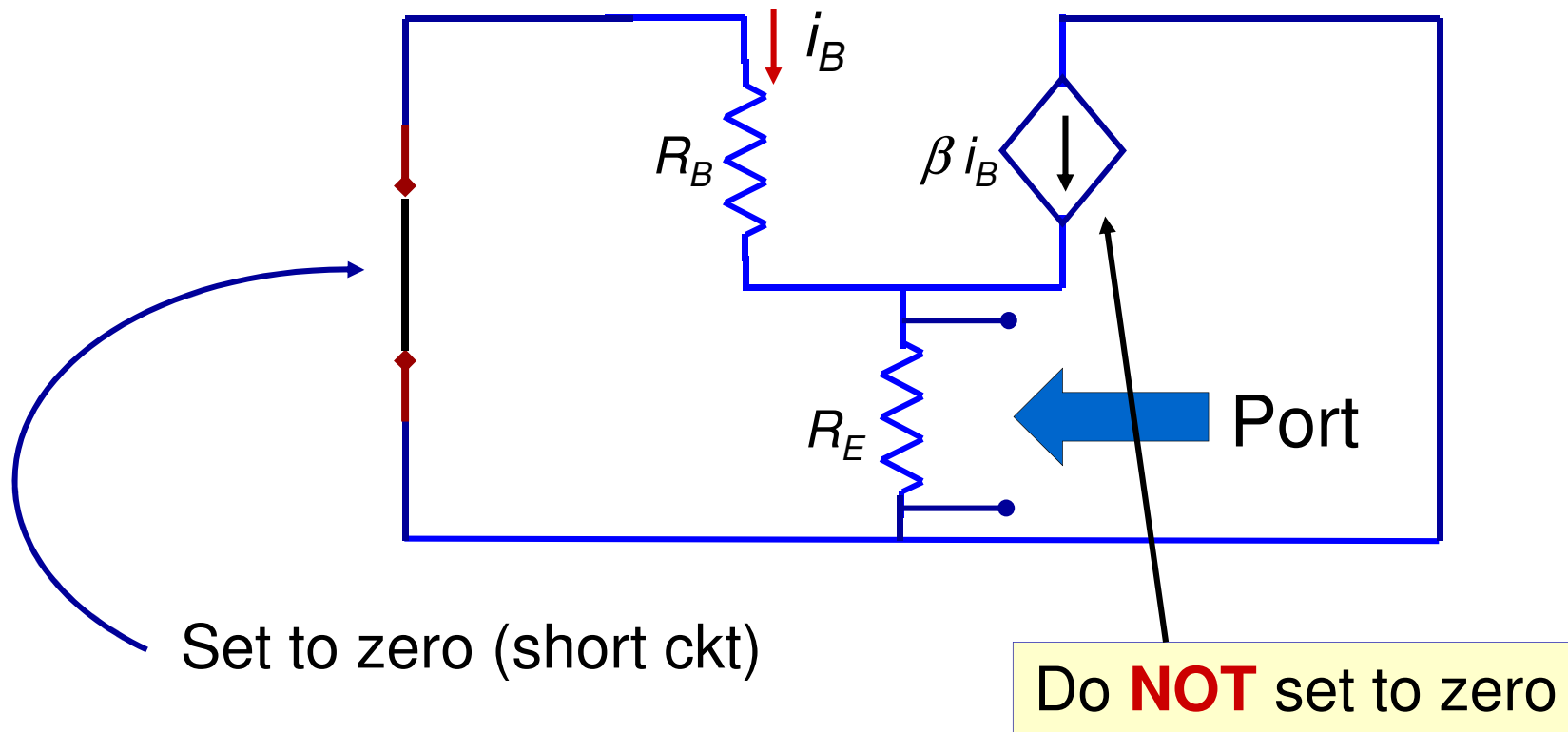
Example



Do **NOT** set to zero

Qual o procedimento quando existem fontes dependentes no circuito?

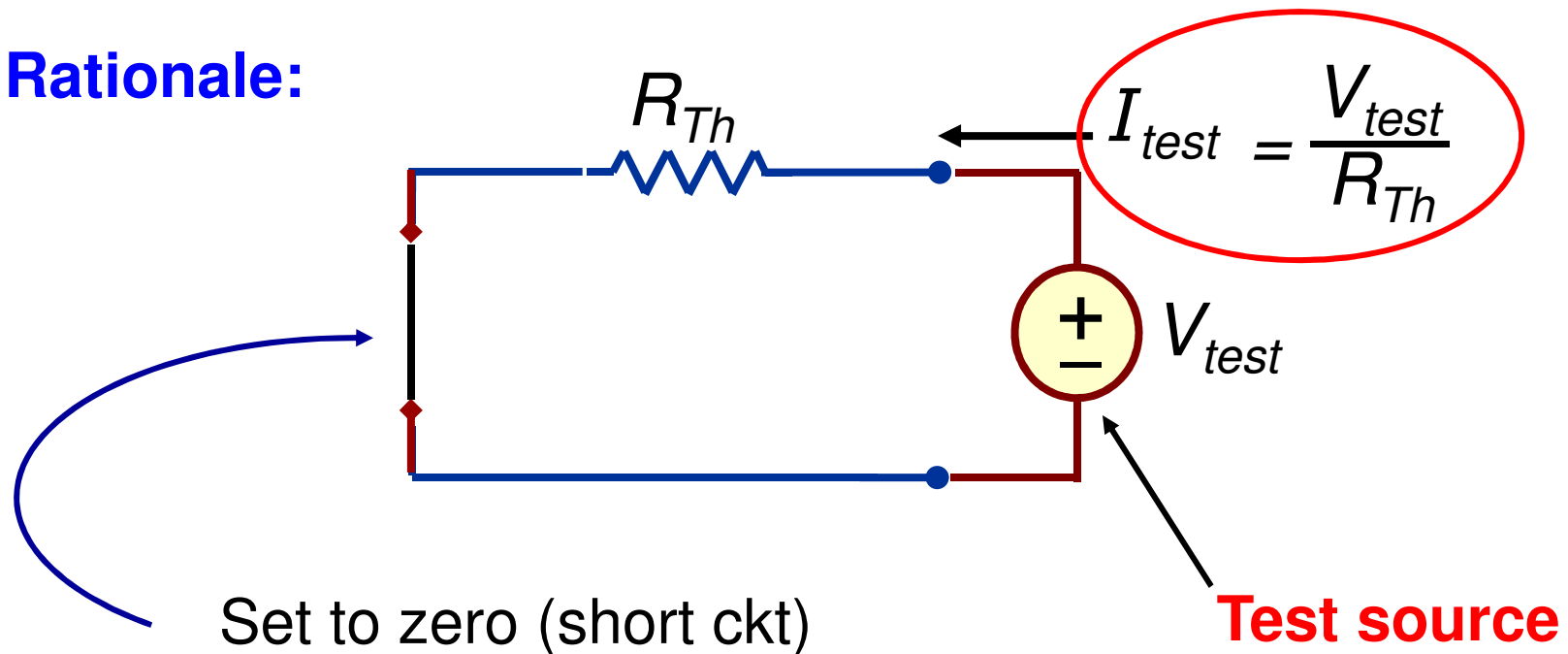
Example



Equivalente de Thevenin de circuitos com fontes dependentes

Dependent Source: **Must** Use “Test Source” Method to find R_{Th}

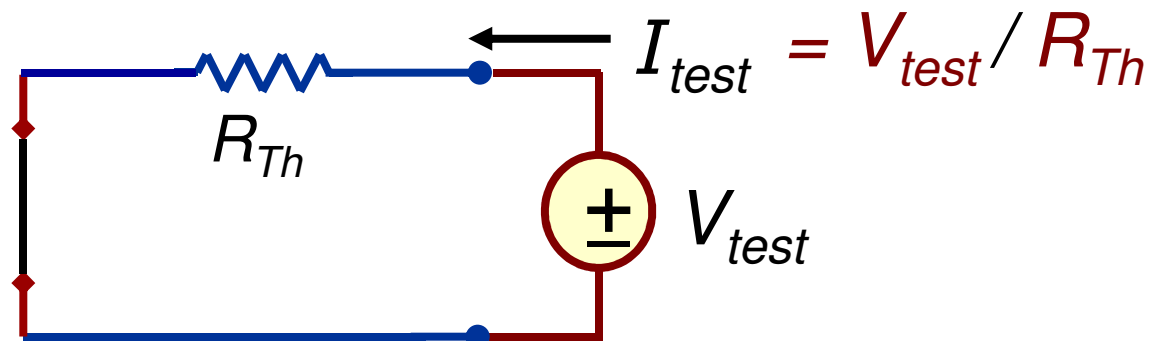
Rationale:



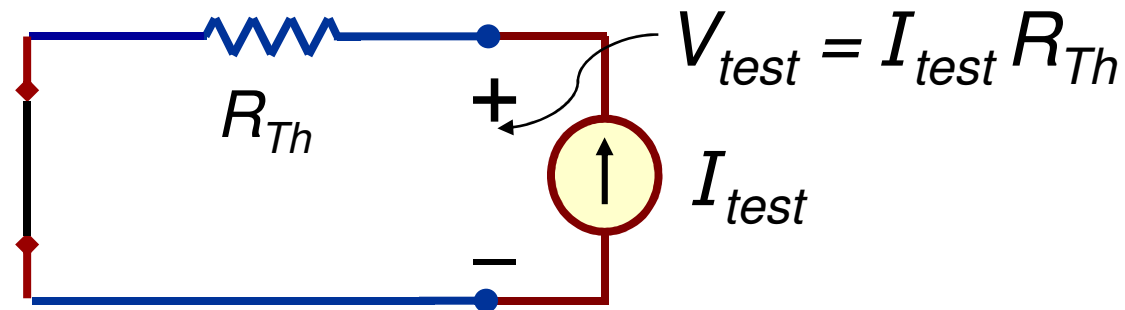
Equivalente de Thevenin de circuitos com fontes dependentes

In the Test Source method: $R_{Th} = \frac{V_{test}}{I_{test}}$

Method A

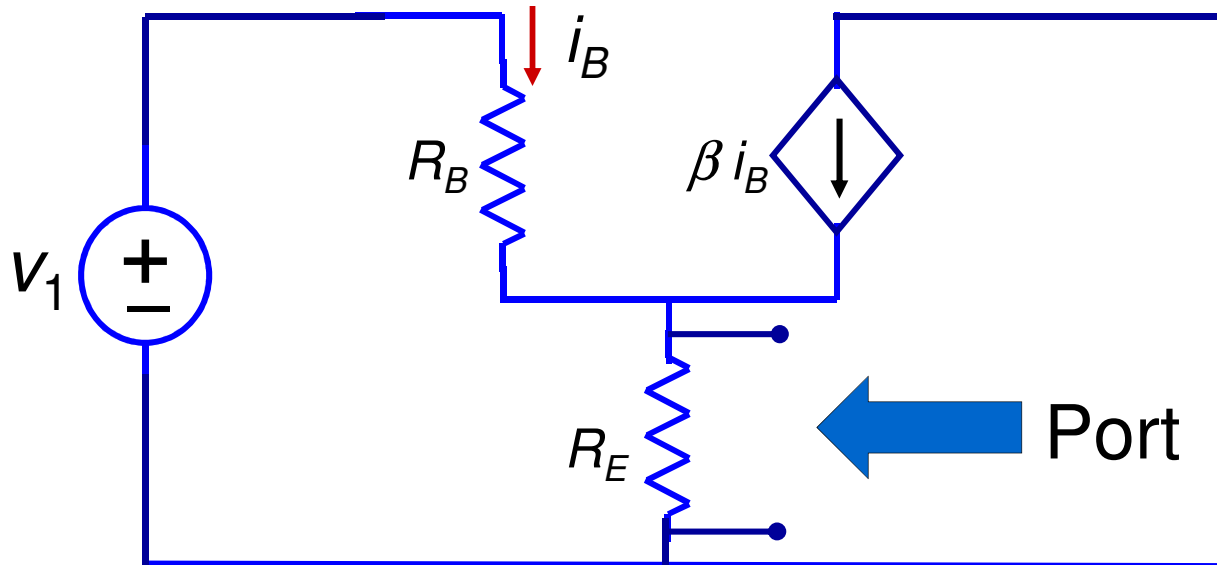


Method B



Equivalente de Thévenin de circuitos com fontes dependentes

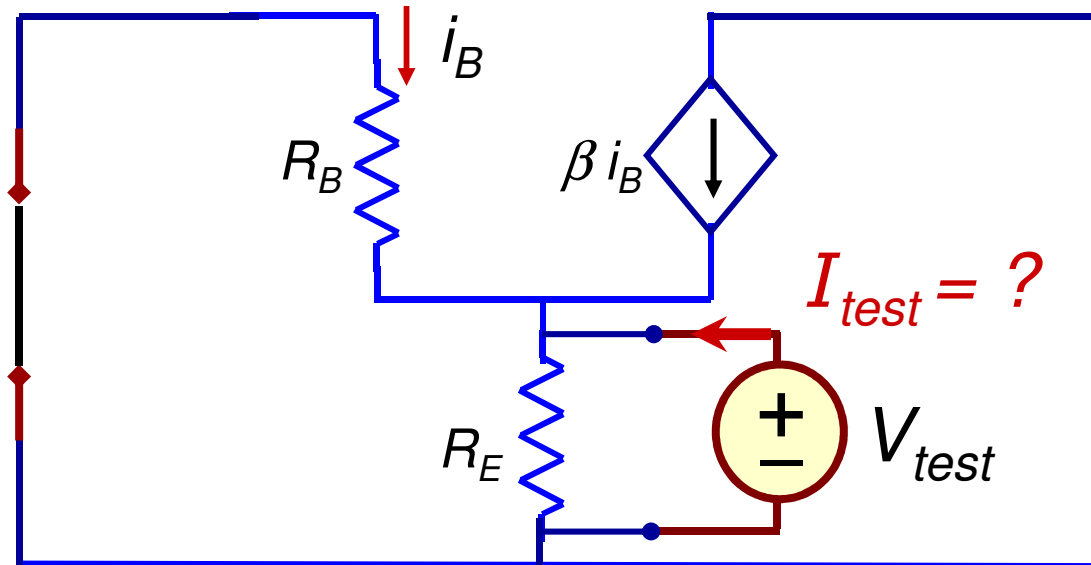
Circuit with one independent source and one **dependent** source



Equivalente de Thevenin de circuitos com fontes dependentes

Dependent Source: **Must** Use “Test Source” Method to find R_{Th}

Circuit with *independent* source set to zero



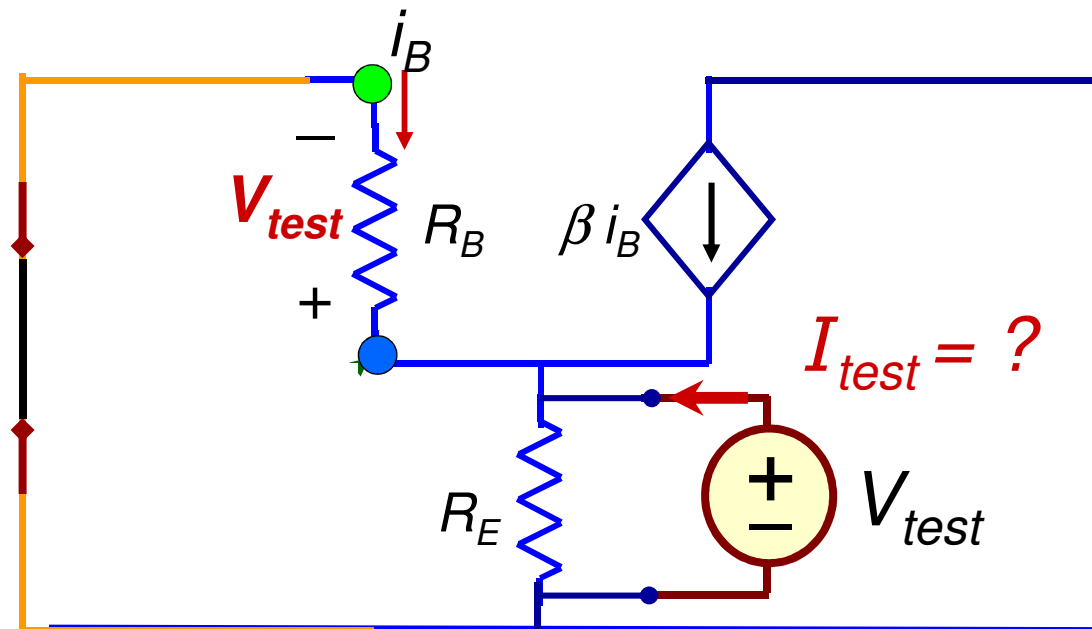
- Solve the circuit for I_{test}
- Compute V_{test} / I_{test} to find R_{Th}

Equivalente de Thevenin de circuitos com fontes dependentes

Dependent Source: **Must** Use “Test Source” Method to find R_{Th}

Apply KVL:

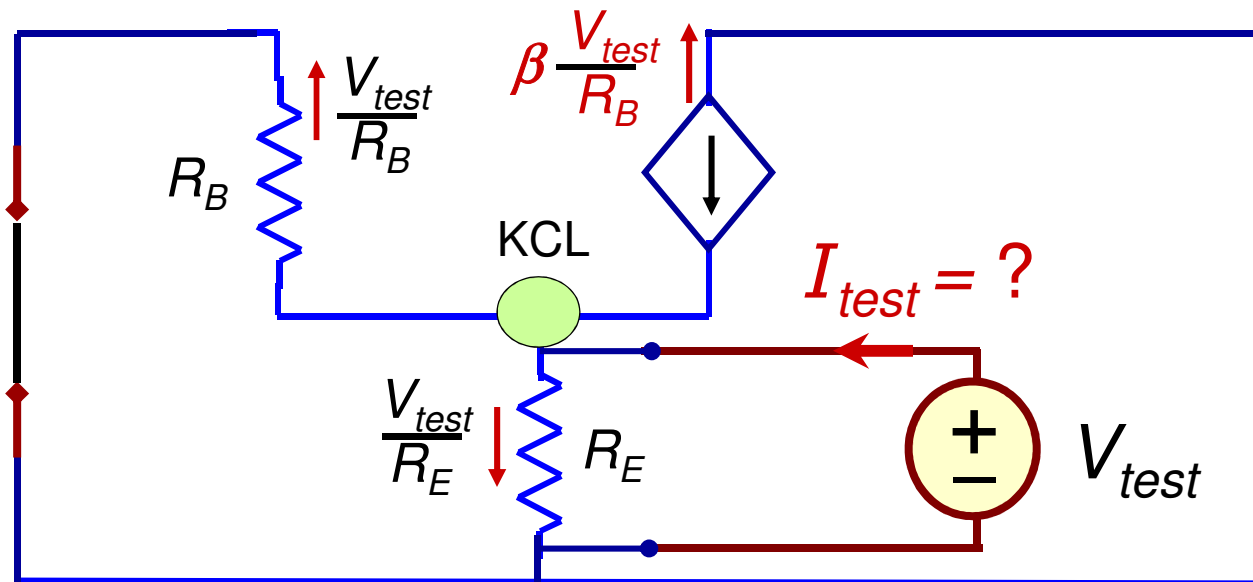
$$i_B = -\frac{V_{test}}{R_B}$$



Equivalente de Thevenin de circuitos com fontes dependentes

Dependent Source: **Must** Use “Test Source” Method to find R_{Th}

Apply KCL:

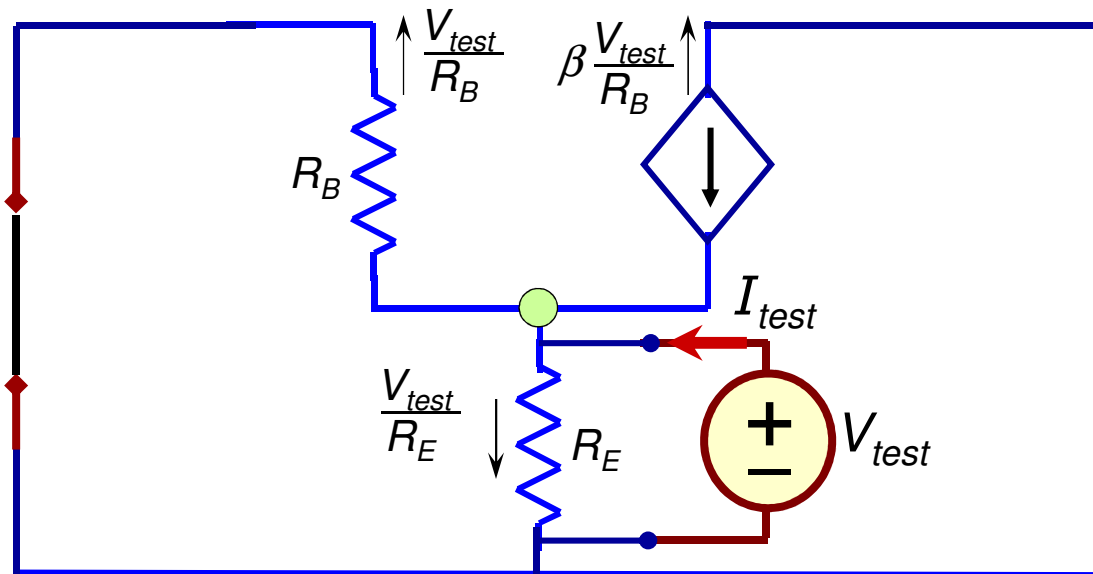


$$I_{test} = \frac{V_{test}}{R_B} + \beta \frac{V_{test}}{R_B} + \frac{V_{test}}{R_E} = V_{test} \left(\frac{1}{R_B} + \frac{\beta}{R_B} + \frac{1}{R_E} \right)$$

Equivalente de Thévenin de circuitos com fontes dependentes

Dependent Source: **Must** Use “Test Source” Method to find R_{Th}

Solve for $R_{Th} = V_{test}/I_{test}$



$$I_{test} = V_{test} \left(\frac{1}{R_B} + \frac{\beta}{R_B} + \frac{1}{R_E} \right) \rightarrow V_{test} = \frac{I_{test}}{\frac{1}{R_B} + \frac{\beta}{R_B} + \frac{1}{R_E}}$$

Equivalente de Thevenin de circuitos com fontes dependentes

Dependent Source: Must Use “Test Source” Method to find R_{Th}

Let's look at the denominator... $R_1 || R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$

Resistors in Parallel

$$\frac{1}{\frac{1}{R_B} + \frac{\beta}{R_B} + \frac{1}{R_E}}$$

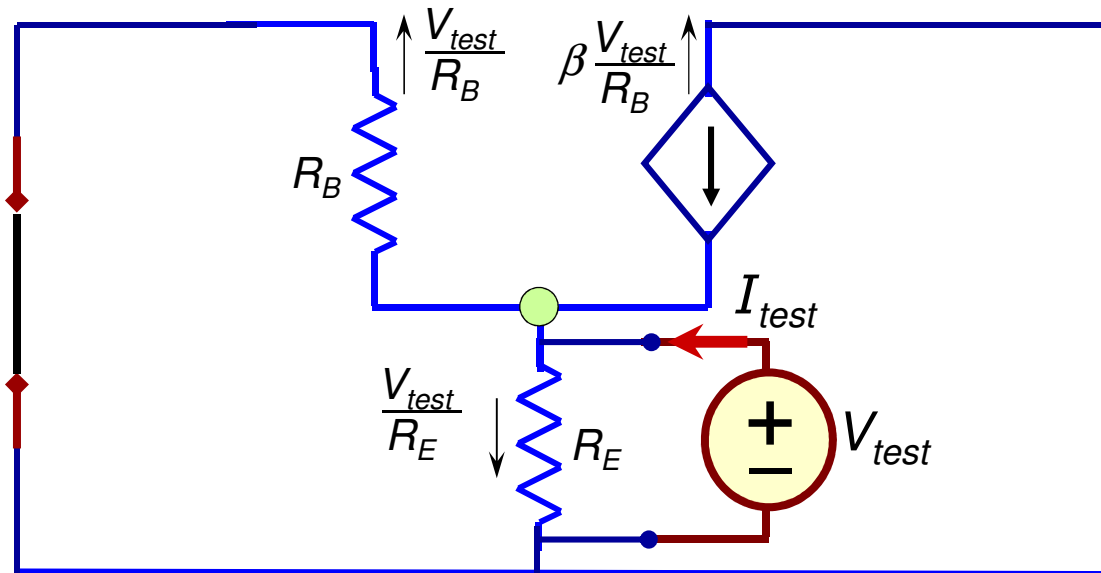
$$\frac{1}{\frac{\beta + 1}{R_B} + \frac{1}{R_E}}$$

$$= \frac{R_B}{\beta + 1} || R_E$$

Back to the main problem...

Equivalente de Thevenin de circuitos com fontes dependentes

Solve for $R_{Th} = V_{test}/I_{test}$

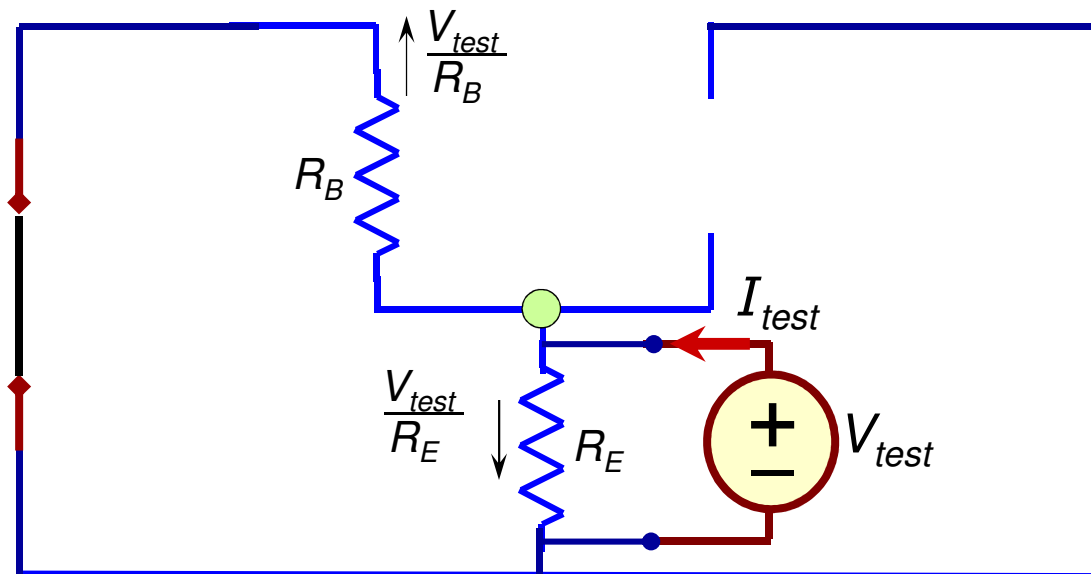


$$V_{test} = \frac{I_{test}}{\frac{1}{R_B} + \frac{\beta}{R_B} + \frac{1}{R_E}} = I_{test} \left(\frac{R_B}{\beta + 1} \parallel R_E \right)$$

$$R_{Th} = \frac{V_{test}}{I_{test}} = \frac{R_B}{\beta + 1} \parallel R_E$$

Equivalente de Thévenin de circuitos com fontes dependentes

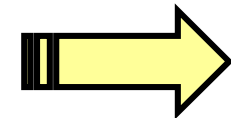
What happens if we erroneously set Dependent Source to zero?



$$R_{Th} = \frac{V_{test}}{I_{test}} = \cancel{R_B \parallel R_E}$$

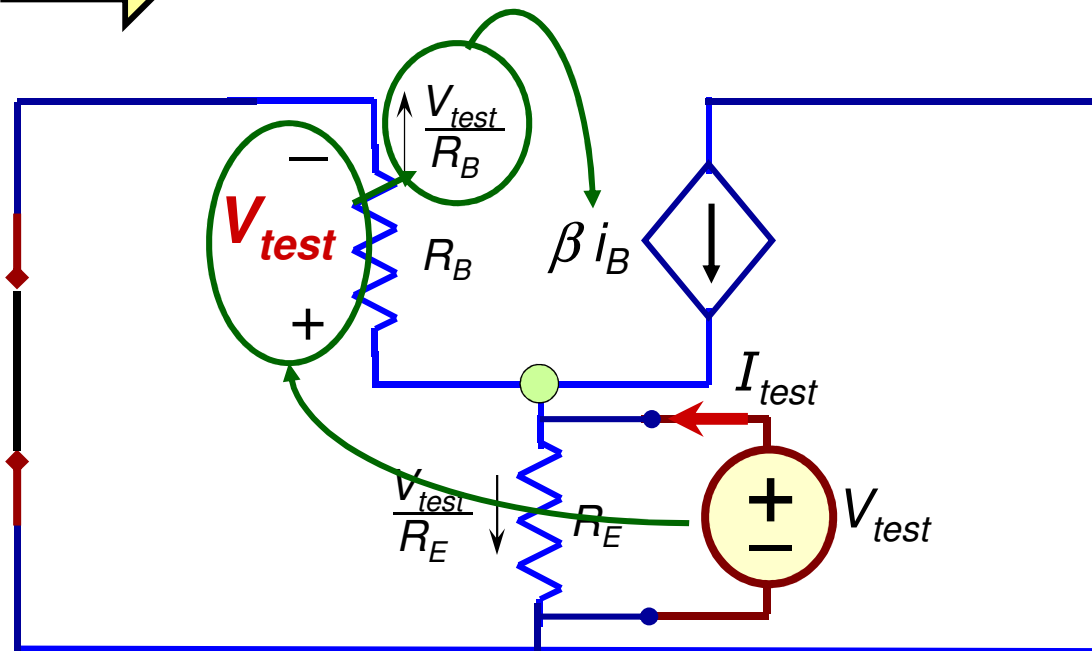
Wrong!

But why?



Equivalente de Thevenin de circuitos com fontes dependentes

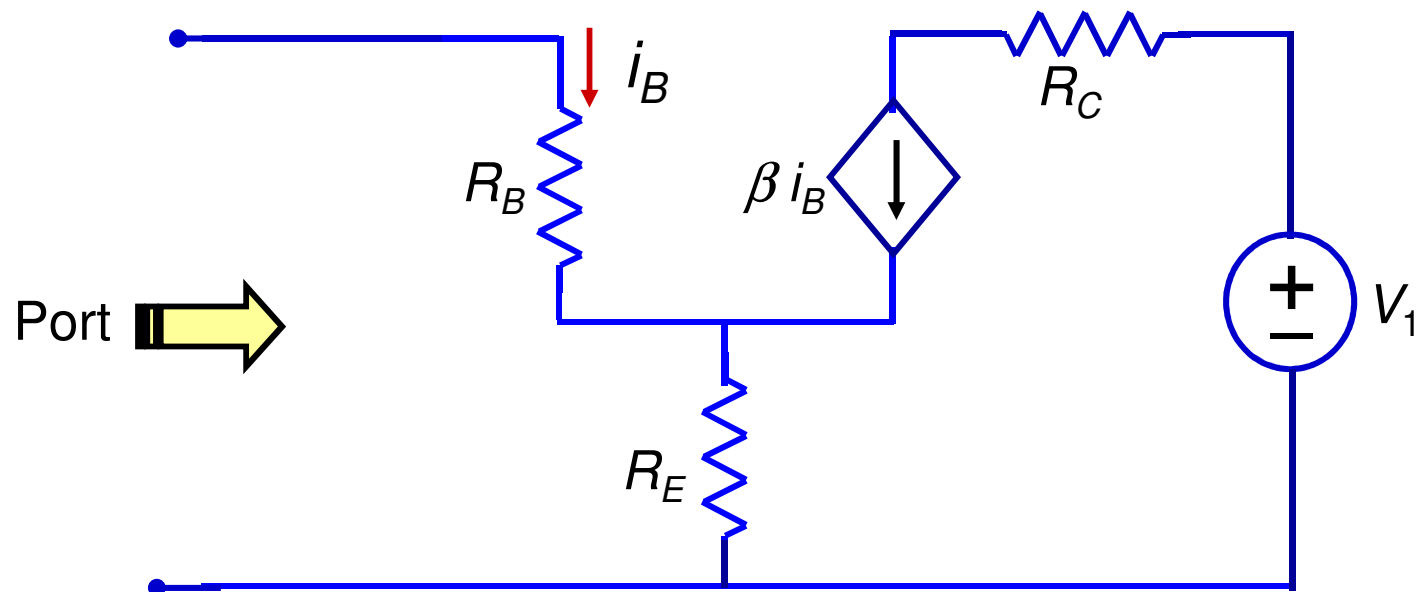
But why? 



- V_{test} sets the voltage across R_B
- V_{test} across R_B sets the value of i_B
- i_B sets the value of the dependent source

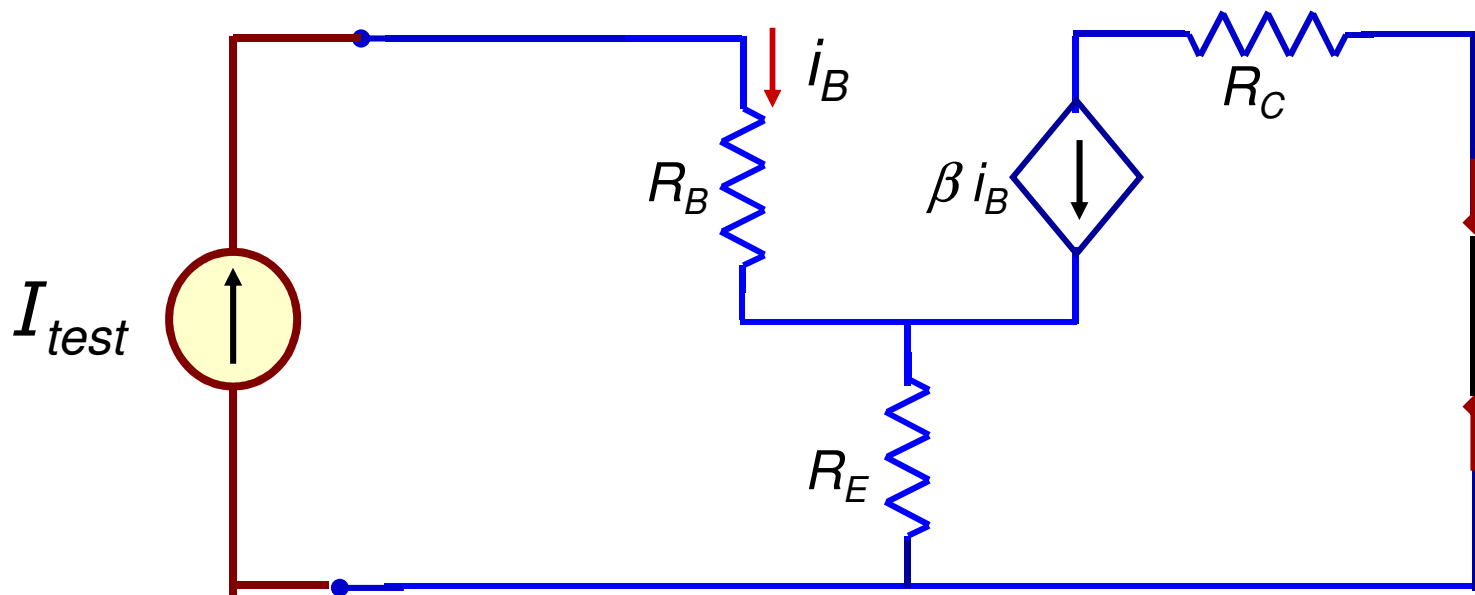
Equivalente de Thévenin de circuitos com fontes dependentes

Another Example: Find the Thévenin Equivalent Resistance of this circuit



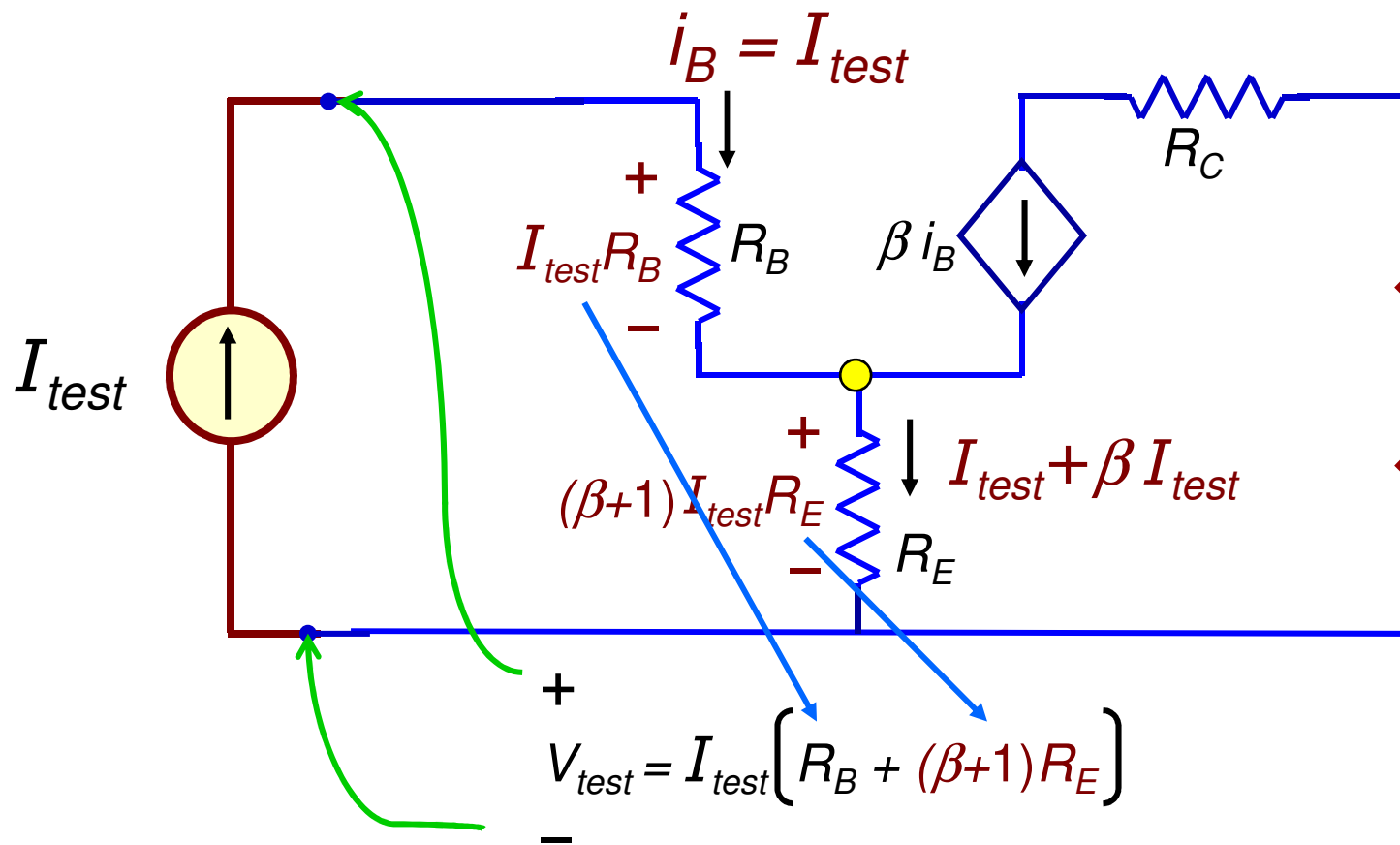
Equivalente de Thévenin de circuitos com fontes dependentes

Another Example: Find the Thévenin Equivalent Resistance of this circuit



- Set the independent source to zero
- Apply a test current source

Equivalente de Thévenin de circuitos com fontes dependentes

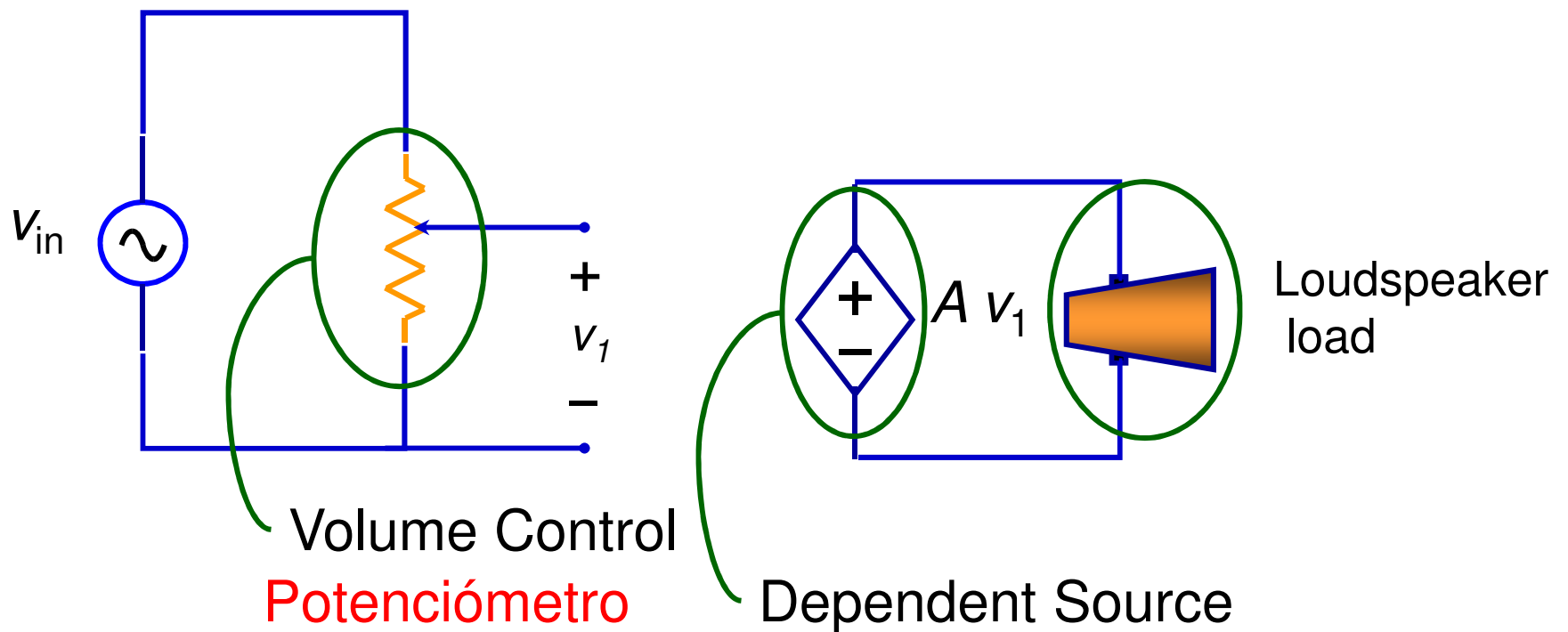


$$R_{Th} = \frac{V_{test}}{I_{test}} = R_B + (\beta + 1)R_E$$

Done!

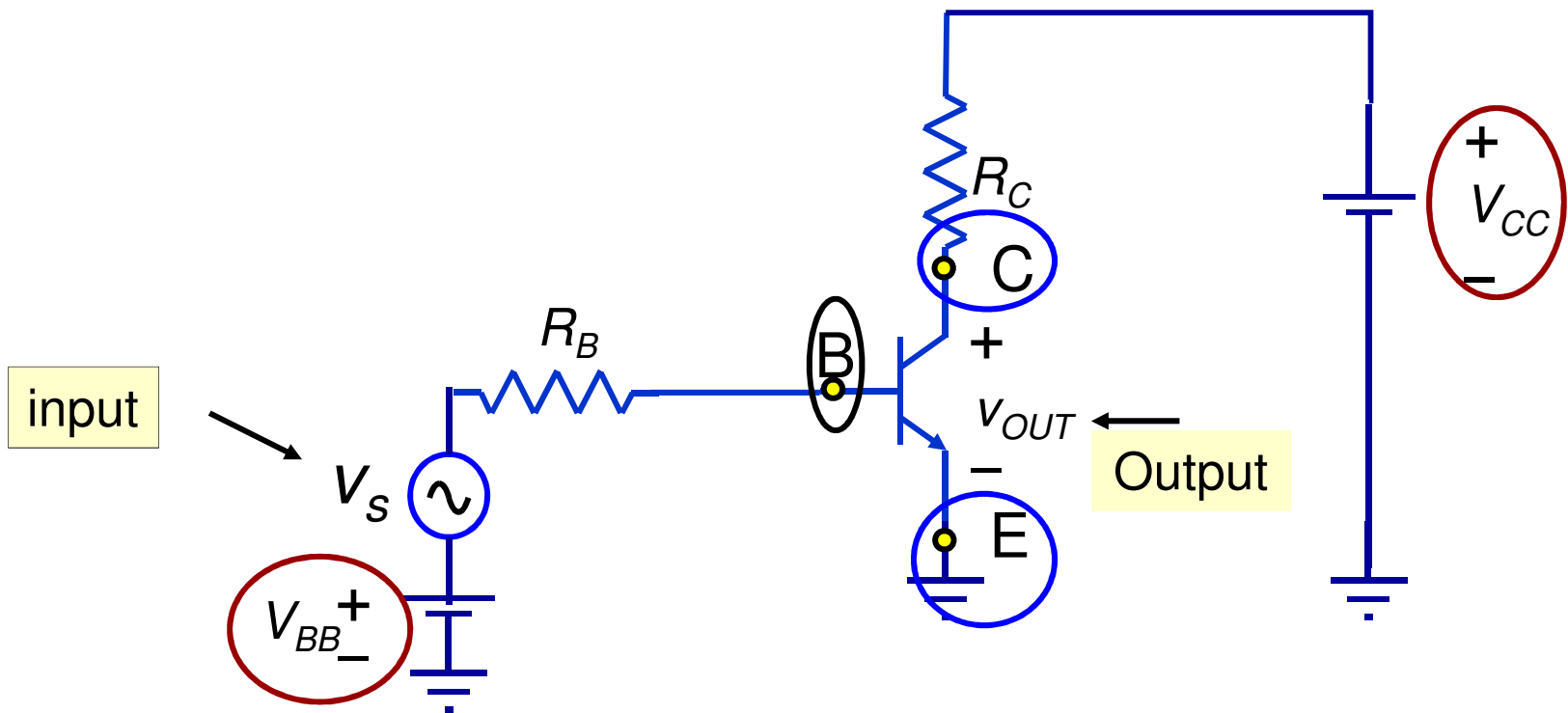
Equivalente de Thévenin de circuitos com fontes dependentes

Amplifier Volume Control



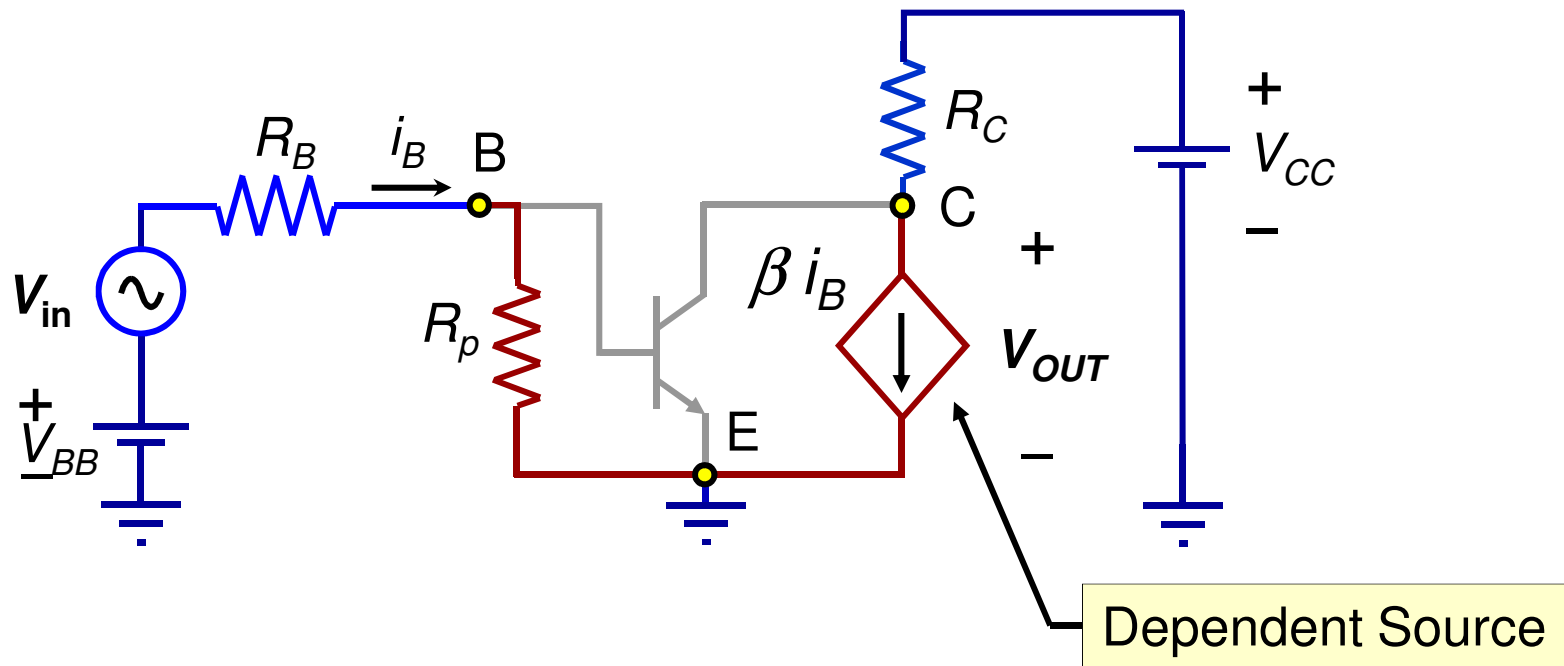
Equivalente de Thévenin de circuitos com fontes dependentes

Transistor Amplifier



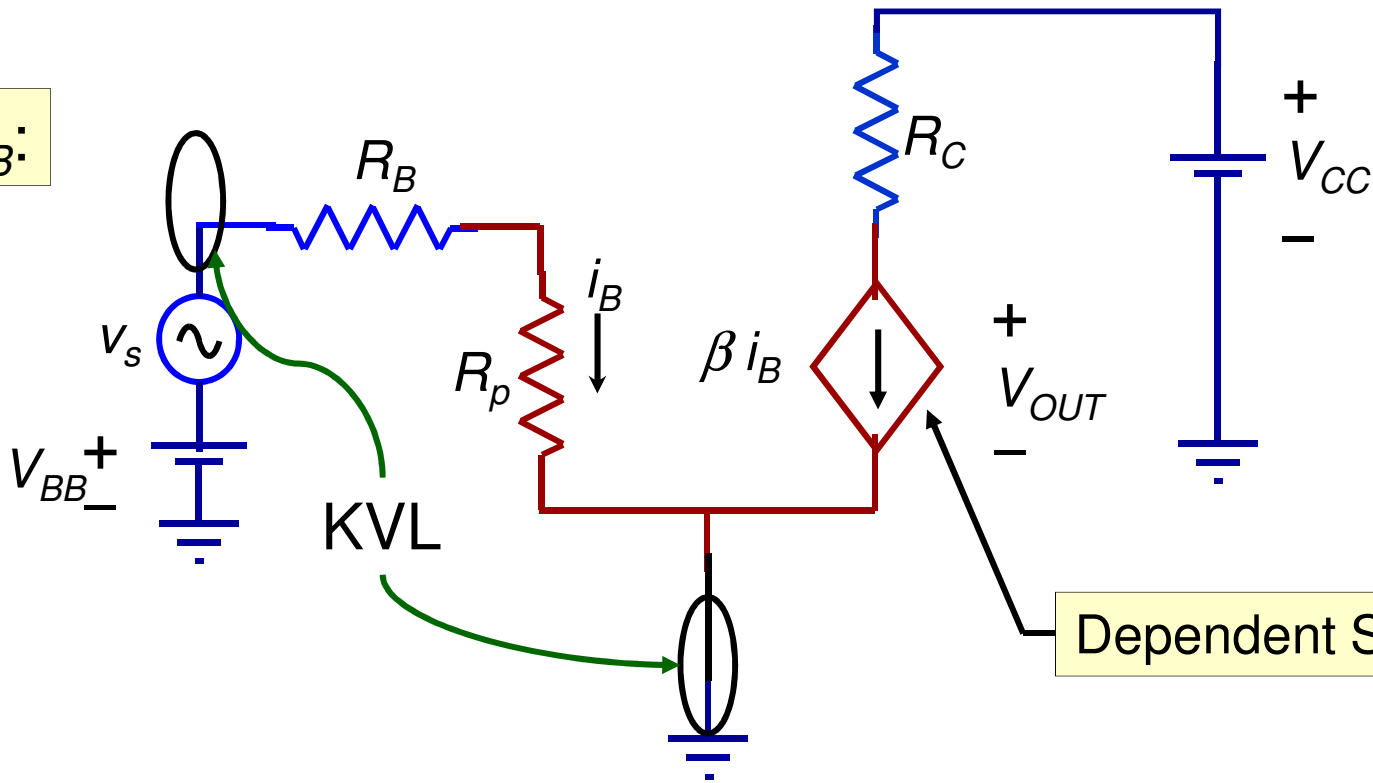
Equivalente de Thévenin de circuitos com fontes dependentes

Substitute the transistor model:



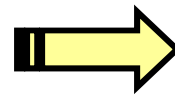
Equivalente de Thévenin de circuitos com fontes dependentes

Find i_B :



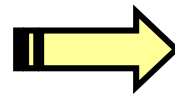
KVL:

$$V_{BB} + v_s = i_B (R_B + R_p)$$



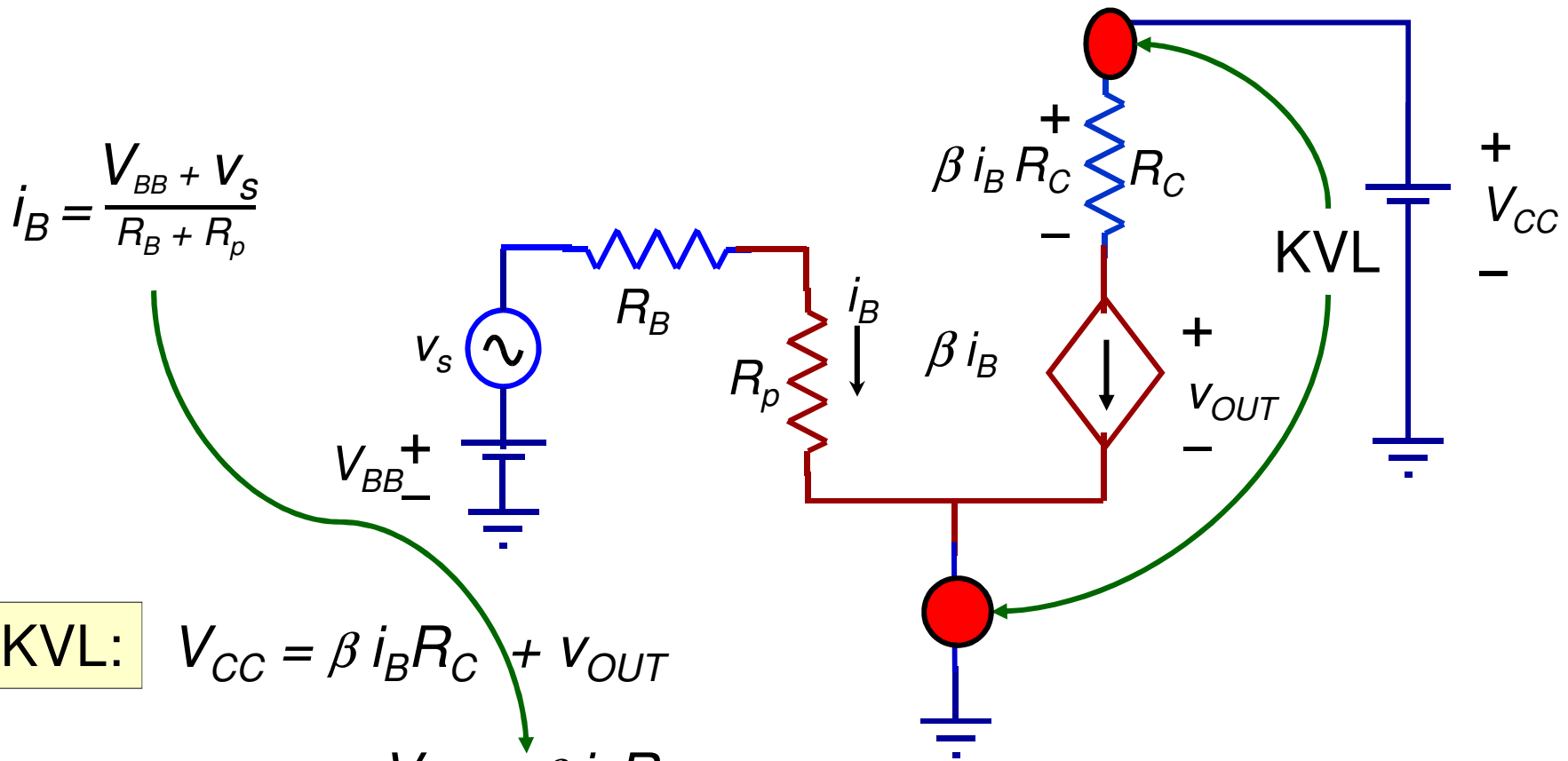
$$i_B = \frac{V_{BB} + v_s}{R_B + R_p}$$

We know i_B



Find v_{OUT}

Equivalente de Thévenin de circuitos com fontes dependentes



$$i_B = \frac{V_{BB} + V_S}{R_B + R_p}$$

KVL: $V_{CC} = \beta i_B R_C + V_{OUT}$

$$V_{OUT} = V_{CC} - \beta i_B R_C$$

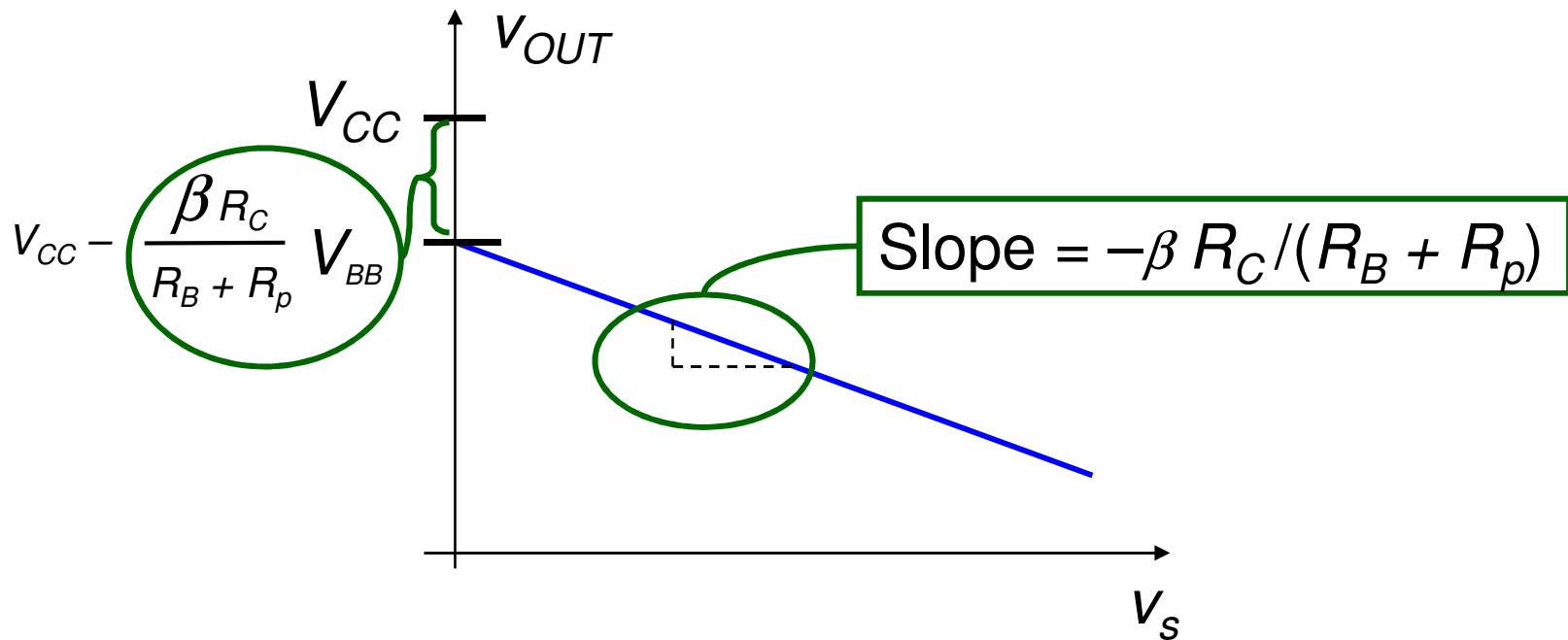
$$V_{OUT} = V_{CC} - \frac{\beta R_C}{R_B + R_p} (V_{BB} + V_S)$$

Gain Factor

Equivalente de Thévenin de circuitos com fontes dependentes

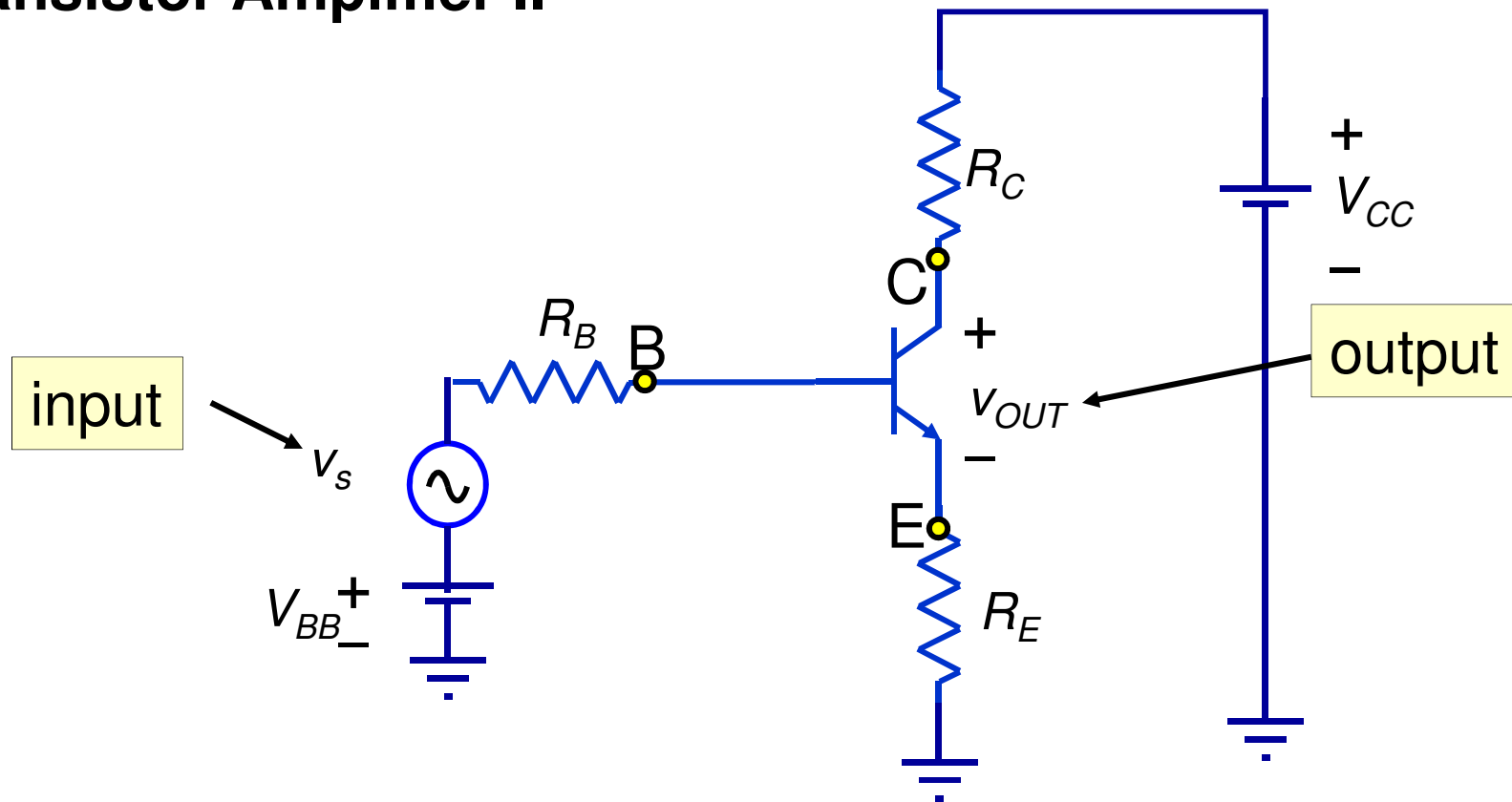
Gain Factor

$$V_{OUT} = V_{CC} - \frac{\beta R_C}{R_B + R_p} (V_{BB} + v_s)$$



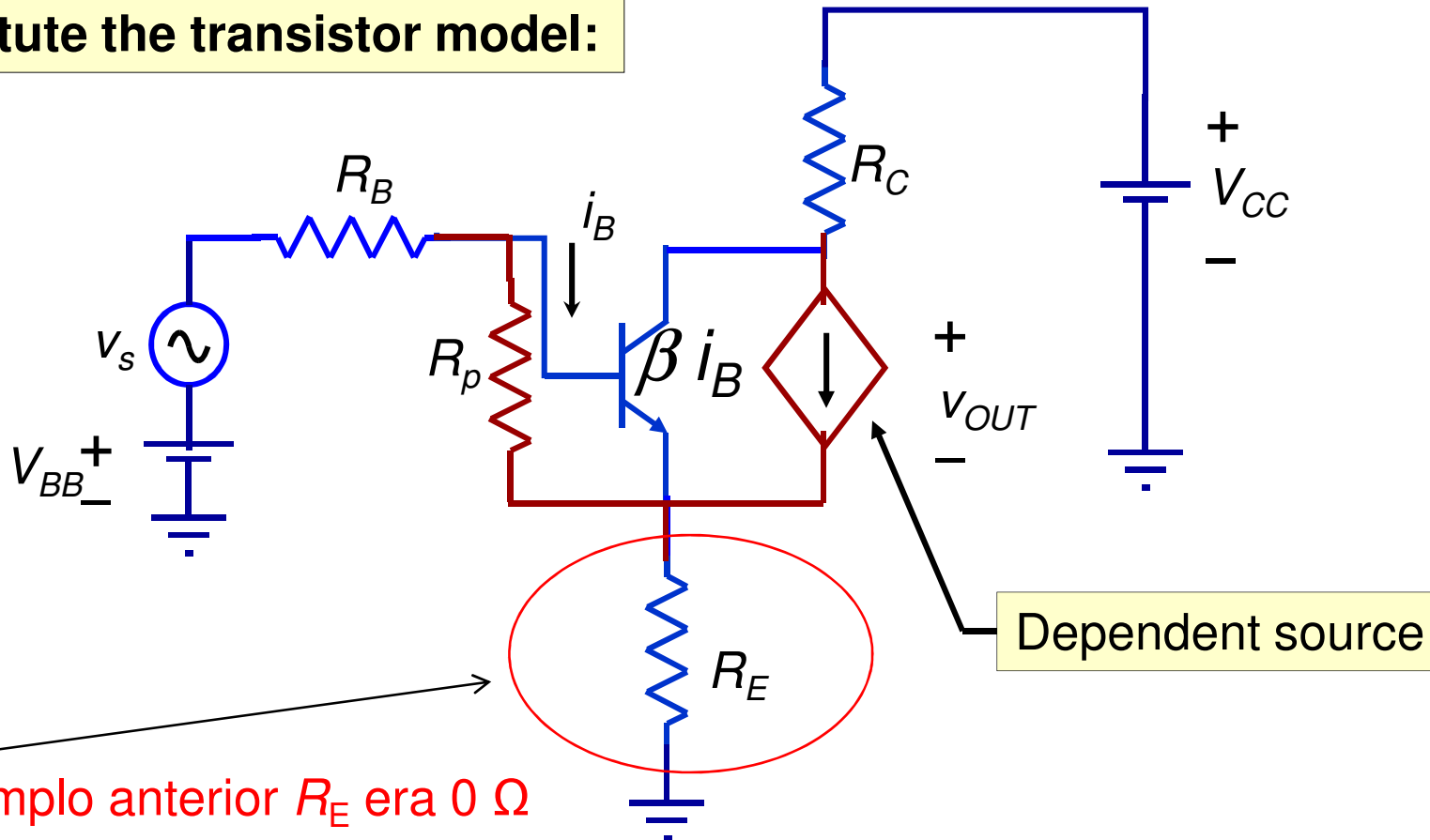
Equivalente de Thévenin de circuitos com fontes dependentes

Transistor Amplifier II



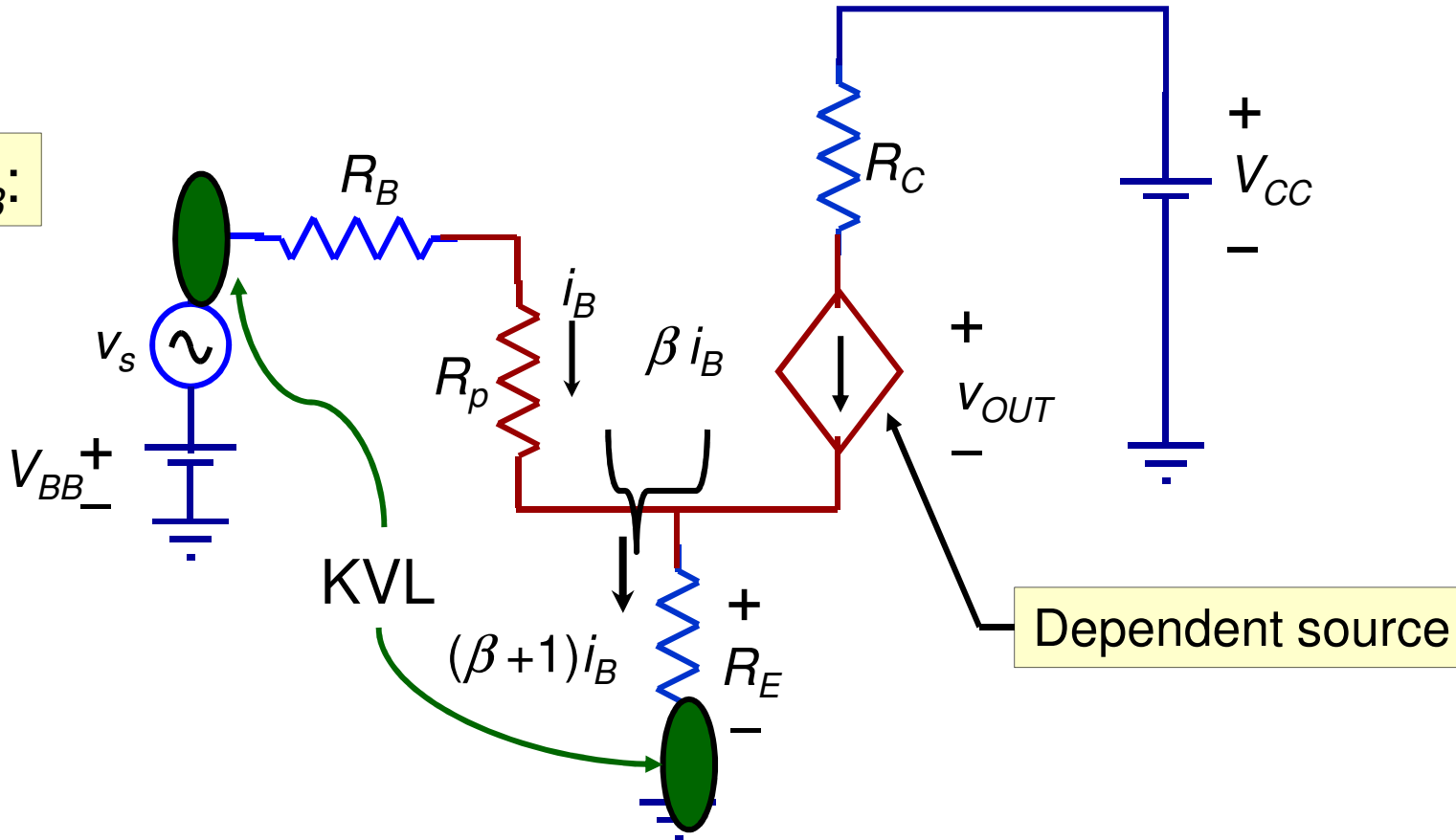
Equivalente de Thévenin de circuitos com fontes dependentes

Substitute the transistor model:



Equivalente de Thévenin de circuitos com fontes dependentes

Find i_B :

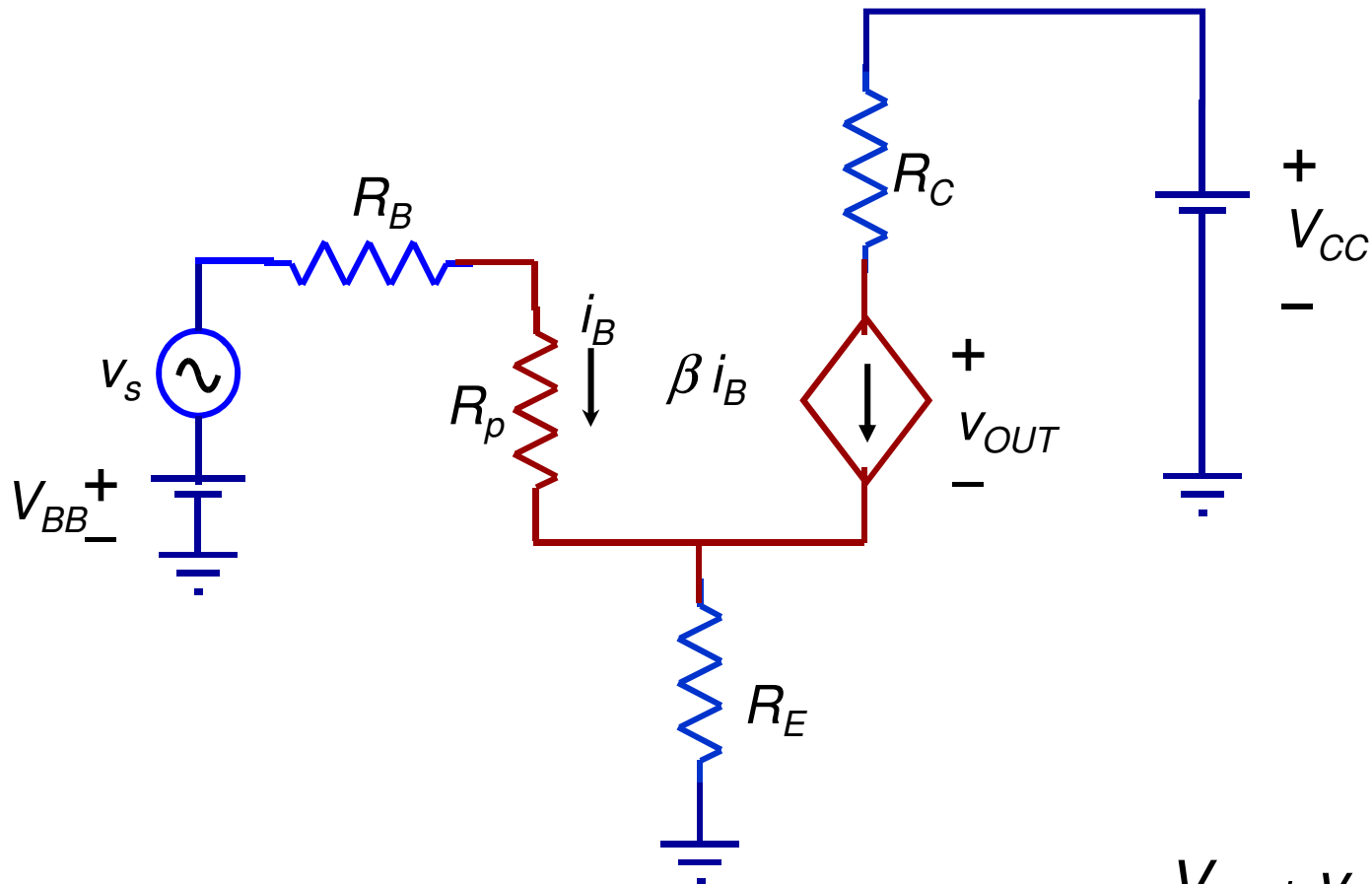


KVL:

$$V_{BB} + v_s = i_B (R_B + R_p) + (\beta + 1)i_B R_E$$

Drop across R_E

Equivalente de Thévenin de circuitos com fontes dependentes

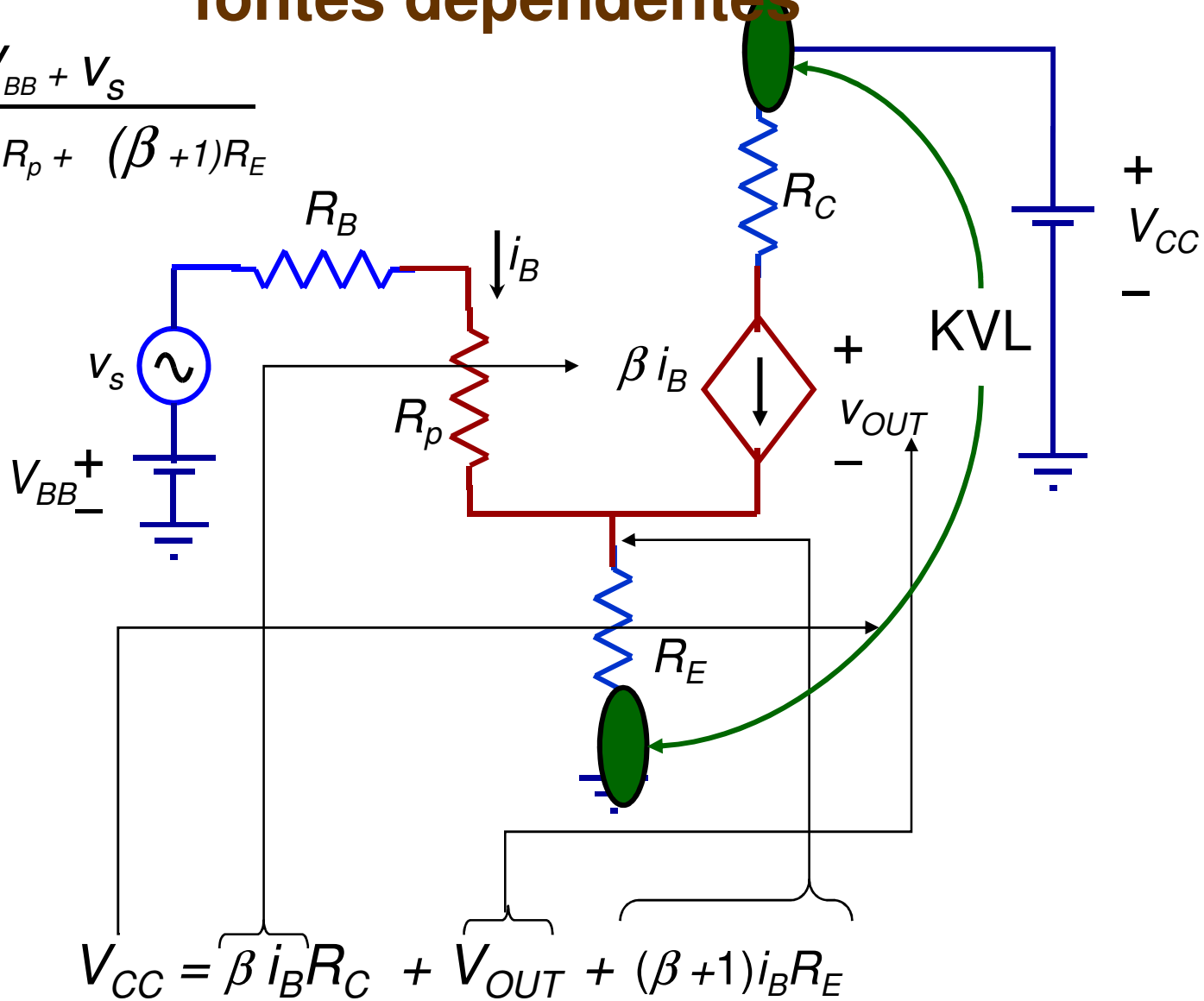


$$V_{BB} + v_s = i_B(R_B + R_p) + (\beta + 1)i_B R_E \quad \Rightarrow \quad i_B = \frac{V_{BB} + v_s}{R_B + R_p + (\beta + 1)R_E}$$

We know i_B \Rightarrow Find v_{OUT}

Equivalente de Thévenin de circuitos com fontes dependentes

$$i_B = \frac{V_{BB} + V_S}{R_B + R_p + (\beta + 1)R_E}$$



KVL:

$$V_{CC} = \beta i_B R_C + V_{OUT} + (\beta + 1) i_B R_E$$

Equivalente de Thévenin de circuitos com fontes dependentes

$$i_B = \frac{V_{BB} + V_S}{R_B + R_p + (\beta + 1)R_E}$$

(from input loop)

$$V_{CC} = \beta i_B R_C + V_{OUT} + (\beta + 1)i_B R_E$$

(from output loop)

Solve for v_{OUT}

$$V_{OUT} = V_{CC} - [\beta i_B R_C + (\beta + 1)i_B R_E]$$

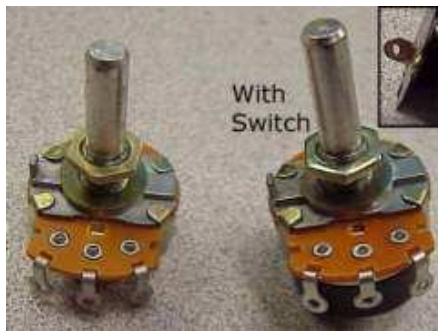
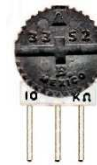
$$= V_{CC} - i_B [\beta R_C + (\beta + 1)R_E]$$

Gain Factor

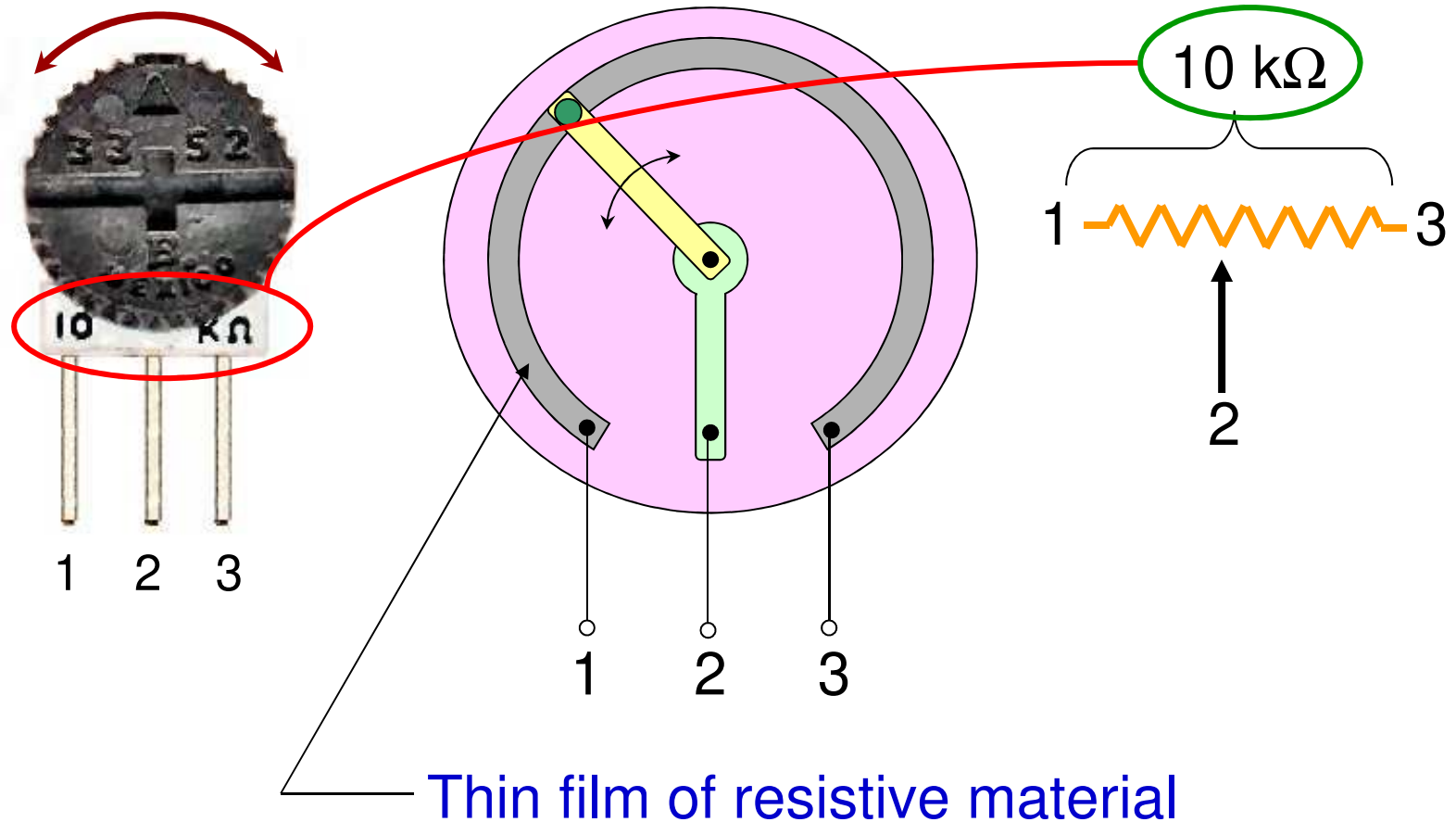
$$V_{OUT} = V_{CC} - (V_{BB} + V_S) \frac{\beta R_C + (\beta + 1)R_E}{R_B + R_p + (\beta + 1)R_E}$$

Nota suplementar sobre o potenciómetro

Resistências variáveis potenciômetros e reóstatos

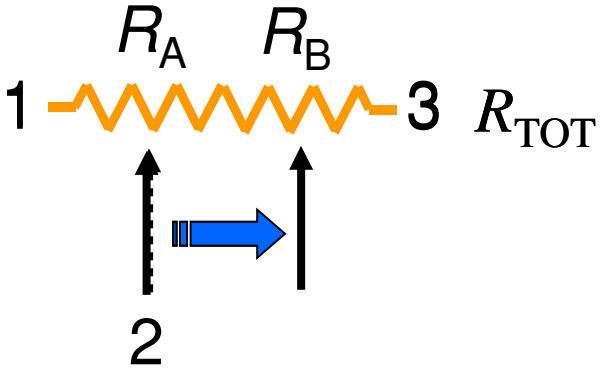
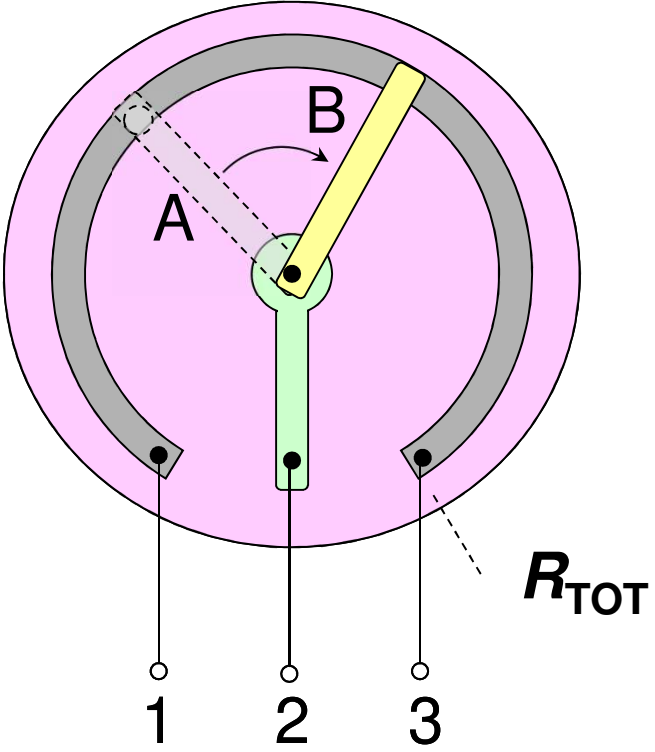


Como funciona um potenciômetro? How it works....



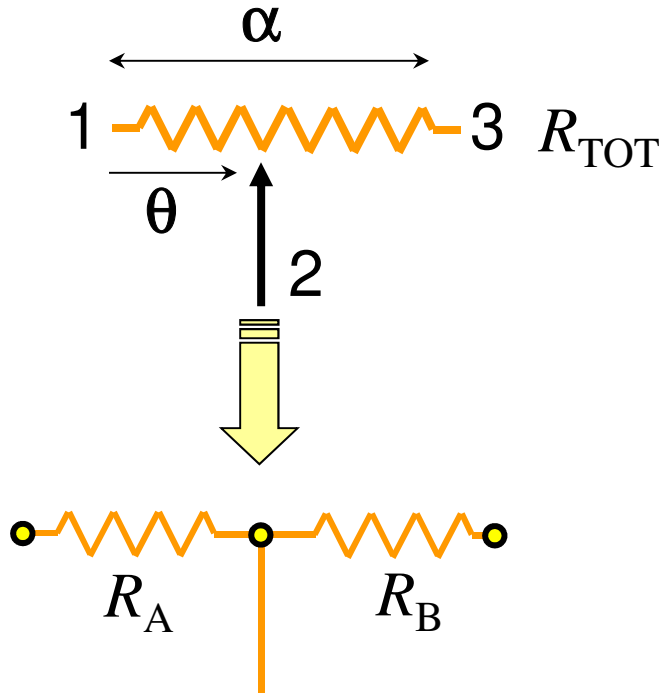
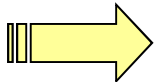
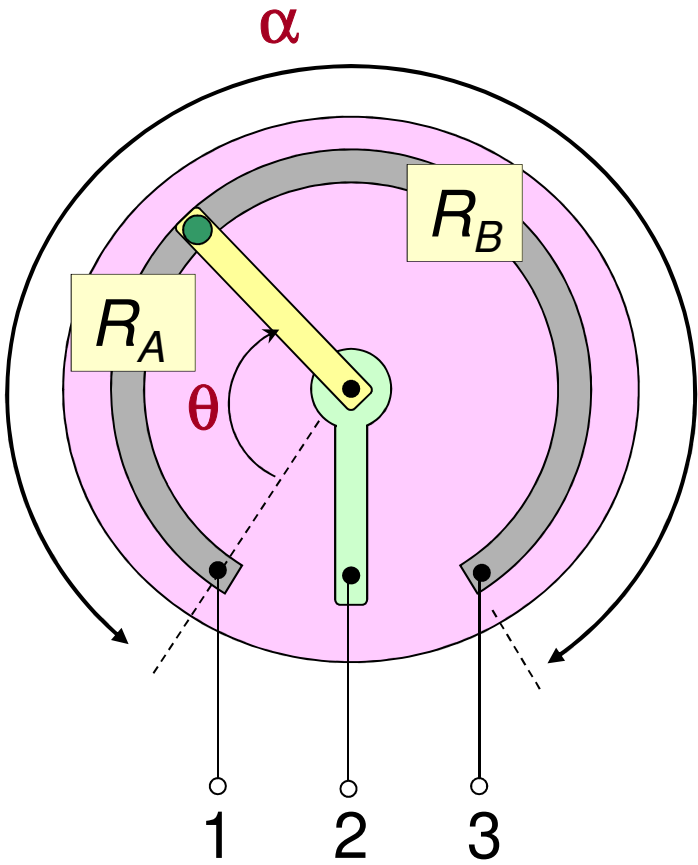
Divisor de tensão resistivo usando um potenciômetro

Resistive Voltage Divider



Divisor de tensão resistivo usando um potenciômetro

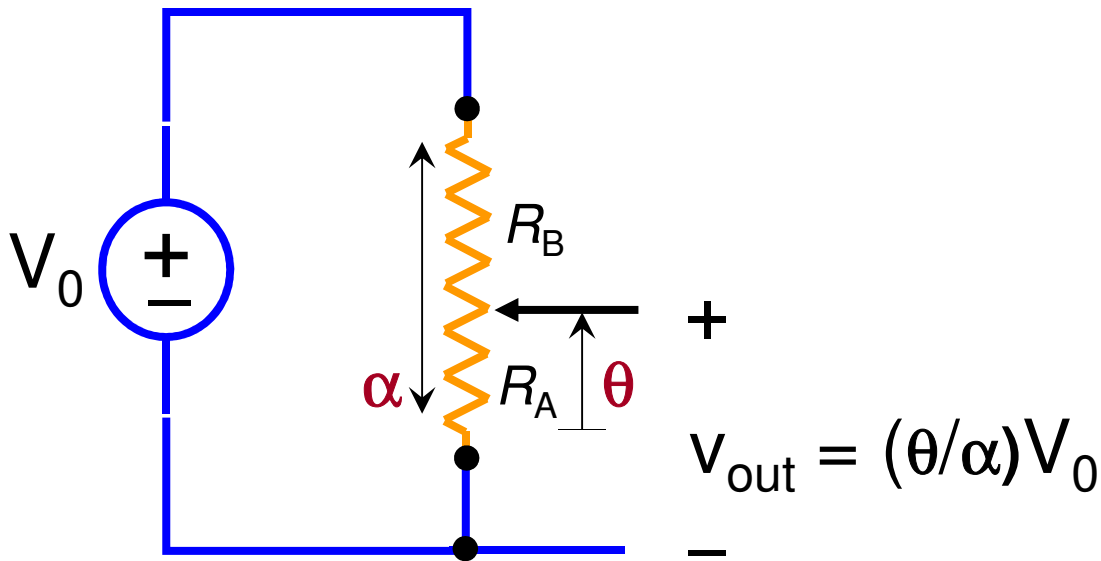
Resistive Voltage Divider



$$R_A = \frac{\theta}{\alpha} R_{TOT}$$

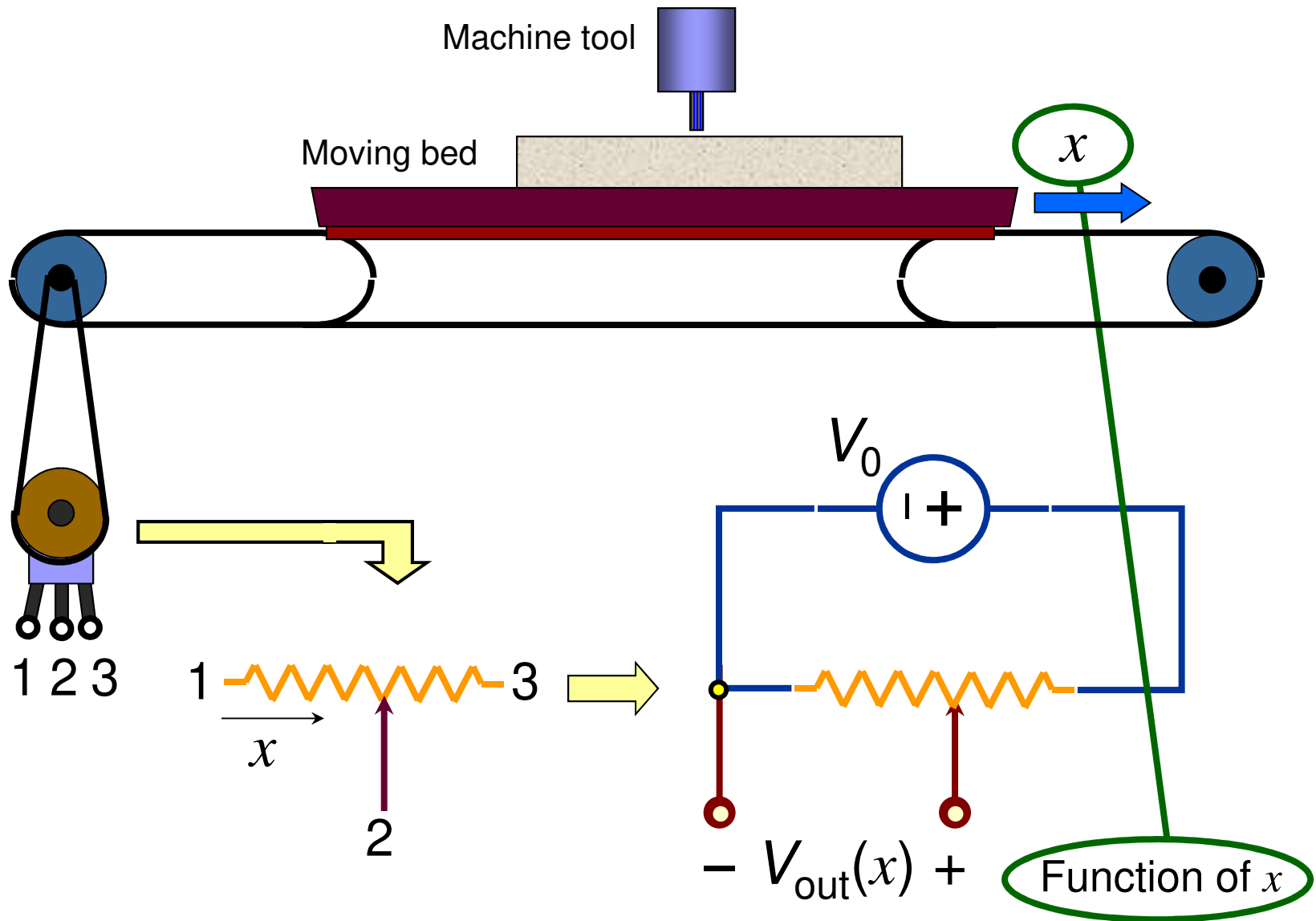
$$R_B = \frac{(\alpha - \theta)}{\alpha} R_{TOT}$$

Divisor de tensão usando um potenciômetro



$$v_{out} = \frac{R_A}{R_A + R_B} V_0 = \frac{R_A}{R_{TOT}} V_0 \Rightarrow v_{out} = \frac{\theta}{\alpha} V_0$$

Exemplo de aplicação do potenciômetro – sensor de posição

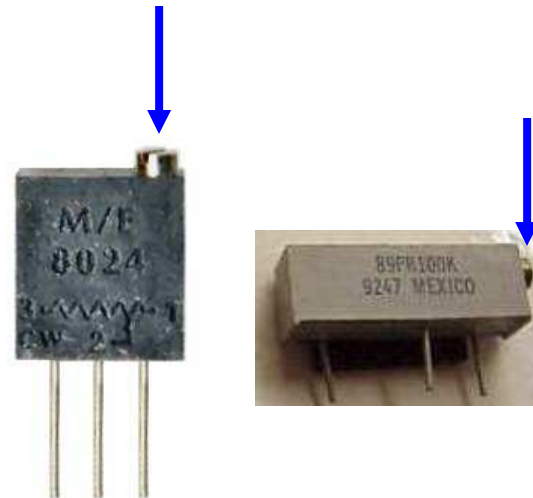


Outros tipos de resistências variável

Other Types of Variable Resistors



Variable Power Resistor
(rheostat / reóstato)



Ten Turn Potentiometers

Técnicas sistemáticas de análise de circuitos

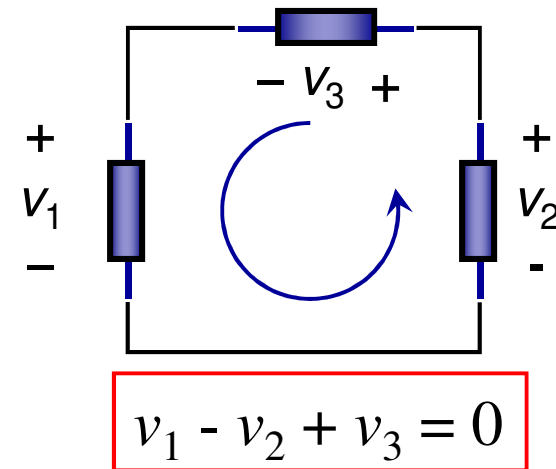
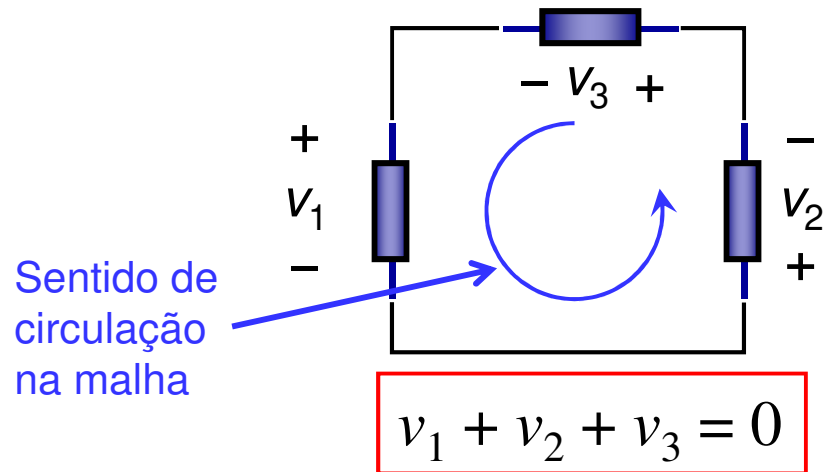
- Método das malhas e dos nós para análise de circuitos
 - Nó, ramo, malha
 - Elemento, característica i-v do elemento
 - Leis de Kirchhoff dos nós e das malhas
- Etapas da aplicação do método das malhas e dos nós
- Exemplos de circuitos resistivos
- Introdução a Ferramentas de Projeto (CAD): O Simulador SPICE

Métodos das malhas e dos nós para análise de circuitos

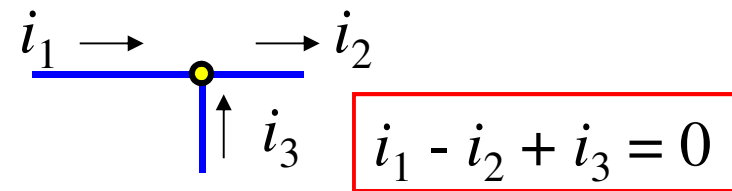
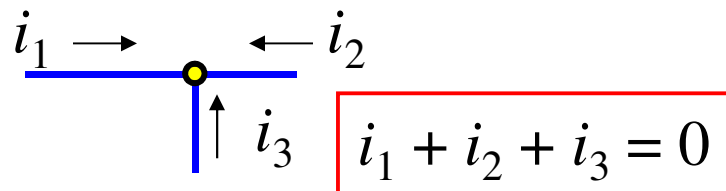
Node & Mesh Method of Circuit Analysis

Leis de Kirchhoff das malhas e dos nós

Kirchhoff's Voltage Law (KVL): "A soma das tensões ao longo de uma malha é igual a zero."
(Ter em atenção a polaridade das tensões.) Exemplos:



Kirchhoff's Current Law (KCL): "A soma das correntes que entram num nó é igual a zero."
(Ter em atenção os sentidos das correntes. Consideram-se positivas as correntes que entram no nó.) Exemplos:



Equação características tensão-corrente (V-I)

Caraterística tensão corrente (V-I) [Voltage-Current (V-I) Characteristic] de um

elemento do circuito: equação que relaciona a tensão aos terminais do componente com a corrente que o atravessa: $v = f(i)$

Exemplos: característica V-I para uma resistência (Lei de Ohm)



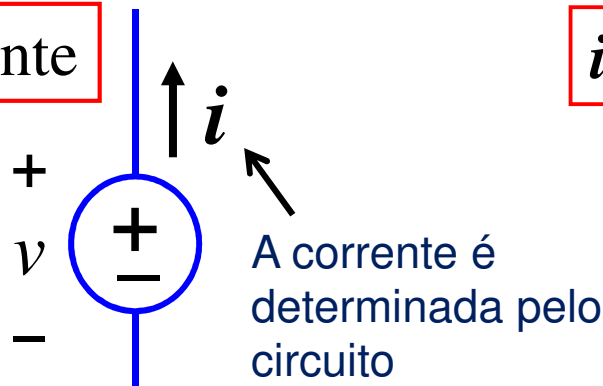
$$v = i R$$



$$v = - i R$$

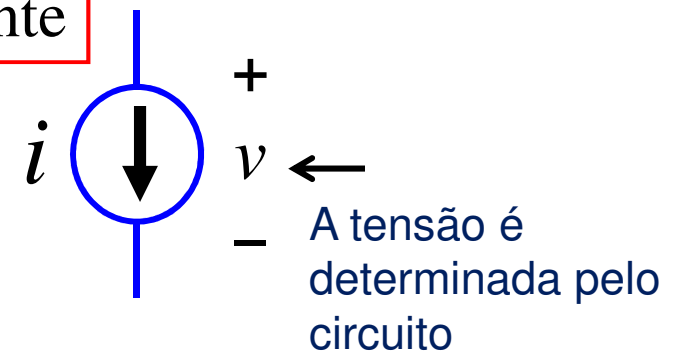
Fonte de tensão independente

$$v = \text{constante}$$



Fonte de corrente independente

$$i = \text{constante}$$



Métodos de análise de circuitos

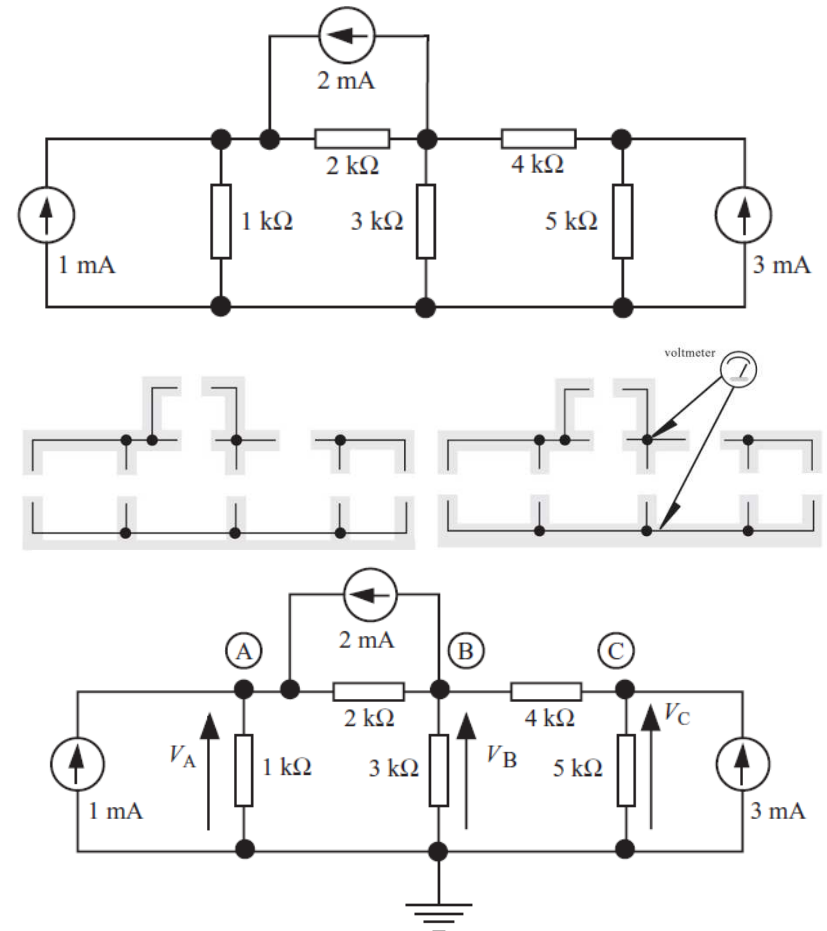
Os circuitos que vimos “até agora” não são muito difíceis de analisar usando as leis dos circuitos (lei de Ohm, leis de Kirchhoff, etc.) e as técnicas de simplificação de circuitos (associação de componentes em série e paralelo). Contudo, na vida real deparámo-nos, por vezes, com circuito complexos em que é mais difícil apontar o procedimento de análise mais expedito. Torna-se pois necessário ter um procedimento de análise que pode ser aplicado de forma quase mecânica.

A técnica de exame de um circuito mais comum é a análise nodal (**método dos nós**).

Considere-se o circuito da figura ao lado. Uma forma simples de ficarmos a conhecer quantas tensões diferentes devemos determinar na análise a efetuar, é remover os componentes e deixar as conexões, figura seguinte. As zonas sombreadas indicam regiões de tensão constante, e são conhecidas como nós. Neste caso podemos concluir que o circuito tem 4 nós.

Se ligarmos uma das pontas de prova de um voltímetro a um destes nós, há três valores diferentes de tensão no circuito que podem ser medidos com a outra prova.

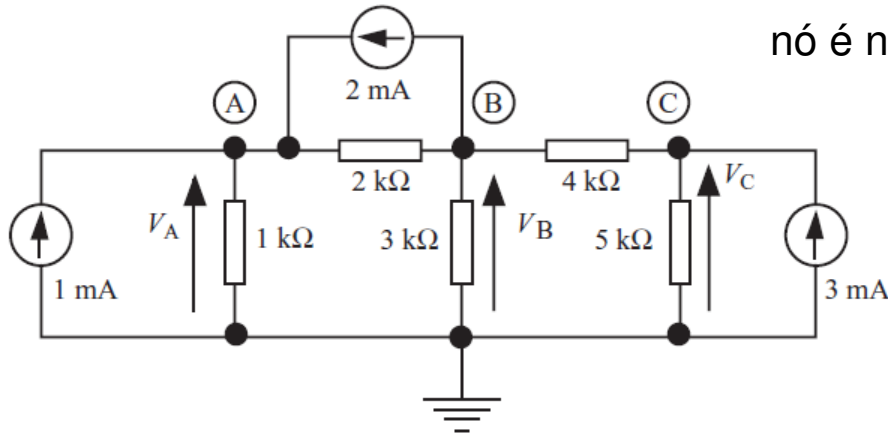
É por isso **conveniente definir um nó a partir do qual se medem todas as tensões no circuito (nó terra/comum)**. Este é o **primeiro de 4 passos** de uma metodologias de análise sistemática. O **segundo passo** consiste em nomear os restantes nós (neste caso A, B e C), e identificar as respetivas tensões V_A , V_B , e V_C .



O **terceiro passo** consiste em aplicar a lei de Kirchhoff da corrente em cada nó, substituindo cada uma das correntes nessas equações pelas expressões que resultam da lei de Ohm, obtendo-se assim as equações das tensões nodais. O **quarto passo** consiste em resolver as equações.

Métodos de análise de circuitos

Seja o circuito da Figura.



Lei dos nós (“A somas das correntes entrando num nó é nula”) aplicada o nó A (unidades A, V, Ω):

$$1 \text{ mA} + 2 \text{ mA} + \frac{(V_B - V_A)}{2 \text{ k}\Omega} - \frac{V_A}{1 \text{ k}\Omega} = 0$$

Em mA, V, k Ω :

$$1 + 2 + \frac{(V_B - V_A)}{2} - V_A = 0$$

Lei dos nós aplicada o nó B (mA, V, k Ω):
$$-2 + \frac{(V_A - V_B)}{2} + \frac{(V_C - V_B)}{4} - \frac{V_B}{3} = 0$$

Lei dos nós aplicada o nó C (mA, V, k Ω):
$$3 + \frac{(V_B - V_C)}{4} - \frac{V_C}{5} = 0$$

Estas três equações formam o sistema de equações das tensões nodais. Temos tantas equações quantas as tensões desconhecidas (incógnitas). Estas equações são lineares na tensão e podem ser resolvidas de forma convencional (por exemplo, eliminação sucessiva) ou por um método numérico apropriado. Por forma a facilitar o processo de resolução é conveniente reescrever as equações na forma:

$$-1.5V_A + 0.5V_B = -3$$

$$0.5V_A - 0.75V_B + 0.25V_C = 2$$

$$0.25V_B - 0.45V_C = -3$$

Obtendo-se:

$$V_A = 1.75 \text{ V}, \quad V_B = -0.75 \text{ V} \quad \text{and} \quad V_C = 6.25 \text{ V}$$

A partir destes valores obtém-se todas as tensões e correntes.

PROBLEM-SOLVING STRATEGY

STEP 1. Determine the number of nodes in the circuit. Select one node as the reference node. Assign a node voltage between each nonreference node and the reference node. All node voltages are assumed positive with respect to the reference node. For an N -node circuit, there are $N - 1$ node voltages. As a result, $N - 1$ linearly independent equations must be written to solve for the node voltages.

STEP 2. Write a constraint equation for each voltage source—independent or dependent—in the circuit in terms of the assigned node voltages using KVL. Each constraint equation represents one of the necessary linearly independent equations, and N_v voltage sources yield N_v linearly independent equations. For each dependent voltage source, express the controlling variable for that source in terms of the node voltages.

A voltage source—independent or dependent—may be connected between a nonreference node and the reference node or between two nonreference nodes. A supernode is formed by a voltage source and its two connecting nonreference nodes.

STEP 3. Use KCL to formulate the remaining $N - 1 - N_v$ linearly independent equations. First, apply KCL at each nonreference node not connected to a voltage source. Second, apply KCL at each supernode. Treat dependent current sources like independent current sources when formulating the KCL equations. For each dependent current source, express the controlling variable in terms of the node voltages.

Exemplo de aplicação do método dos

Let us find the current I_o in the network in Fig. 3.15.

This circuit contains both an independent voltage source and a voltage-controlled voltage source. Note that $V_3 = 6\text{ V}$, $V_2 = V_x$, and a supernode exists between the nodes labeled V_1 and V_2 .

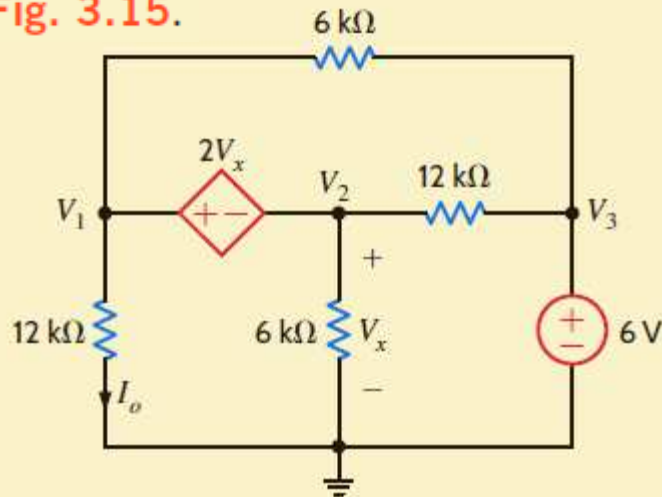
Applying KCL to the supernode, we obtain

$$\frac{V_1 - V_3}{6\text{k}} + \frac{V_1}{12\text{k}} + \frac{V_2}{6\text{k}} + \frac{V_2 - V_3}{12\text{k}} = 0$$

where the constraint equation for the supernode is

$$V_1 - V_2 = 2V_x$$

Fig. 3.15.



The final equation is

$$V_3 = 6$$

Solving these equations, we find that

$$V_1 = \frac{9}{2}\text{ V}$$

and, hence,

$$I_o = \frac{V_1}{12\text{k}} = \frac{3}{8}\text{ mA}$$

LOOP ANALYSIS

PROBLEM-SOLVING STRATEGY

- STEP 1.** Determine the number of independent loops in the circuit. Assign a loop current to each independent loop. For an N -loop circuit, there are N -loop currents. As a result, N linearly independent equations must be written to solve for the loop currents.
- If current sources are present in the circuit, either of two techniques can be employed. In the first case, one loop current is selected to pass through one of the current sources. The remaining loop currents are determined by open-circuiting the current sources in the circuit and using this modified circuit to select them. In the second case, a current is assigned to each mesh in the circuit.
- STEP 2.** Write a constraint equation for each current source—independent or dependent—in the circuit in terms of the assigned loop current using KCL. Each constraint equation represents one of the necessary linearly independent equations, and N_1 current sources yield N_1 linearly independent equations. For each dependent current source, express the controlling variable for that source in terms of the loop currents.
- STEP 3.** Use KVL to formulate the remaining $N - N_1$ linearly independent equations. Treat dependent voltage sources like independent voltage sources when formulating the KVL equations. For each dependent voltage source, express the controlling variable in terms of the loop currents.

Exemplo de aplicação método das malhas

Let us find V_o in the circuit in Fig. 3.26

$$I_1 = \frac{V_x}{2000}$$

$$I_2 = 2 \times 10^{-3}$$

$$V_x = 4k(I_1 - I_2)$$

The KVL equation for the third mesh is

$$-3 + 2k(I_3 - I_1) + 6kI_3 = 0$$

Combining these equations yields

$$-I_1 + 2I_2 = 0$$

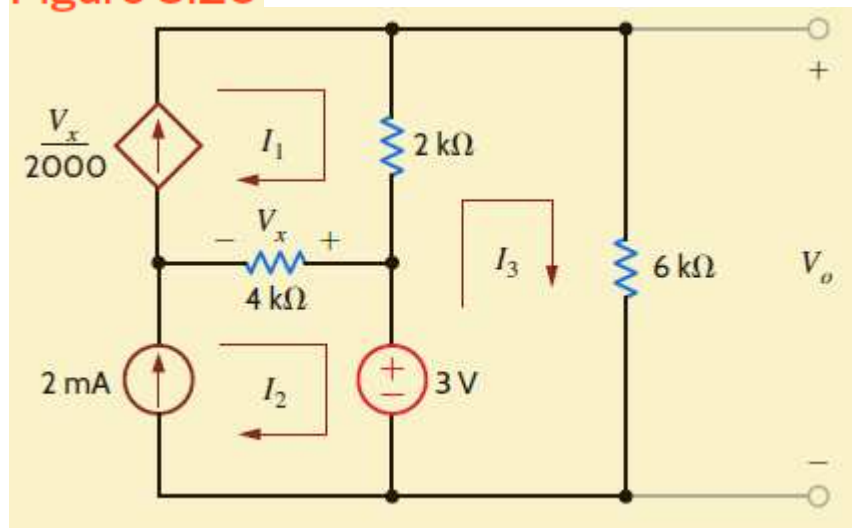
$$I_2 = 2/k$$

$$-2kI_1 + 8kI_3 = 3$$

In matrix form, the equations are

$$\begin{bmatrix} -1 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -2000 & 0 & 8000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.002 \\ 3 \end{bmatrix}$$

Figure 3.26

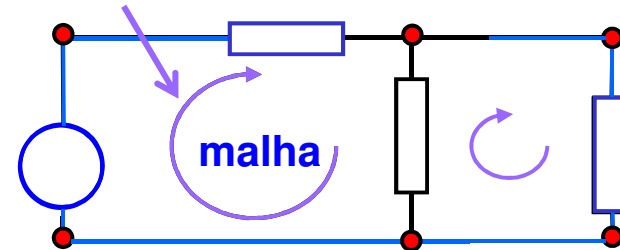


The actual numbers are $I_1 = 4.0$ mA, $I_2 = 2.0$ mA, and $I_3 = 1.375$ mA,
And, hence, $V_o = 8.25$ V.

Análise de circuitos usando o método das malhas e dos nós

O método dos nós/malhas é um procedimento formal de usar as lei de Kirchhoff dos nós (KCL) e das malhas (KVL).

Sentido de circulação na malha

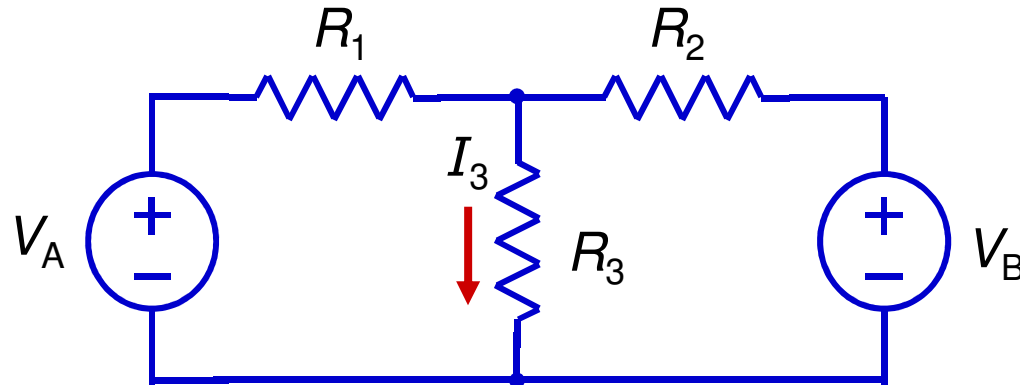


Passos para a aplicação do método:

- Escolher o nó comum/terra e numerar/identificar os restantes nós
- Escrever a lei de Kirchhoff das corrente (KCL) para cada nó do circuito, excluindo o nó designado como comum.
- Escrever a lei de Kirchhoff das malhas (KVL) para cada malha do circuito.
- Escrever as equações características tensão-corrente (V-I) para cada elemento no circuito, e fazer a respetiva substituição nas equações anteriores.
- Resolver o conjunto de equações em ordem às tensões e às correntes.

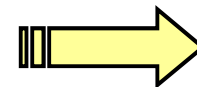
Exemplo de aplicação: Determinar a corrente I_3

Find I_3 in the following circuit:



What do we know?

- The circuit contains only sources and resistors.
- The circuit is driven by two sources, V_A and V_B .
- Both sources contribute to I_3 .



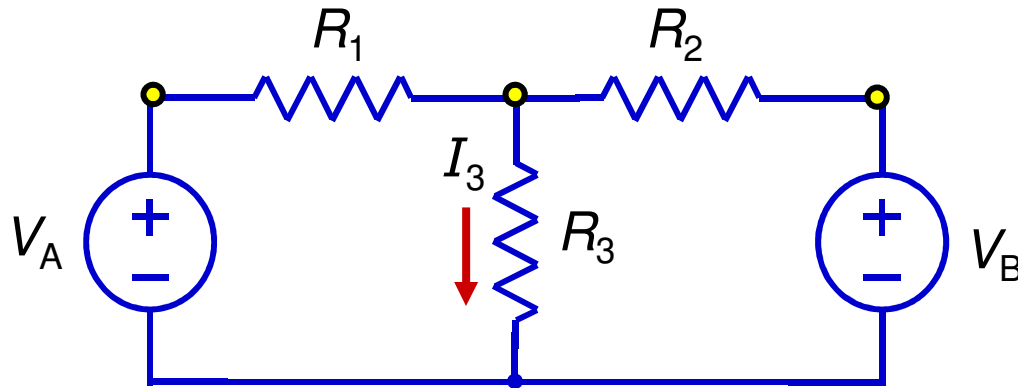
Resistive Circuit

Q: How can we find the current I_3 ?

A: One way: Solve for I_3 using the *node & mesh method*

Determinar a corrente I_3 usando o método dos nós e das malhas

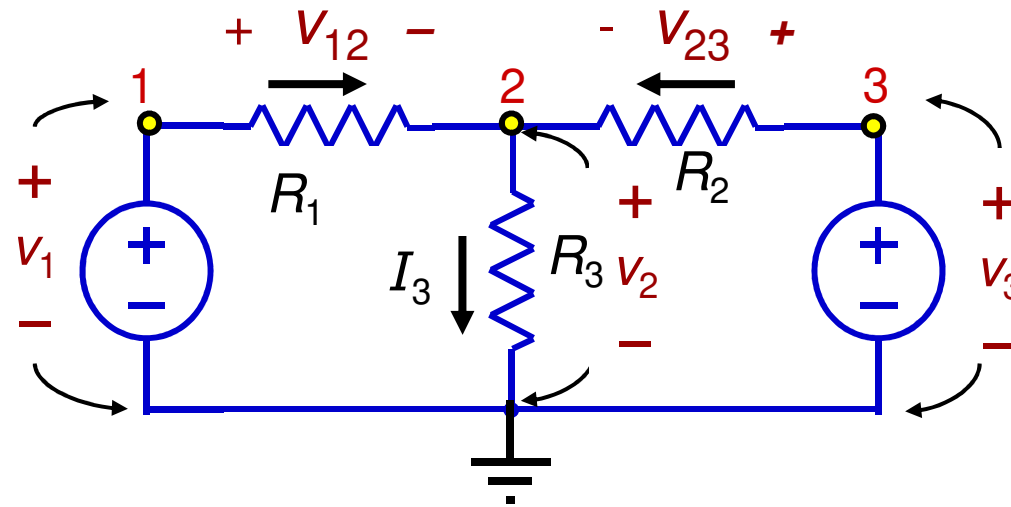
Find I_3 using KVL and KCL via the Node/Mesh method:



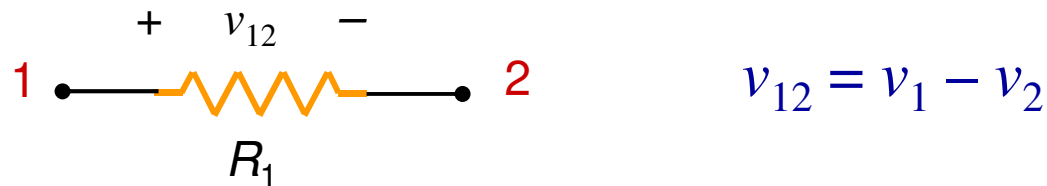
Steps of the Method:

- Choose one node to be “ground”.
- Assign **numbers** to the remaining nodes.
- Define all “node” voltages **relative to ground**.
- Write down KCL for all nodes servicing more than 2 branches.
- Write down KVL for all loops using the **node voltages**.
- Use the **$v-i$ equation** for every element in the circuit.

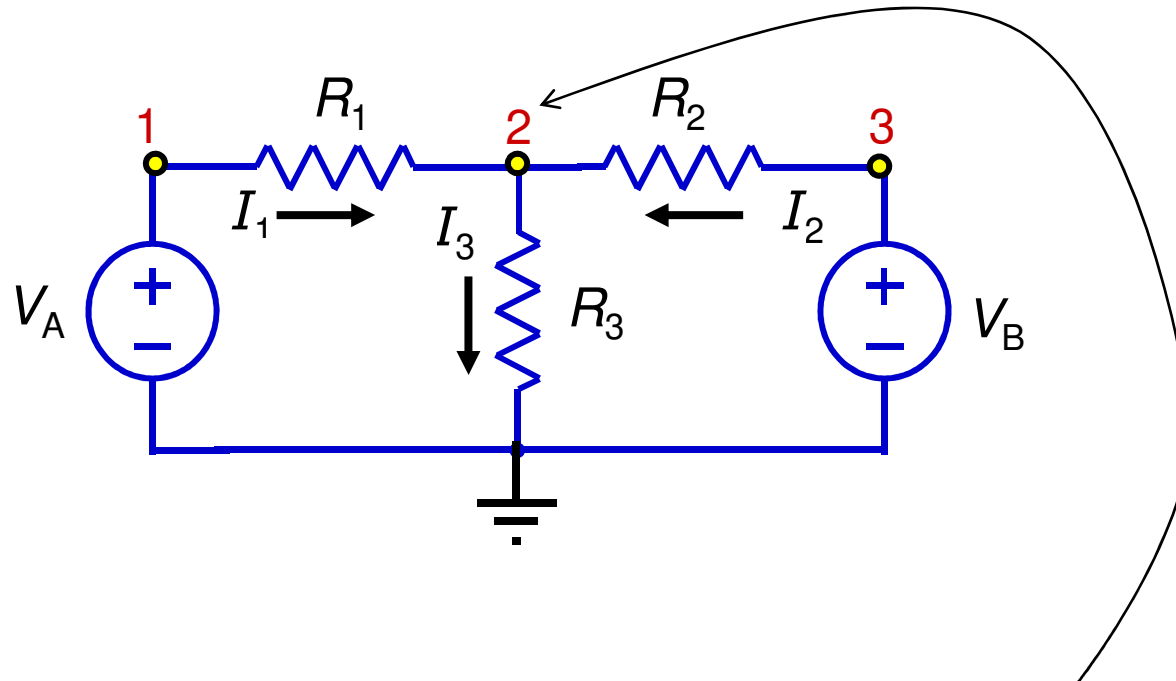
Escolher o nó comum/terra, numerar os restantes nós, e definir a tensão em cada nó



- Choose one node to be “ground”.
- Assign **numbers** to the remaining nodes.
- Define all “node” voltages **relative to ground**.
 - Voltages between two nodes defined as their difference:



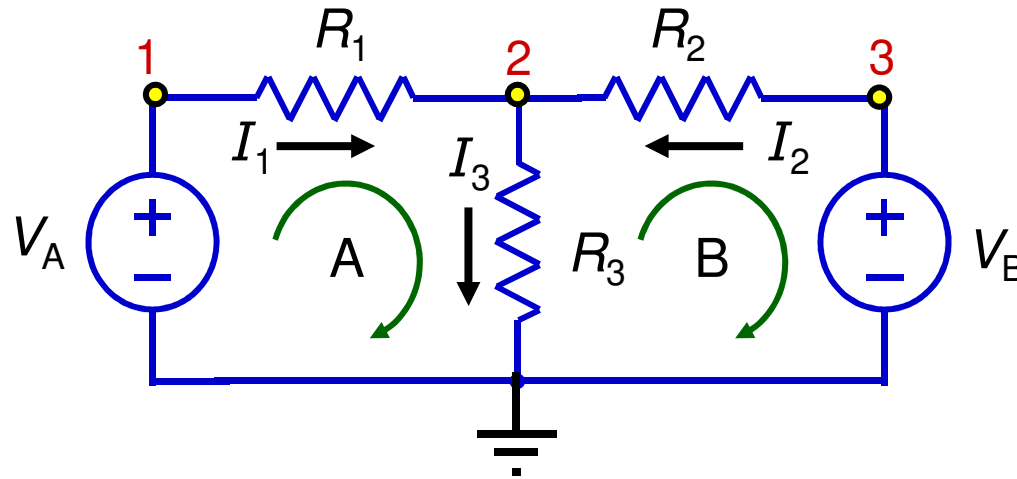
Escrever a equação dos nós para cada nó



- Write down KCL for all nodes serving more than 2 branches.
- Write down KCL for node **2**:

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

Identificar as malhas, definir o sentido de circulação em cada malha, e escrever a equação das malhas para cada malha



- Write down KVL for all loops using the **node voltages**.
- Write down KVL for loop **A**:

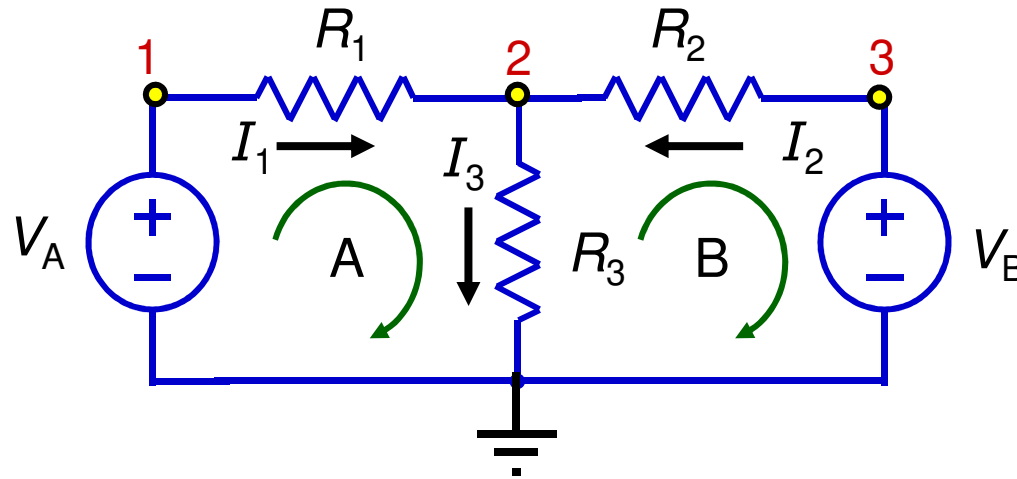
$$-v_1 + v_{12} + v_2 = 0$$

- Write down KVL for loop **B**:

$$-v_2 - v_{32} + v_3 = 0$$

$$I_2 = V_{32}/R_2 = (V_3 - v_2)/R_2$$

Escrever as equações i-v para cada elemento



- Use the v - i equation for every element in the circuit.

By Inspection:

$$v_1 = V_A$$

$$v_3 = V_B$$

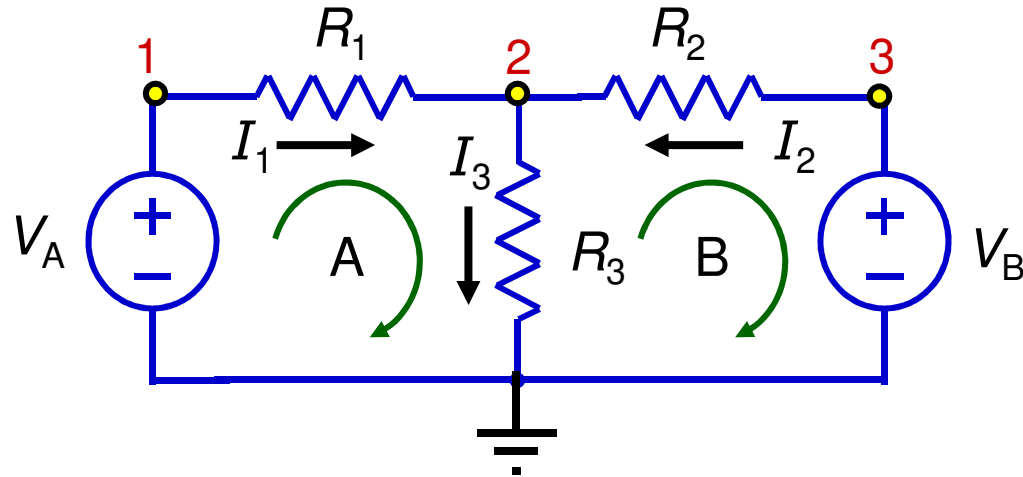
From Ohm's Law:

$$I_1 = (V_A - v_2)/R_1$$

$$I_2 = (V_B - v_2)/R_2$$

$$I_3 = v_2/R_3$$

Equações do circuito



v - i equations

KCL

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

KVL

$$-V_A + v_{12} + v_2 = 0$$

$$-v_2 - v_{32} + V_B = 0$$

$$I_1 = (V_A - v_2)/R_1$$

$$I_2 = (V_B - v_2)/R_2$$

$$I_3 = v_2/R_3$$

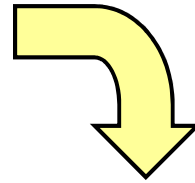
Escrever as equações na forma de uma matriz

v-i equations

$$I_1 = (V_A - v_2)/R_1$$

$$I_2 = (V_B - v_2)/R_2$$

$$I_3 = v_2/R_3$$



I		v_1	v_2	v_3
\downarrow		\downarrow	\downarrow	\downarrow
I_1	=	V_A/R_1	$- v_2/R_1$	$+ 0$
I_2	=	0	$- v_2/R_2$	$+ V_B/R_2$
I_3	=	0	$+ v_2/R_3$	$+ 0$

Determinação de v_2

I ↓		v_1 ↓		v_2 ↓		v_3 ↓
I_1	=	V_A/R_1		$- v_2/R_1$		$+ 0$
I_2	=	0		$- v_2/R_2$		$+ V_B/R_2$
I_3	=	0		$+ v_2/R_3$		$+ 0$

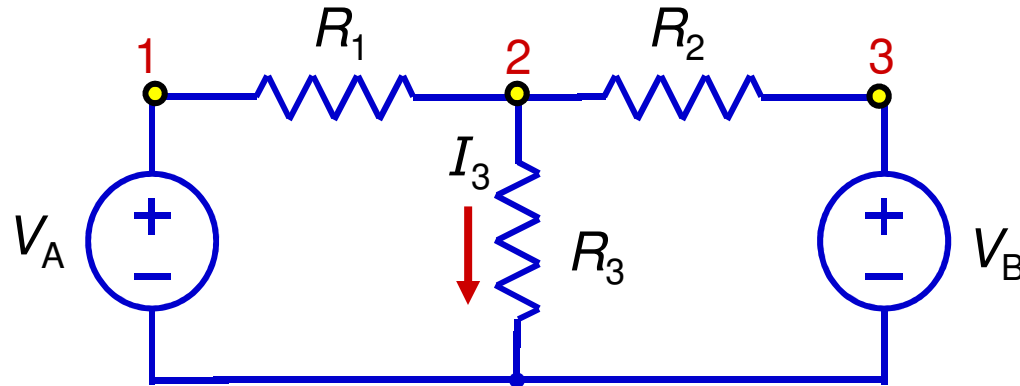
KCL

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

$$V_A/R_1 - v_2/R_1 - v_2/R_2 + V_B/R_2 - v_2/R_3 = 0$$

$$\frac{V_A}{R_1} + \frac{V_B}{R_2} = v_2 \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right]$$

Determinação de I_3



$$v_2 = \frac{\frac{V_A}{R_1} + \frac{V_B}{R_2}}{\left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right]}$$

$I_3 = v_2 / R_3$

Solução:

$$I_3 = \frac{V_A R_2 + V_B R_1}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}$$

Comparar com solução obtida pela uso do princípio da sobreposição.

Ferramentas de simulação e análise de circuitos elétricos

O Simulador PSPICE

(ver guia do trabalho n.º 3)

http://webpages.ciencias.ulisboa.pt/%7Ejmfigueiredo/aulas/CEeSD_CE_201819.htm#Guiasp

PSpice e MultiSim

SPICE ([acrónimo](#) de *Simulated Program with Integrated Circuits Emphasis*, ou Programa de Simulação com ênfase em Circuitos Integrados) é um [software](#) de [simulação](#) de [circuitos analógicos](#). É uma poderosa ferramenta usada para testar, e antever comportamento de circuitos contendo [circuitos integrados](#), resistências, bobines, [transístores](#), condensadores, [díodos](#) e outros componentes elétricos e eletrónicos.

Versões comerciais: [PSpice/OrCAD](#), HSpice (para [UNIX](#)), HSIM, MicroCad, NG-spice, MultiSIM, SmartSpice, TINA, MacSpice, NanoSim, NSPICE, LTSpice,

Electronics Workbench Inc. é uma subsidiária da National Instruments e desenvolve o MultiSIM, um programa de simulação e análise de circuitos elétricos. O programa chamava-se anteriormente *Electronics Workbench*.

O **OrCAD** representa pacote de software proprietário usado na simulação e projeto de circuitos eletrónicos, principalmente no desenho de [placas de circuitos impressos](#). O nome OrCAD reflete a origem do [software](#): [Oregon](#) + [CAD](#). A linha de produtos OrCAD é propriedade da [Cadence Design Systems](#).

Ver: [PSpice 9.1 student version](#) + [guia versão 0.1](#)

(http://webpages.ciencias.ulisboa.pt/~jmfigueiredo/aulas/CEeSD_CE_201819.htm#Guiasp)

Exemplos de circuitos resistivos práticos

- Exemplos de circuitos resistivos e aplicações
 - Fonte alimentando várias cargas simultaneamente
 - Potencia fornecida a vários altifalantes
 - Atenuador resistivo
 - Amplificadores com transístores
 - Circuitos com potenciómetros
 - Redes R-2R para conversores digitais-analógicos (Digital-to-Analog Converter (R-2R Ladder))

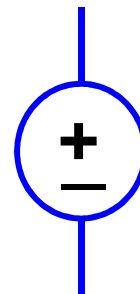
Review: Definition of Resistive Circuit

A **Resistive Circuit** contains one or more of the following:

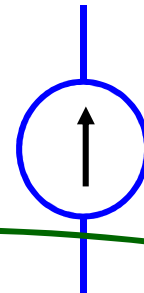
- Resistors



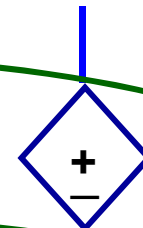
- Independent Voltage Sources



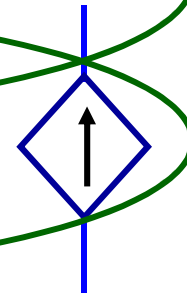
- Independent Current Sources



- Dependent Voltage Sources



- Dependent Current Sources



Problema da carga elétrica

The Electric Load Problem



Problem statement:

A standard 12 V dc automobile battery powers the following loads:

- Cell phone that draws 0.2 A
- 80 W halogen spotlight
- Portable CD player that requires a peak current of 300 mA
- Portable TV that requires 22 W of power

Outlet is protected by a 10-A dc fuse.

Question: Will the fuse “blow” due to excessive current?

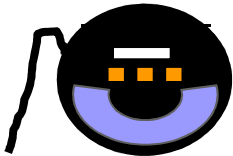
Numa primeira aproximação estes equipamentos (cargas) podem ser modelados por resistências



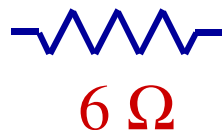
$$R_{\text{cell}} = V/I = (12 \text{ V})/(0.2 \text{ A}) = 600 \Omega$$



$$P_{\text{lamp}} = V \cdot I = V(V/R) = V^2/R$$
$$\therefore R_{\text{lamp}} = V^2/P = (12 \text{ V})^2/(80 \text{ W}) = 1.8 \Omega$$



$$R_{\text{CD}} = V/I = (12 \text{ V})/(0.3 \text{ A}) = 400 \Omega$$

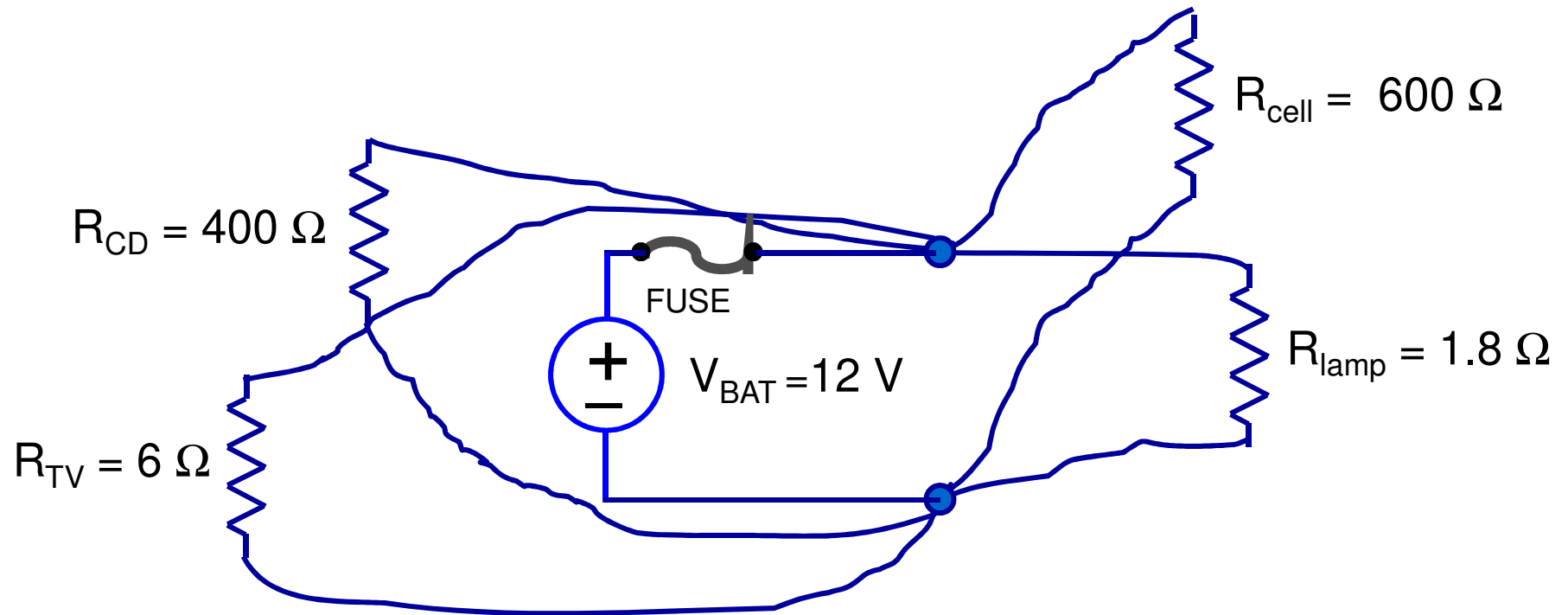


$$R_{\text{TV}} = V^2/P = (12 \text{ V})^2/(24 \text{ W}) = 6 \Omega$$

Esquema grosseiro do circuito

Draw the schematic of the entire circuit:

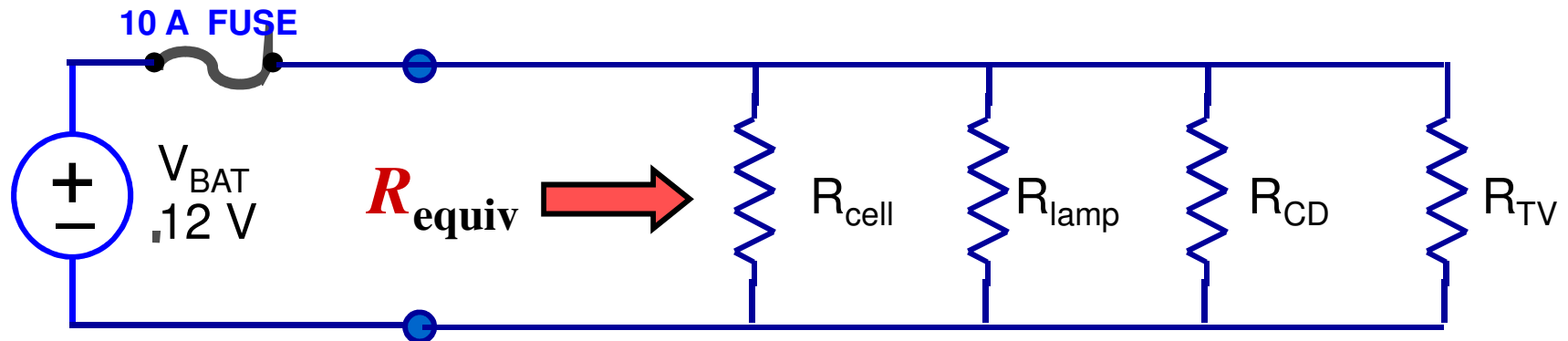
All of the loads are connected in **parallel**.



Outlet is protected by a 10-A dc fuse.

Esquema do circuito

A simpler way to view the circuit:



Use the formula for resistors connected in parallel:

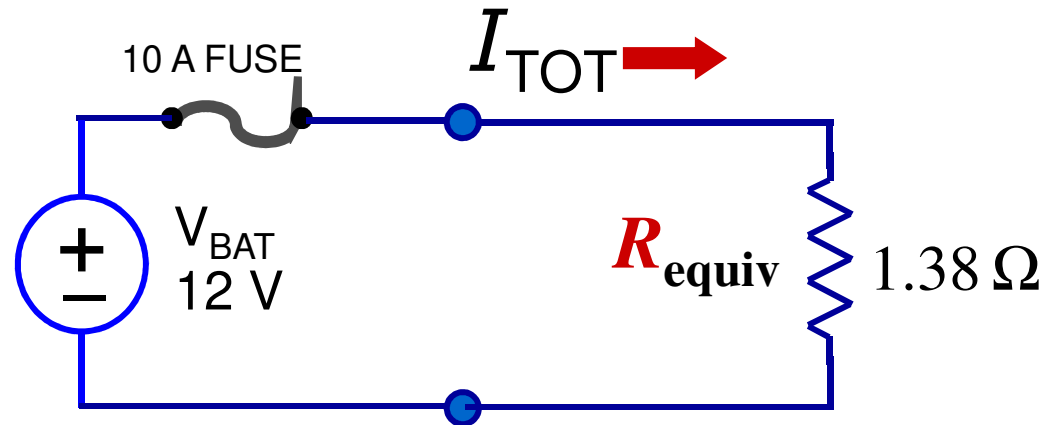
(Add the **conductances**):

$$\frac{1}{R_{\text{equiv}}} = \frac{1}{R_{\text{cell}}} + \frac{1}{R_{\text{lamp}}} + \frac{1}{R_{\text{CD}}} + \frac{1}{R_{\text{TV}}}$$

$$= 1/(600 \Omega) + 1/(1.8 \Omega) + 1/(400 \Omega) + 1/(6 \Omega) = 0.726 \Omega^{-1}$$

$$R_{\text{equiv}} = 1/(0.726 \Omega^{-1}) = 1.38 \Omega$$

Esquema equivalente do circuito



$$I_{\text{TOT}} = V_{\text{BAT}} / R_{\text{equiv}} = (12 \text{ V}) / (1.38 \Omega) = 8.7 \text{ A}$$

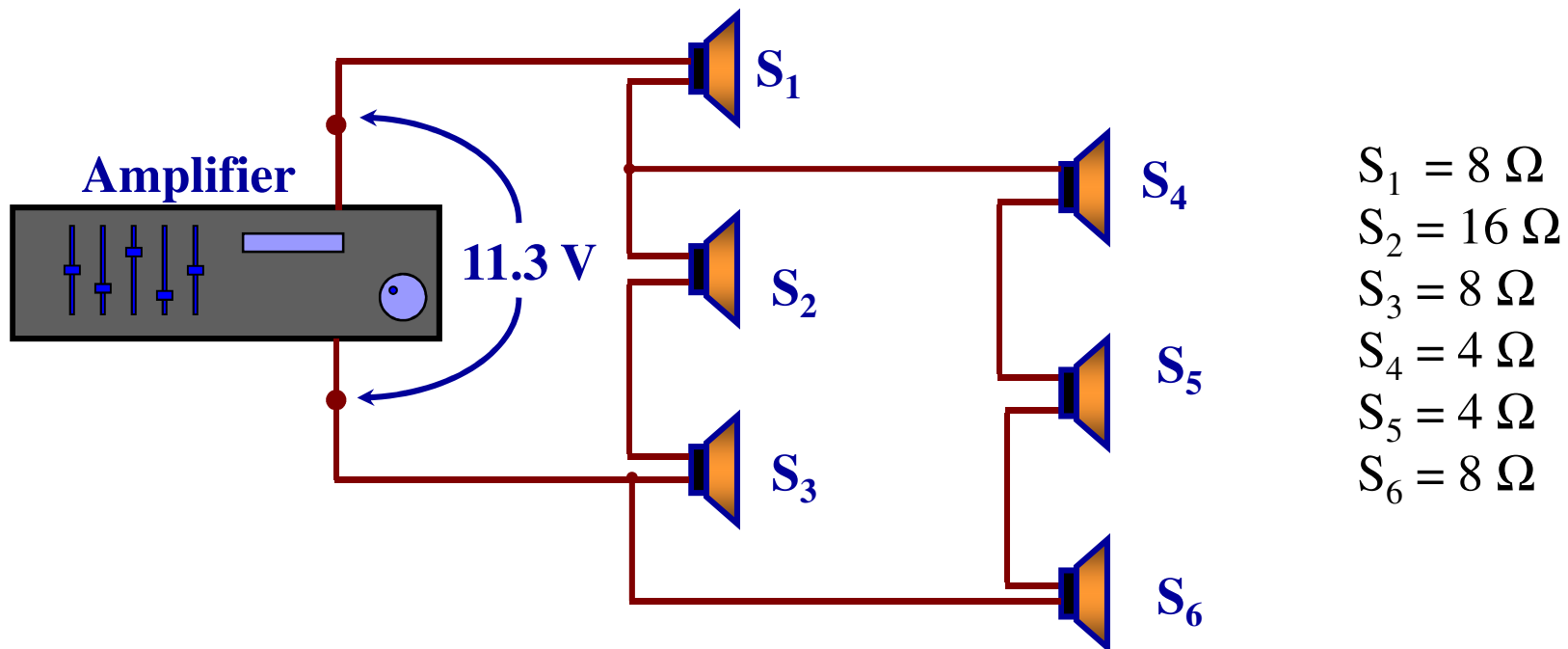
- The fuse will “blow” (become an open circuit) if I_{TOT} exceeds 10 A.
- The combination of all the loads does not blow the fuse.

Problema da potência fornecida aos altifalantes

Problem:

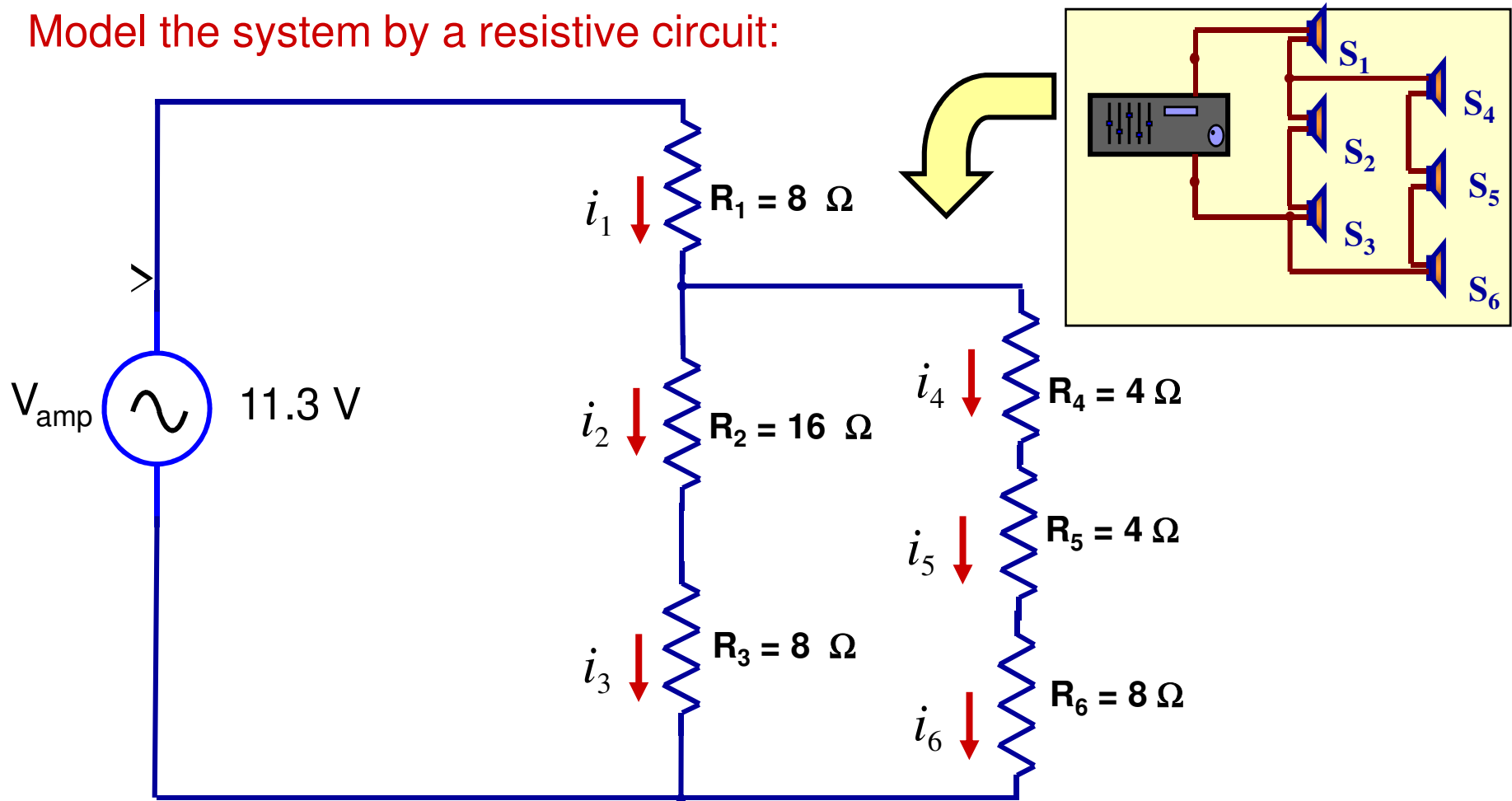
- Public address amplifier powers loudspeakers as shown below.
- Amplifier produces an average voltage of 11.3 V.

Question: How much power does each speaker receive?



Altifalantes podem ser representados por resistências

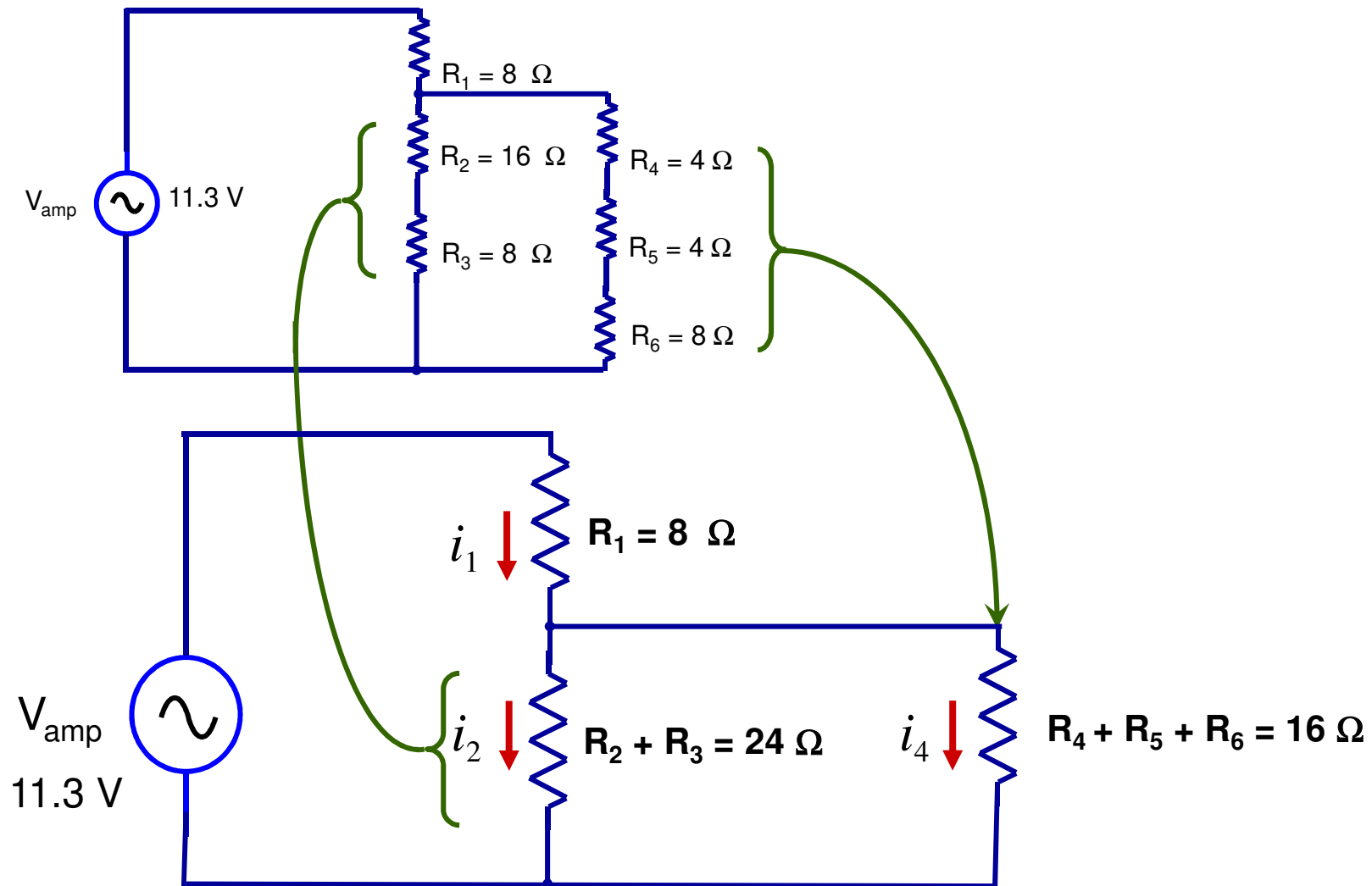
Model the system by a resistive circuit:



- The power to any given speaker will be $i^2 R$
- Use KVL and KCL to find the various values of i_n

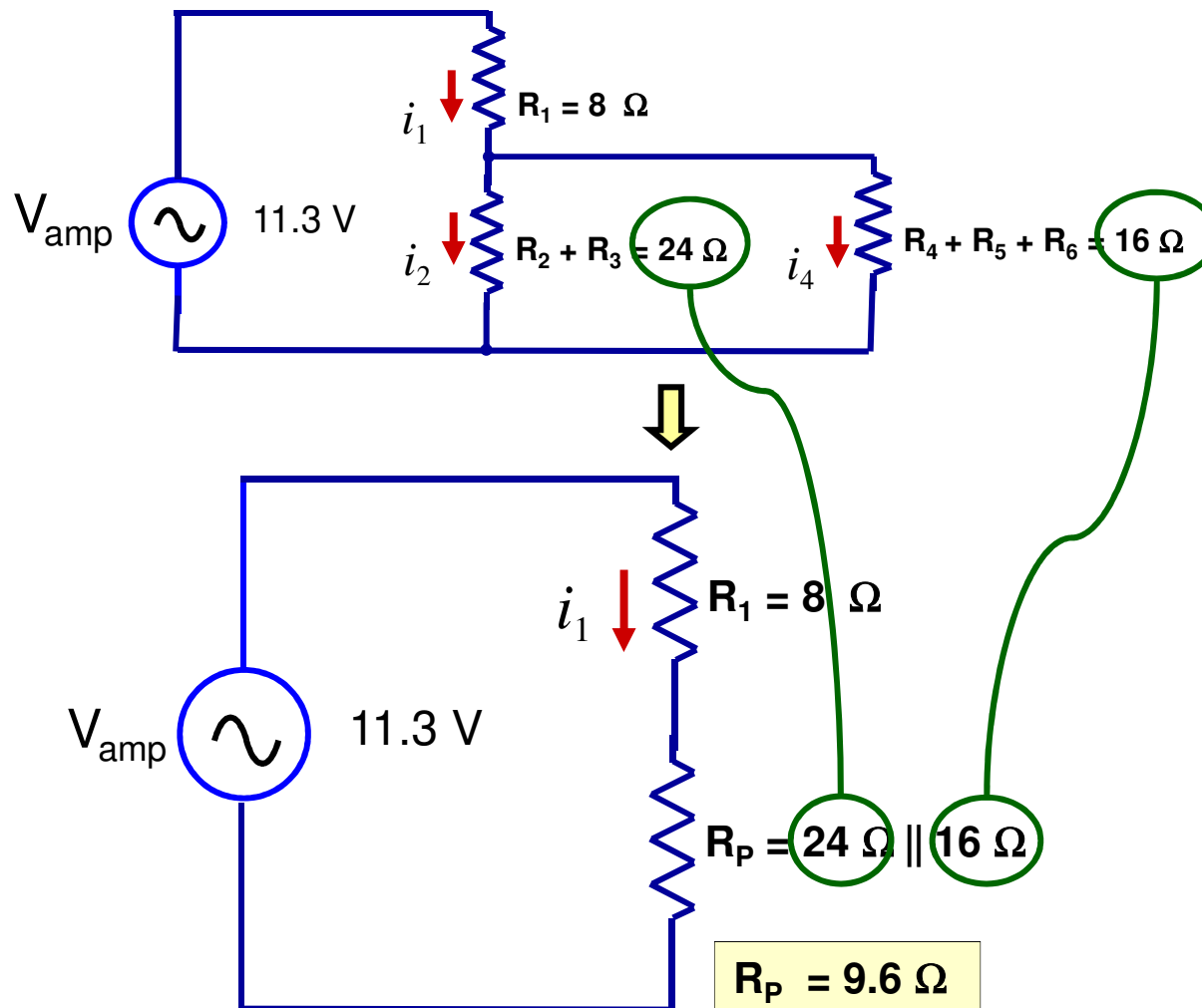
Simplificações do circuito com o objetivo de determinar a corrente fornecida pelo amplificador

Simplify the circuit as follows:



Simplificações do circuito com o objetivo de determinar a corrente fornecida pelo amplificador

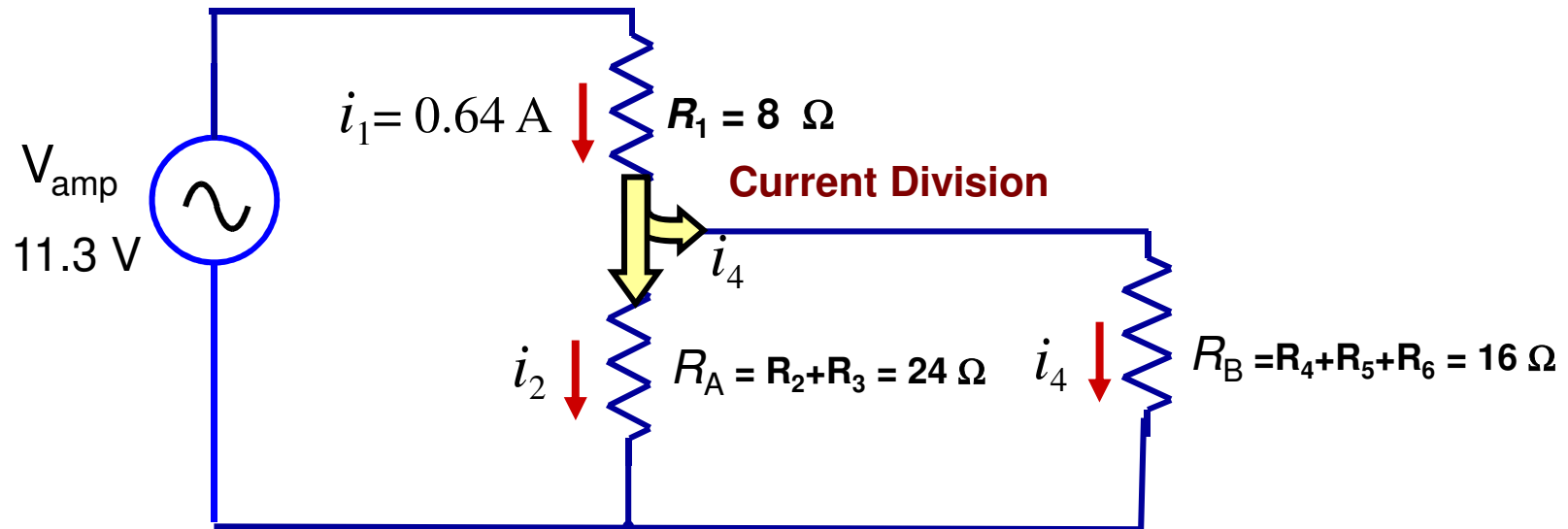
Further simplify the circuit:



$$\begin{aligned} i_1 &= V_{amp} / (R_1 + R_p) \\ &= (11.3 \text{ V}) / (17.6 \Omega) \\ &= 0.64 \text{ A} \end{aligned}$$

Determinação das correntes nos ramos

Now use current division to find i_2 and i_4 :



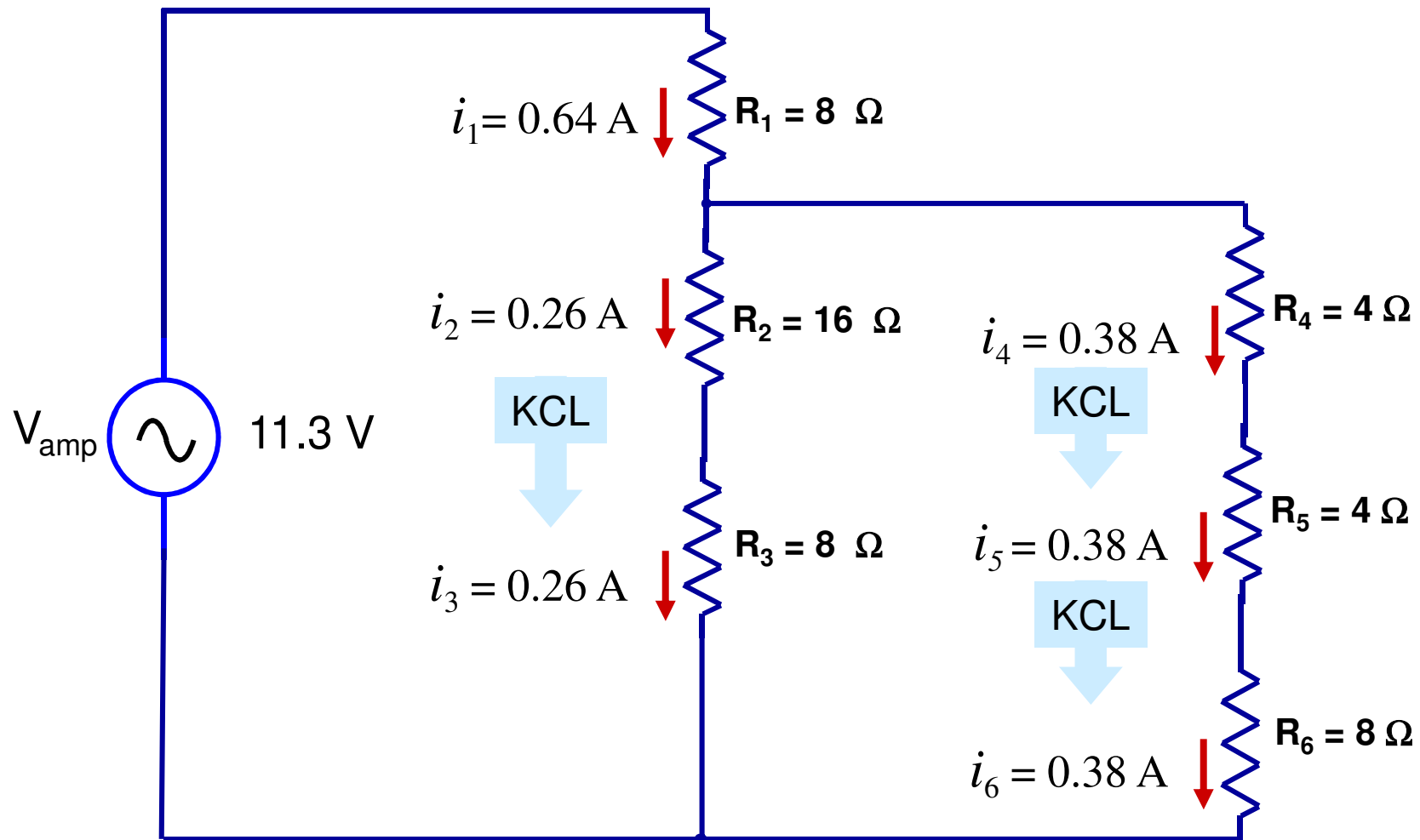
$$\text{Current Division: } i_2 = i_1 \frac{R_B}{R_A + R_B} = 0.64 \text{ A} \frac{16 \Omega}{24 \Omega + 16 \Omega} = 0.26 \text{ A}$$

$$\text{Similarly: } i_4 = i_1 \frac{R_A}{R_A + R_B} = 0.64 \text{ A} \frac{24 \Omega}{24 \Omega + 16 \Omega} = 0.38 \text{ A}$$

$$\text{Note that: } i_2 + i_4 = 0.26 \text{ A} + 0.38 \text{ A} = 0.64 \text{ A}$$

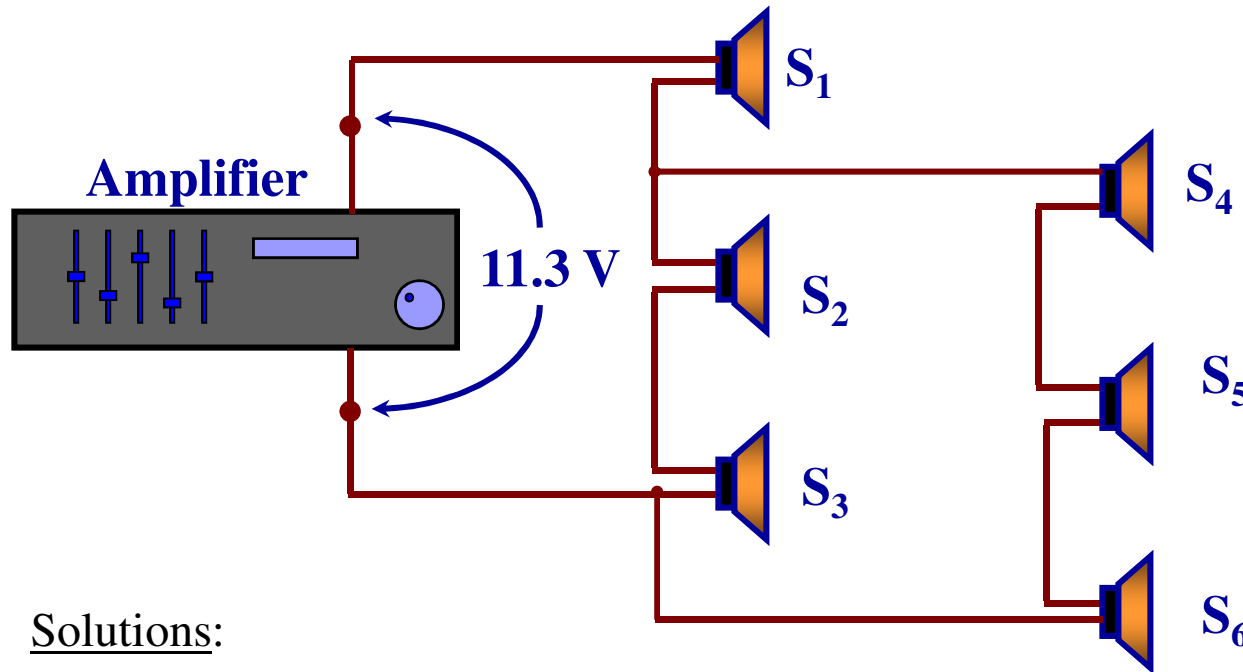
Determinação das correntes em cada ramo

Now find ***all*** the currents in the circuit:



Determinação das potências fornecidas aos altifalantes

Find the power into each speaker using i^2R :



Given:

- $S_1 = 8 \Omega$
- $S_2 = 16 \Omega$
- $S_3 = 8 \Omega$
- $S_4 = 4 \Omega$
- $S_5 = 4 \Omega$
- $S_6 = 8 \Omega$

Solutions:

$$P_1 = i_1^2 R_1 = (0.64 \text{ A})^2 (8 \Omega) = \mathbf{3.28 \text{ W}}$$

$$P_2 = i_2^2 R_2 = (0.26 \text{ A})^2 (16 \Omega) = \mathbf{1.08 \text{ W}}$$

$$P_3 = i_3^2 R_3 = (0.26 \text{ A})^2 (8 \Omega) = \mathbf{0.54 \text{ W}}$$

$$P_4 = i_4^2 R_4 = (0.38 \text{ A})^2 (4 \Omega) = \mathbf{0.58 \text{ W}}$$

$$P_5 = i_5^2 R_5 = (0.38 \text{ A})^2 (4 \Omega) = \mathbf{0.58 \text{ W}}$$

$$P_6 = i_6^2 R_6 = (0.38 \text{ A})^2 (8 \Omega) = \mathbf{1.16 \text{ W}}$$

Currents:

$$i_1 = 0.64 \text{ A}$$

$$i_2 = i_3 = 0.26 \text{ A}$$

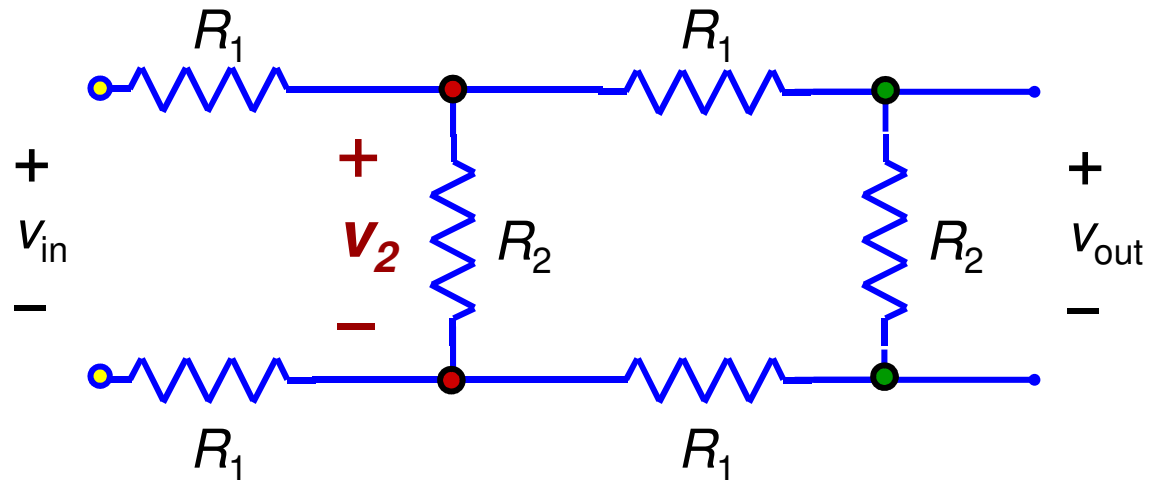
$$i_4 = i_5 = i_6 = 0.38 \text{ A}$$

$$V \cdot i_1 = (11.3 \text{ V})(0.64 \text{ A}) = 7.22 \text{ W}$$

$$+ \underline{\underline{= 7.22 \text{ W}}}$$

Atenuador resistivo

Atenuador resistivo



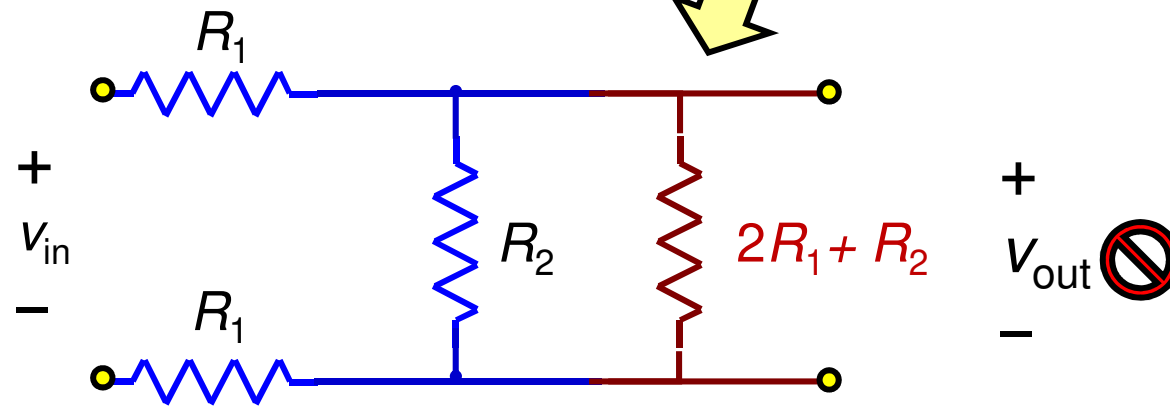
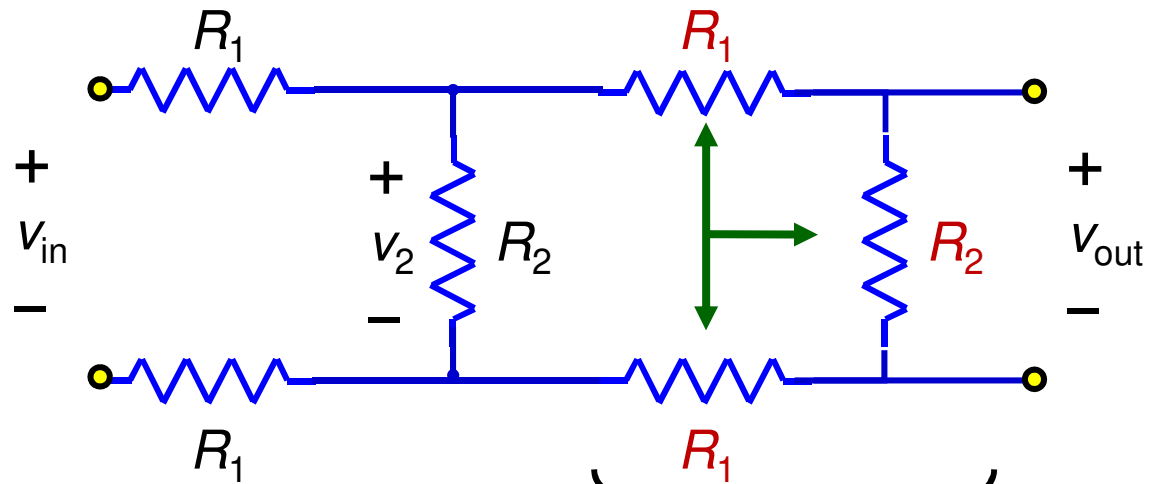
Objetivo: determinar a razão de atenuação v_{out}/v_{in}

Let's go over the steps...

- Find voltage v_2
- Use voltage division to find v_{out}

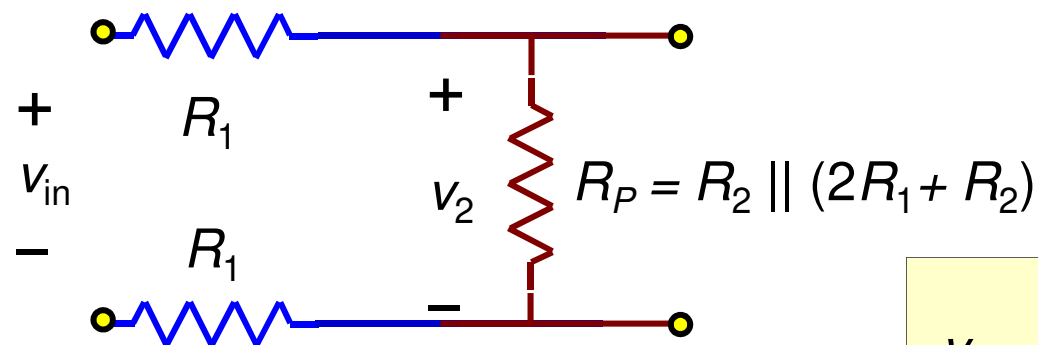
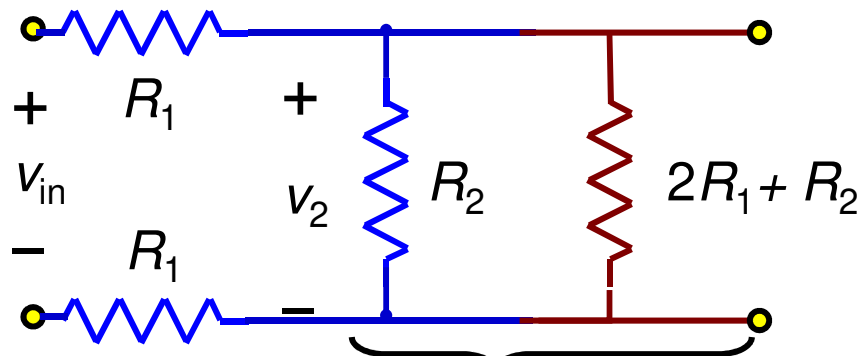
Atenuador resistivo

- Find voltage v_2



Atenuador resistivo

- Find voltage v_2

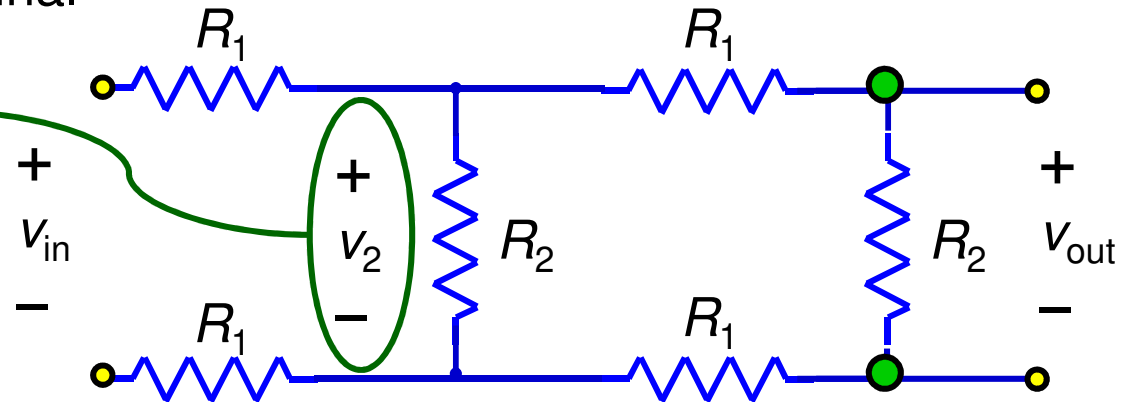


$$v_2 = \frac{R_p}{R_p + 2R_1} V_{in}$$

Atenuador resistivo

Voltando ao circuito original

$$V_2 = \frac{R_p}{R_p + 2R_1} V_{in}$$



$$V_{out} = \frac{R_2}{R_2 + 2R_1} V_2 = \frac{R_2}{R_2 + 2R_1} \frac{R_p}{R_p + 2R_1} V_{in}$$

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_2 + 2R_1} \frac{R_p}{R_p + 2R_1} V_{in}$$

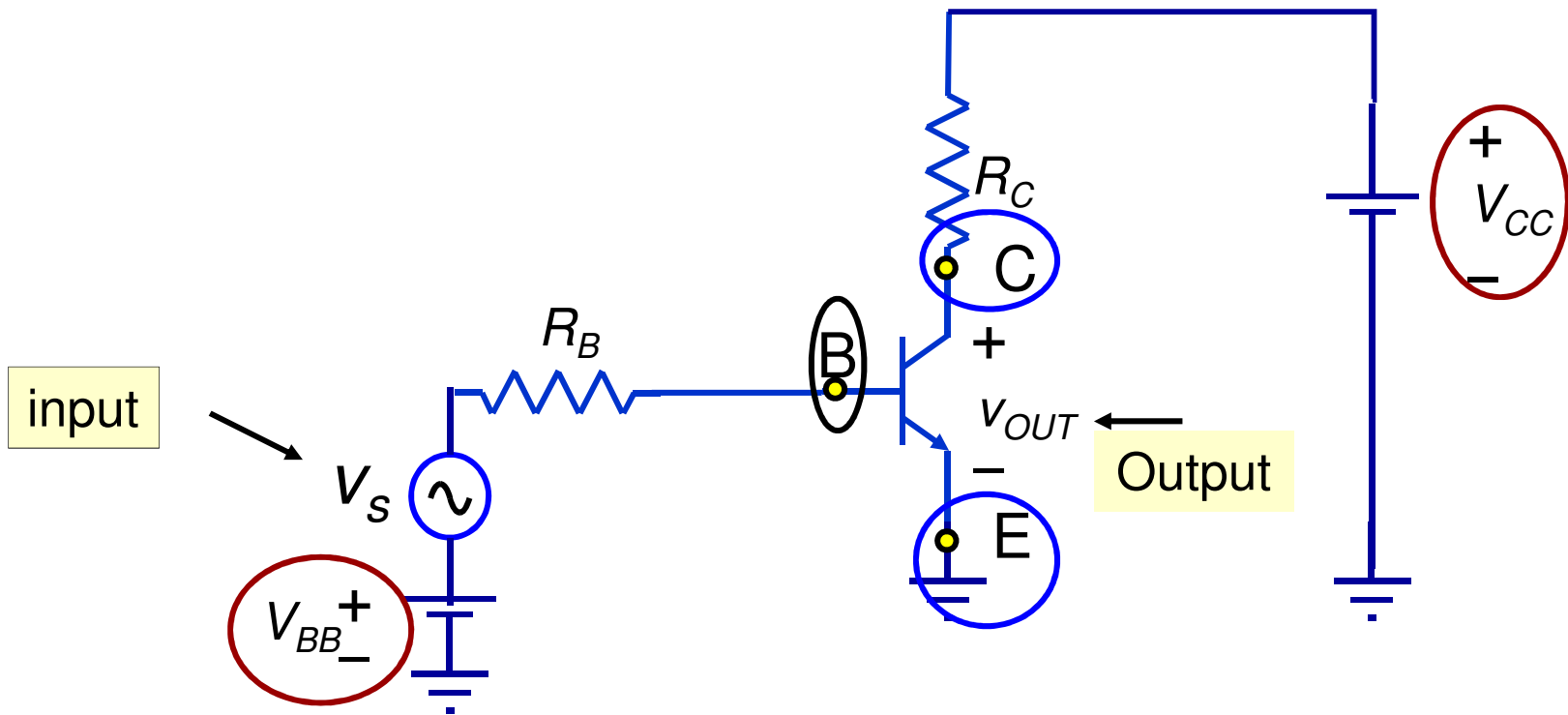
Attenuation Factors

$$R_p = R_2 \parallel (2R_1 + R_2)$$

Amplificadores com transístores

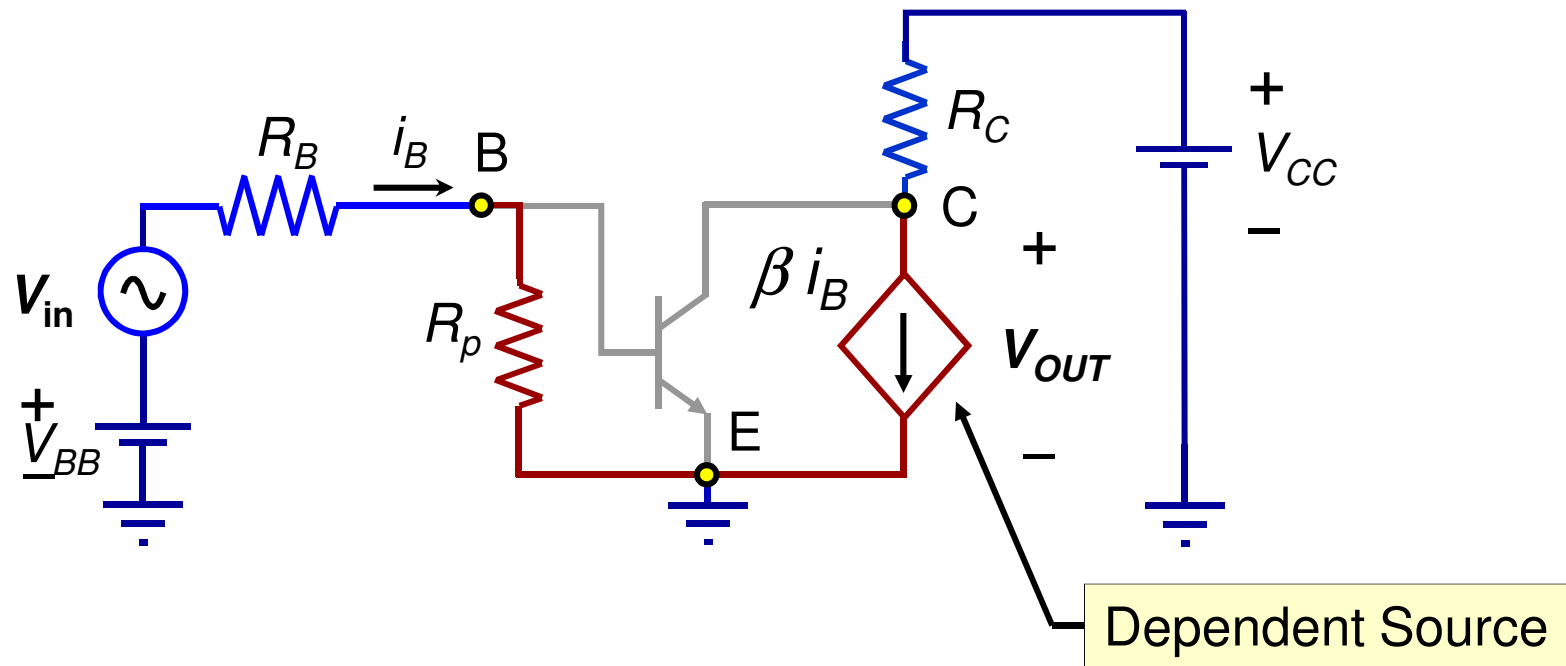
Amplificador com transístor I (para reвер)

Transistor Amplifier



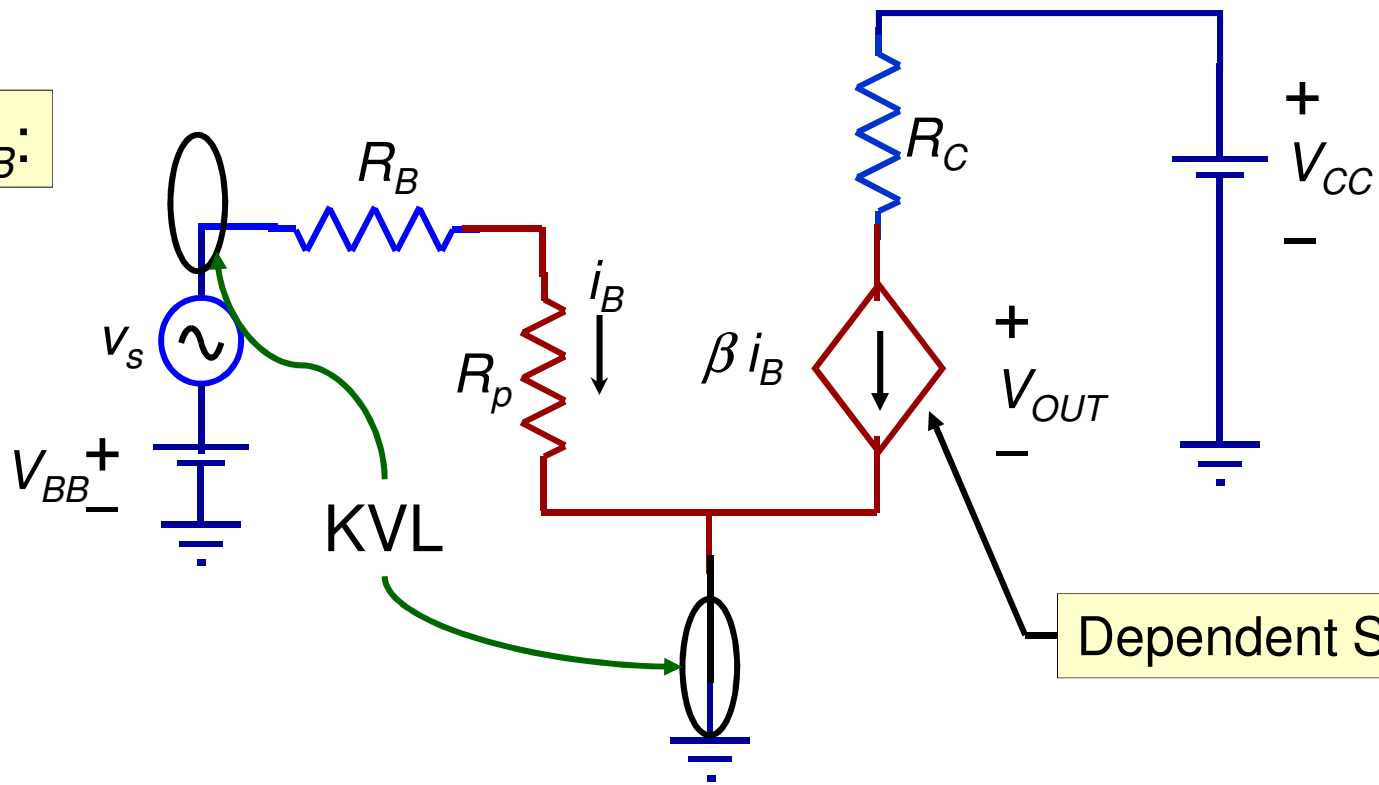
Amplificador com transístor I (para rever)

Substituindo o transístor pelo seu modelo



Amplificador com transístor I (para reвер)

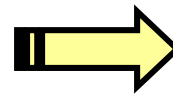
Find i_B :



Dependent Source

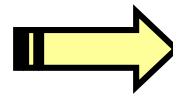
KVL:

$$V_{BB} + v_s = i_B (R_B + R_p)$$



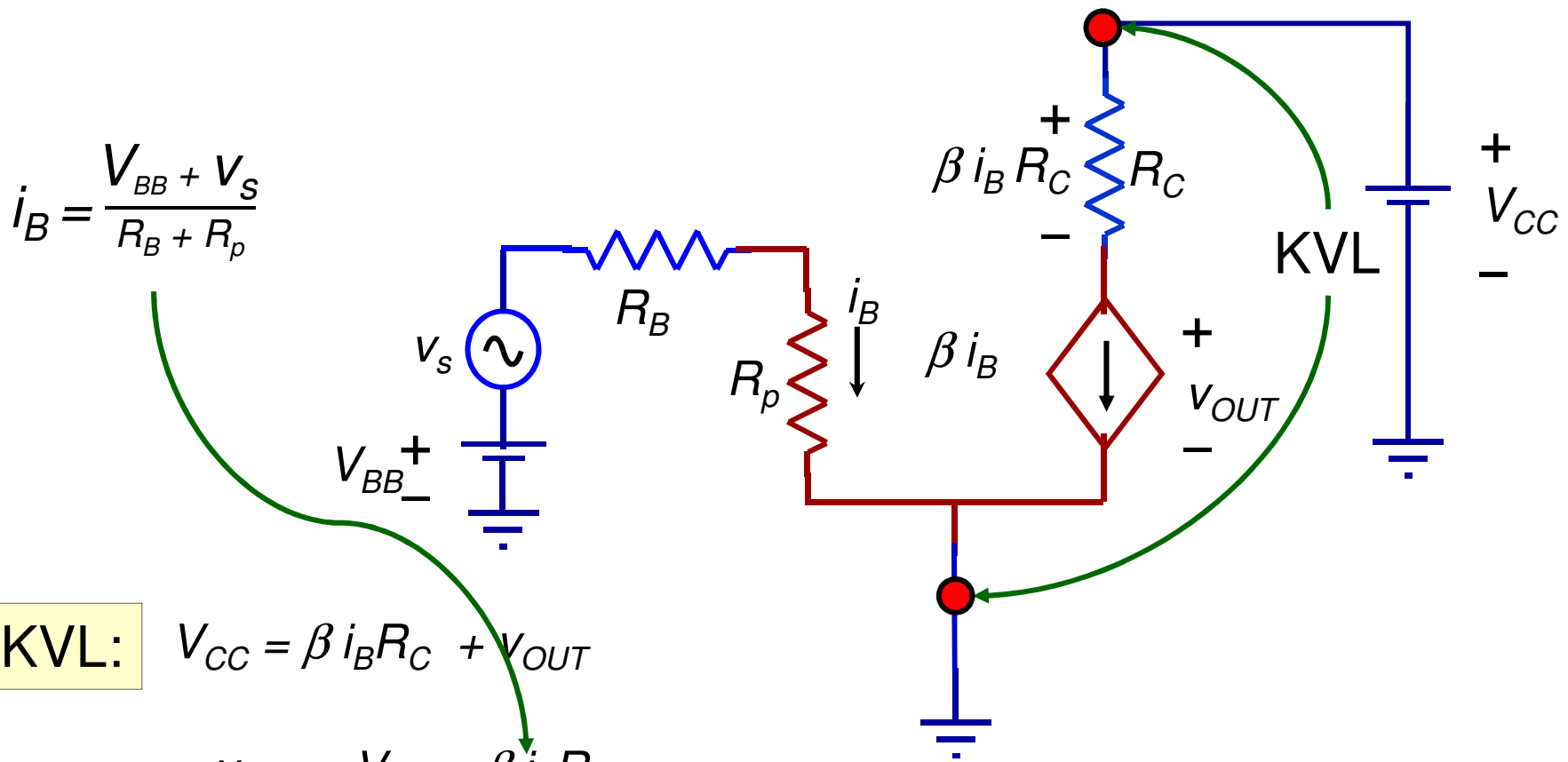
$$i_B = \frac{V_{BB} + v_s}{R_B + R_p}$$

We know i_B



Find v_{OUT}

Amplificador com transístor I (para rever)



$$i_B = \frac{V_{BB} + V_S}{R_B + R_P}$$

KVL: $V_{CC} = \beta i_B R_C + V_{OUT}$

$$V_{OUT} = V_{CC} - \beta i_B R_C$$

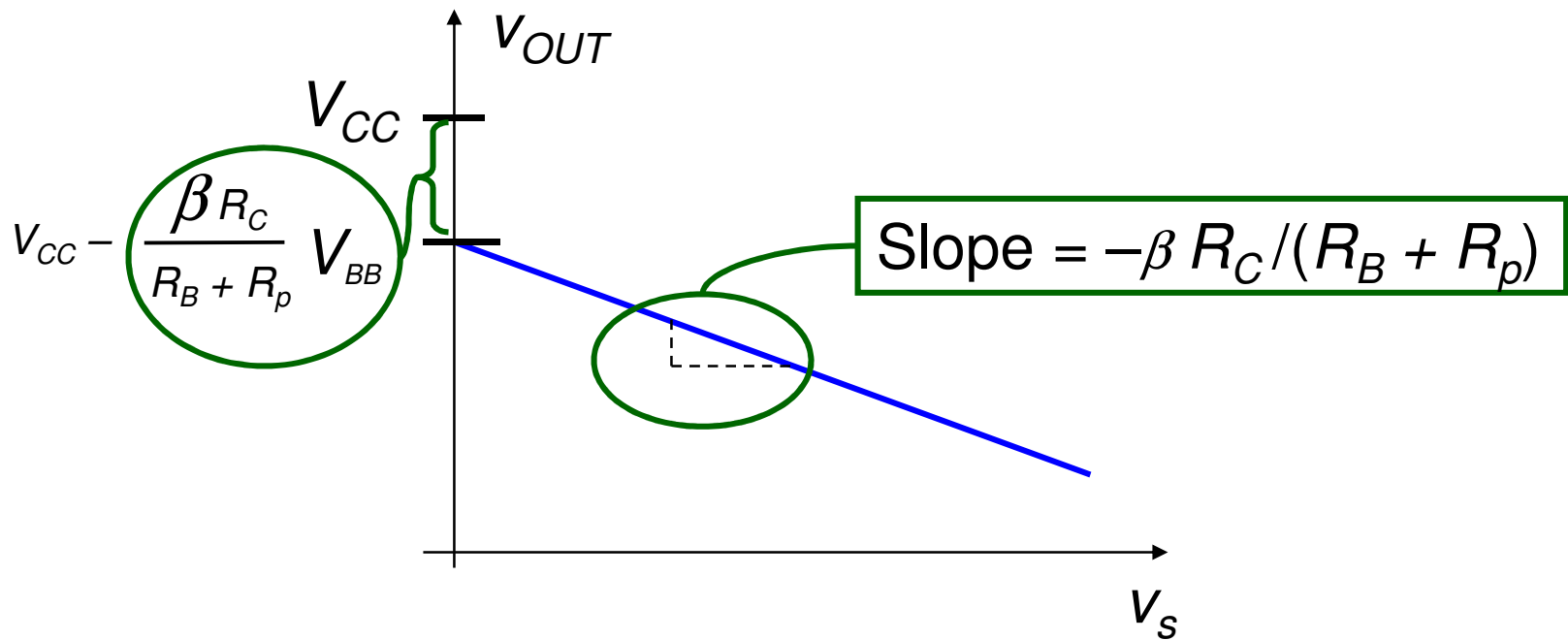
$$V_{OUT} = V_{CC} - \left(\frac{\beta R_C}{R_B + R_P} \right) (V_{BB} + V_S)$$

Gain Factor

Amplificador com transístor I (para rever)

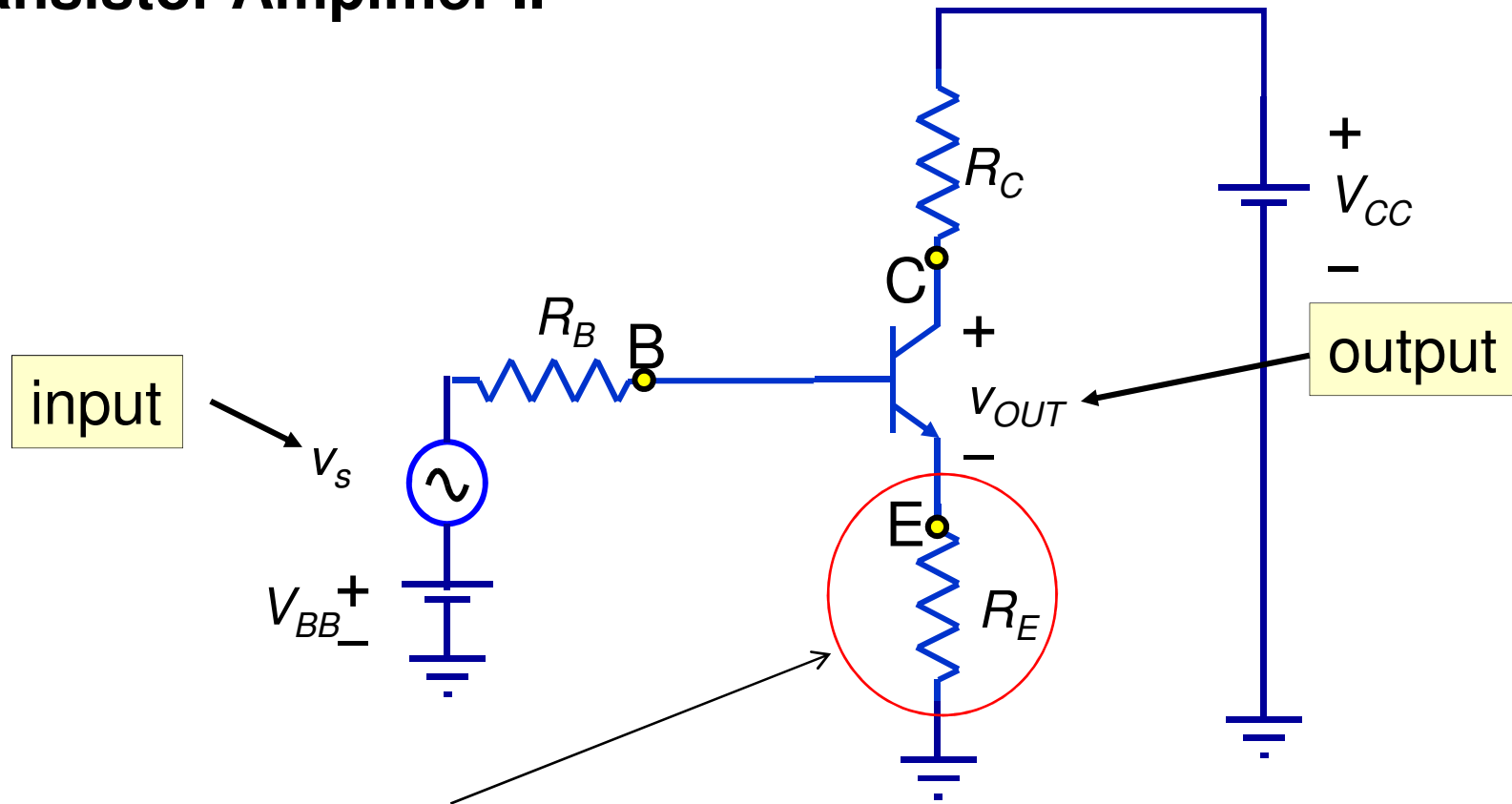
Fator de ganho

$$V_{OUT} = V_{CC} - \frac{\beta R_C}{R_B + R_p} (V_{BB} + v_s)$$



Amplificador com transístor II (para rever)

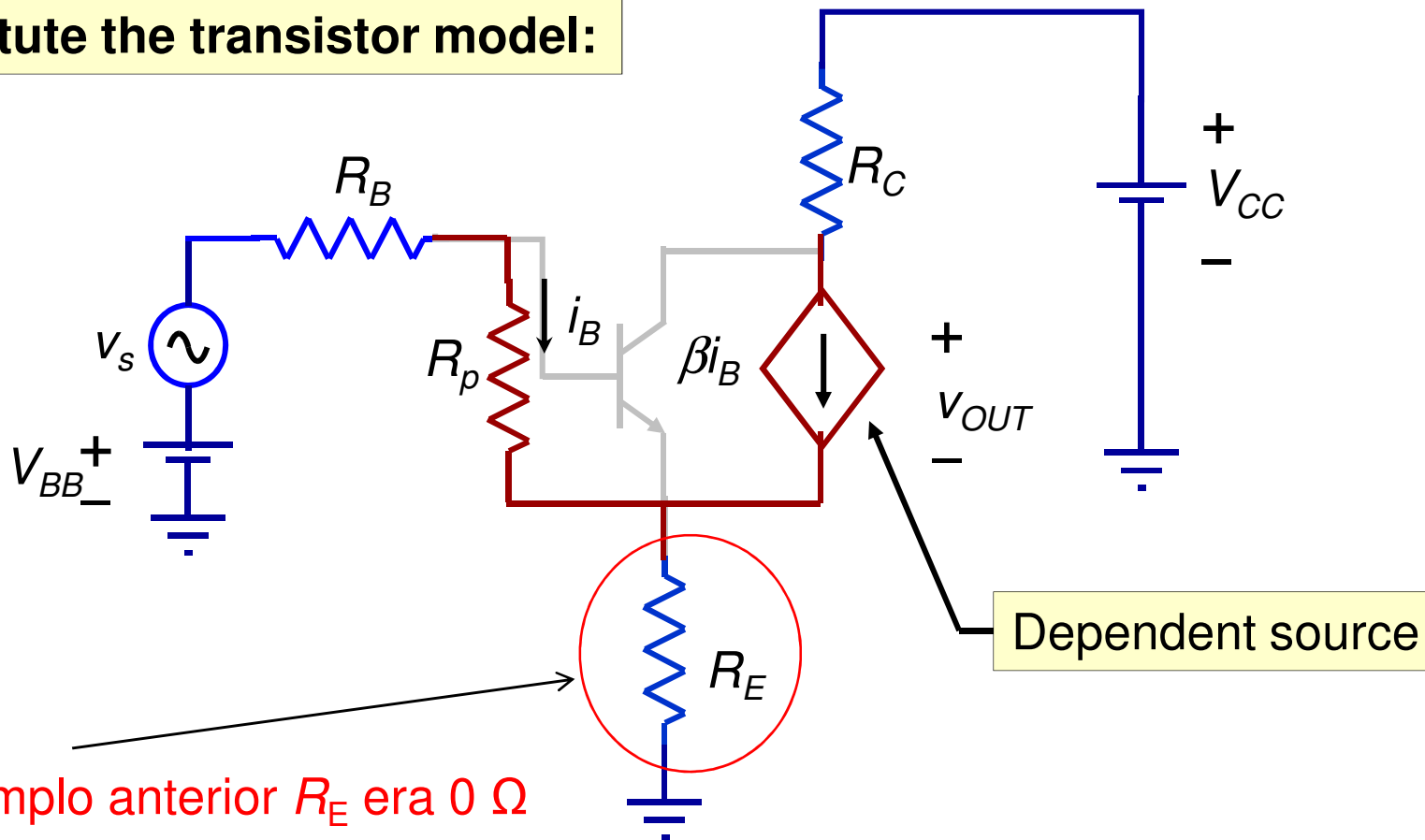
Transistor Amplifier II



No exemplo anterior R_E era 0Ω

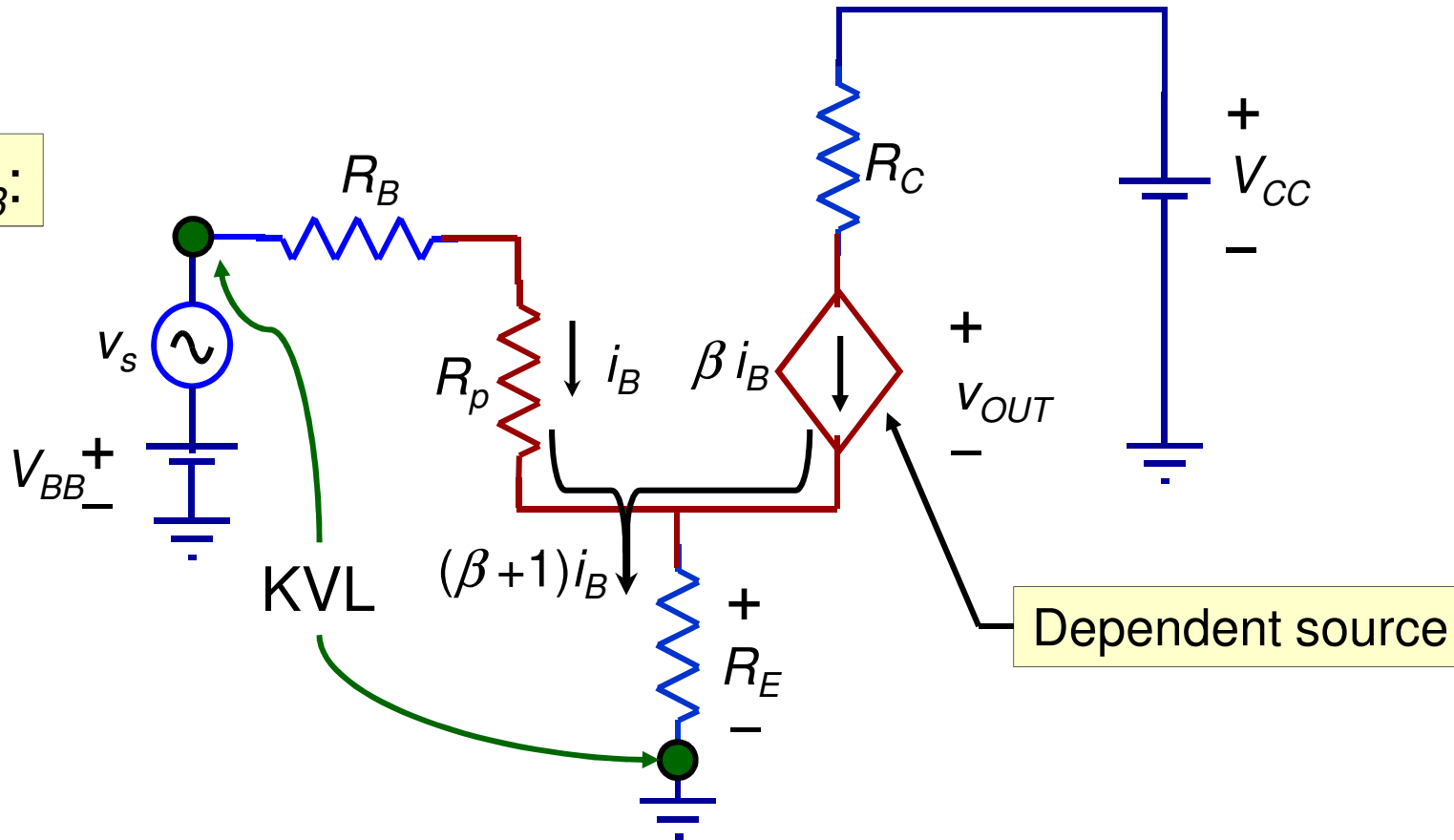
Amplificador com transístor II (para rever)

Substitute the transistor model:



Amplificador com transístor II (para rever)

Find i_B :

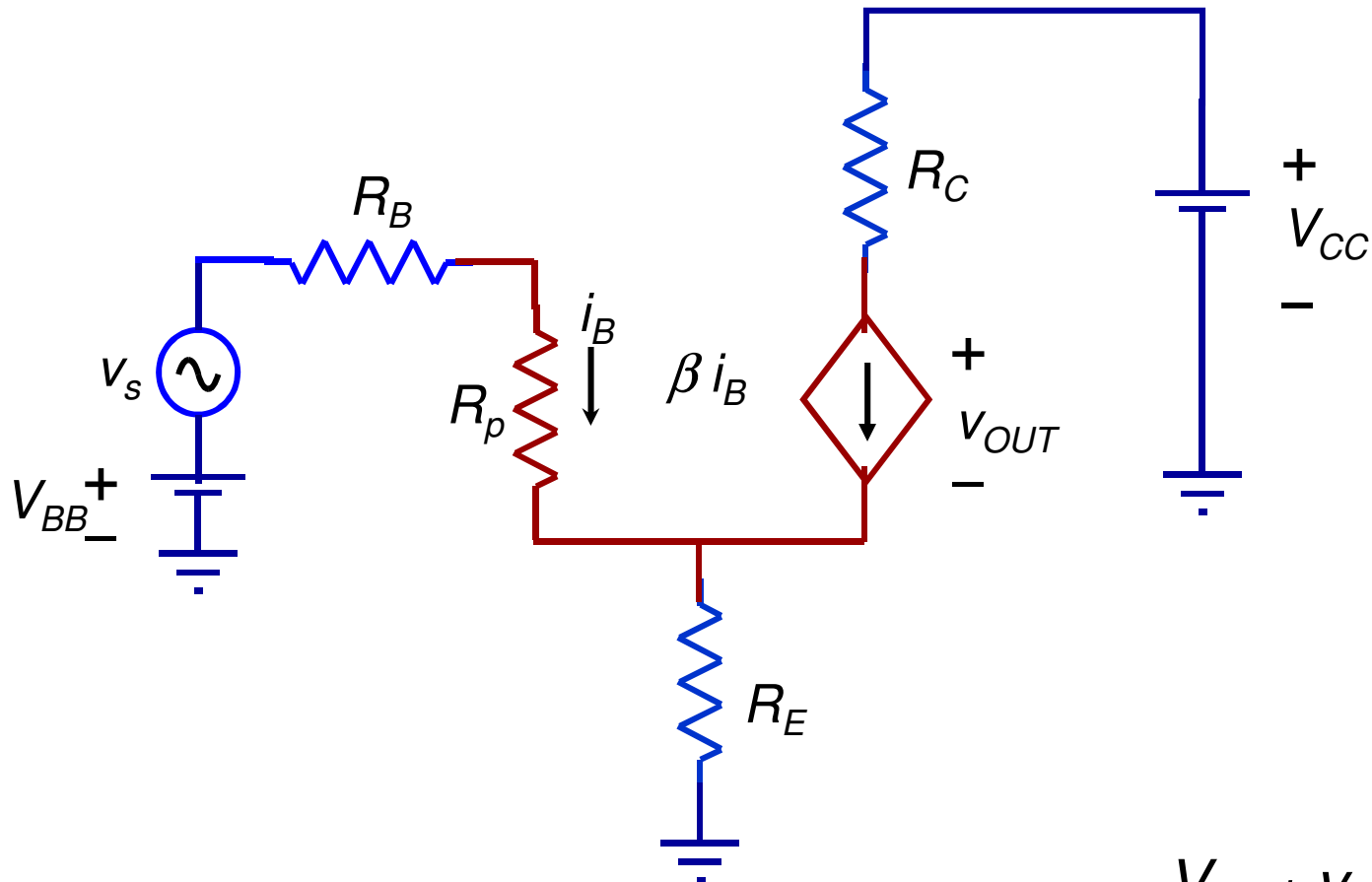


KVL:

$$V_{BB} + v_s = i_B (R_B + R_p) + (\beta + 1) i_B R_E$$

Drop across R_E

Amplificador com transístor II (para rever)

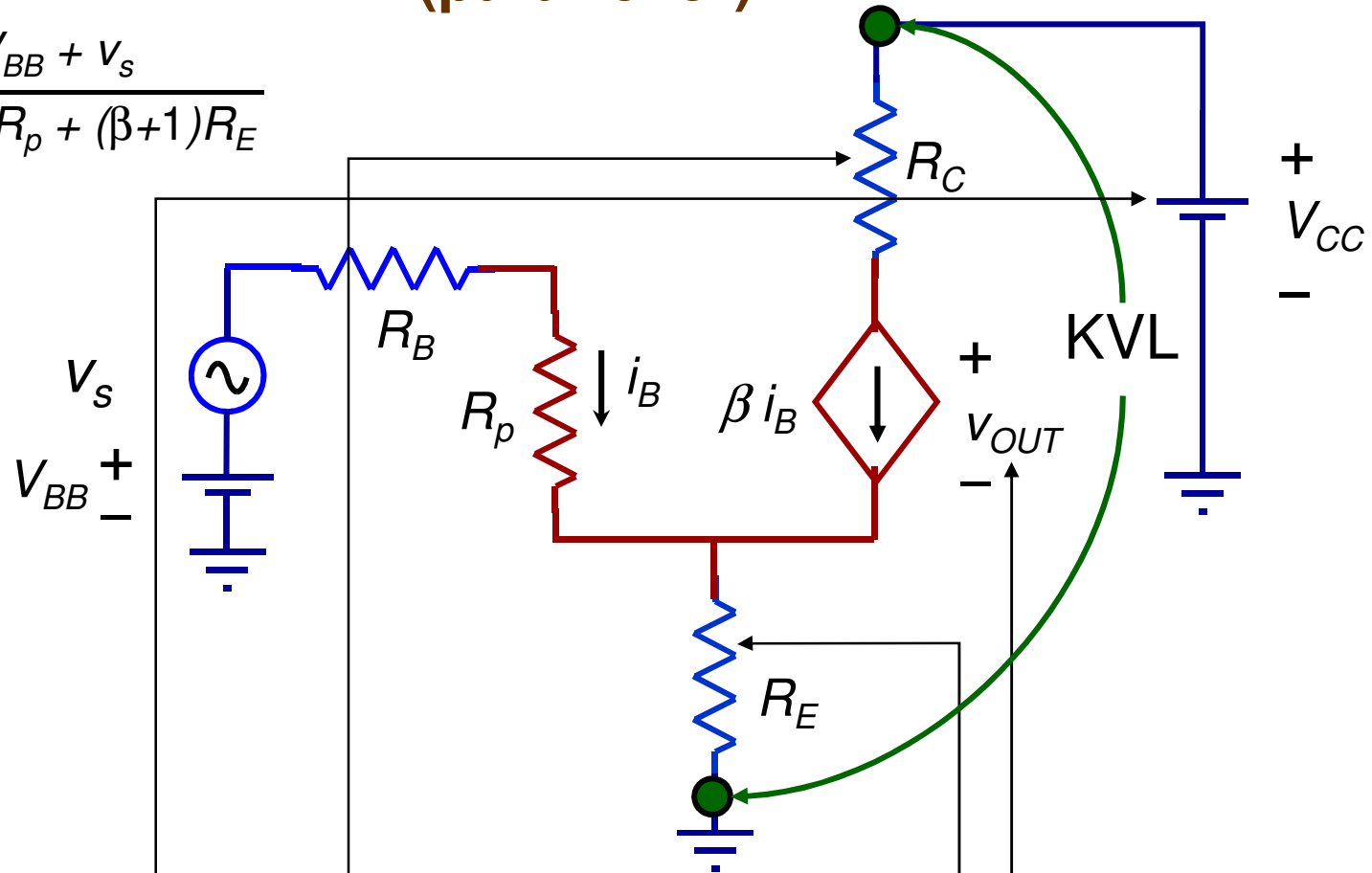


$$V_{BB} + v_s = i_B(R_B + R_p) + (\beta + 1)i_B R_E \quad \Rightarrow \quad i_B = \frac{V_{BB} + v_s}{R_B + R_p + (\beta + 1)R_E}$$

We know i_B \Rightarrow Find v_{OUT}

Amplificador com transístor II (para rever)

$$i_B = \frac{V_{BB} + v_s}{R_B + R_p + (\beta + 1)R_E}$$



KVL:

$$V_{CC} = \beta i_B R_C + v_{OUT} + (\beta + 1) i_B R_E$$

Amplificador com transístor II (para rever)

$$i_B = \frac{V_{BB} + V_S}{R_B + R_p + (\beta + 1)R_E}$$

(from input loop)

$$V_{CC} = \beta i_B R_C + V_{OUT} + (\beta + 1)i_B R_E$$

(from output loop)

Solve for v_{OUT}

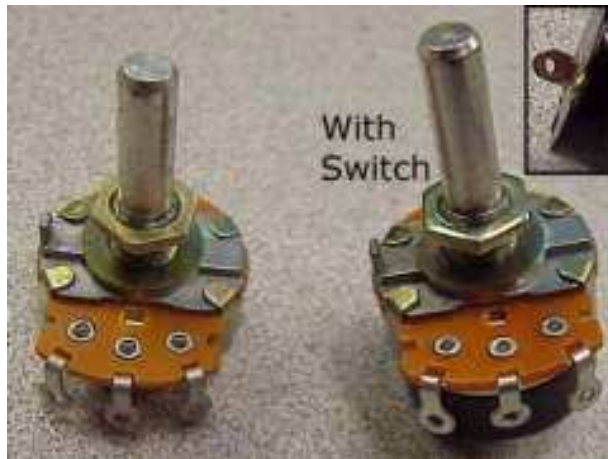
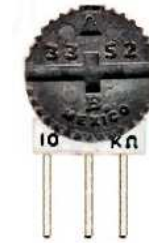
$$\begin{aligned} V_{OUT} &= V_{CC} - [\beta i_B R_C + (\beta + 1)i_B R_E] \\ &= V_{CC} - i_B [\beta R_C + (\beta + 1)R_E] \end{aligned}$$

Fator de ganho

$$V_{OUT} = V_{CC} - (V_{BB} + V_S) \frac{\beta R_C + (\beta + 1)R_E}{R_B + R_p + (\beta + 1)R_E}$$

Circuitos com potenciômetros

Como funciona um potenciômetro (resistância variável)

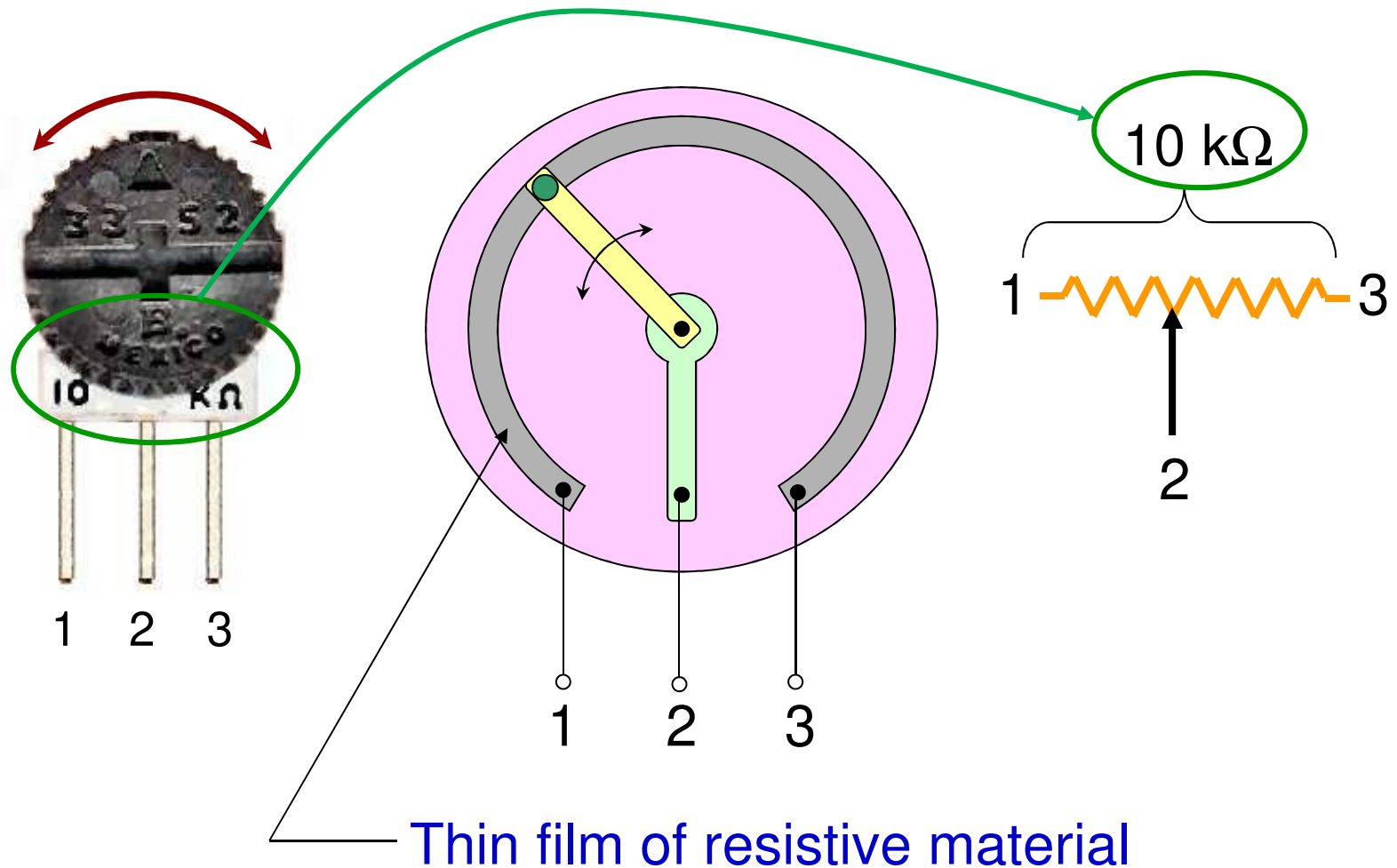


Variable Power Resistor

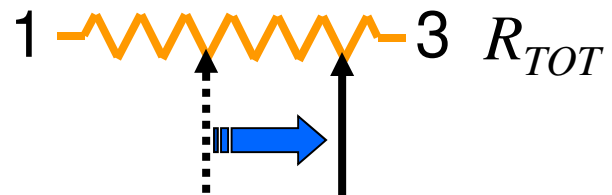
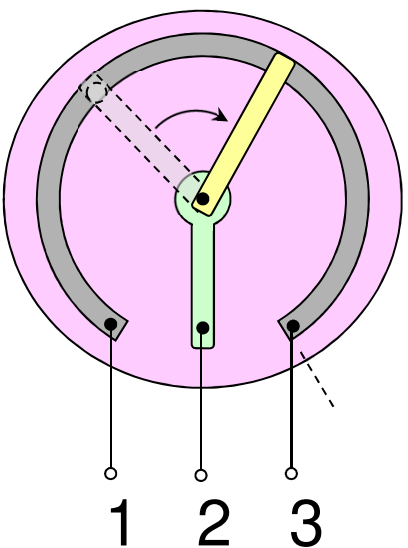
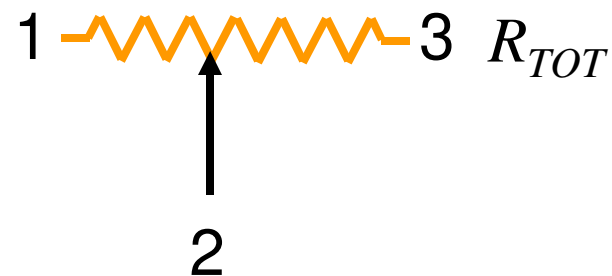
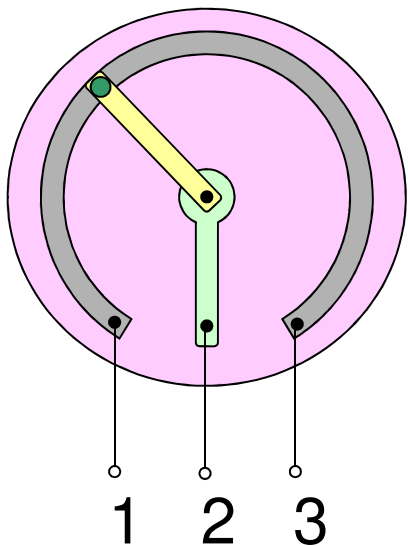
Ten Turn Potentiometers



Funcionamento de um potenciômetro (resistência variável)

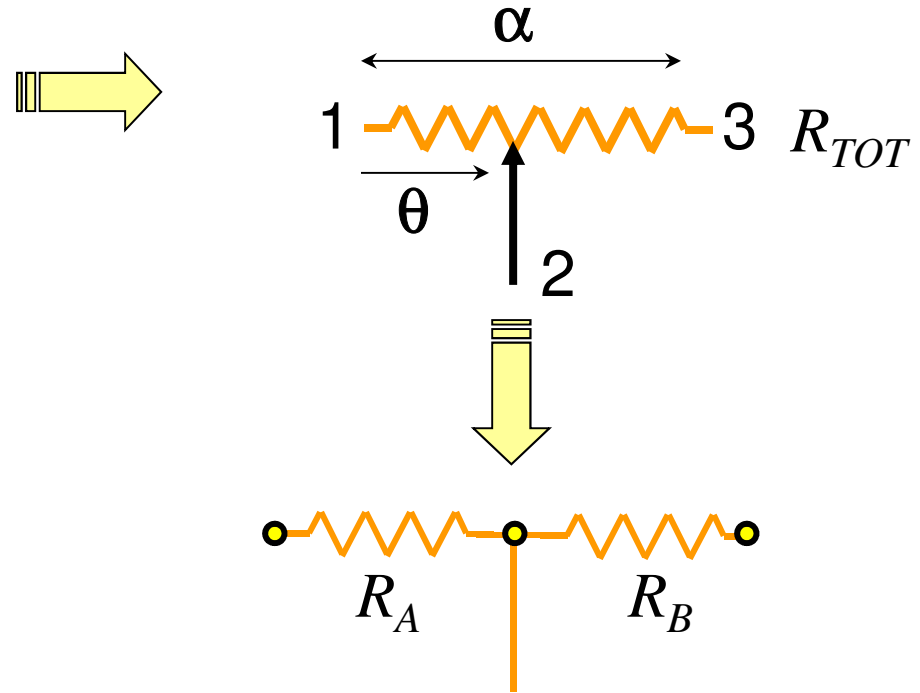
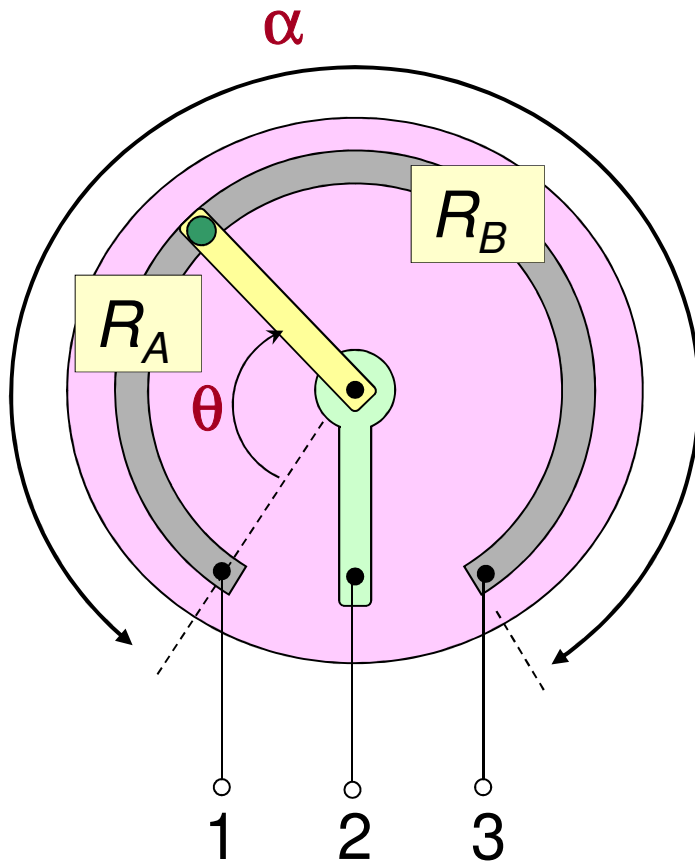


Potenciómetro como divisor resistivo



Potenciómetro como divisor resistivo

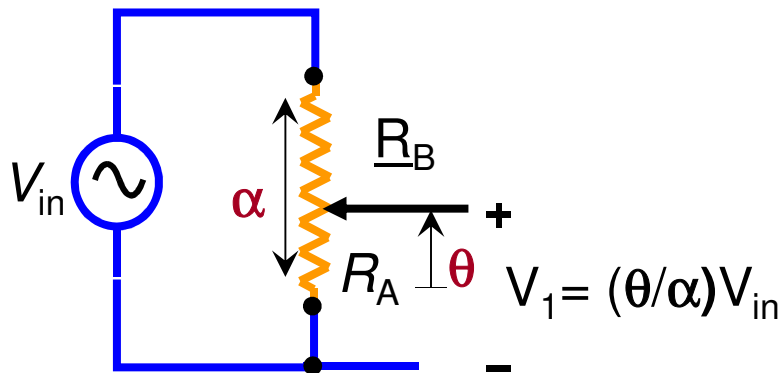
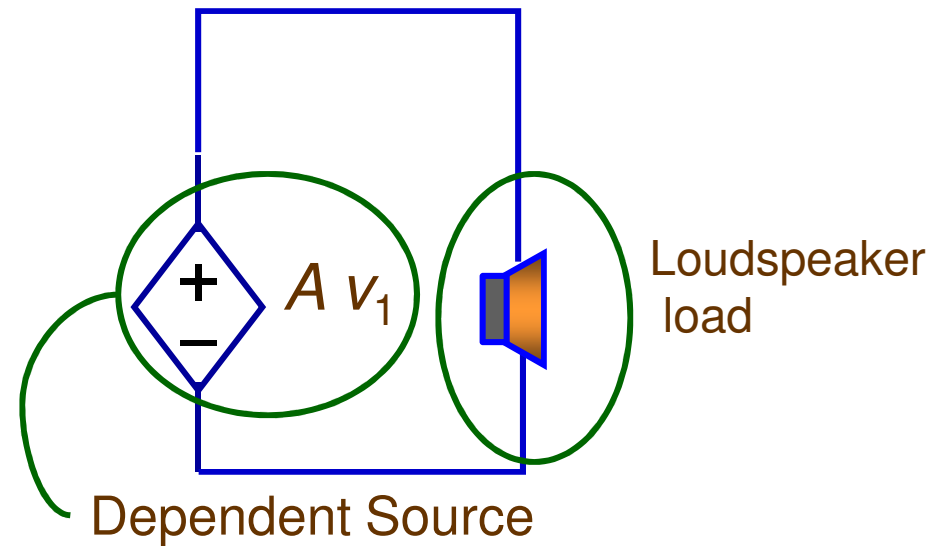
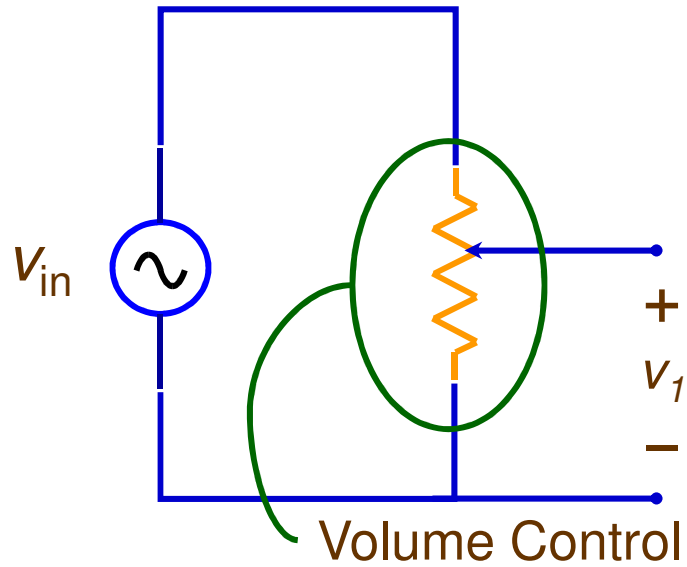
Resistive Divider



$$R_A = \frac{\theta}{\alpha} R_{TOT}$$

$$R_B = \frac{(\alpha - \theta)}{\alpha} R_{TOT}$$

Uso do potenciômetro para controlar o volume de um amplificador de som

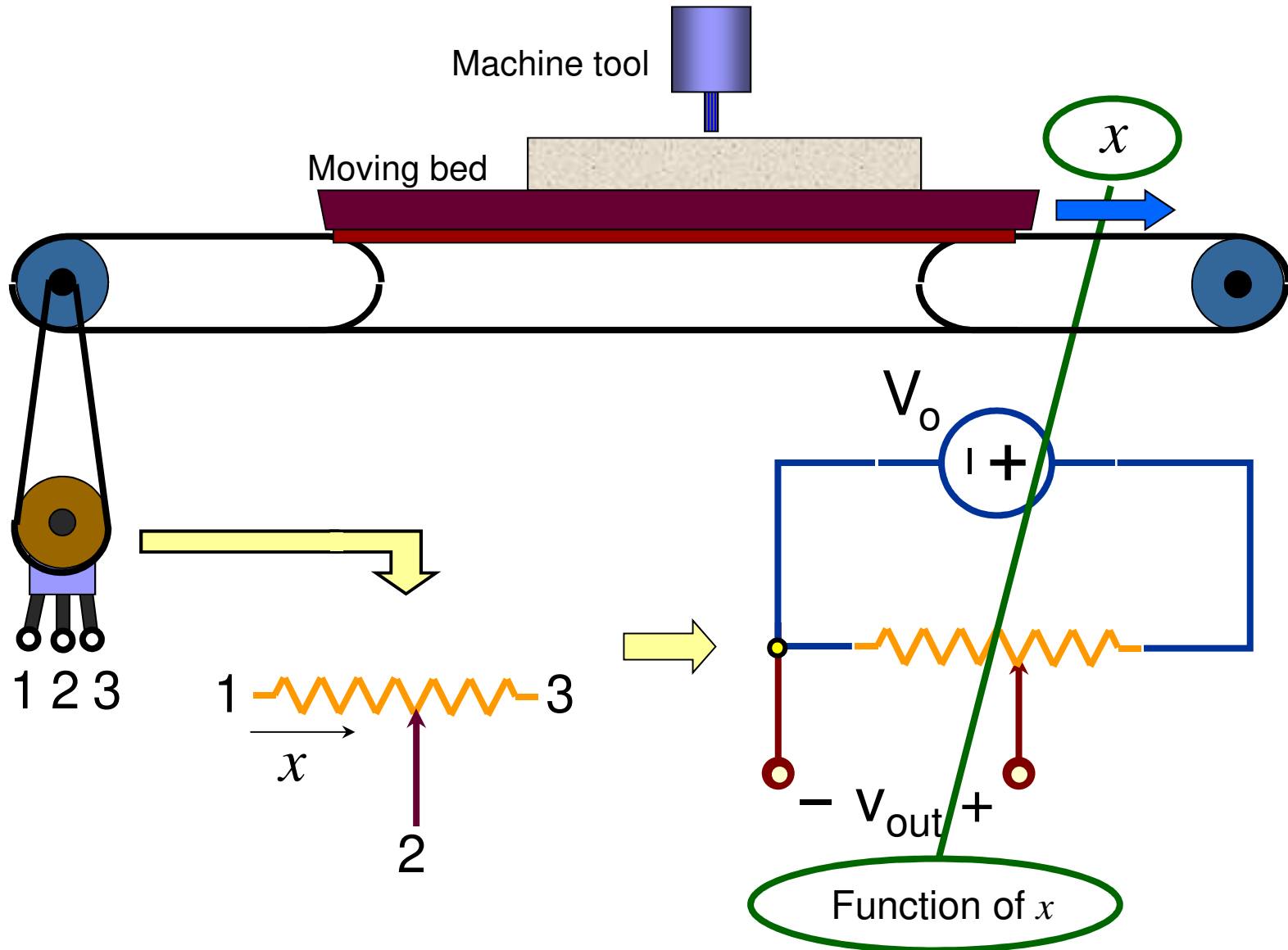


$$v_1 = \frac{R_A}{R_A + R_B} V_{in} = \frac{R_A}{R_{TOT}} V_{in}$$



$$v_1 = \frac{\theta}{\alpha} V_{in}$$

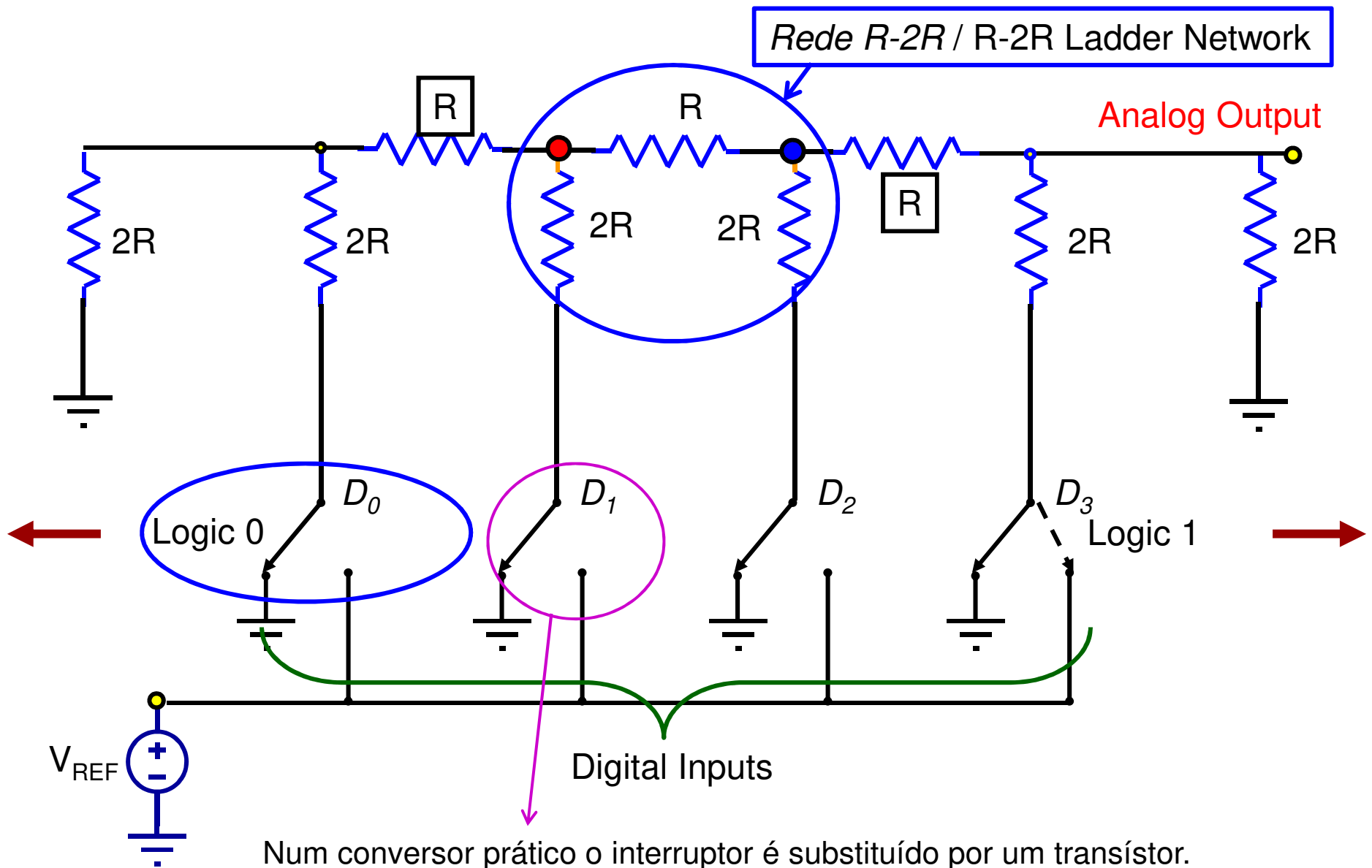
Uso do potenciômetro num sensor de posição



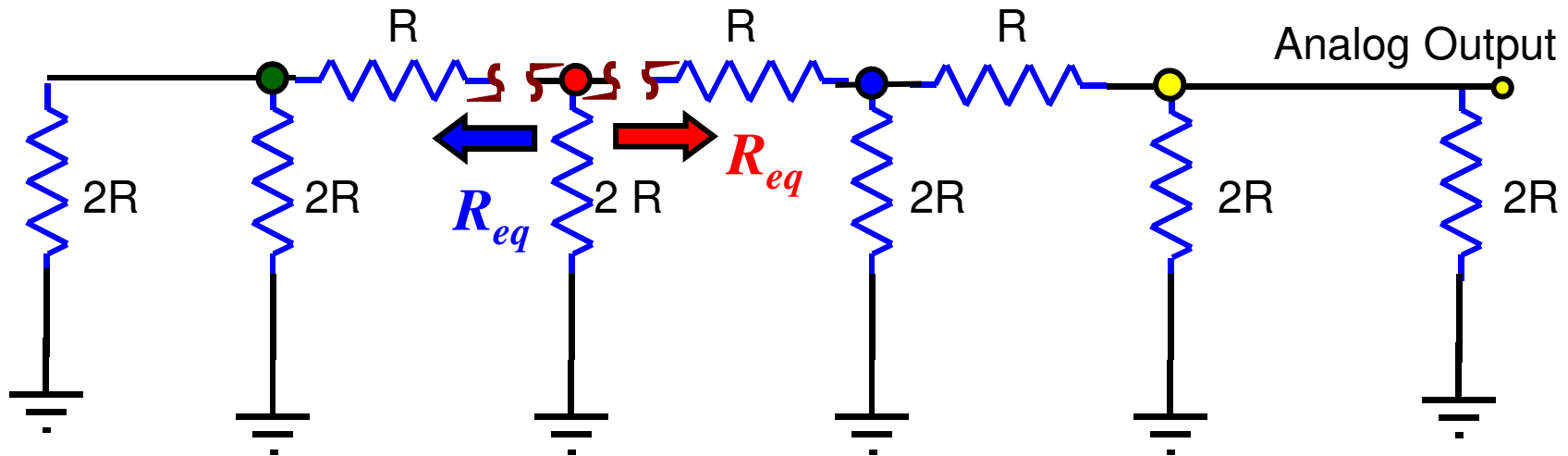
Rede R-2R / R-2R Ladder Network

(componente de conversor digital-analógico simples)

Conversor digital-analógico simples



Rede $R-2R$ / $R-2R$ Ladder Network



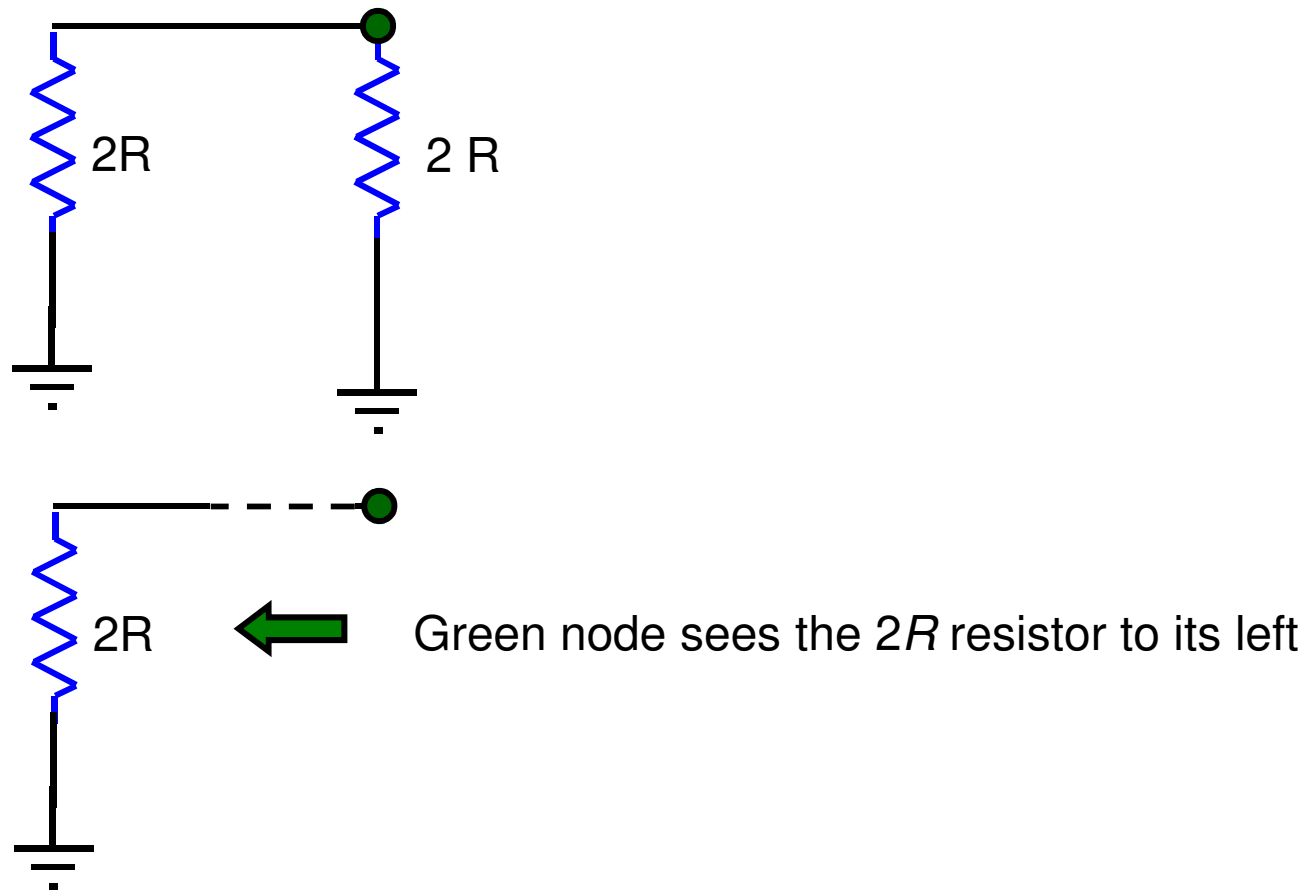
Objective: Show that resistance to **right** or **left** of *any* node is $2R$

Specific value of R does not matter

Rede $R-2R$ / $R-2R$ Ladder Network

Objective: Show that resistance to **right** or **left** of *any* node is $2R$

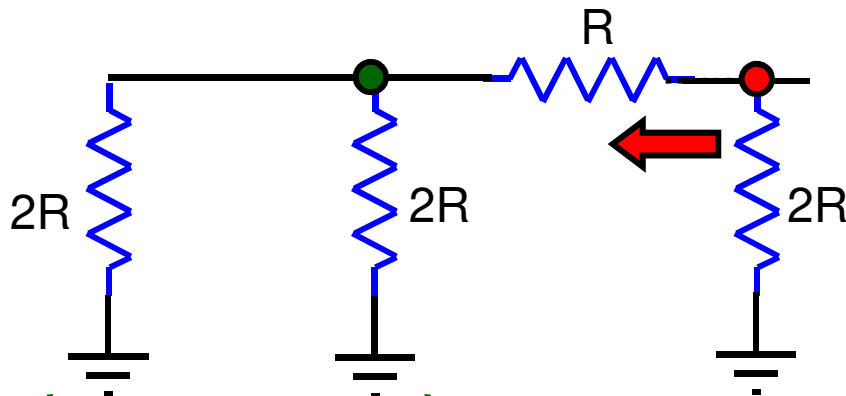
Check out the **green** node:



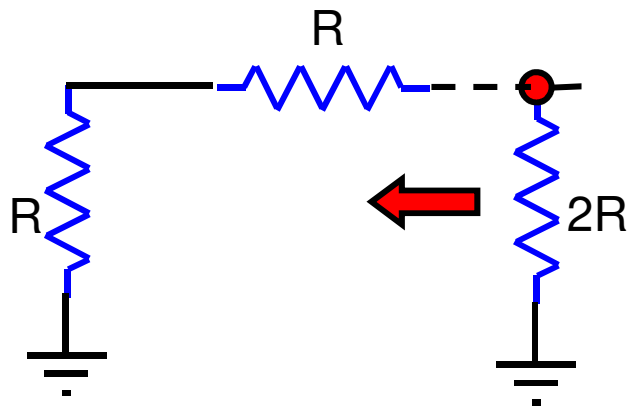
Rede $R-2R$ / $R-2R$ Ladder Network

Objective: Show that resistance to **right** or **left** of *any* node is $2R$

Check out the **red** node:

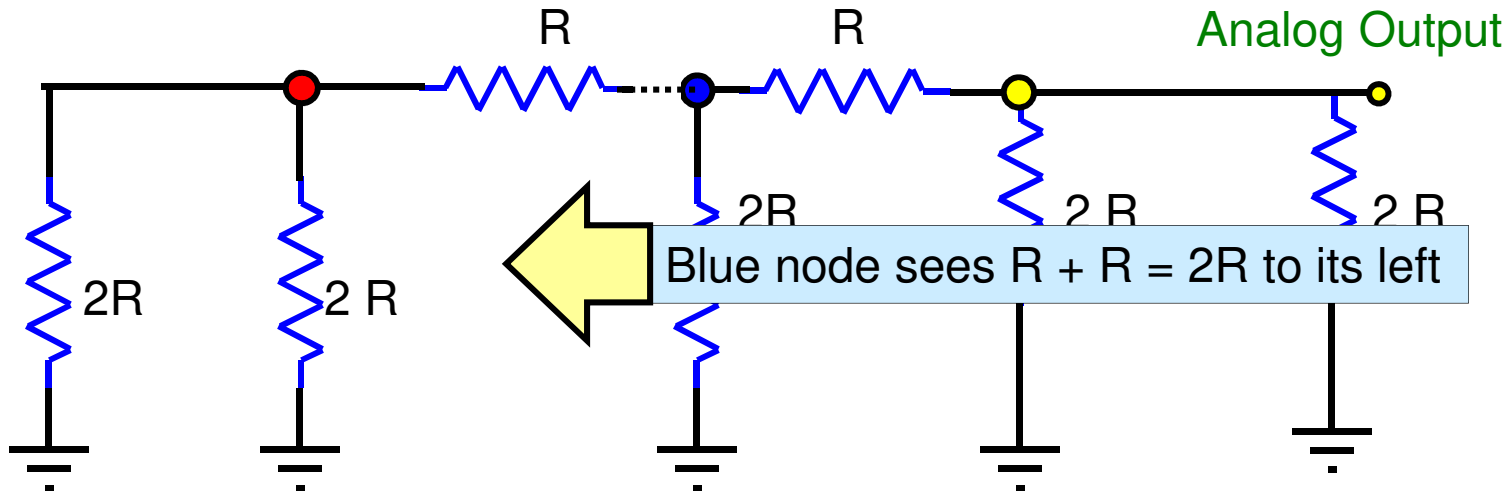


$$R \leftarrow (2R) \parallel (2R) = \frac{(2R)(2R)}{2R + 2R} = \frac{4R^2}{4R} = R$$

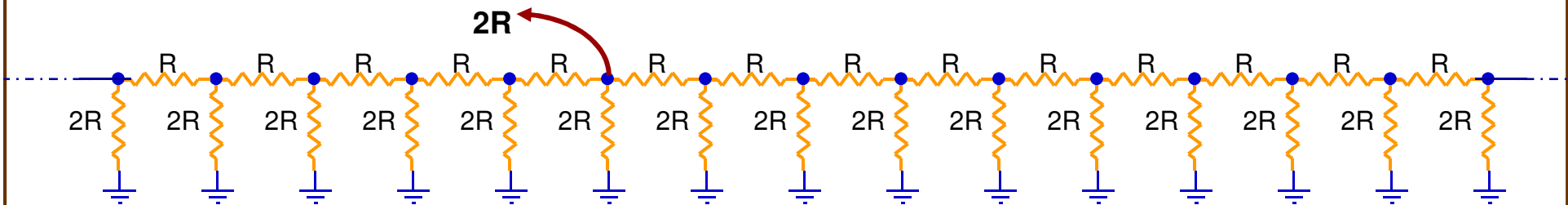


Red node sees $R + R = 2R$ to its left

Rede $R-2R$ / $R-2R$ Ladder Network

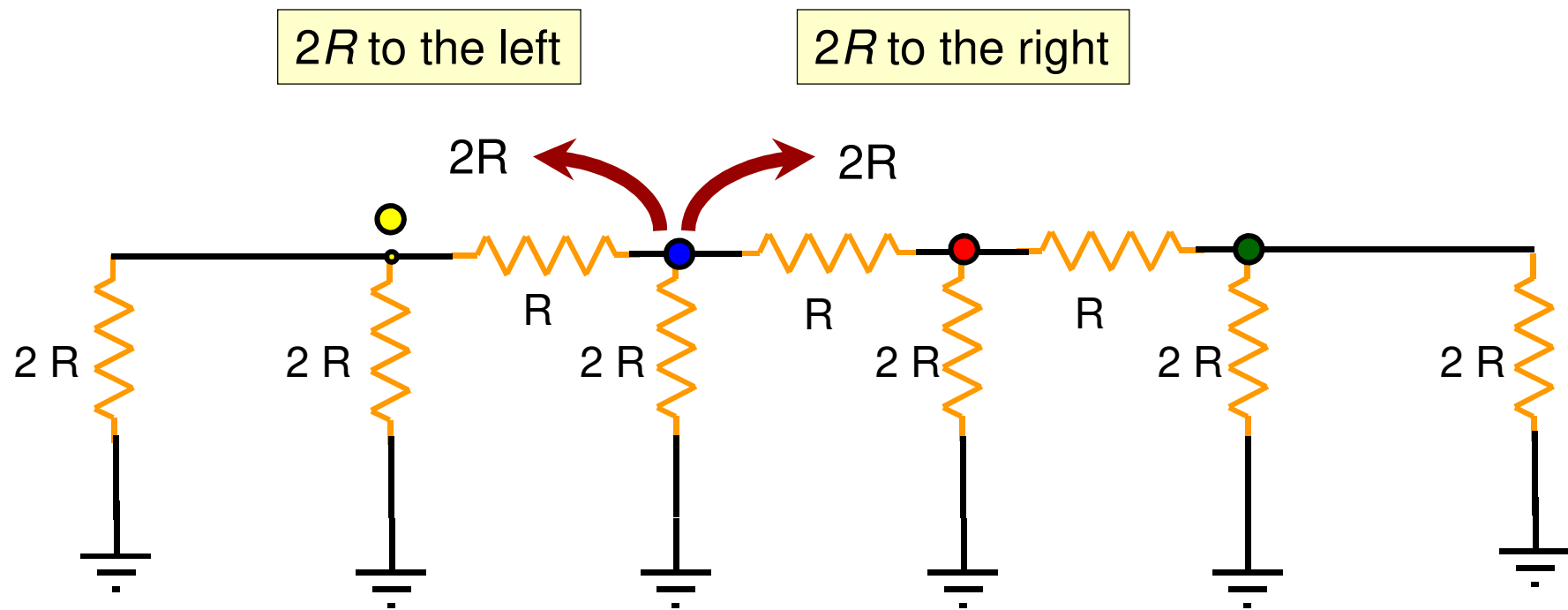


- This pattern now repeats for every node down the line
- Independent of the number of nodes in the cascade



Rede $R-2R$ / $R-2R$ Ladder Network

The circuit has left-right symmetry



Circuitos Elétricos e Sistemas Digitais

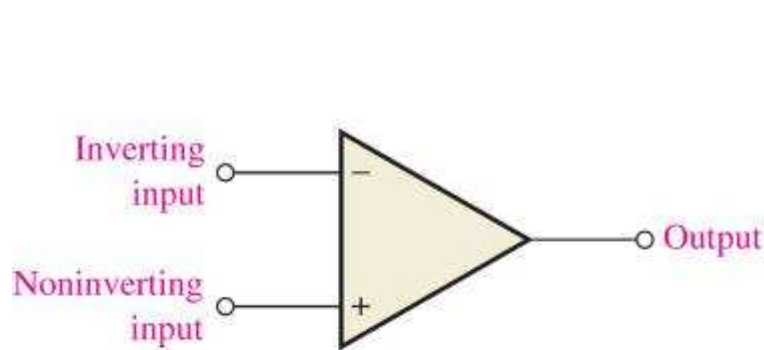
2018-2019 - 1.º Semestre

Amplificador operacional

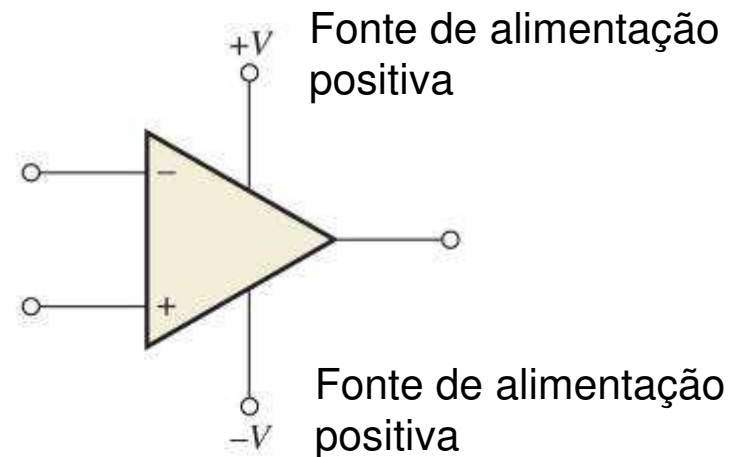
- Amplificador operacional ideal e amplificador operacional real
- Realimentação negativa/retroação negativa
- Circuitos com realimentação negativa
- Impedâncias de entrada e de saída de um amplificador não inversor
- Impedâncias de entrada e de saída de um amplificador inversor
- Montagem seguidor de tensão
- Amplificador somador e amplificador diferença
- Amplificador integrador e amplificador diferenciador
- Filtros ativos
- Circuitos detetor de zero, detetor de nível, e comparadores
- Realimentação positiva/Retroação positiva
- Osciladores

As figuras apresentadas neste capítulo são, na sua maioria, retiradas do manual “*Electronics Fundamentals: Circuits, Devices & Applications*,” Pearson New International Edition (8e) By Thomas L Floyd, David Buchla. Outras fazem parte do capítulo sobre AmpOps do manual “*Microelectronic Circuits*”, 6th Edi, Sedra, Oxford

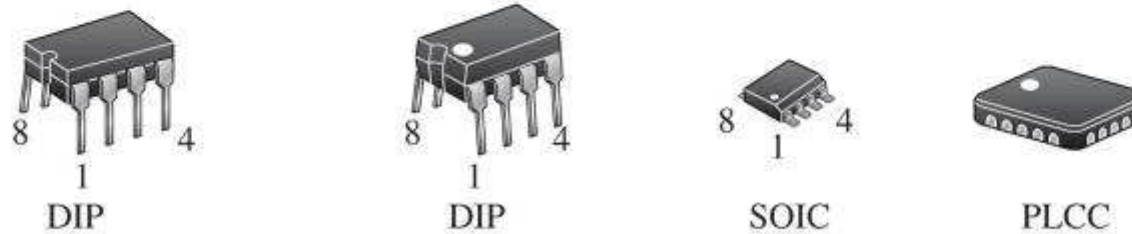
Símbolos do amplificador operacional e tipos de empacotamento



(a) Symbol



(b) Symbol with dc supply connections

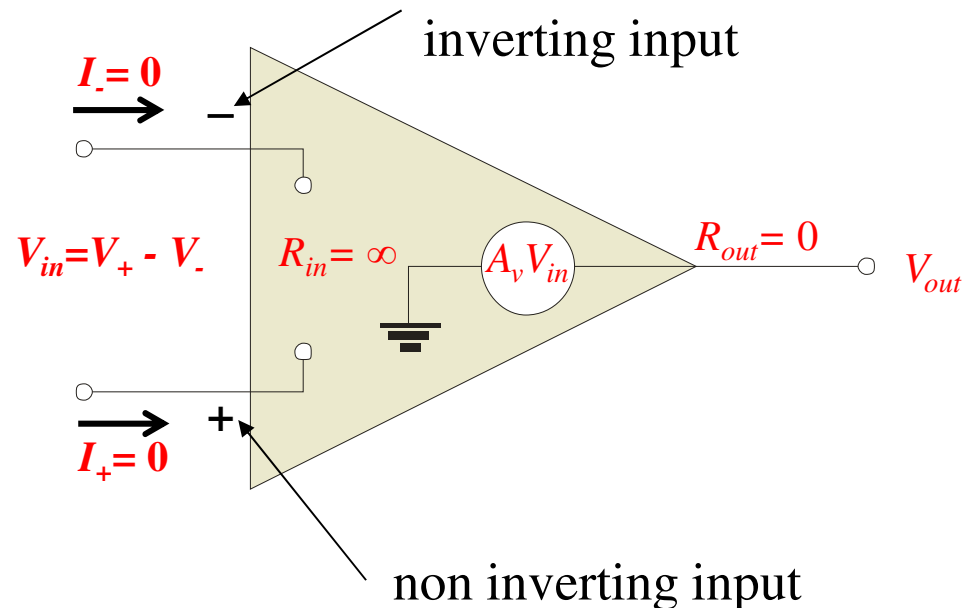


(c) Typical packages. Looking from the top, pin 1 always is to the left of the notch or dot on the DIP and SOIC packages. The dot indicates pin 1 on the plastic-leaded chip carrier (PLCC) package.

Amplificador operacional ideal

The ideal op-amp is one with optimum characteristics, which cannot be attained in the real world. Nevertheless, actual op-amp circuits can often approach this ideal.

The ideal op amp has infinite voltage gain A_v , infinite input resistance (open), and zero output resistance.



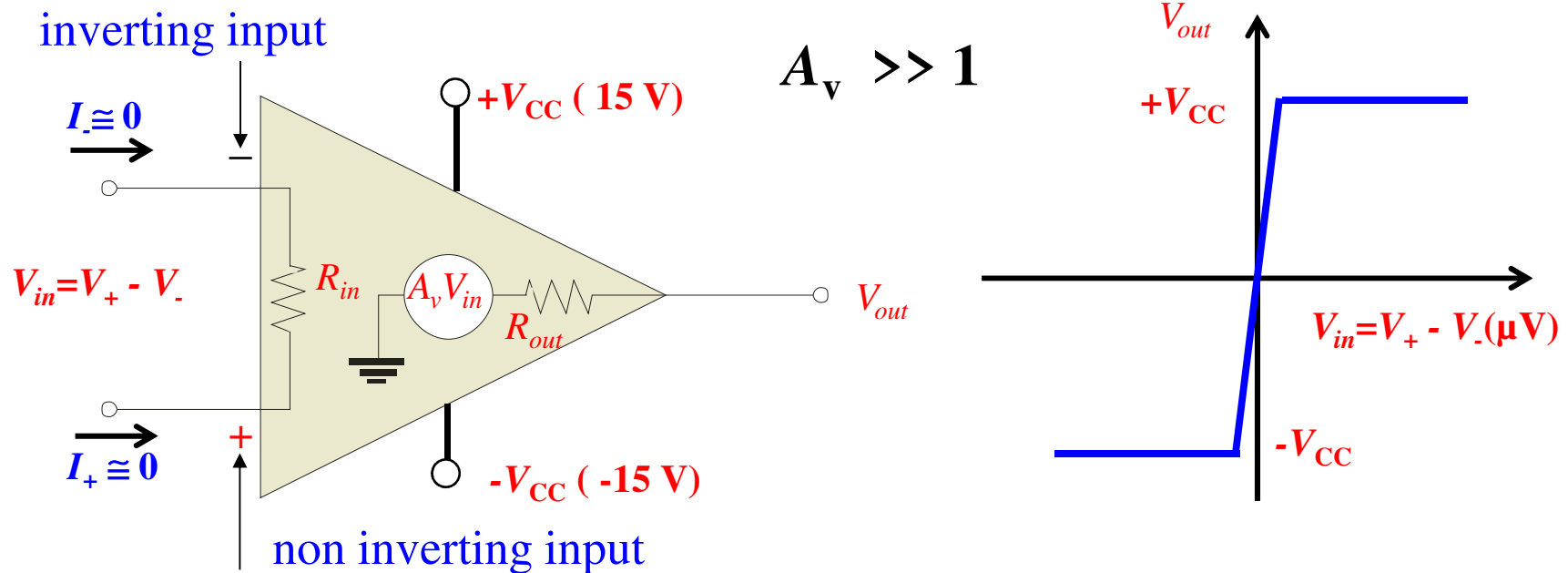
Ver também guia do trabalho prático nº 7:

http://webpages.ciencias.ulisboa.pt/%7Ejmfigueiredo/aulas/Pratica_n_07_CESDig_1819.pdf

Amplificador operacional real

Practical op-amps have limitations including power and voltage limits. A practical op-amp has high voltage gain A_v , high input resistance, and low output resistance.

There are two inputs, labeled inverting and non inverting because of the phase relation of the input and output signals.

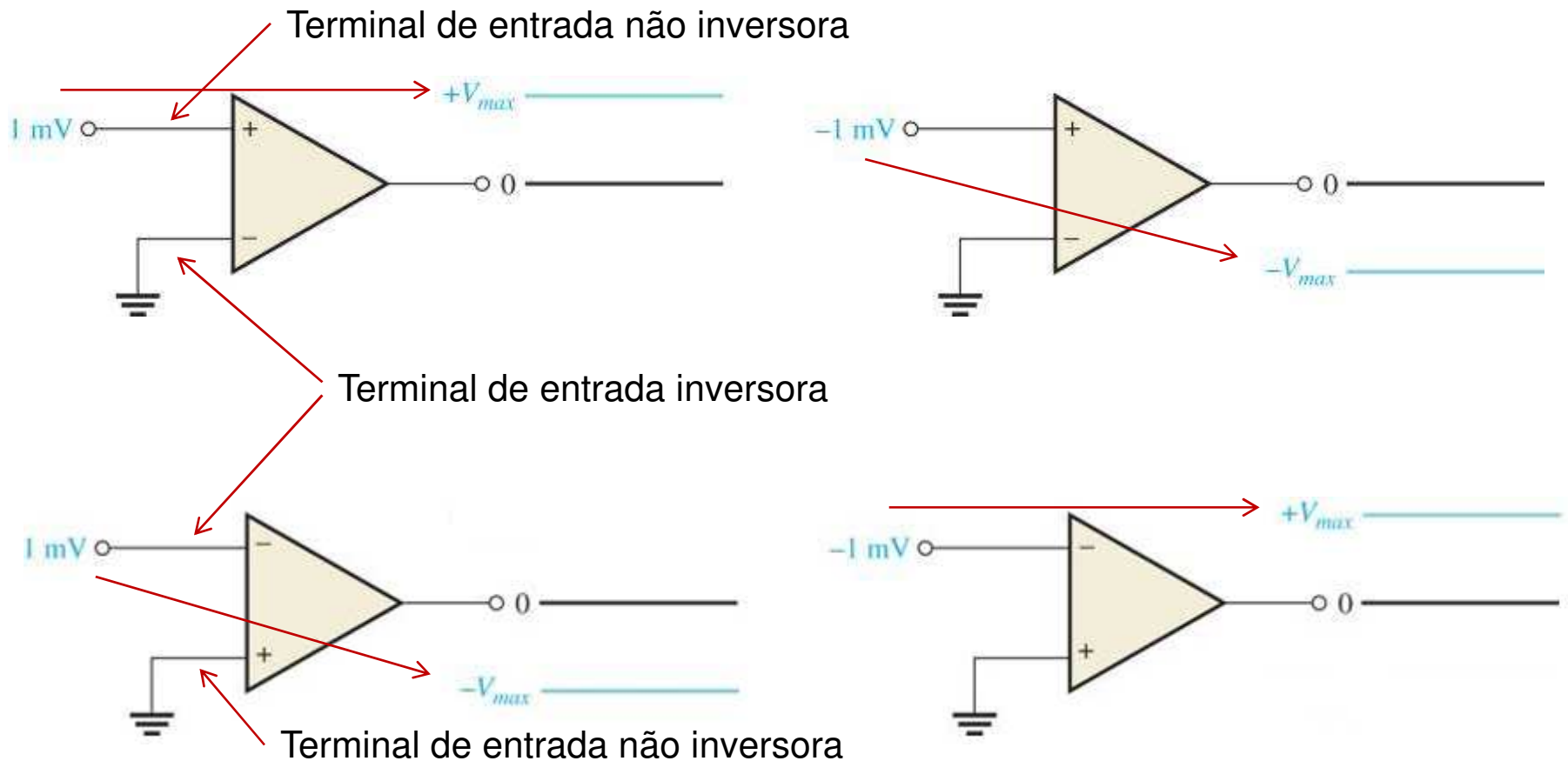


Ver também guia do trabalho prático nº 7:

http://webpages.ciencias.ulisboa.pt/%7Ejmfigueiredo/aulas/Pratica_n_07_CESDig_1819.pdf

Um amplificador operacional tem um ganho em malha aberta muito elevado

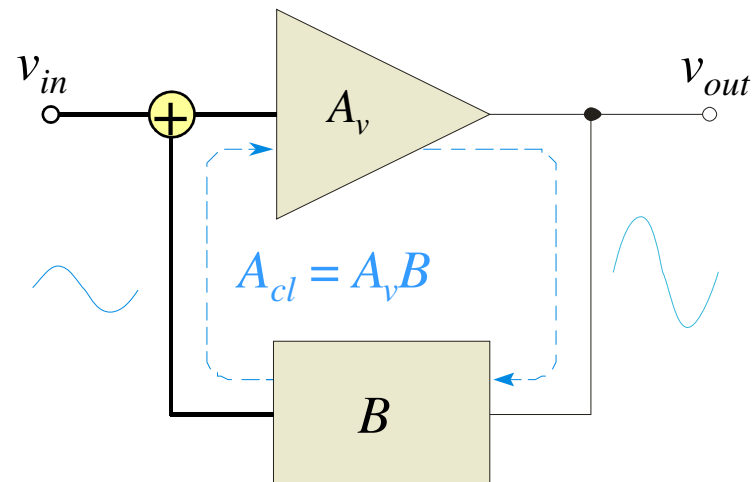
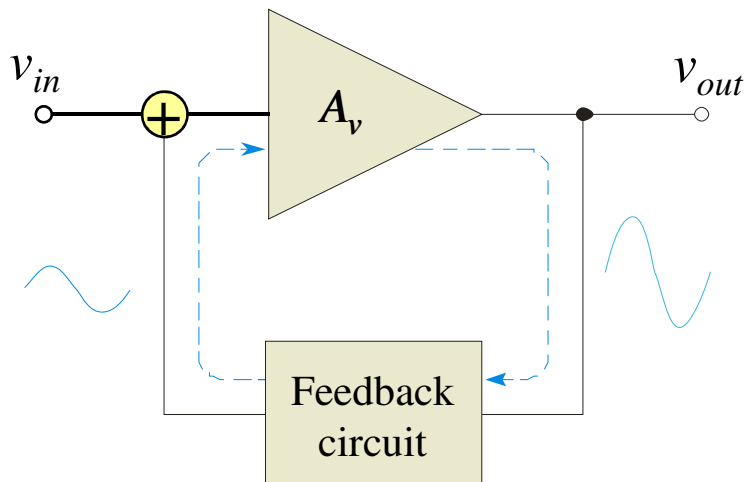
Without negative feedback, an extremely small difference in the two input voltages drives the op-amp to its output limits and it becomes nonlinear.



Montagens com realimentação/retroação (feedback)

Realimentação – Retroação (feedback)

A realimentação num amplificador consiste em reintroduzir uma parte do sinal de saída na entrada. Dependendo da(s) malha(s) exterior(es), a realimentação pode reforçar o sinal de entrada, ou contrariá-lo. Assim, a realimentação positiva correspondente a um reforço do sinal de entrada pela saída, e realimentação negativa, ao caso oposto.



A_v = ganho em malha aberta/sem realimentação

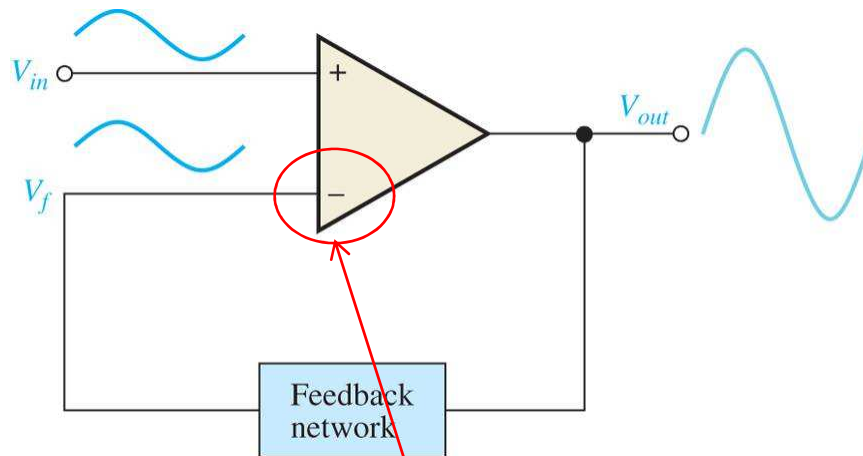
$A_{cl,f}$ = ganho em malha fechada/com realimentação

B = factor de realimentação

$$v_{out} = A_v(v_{in} + Bv_{out})$$
$$v_{out} = \frac{A_v}{1 - BA_v} = A_{cl}v_{in} \equiv A_f v_{in}$$

Montagem não inversora com realimentação/retroação negativa

Amp-ops com realimentação/retroação negativa (feedback negativo)



The op-amp has a **differential amplifier as the input stage**. When a feedback network returns a fraction **B** of the output V_{out} , $V_f = B V_{out}$, **to the inverting input**, only the difference signal $(V_{in} - V_f)$ is amplified.

B = factor de realimentação ou feedback

$$v_{out} = A_v (v_{in} - v_f) = A_v (v_{in} - B v_{out})$$

$$v_{out} = \frac{A_v}{1 + B A_v} v_{in} \equiv A_{cl} v_{in} \equiv A_f v_{in}$$

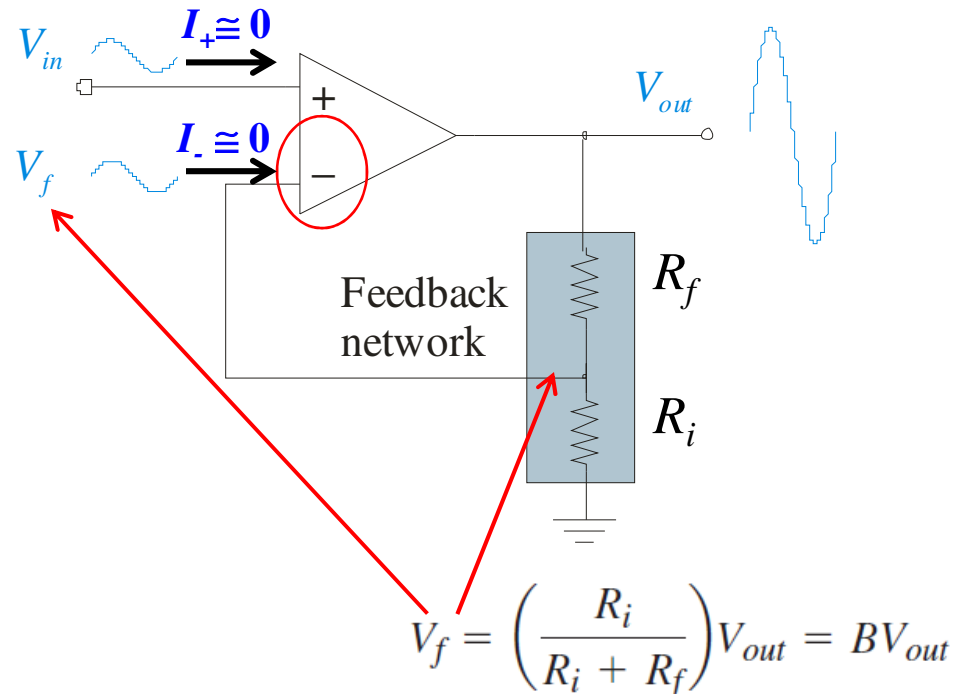
$$\text{se } B A_v \gg 1, A_f = A_{cl} = \frac{1}{B}$$

Realimentação negativa/Retroação negativa

Negative feedback

In 1921, Harold S. Black was working on the problem of linearizing and stabilizing amplifiers. While traveling to work on the ferry, he suddenly realized that if he returned some of the output back to the input in opposite phase, he had a means of canceling distortion. One of the most important ideas in electronics was sketched out on his newspaper that morning.

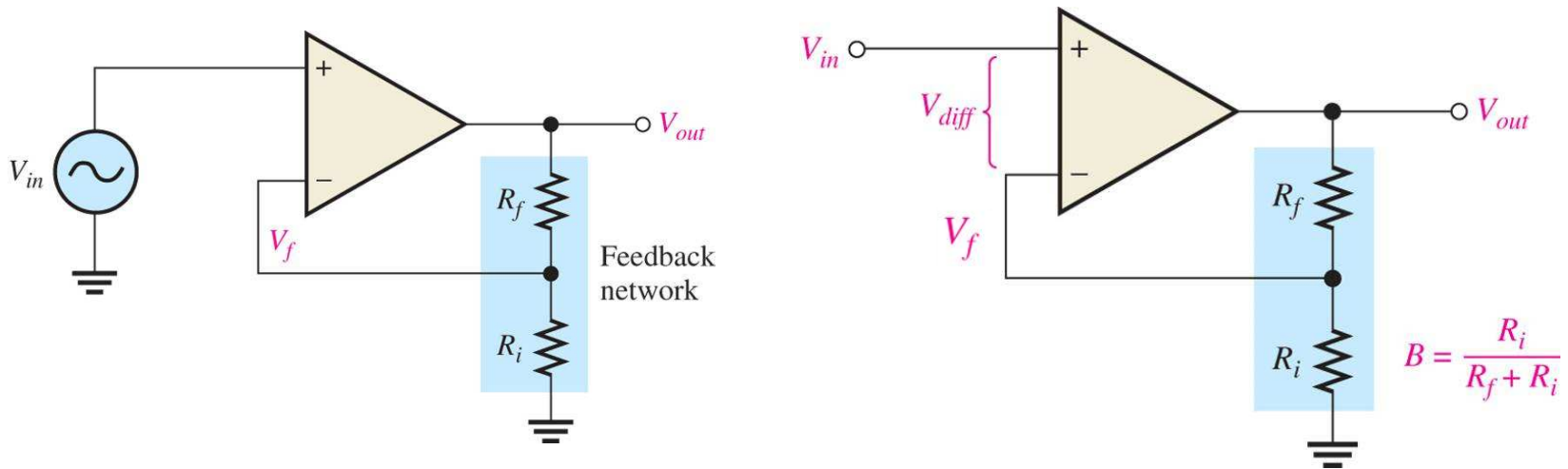
The op-amp has a **differential amplifier as the input stage**. When a feedback network returns a fraction of the output **to the inverting input**, only the difference signal ($V_{in} - V_f$) is amplified.



Ver também guia do trabalho prático nº 7:

http://webpages.ciencias.ulisboa.pt/%7Ejmfigueiredo/aulas/Pratica_n_07_CESDig_1819.pdf

Montagem não inversora com realimentação/retroação negativa



$$v_{out} = A_v(v_{in} - v_f) = A_v \left(1 - \frac{R_i}{R_i + R_f} v_{out} \right)$$

$$v_{out} = \frac{A_v}{1 + A_v \frac{R_i}{R_i + R_f}} v_{in} = A_{cl(NI)} v_{in} = A_{f(NI)} v_{in}$$

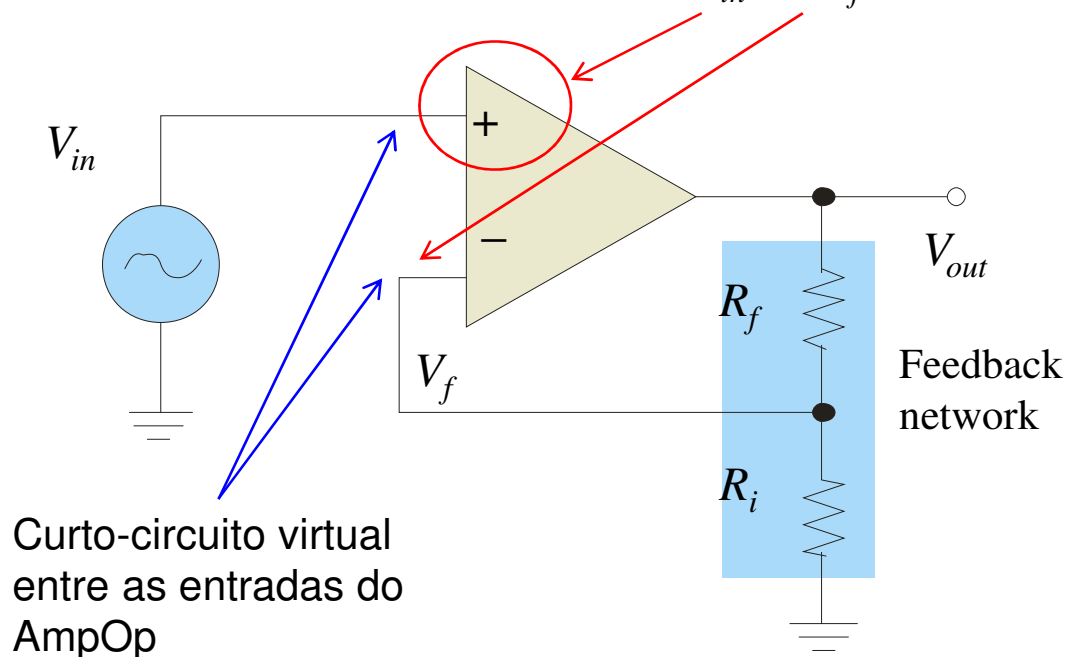
$$v_{out} \cong \frac{1}{B} v_{in} = \frac{R_i + R_f}{R_i} v_{in} = A_{cl(NI)} v_{in} = \left(1 + \frac{R_f}{R_i} \right) v_{in}$$

Montagem não inversora com realimentação/retroação negativa

Op amp circuits with negative feedback

Negative feedback is used in almost all linear op-amp circuits because it stabilizes the gain and reduces distortion. It can also increase the input resistance.

A basic configuration is a noninverting amplifier. The *difference* between V_{in} and V_f is **very small due to feedback**. Therefore, $V_{in} \cong V_f$.



The closed-loop gain for the noninverting amplifier can be derived from this idea; it is controlled by the feedback resistors:

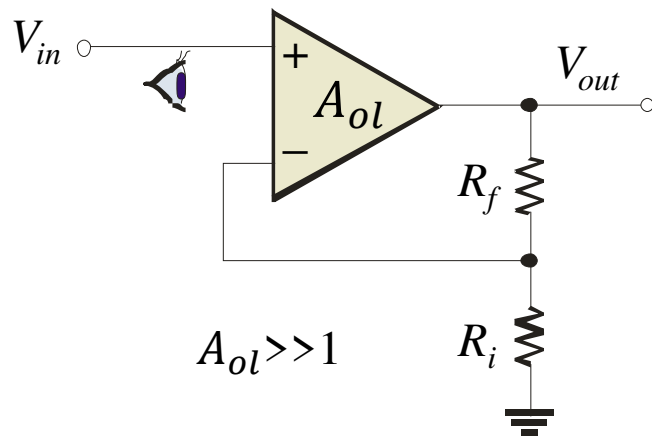
$$A_{cl(NI)} = 1 + \frac{R_f}{R_i}$$

Impedância de entrada de um amplificador não inversor

Input resistance for the noninverting amplifier

The input resistance of an op-amp without feedback is R_{in} . For the 741C, the manufacturer's specified value of R_{in} is 2 M Ω .

Negative feedback increases this to $R_{in(NI)} = (1 + A_{ol}B)R_{in}$, $A_{ol}=A_v$. This is so large that for all practical circuits it can be considered to be infinite.

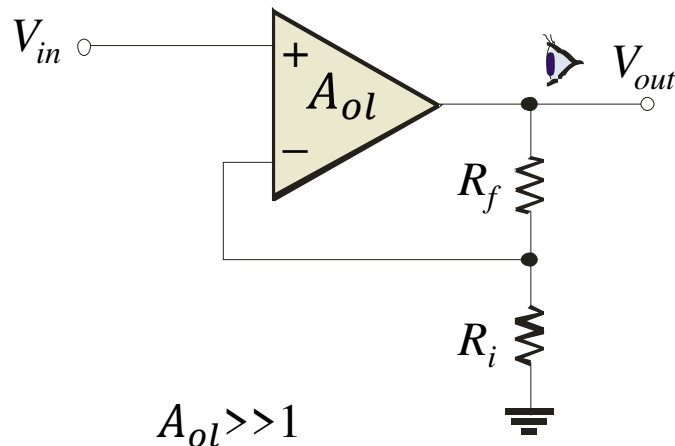


Keep in mind that, although $R_{in(NI)}$ is extremely large, the op-amp is a dc amplifier and still requires a dc bias path for the input.

Impedância de saída de um amplificador não inversor

Output resistance for the noninverting amplifier

The output resistance of an op-amp without feedback is R_{out} . Negative feedback decreases this by a factor of $(1 + A_{ol}B)$. This is so small that for all practical circuits it can be considered to be zero.



$$R_{out(NI)} = \frac{R_{out}}{1 + A_{ol}B}$$

The low output resistance implies that the **output voltage is independent of the load resistance** (as long as the current limit is not exceeded).

Although $R_{out(I)}$ is very small, this **does not imply that an op-amp can drive any load. The maximum current that the op-amp can supply is limited.** For the 741C, it is typically 20 mA.

Impedância de entrada e de saída de um amplificador não inversor

What are the input and output resistances and the gain of the noninverting amplifier? Assume the op amp has $A_{ol} = 100,000$, $R_{in} = 2 \text{ M}\Omega$, and $R_{out} = 75 \text{ }\Omega$.

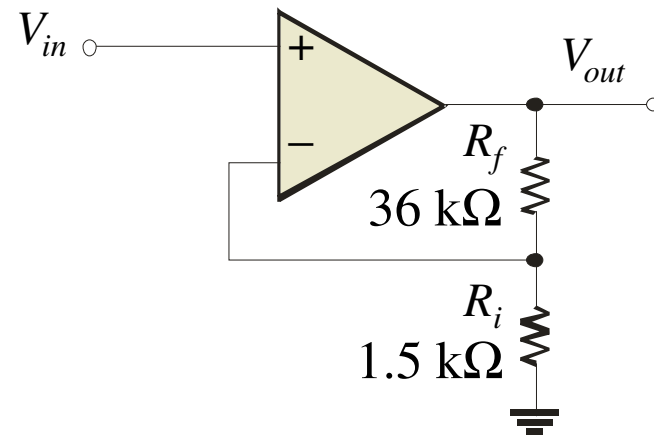
The gain is

$$A_{cl(NI)} = 1 + \frac{R_f}{R_i} = 1 + \frac{36 \text{ k}\Omega}{1.5 \text{ k}\Omega} = 25$$

The feedback fraction is $B = \frac{1}{25} = 0.040$

The input resistance is

$$R_{in(NI)} = (1 + A_{ol}B) R_{in} = (1 + (100,000)(0.040)) 2 \text{ M}\Omega = 8 \text{ G}\Omega$$



Impedância de entrada e de saída de um amplificador não inversor

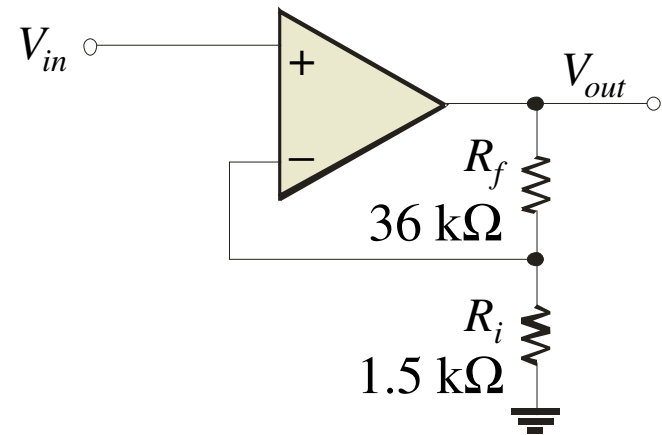
The last result illustrates why it is rarely necessary to calculate an exact value for the input resistance of a noninverting amplifier.

For practical circuits, you can assume it is ideal.

The output resistance is

$$R_{out(NI)} = \frac{R_{out}}{1 + A_{ol}B} = \frac{75 \Omega}{1 + (100,000)(0.040)} = 0.019 \Omega$$

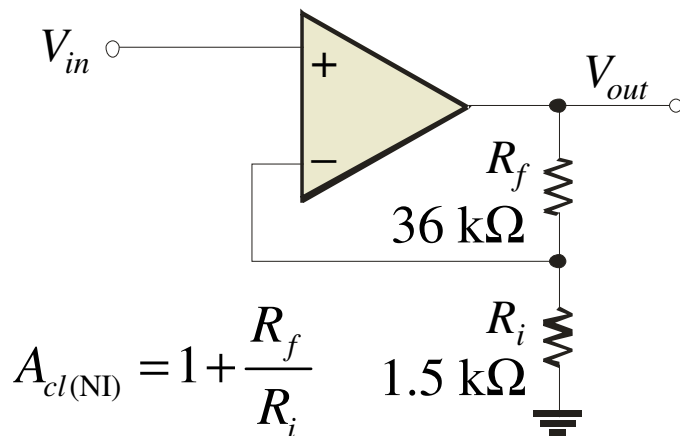
This extremely small resistance is close to ideal. As in the case of the input resistance, it is rarely necessary to calculate an exact value for the noninverting amplifier.



Montagem seguidor – seguidor de tensão

The voltage-follower is a special case of the noninverting amplifier in which $A_{cl} = 1$. The input resistance is increased by negative feedback and the output resistance is decreased by negative feedback. **This makes it an ideal circuit for interfacing a high-resistance source with a low resistance load.**

Amplificador não inversor

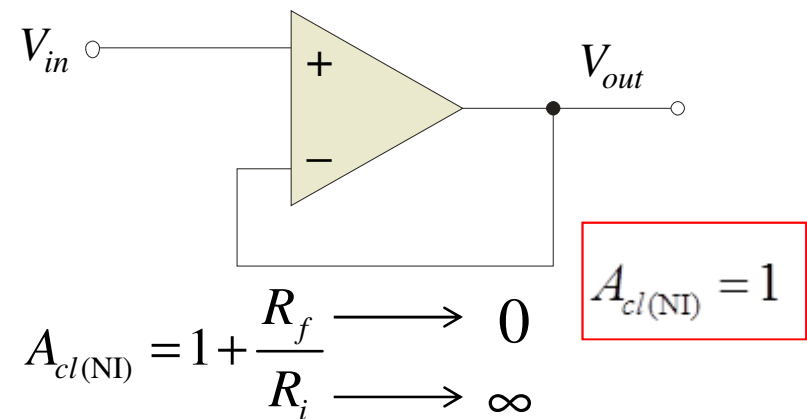


The op amp has $A_{ol} = 100,000$, $R_{in} = 2 \text{ M}\Omega$, and $R_{out} = 75 \text{ }\Omega$.

$$R_{in(NI)} = 16 \text{ G}\Omega$$

$$R_{out(NI)} = 0,009 \text{ }\Omega$$

Amplificador seguidor de tensão



Circuito “buffer”

$R_{in} = 2 \text{ M}\Omega$, $R_{out} = 75 \text{ }\Omega$, and $A_{ol} = 200,000$.

$$R_{in(VF)} = (1 + A_{ol})R_{in} = (1 + 200,000)2 \text{ M}\Omega = 400 \text{ G}\Omega$$

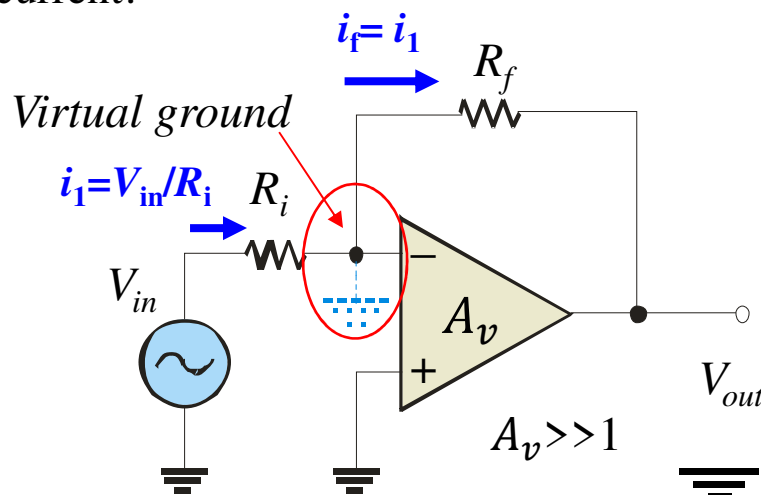
$$R_{out(VF)} = \frac{R_{out}}{1 + A_{ol}} = \frac{75 \text{ }\Omega}{1 + 200,000} = 375 \text{ }\mu\Omega$$

Montagem inversora com realimentação/retroação negativa

Montagem inversora com realimentação/retroação negativa

Op amp circuits with negative feedback

The inverting amplifier is a basic configuration in which the noninverting input is grounded (sometimes through a resistor to balance the bias inputs). Again, the *difference* between V_{in} and V_f is very small due to feedback; this implies that the inverting input is nearly at ground. This is referred to as a *virtual ground*. The virtual ground looks like ground to voltage, but not to current!



$$v_{out} = A_v(v_+ - v_-) = -A_v v_-$$

$$= -A_v \left(v_{in} - R_i \frac{v_{in} - v_{out}}{R_i + R_f} \right)$$

$$v_{out} = -\frac{A_v R_f}{R_f + R_i + A_v R_i} v_{in}$$

$$v_{out} = A_{cl(I)} v_{in} \approx -\frac{R_f}{R_i} v_{in}$$

The closed-loop gain for the inverting amplifier can be derived from this idea; again it is controlled by the feedback resistors ($A_v R_i \gg R_f + R_i$):

$$A_{cl(I)} = -\frac{R_f}{R_i}$$

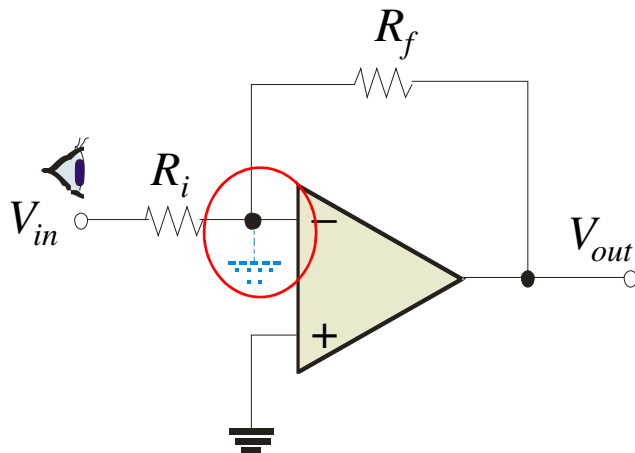
Ver também guia do trabalho prático nº 7:

http://webpages.ciencias.ulisboa.pt/%7Ejmfigueiredo/aulas/Pratica_n_07_CESDig_1819.pdf

Impedância de entrada de um amplificador inversor

Input resistance for the inverting amplifier

Recall that negative feedback forces the inverting input to be near ac ground for the inverting amplifier. For this reason, the input resistance of the inverting amplifier is equal to just the input resistor, R_i . That is, $R_{in(I)} = R_i$.



The **low input resistance** is usually a **disadvantage** of this circuit.

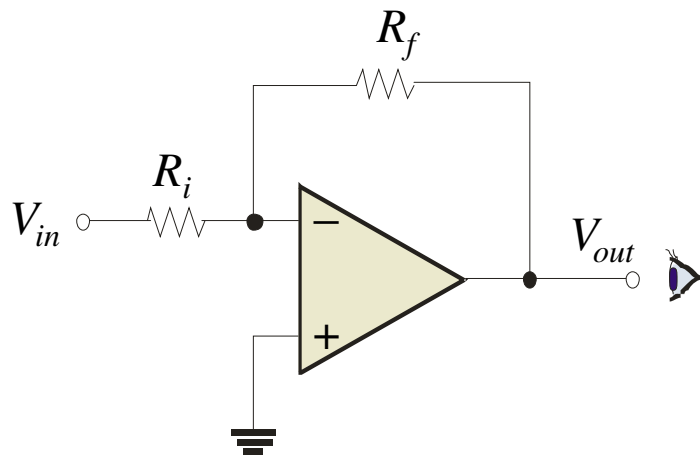
However, because the $R_{in(I)}$ is equal to R_i , **it can easily be set by the user** for those cases where a specific value is needed.

Impedância de saída de um amplificador inversor

Output resistance for the inverting amplifier

The equation for the output resistance of the inverting amplifier is the essentially the same as the noninverting amplifier:

$$R_{out(I)} = \frac{R_{out}}{1 + A_{ol}B}$$



Although $R_{out(I)}$ is very small, this **does not imply that an op-amp can drive any load.**

The maximum current that the op-amp can supply is limited.

For the 741C, it is typically 20 mA.

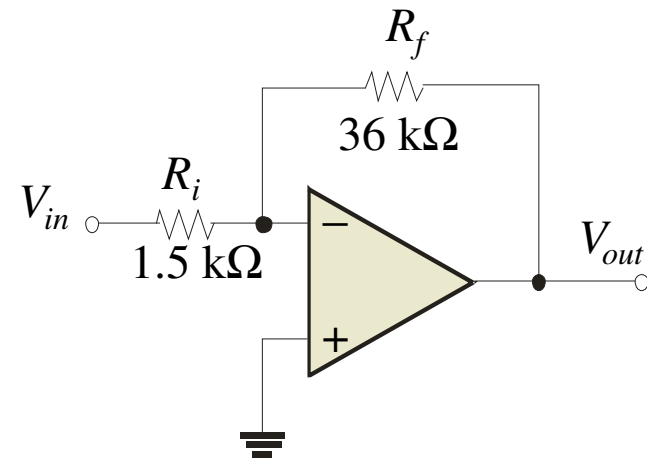
Impedância de entrada e de saída de um amplificador inversor

What is the input resistance and the gain of the inverting amplifier?

The gain is $A_{cl(I)} = -\frac{R_f}{R_i} = -\frac{36 \text{ k}\Omega}{1.5 \text{ k}\Omega} = -24$

The input resistance = $R_i = 1.5 \text{ k}\Omega$

The output resistance is **nearly identical to the noninverting case, where it was shown to be negligible.**



Outro exemplo: $R_i = 1 \text{ k}\Omega$ e $R_f = 100 \text{ k}\Omega$.

$A_{ol} = 50,000$, $R_{in} = 4 \text{ M}\Omega$, and $R_{out} = 50 \Omega$.

$$A_{cl(I)} = -\frac{R_f}{R_i} = -\frac{100 \text{ k}\Omega}{1.0 \text{ k}\Omega} = -100$$

$$R_{in(I)} \cong R_i = 1.0 \text{ k}\Omega$$

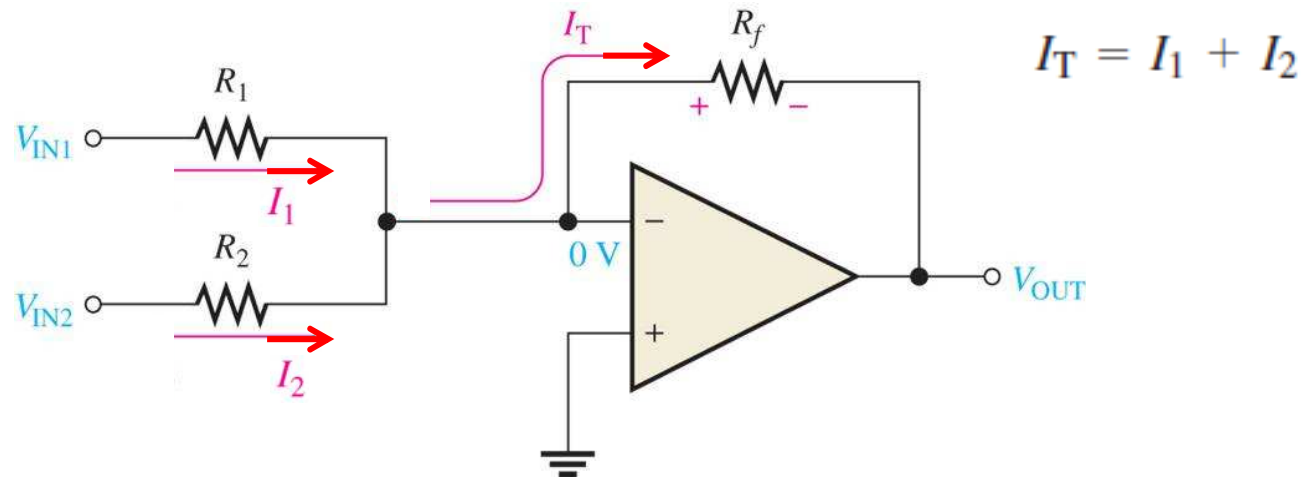
$$R_{out(I)} = \frac{R_{out}}{1 + A_{ol}B} = \frac{R_{out}}{1 + A_{ol}(R_i/(R_i + R_f))} = \frac{50 \Omega}{1 + (50,000)(1 \text{ k}\Omega/101 \text{ k}\Omega)} = 101 \text{ m}\Omega$$

Circuitos aritméticos

Montagens somadoras

Amplificador somador

There are a number of useful applications for the basic inverting amplifier configuration. One is the summing amplifier that uses two or more inputs and one output.



Since $V_{OUT} = -I_T R_f$,

$$V_{OUT} = -(I_1 + I_2)R_f = -\left(\frac{V_{IN1}}{R_1} + \frac{V_{IN2}}{R_2}\right)R_f$$

If all three of the resistors are equal ($R_1 = R_2 = R_f = R$), then

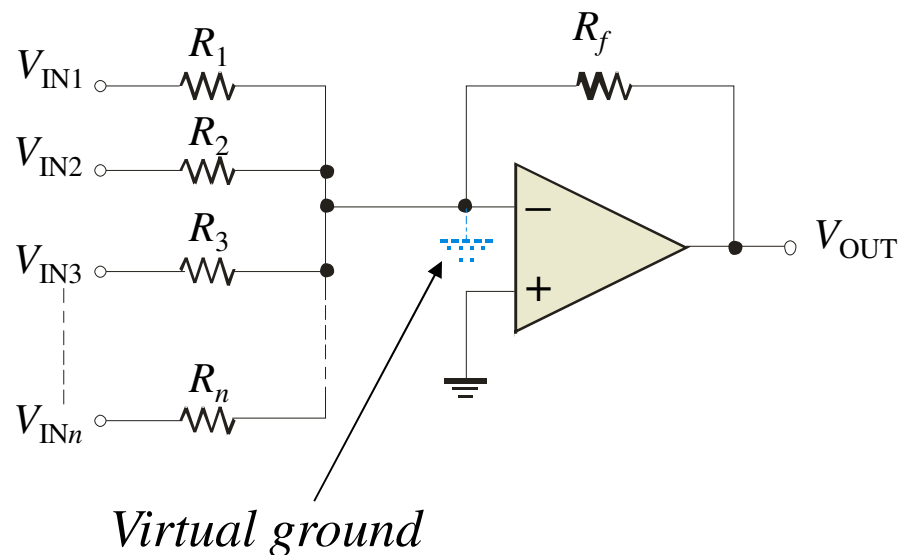
$$V_{OUT} = -\left(\frac{V_{IN1}}{R} + \frac{V_{IN2}}{R}\right)R = -(V_{IN1} + V_{IN2})$$

Amplificador somador

Summing amplifier

There are a number of useful applications for the basic inverting amplifier configuration. One is the summing amplifier that uses two or more inputs and one output.

The virtual ground isolates the inputs from each other. **Input current from each input is passed to R_f , which develops an output voltage that is proportional to the algebraic sum of the inputs.**

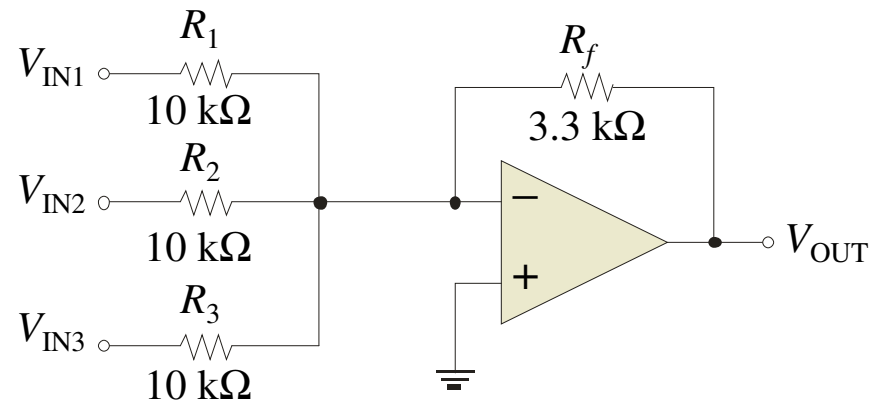


Amplificador somador

Averaging amplifier

An averaging amplifier is a variation of the summing amplifier in which all input resistors are equal. The feedback resistor is the reciprocal of the number of inputs times the input resistor value.

For example, if there are three input resistors, each with a value of 10 k Ω , then $R_f = 3.3 \text{ k}\Omega$ to form an averaging amplifier.



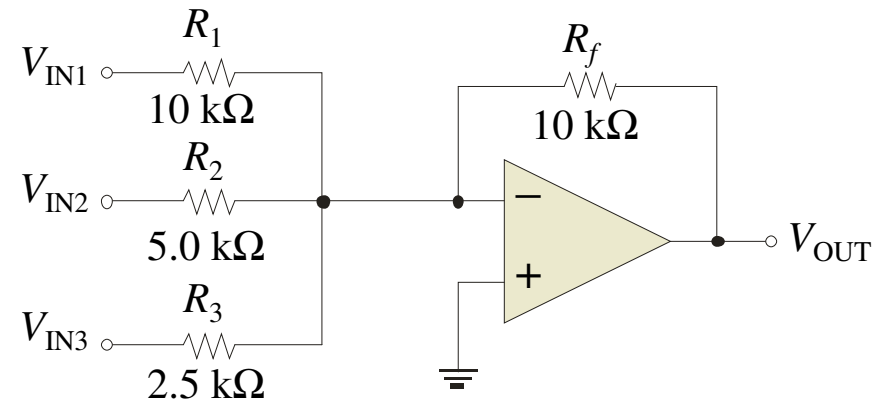
$$V_{OUT} = -\frac{R_f}{R}(V_{IN1} + V_{IN2} + \dots + V_{INn})$$

Amplificador somador

Scaling adder

A scaling adder is another variation of the summing amplifier in which the input resistors are adjusted to weight inputs differently. The input “weight” is proportional to the current from that input.

Larger resistors will allow less current for a given input voltage, so they have less “weight” than smaller resistors. In the case shown, V_{IN3} is “weighted” 2 times more than V_{IN2} , which is 2 times more than V_{IN1} .



$$V_{OUT} = -\left(\frac{R_f}{R_1}V_{IN1} + \frac{R_f}{R_2}V_{IN2} + \dots + \frac{R_f}{R_n}V_{INn}\right)$$

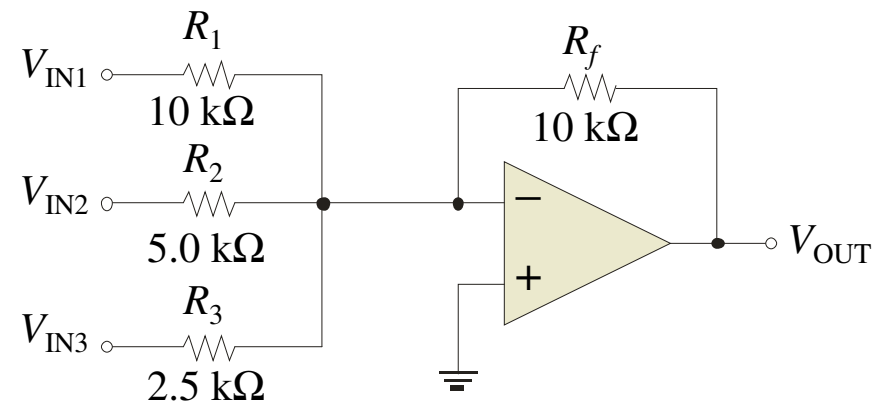
Amplificador somador

Scaling adder

What is V_{OUT} for the scaling adder if all inputs are + 1.0 V?

By Ohm's law, the currents into R_f are $I_1 = 0.1$ mA, $I_2 = 0.2$ mA and $I_3 = 0.4$ mA.

Using the superposition theorem, the current in R_f is 0.7 mA. From Ohm's law, $V_{OUT} = 7$ V



Ver também guia do trabalho prático nº 7:

http://webpages.ciencias.ulisboa.pt/%7Ejmfigueiredo/aulas/Pratica_n_07_CESDig_1819.pdf

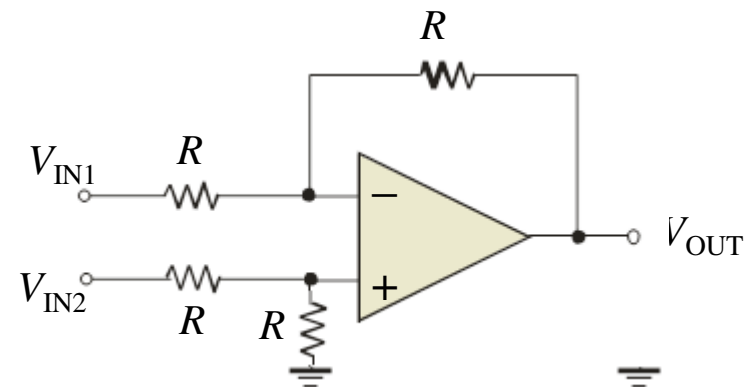
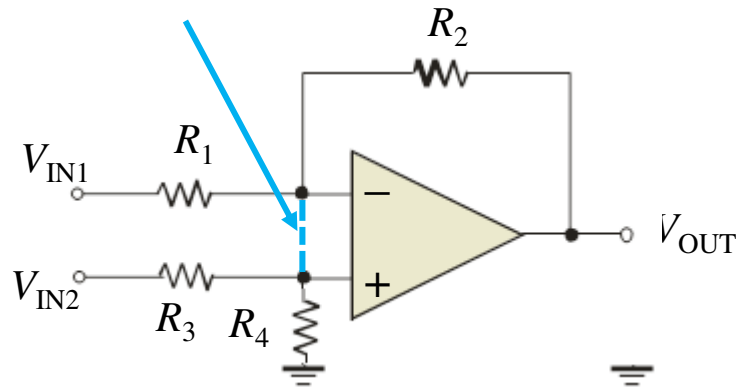
Montagem diferença (subtração)

Amplificador diferença

Este circuito é semelhante ao somador e é usado para subtrair dois sinais V_{IN1} e V_{IN2} . O terminal v_+ tem uma tensão imposta pelo divisor resistivo R_3 e R_4 . A tensão no terminal v_- é igual à tensão em v_+ desde que o AmpOp não esteja na zona de saturação.

(para a dedução das expressões abaixo pode-se, por exemplo, aplicar o princípio da sobreposição.)

Curto-circuito virtual



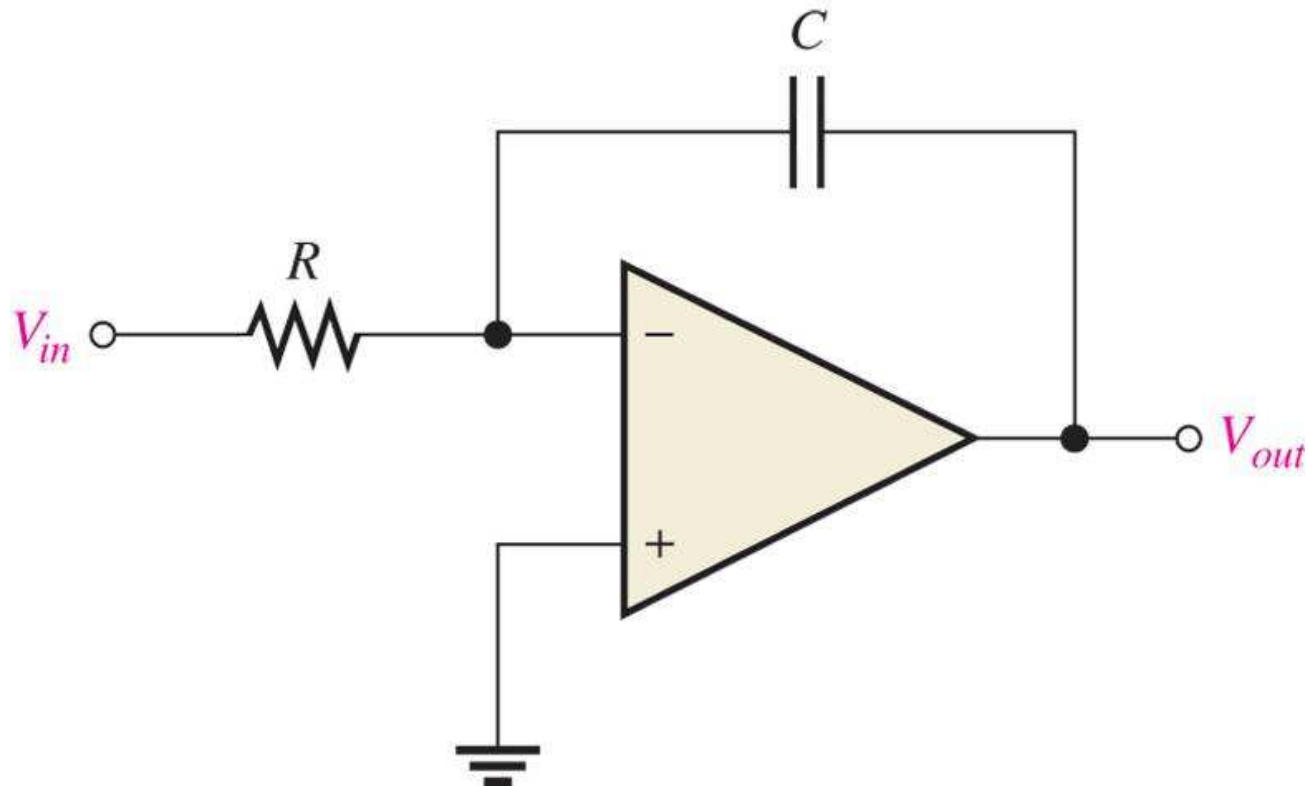
$$V_{out} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \frac{R_1 + R_2}{R_1} V_{in2} - \frac{R_2}{R_1} V_{in1}$$

$$V_{out} = V_{in2} - V_{in1}$$



Montagem integradora

An ideal op-amp integrator.



$$v_c(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i_c(t) dt$$

FIGURE 19-12

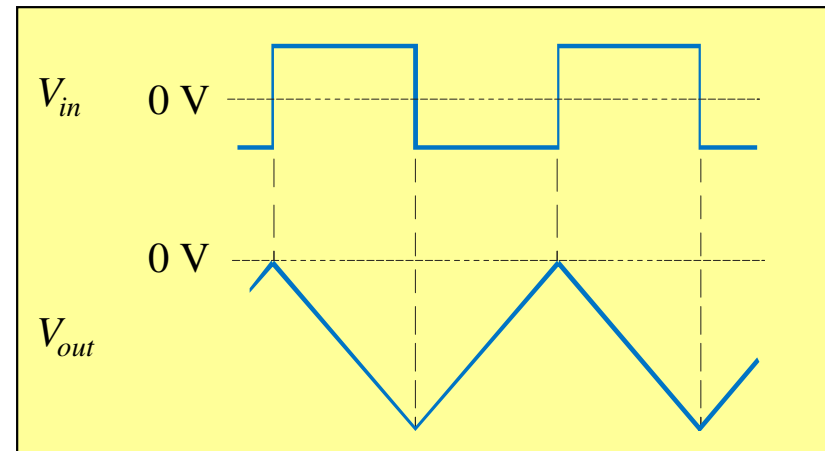
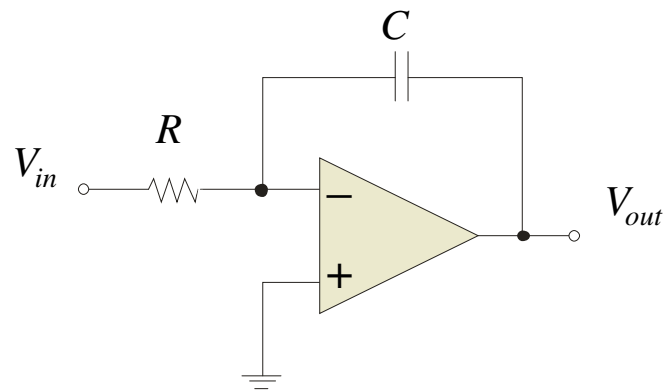
Amplificador integrador

Integrators

For the ideal integrator, the rate of change of the output is given by

$$\frac{\Delta V_{out}}{\Delta t} = -\frac{V_{in}}{R_i C}$$

The minus sign in the equation is due to the inverting amplifier. If the input is a square wave centered about 0 V, the output is a negative triangular wave (provided saturation is not reached).



Currents in an integrator.

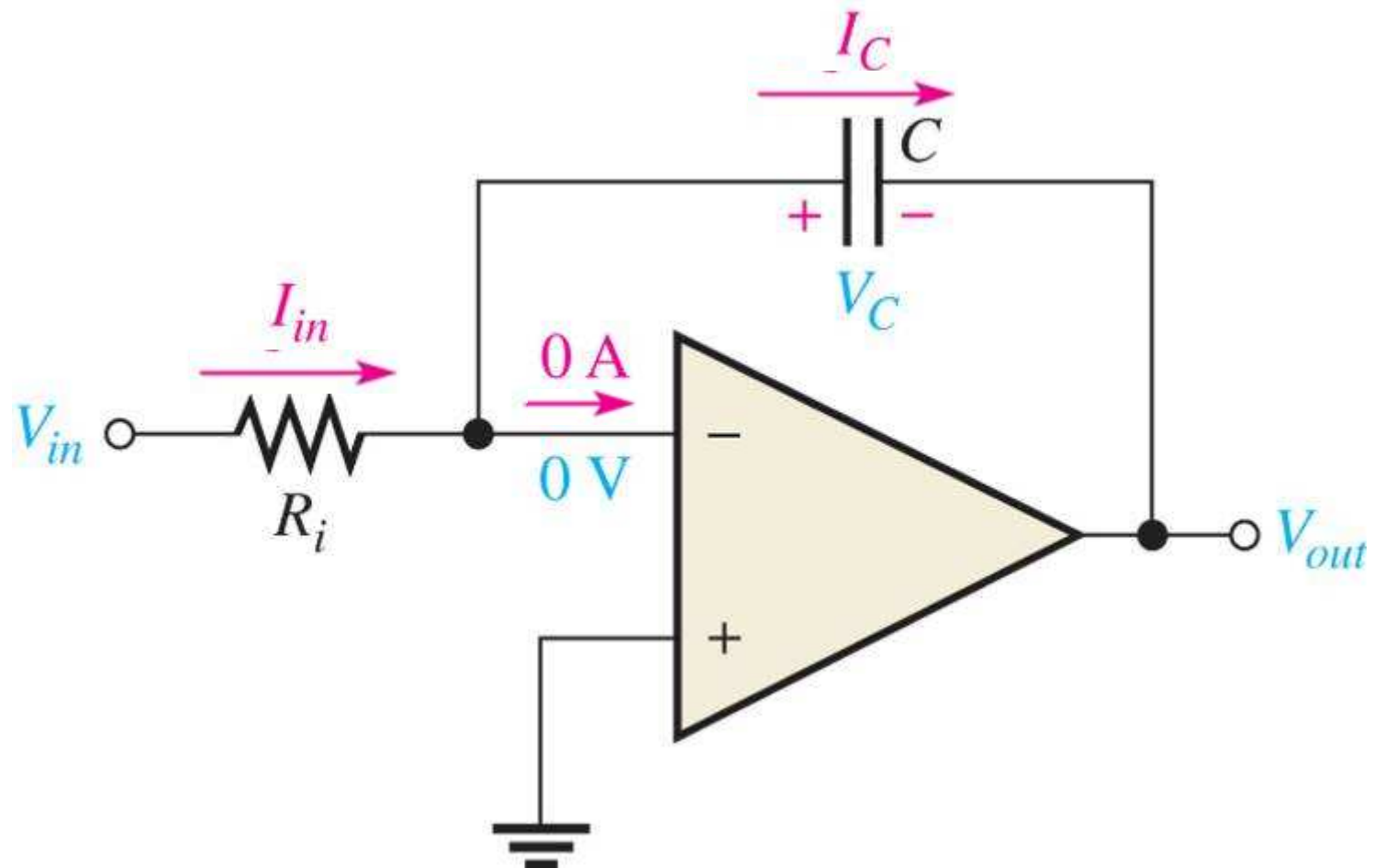


FIGURE 19-13

A constant input voltage produces a ramp on the output.

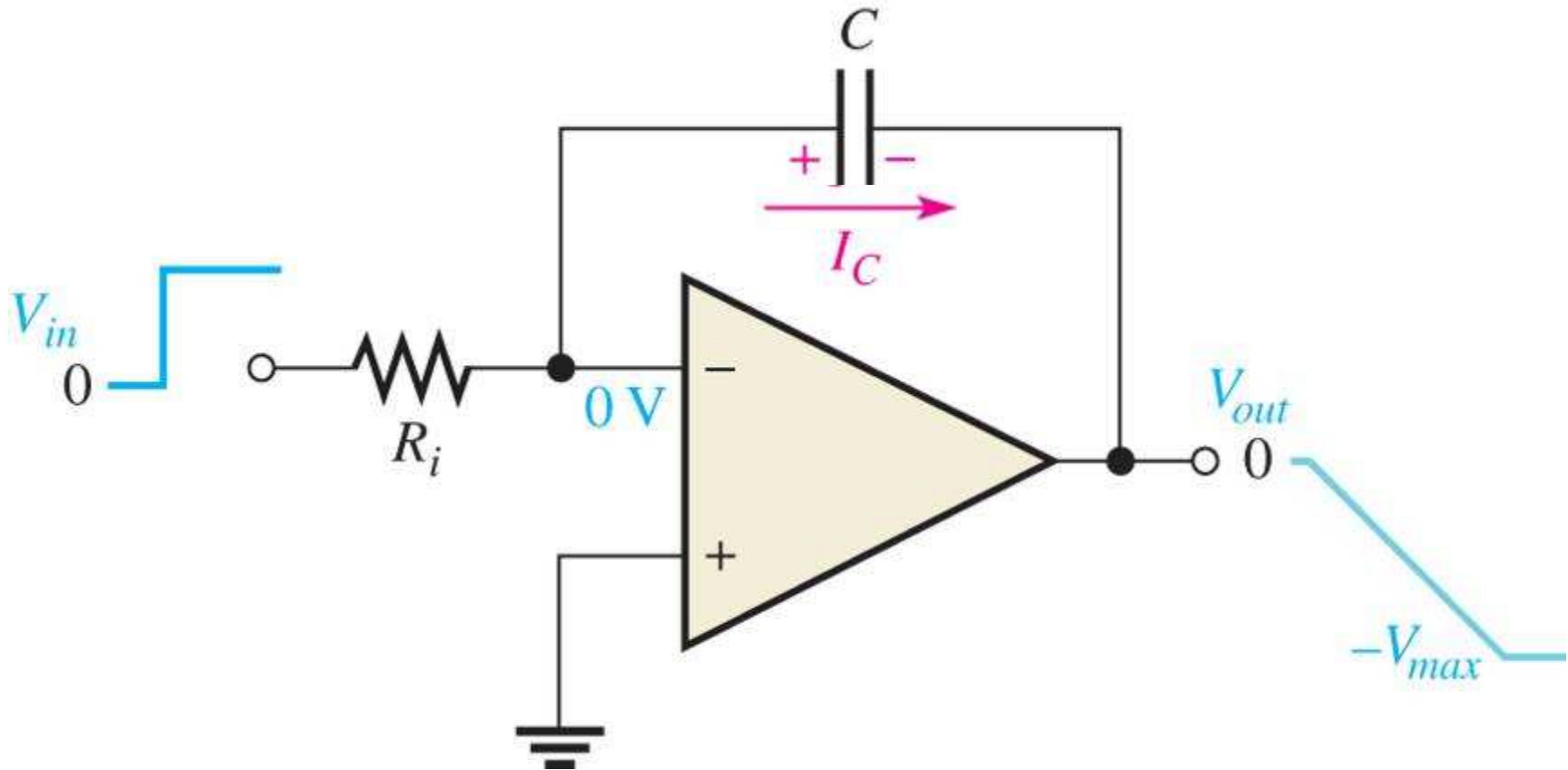


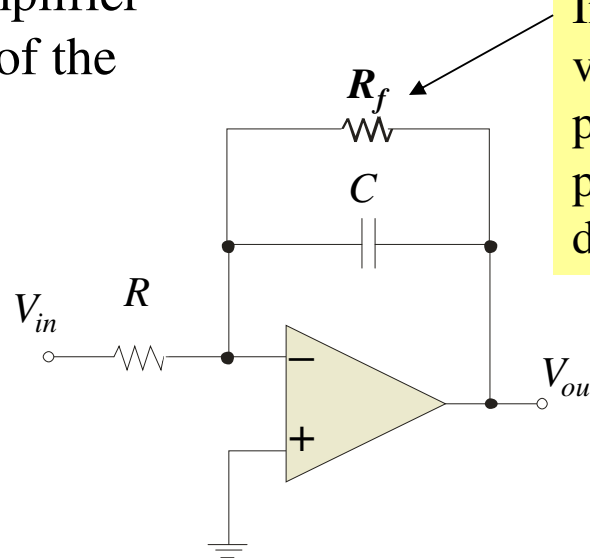
FIGURE 19-15

Amplificador integrador prático

Integrators

Mathematical integration is basically a summing process. Within certain limitations, an integrator circuit simulates this process.

The ideal integrator is essentially a summing amplifier with a capacitor in place of the feedback resistor.

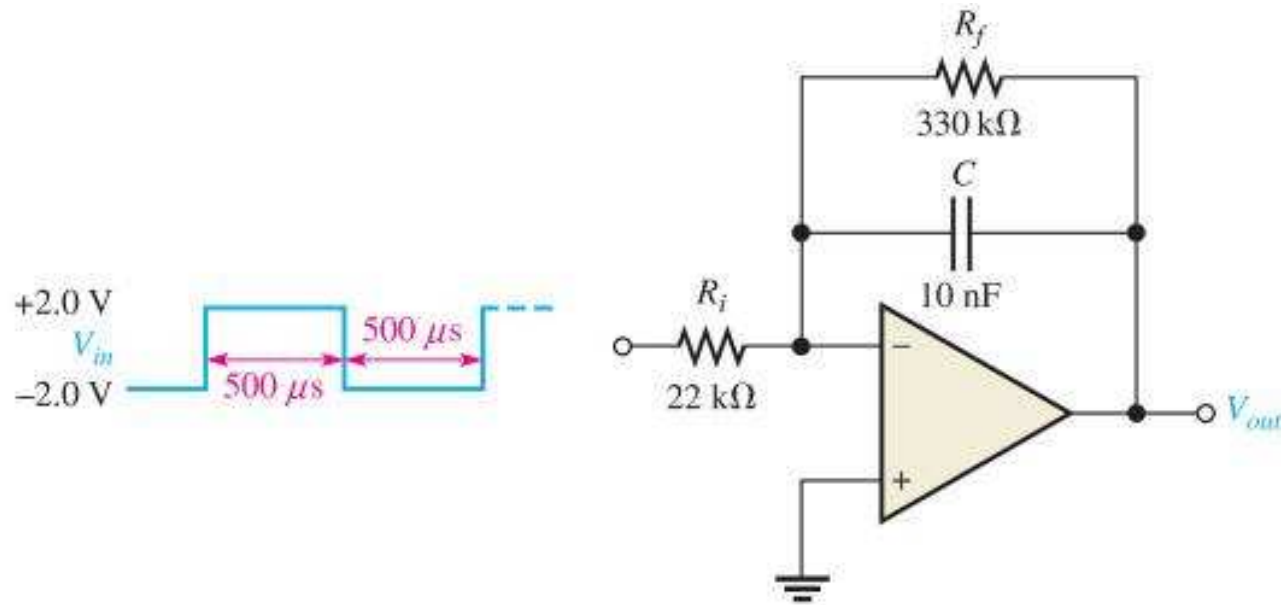


In practical circuits, a large value resistor is usually in parallel with the capacitor to prevent the output from drifting into saturation.

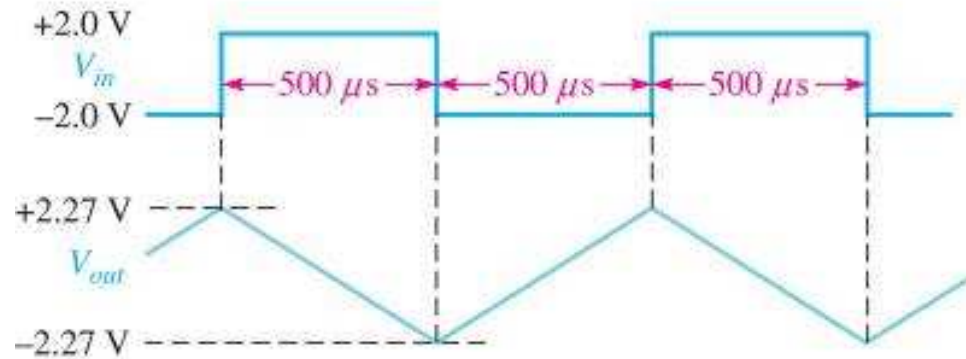
Ver também guia do trabalho prático nº 7:

http://webpages.ciencias.ulisboa.pt/%7Ejmfigueiredo/aulas/Pratica_n_07_CESDig_1819.pdf

Amplificador integrador



(a)



(b)

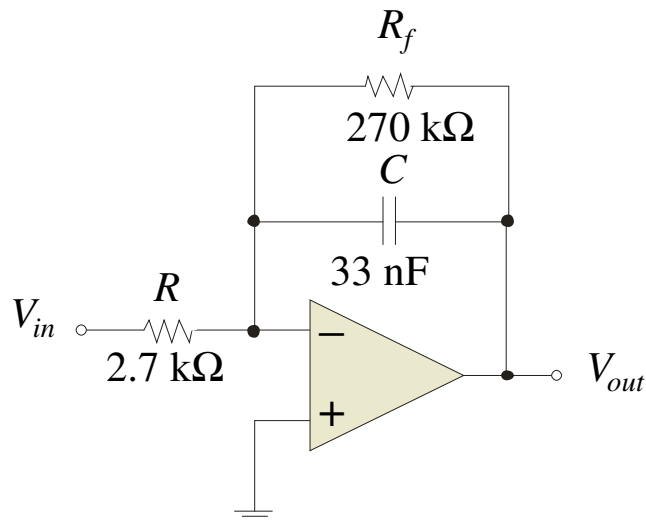
FIGURE 19-16

Amplificador integrador

A 5 kHz square wave with $10 V_{pp}$ is applied to a practical integrator. Show the output waveform voltages.

During the positive input ($1/2$ the period), the *change* in the output is

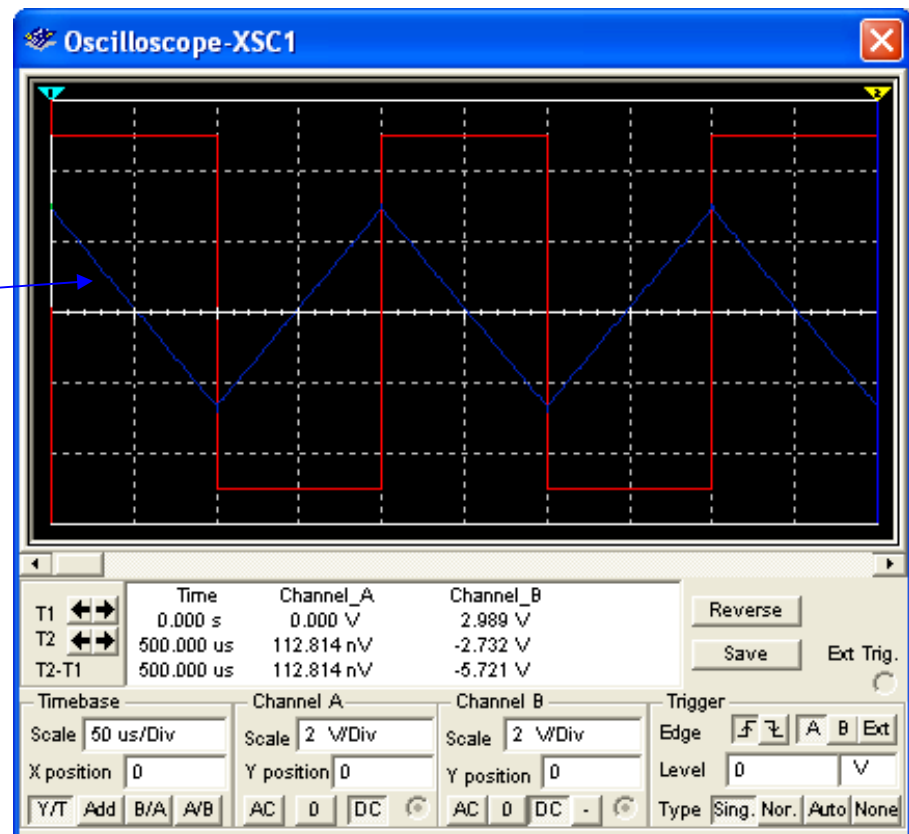
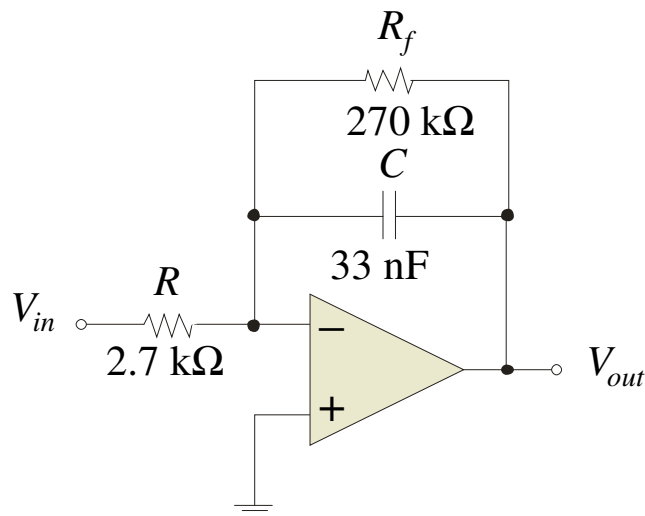
$$\Delta V_{out} = -\frac{V_{in}}{R_i C} \Delta t = -\frac{5 \text{ V}}{(2.7 \text{ k}\Omega)(33 \text{ nF})} 100 \mu\text{s} = 5.6 \text{ V}$$



The feedback resistor (R_f) is large compared to R , so has little effect on the shape of the waveform. In a practical circuit, it will cause the output waveform to center on zero as shown on the following slide.

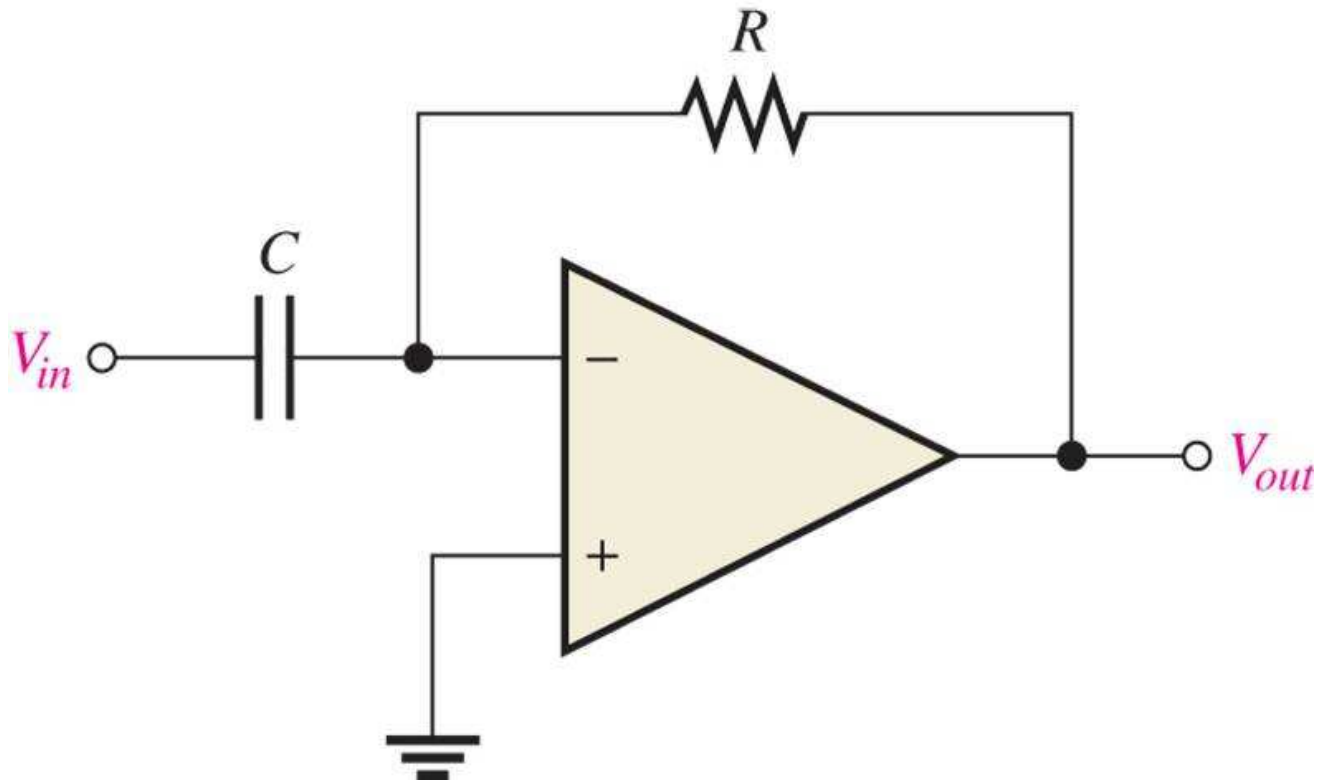
Amplificador integrador

The results of a computer simulation on Multisim confirm the calculated change (5.6 V) in output voltage (blue line).



Montagem diferenciadora

An ideal op-amp differentiator.



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

FIGURE 19-17

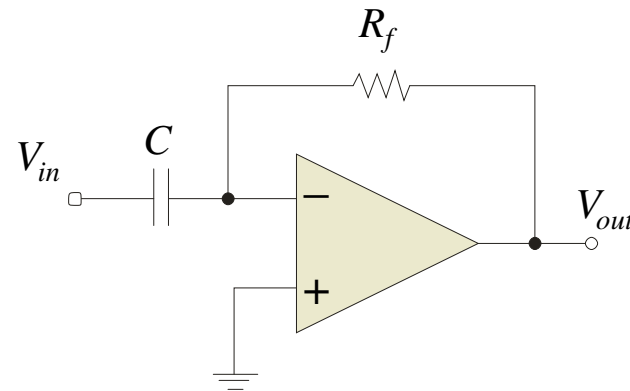
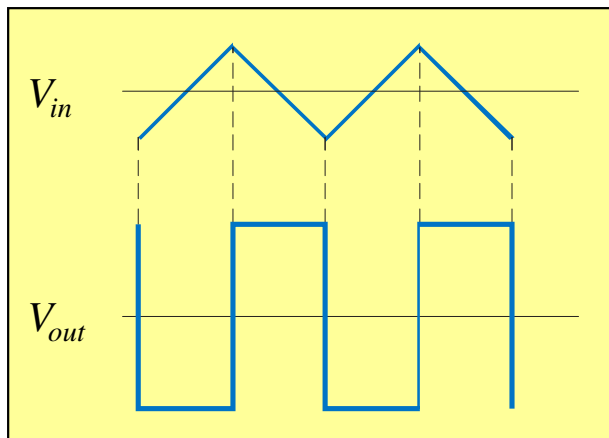
Amplificador diferenciador

Differentiators

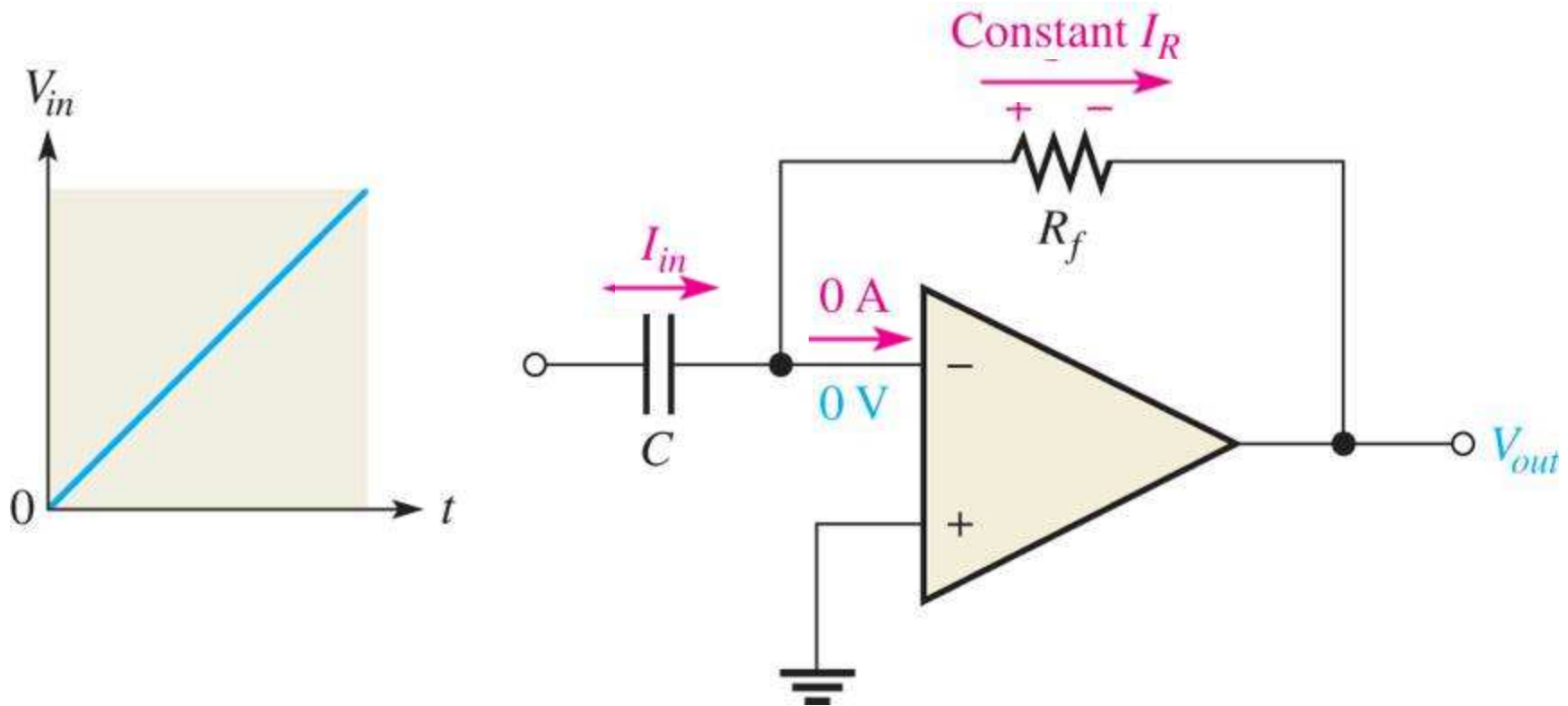
The output voltage for the ideal differentiator is given by

$$V_{out} = -\left(\frac{V_c}{t}\right) R_f C$$

The minus sign in the equation is due to the inverting amplifier. If the input is a ramp, the output is a negative dc level for the positive slope and a positive dc level for the negative slope.



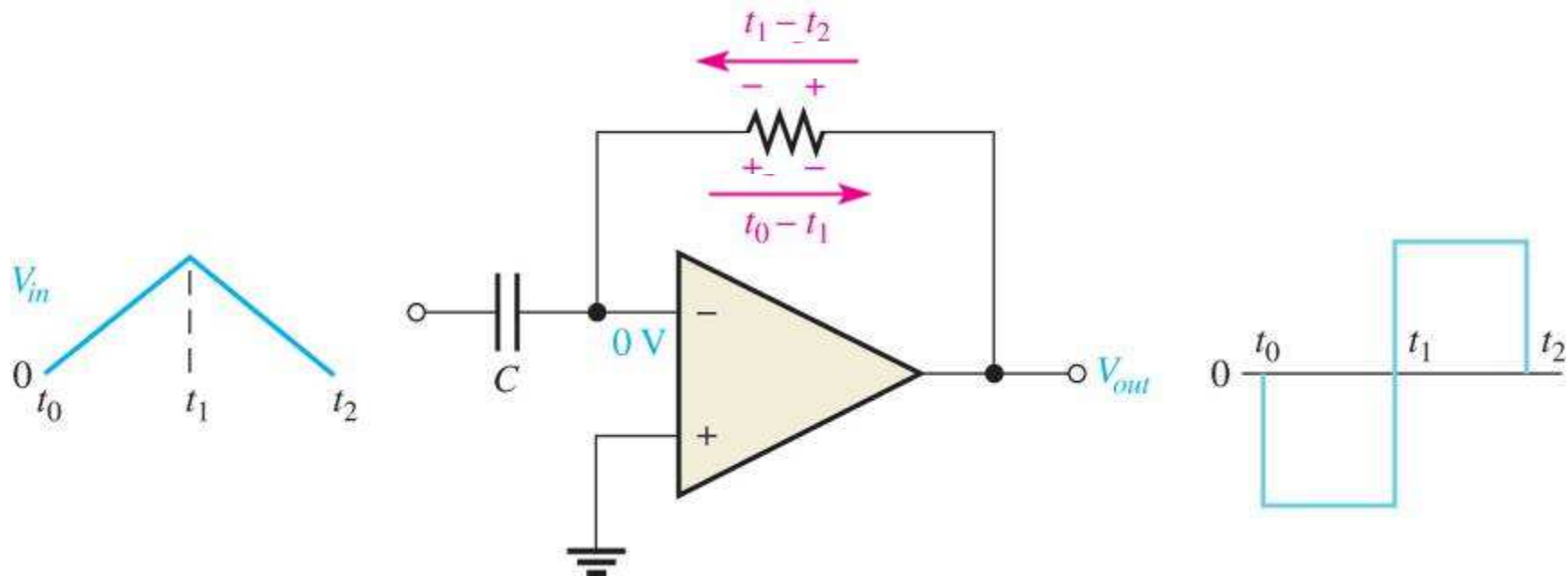
A differentiator with a ramp input.



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

FIGURE 19-18

Output of a differentiator with a series of positive and negative ramps (triangle wave) on the input.



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

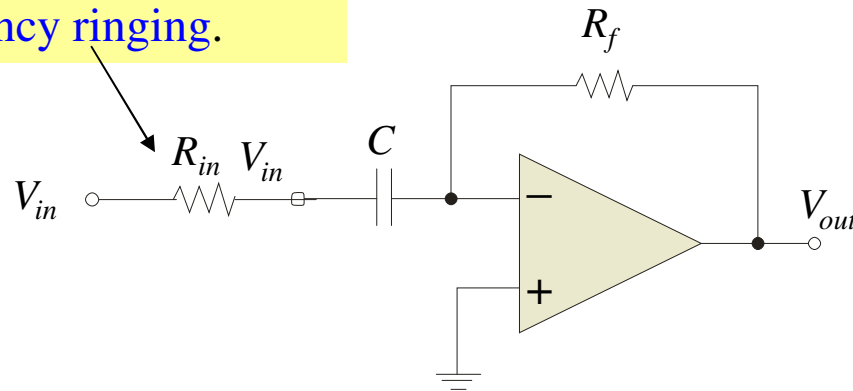
FIGURE 19-19

Amplificador diferenciador práctico

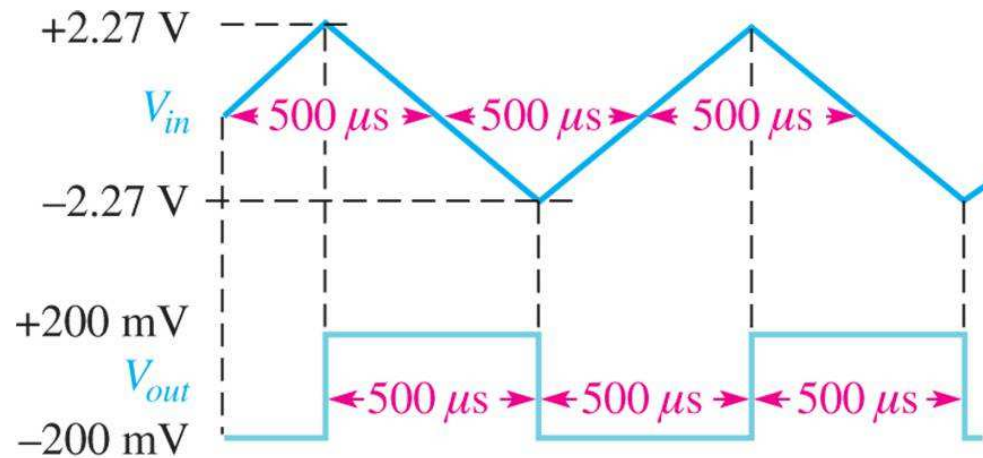
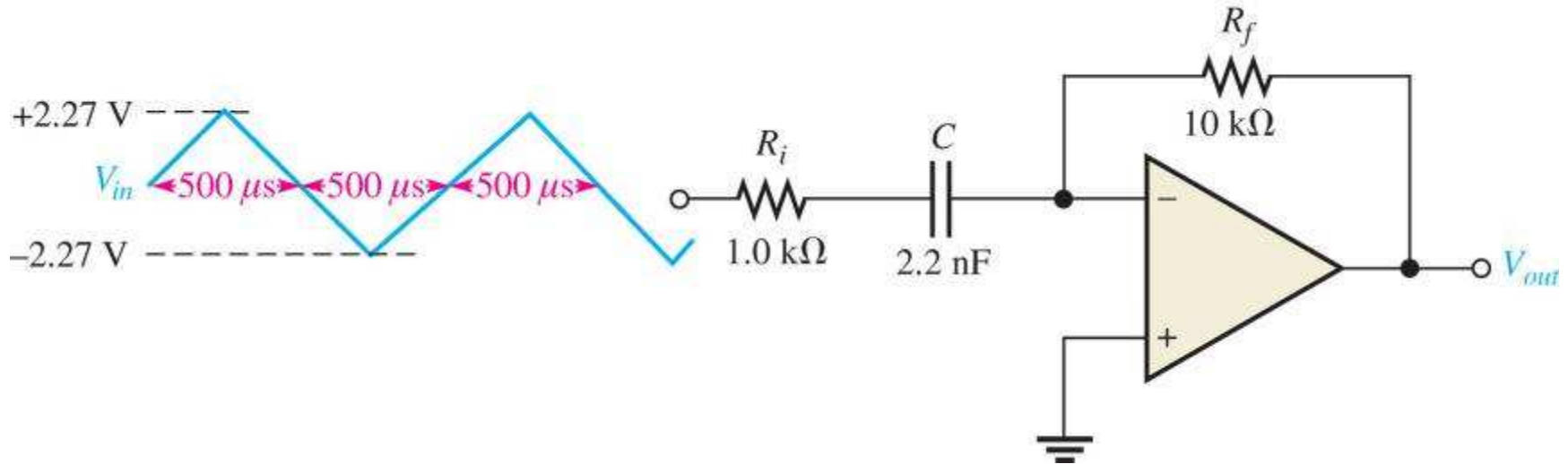
Differentiators

In mathematics, differentiation is the process of finding the rate of change. An idea differentiator circuit is shown. It produces an inverted output that is proportional to the rate of change of the input.

In practical circuits, a small value resistor is added in series with the input to prevent high frequency ringing.



Output of a differentiator with a series of positive and negative ramps (triangle wave) on the input



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

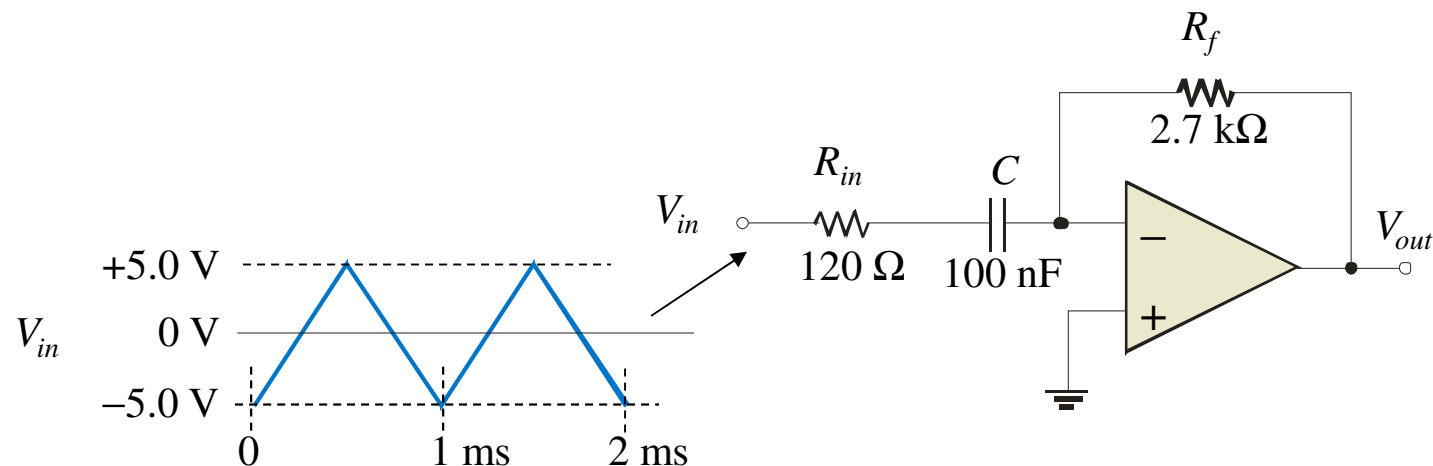
Amplificador diferenciador

A 1.0 kHz, 10 V_{pp} triangular wave is applied to a practical differentiator as shown. Show the output in relationship to the input.

When the input has a positive slope, the output is

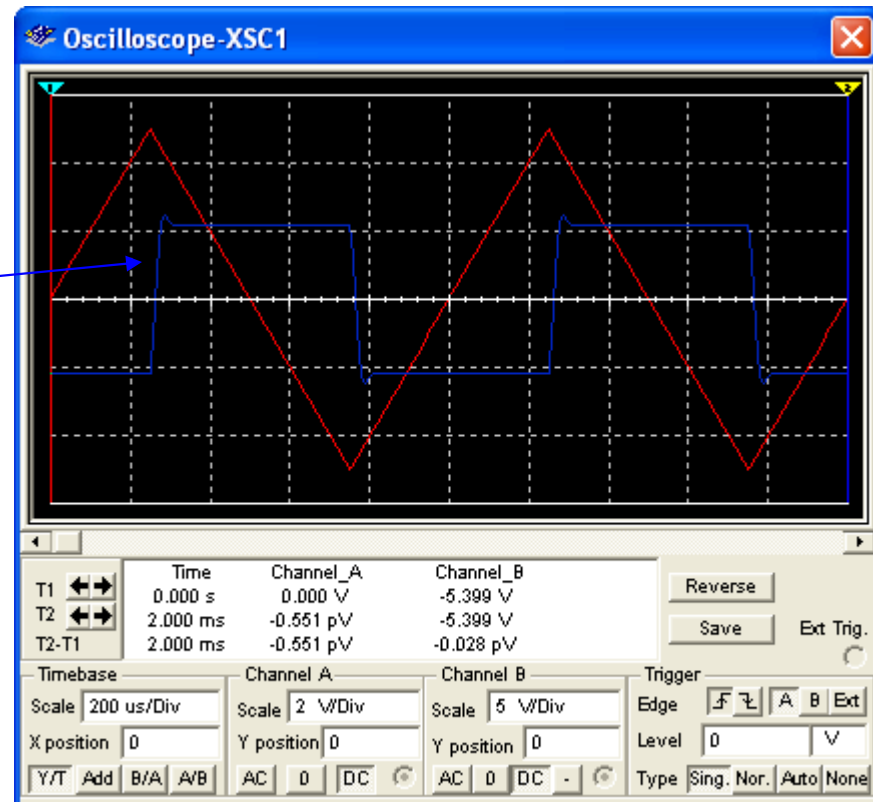
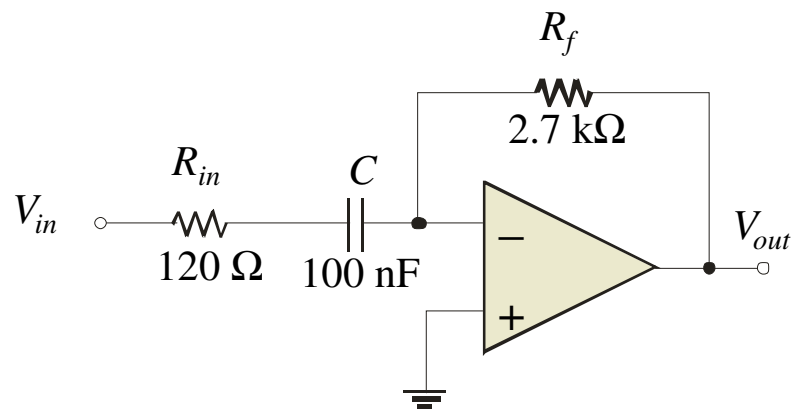
$$V_{out} = -\left(\frac{V_c}{t}\right)R_f C = -\left(\frac{10 \text{ V}}{0.5 \text{ ms}}\right)(2.7 \text{ k}\Omega)(100 \text{ nF}) = -5.4 \text{ V}$$

By symmetry, when the input has a negative slope, the output will be **+5.4 V**.



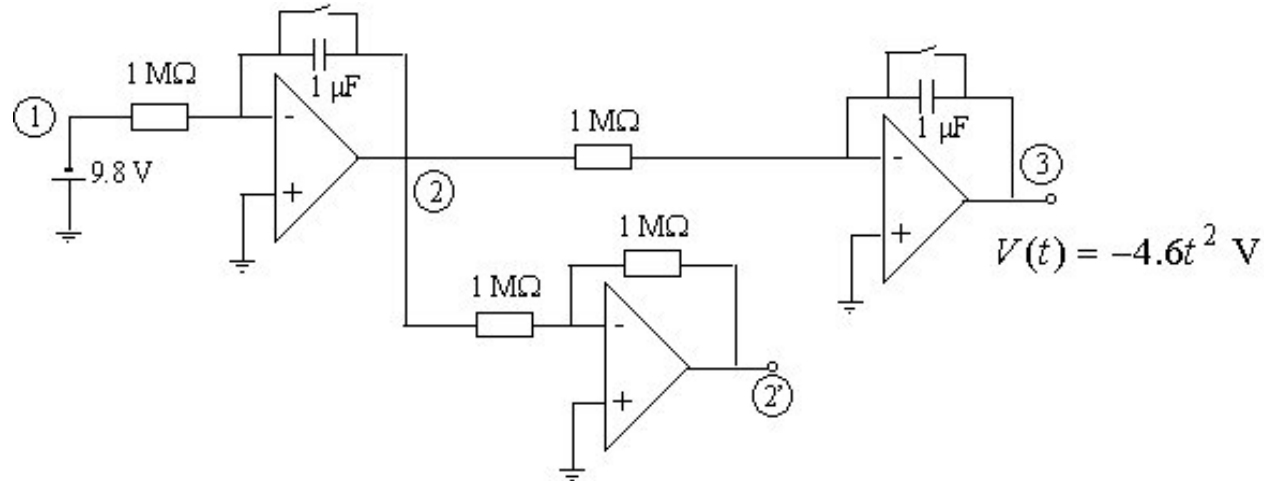
Amplificador diferenciador

The results of a computer simulation on Multisim confirm the calculated output voltages (± 5.4 V). The output voltage is the blue line.



Computador analógico

Com foi referido anteriormente, é possível realizar cálculos mais ou menos complicados como, por exemplo, resolver equações diferenciais. A um circuito deste tipo é costume chamar-se computador analógico ou simulador analógico, uma vez que a(s) equação(ões) que rege(m) o circuito é(são) a(s) mesma(s) que governa(m) o fenómeno a simular. A título de exemplo, considere-se o circuito amplificador abaixo (na prática, e por questões de estabilidade, os terminais não-inversores deverão ser ligados à massa através de uma resistência).



O circuito simula a queda de um grave de massa m , à superfície da Terra. Trata-se de um movimento com aceleração constante $g=9.8 \text{ ms}^{-2}$:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = -g \Rightarrow \frac{dy}{dt} = -gt + v_{0y} \Rightarrow y = -\frac{1}{2} gt^2 + v_{0y}t + y_0$$

Em 1, a tensão é a da bateria, e é, portanto, constante: aceleração da gravidade, $-g$. A tensão em 2 é a tensão anterior depois de integrada: velocidade do corpo, $-gt$. O condensador tem em paralelo um interruptor que permite fixar as condições iniciais do movimento (u_{0y}). Como a tensão, além de integrada, é invertida, junta-se um novo inversor com ganho -1 , 2'. Em 3, aparece uma tensão que corresponde à primitiva da tensão em 2: deslocamento, $y=-1/2 gt^2 + v_{0y}t$.

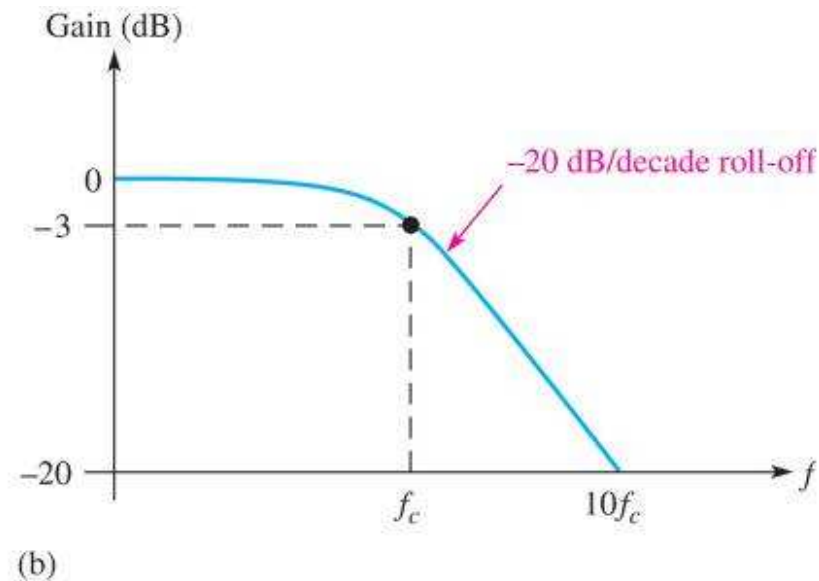
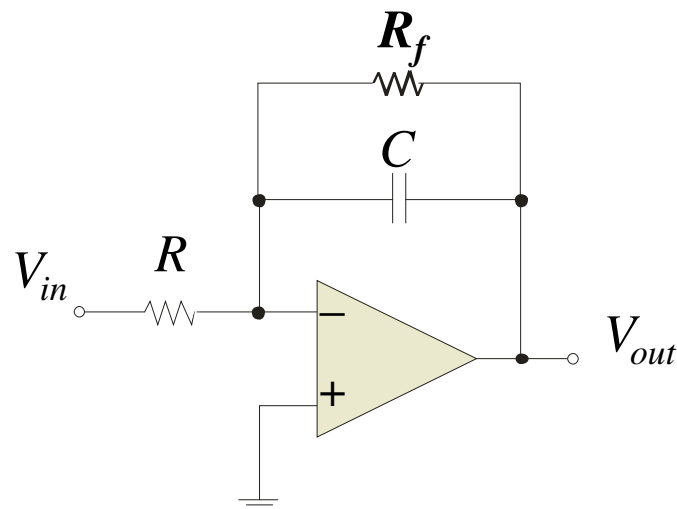
Filtros ativos de 1.^a ordem

Ver também Guia P08: [Circuitos com AmOps – filtros ativos](#)

http://webpages.ciencias.ulisboa.pt/%7Ejmfigueiredo/aulas/Pratica_n_08_CESDig_1819.pdf

Filtro passa-baixo

A filter selects certain frequencies and excludes others. Active filters use op-amps to optimize the frequency response. A low-pass active filter and its response:



The gain for this filter is 1 (0 dB) for $f < f_c$.

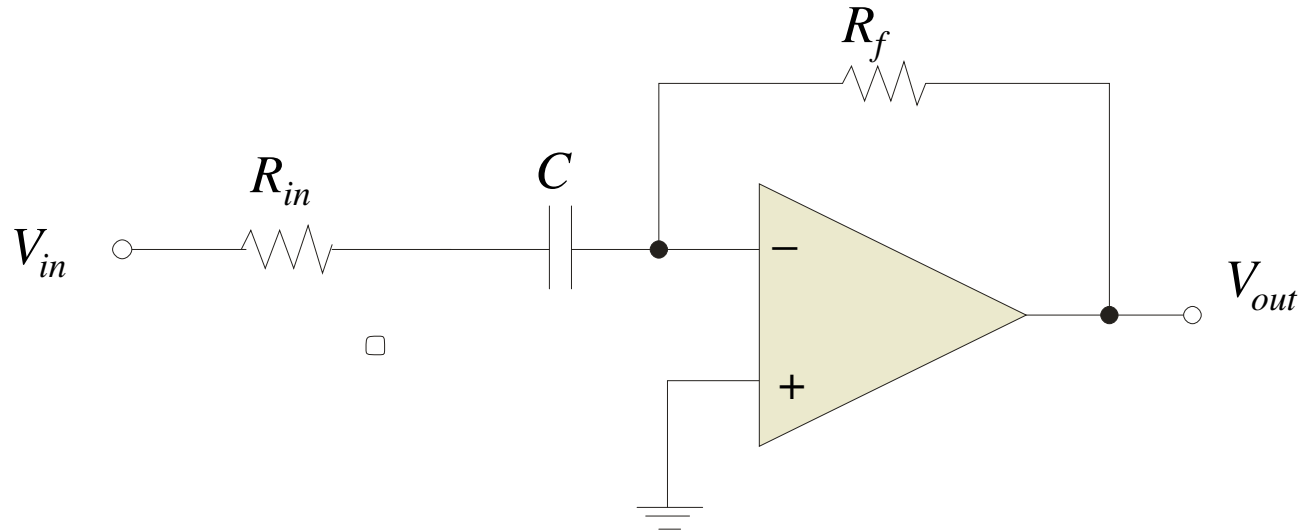
Integrators

Ver também guia do trabalho prático nº 7:

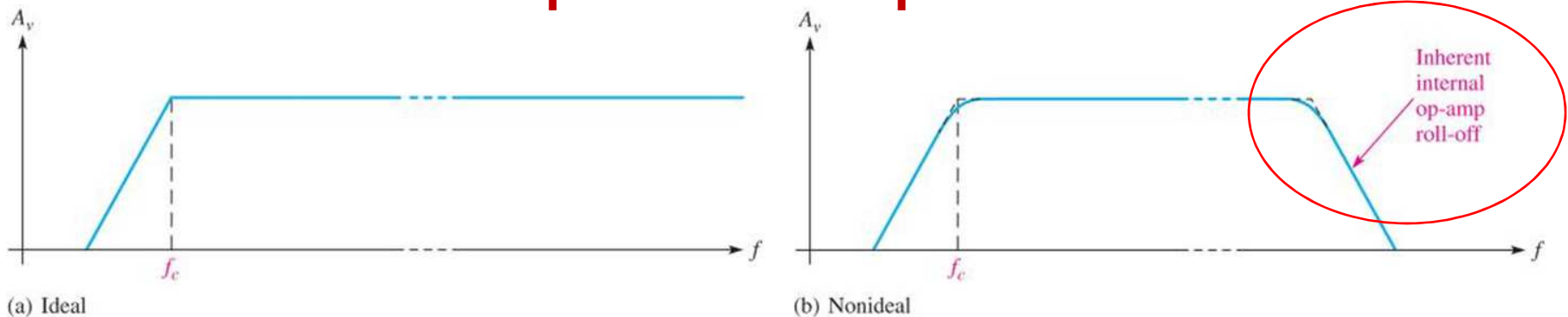
http://webpages.ciencias.ulisboa.pt/%7Ejmfigueiredo/aulas/Pratica_n_07_CESDig_1819.pdf

Filtro passa-alto e efeito da largura de banda do AmpOP

By reversing the resistor and capacitor in the low-pass circuit, a high-pass active filter is created. This filter has a gain of 1 (0 dB) at frequencies where $f > f_c$.

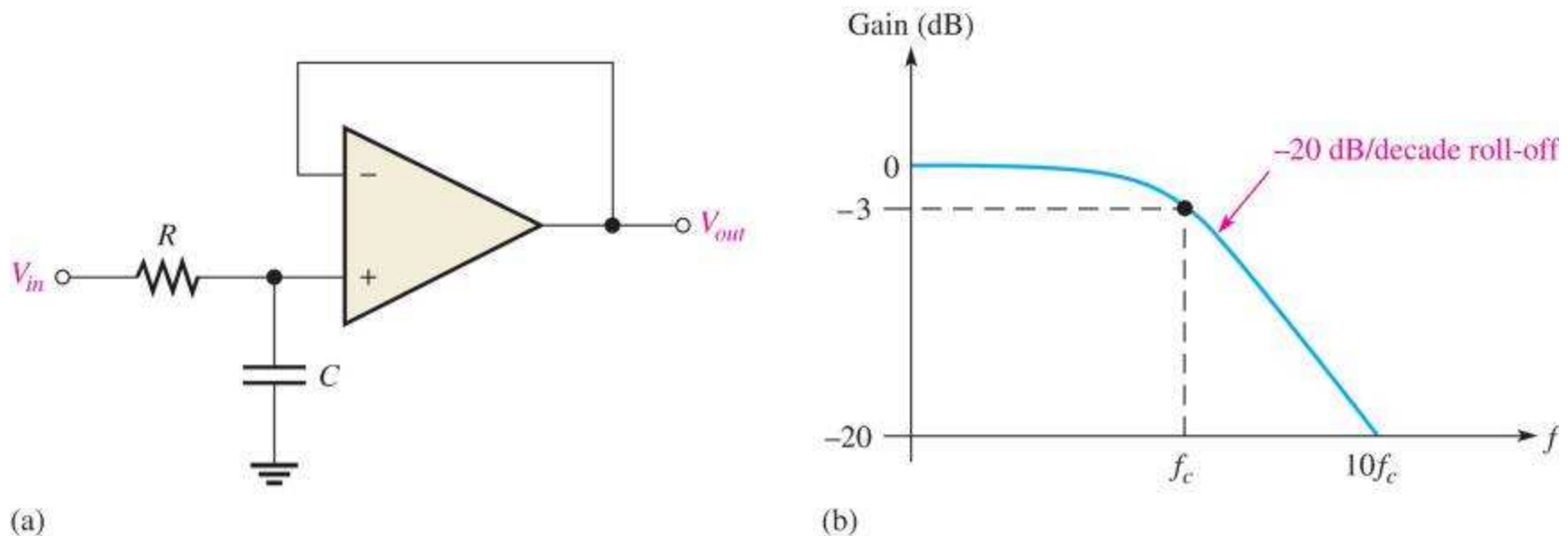


Resposta em frequência.



Single-pole, low-pass active filter and response curve.

Active filters use op-amps to optimize the frequency response. A low-pass active filter and its response.

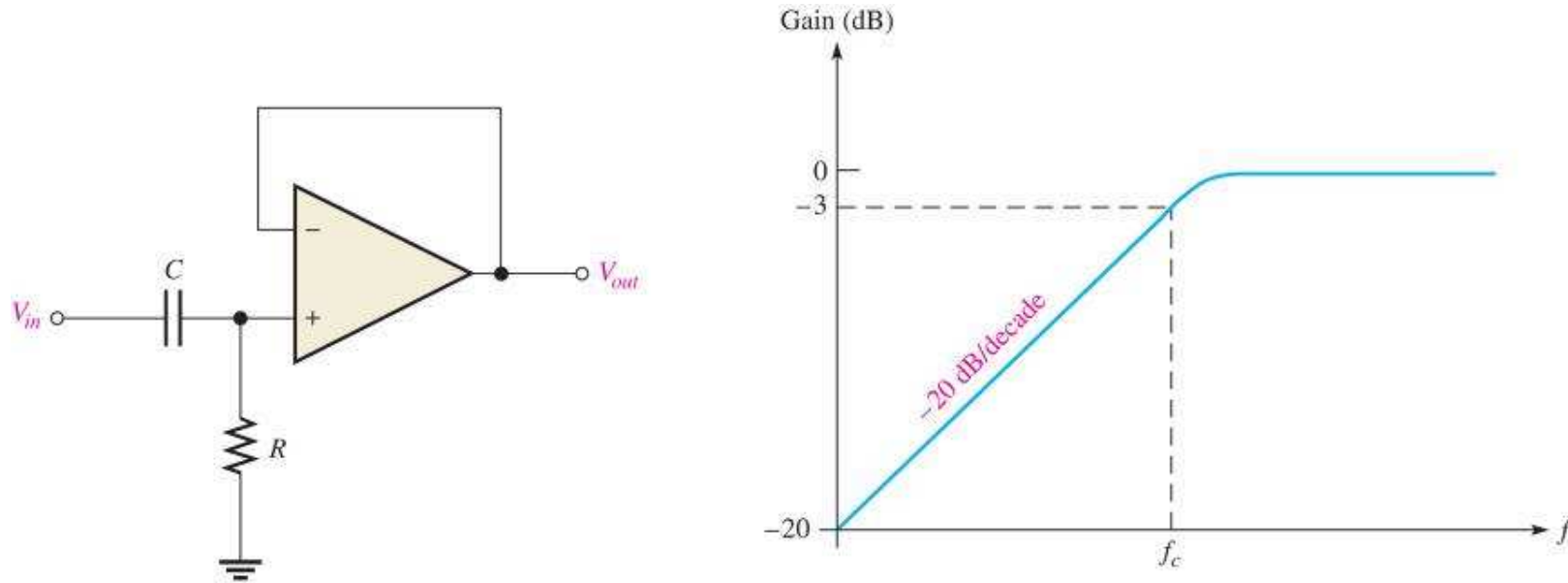


The gain for this filter is 1 (0 dB) for $f < f_c$.

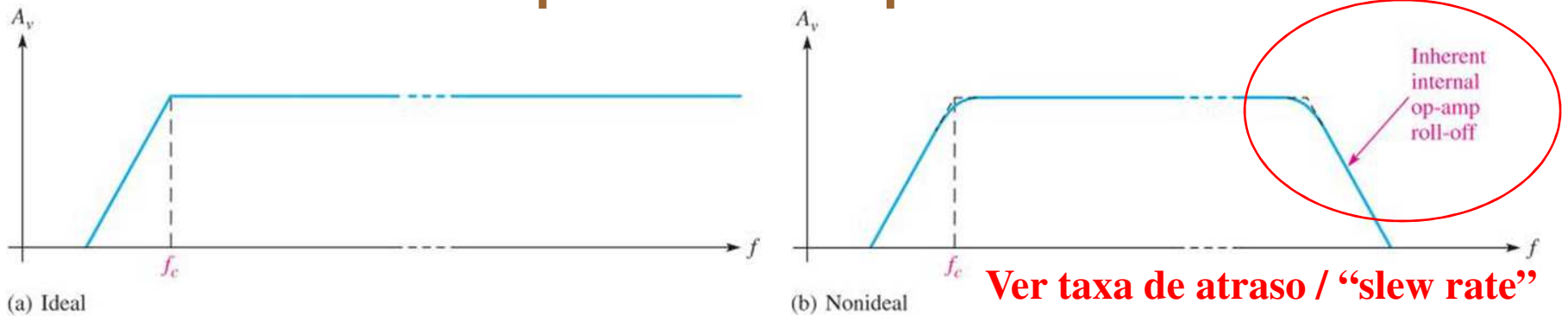
FIGURE 19-33

Single-pole, high-pass active filter and response curve

By reversing the resistor and capacitor in the low-pass circuit, a high-pass active filter is created. This filter has a gain of 1 (0 dB) at frequencies where $f > f_c$.



Resposta em frequência.



Ver taxa de atraso / "slew rate"

Definições gerais de largura de banda e de frequência de corte

Resposta em frequência e largura de banda

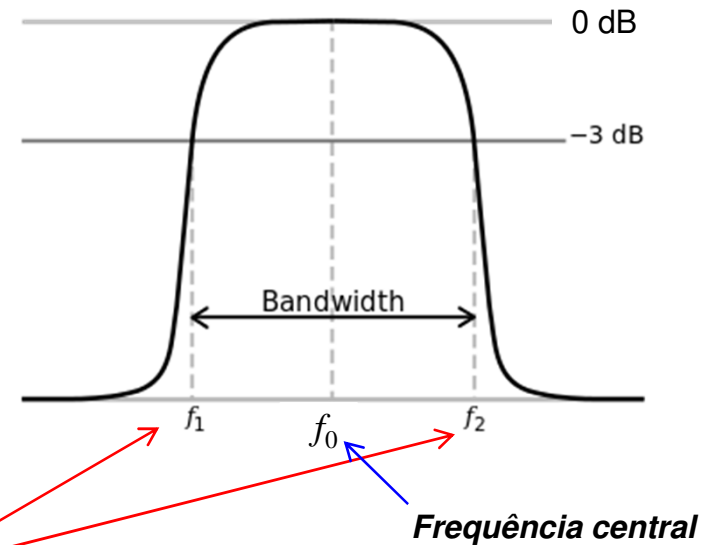
- **Resposta em frequência de um sistema** corresponde à análise do comportamento do [sistema](#) quanto ao seu [ganho](#) numa certa faixa de [frequências](#) (ou [frequência angular](#)).
- A representação gráfica da resposta em frequência de uma rede elétrica traduz-se nos diagramas de [Bode](#). A [representação de Bode](#) consiste em dois diagramas, um relativo ao ganho com uma [escala linear](#) no eixo das ordenadas ([ganho](#) em [decibéis](#) (dB) ou em [volt](#) por [volt](#) (V/V)), e o outro diagrama correspondendo à diferença de fase entre os sinais de entrada e de saída . A unidade mais utilizada para o ganho é o dB, mas pode ser usado o dBm, que corresponde ao nível de potência em dB em relação ao nível de referência de 1 [mW](#)). Em ambos no eixo das abscissas representa-se a [frequência](#) (Hz) ou frequência angular (rad/s) numa [escala logarítmica](#).
- **A largura de banda** é um conceito central em diversos campos de conhecimento, incluindo [teoria da informação](#), sistemas de comunicação [rádio](#) e óticos, [processamento de sinais](#), [eletrónica](#) e [espectroscopia](#). Em sistemas de comunicação a largura de banda corresponde à faixa de frequência ocupada pelo sinal modulado.
- **Em eletrónica normalmente corresponde à faixa de frequências na qual o sistema tem uma resposta em frequência aproximadamente plana (com variação igual ou inferior a 3 dB).**
- Quando se refere a sinais [analógicos](#), a largura de banda corresponde à faixa de frequência, medida em hertz, para a qual a [transformada de Fourier](#) do sinal é diferente de zero. **Esta definição normalmente é relaxada considerando um certo limiar de amplitude, tipicamente 3 dB em relação ao pico.**
- Para [sistemas](#), aplicam-se basicamente os conceitos acima, mas considerando **a função de transferência do sistema.**

https://pt.wikipedia.org/wiki/Largura_de_banda

Filtros: largura de banda e frequência de corte

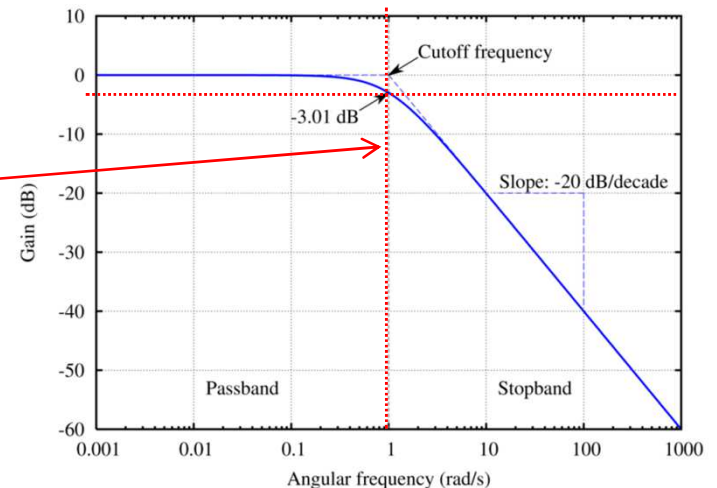
- **Filtro passa-banda:**

A largura de banda (LB ou simplesmente B) de um filtro passa-banda é a parte da [resposta em frequência](#) do filtro que está situada na faixa de 3 dB do valor de pico da resposta em frequência. Ou seja, num filtro [passa-banda](#) LB é a diferença entre f_2 e f_1 : $LB = f_2 - f_1$.



- Num **filtro passa-baixo** a largura de banda corresponde ao valor da [frequência de corte](#) (f_c): $LB = f_c$.

- A **frequência de corte** (f_c) ou **frequência metade da potência** (f_{3dB}) é a [frequência](#) abaixo da qual ou acima da qual a potência na saída de um sistema ([circuito eletrônico](#), [linha de transmissão](#), [filtro](#) ou [amplificador](#)) é reduzida a metade do valor máximo (valor de pico) da [potência](#) na faixa de passagem.



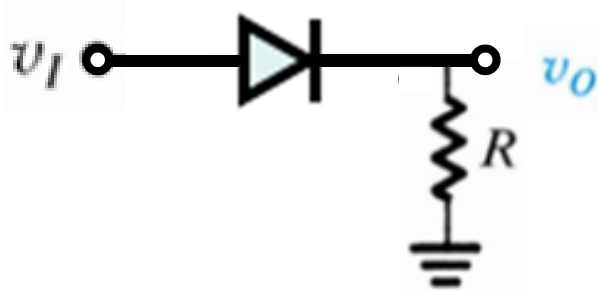
Circuitos não lineares com AmpOps

Retificadores de Precisão e Amplificadores

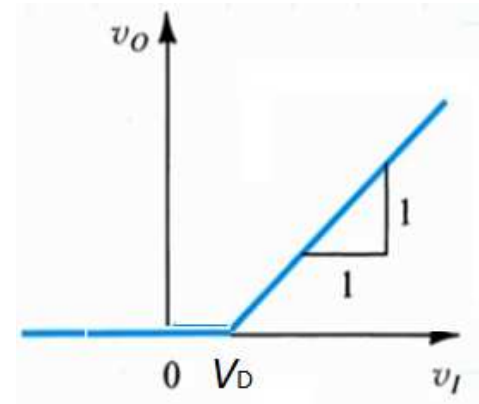
Logarítmico e Exponencial

Super-díodo

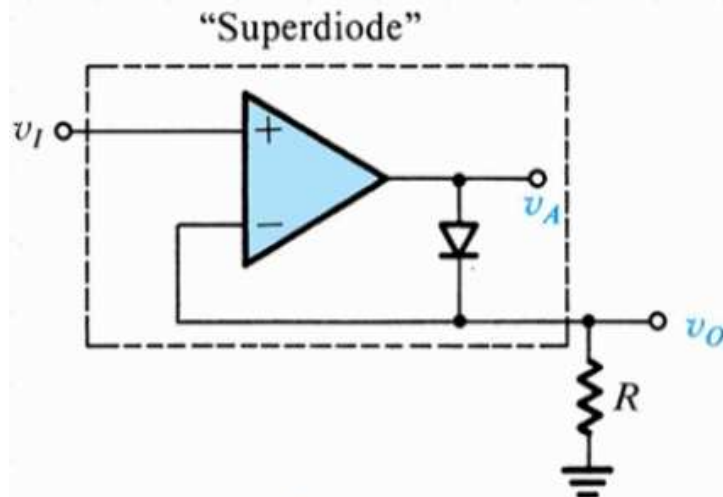
Díodo



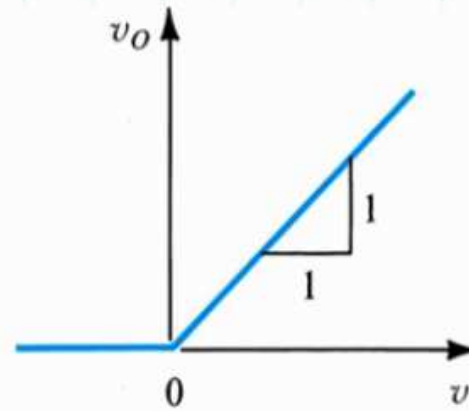
Função de transferência



Super-díodo



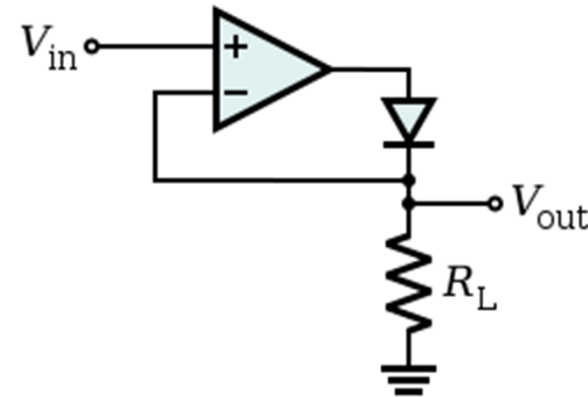
Função de transferência



Paul Horowitz and Winfield Hill, [The Art of Electronics](#), 2nd ed. Cambridge University Press, Cambridge, 1989 ISBN 0-521-37095-7.

Retificador de precisão

The **precision rectifier**, also known as a **super diode**, is a configuration obtained with an [operational amplifier](#) in order to have a [circuit](#) behaving like an ideal [diode](#) and [rectifier](#).^[1] It is useful for high-precision signal processing.



When the input [voltage](#) is negative, there is a negative voltage on the diode, so it works like an open circuit, no current flows through the load, and the output voltage is zero. When the input is positive, it is amplified by the operational amplifier, which switches the diode on. Current flows through the load and, because of the [feedback](#), the output voltage is equal to the input voltage.

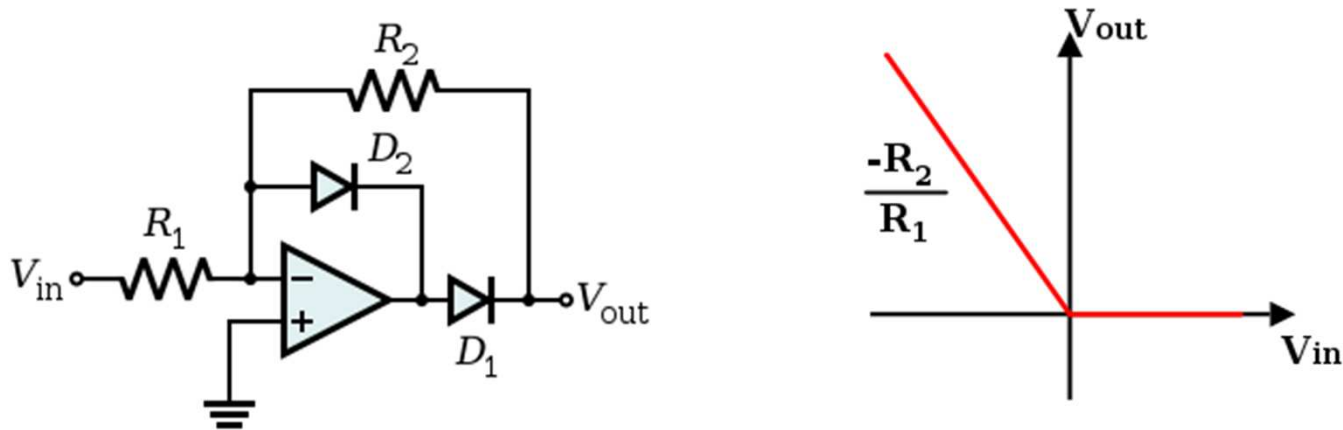
The actual threshold of the super diode is very close to zero, but is not zero. It equals the actual threshold of the diode, divided by the gain of the operational amplifier.

This basic configuration has a problem, so it is not commonly used. When the input becomes (even slightly) negative, the operational amplifier runs open-loop, as there is no feedback signal through the diode. For a typical operational amplifier with high open-loop gain, the output saturates. If the input then becomes positive again, the op-amp has to get out of the saturated state before positive amplification can take place again. This change generates some ringing and takes some time, greatly reducing the [frequency response](#) of the circuit.

Paul Horowitz and Winfield Hill, [The Art of Electronics](#). 2nd ed. Cambridge University Press, Cambridge, 1989 [ISBN 0-521-37095-7](#).

Retificador de precisão – circuito melhorado

In this case, when the input is greater than zero, D_1 is off, and D_2 is on, so the output is zero because one side of R_2 is connected to the virtual ground, and there is no current through it. When the input is less than zero, D_1 is on, and D_2 is off, so the output is like the input with an amplification of $-R_2 / R_1$. Its input–output relationship is the following:



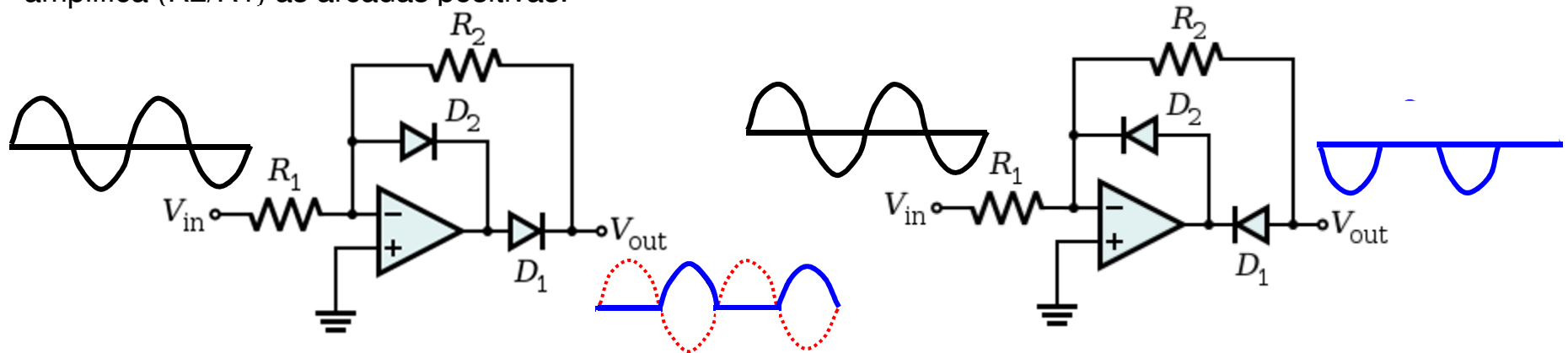
This circuit has the benefit that the op-amp never goes into saturation, but its output must change by two diode voltage drops (about 1.4 V) each time the input signal crosses zero. Hence, the [slew rate](#) of the operational amplifier and its frequency response ([gain–bandwidth product](#)) will limit high-frequency performance, especially for low signal levels, although an error of less than 1% at 100 kHz is possible.

Similar circuitry can be used to create a precision [full-wave rectifier](#) circuit.

<http://sound.whsites.net/appnotes/an001.htm>

Retificador de precisão de meia onda

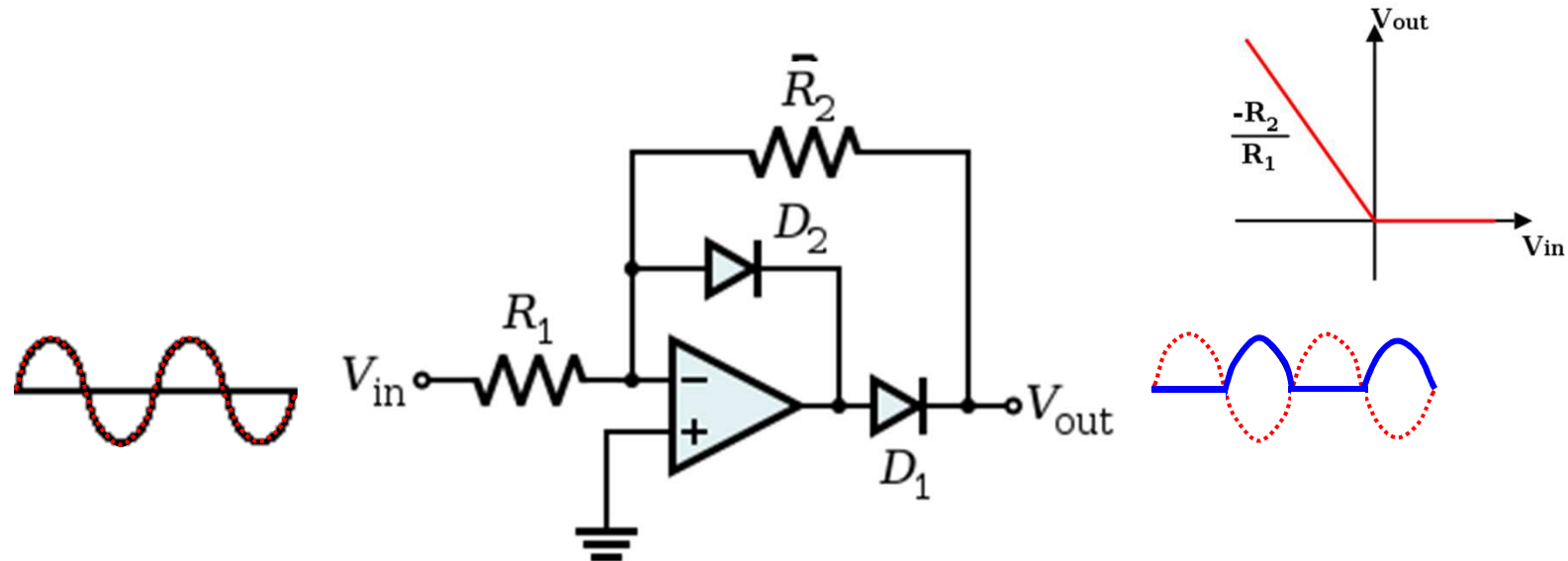
Os circuitos abaixo são uma versão melhorada do retificador de precisão anterior (super-díodo). Ambos realizam a função de retificação de meia-onda. O primeiro faz retificação de meia onda aproveitando/deixando passar as arcadas negativas e amplificando-as (R_2/R_1). O segundo deixa passar e amplifica (R_2/R_1) as arcadas positivas.



The circuit in the left accepts an incoming waveform and inverts it. However, only the positive-going portions of the output waveform, which correspond to the negative-going portions of the input signal, actually reach the output. The direct feedback diode shunts any negative-going output back to the "-" input directly, preventing it from being reproduced. The slight voltage drop across the diode itself is blocked from the output by the second diode. The second diode allows positive-going output voltage to reach the output. Furthermore, since the output voltage is taken from beyond the output diode itself, the op amp will necessarily compensate for any non-linear characteristics of the diode itself. As a result, the output voltage is a true and accurate (but inverted) reproduction of the negative portions of the input signal. Thus, this circuit operates as a precision half-wave rectifier. If R_2 is equal to R_1 as is the usual case, the output voltage will have the same amplitude as the input voltage. If you want to keep the positive-going portion of the input signal instead of the negative-going portion, simply reverse the two diodes – circuit in the right. The result will be a negative-going copy of the positive part of the input signal.

http://www.play-hookey.com/analog/feedback_circuits/half-wave_rectifier.html

Retificador de precisão de meia onda

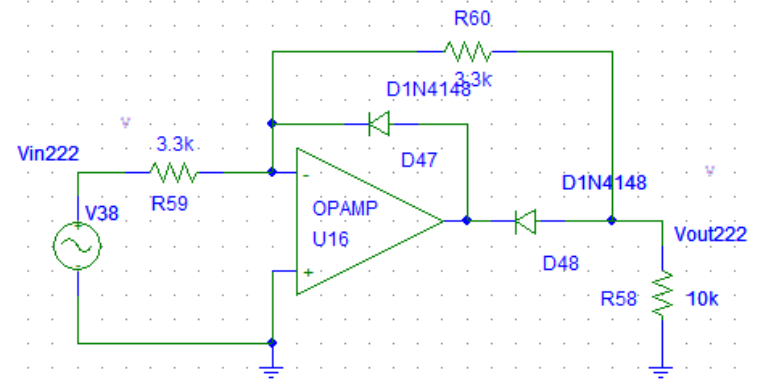


Para $v_{in} < 0$, $v_0 = -\frac{R_2}{R_1} v_{in}$

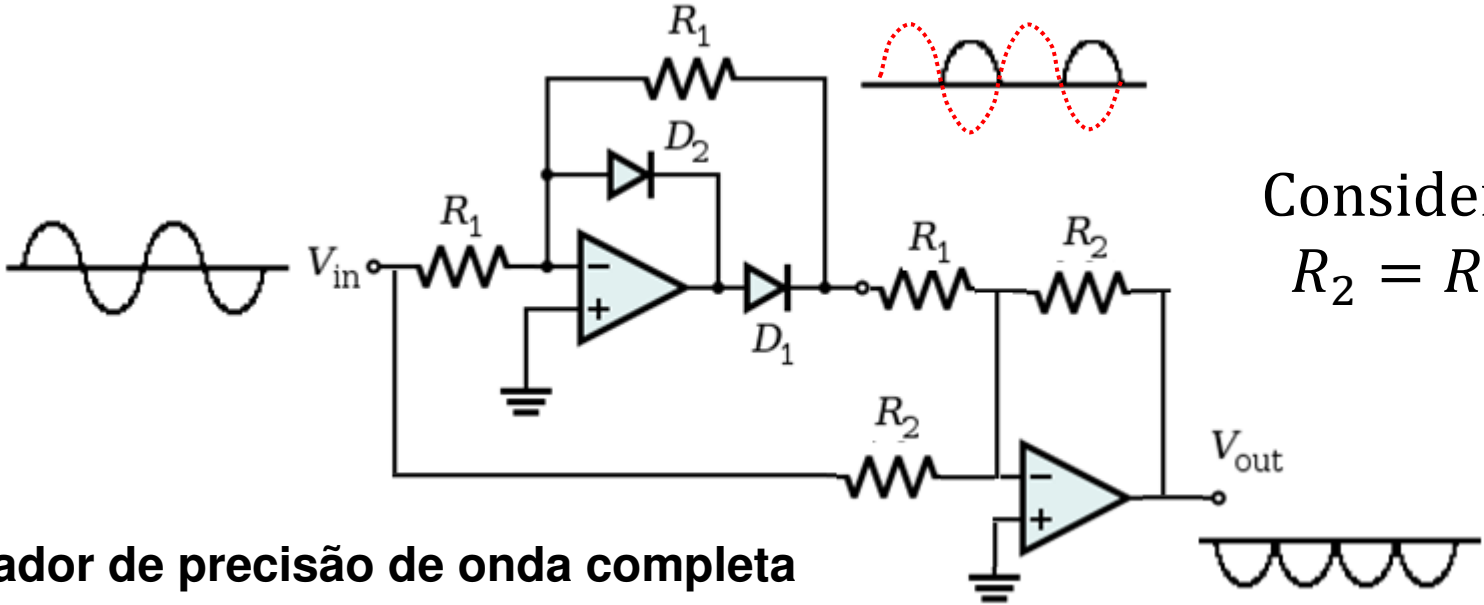
Para $v_{in} \geq 0$, $v_0 = 0$

D2 evita a saturação do AmpOp

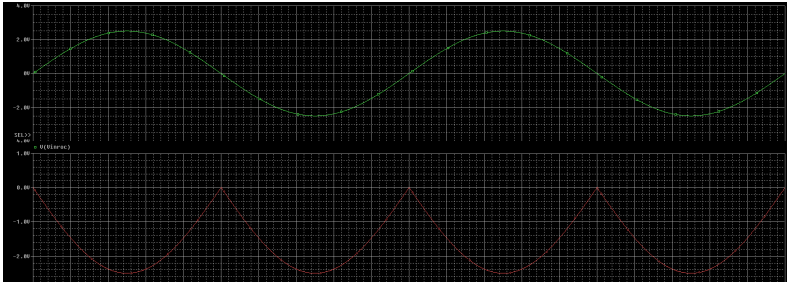
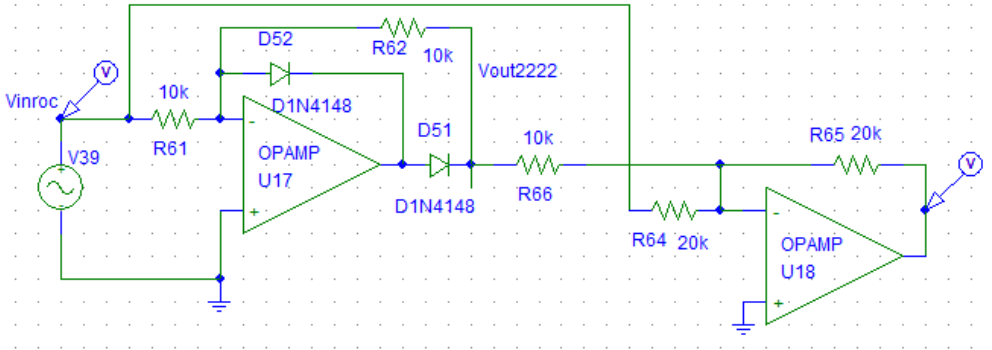
Qual é a função realizada pelo circuito se invertermos os sentidos dos díodos?



Qual é a função realizada por este circuito?

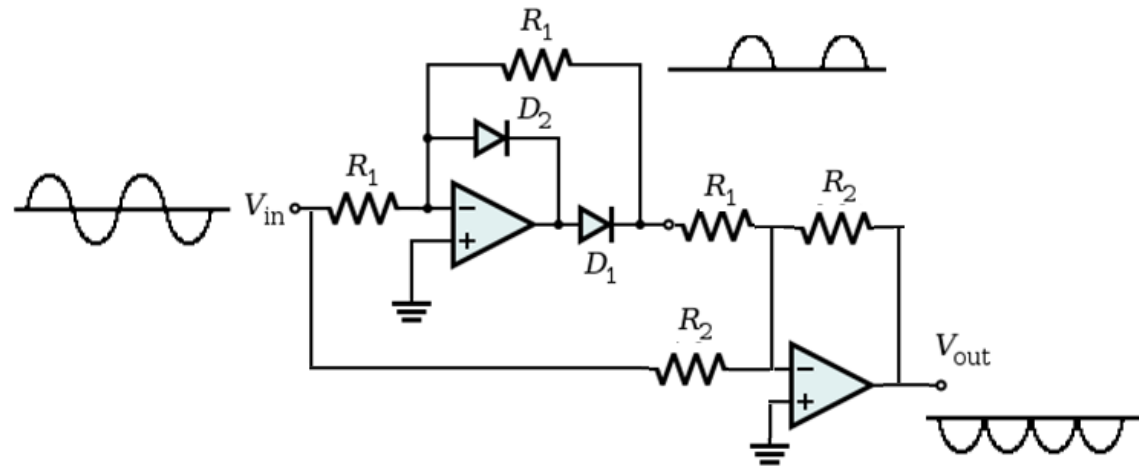


Retificador de precisão de onda completa



Retificador de precisão de onda completa

The half-wave rectifier kept only those parts of the original input signal that were positive (or negative). Is there a way to keep both halves of the input signal, and yet render them both with the same output polarity? This is the behavior of a *full-wave rectifier*.



The circuit shown above (*considere no que segue $R_1=10\text{ k}\Omega$ e $R_2=20\text{ k}\Omega$*) performs full-wave rectification on the input signal, as shown. If you wish the final output to be positive instead of negative, simply reverse the two diodes in the half-wave rectifier section.

The full-wave rectifier depends on the fact that both the half-wave rectifier and the summing amplifier are precision circuits. It operates by producing an inverted half-wave-rectified signal and then *adding that signal at double amplitude* to the original signal in the summing amplifier. The result is a reversal of the selected polarity of the input signal.

The resistor values shown are reasonable; the resistors themselves must be of high precision in order to keep the rectification process accurate. If for some reason you must build such a circuit with a different set of resistance values, you must maintain the indicated 2:1 resistance ratio, and you must still use precision resistors in order to obtain accurate results.

http://www.play-hokey.com/analog/feedback_circuits/full-wave_rectifier.html

Amplificadores Logarítmico e exponencial

Sabe-se que na natureza e no dia-a-dia muitos fenómenos variam de forma logarítmica ou exponencial.

No **amplificador logarítmico**, a tensão de saída é o logarítmico da tensão de entrada:

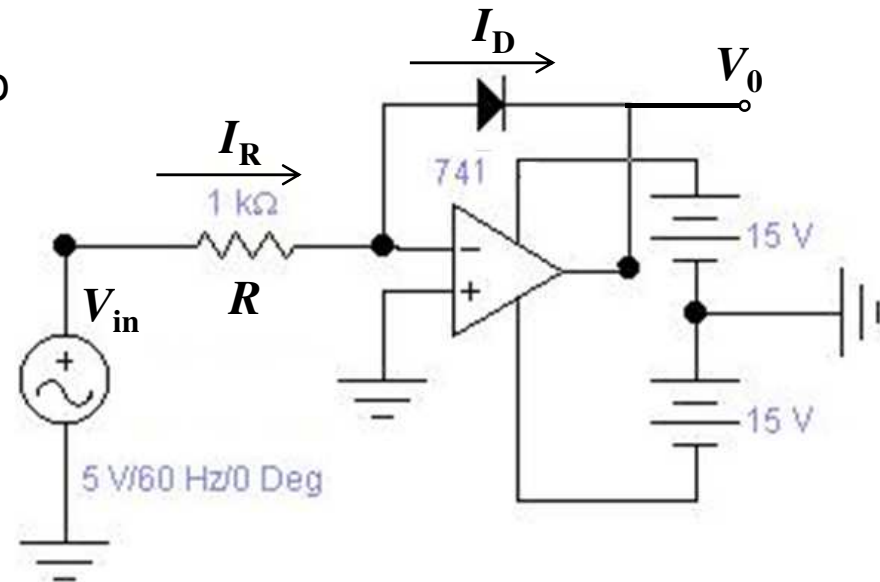
$$I_R = \frac{V_{in}}{R_i}; I_D(V_D) = I_R, \text{ e } V_0 = -V_D.$$

De onde resulta que

$$I_D(V_D) = I_S(e^{V_0/V_T} - 1),$$

obtendo-se

$$V_0 = -V_T \cdot \ln\left(\frac{V_{in}}{R \cdot I_S} + 1\right)$$



Trocando de posição a resistência e o díodo obtém-se o **amplificador exponencial**:

$$I_D(V_D) = I_R = -\frac{V_0}{R}, \text{ e } V_D = V_{in}:$$

De onde resulta que,

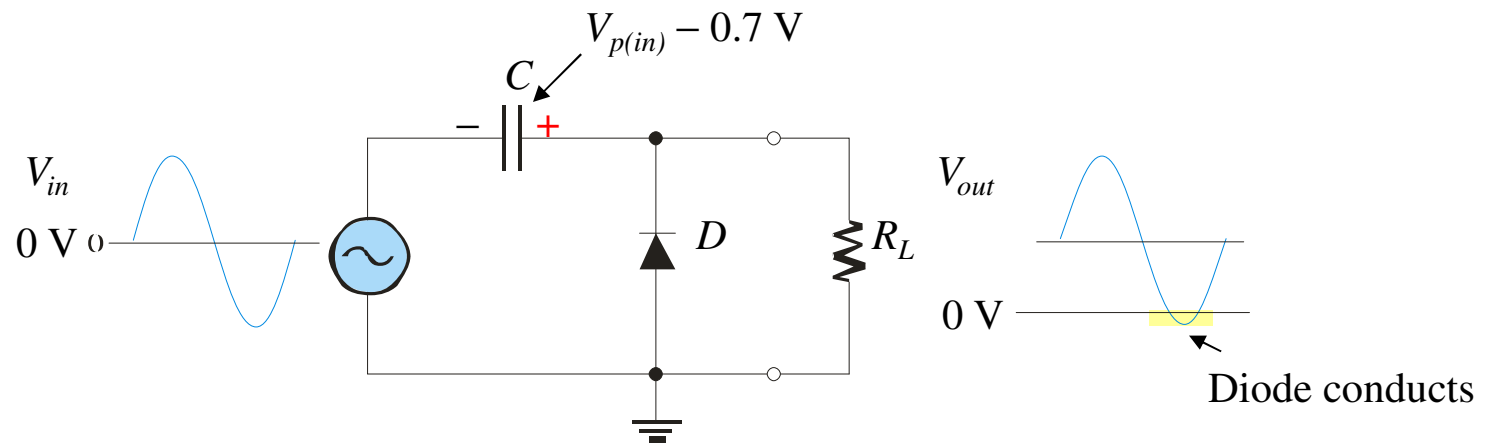
$$V_0 = -R \cdot I_S \left(e^{\frac{V_{in}}{V_T}} - 1 \right)$$

Circuitos não-lineares com AmpOps

Circuito fixador de nível

Clamping circuits

A basic clamping circuit (also called a dc restorer) adds a dc level to a signal voltage using a diode and capacitor.

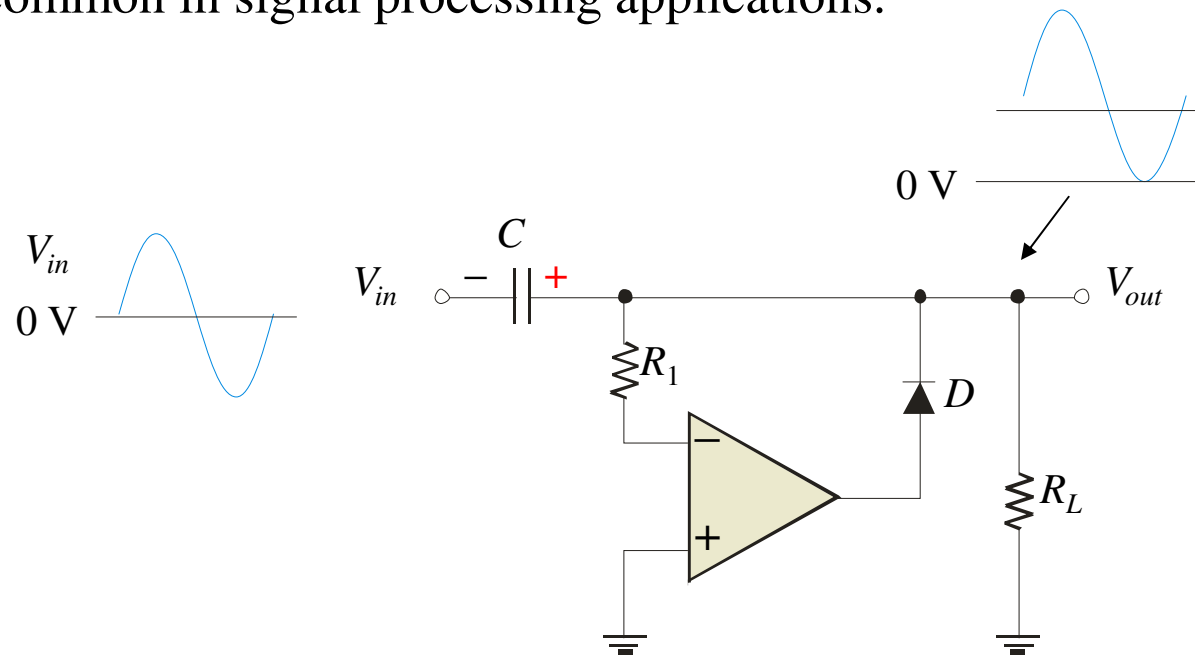


The first negative cycle of the signal biases the diode on and causes the capacitor to charge to $V_{p(in)} - 0.7\text{ V}$. The long time constant keeps the capacitor charged, which adds a dc voltage to the signal voltage at the output.

Circuito fixador de nível com AmpOP

Clamping circuits

The 0.7 V diode drop in the basic circuit can be a problem for low-level signals, which are common in signal processing applications.

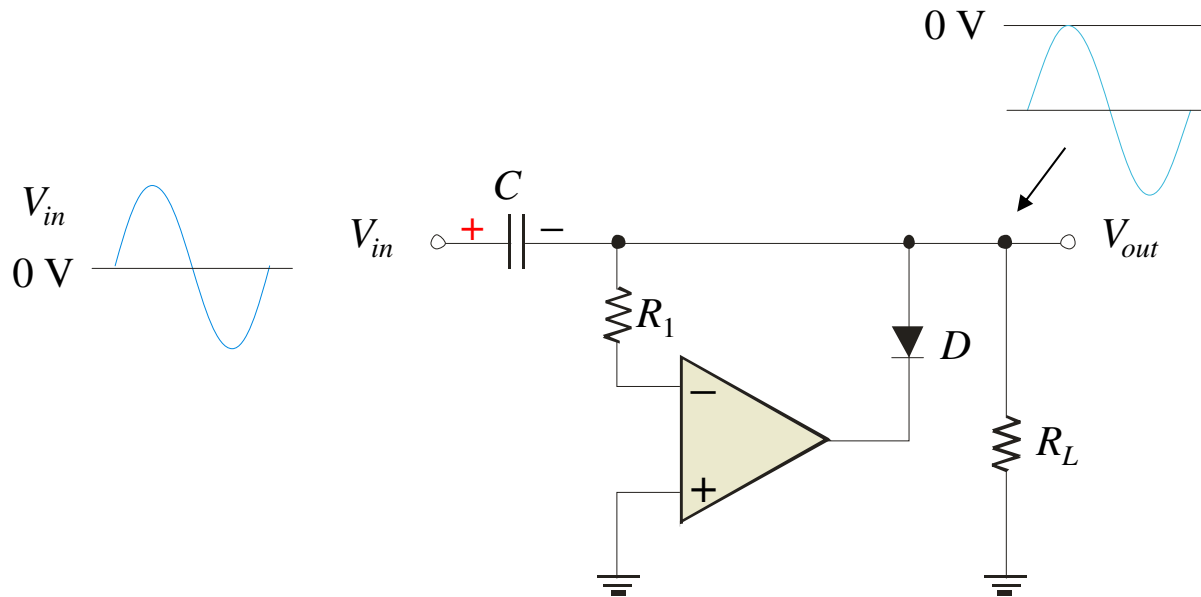


Active diode circuits use an op-amp and feedback to closely approximate the behavior of an ideal diode. The same clamping circuit with an active diode has a nearly ideal response.

Circuito fixador de nível com AmpOp

Clamping circuits

Active clamping circuits can produce negative clamping action by reversing the diode.

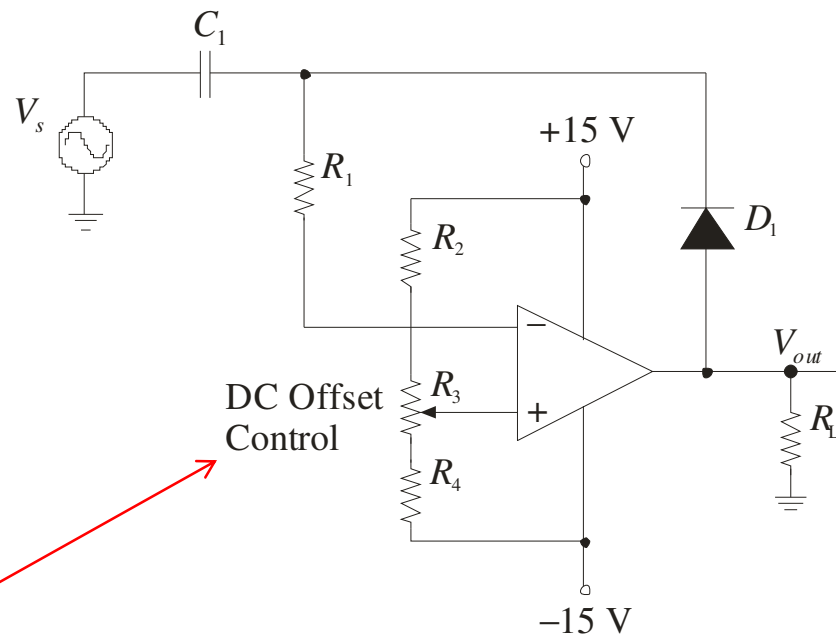


The first positive cycle of the signal charges the capacitor as shown, adding a negative dc voltage to the input.

Circuito fixador de nível com AmpOp

Clamping circuits

An application for a clamping circuit is shown.

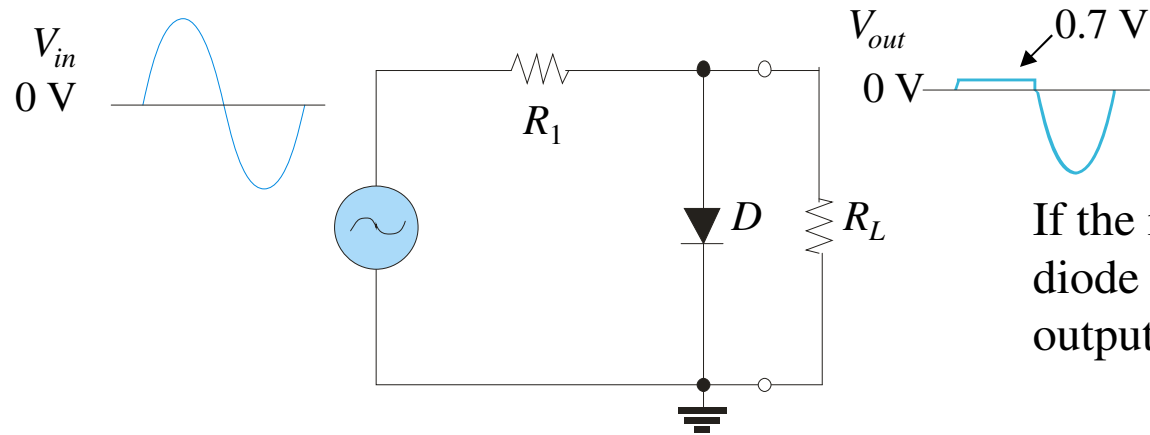


This circuit adds or subtracts a dc voltage to the output, depending on the setting of the DC Offset control.

Circuito limitador

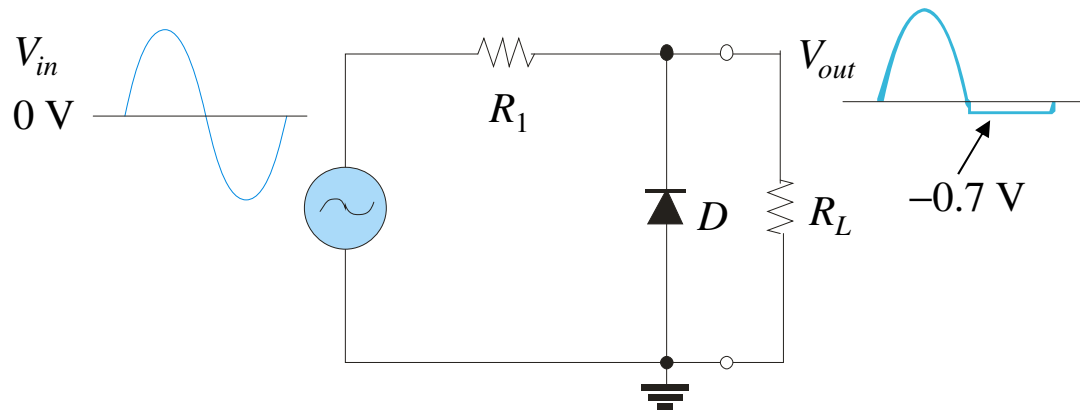
Limiting circuits

Diode limiters (clippers) are circuits that limit voltage above or below a specified level. A basic limiter circuit that clips voltages below 0.7 V is shown.



If the input is above 0.7 V, the diode conducts, causing the output to be limited to this level.

Reversing the diode causes the limiter to clip signal voltages that are below -0.7 V.

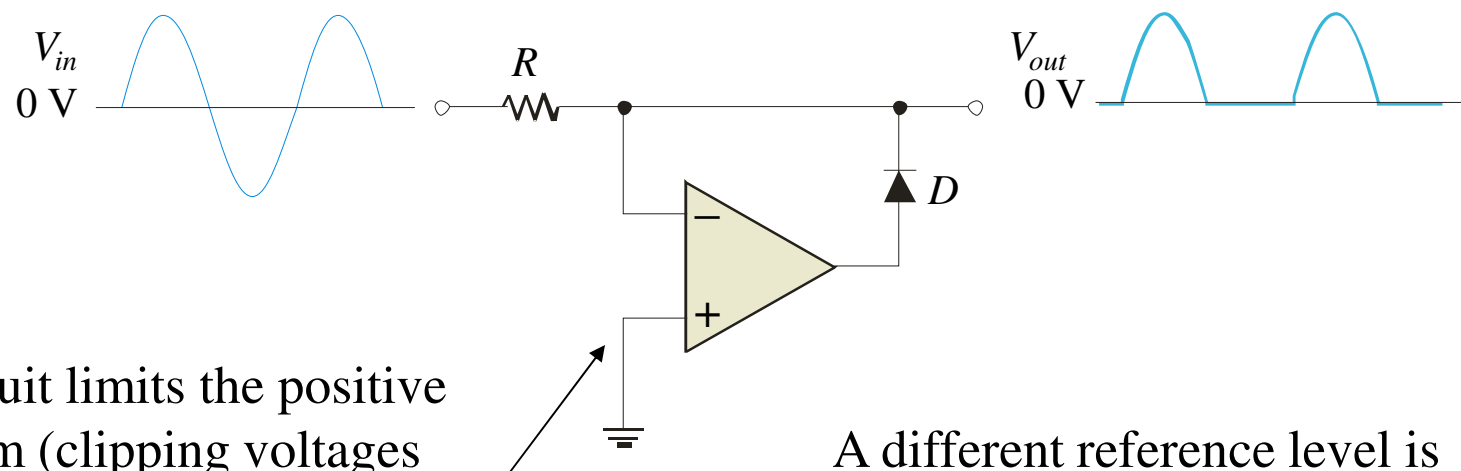


If the input is below -0.7 V, the diode conducts, causing the output to be limited (clipped) for voltages less than this level.

Circuito limitador com AmpOp

Limiting circuits

An active limiter uses an op-amp and diode circuit to form an almost ideal diode. This means the 0.7 V forward drop of the diode does not affect the output.



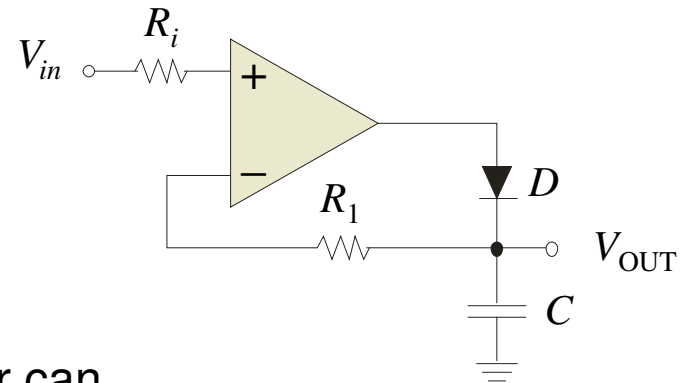
This circuit limits the positive waveform (clipping voltages above ground) because the + input reference is at 0 V.

A different reference level is easy to achieve by putting the desired reference voltage on the non-inverting input.

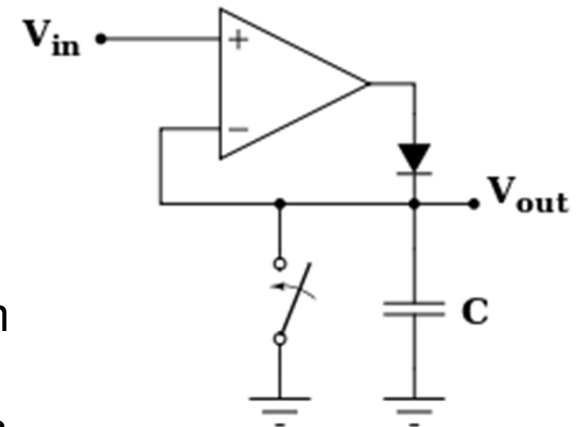
Detector de pico

Another useful active diode circuit is the peak detector. The purpose of the circuit is to store the maximum positive value of a voltage on a capacitor and hold the value for a certain time.

The op-amp is set up as a comparator. If $V_{in} > V_C$, the diode is forward biased and charges to the peak of V_{in} . For example if a 1.0 V_{pp} sine wave is the input, the output will be a dc level of +0.5 V.



With a little modification, the basic precision rectifier can be used for detecting signal level peaks. In the following circuit, a [capacitor](#) retains the peak voltage level of the signal, and a switch is used for resetting the detected level. When the input V_{in} exceeds V_C (voltage across capacitor), the diode is forward biased and the circuit becomes voltage follower. Consequently, the output voltage V_{out} follows V_{in} as long as V_{in} exceeds V_C . When V_{in} drops below V_C , the diode becomes reverse biased and the capacitor holds the charge till input voltage again attains a value greater than V_C .

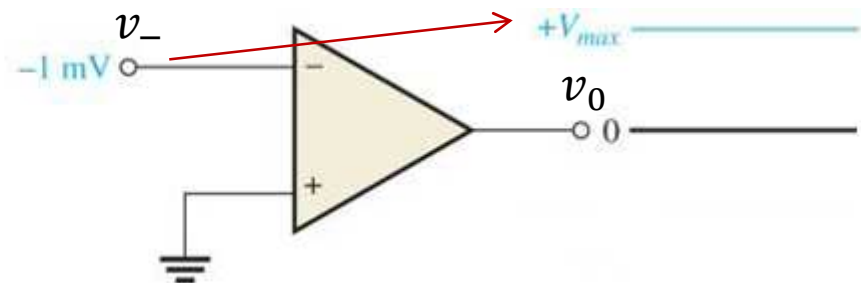
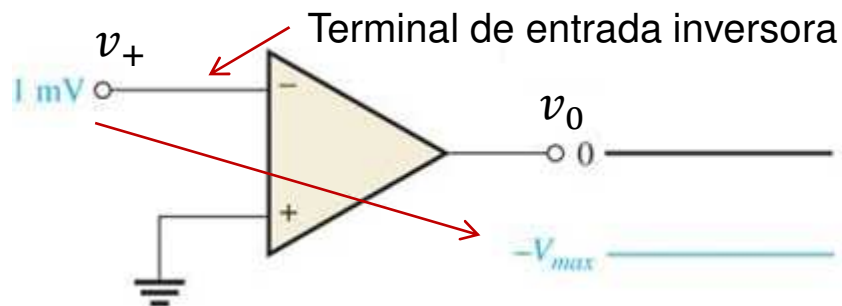
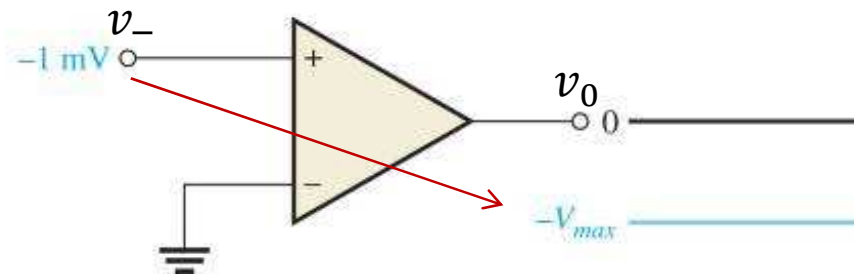
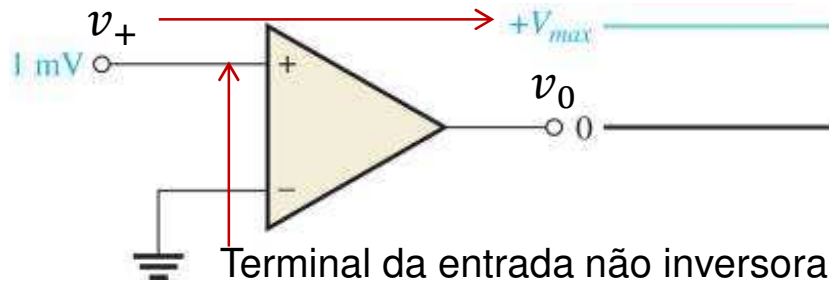


Comparadores e detetores de nível

Um amplificador operacional tem um ganho em malha aberta muito elevado

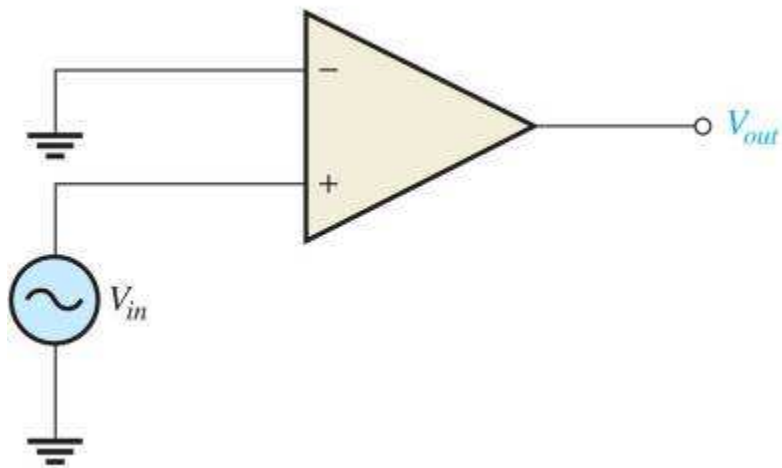
Sem realimentação negativa, uma diferença extremamente pequena ($> \sim 10 \mu\text{V}$) entre as tensões aplicadas às entradas, levam o AmpOp para fora dos seus “limites” e tornam-no não-linear

$$v_o = A(v_+ - v_-)$$

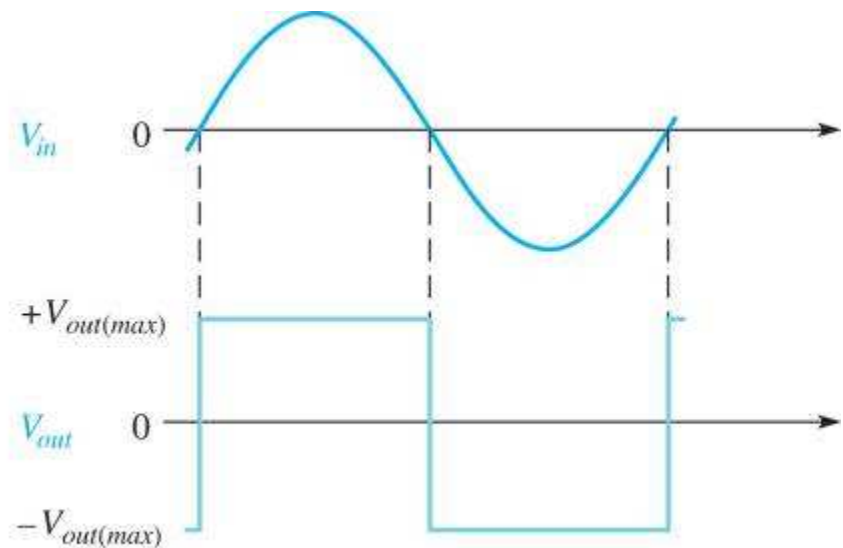


Detetor de zero

Quando a tensão aplicada à entrada não inversora passa por zero, a saída do AmpOp comuta entre os seus valores de saturação. Desta forma o circuito detecta que a tensão tomou o valor zero.



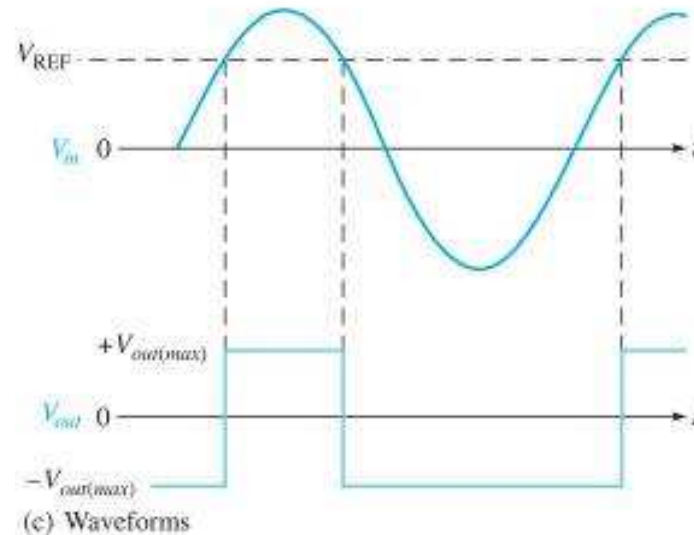
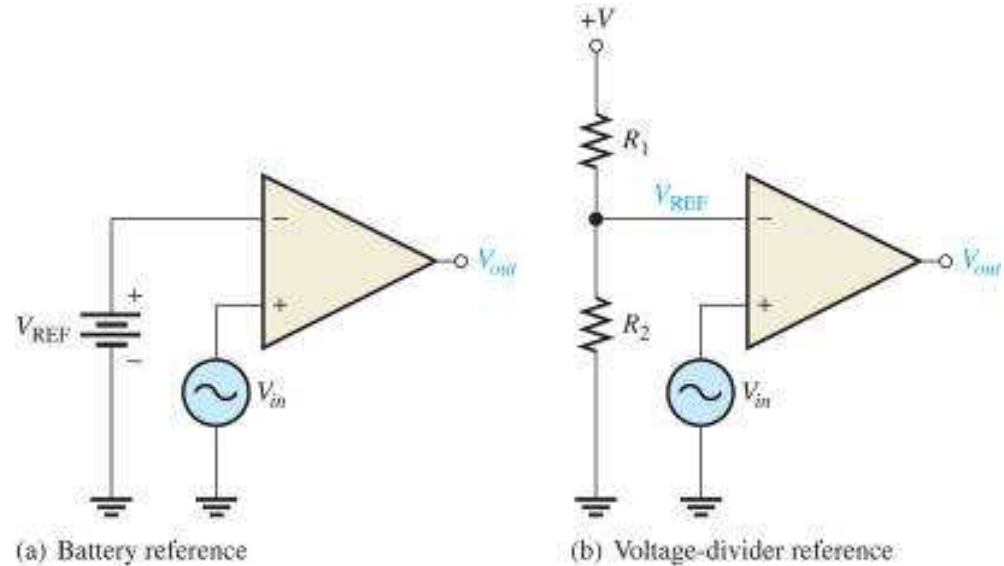
(a)



(b)

Detetor de nível

Se ao terminal inversor for aplicada uma tensão de referência, a saída do comparador comuta sempre que a tensão de entrada passa por esse valor de referência, i.e., o circuito detecta o nível de tensão correspondente à tensão de referência.

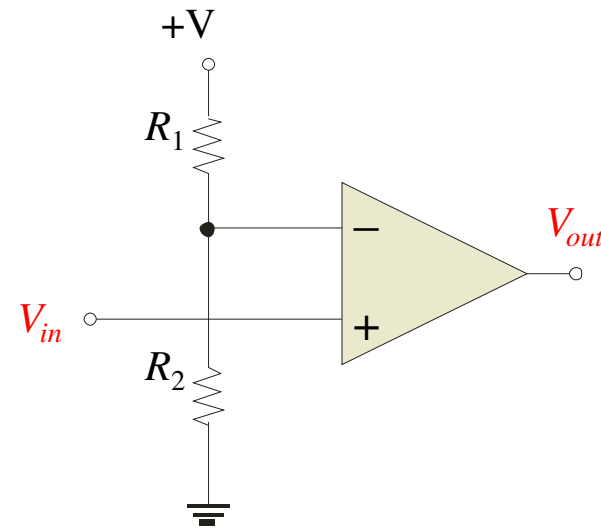


Comparador

Comparators

Op-amps can be used to compare the amplitude of one voltage with another. Although general-purpose op-amps can be used as comparators, special op-amps are available to optimize speed and add features.

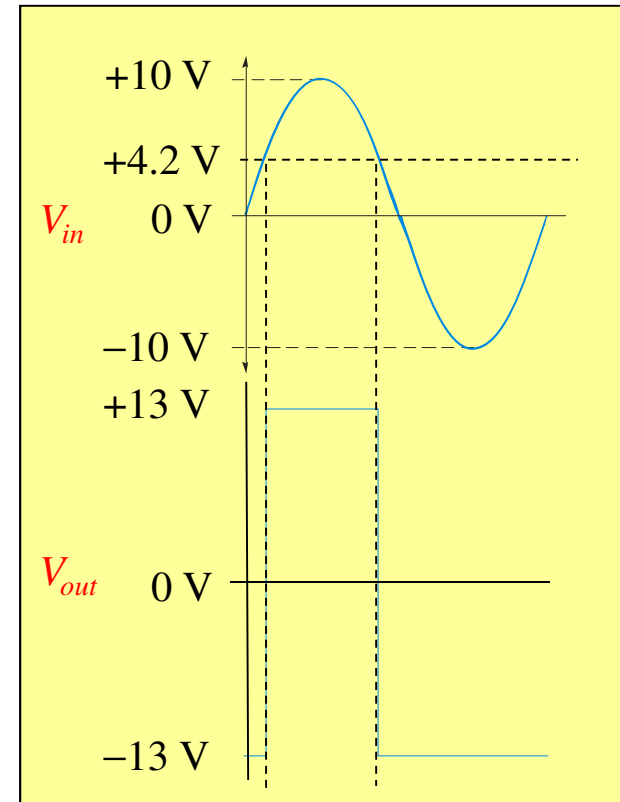
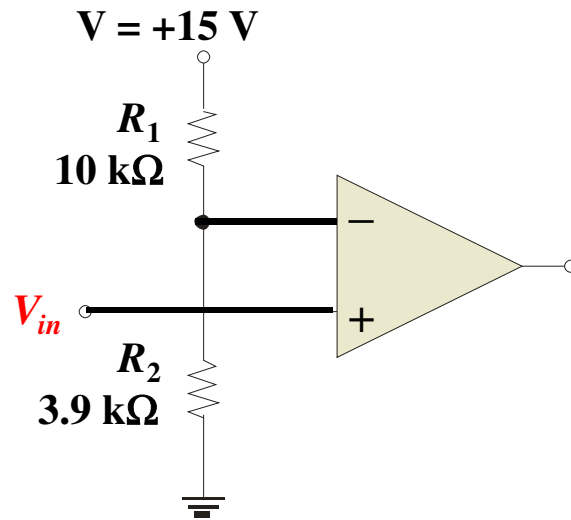
An example of a comparison circuit is shown. The input is compared with a reference set by the voltage-divider. Notice that there is no feedback; **the op-amp is operated in open-loop, so the output will be in saturation.**



Comparador

Esboce a saída do comparador em relação à entrada; assuma que a tensão máxima na saída é ± 13 V.

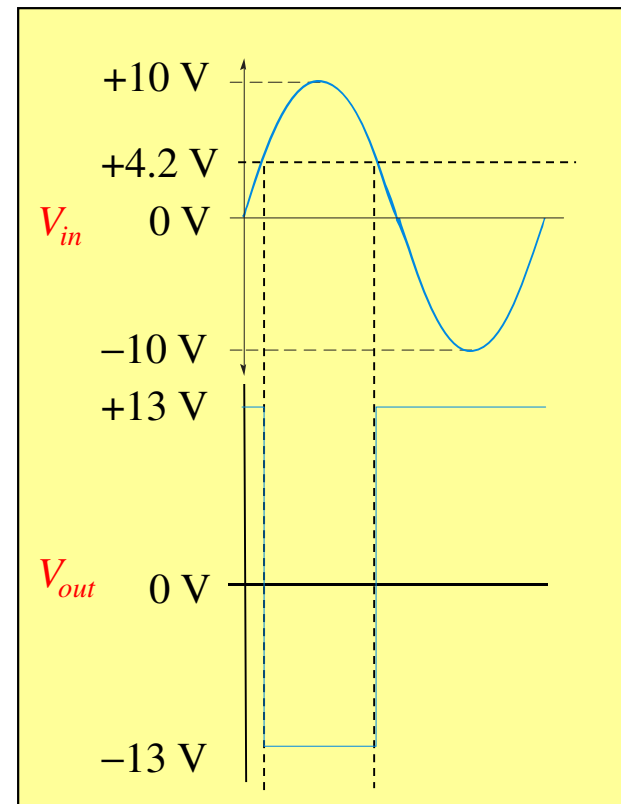
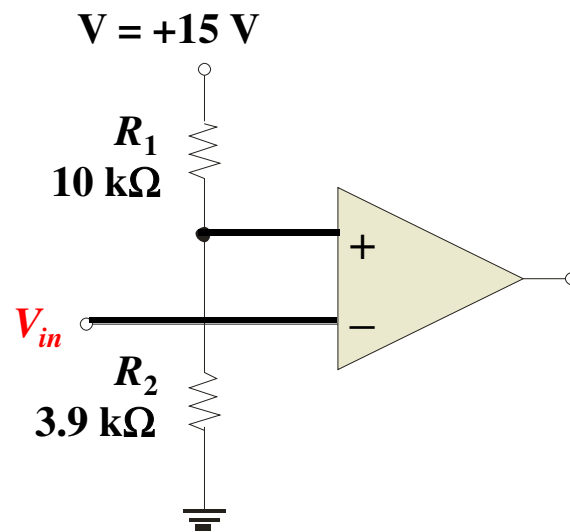
O valor de referência é +4.2 V. A saída estará saturada positivamente sempre que $V_{in} > +4.2$ V



Comparador

Esboce a saída do comparador em relação à entrada tendo em atenção que os terminais estão trocados; assuma novamente que a tensão máxima na saída é ± 13 V.

O valor de referência continua a ser $+4.2$ V. Mas agora a saída estará saturada negativamente sempre que $V_{in} > +4.2$ V.



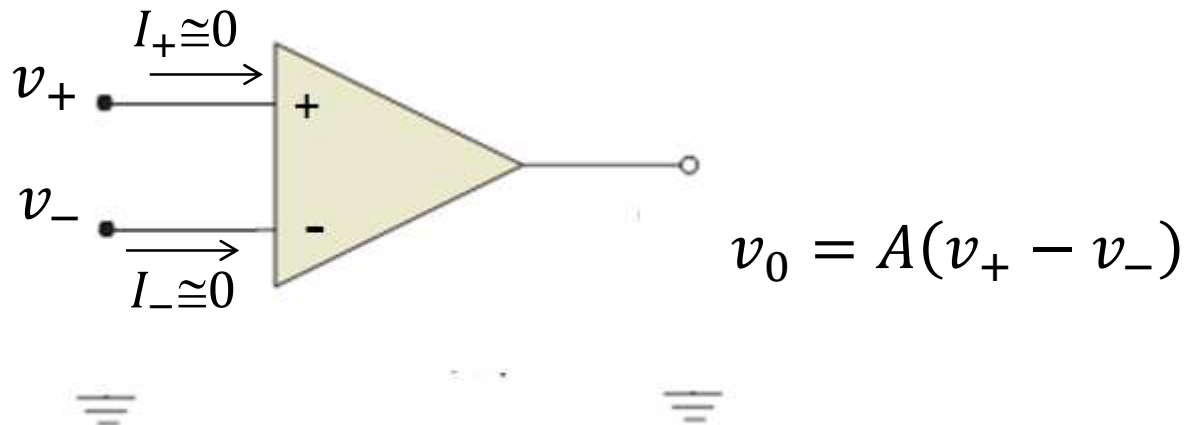
Circuitos não lineares

Comparadores com realimentação positiva

(ver também guia do trabalho 10)

AmpOp sem realimentação/retroação

O ampOp sem realimentação/retroação comporta-se como um circuito comparador, comprando a tensão de um terminal com a tensão do outro, produzindo à saída um sinal que multiplica a diferença entre os dois sinais pelo ganho em malha aberta do AmpOp.



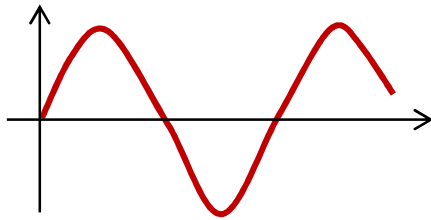
Como o ganho do AmpOp em malha aberta é, em geral, muito elevado, o amplificador entra facilmente em saturação, tomando a saída um dos valores possíveis:

$$v_0 = +V_{sat+} \text{ se } v_+ > v_-$$
$$v_0 = -V_{sat-} \text{ se } v_- > v_+$$

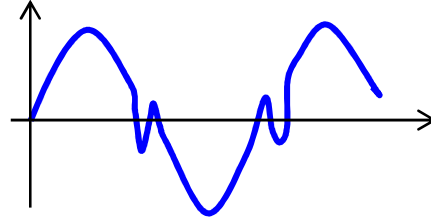
Comparador simples

Limitações do comparador simples – ver também anexo do trabalho 10.

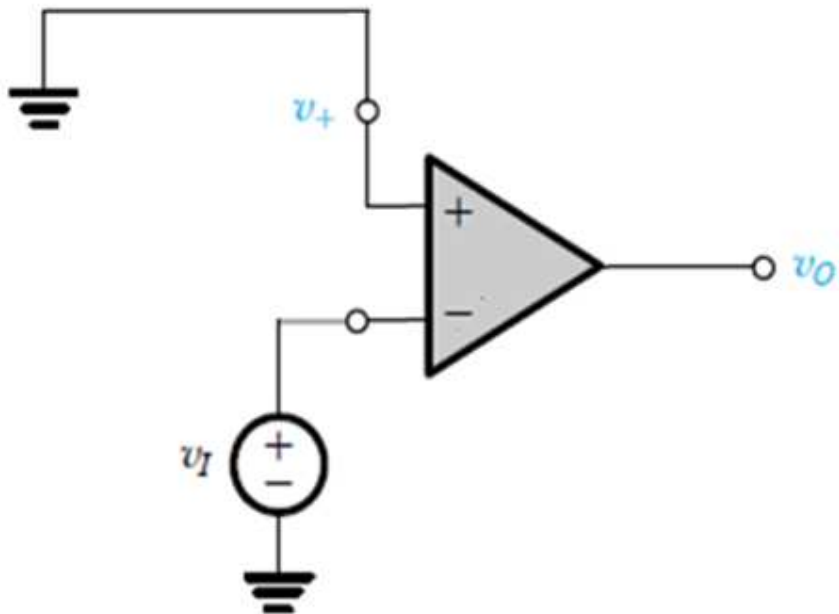
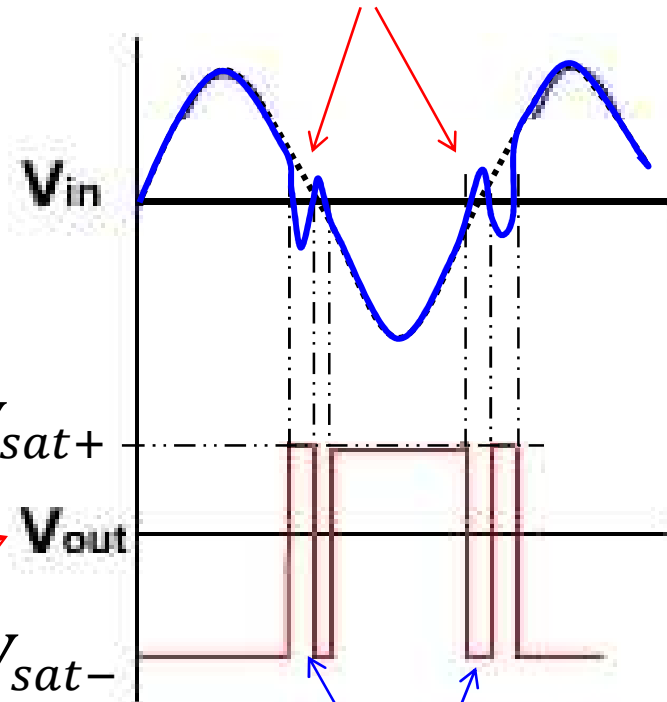
Sinal original



sinal afectado pelo ruído

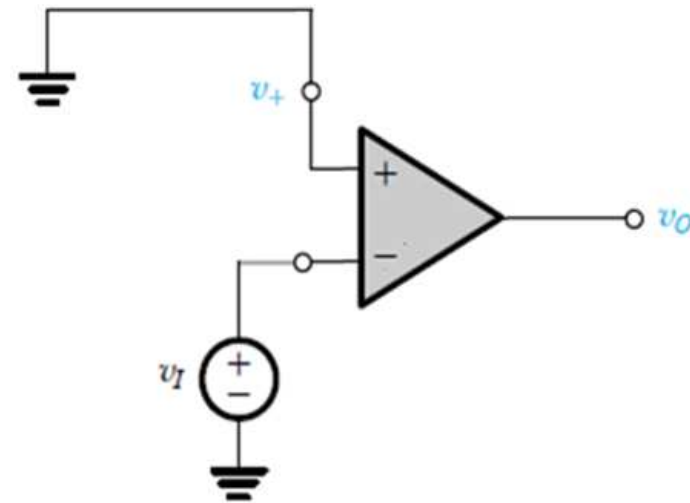
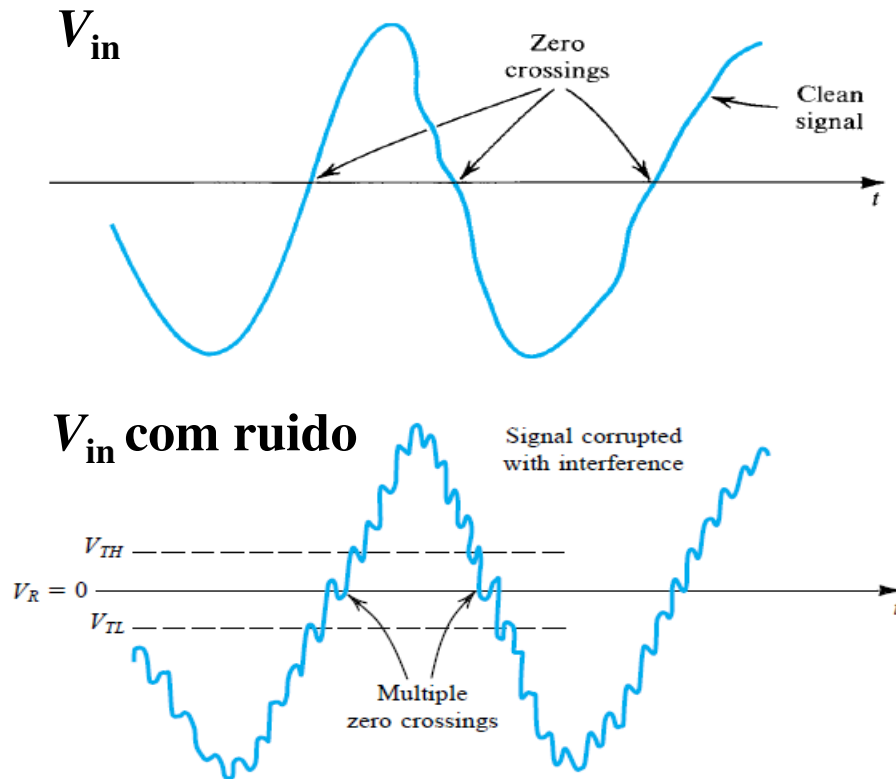


Anomalias no sinal de entrada



O sinal de saída reproduz as anomalias do sinal de entrada

Comparador e a histerese



Qual seria a saída do comparador para cada um dos sinais ao lado?

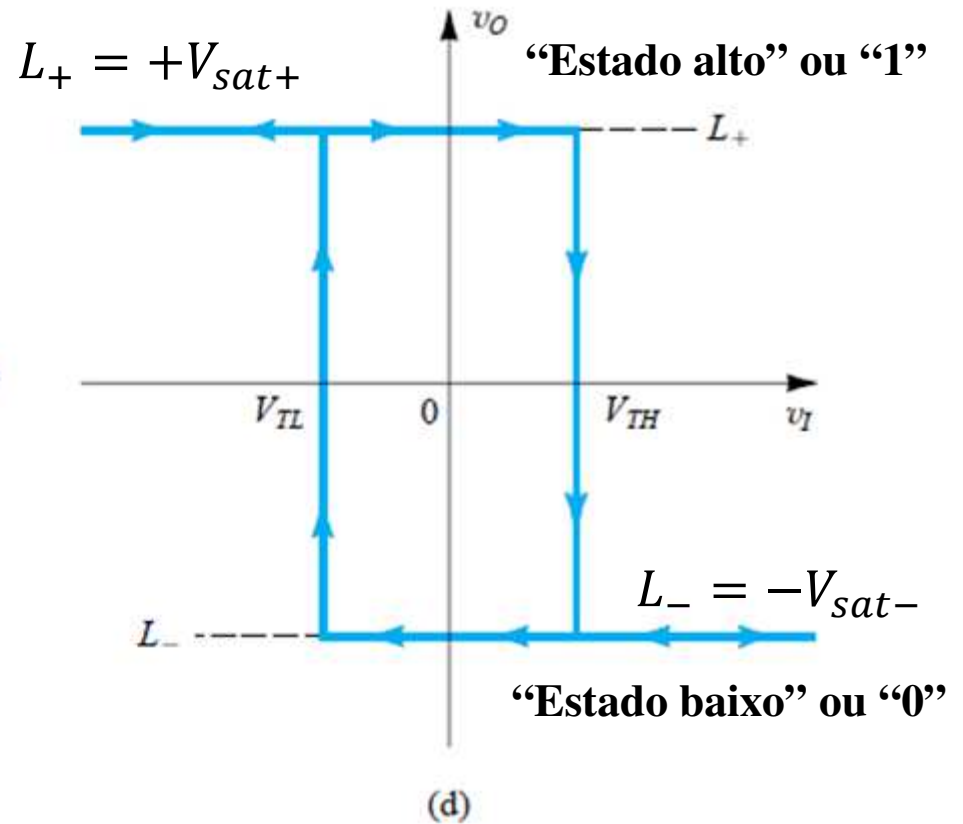
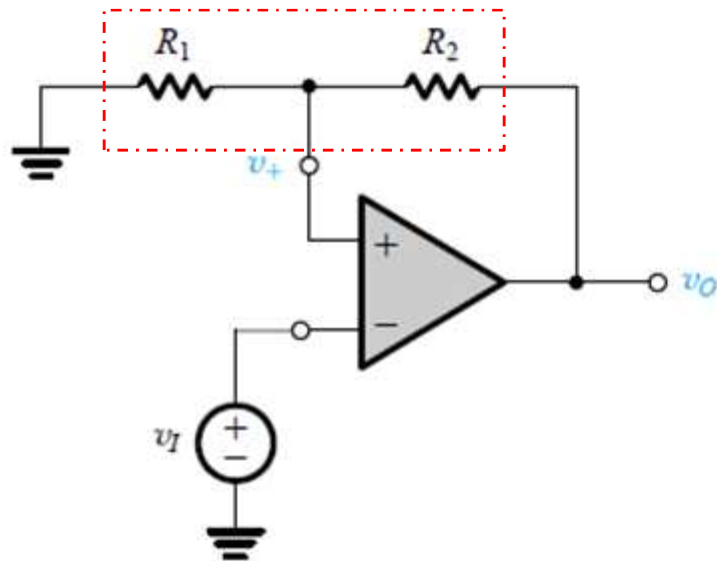
Em muitas aplicações de detecção de nível (por exemplo, detetor de zero) é útil dispor de um comparador com histerese. Desta forma evitam-se disparos/ transições indevidas devido a interferências indesejáveis.

A **histerese** é a tendência que certos [sistemas](#) têm de preservar suas propriedades.

A Histerese pode ser utilizada para filtrar sinais de forma que a saída reaja de maneira retardada à história desse sinal.

Comparador “Schmitt trigger” comparador com histerese

Malha de realimentação positiva



$$L_- = -V_{sat-}$$

$$L_+ = +V_{sat+}$$

(a)

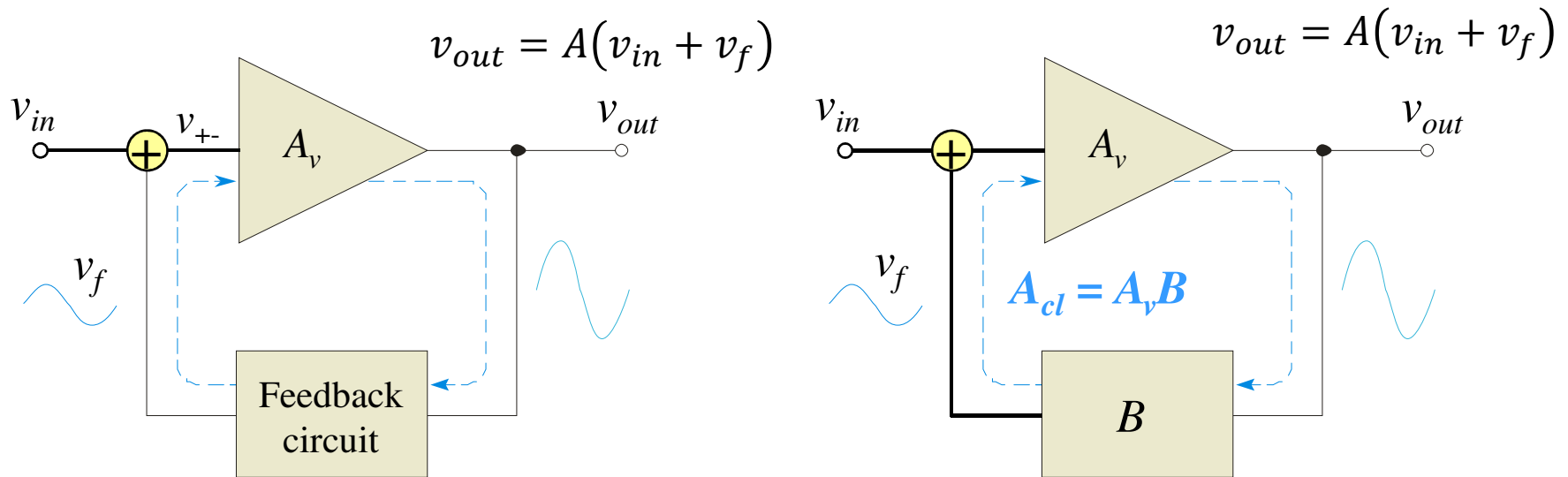
(d)

Este circuito comparador muda de estado a diferentes valores de v_I , dependendo de v_I estar a aumentar ou a diminuir. A comutação entre os estado L_+ e L_- depende do *passado* do sinal. Diz-se que o **circuito apresenta histerese**.

Realimentação positiva

(feedback positivo)

A realimentação num amplificador consiste em reintroduzir uma parte do sinal de saída na entrada. Dependendo da(s) malha(s) exterior(es), a realimentação pode reforçar o sinal de entrada, ou contrariá-lo. A realimentação positiva corresponde a um reforço do sinal de entrada pela saída.



A_v = ganho em malha aberta/sem realimentação

$A_{cl,f}$ = ganho em malha fechada/com realimentação

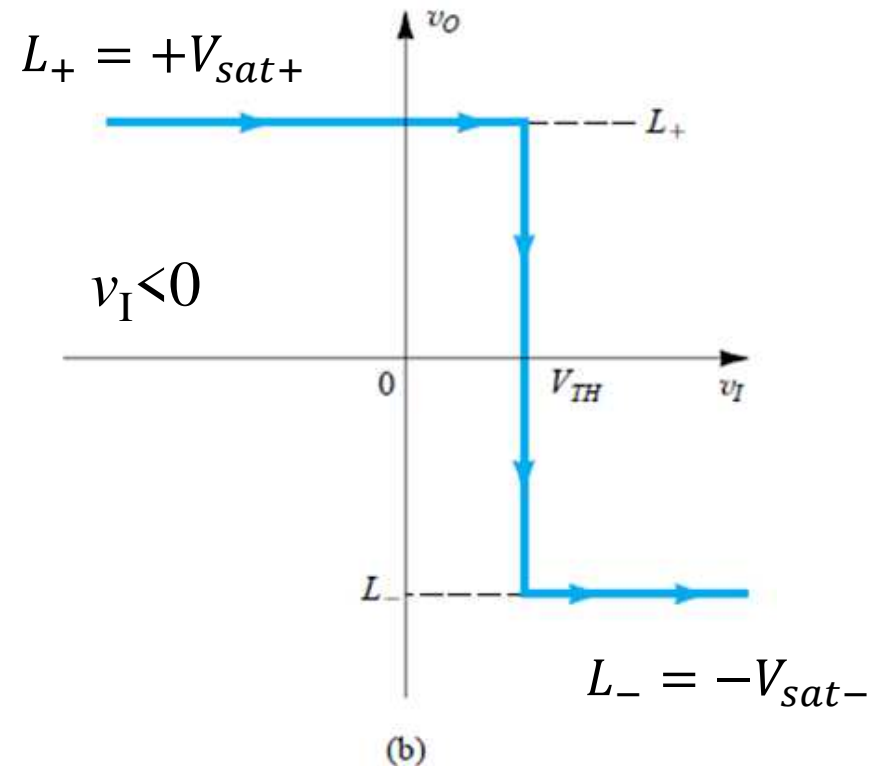
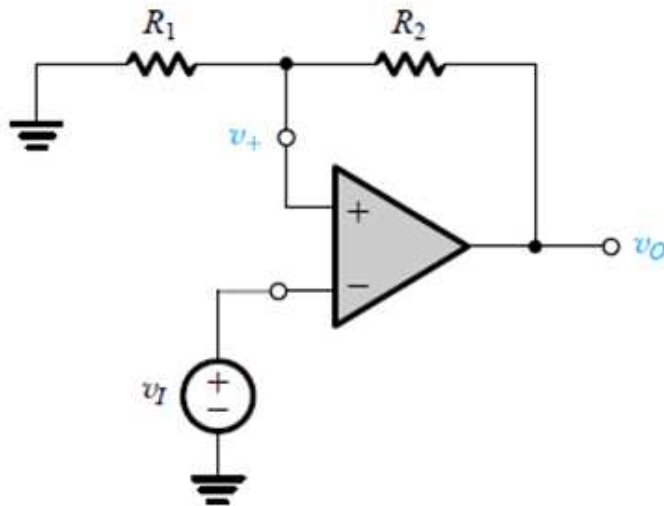
B = factor de realimentação

$$v_{out} = A_v(v_{in} + v_f) = A_v(v_{in} + Bv_{out})$$

$$v_{out} = \frac{A_v}{1 - BA_v} v_{in} = A_{cl} v_{in} \equiv A_f v_{in}$$

Comparador “Schmitt trigger”

Consideremos v_I negativa ($|v_I| > |v_0|/A$): tem-se $v_0 = V_{sat+} = L_+$ e $v_+ = V_{TH} = V_{sat+} R_1 / (R_1 + R_2)$. Se agora aumentarmos progressivamente v_I obtemos a função de transferência do circuito representada abaixo: a tensão v_0 muda de $v_0 = V_{sat+} = L_+$ para $v_0 = V_{sat-} = L_-$ quando v_I fica superior a $V_{TH} = V_{sat+} R_1 / (R_1 + R_2)$. Notar que, em consequência, a v_+ passa a valer $v_+ = V_{LH} = -V_{sat-} R_1 / (R_1 + R_2)$.

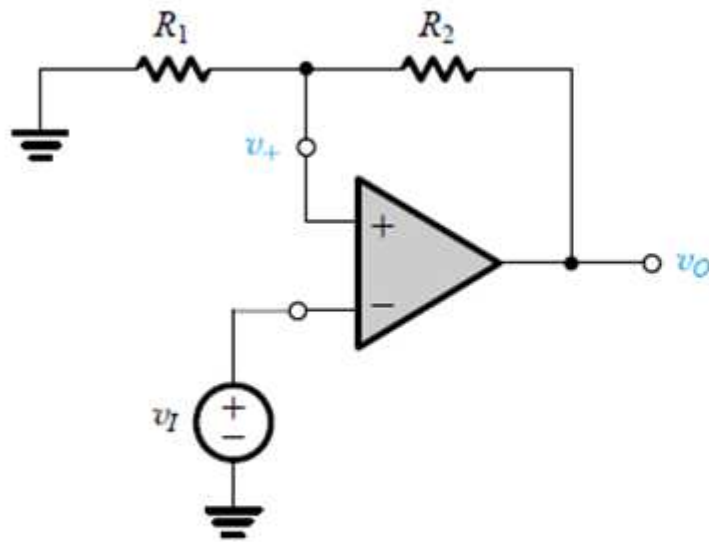


$L_- = -V_{sat-}$ estado baixo ou “0”

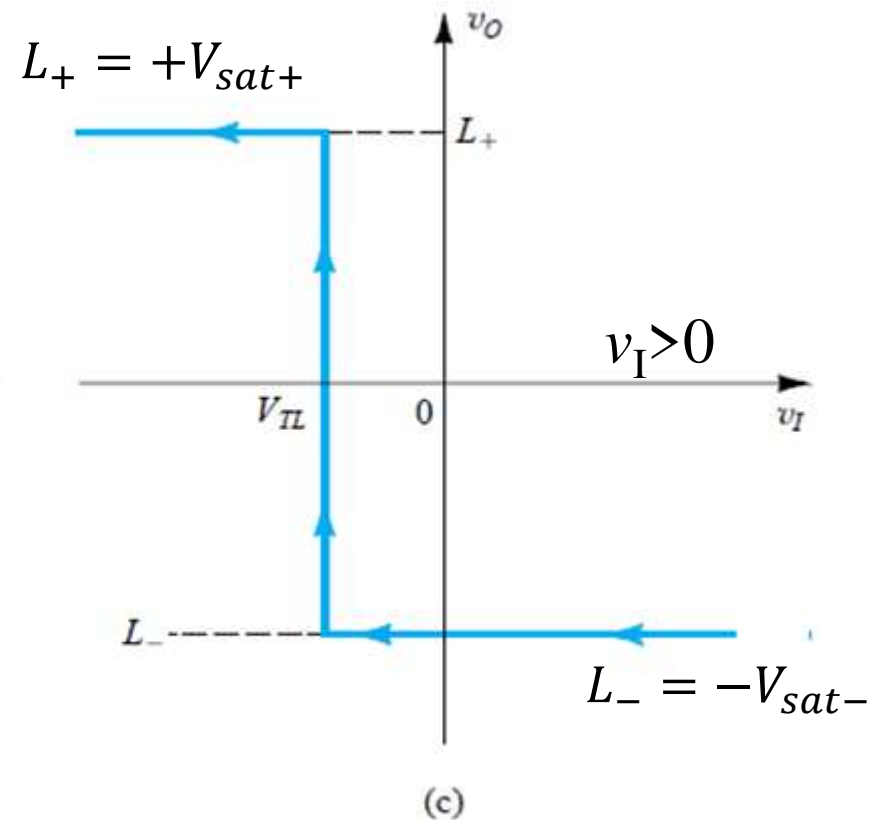
$L_+ = +V_{sat+}$ estado alto ou “1”

Comparador “Schmitt trigger”

Consideremos agora v_I positiva ($|v_I| > |v_0|/A$): tem-se $v_0 = -V_{sat-} = L_-$ e $v_- = V_{LH} = -V_{sat-} R_1/(R_1+R_2)$. Se agora diminuirmos progressivamente v_I obtemos a função de transferência do circuito representada abaixo: a tensão v_0 muda de $v_0 = -V_{sat-} = L_-$ para $v_0 = +V_{sat+} = L_+$ quando v_I fica inferior a $V_{TH} = -V_{sat-} R_1/(R_1+R_2)$. Notar que, em consequência, v_+ passa a valer $v_+ = V_{TH} = V_{sat+} R_1/(R_1+R_2)$.

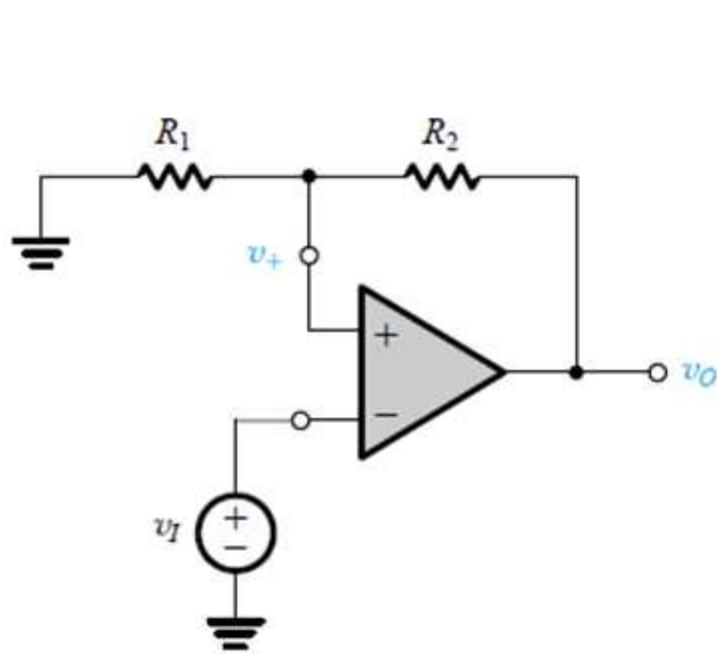


(a)

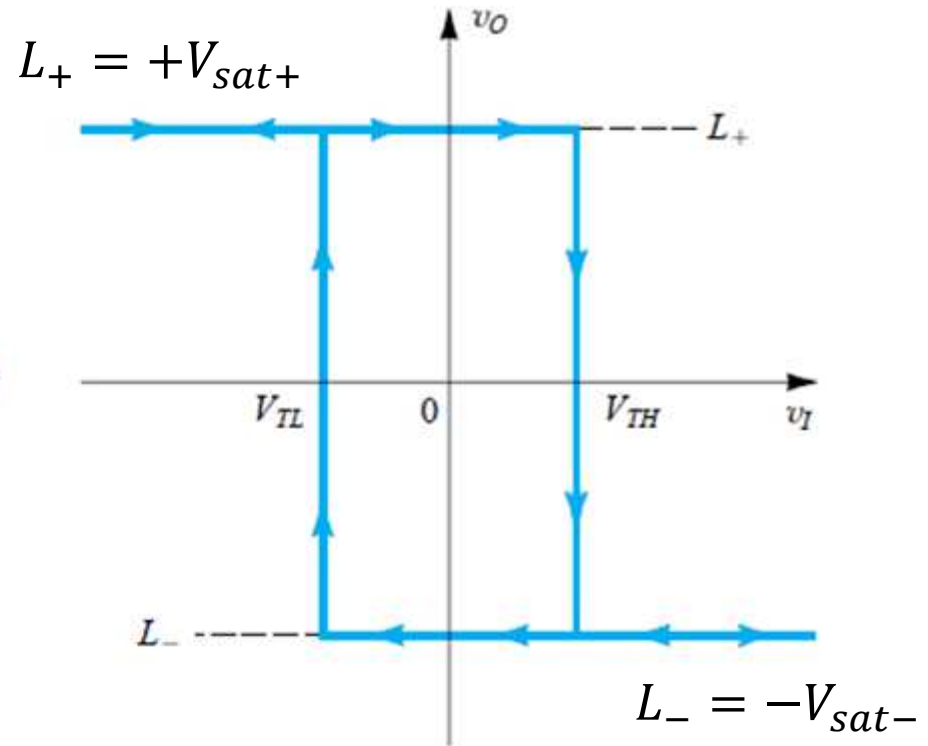


(c)

Comparador “Schmitt trigger”



(a)



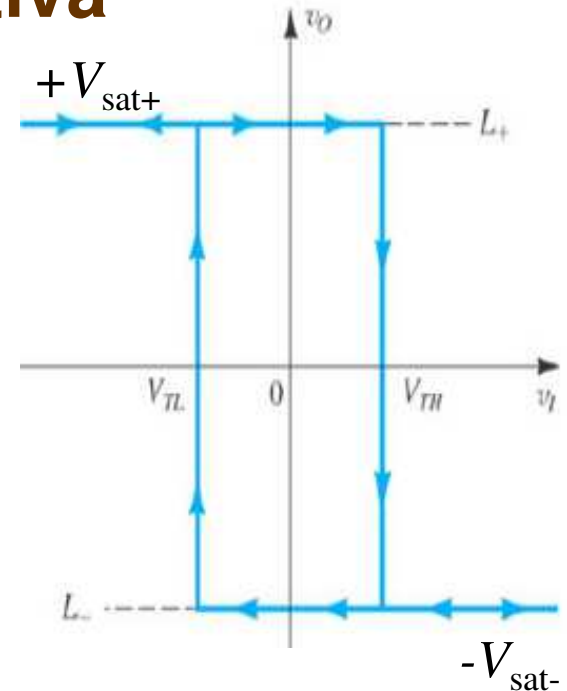
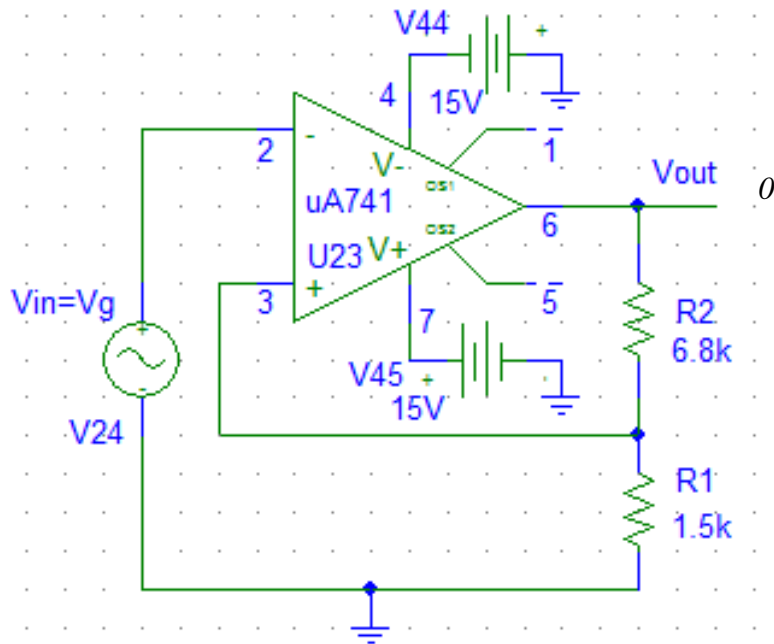
(d)

O circuito comparador muda de estado a diferentes valores de v_I , dependendo de v_I estar a aumentar ou a diminuir. Diz-se que o **circuito apresenta histerese**.

A **largura da janela de histerese** é a diferença entre V_{TH} e V_{LH} :

$$LH = R_1 / (R_1 + R_2) (V_{sat+} - V_{sat-})$$

Circuito comparador (inversor) com retroação positiva



— Inicialmente assumimos que: $v_0 = +V_{sat+}$

Portanto $v_+ = V_{sat-} R_1 / (R_1 + R_2)$

Quando v_I tende para e ultrapassa $v_+ = V_{sat-} R_1 / (R_1 + R_2)$,

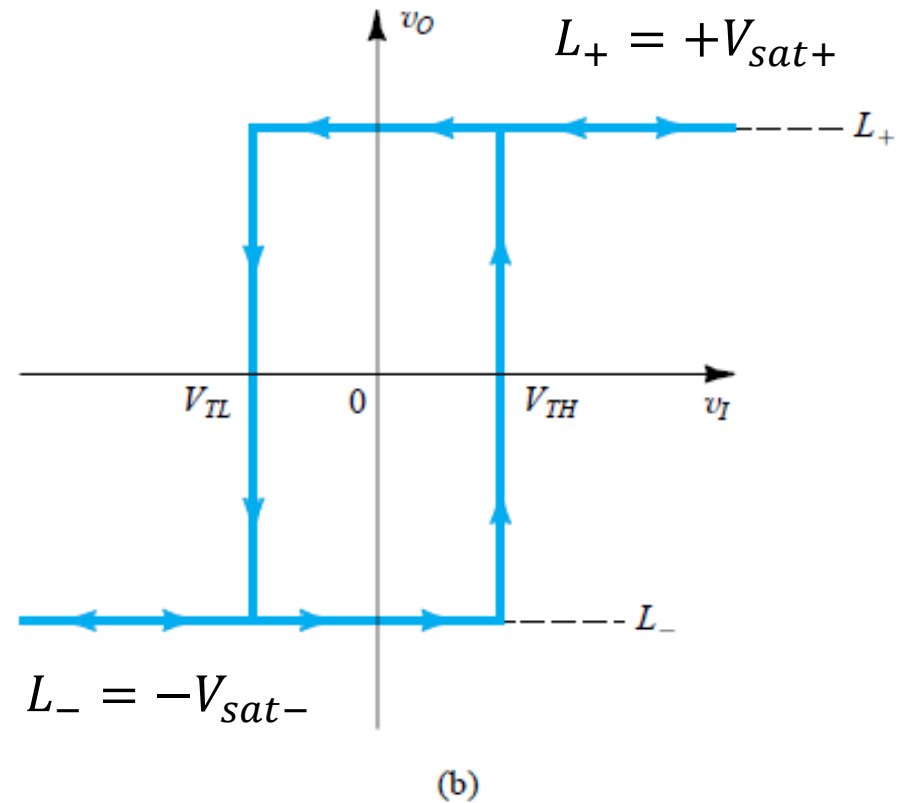
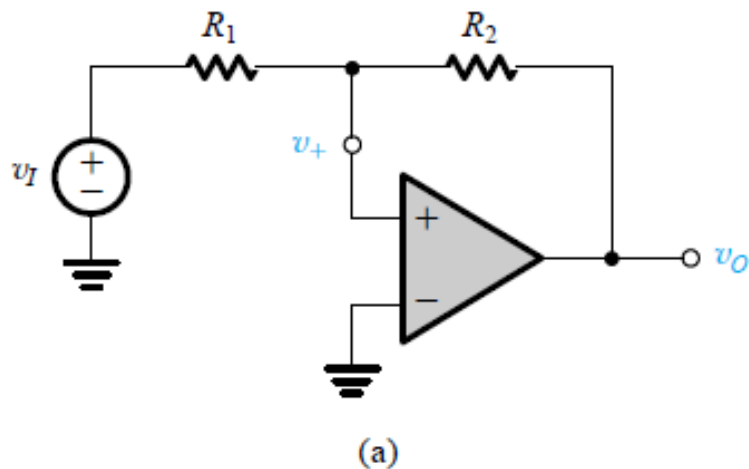
a saída tende para $v_0 = -V_{sat-}$ e $v_+ = -V_{sat-} R_1 / (R_1 + R_2)$.

Histerese: $V_{sat} = R_1 / (R_1 + R_2) (V_{sat+} - V_{sat-})$.

Comparador “Schmitt trigger” não-inversor

Aplicando o princípio da sobreposição:

$$v_+ = v_I \frac{R_2}{R_1 + R_2} + v_O \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$



$$V_{TL} = -L_+(R_1/R_2) \quad V_{TH} = -L_-(R_1/R_2)$$

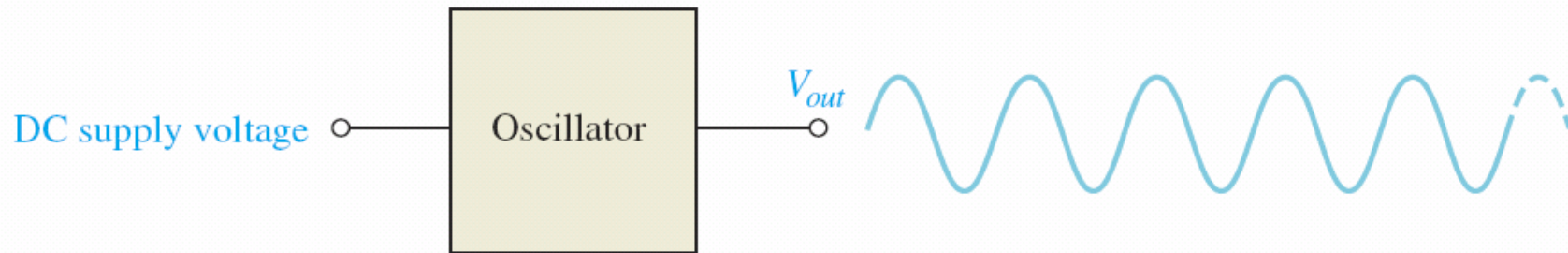
Circuitos não lineares e geradores de funções

Osciladores

(ver também guia do trabalho 10)

Conceitos básicos de um oscilador sinusoidal

An oscillator is a circuit that generates a repetitive waveform on its output. A feedback oscillator uses positive feedback from the output to sustain oscillations.

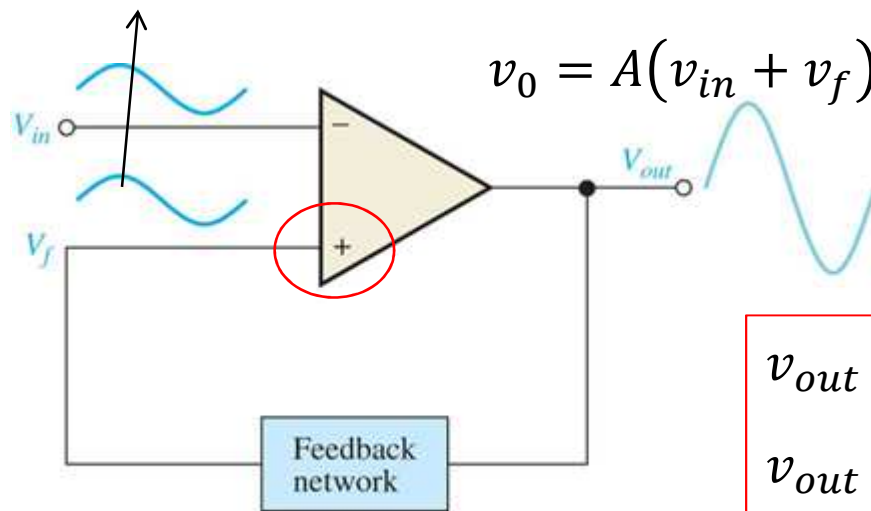


The basic oscillator concept showing a sinusoidal output waveform.

FIGURE 17-52

AmpOp com realimentação/retroação positiva (feedback positivo)

Sinais em fase



“Sinais em fase”

$$v_{out} = A_v(v_{in} + v_f) = A_v(v_{in} + Bv_{out})$$

$$v_{out} = \frac{A_v}{1 - BA_v} v_{in} = A_{cl} v_{in} \equiv A_f v_{in}$$

B = factor de realimentação ou feedback

$$A_f = A_{cl} = \frac{A_v}{1 - BA_v}$$

Casos de interesse aqui: $|1 - \beta A_v| \leq 1$

Quando $BA=1$, o ganho torna-se infinito e um sinal não nulo é obtido com $V_{in}=0$, o circuito produz um sinal periódico (o circuito é um oscilador).

Conceitos básicos de um oscilador

An oscillator is a circuit that generates a repetitive waveform on its output. A feedback oscillator uses positive feedback from the output to sustain oscillations.

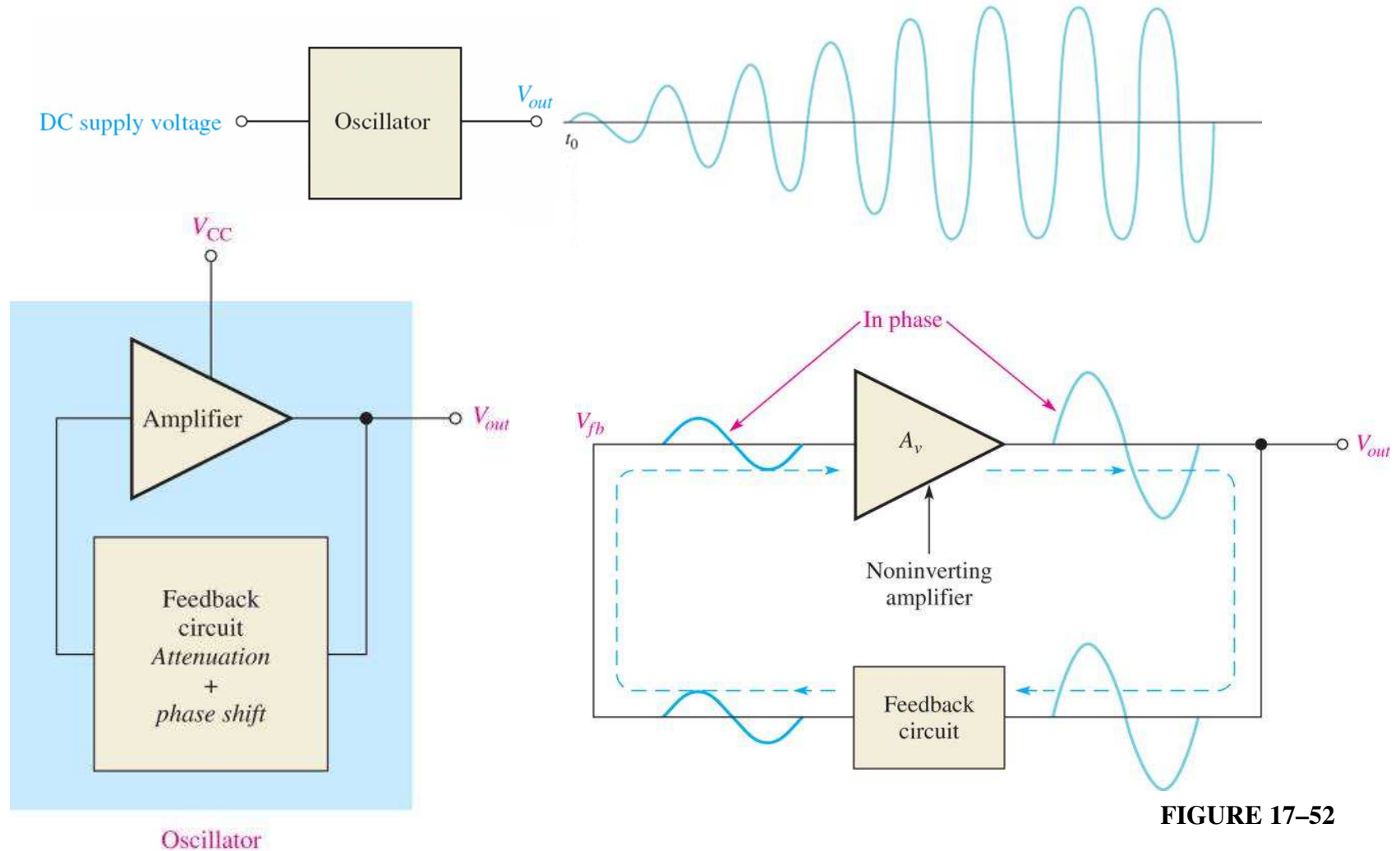


FIGURE 17-52

Condições para obter oscilação

When oscillation starts at t_0 , the condition $A_{cl} > 1$ causes the output voltage amplitude to build up to a desired level, where A_{cl} decreases to 1 and maintains the desired amplitude.

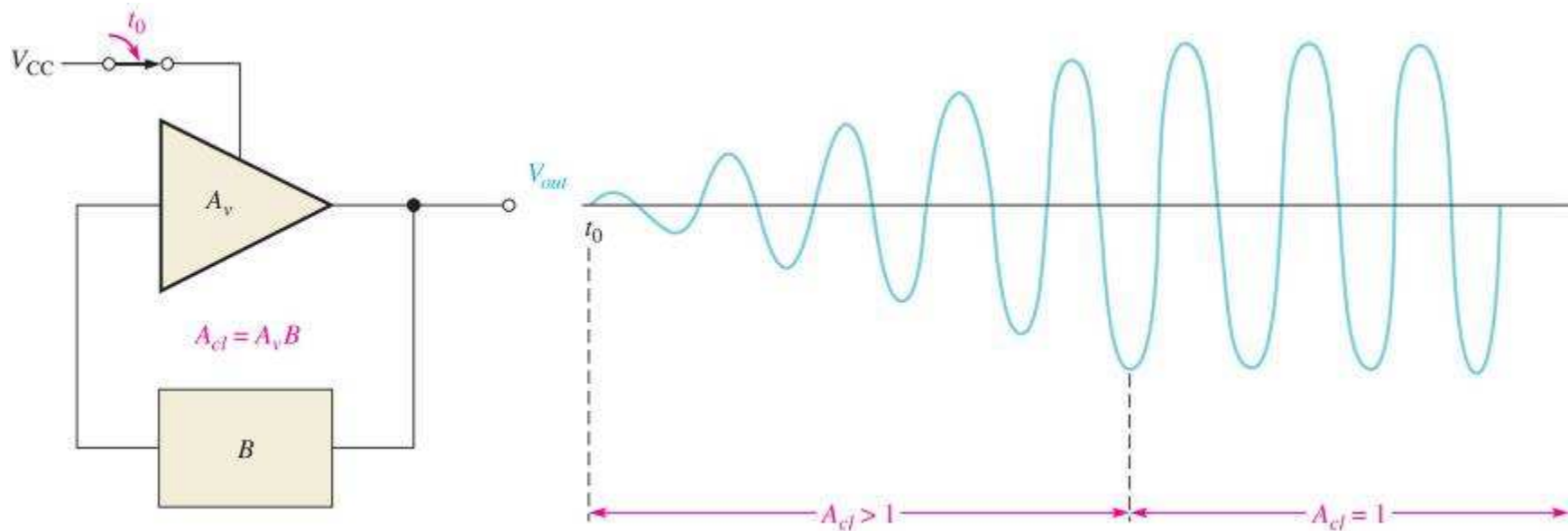


FIGURE 17-56

Osciladores - Critério de Barkhausen

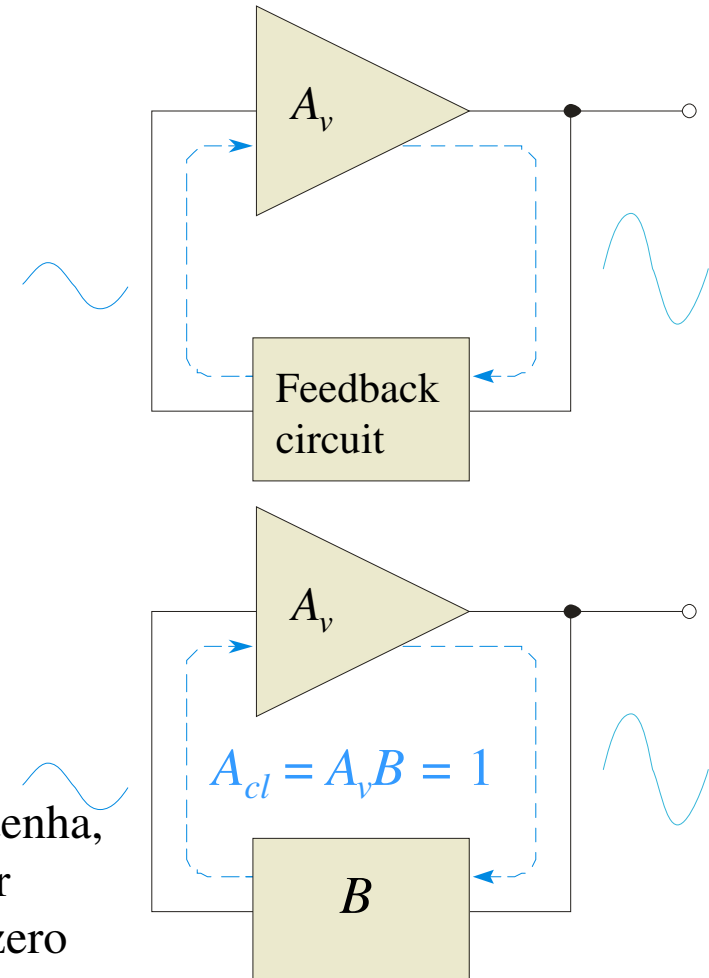
An oscillator is a circuit that generates a repetitive waveform on its output. A feedback oscillator uses positive feedback from the output to sustain oscillations.

Feedback oscillators

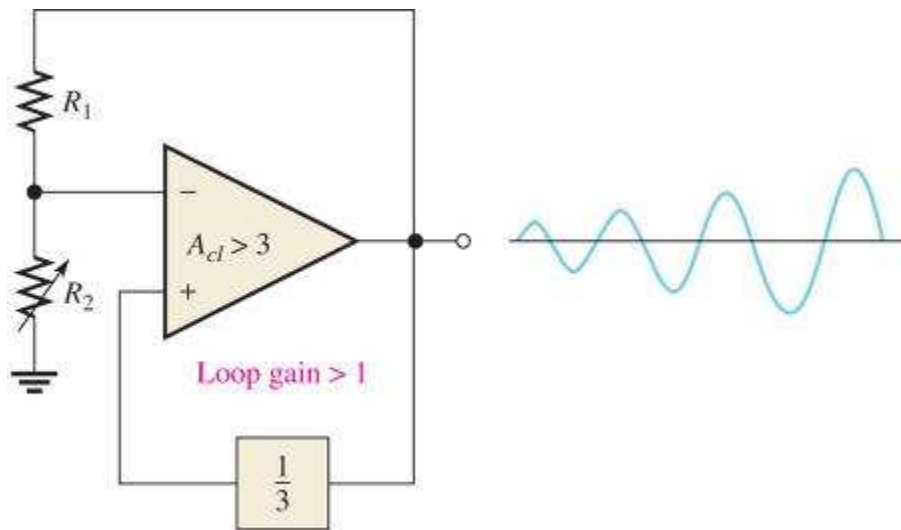
Conditions for oscillations are

1. The phase shift around the loop must be 0° .
2. The closed loop gain must be 1 (**unity gain**).

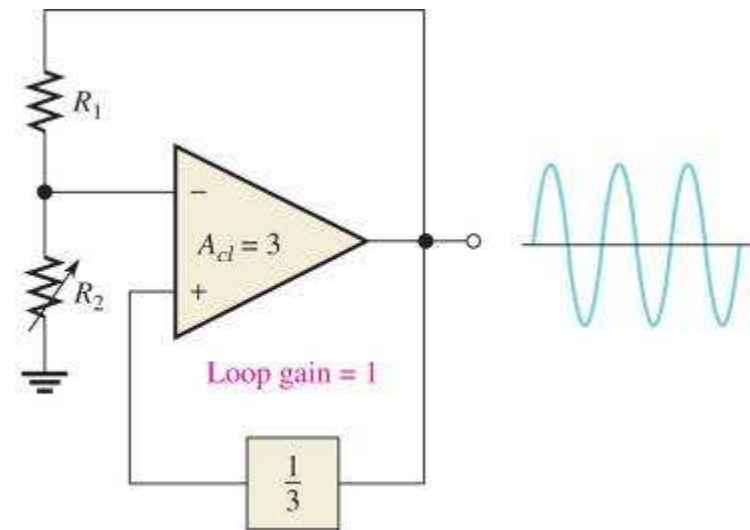
Critério de Barkhausen: para que a oscilação se mantenha, o módulo do ganho da malha de realimentação deve ser igual à unidade, e dd fase entre $v_+ - v_-$ e v_f deve ser zero ou um multiplo inteiro de 2π .



Estado transitório e estado estacionário



(a) Initially, loop gain greater than 1 causes output to build up.



(b) Loop gain of 1 causes a sustained constant output.

FIGURE 19–25

Condições para obter oscilação sinusoidal

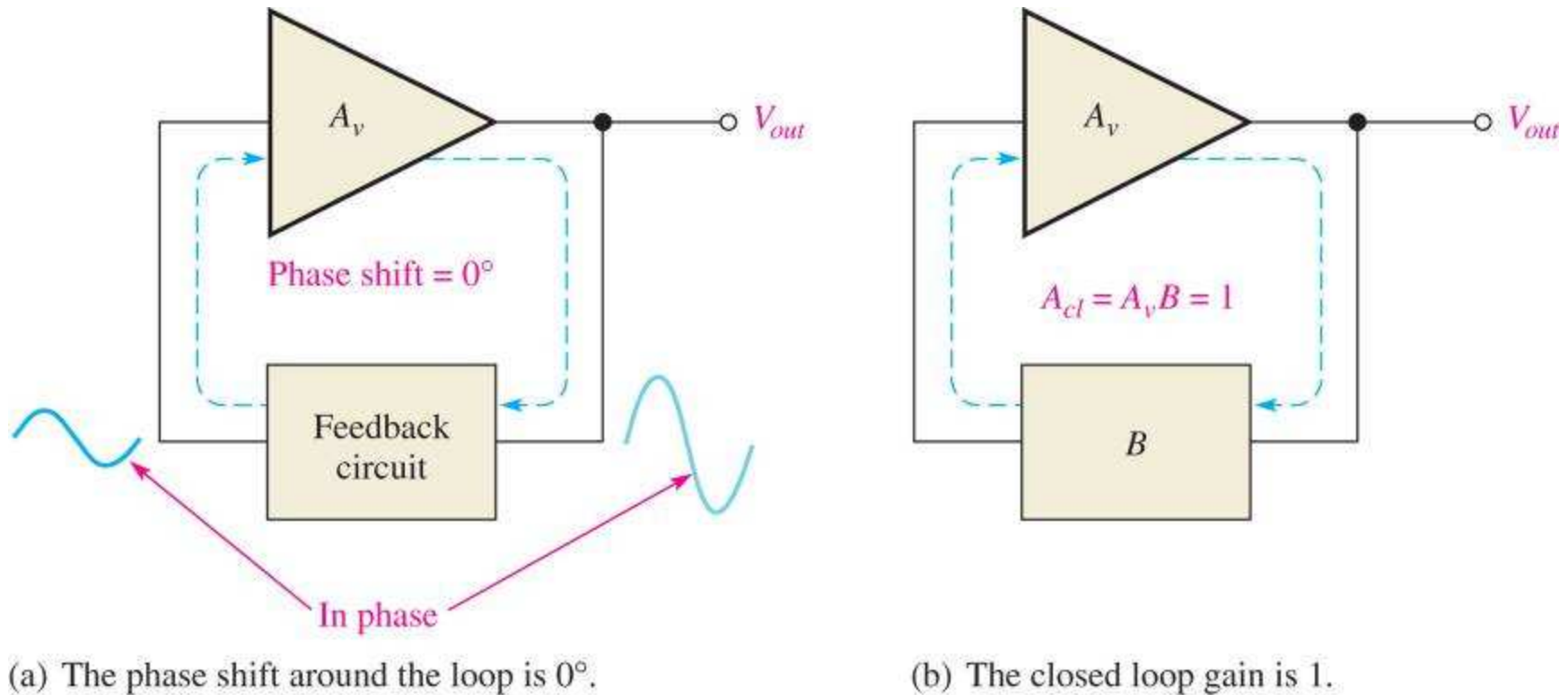
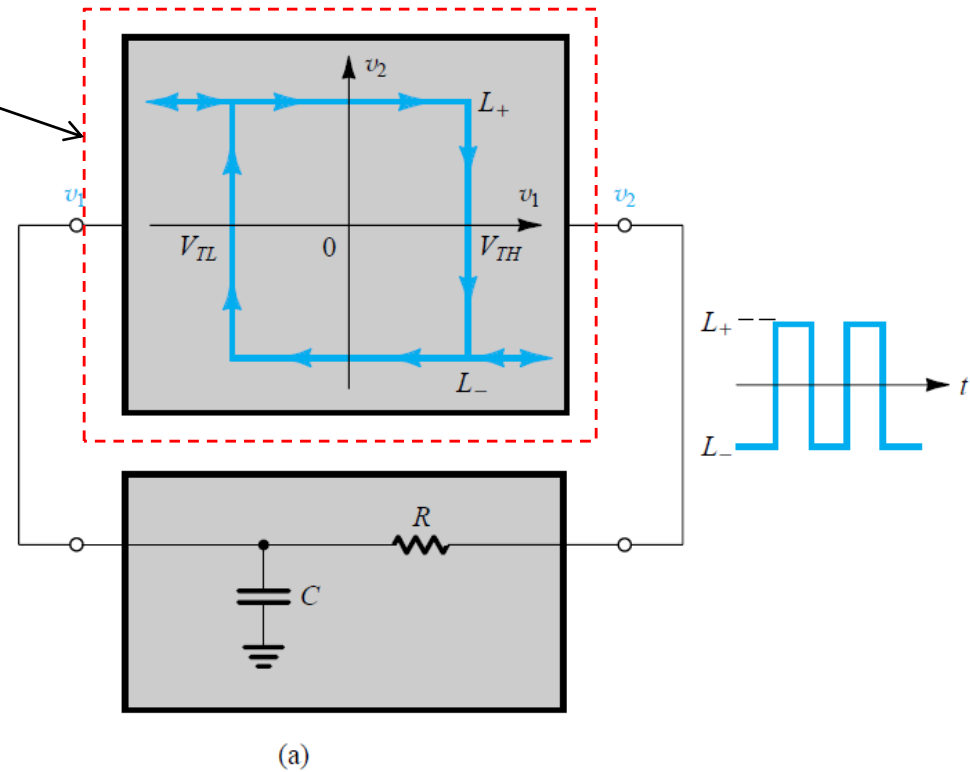
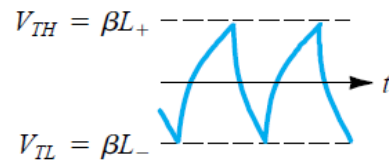
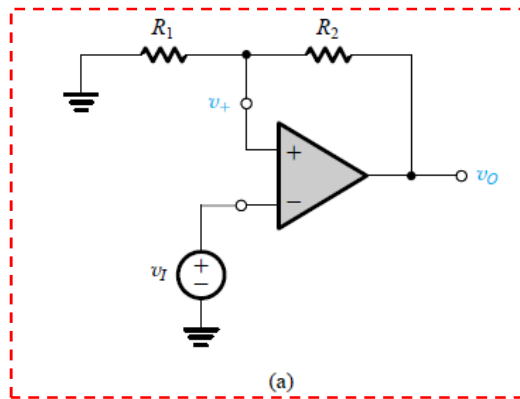


FIGURE 17-55

Gerador em relaxação de onda quadrada

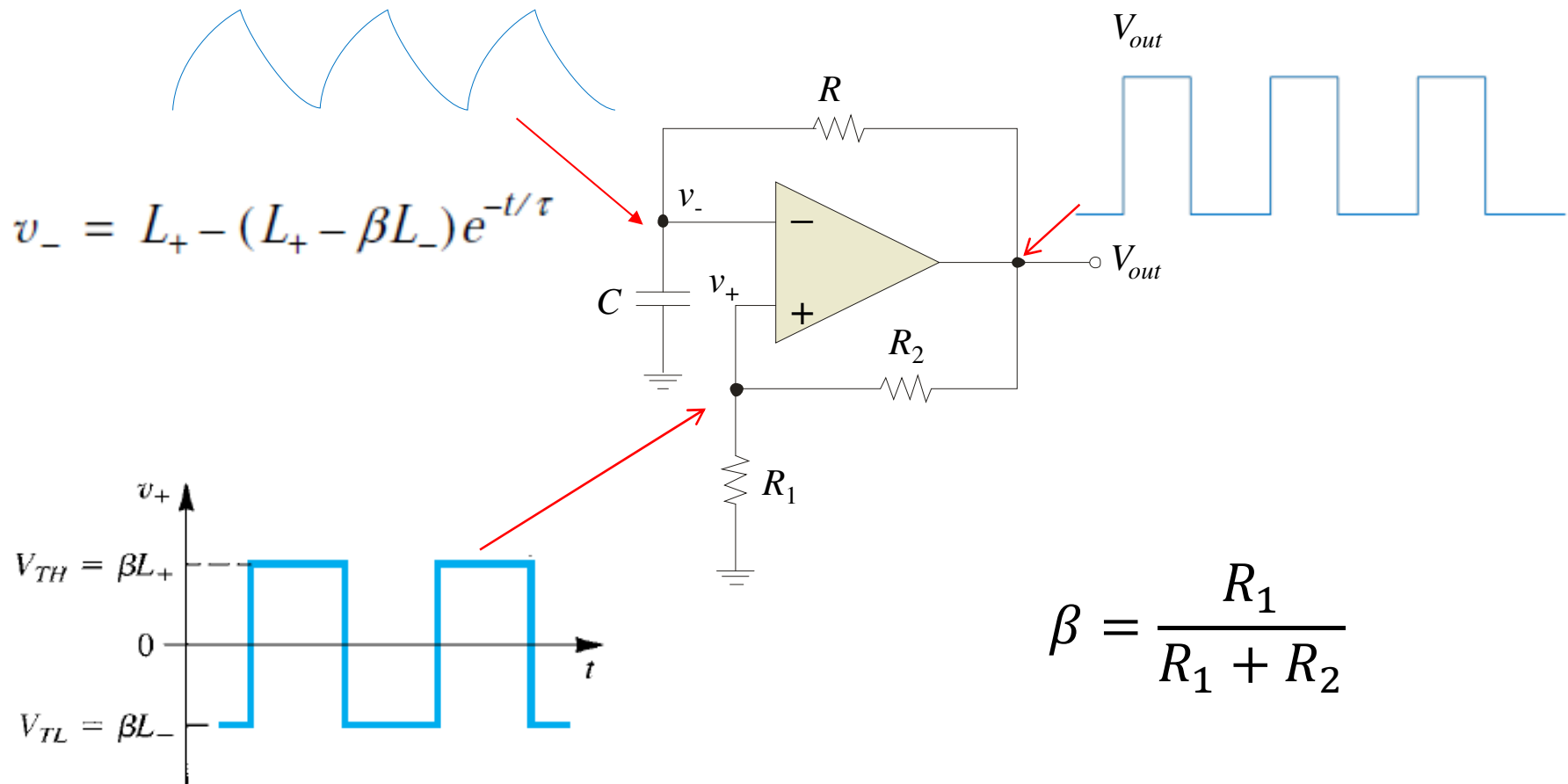


$$v(t) = V_{\infty} - (V_{\infty} - V_{0+}) e^{-t/\tau}$$

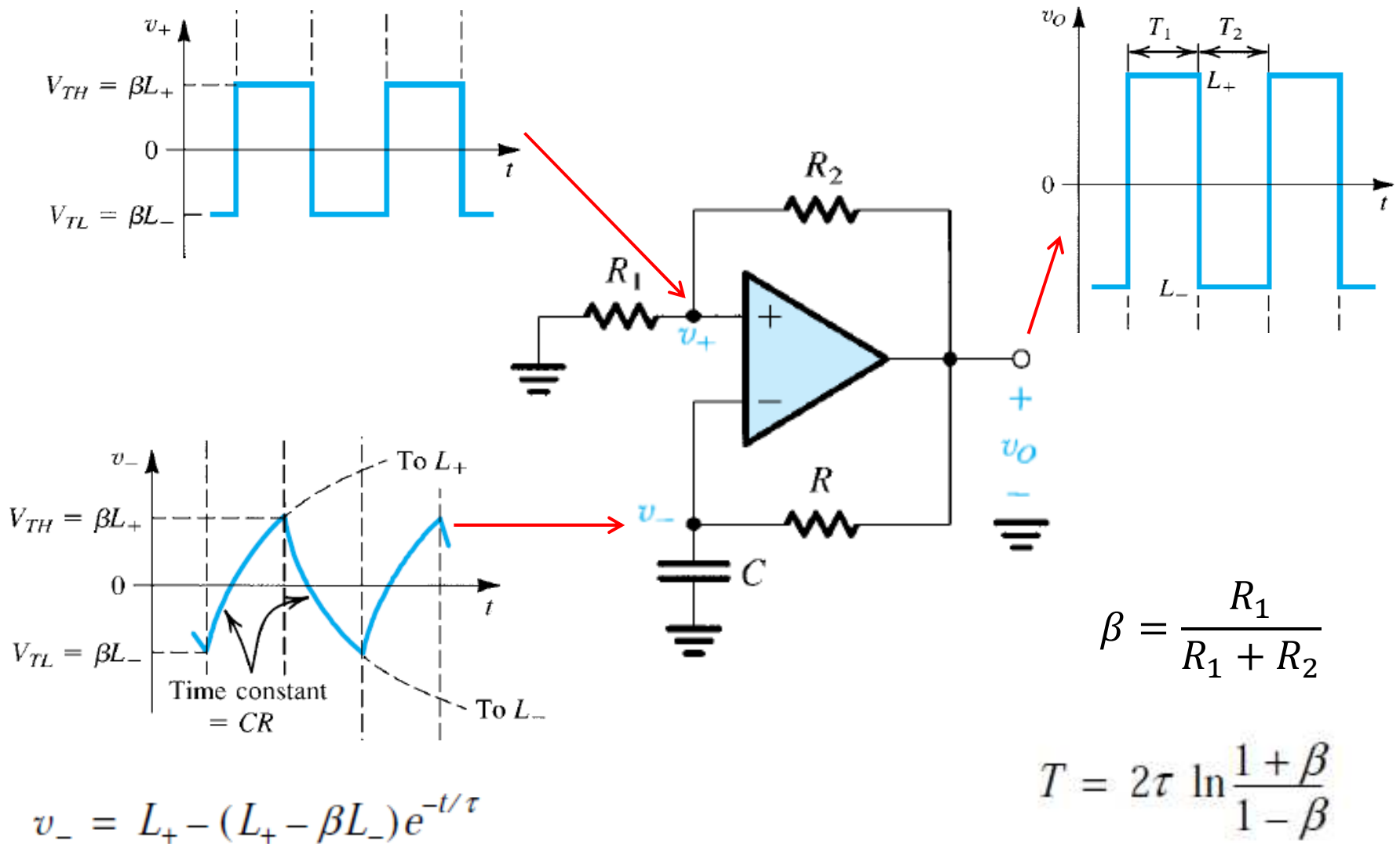
$$v_0 = A(v_+ - v_-)$$

Gerador em relaxação de onda quadrada

The square-wave relaxation oscillator uses a comparator to switch the output based on the charging and discharging of a capacitor.

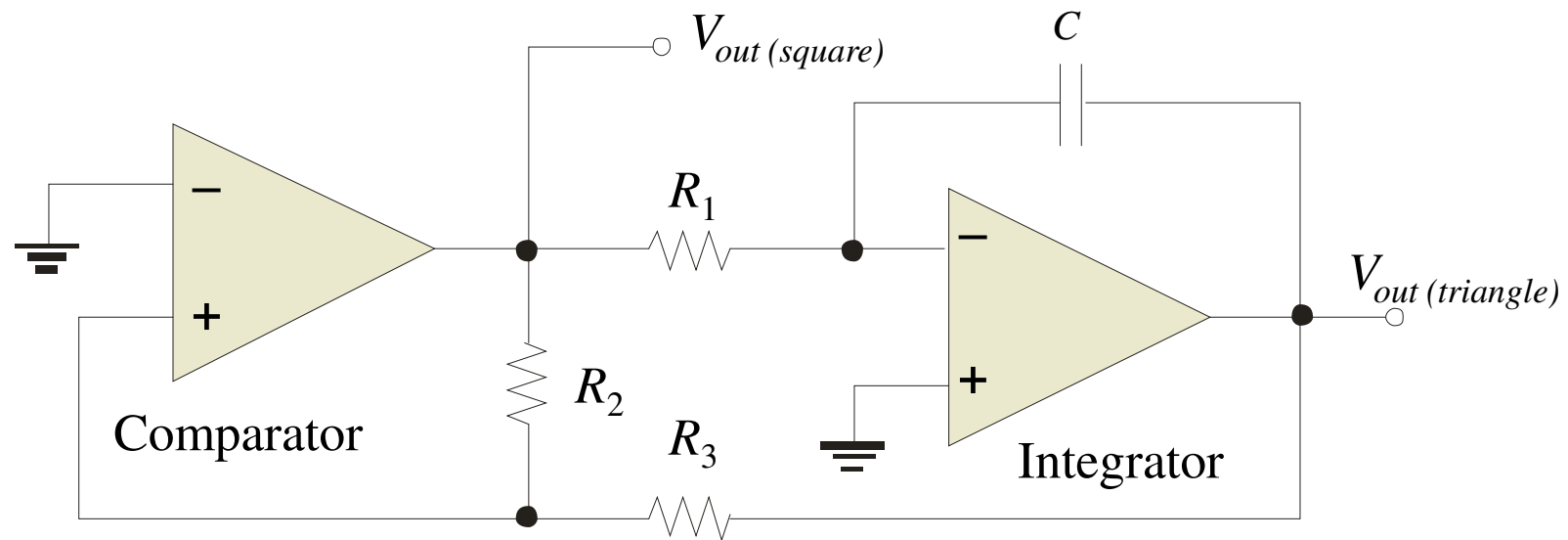


Gerador em relaxação de onda quadrada



Gerador de onda triangular

A triangular-wave oscillator can be made from a comparator and an integrator. The integrator produces a ramp due to the constant current charging of the capacitor. When the ramp reaches a trip point, the comparator suddenly switches to opposite level and the ramp changes direction.



Oscilador de onda quadrada com dois AmpOPs

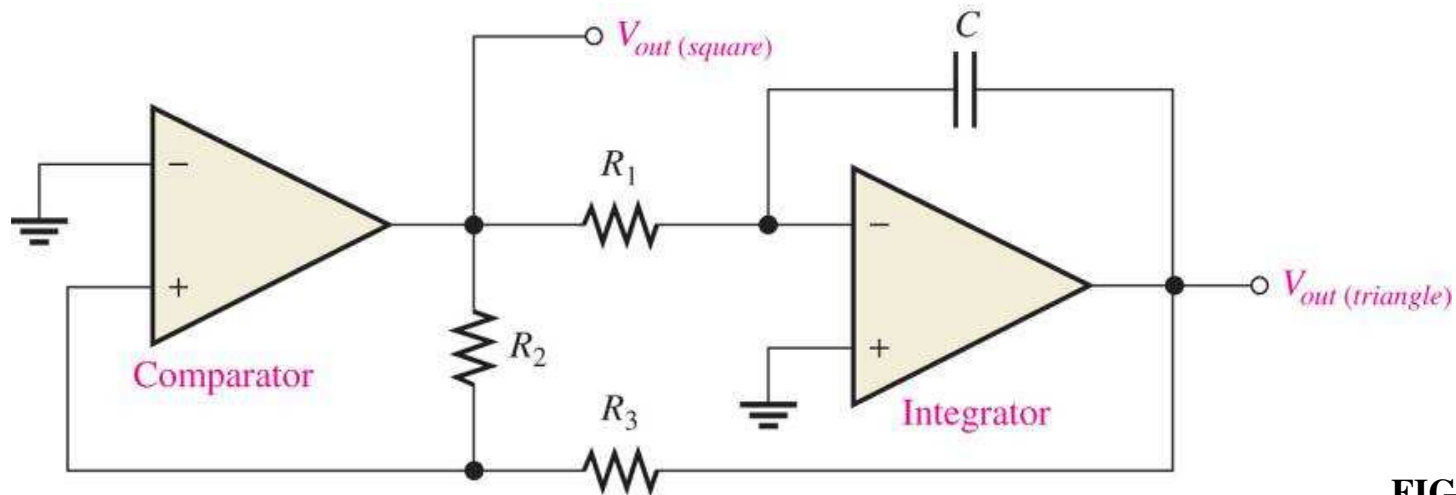


FIGURE 19–28

Waveforms for the circuit

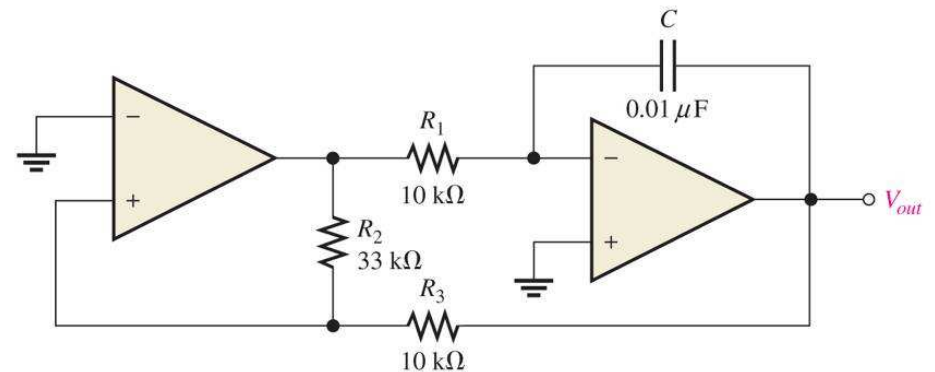
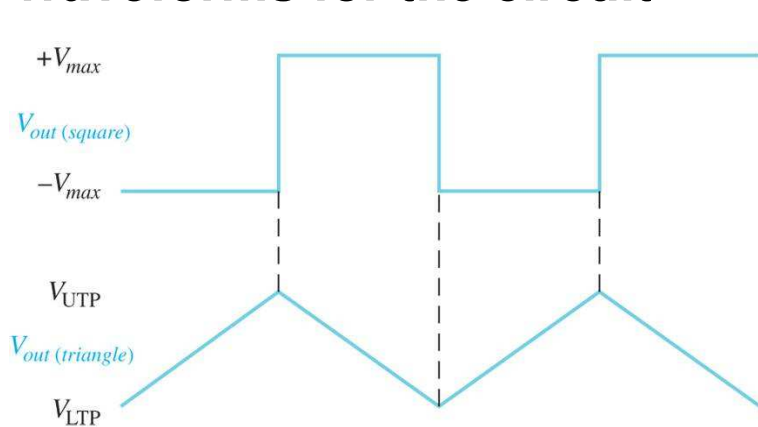
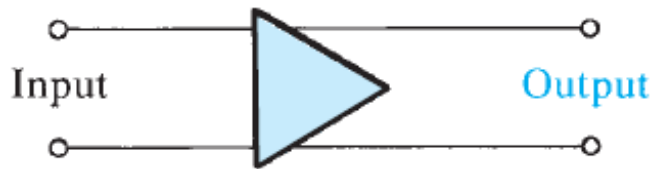


FIGURE 19–29

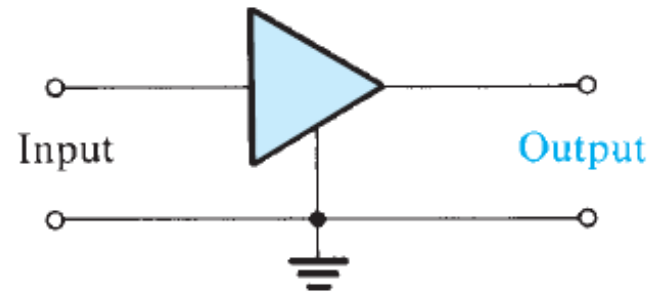
Amplificadores

Revisão/clarificação de conceitos

Circuito amplificador



(a)



(b)

Figure 1.11 (a) Circuit symbol for amplifier. (b) An amplifier with a common terminal (ground) between the input and output ports.

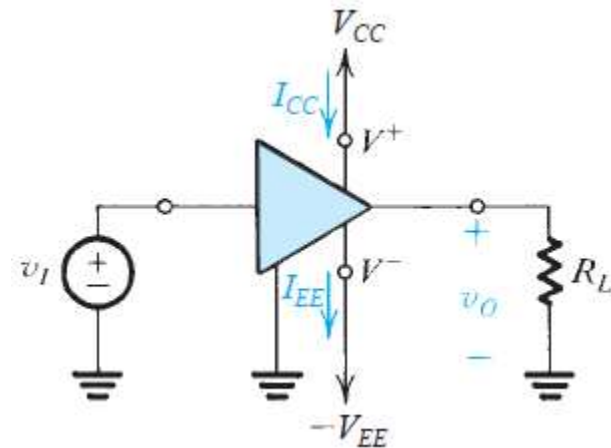
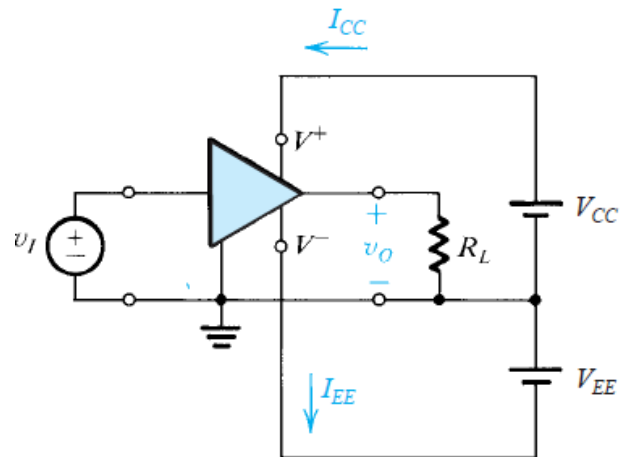


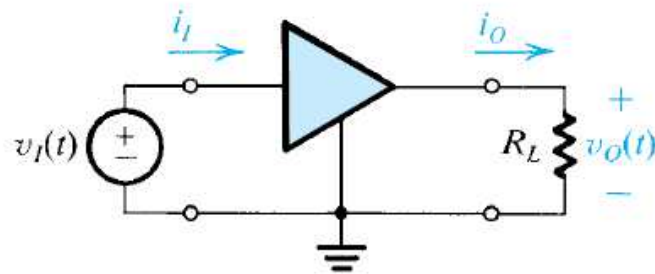
Figure 1.13 An amplifier that requires two dc supplies (shown as batteries) for operation.

Ganho em tensão, em corrente e em potência de um amplificador

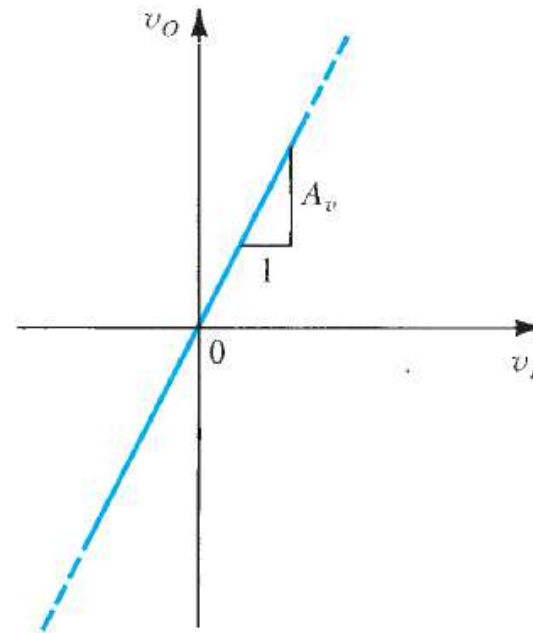
$$\text{Voltage gain } (A_v) \equiv \frac{v_O}{v_I} \quad \text{Power gain } (A_p) \equiv \frac{\text{load power } (P_L)}{\text{input power } (P_I)} \quad (1.6)$$

$$\text{Current gain } (A_i) \equiv \frac{i_O}{i_I} = \frac{v_O i_O}{v_I i_I} \quad (1.7)$$

$$A_p = A_v A_i$$



(a)



(b)

Figure 1.12 (a) A voltage amplifier fed with a signal $v_I(t)$ and connected to a load resistance R_L .
(b) Transfer characteristic of a linear voltage amplifier with voltage gain A_v .

Ganhos em dB e potencia fornecida pelas fontes de alimentação

$$\text{Voltage gain in decibels} = 20 \log |A_v| \quad \text{dB}$$

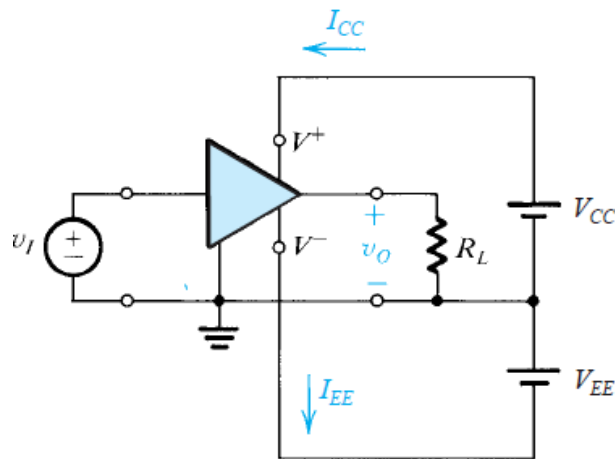
and the current gain A_i can be expressed as

$$\text{Current gain in decibels} = 20 \log |A_i| \quad \text{dB}$$

Since power is related to voltage (or current) squared, the power gain A_p can be expressed in decibels as

$$\text{Power gain in decibels} = 10 \log A_p \quad \text{dB}$$

Potencia fornecida pelas fontes e gerador



$$P_{dc} = V_{CC}I_{CC} + V_{EE}I_{EE}$$

$$P_{dc} + P_I = P_L + P_{\text{dissipated}}$$

$$\eta \equiv \frac{P_L}{P_{dc}} \times 100$$

Amplificador em saturação

$$\frac{L_-}{A_v} \leq v_I \leq \frac{L_+}{A_v}$$

$$i_C(t) = I_C + i_c(t)$$

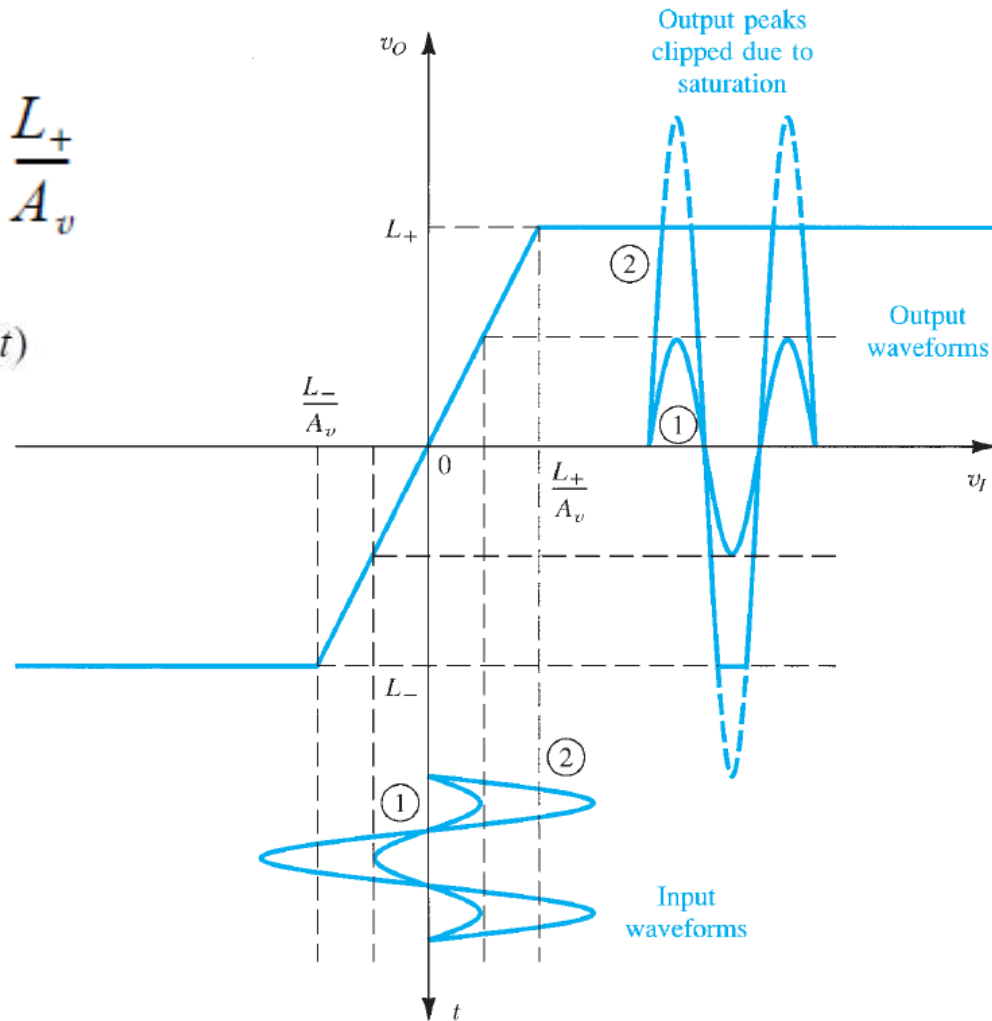
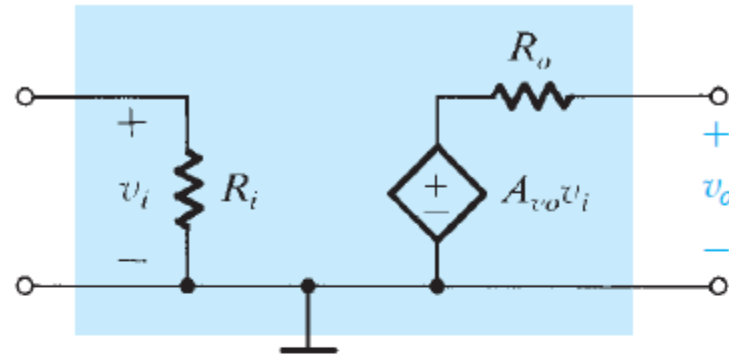
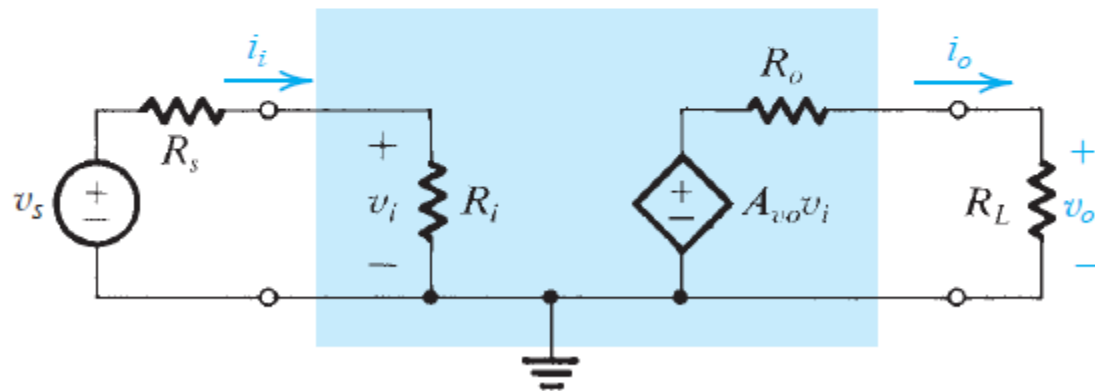


Figure 1.14 An amplifier transfer characteristic that is linear except for output saturation.

Modelos de pequeno sinal



(a)



(b)

$$v_o = A_{vo} v_i \frac{R_L}{R_L + R_o}$$

$$A_v \equiv \frac{v_o}{v_i} = A_{vo} \frac{R_L}{R_L + R_o}$$

$$v_i = v_s \frac{R_i}{R_i + R_s}$$

$$\frac{v_o}{v_s} = A_{vo} \frac{R_i}{R_i + R_s} \frac{R_L}{R_L + R_o}$$

Tipos de amplificadores

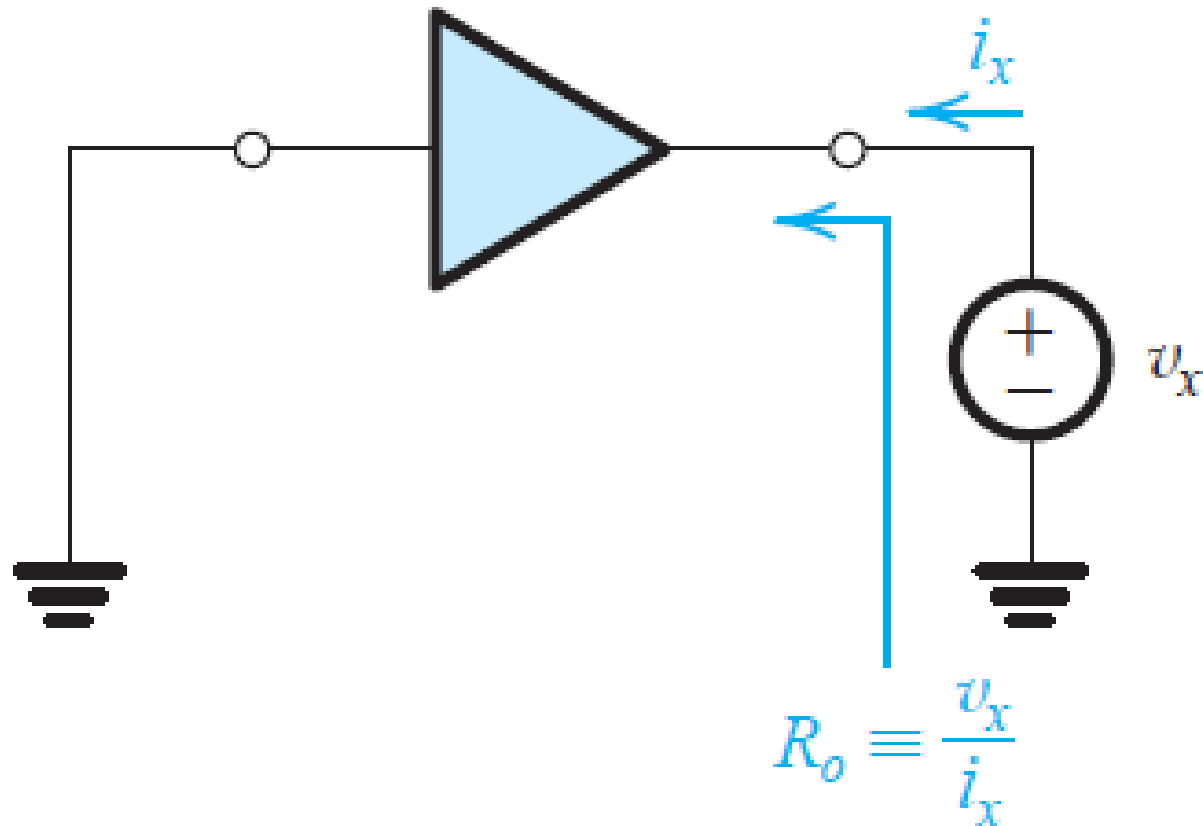
Table 1.1 The Four Amplifier Types			
Type	Circuit Model	Gain Parameter	Ideal Characteristics
Voltage Amplifier		Open-Circuit Voltage Gain $A_{vo} \equiv \left. \frac{v_o}{v_i} \right _{i_o=0} \quad (\text{V/V})$	$R_i = \infty$ $R_o = 0$
Current Amplifier		Short-Circuit Current Gain $A_{is} \equiv \left. \frac{i_o}{i_i} \right _{v_o=0} \quad (\text{A/A})$	$R_i = 0$ $R_o = \infty$
Transconductance Amplifier		Short-Circuit Transconductance $G_m \equiv \left. \frac{i_o}{v_i} \right _{v_o=0} \quad (\text{A/V})$	$R_i = \infty$ $R_o = \infty$
Transresistance Amplifier		Open-Circuit Transresistance $R_m \equiv \left. \frac{v_o}{i_i} \right _{i_o=0} \quad (\text{V/A})$	$R_i = 0$ $R_o = 0$

$$A_{vo} = A_{is} \left(\frac{R_o}{R_i} \right)$$

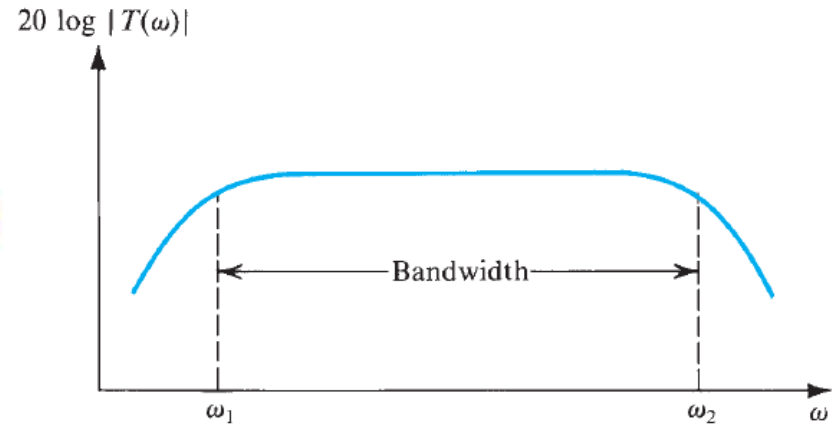
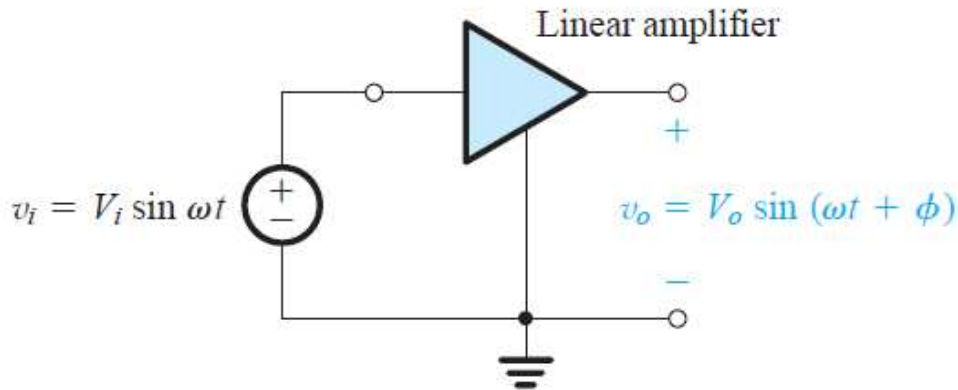
$$A_{vo} = G_m R_o$$

$$A_{vo} = \frac{R_m}{R_i}$$

Determinação da resistência de saída (R_o)



Resposta em frequência



$$T(\omega) = \frac{V_o(\omega)}{V_i(\omega)} \quad |T(\omega)| = \frac{V_o}{V_i}$$

$$\angle T(\omega) = \phi$$

A taxa de atraso (slew rate) do AmpOp limita a resposta em alta frequência das montagens: ver figuras abaixo

Resposta do amplificador seguidor a um sinal sinusoidal de alta frequência

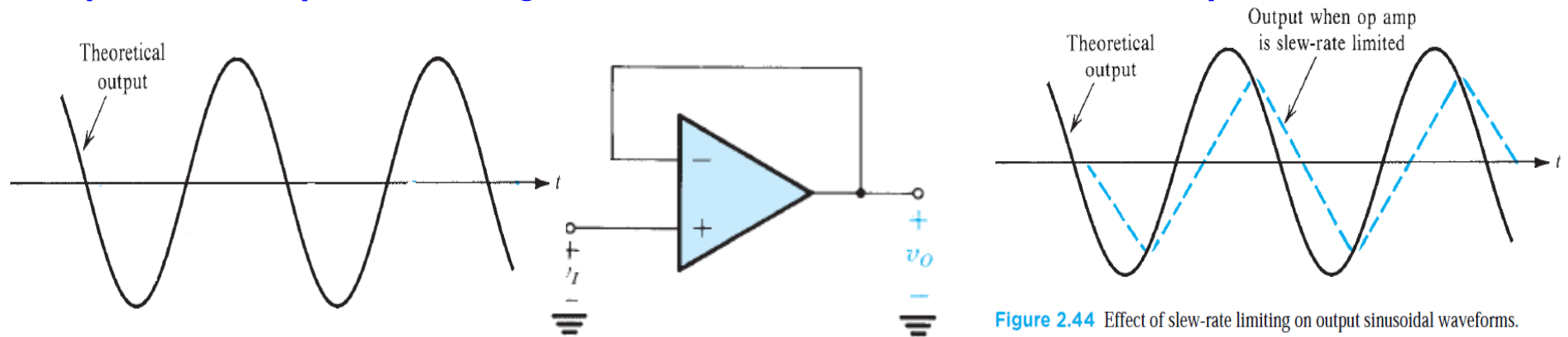
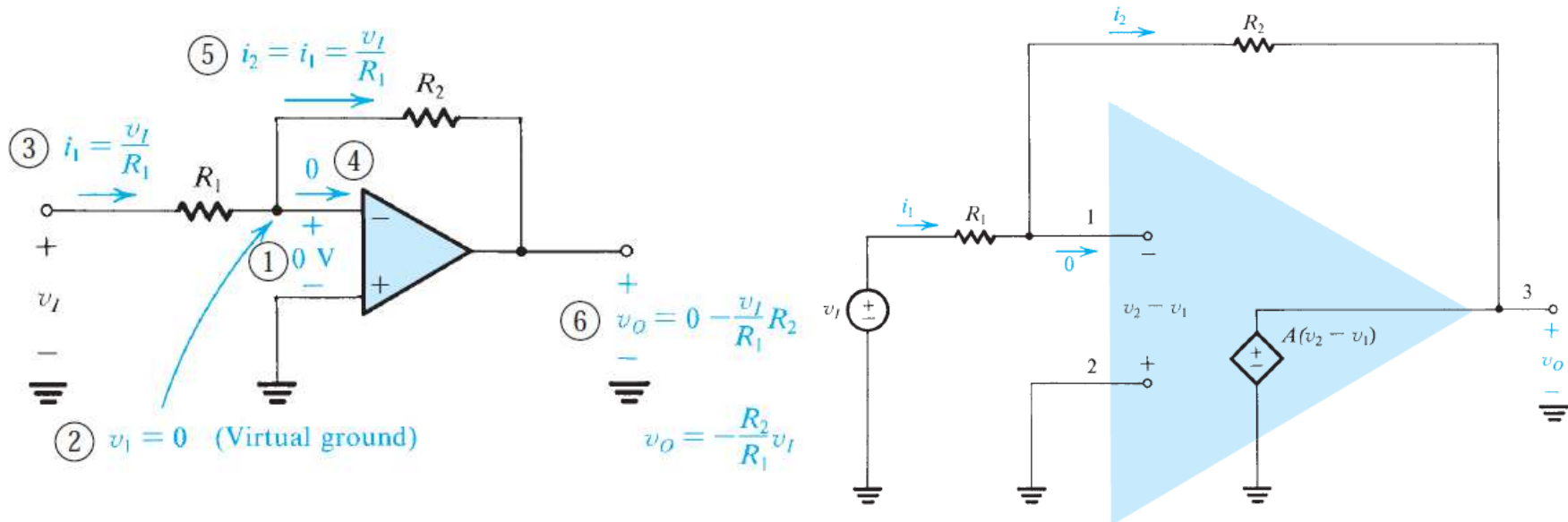


Figure 2.44 Effect of slew-rate limiting on output sinusoidal waveforms.

Amplificadores de transimpedância, de corrente e de transadmitância

Amplificador de tensão (montagem inversora simples)



Ganho em tensão: $A_{v,f} = -\frac{R_2}{R_1}$

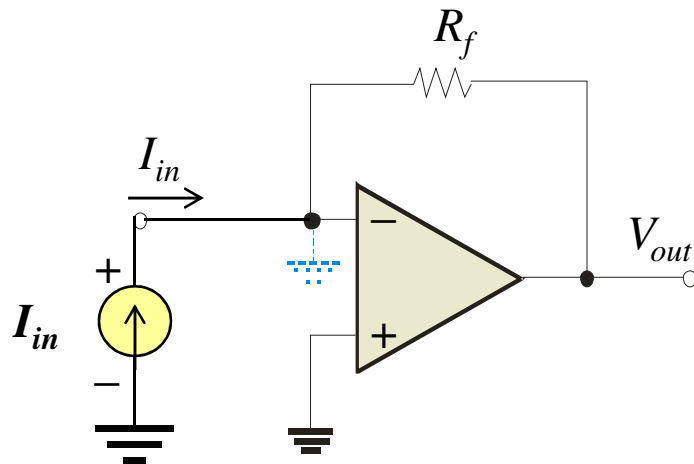
Resistência de entrada: $R_{if} = R_1$

Resistência de saída: $R_{of} = R_{10}$

Amplificador transimpedância

(entrada em corrente, saída em tensão)

A montagem abaixo é um amplificador transimpedância (ti, $i \rightarrow v$), com a ganho V_o/I_{in} :

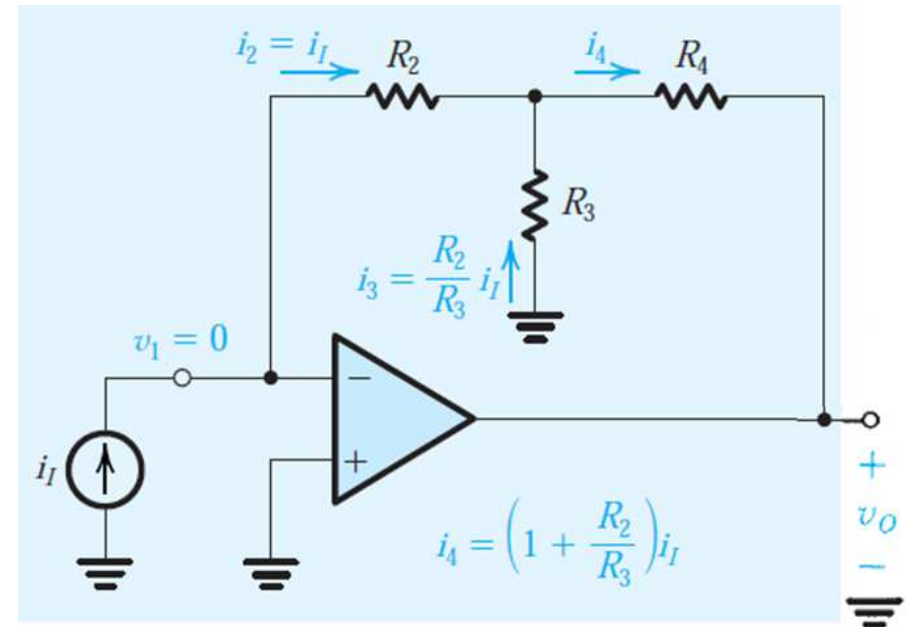


$$V_{out} = -R_f I_{in}$$

$$A_{iv,f} = \frac{V_{out}}{I_{in}} = -R_f$$

A resistência de entrada $R_{in(l)}$ é igual a zero.

A resistência de saída é também igual a zero.

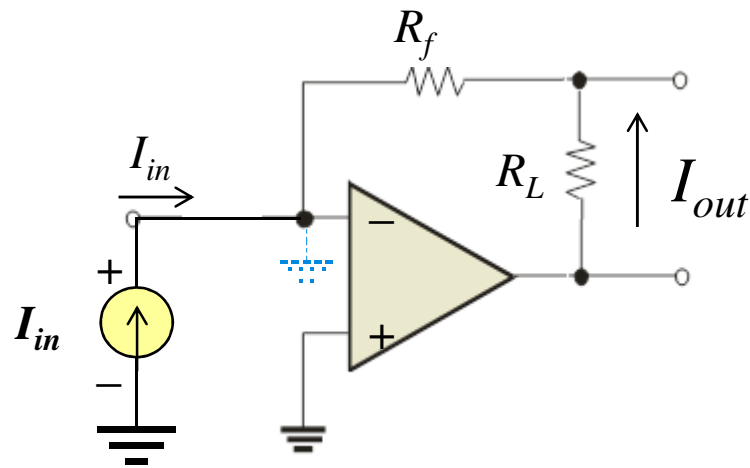


$$\begin{aligned} v_o &= -R_2 i_I - R_4 i_4 \\ &= -i_I \left[R_2 + R_4 \left(1 + \frac{R_2}{R_3} \right) \right] \end{aligned}$$

$$A_{iv,f} = - \left[R_2 + R_4 \left(1 + \frac{R_2}{R_3} \right) \right]$$

Amplificador de corrente

As montagens abaixo corresponde a amplificadores de corrente (i), com a ganho I_{out}/I_{in} :



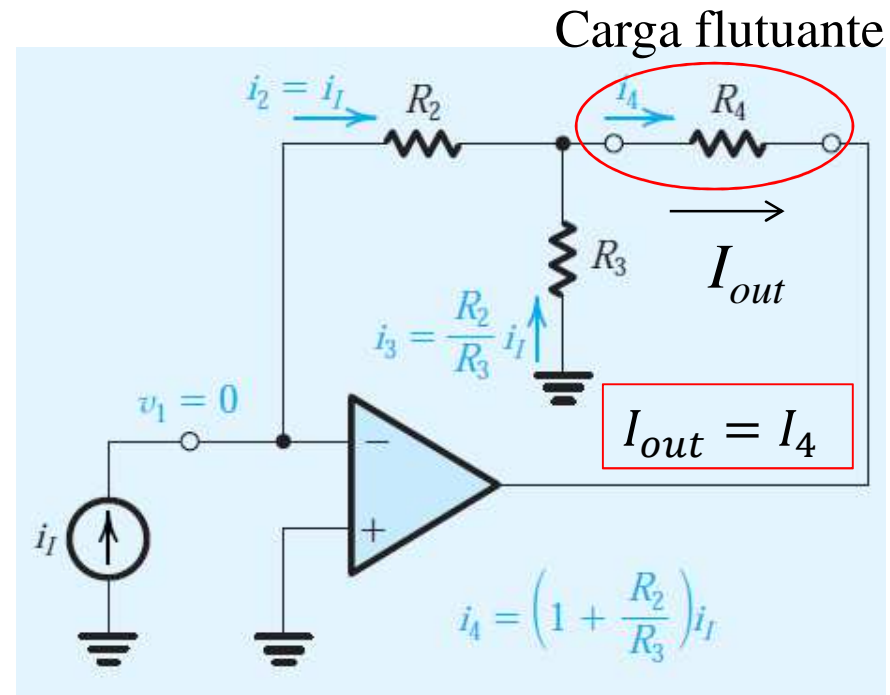
$$I_{out} = -I_{in}, A_{i,f} = \frac{I_{out}}{I_{in}} = -1$$

O ganho da montagem é -1

$R_{in(l)}$ é igual a zero.

$R_{0(l)}$ é muito grande (infinita)

Nesta montagem, a corrente I_{out} não depende da carga (R_L).



$$A_{i,f} = \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right), R_{i,f} = 0, R_{0f} = \infty$$

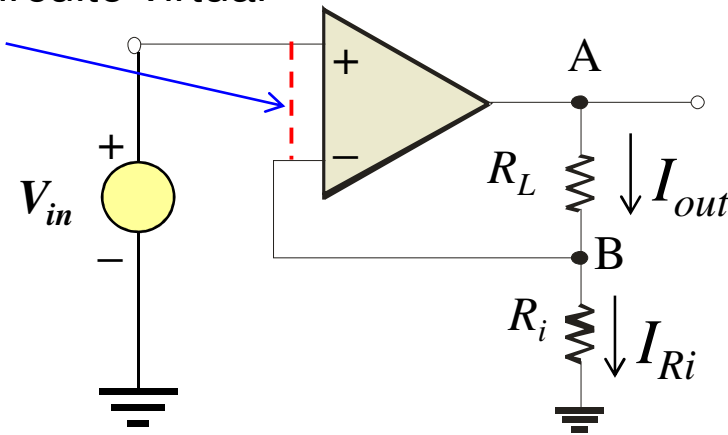
Nesta montagem a carga (R_4) tem de estar flutuante.

Amplificador de Transadmitância

(entrada em corrente, saída em tensão)

A montagem abaixo é um amplificador transadmitância (ta), com a ganho I_{out}/V_{in} :

Curto-circuito virtual



$$V_B = V_- = V_{in}$$

$$I_{out} = I_{Ri} = \frac{V_{in}}{R_i}$$

$$A_{vi,f} = \frac{I_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{R_i}$$

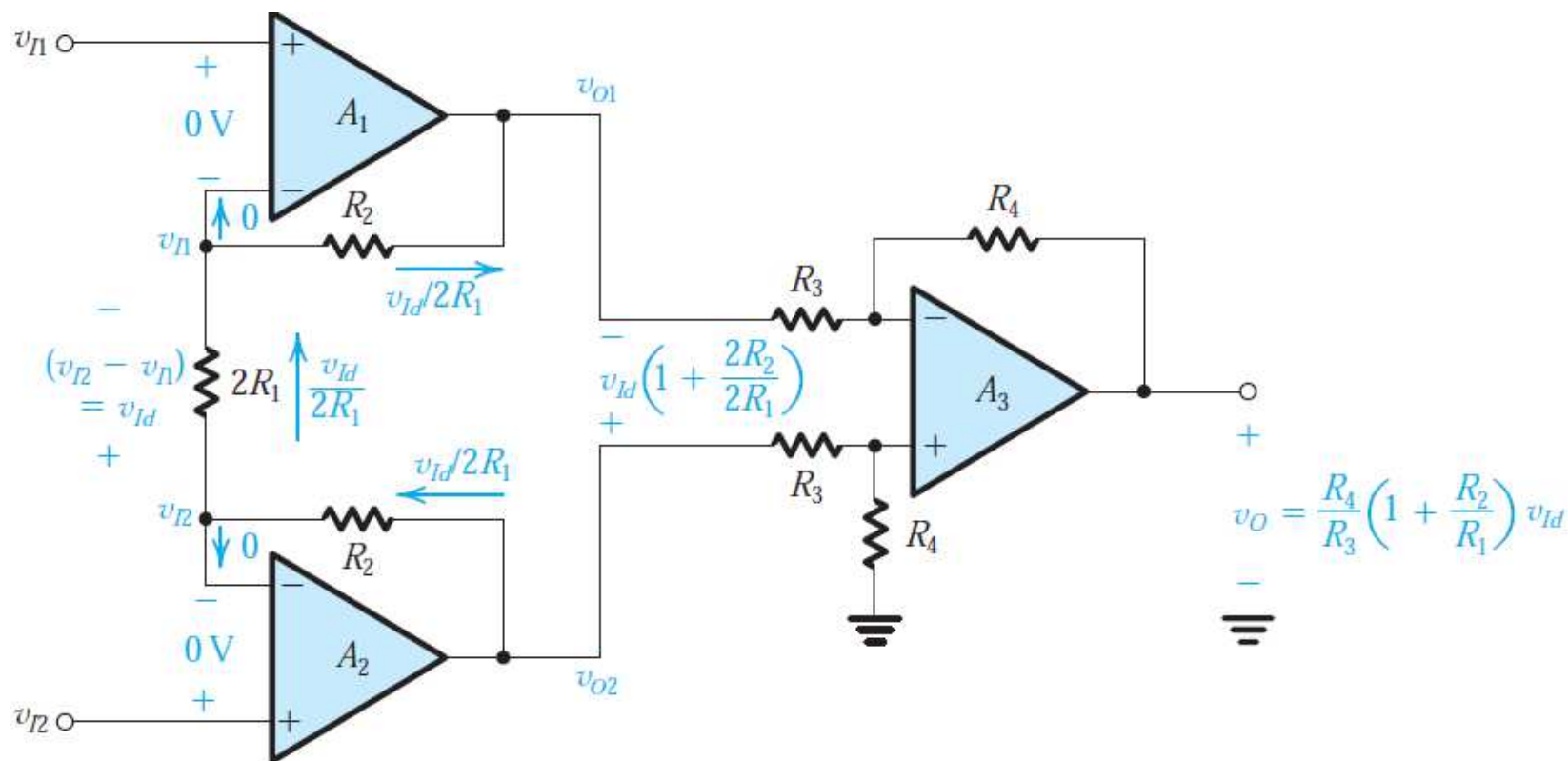
A resistência de entrada $R_{in(l)}$ é muito grande (infinita).

A resistência de saída $R_{o(l)}$ é muito grande (infinita).

Amplificador de instrumentação

Amplificador de instrumentação

Uma desvantagem da montagem subtratora convencional é que a impedância vista de cada uma das entradas é diferente. O circuito abaixo remove esta desvantagem, fazendo com que a impedância vista de ambas as entradas seja muito grande (\rightarrow infinito), e permite a introdução de ganho diferencial (i.e., o ganho é igual para ambas as entradas). Esta montagem pode ser usada para medir/amplificar pequenas diferenças entre sinais, sendo por isso usado em muitos instrumentos. Por isso é conhecida como amplificador de instrumentação. É o circuito base, por exemplo, do eletrocardiógrafo.



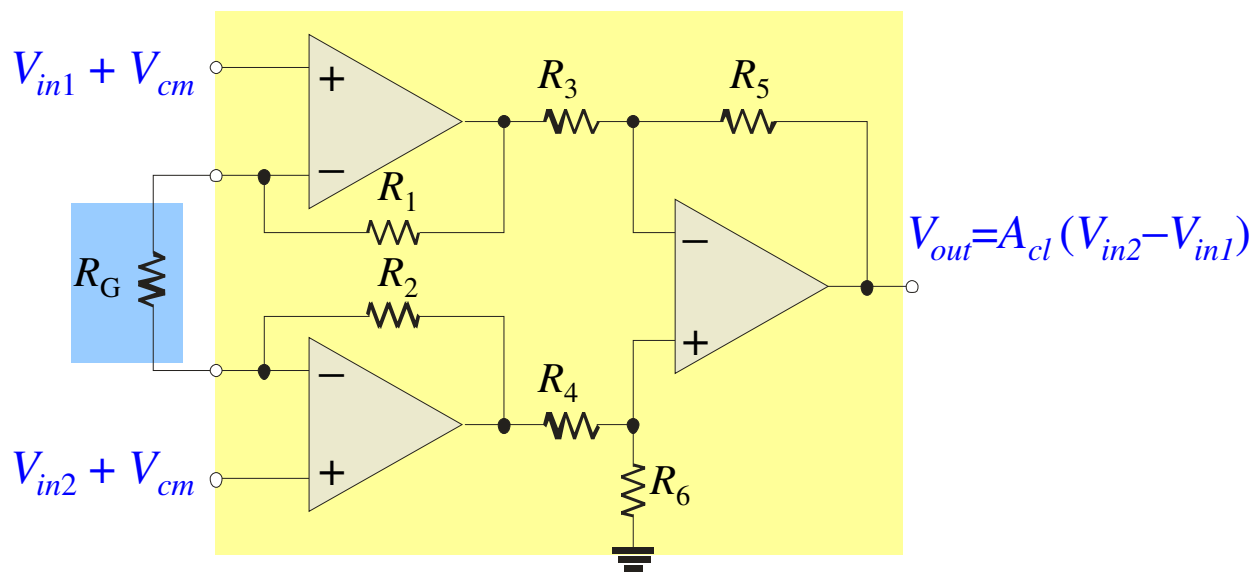
Amplificador de instrumentação

Instrumentation amplifiers

Um amplificador de instrumentação (AI) é um circuito desenhado para aplicações onde os pequenos sinais estão num ambiente com ruído. Estas montagens amplificadoras apresentam elevadas impedâncias de entrada (infinita) e elevado fator de rejeição de modo comum (CMRR) para rejeição do ruído.

R_3 , R_4 , R_5 e R_6 têm o mesmo valor (R). Se $R_1 = R_2$, o ganho em malha fechada é definido pela resistência externa, R_G , definida pelo utilizador, e o ganho é:

$$A_{cl} = 1 + \frac{2R}{R_G}$$



Amplificador de instrumentação

Instrumentation amplifiers

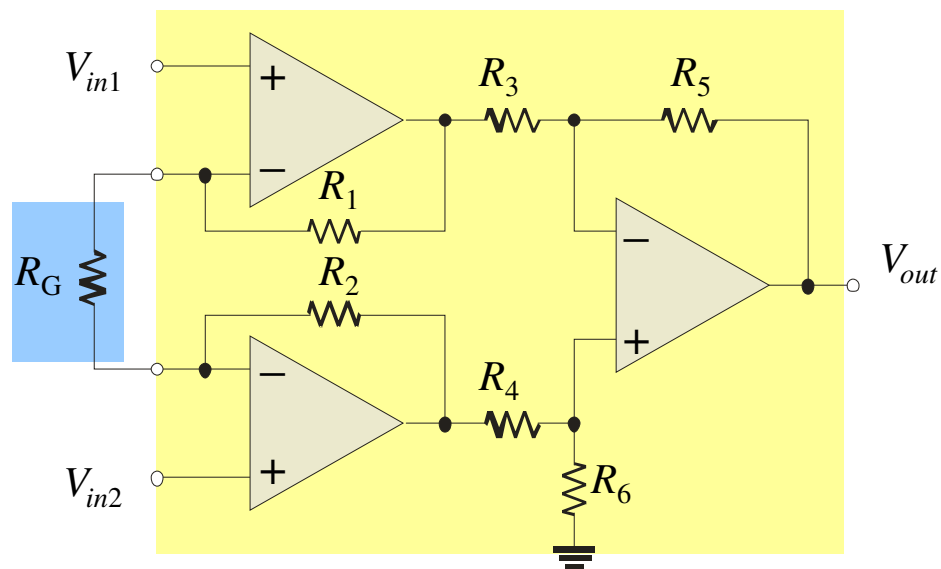
Consideremos $R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$, qual deve ser o valor de R_G para que o ganho seja 40?

$$A_{cl} = 1 + \frac{2R}{R_G}$$

Resolvendo em ordem a R_G ,

$$R_G = \frac{2R}{A_{cl} - 1}$$

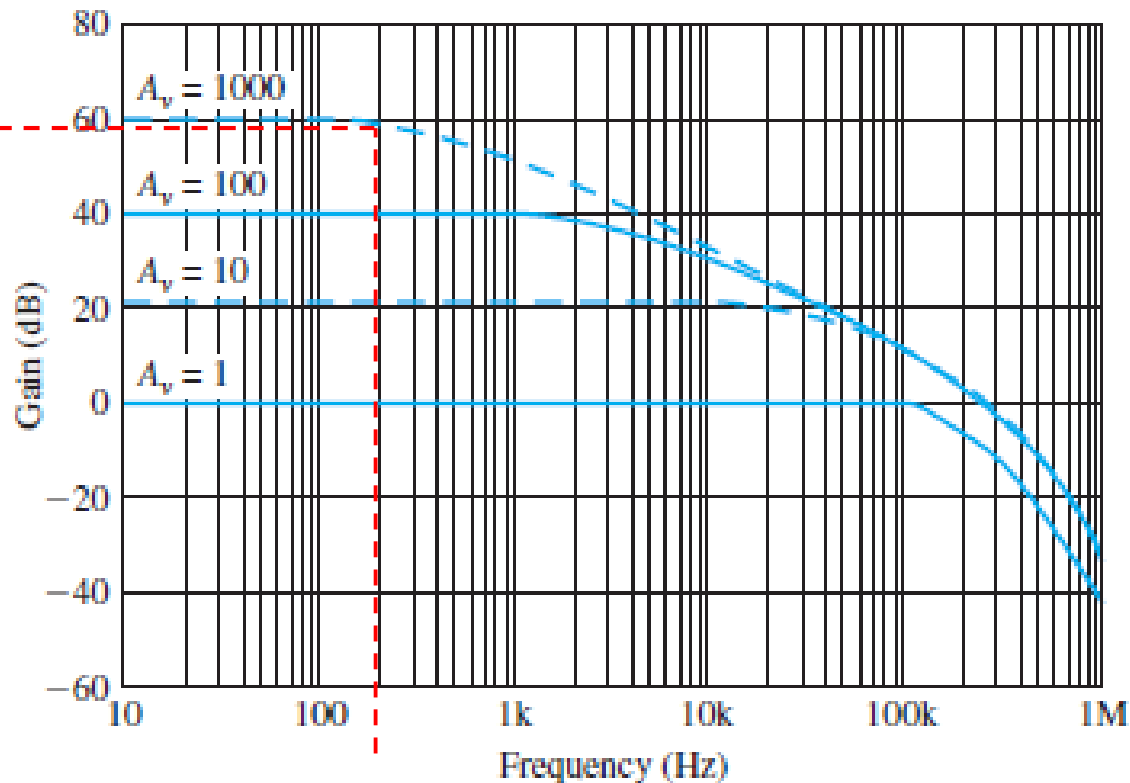
$$R_G = \frac{2 (10 \text{ k}\Omega)}{40 - 1} = 513 \text{ }\Omega$$



(510 Ω é o valor *standard* mais próximo).

Resposta em frequência do amplificador de instrumentação

The bandwidth of instrumentation amplifiers decreases when higher gain is selected. The frequency response is published by the manufacturer. For example the frequency response of an INA333 is shown.

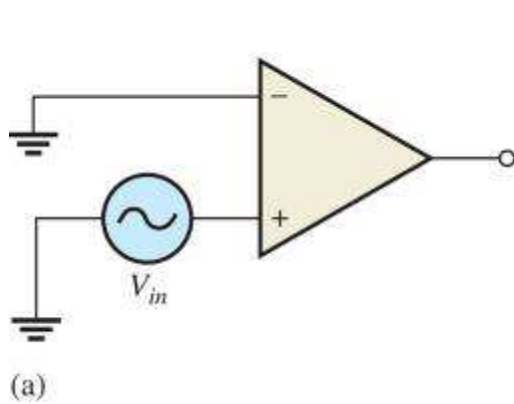


If the required frequency response is less than about 300 Hz, a gain of 1000 can be selected. The INA333 can operate on as little as 1.8 V, so is used in portable medical, handheld instrumentation, weigh scales and data acquisition applications.

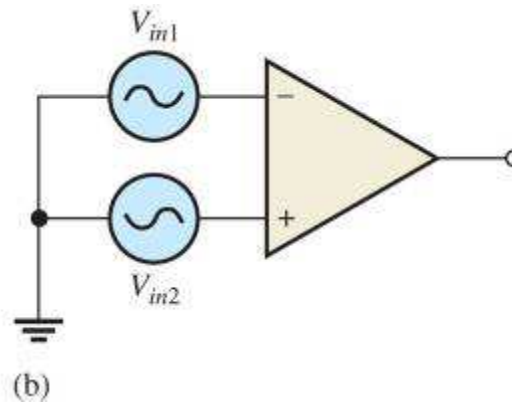
**Conceitos e parâmetros
de amplificadores operacionais
(ver também guias dos trabalhos práticos)**

Montagens com ampops em malha aberta

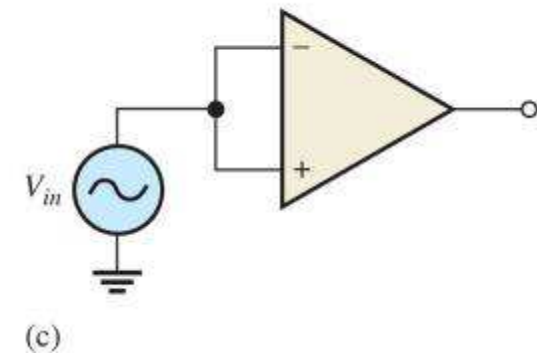
Detetor de zero



Amplificador diferencial



Modo comum



Parâmetros do AmOp

Some important op-amp parameters are:

Input bias current: Average of input currents required to bias the first stage of the amplifier:
$$I_{\text{BIAS}} = \frac{I_1 + I_2}{2}$$

Differential input resistance: Total resistance between the inverting and non-inverting inputs

Common-mode input resistance: Total resistance between each input and ground.

Input offset current: Absolute difference between the two bias currents:
$$I_{\text{OS}} = |I_1 - I_2|$$

Output resistance: The resistance when viewed from the output terminal.

Common-mode input voltage range: Range of input voltages, which, when applied to both inputs, will not cause clipping or other distortion.

Parâmetros do AmOp

Op-amp parameters

Output resistance: The resistance when viewed from the output terminal.

Common-mode input voltage range: Range of input voltages, which, when applied to both inputs, will not cause clipping or other distortion.

Common-mode rejection ratio Ratio of the differential gain to the common-mode gain.
The differential gain for the op-amp by itself is the same as its open loop gain.

$$\text{CMRR} = \frac{A_{v(d)}}{A_{cm}} = \frac{A_{ol}}{A_{cm}}$$

Slew rate: The maximum rate of change of the output in response to a step input voltage.

Fator de rejeição em modo comum

Common-Mode Rejection Ratio (CMRR)

Many times, noise sources will induce an unwanted voltage in a signal line. When the noise is induced in common-mode, the differential amplifier tends to cancel it. (The diff-amp cannot reject any signal that is in differential mode.)

The ability to reject common-mode signals is measured with a parameter called the common-mode rejection ratio (CMRR), which is defined as

$$\text{CMRR} = \frac{A_{v(d)}}{A_{cm}}$$

CMRR can be expressed in decibels as $\text{CMRR} = 20 \log \left(\frac{A_{v(d)}}{A_{cm}} \right)$

Fator de rejeição em modo comum

Common-Mode Rejection Ratio (CMRR)

A certain diff-amp has a differential voltage gain of 500 and a common-mode gain of 0.1. What is the CMRR?

From the defining equation for CMRR:

$$\text{CMRR} = \frac{A_{v(d)}}{A_{cm}} = \frac{500}{0.1} = 5000$$

Expressed in decibels, it is

$$\text{CMRR} = 20 \log \left(\frac{A_{v(d)}}{A_{cm}} \right) = 20 \log (5000) = 74 \text{ dB}$$

Fator de rejeição em modo comum

Common-Mode Rejection Ratio (CMRR)

A certain diff-amp has $A_d = 100$ and a CMRR of 90 dB. Describe the output if the input is a 50 mV differential signal and a common mode noise of 1.0 V is present.

The differential signal is amplified by 100. Therefore, the signal output is

$$V_{out} = A_{v(d)} \times V_{in} = 100 \times 50 \text{ mV} = 5.0 \text{ V}$$

The common-mode gain can be found by

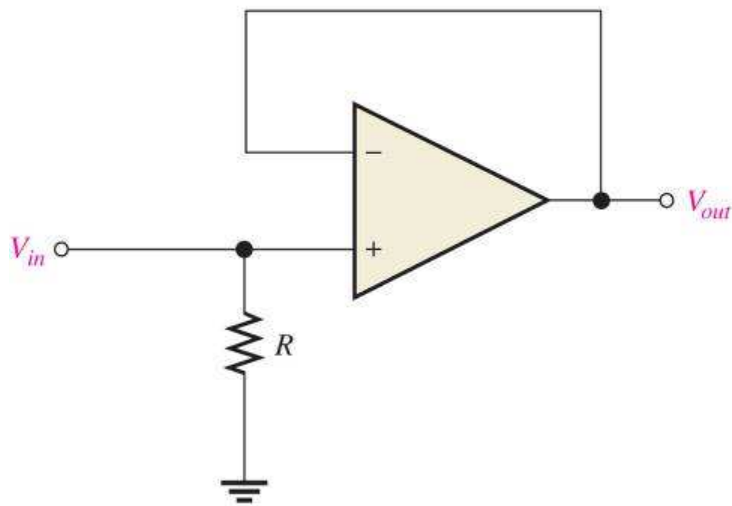
$$A_{cm} = \frac{A_{v(d)}}{\text{CMRR}} = \frac{100}{90 \text{ dB}} = \frac{100}{10^{4.5}} = \frac{100}{31,600} = 0.0032$$

The noise is amplified by 0.0032. Therefore,

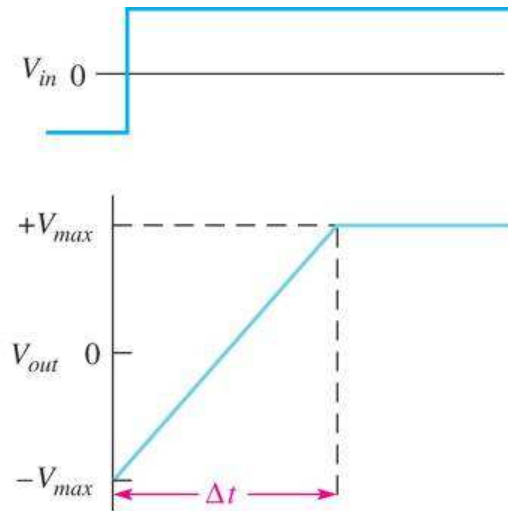
$$V_{noise} = A_{cm} \times V_{in} = 0.0032 \times 1.0 \text{ V} = 3.2 \text{ mV}$$

Medida do tempo de resposta – taxa de atraso

Measurement of **slew rate**.



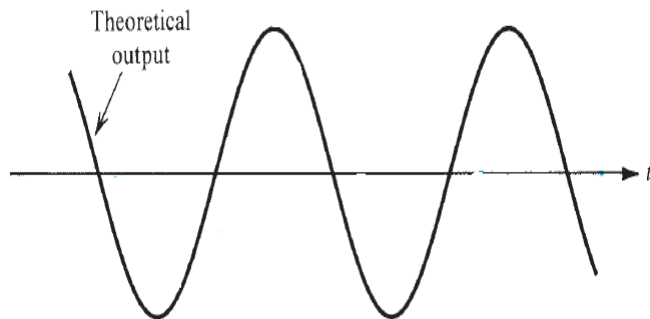
(a) Test circuit



(b) Step input voltage and the resulting output voltage

A taxa de atraso limita a resposta em alta frequência do AmpOp: ver figuras abaixo

Sinal sinusoidal de alta frequência



Resposta do amplificador seguidor a um sinal sinusoidal de alta frequência

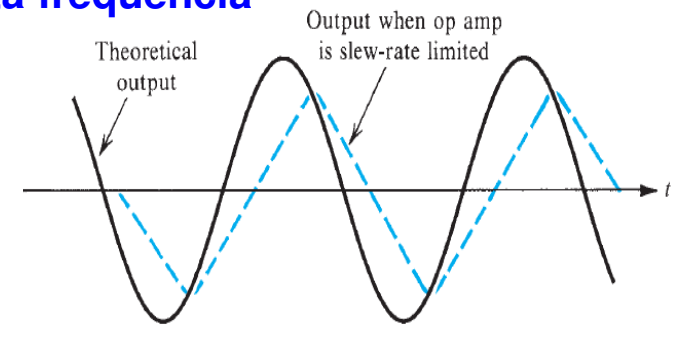
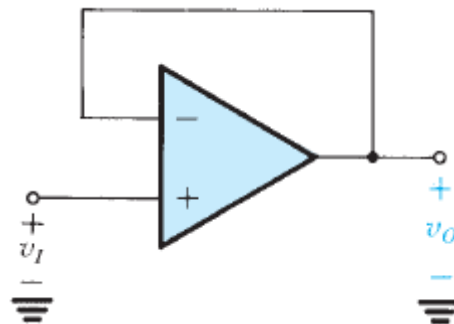


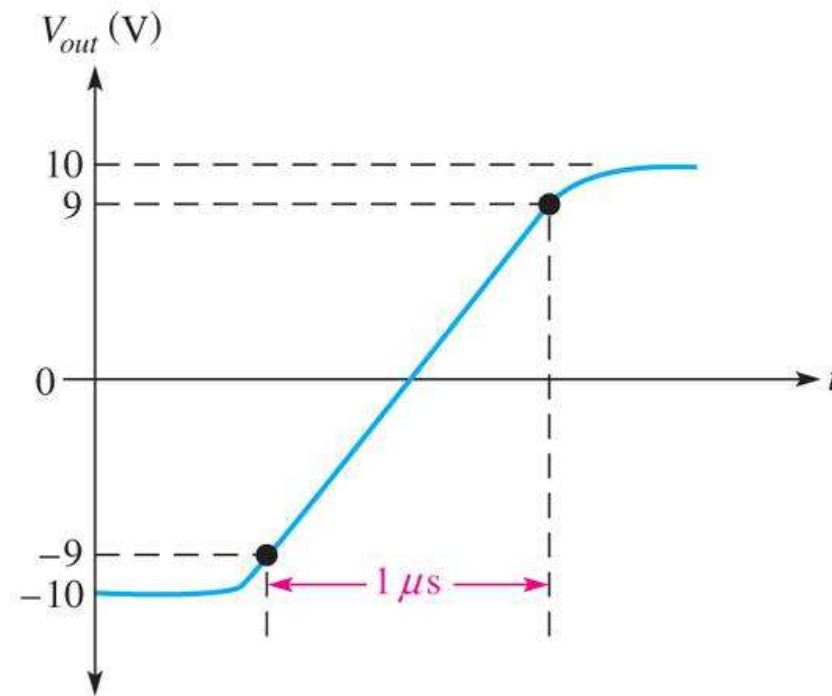
Figure 2.44 Effect of slew-rate limiting on output sinusoidal waveforms.

Tempo de resposta – taxa de atraso

Op-amp parameters

Slew rate

What is the slew rate for the output signal shown in response to a step input?



The output goes from -9 V to $+9 \text{ V}$ in $1 \mu s$.

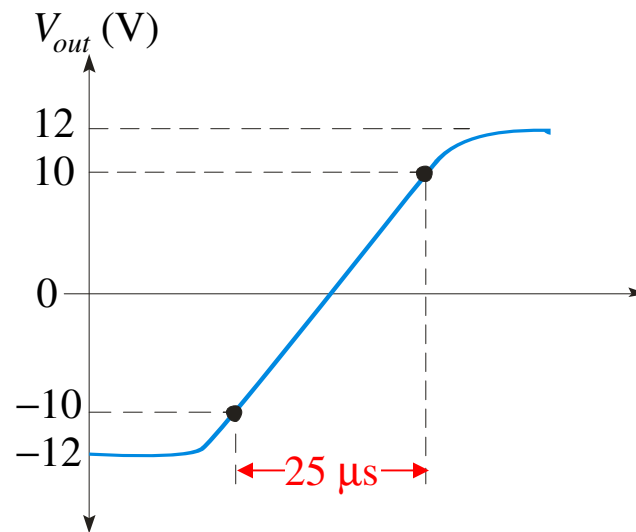
$$\text{Slew rate} = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta t} = \frac{+9 \text{ V} - (-9 \text{ V})}{1 \mu s} = 18 \text{ V}/\mu s$$

Tempo de resposta – taxa de atraso

Slew rate

Op-amp parameters

What is the slew rate for the output signal shown in response to a step input?

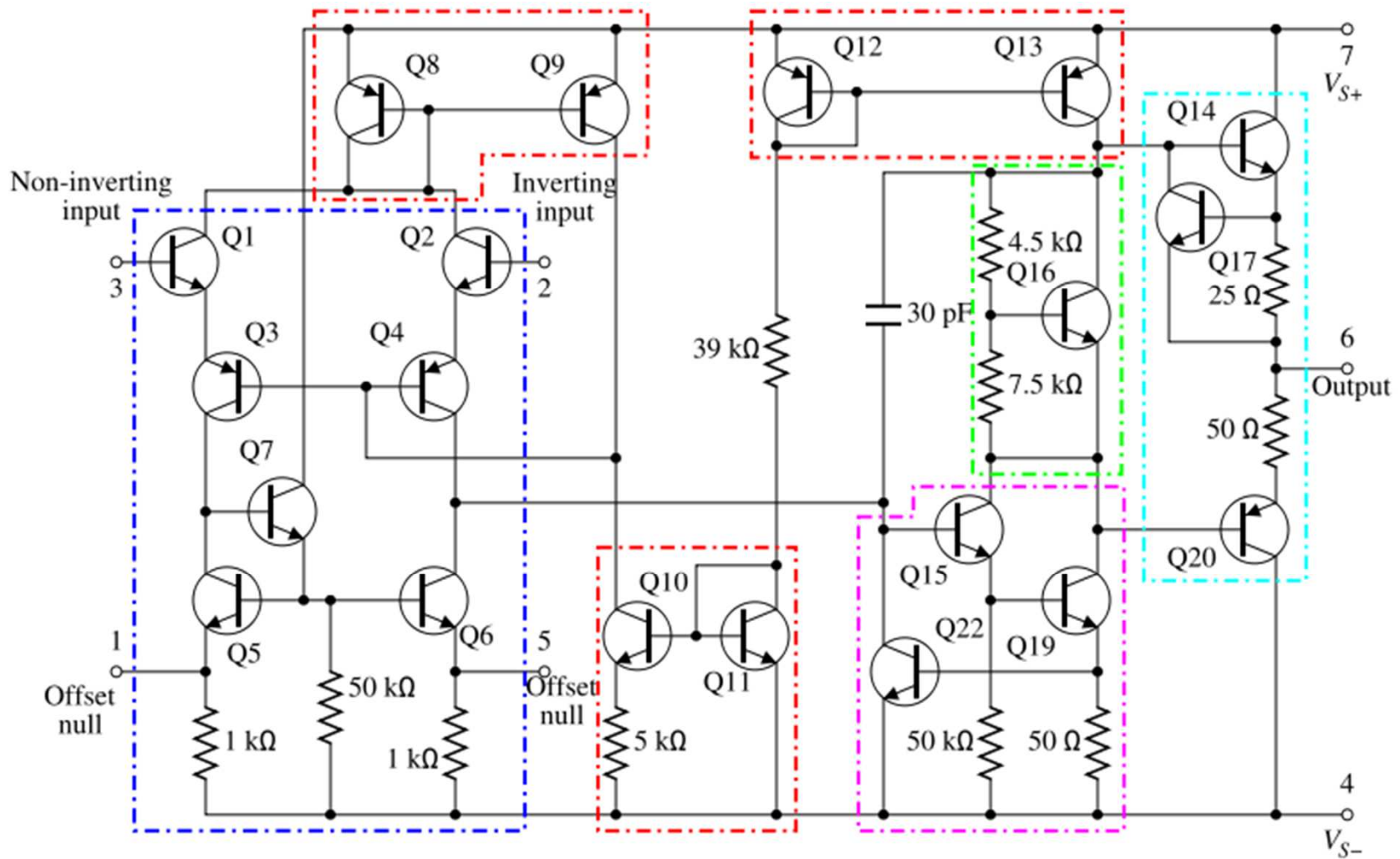


The output goes from -10 V to $+10 \text{ V}$ in $25 \mu\text{s}$.

$$\text{Slew rate} = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta t} = \frac{20 \text{ V}}{25 \mu\text{s}} = 0.8 \text{ V}/\mu\text{s}$$

Amplificador operacional LM741

Diagrama elétrico do ampop LM741



https://pt.wikipedia.org/wiki/Amplificador_operacional#/media/File:OpAmpTransistorLevel_Colored_Labeled.svg

LM741 - Comparação entre AmpOps

	VOLTAGE GAIN	INPUT R	OUTPUT R	BANDWIDTH
Without negative feedback	A_{ol} is too high for linear amplifier applications	Relatively high (see Table 1)	Relatively low	Relatively narrow (because the gain is so high)
With negative feedback	A_{cl} is set to desired value by the feedback network	Can be increased or reduced to a desired value depending on type of circuit	Can be reduced to a desired value	Significantly wider

OP-AMP	V_{OS} (mV)	I_{BIAS} (nA)	R_{in} (M Ω)	A_{ol} ($\times 10^6$)	SR (V/ μ s)	CMRR (dB)	COMMENT
AD8009AR	5	150	—	—	5500	50	Ultra fast, current feedback
AD8041A	7	2000	0.16	0.056	160	74	$BW = 160$ Hz, rail-to-rail
AD8055A	5	1200	10	0.0035	1400	82	Very fast voltage feedback
LF353	5	0.050	10^{12}	3.0	13	100	Low cost, JFET inputs
LM101A	7.5	250	1.5	0.16	—	80	General-purpose
LM741C	6	500	0.3	0.20	0.5	70	Industry standard; low cost
LMP2021	± 0.005	0.025	—	100	2.6	139	Very low drift, precision
OP113E	0.075	600	—	2.4	1.2	100	General-purpose
OP177A	0.01	1.5	26	12	0.3	130	Very high CMRR
OP184E	0.065	350	—	0.24	2.4	60	Precision, rail-to-rail
OPA365	0.2	0.010	—	1.0	25	100	Low power, low noise
OPA827	0.15	0.015	10^{13}	1.0	28	114	Low noise, precision

Selected Key Terms

Operational amplifier A special type of amplifier exhibiting very high open-loop gain, very high input resistance, very low output resistance, and good rejection of common-mode signals.

Differential amplifier An amplifier that produces an output proportional to the difference of two inputs.

Common-mode rejection ratio (CMRR) A measure of a diff-amp's or op-amp's ability to reject signals that appear the same on both inputs; the ratio of differential voltage gain or open-loop gain (for op-amps) to common-mode gain.

Open-loop voltage gain The internal voltage gain of an op-amp without feedback.

Closed-loop voltage gain The overall voltage gain of an op-amp with negative feedback.

Noninverting amplifier An op-amp closed-loop configuration in which the input signal is applied to the noninverting input.

Inverting amplifier An op-amp closed-loop configuration in which the input signal is applied to the inverting input.

Termos e definições importantes

Summing amplifier An amplifier with several inputs that produces an output voltage proportional to the algebraic sum of the inputs.

Averaging amplifier An amplifier with several inputs that produces an output voltage that is the mathematical average of the input voltages.

Scaling adder A special type of summing amplifier with weighed inputs.

Termos e definições importantes

Integrator A circuit that produces an inverted output that approaches the mathematical integral of the input.

Differentiator A circuit that produces an inverted output that approaches the mathematical derivative of the input, which is the rate of change.

Active filter A frequency selective circuit consisting of active devices such as transistors or op-amps combined with reactive (RC) circuits.

Series regulator A type of voltage regulator with the control element in series between the input and output.

Termos e definições importantes

Instrumentation amplifier

An amplifier specifically designed for amplifying small differential signals and rejecting large common-mode voltages.

Isolation amplifier

An amplifier with electrically isolated internal stages.

Operational transconductance amplifier (OTA)

A voltage-to-current amplifier in which the gain is set by a bias current.

Clamper

A circuit that adds a dc level to an ac signal; a dc restorer.

Limiter

A circuit that removes part of a waveform above or below a specified level; a clipper.

Representações esquemáticas do AmpOp

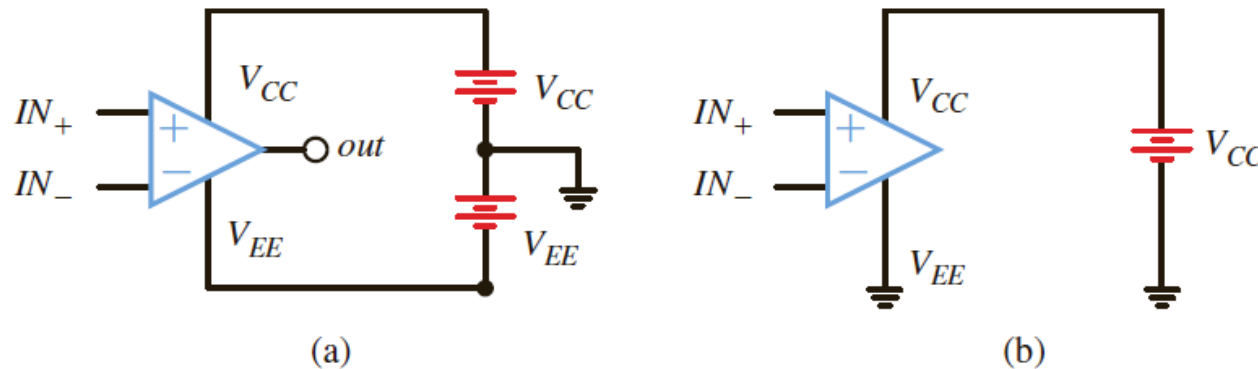


Figure 4.3

Schematics showing the power supply connections and ground location for (a) dual-supply and (b) single-supply implementations.

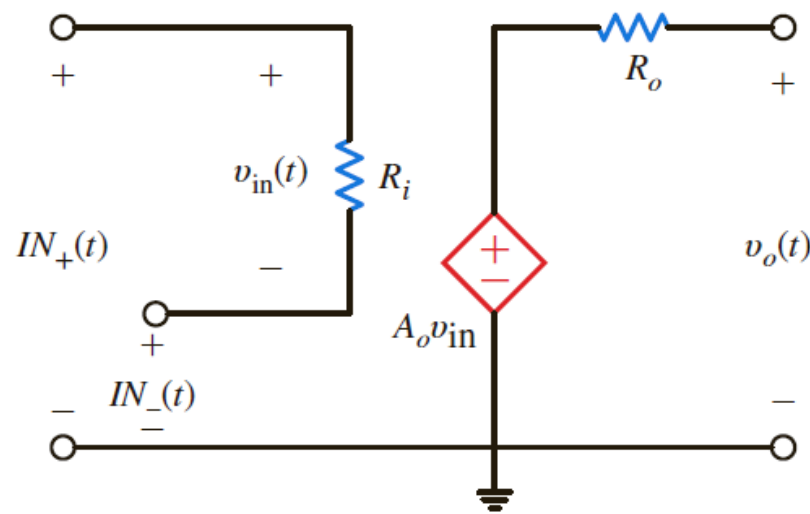
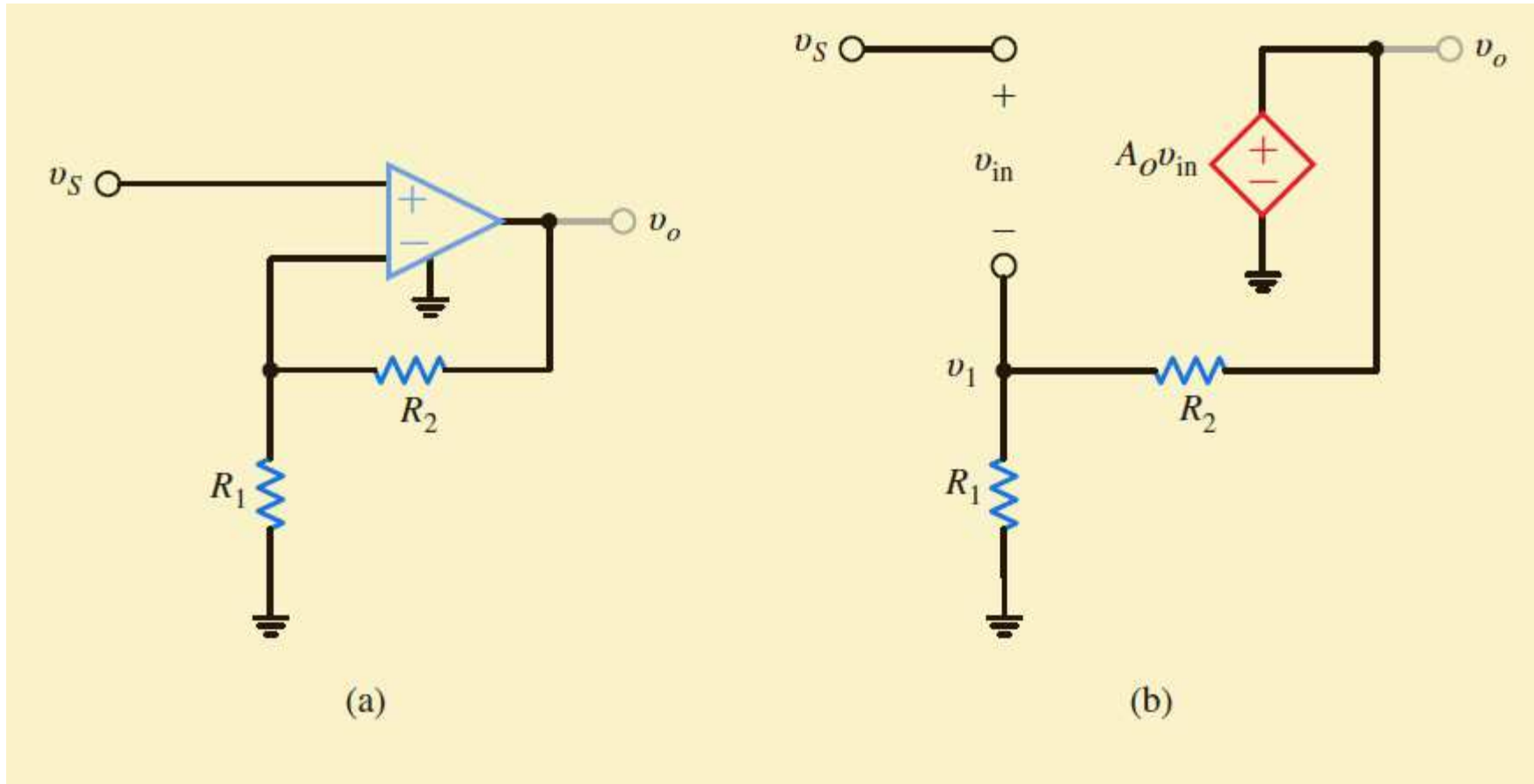


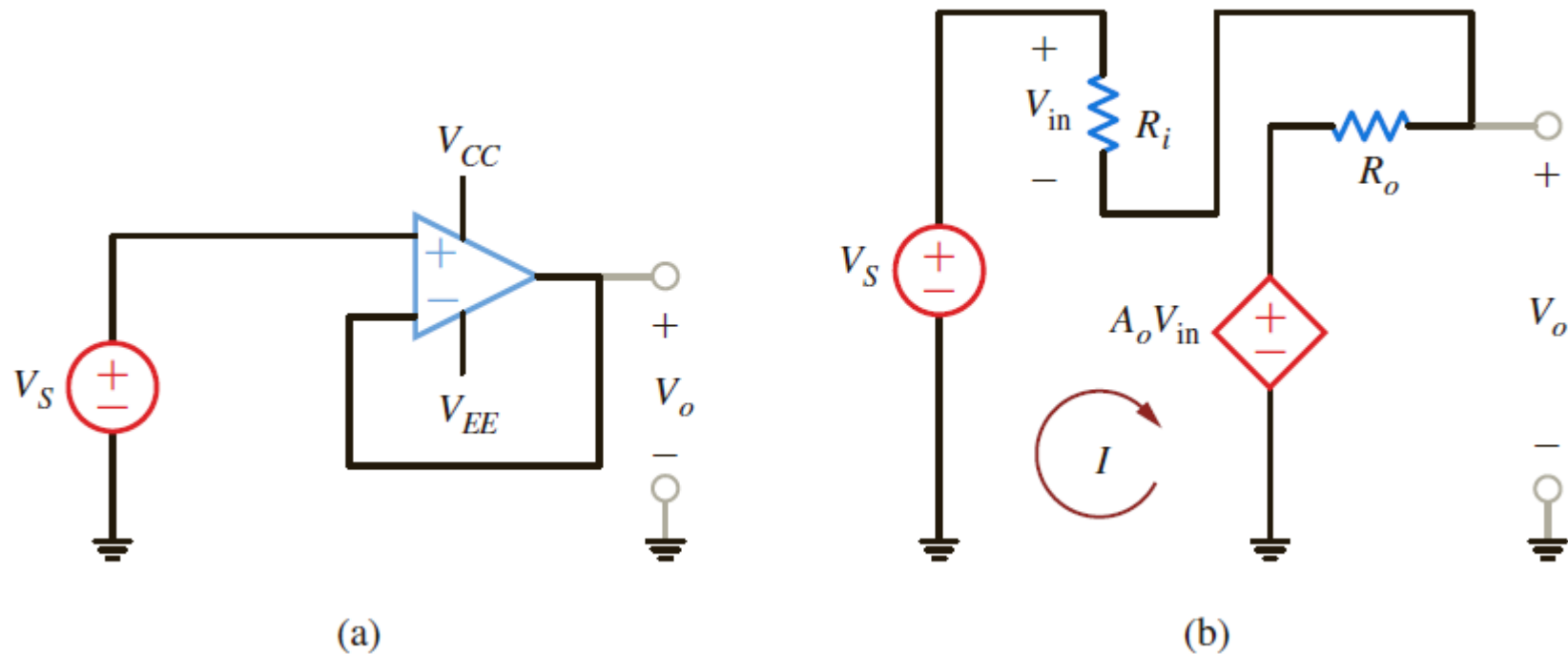
Figure 4.4

A simple model for the gain characteristics of an op-amp.

Montagem não inversora

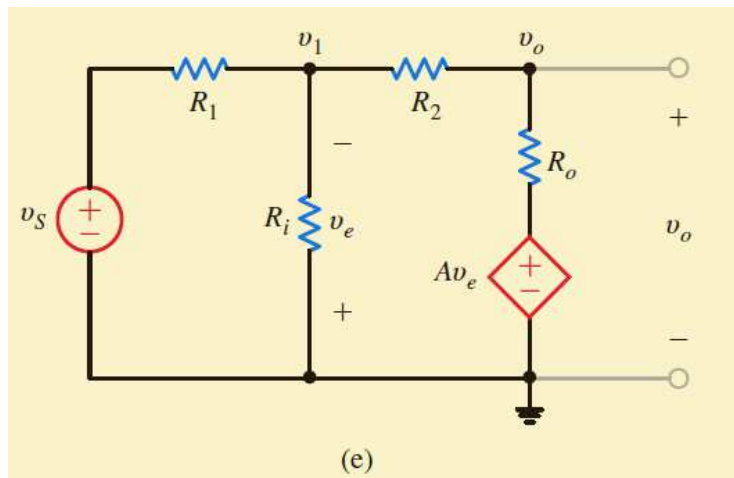
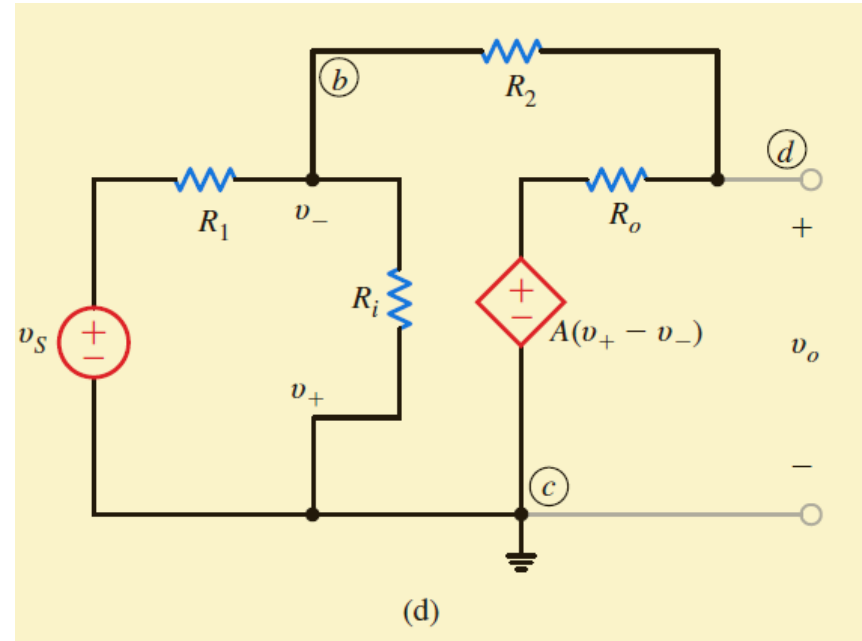
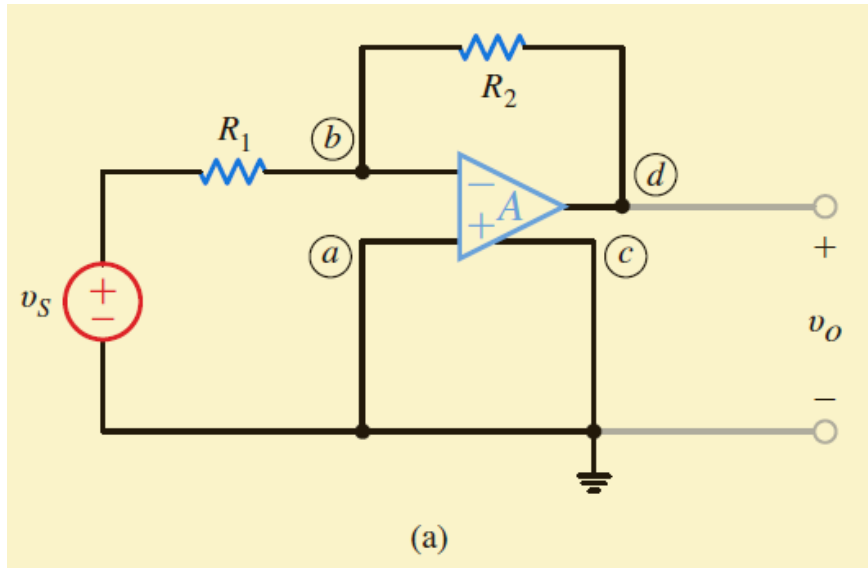


Modelo do amplificador seguidor de tensão

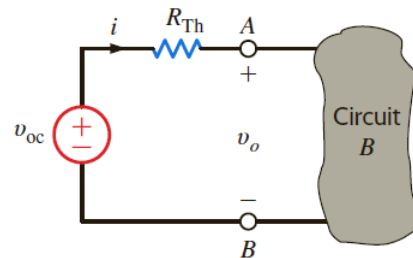
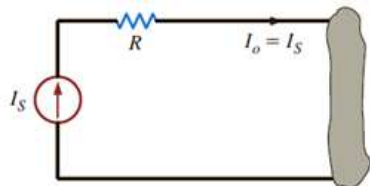
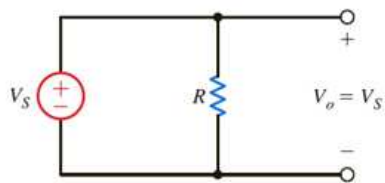
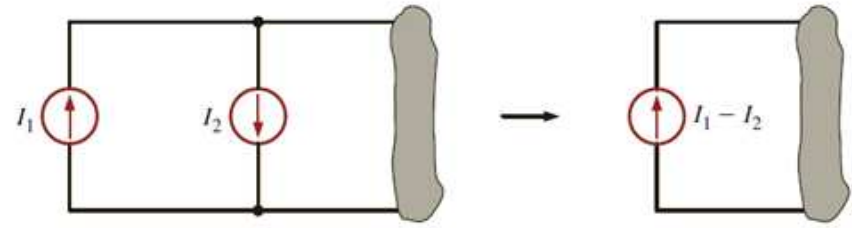
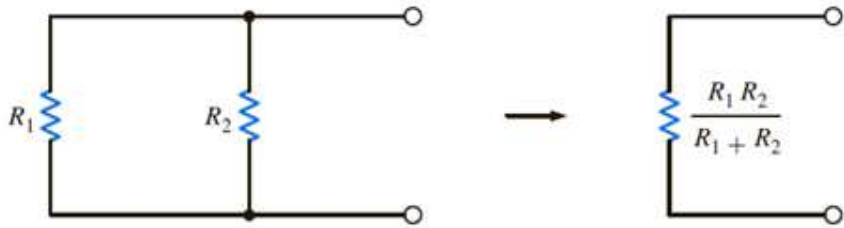
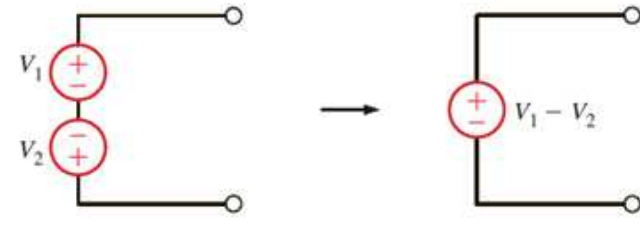
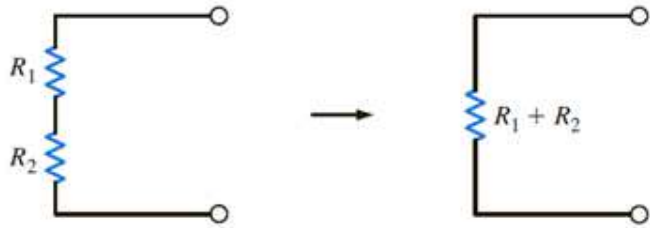


Circuit (a) and model (b) for the unity gain buffer.

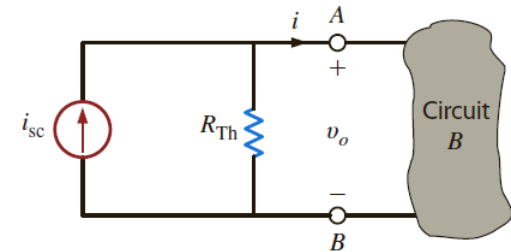
Montagem inversora



Formas equivalentes



(a)



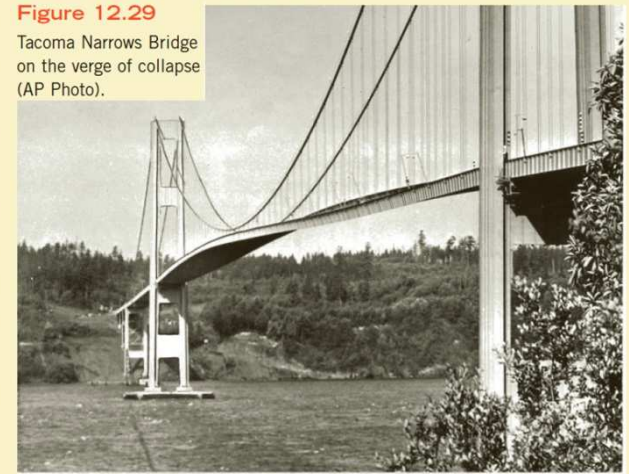
(b)

Circuito RLC usado para simular a queda da ponte Tacoma Narrows

On July 1, 1940, the third longest bridge in the nation, the Tacoma Narrows Bridge, was opened to traffic across Puget Sound in Washington. On November 7, 1940, the structure collapsed in what has become the most celebrated structural failure of that century. A photograph of the bridge, taken as it swayed back and forth just before breaking apart, is shown in **Fig. 12.29**. Explaining the disaster in quantitative terms is a feat for civil engineers and structures experts, and several theories have been presented. However, the one common denominator in each explanation is that wind blowing across the bridge caused the entire structure to resonate to such an extent that the bridge tore itself apart. One can theorize that the wind, fluctuating at a frequency near the natural frequency of the bridge (0.2 Hz), drove the structure into resonance. Thus, the bridge can be roughly modeled as a second-order system. Let us design an *RLC* resonance network to demonstrate the bridge's vertical movement and investigate the effect of the wind's frequency.

Figure 12.29

Tacoma Narrows Bridge on the verge of collapse (AP Photo).



The *RLC* network shown in **Fig. 12.30** is a second-order system in which $v_{in}(t)$ is analogous to vertical deflection of the bridge's roadway (1 volt = 1 foot). The values of C , L , R_A , and R_B can be derived from the data taken at the site and from scale models, as follows:

vertical deflection at failure ≈ 4 feet

wind speed at failure ≈ 42 mph

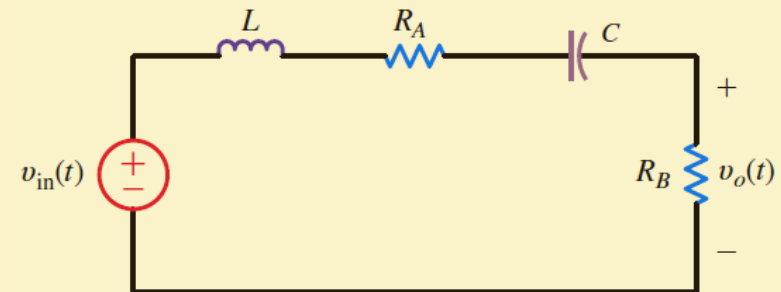
resonant frequency $= f_0 \approx 0.2$ Hz

Figure 12.30

RLC resonance network for a simple Tacoma Narrows Bridge simulation.

The output voltage can be expressed as

$$\mathbf{V}_o(j\omega) = \frac{j\omega\left(\frac{R_B}{L}\right)\mathbf{V}_{in}(j\omega)}{-\omega^2 + j\omega\left(\frac{R_A + R_B}{L}\right) + \frac{1}{LC}}$$



from which we can easily extract the following expressions:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 2\pi(0.2) \text{ rad/s} \quad \text{and} \quad \frac{\mathbf{V}_o(j\omega_0)}{\mathbf{V}_{in}(j\omega_0)} = \frac{R_B}{R_A + R_B} \approx \frac{4 \text{ feet}}{42 \text{ mph}}$$

$$2\zeta\omega_0 = \frac{R_A + R_B}{L}$$

<https://www.youtube.com/watch?v=ESTJCQpGW3Q>

Circuito RLC usado para simular a queda da ponte Tacoma Narrows

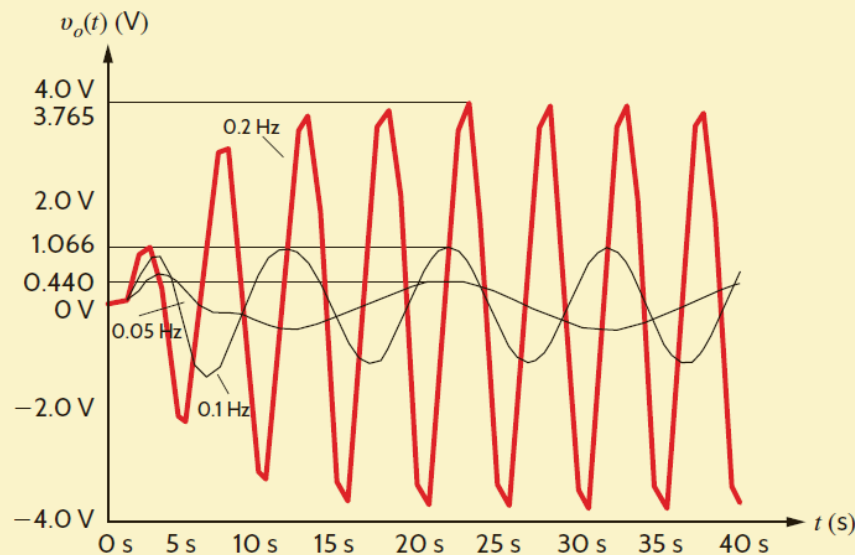
Let us choose $R_B = 1 \Omega$ and $R_A = 9.5 \Omega$. Having no data for the damping ratio, ζ , we will select $L = 20 \text{ H}$, which yields $\zeta = 0.209$ and $Q = 2.39$, which seem reasonable for such a large structure. Given the aforementioned choices, the required capacitor value is $C = 31.66 \text{ mF}$. Using these circuit values, we now simulate the effect of 42 mph winds fluctuating at 0.05 Hz, 0.1 Hz, and 0.2 Hz using an ac analysis at the three frequencies of interest.

The results are shown in **Fig. 12.31**. Note that at 0.05 Hz the vertical deflection (1 ft/V) is only 0.44 feet, whereas at 0.1 Hz the bridge undulates about 1.07 feet. Finally, at the bridge's resonant frequency of 0.2 Hz, the bridge is oscillating 3.77 feet—catastrophic failure.

Clearly, we have used an extremely simplistic approach to modeling something as complicated as the Tacoma Narrows Bridge. However, we will revisit this event in Chapter 14 and examine it more closely with a more accurate model (K. Y. Billah and R. H. Scanlan, "Resonance, Tacoma Narrows Bridge Failure, and Undergraduate Physics Textbooks," *American Journal of Physics*, 1991, vol. 59, no. 2, pp. 118–124).

Figure 12.31

Simulated vertical deflection (1 volt = 1 foot) for the Tacoma Narrows Bridge for wind shift frequencies of 0.05, 0.1, and 0.2 Hz.



<https://www.youtube.com/watch?v=ESTJQCpGW3Q>

Diagrama do circuito usado para simular a queda da ponte Tacoma Narrows

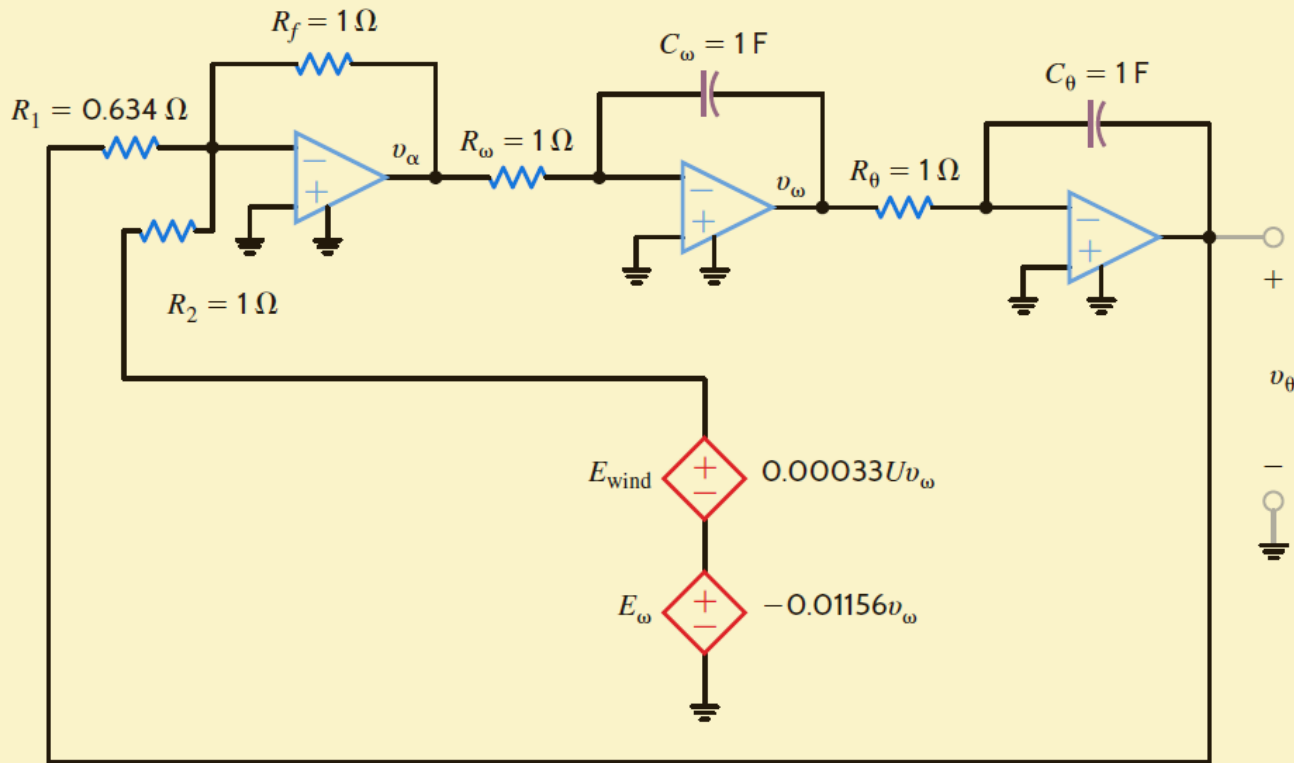
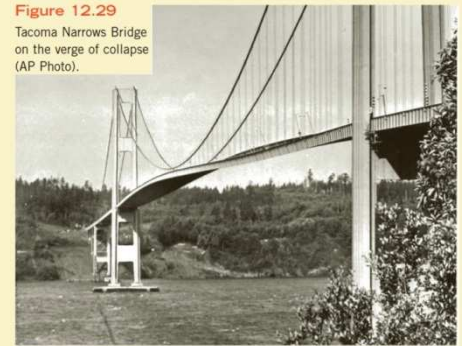


Figure 14.30

Circuit diagram for Tacoma Narrows Bridge simulations.

Figure 12.29

Tacoma Narrows Bridge on the verge of collapse (AP Photo).



<https://www.youtube.com/watch?v=ESTJQCpGW3Q>

Figure 14.31

Tacoma Narrows Bridge simulation at 20-mph wind speed and one degree twist initial condition.

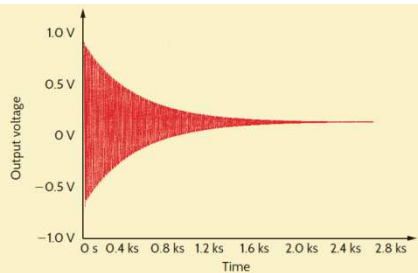


Figure 14.32

Tacoma Narrows Bridge simulation at 35-mph winds and one degree of initial twist.

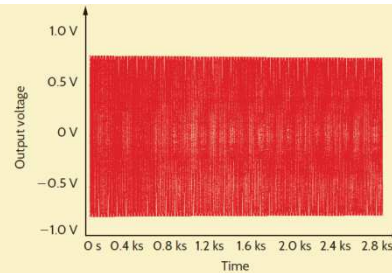


Figure 14.33

Tacoma Narrows Bridge simulation at 42-mph wind speed and one degree of initial twist.

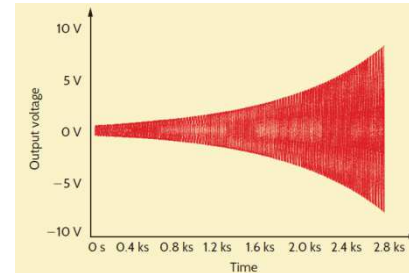
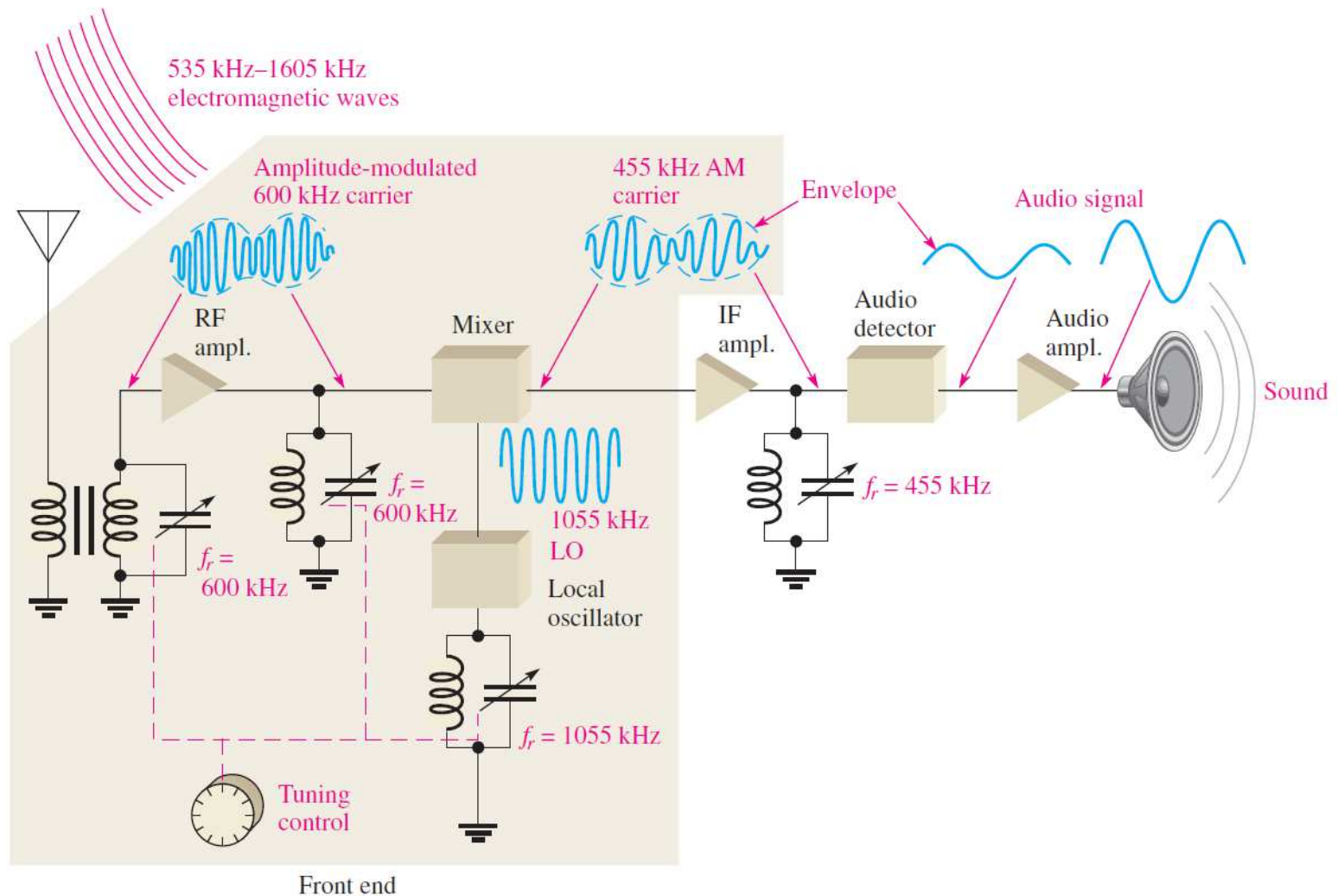


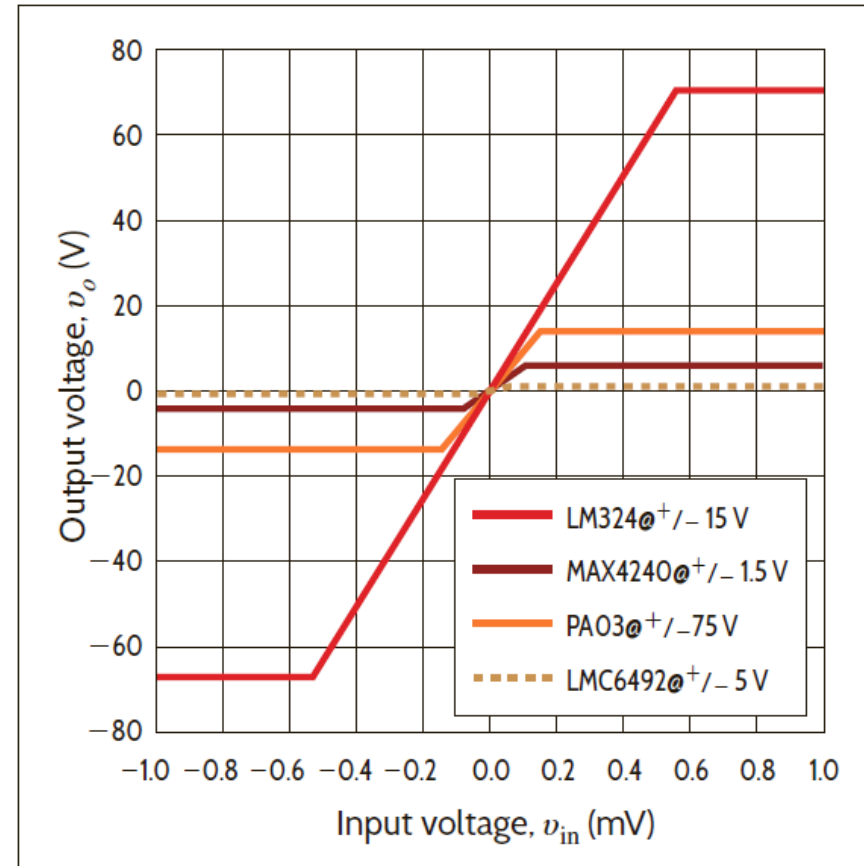
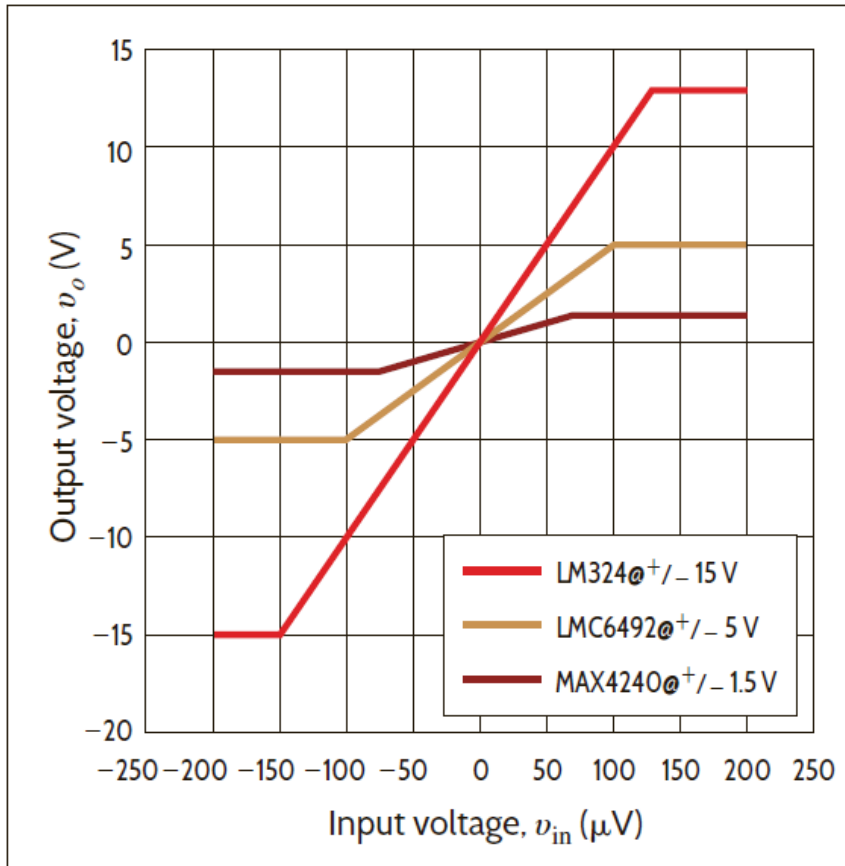
Diagrama simplificado de um receptor de rádio AM



▲ FIGURE 64

A simplified diagram of a superheterodyne AM radio broadcast receiver showing the application of tuned resonant circuits.

Função de transferência de alguns AmpOps



Elementos básicos de um oscilador sinusoidal

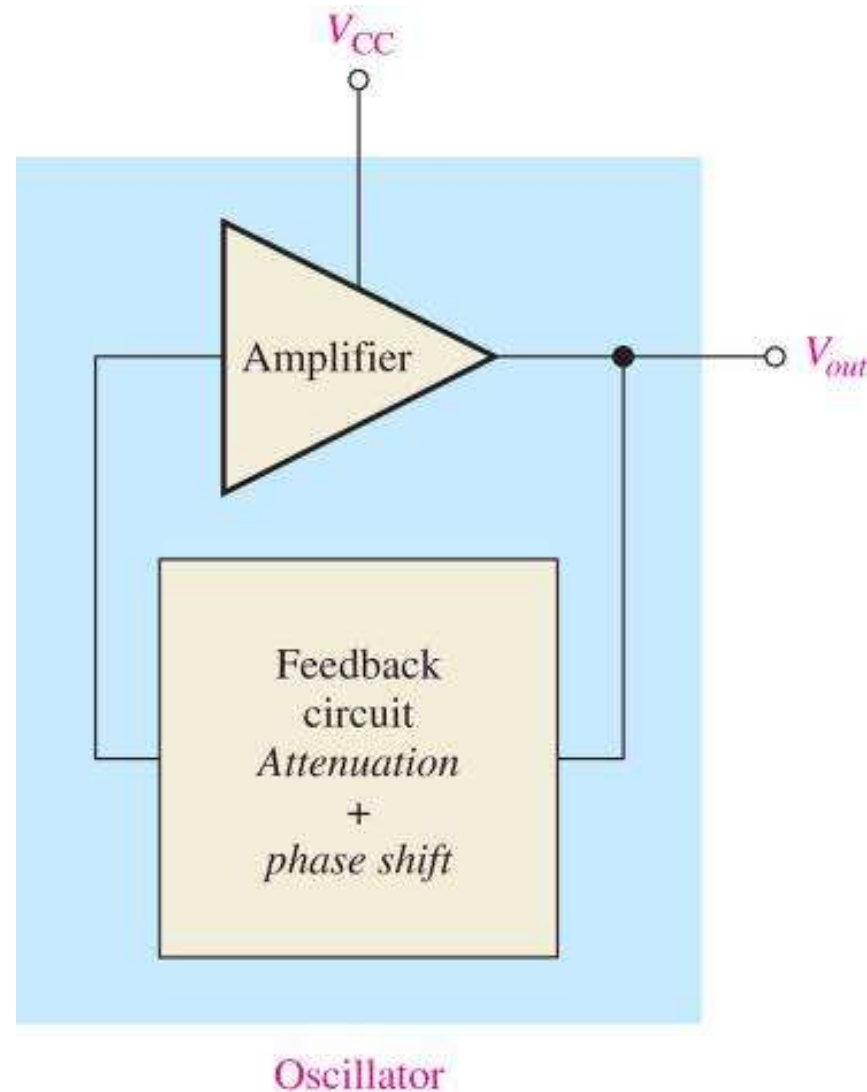


FIGURE 17-53

Condições para obter oscilação

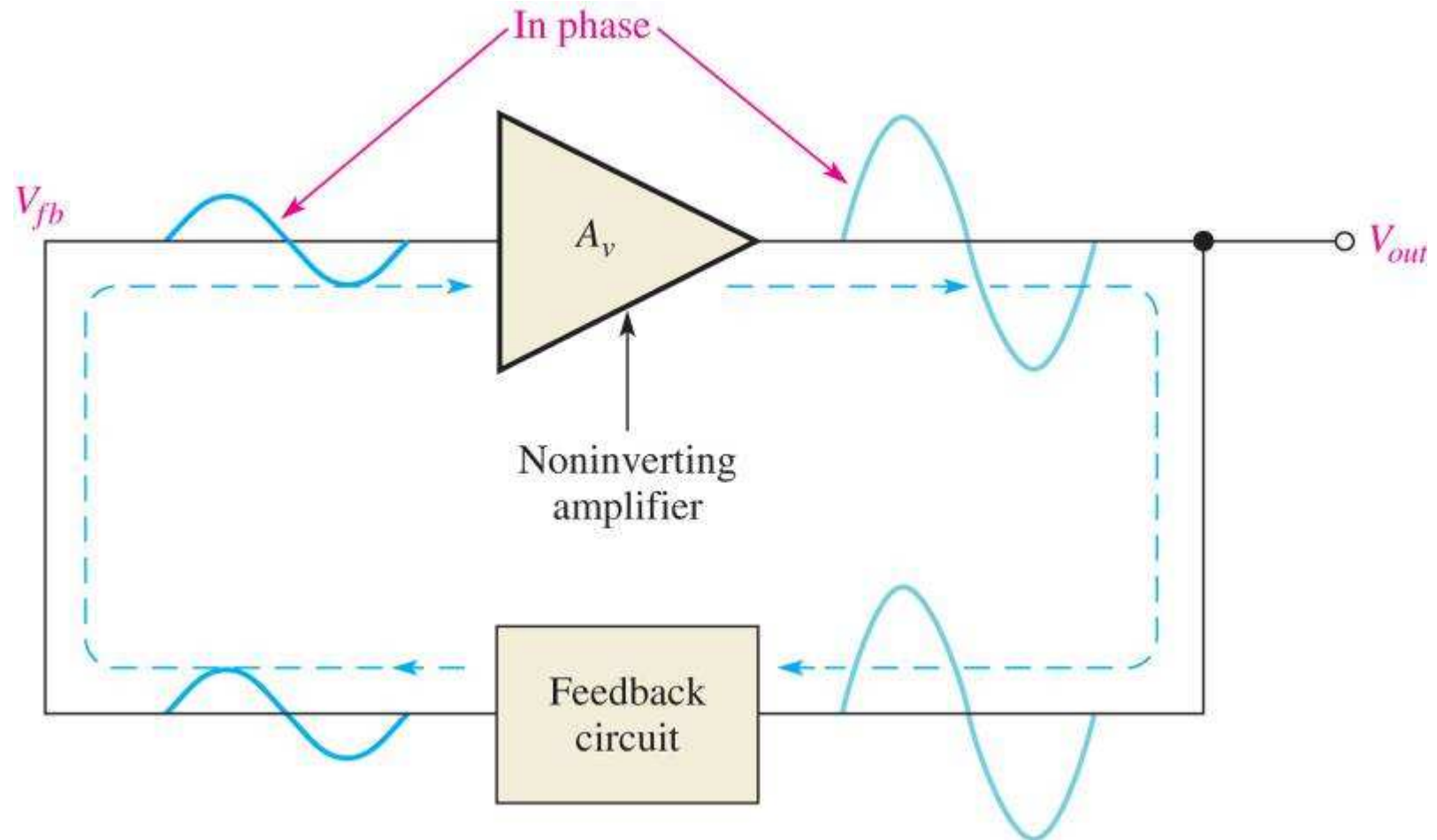
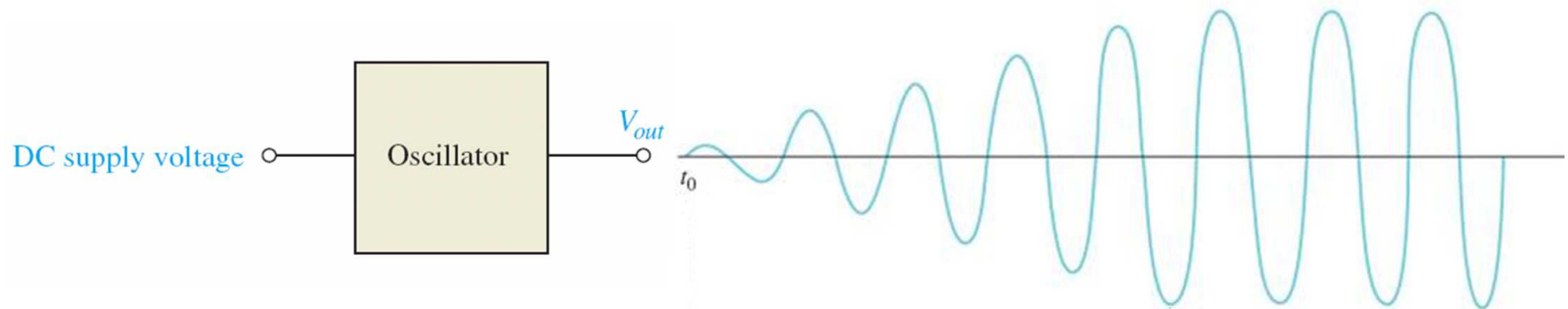
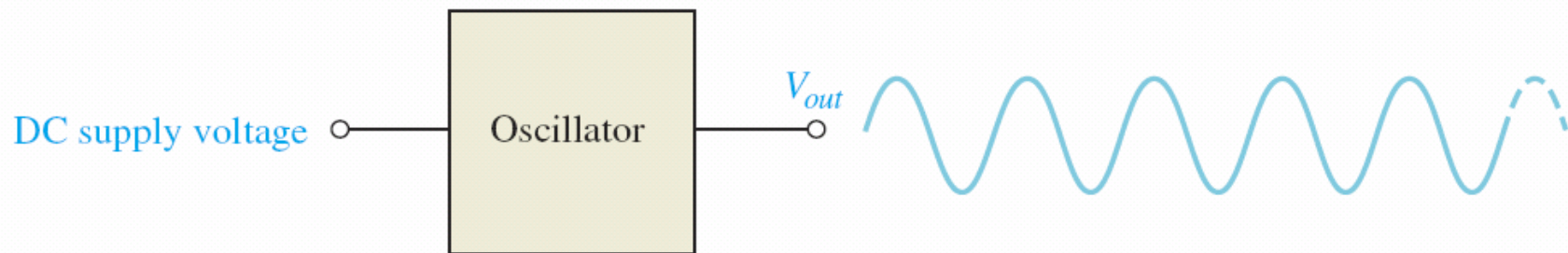


FIGURE 17-54

Conceitos básicos de um oscilador sinusoidal

An oscillator is a circuit that generates a repetitive waveform on its output. A feedback oscillator uses positive feedback from the output to sustain oscillations.



Circuitos Elétricos e Sistemas Digitais

2018-2019 - 1.º Semestre

Análise de circuitos dinâmicos (análise no tempo e em frequência)

- Circuitos de corrente alternada, Formas de onda
- Condensadores, Impediência e reatância
- Circuitos com condensadores
- Resposta em frequência de circuitos RC
- Função de transferência, Diagramas de Bode
- Decibel, Ponto -3 dB, Taxa de atenuação em dB por oitava e por década
- Resposta temporal de circuitos RC
- Circuitos RC diferenciador e integrador
- Bobines/Indutâncias, Associação de indutâncias
- Impediência e reatância indutiva
- Circuitos RL, Resposta temporal
- Resposta em frequência, Filtros RL
- Circuitos RCL série e RLC paralelo, Impedância, Ressonância
- Filtros passa-baixo, passa-alto, passa-banda, rejeita-banda
- Frequências de corte, largura de banda e rejeita banda
- Filtros, Filtros não ideais
- Filtros de ordem superior (filtros de ordem n)
- Taxa de atenuação por oitava e por década de filtros de ordem n

Circuitos de Corrente Alternada

Em corrente contínua (CC/cc), os componentes elétricos/eletrônicos passivos são caracterizados essencialmente pela respetiva **resistência elétrica**, e o carácter **capacitivo** e/ou **indutivo** dos componentes só se revela durante o estabelecimento do regime estacionário.

Em corrente alternada (CA/ca) o comportamento dos componentes passivos é caracterizados pela respetiva **impedância Z** (que é o *equivalente* à resistência em corrente contínua): em geral Z é uma grandeza complexa, isto é, tem uma parte real e uma parte imaginária.

A energia elétrica é-nos fornecida, em geral, na forma de sinais de tensão e corrente variáveis no tempo e cujo sentido se inverte periodicamente, percorrendo o seu ciclo de valores uma vez em cada período. A tensão/corrente alternada tem valor médio, durante um período, nulo.

A forma mais comum de corrente alternada é representada por uma função sinusoidal. Contudo, no início do século XIX a energia elétrica era fornecida quase exclusivamente fornecida na forma de corrente contínua.

Curiosidades históricas

A corrente contínua (CC) é correntemente gerada por **dínamos**, enquanto a corrente alternada (CA) é obtida a partir de **alternadores**. A corrente contínua apresenta algumas vantagens: as baterias podem ser usadas como sistemas de alimentação de reserva quando os dínamos falham ou em regimes de baixo consumo; os dínamos podem ser operados em paralelo de forma a aumentar a potência (o uso de alternadores em paralelo é difícil, devidos aos problemas de sincronização).

A principal vantagem da corrente alternada é a eficiência com que pode ser transmitida. A tensão alternada pode ser facilmente transformada em alta tensão, reduzindo deste modo as perdas associadas às linhas de transmissão: se a resistência da linha é R e a potência transmitida é $P = V \cdot I$, a perda na linha será $R \cdot I^2$. Assim, se a tensão transmitida for elevada e a corrente for baixa, as perdas na linha serão minimizadas.

O final do século XIX é caracterizado pela competição entre estas duas modalidades de fornecimento de energia elétrica. Vários cientistas (Thomas Edison, por exemplo) eram defensores dos sistemas de CC, mas o advento do **transformador** e a necessidade de transmitir energia elétrica da central até aos consumidores tornou os sistemas alternados dominantes. Nas primeiras redes de distribuição, a frequência dos sinais de CA era superior a 100 Hz (tipicamente 133 Hz).

No início do século XX, Nikola Tesla, o inventor do motor de indução, demonstrou que este não funcionaria de forma eficiente a frequências superiores a 100 Hz: nos Estados Unidos a frequência da CA é 60 Hz, enquanto que na Europa a distribuição é realizada a 50 Hz.

Formas de onda e funções sinusoidais

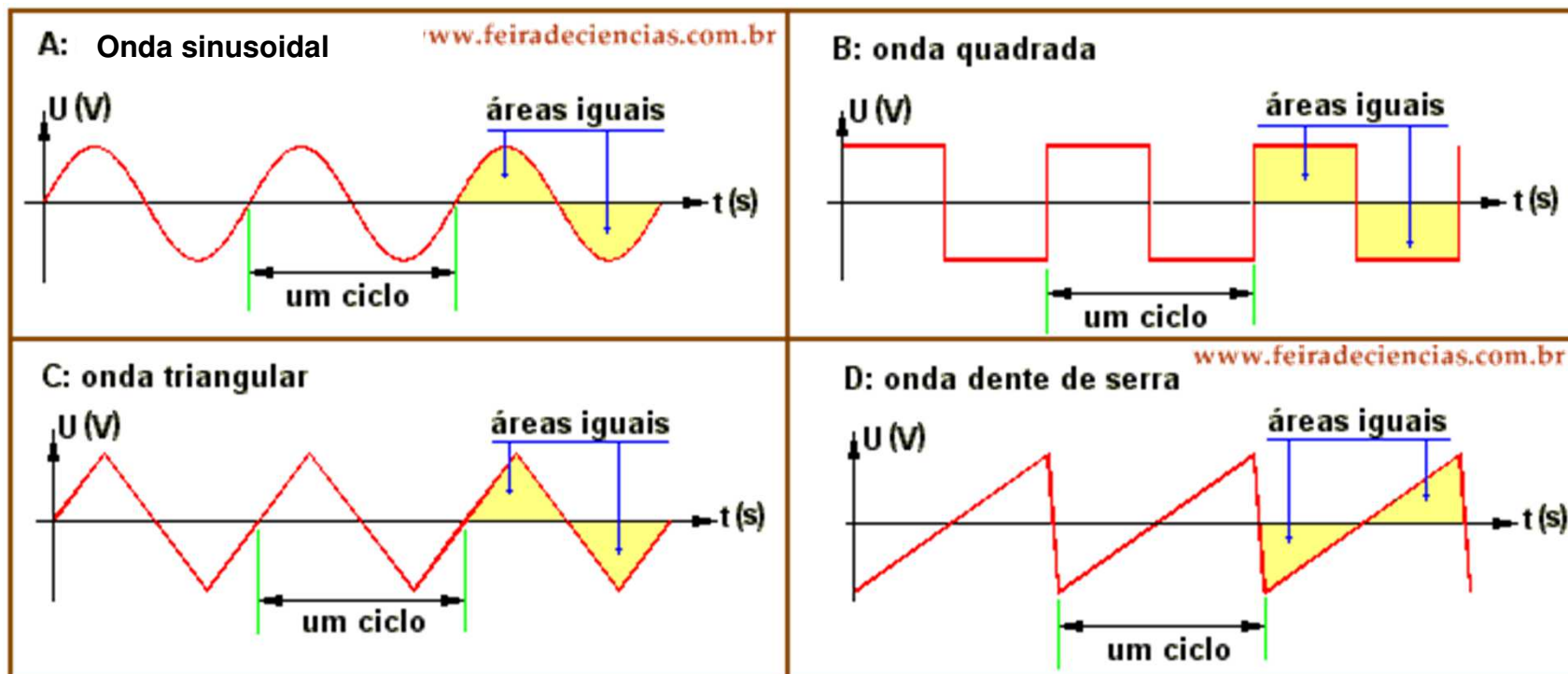
Os valores instantâneos das tensões/correntes alternadas variam no tempo, alterando periodicamente a direção da corrente/polaridade, de acordo com uma dada função denominada forma de onda. As formas de onda mais comuns são: a **onda sinusoidal**, a **onda quadrada**, a onda **triangular** e a onda **dente de serra**.

A forma de onda sinusoidal é a corrente/tensão alternada fundamental. Todas as outras formas de onda periódicas podem ser obtidas a partir da combinação de ondas sinusoidais (a onda sinusoidal fundamental e os seus harmónicos). A onda sinusoidal fica completamente caracterizada pelo período/frequência, fase, e máximos e mínimos.

Há cinco valores característicos de uma forma de onda sinusoidal: o valor instantâneo (v , i), o valor de pico (V_p , I_p), o valor de pico-a-pico (V_{pp} , I_{pp}), o valor eficaz (V_{ef} , I_{ef}) e o valor médio (V_m , I_m). Se a onda for puramente sinusoidal o valor de pico corresponde à amplitude da onda V ou I . A fase da onda é uma medida angular que especifica o valor da onda relativamente a uma referência, num dado instante de tempo.

Em corrente direta(DC)/contínua (CC/cc) no regime estacionário os componentes são caracterizados apenas pela respetiva resistência elétrica, R , e o **carácter capacitivo e/ou indutivo dos componentes só se revela durante o estabelecimento do regime estacionário, i.e., quando $t < 5\tau$ s**, onde representa chamada constante de tempo do circuito, tipicamente dada pelo produto da resistência pela capacidade, em circuitos com resistências e condensadores, ou da resistência pela indutância, no caso de circuitos com resistências e bobines.

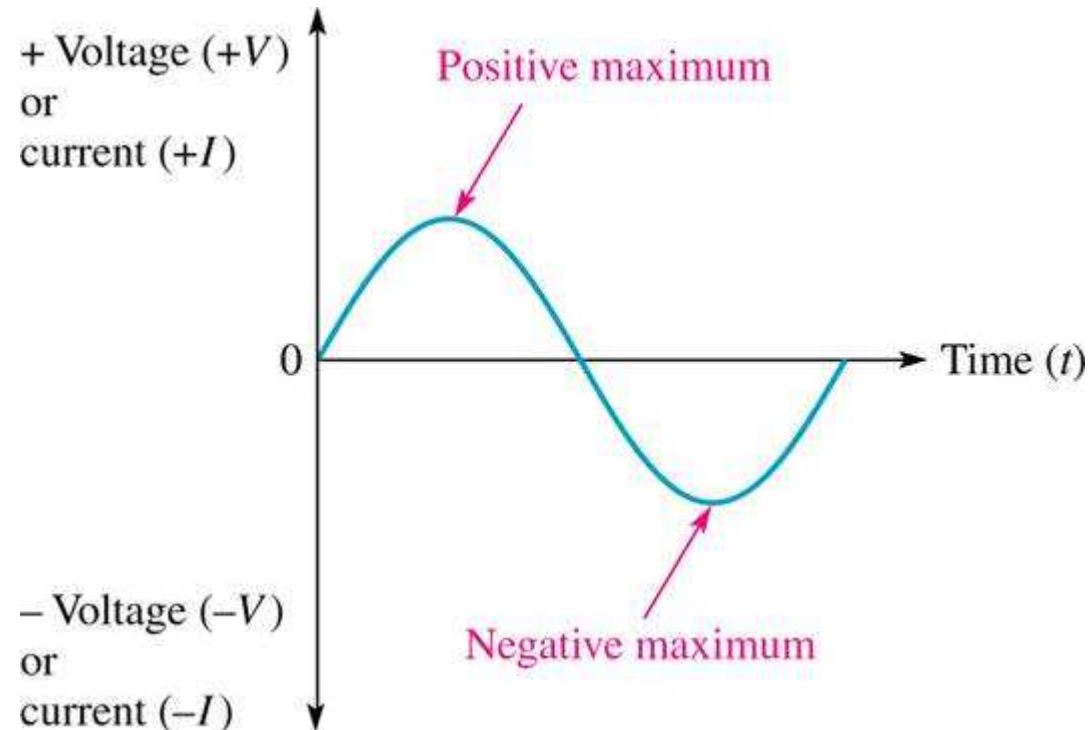
Formas de onda/sinais comuns



http://www.feiradeciencias.com.br/sala15/15_07.asp

Forma de onda sinusoidal/Sinal sinusoidal

The sinusoidal waveform (sine wave) is the fundamental alternating current (ac) and alternating voltage waveform.



Electrical sine waves are named from the mathematical function with the same shape.

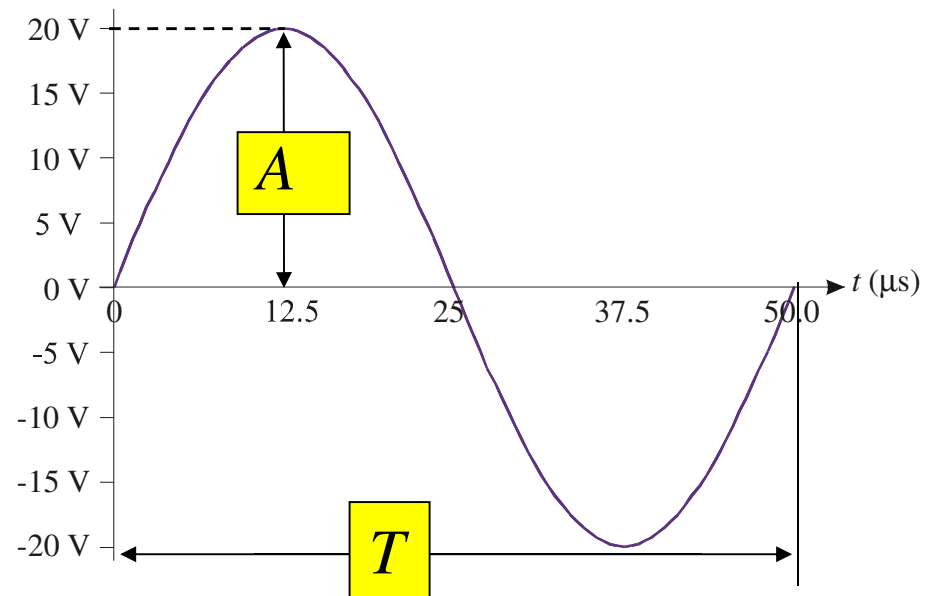
Sinais sinusoidais: amplitude e período

Sine waves are characterized by the **amplitude and period**.

The **amplitude** is the maximum value of a voltage or current; the **period** is the time interval for one complete cycle.

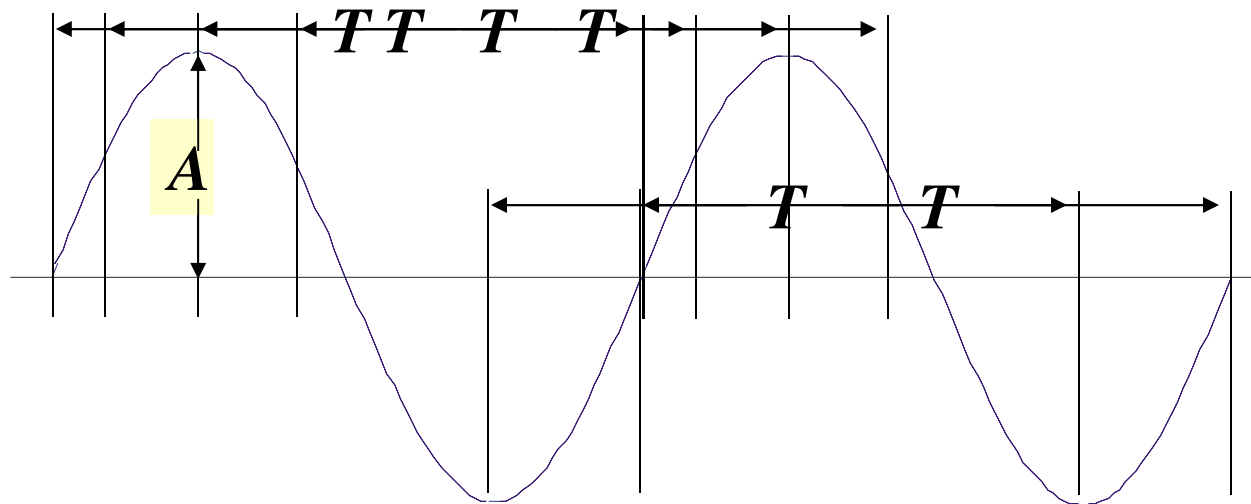
The amplitude (A) of this sine wave is **20 V**

The period is **50.0 ms**



Período de um sinal sinusoidal

The period of a sine wave can be measured between any two corresponding points on the waveform.

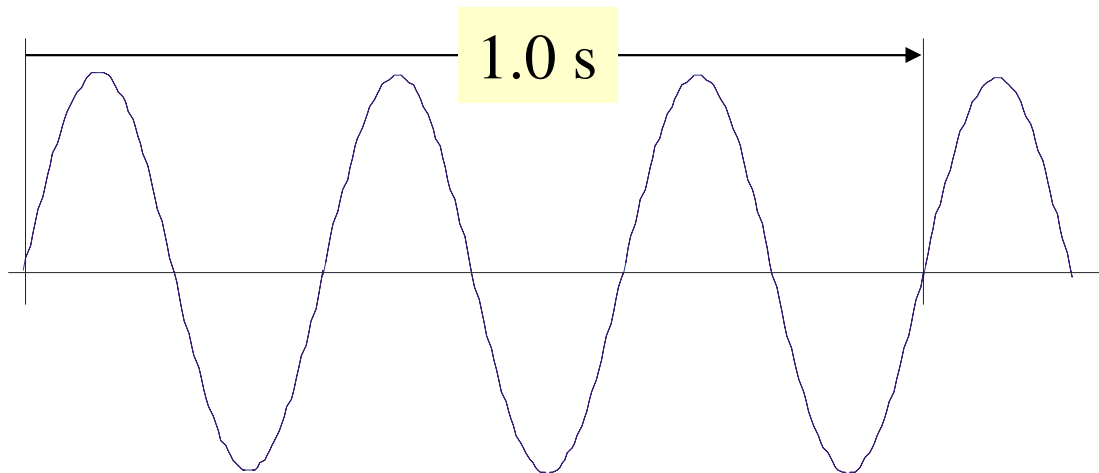


By contrast, the amplitude of a sine wave is only measured from the center to the maximum point.

Frequência e período de um sinal sinusoidal

Frequency (f) is the number of cycles that a sine wave completes in one second.
Frequency is measured in **hertz** (Hz).

If 3 cycles of a wave occur in one second, the frequency is **3.0 Hz**



The period and frequency are reciprocals of each other:

$$f = \frac{1}{T}$$

and

$$T = \frac{1}{f}$$

Thus, if you know one, you can easily find the other.

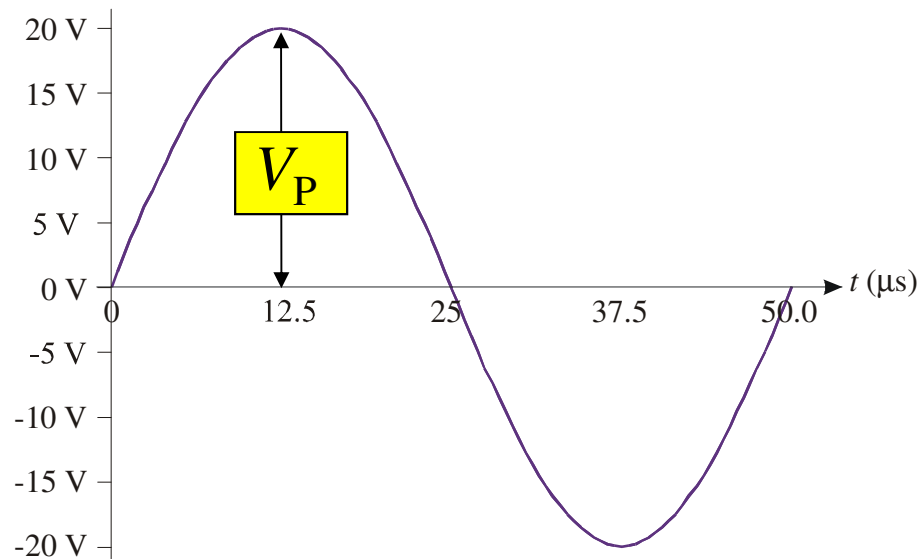
(The $1/x$ key on your calculator is handy for converting between f and T .)

If the period is 50 ms, the frequency is **0.02 MHz = 20 kHz**.

Tensão sinusoidal: tensão de pico

There are several ways to specify the voltage of a sinusoidal voltage waveform. The amplitude of a sine wave is also called the **peak value**, abbreviated as V_P for a voltage waveform.

The **peak voltage** of this waveform is **20 V**.

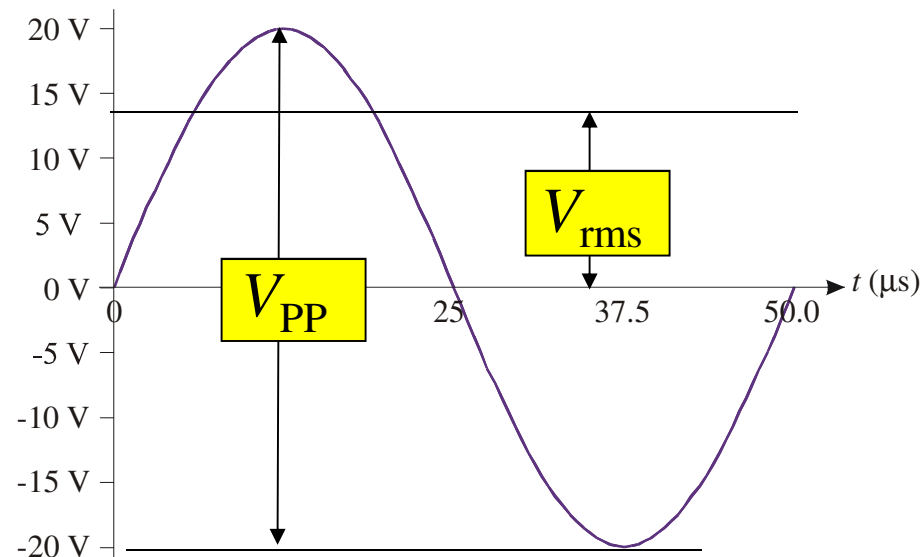


Tensão sinusoidal: tensão pico-a-pico valor eficaz

The voltage of a sine wave can also be specified as either the peak-to-peak or the rms value. The peak-to-peak is twice the peak value. The rms value is 0.707 times the peak value.

The peak-to-peak voltage is **40 V**.

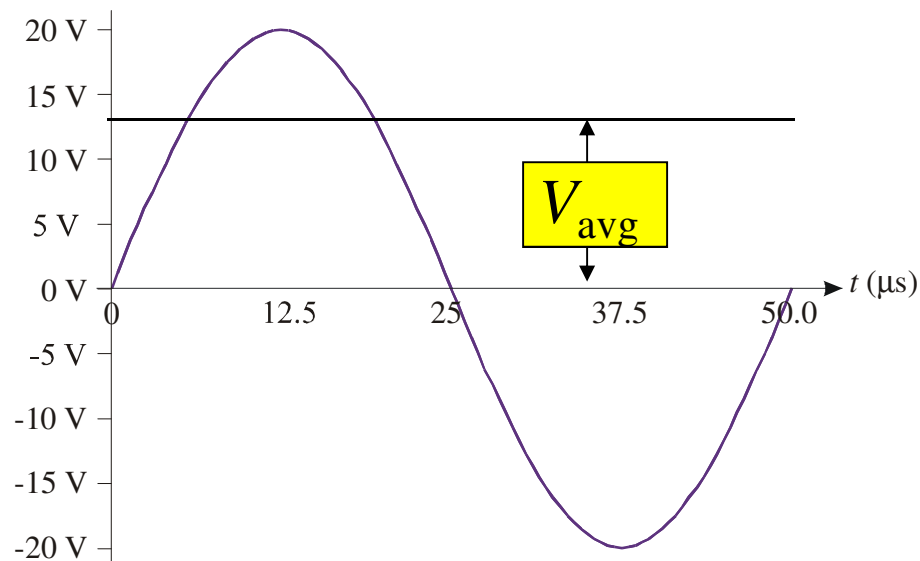
The rms voltage is **14.1 V**.



Tensão sinusoidal: valor médio (meio período)

For some purposes, the average value (actually the half-wave average) is used to specify the voltage or current. By definition, the average value is as 0.637 times the peak value.

The average value for the sinusoidal voltage is **12.7 V**.



Potência em circuitos resistivos

The power relationships developed for dc circuits apply to ac circuits except you must use rms values in ac circuits when calculating power.

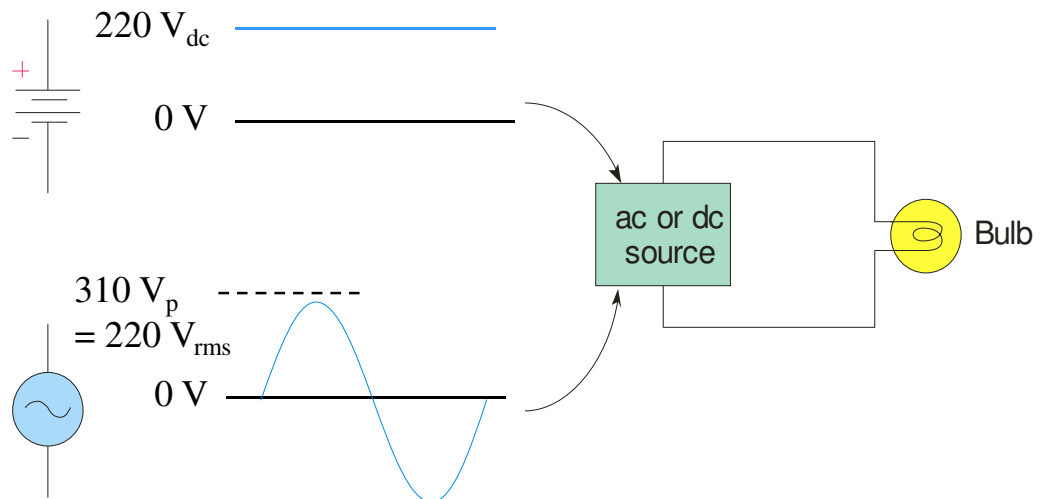
The power formulas are:

$$P = V_{\text{rms}} I_{\text{rms}}$$

$$P = \frac{V_{\text{rms}}^2}{R}$$

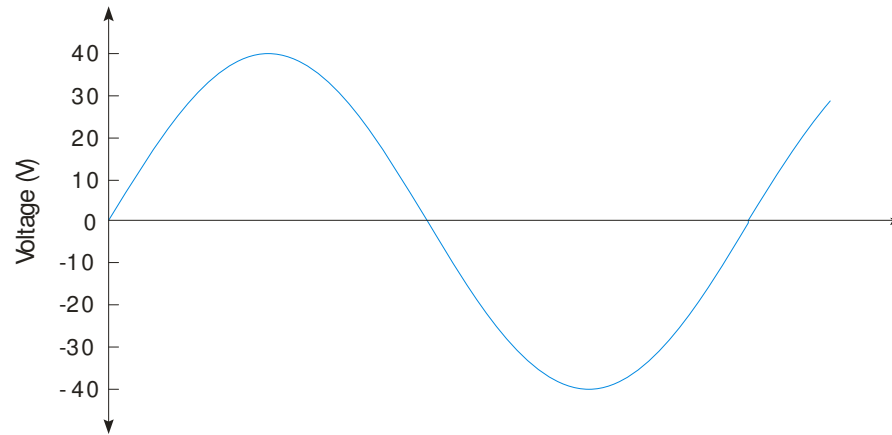
$$P = I_{\text{rms}}^2 R$$

For example, the dc and the ac sources produce the same power to the bulb:



Power in resistive AC circuits

Assume a sine wave with a peak value of 40 V is applied to a 100 Ω resistive load. What power is dissipated?

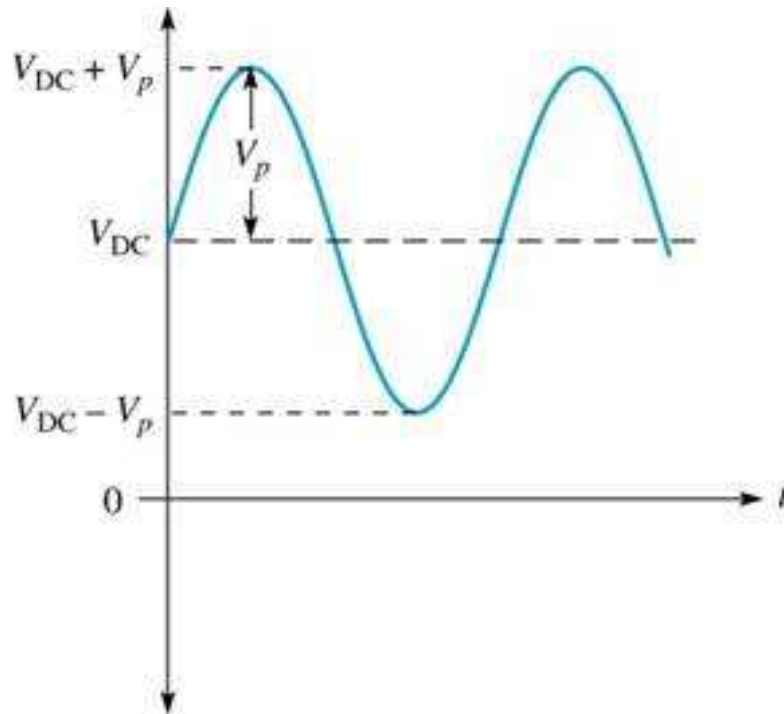


$$V_{\text{rms}} = 0.707 \times V_p = 0.707 \times 40 \text{ V} = 28.3 \text{ V}$$

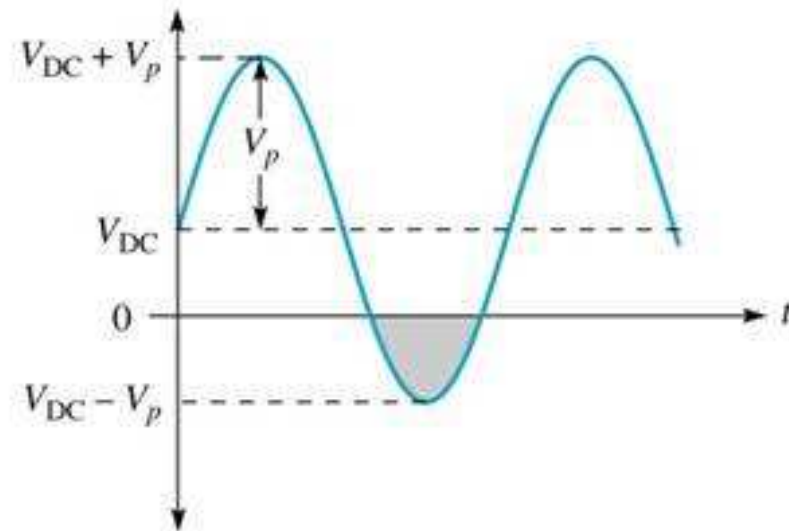
$$P = \frac{V_{\text{rms}}^2}{R} = \frac{28.3 \text{ V}^2}{100 \Omega} = 8 \text{ W}$$

Sobreposição de tensões dc e ac

Frequently dc and ac voltages are together in a waveform. They can be added algebraically, to produce a composite waveform of an ac voltage “riding” on a dc level.



(a) $V_{DC} > V_p$. The sine wave never goes negative.



(b) $V_{DC} < V_p$. The sine wave reverses polarity during a portion of its cycle, as indicated by the gray area.

Exercícios

1. In Europe, the frequency of ac utility voltage is 50 Hz. The period is

- a. 8.3 ms b. 20.0 ms c. 60 ms d. 60 s

3. An example of an equation for a waveform that lags the reference is

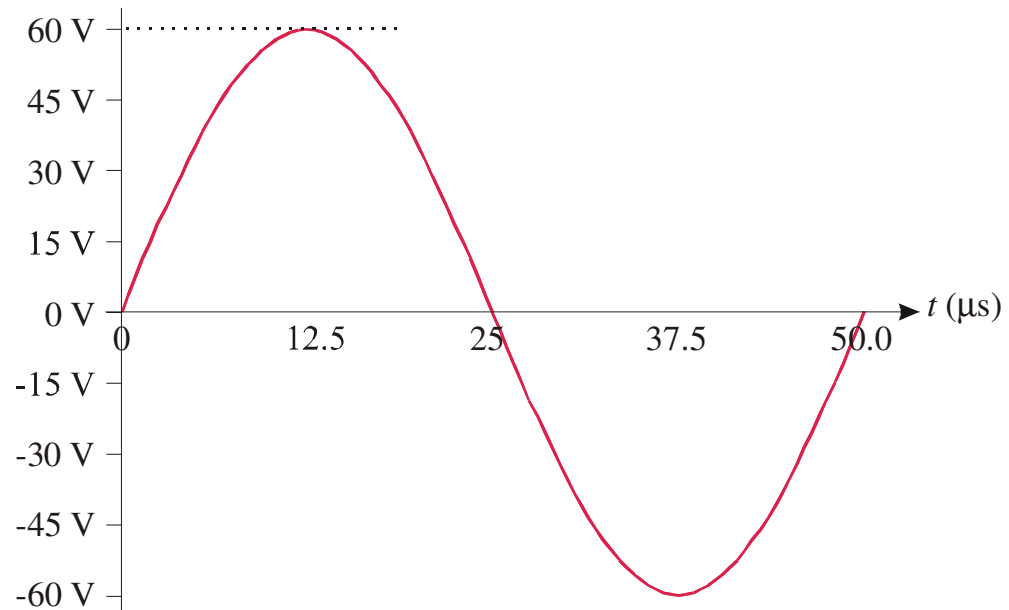
- a. $v = -40 \text{ V} \sin(\theta)$ b. $v = 100 \text{ V} \sin(\theta + 35^\circ)$ c. $v = 5.0 \text{ V} \sin(\theta - 27^\circ)$ d. $v = 27 \text{ V}$

4. In the equation $v = V_p \sin \theta$, the letter v stands for the

- a. peak value b. average value c. rms value d. instantaneous value

8. For the waveform shown, the same power would be delivered to a load with a dc voltage of

- a. 21.2 V b. 37.8 V
c. 42.4 V d. 60.0 V



Corrente alternada sinusoidal
Representação complexa e fasores

Representação de tensões sinusoidais

Instantaneous values of a wave are shown as v or i . The equation for the instantaneous voltage (v) of a sine wave is

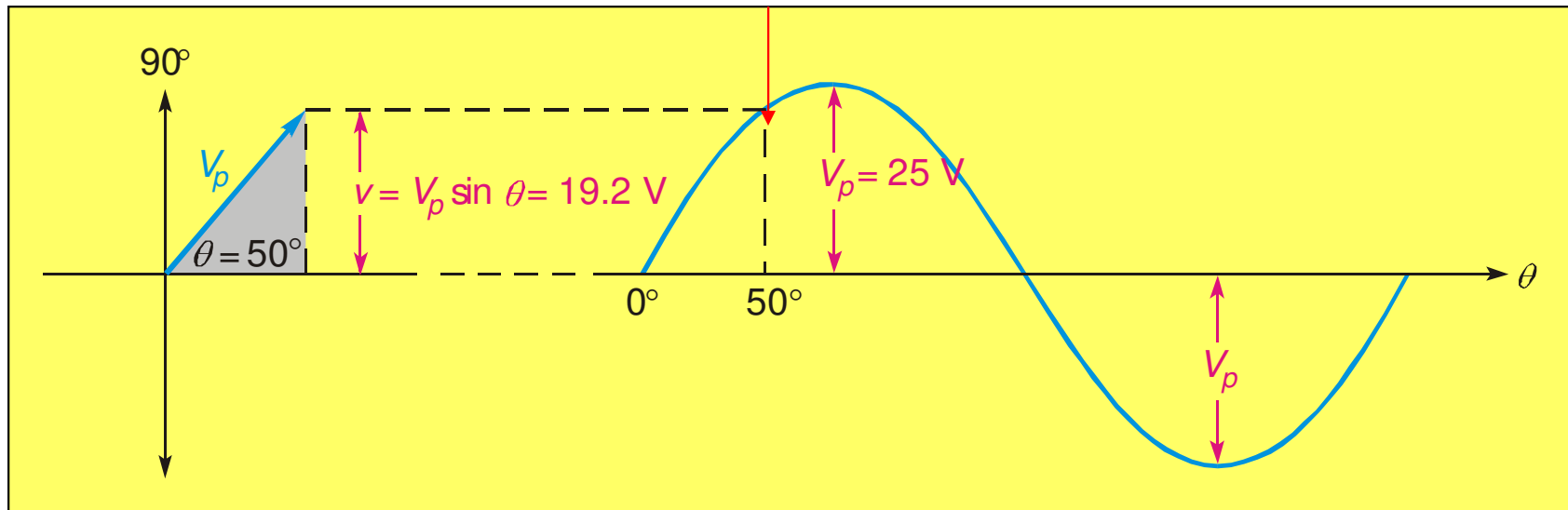
$$v = V_p \sin \theta$$

where $V_p =$ Peak voltage

$\theta =$ Angle in rad or degrees

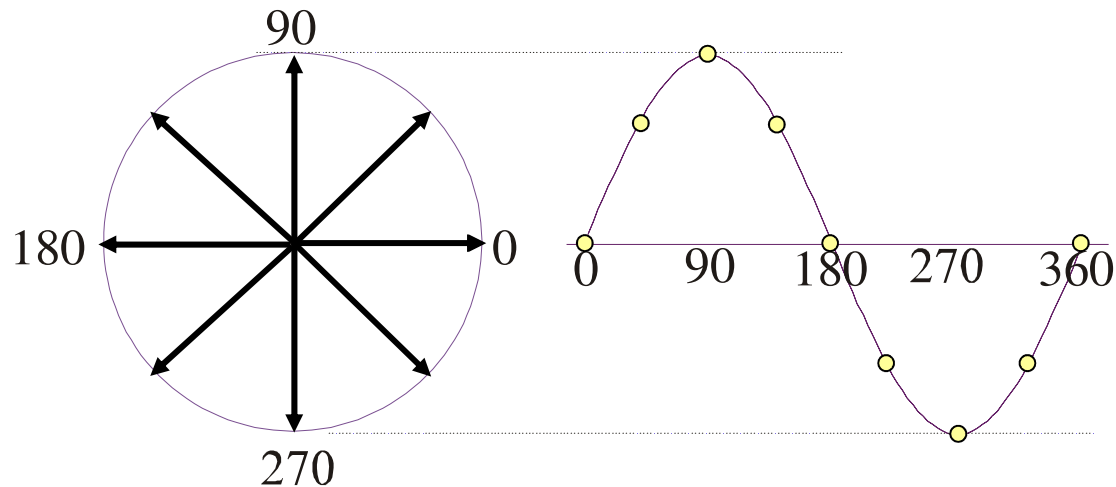
If the peak voltage is 25 V, the instantaneous voltage at 50 degrees is **19.2 V**

A plot of the example in the previous slide (peak at 25 V) is shown. The instantaneous voltage at 50° is 19.2 V as previously calculated.



Fasor e fase inicial

The sine wave can be represented as the projection of a vector rotating at a constant rate. This rotating vector is called a **phasor**. Phasors are useful for showing the phase relationships in ac circuits.



The phase of a sine wave is an angular measurement that specifies the position of a sine wave relative to a reference. To show that a sine wave is shifted to the left or right of this reference, a term is added to the equation given previously.

$$v = V_P \sin(\theta \pm \phi)$$

where ϕ = Phase shift

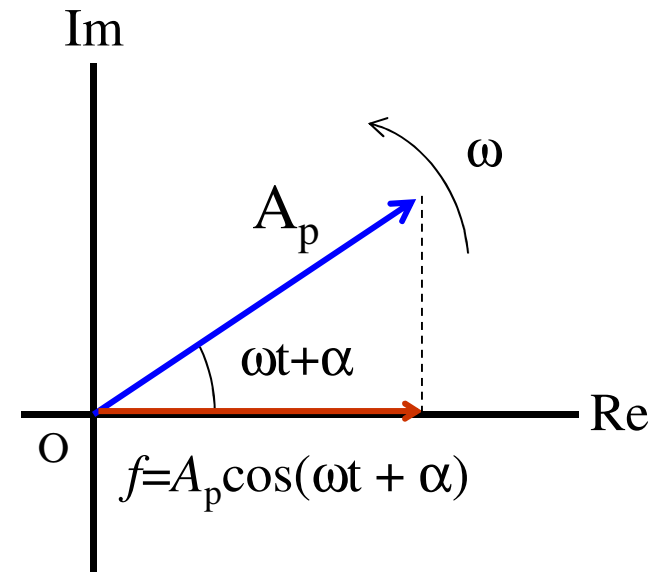
Representação Complexa e Notação Fasorial

É comum em corrente alternada tratar as correntes/tensões sinusoidais, $f(t)=A_p \cos(\omega t+\alpha)$, como grandezas complexas, representando-as usando, quer a notação exponencial, $f(t)=A_p e^{j(\omega t+\alpha)}$, quer a notação fasorial, $f=A_p e^{j(\omega t+\alpha)}$.

O fasor f corresponde a um vetor no plano complexo, com origem na origem do referencial, cujo comprimento é igual à amplitude do sinal sinusoidal (A_p), e rodado de um ângulo $\omega t+\alpha$ (fase) relativamente ao eixo horizontal:

$$f(t)=A_p \cos(\omega t+\alpha) \rightarrow f=A e^{j(\omega t)}, \text{ onde } A \text{ representa o complexo } A_p e^{j\alpha}.$$

O valor instantâneo da grandeza sinusoidal é dado pela projeção do vetor no eixo horizontal: $f(t)=A_p \cos(\omega t + a)$.



A “unidade SI” de ângulo plano é o radiano (rad).

Representação Complexa e Notação Fasorial

Uma vez que a dependência temporal da tensão e da corrente é conhecida e é a mesma em qualquer ponto de um **circuito linear**, é comum, para simplificar a escrita, representar as grandezas apenas pelas suas amplitudes e fase iniciais, i.e., pelo fasor:

$$A = A_p e^{j\alpha}$$

$$\text{fasor da tensão } V = V_p e^{j\alpha};$$

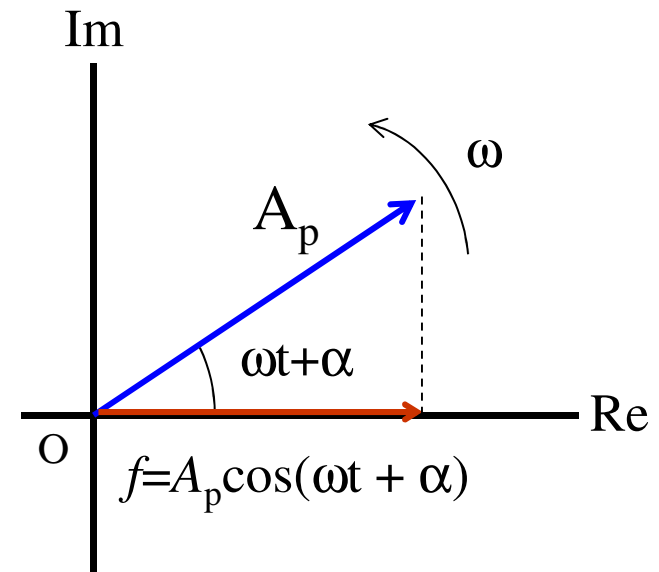
$$\text{fasor da corrente } I = I_p e^{j\phi},$$

Cada um destes representando:

$$v(t) = V_p \cos(\omega t + \alpha)$$

e

$$i(t) = I_p \cos(\omega t + \phi), \quad \text{respectivamente].}$$

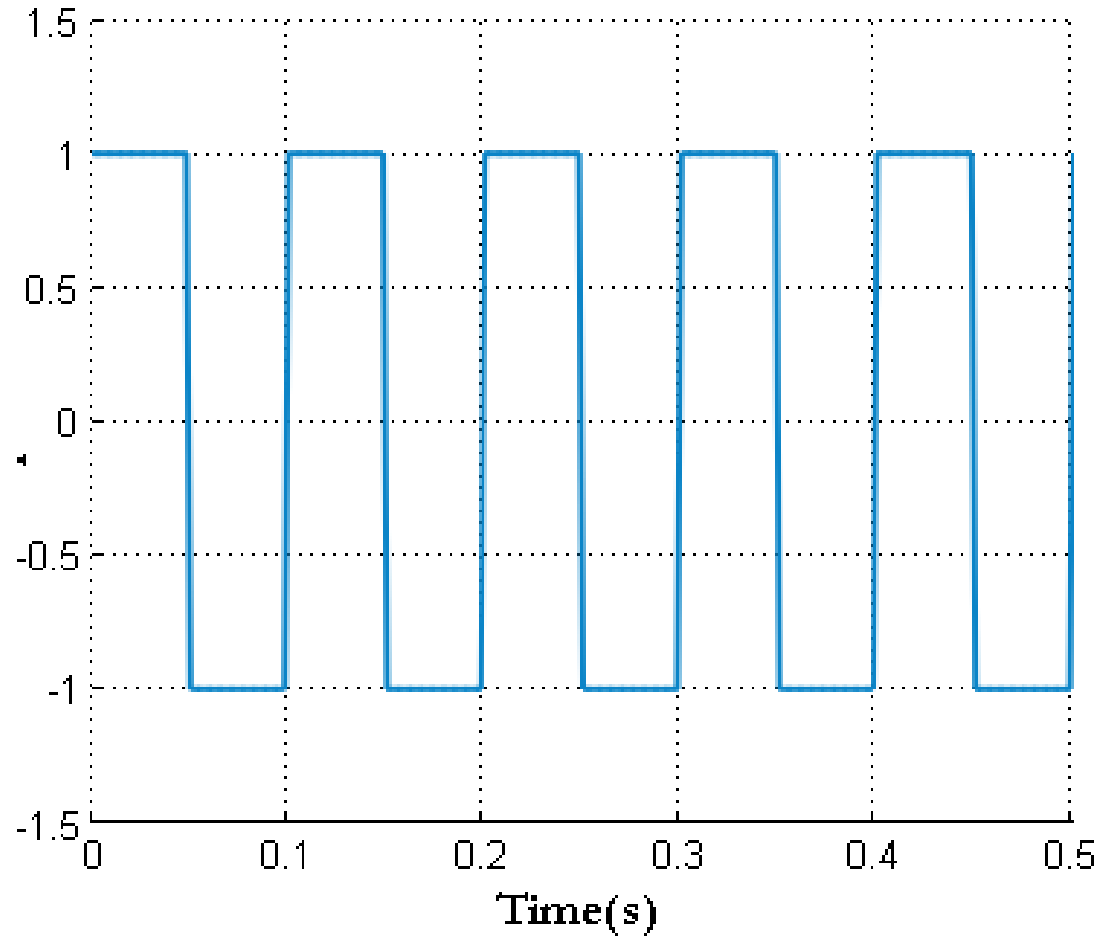


Corrente alternada

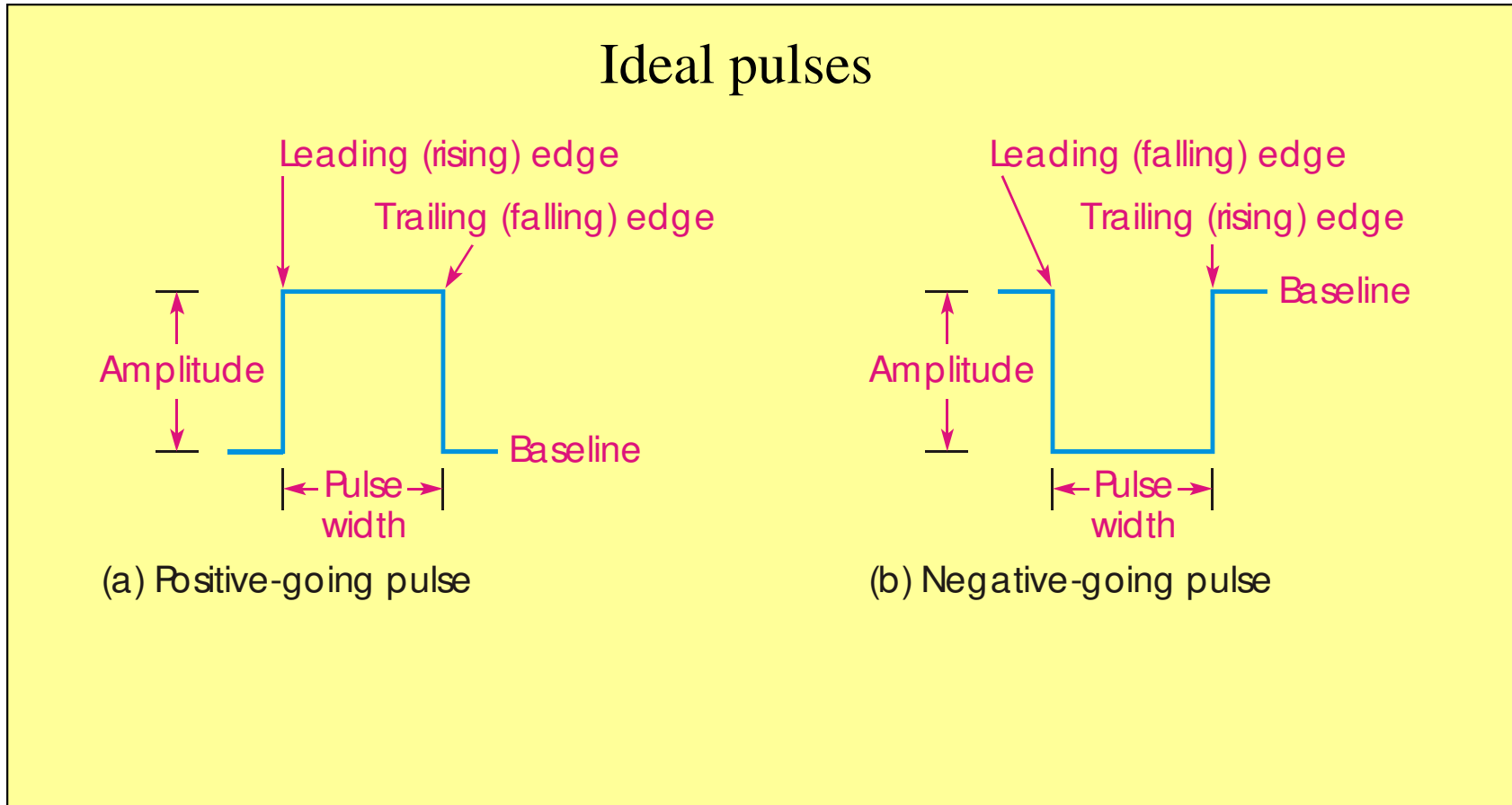
Formas de onda não sinusoidais

Onda quadrada

Square Wave $f=10\text{Hz}$

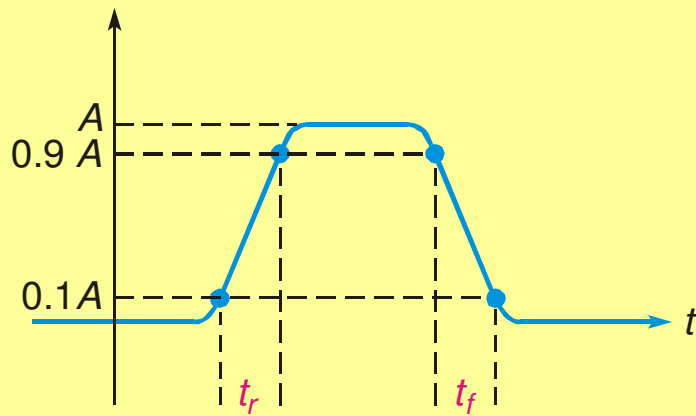


Pulsos ideais

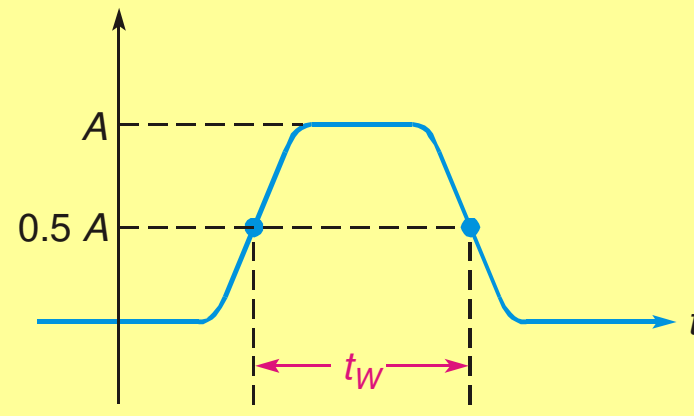


Pulsos reais

Non-ideal pulses



(a) Rise and fall times



(b) Pulse width

Notice that rise and fall times are measured between the 10% and 90% levels whereas pulse width is measured at the 50% level.

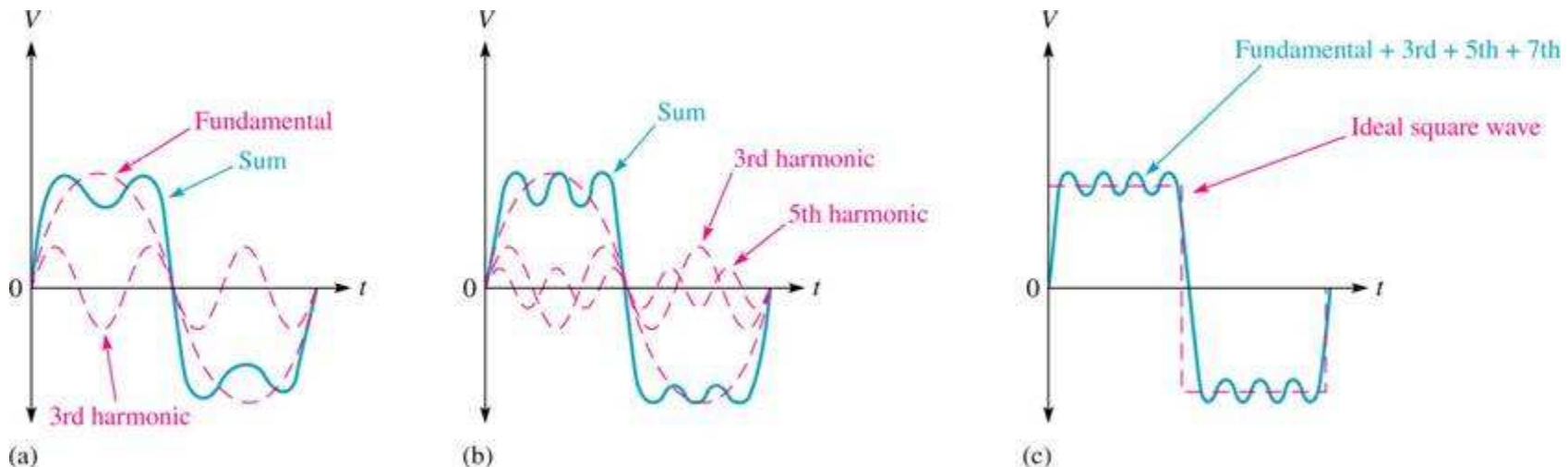
Harmónicos

All repetitive non-sinusoidal waveforms are composed of a **fundamental frequency** (repetition rate of the waveform) and **harmonic frequencies**.

Odd harmonics are frequencies that are odd multiples of the fundamental frequency.

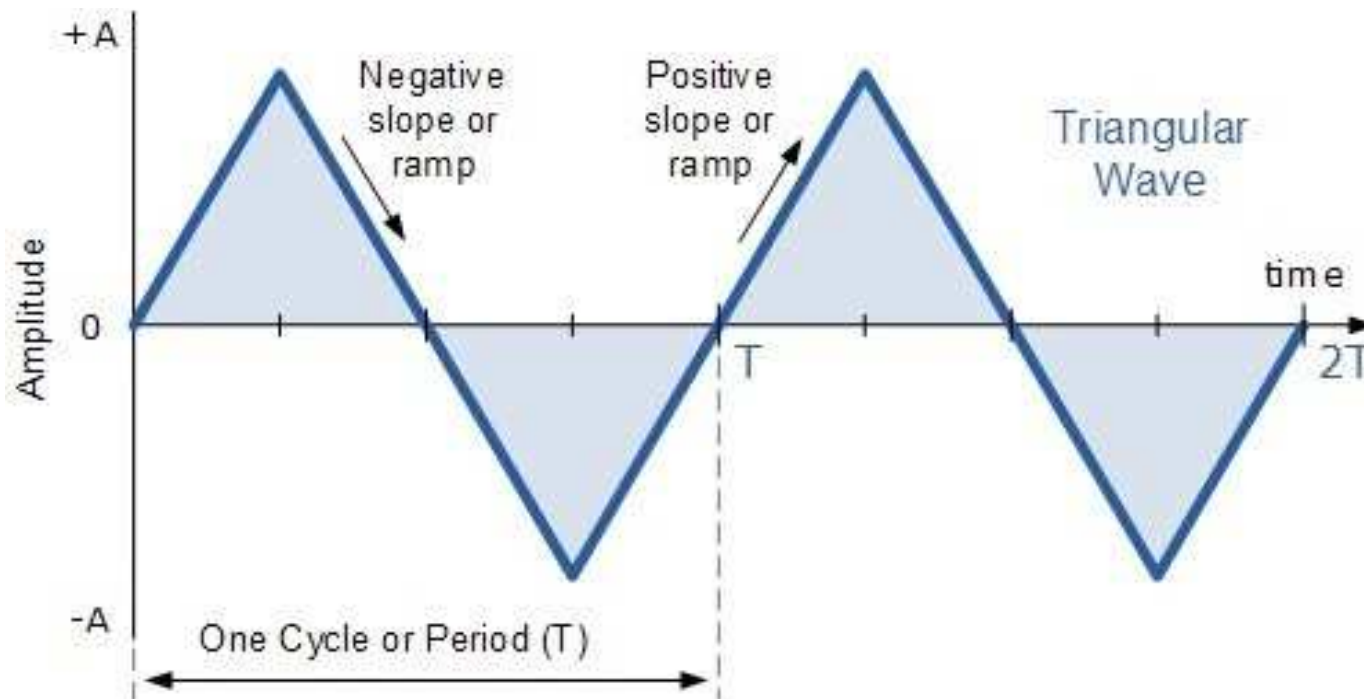
Even harmonics are frequencies that are even multiples of the fundamental frequency.

A square wave is composed only of the fundamental frequency and odd harmonics (of the proper amplitude).



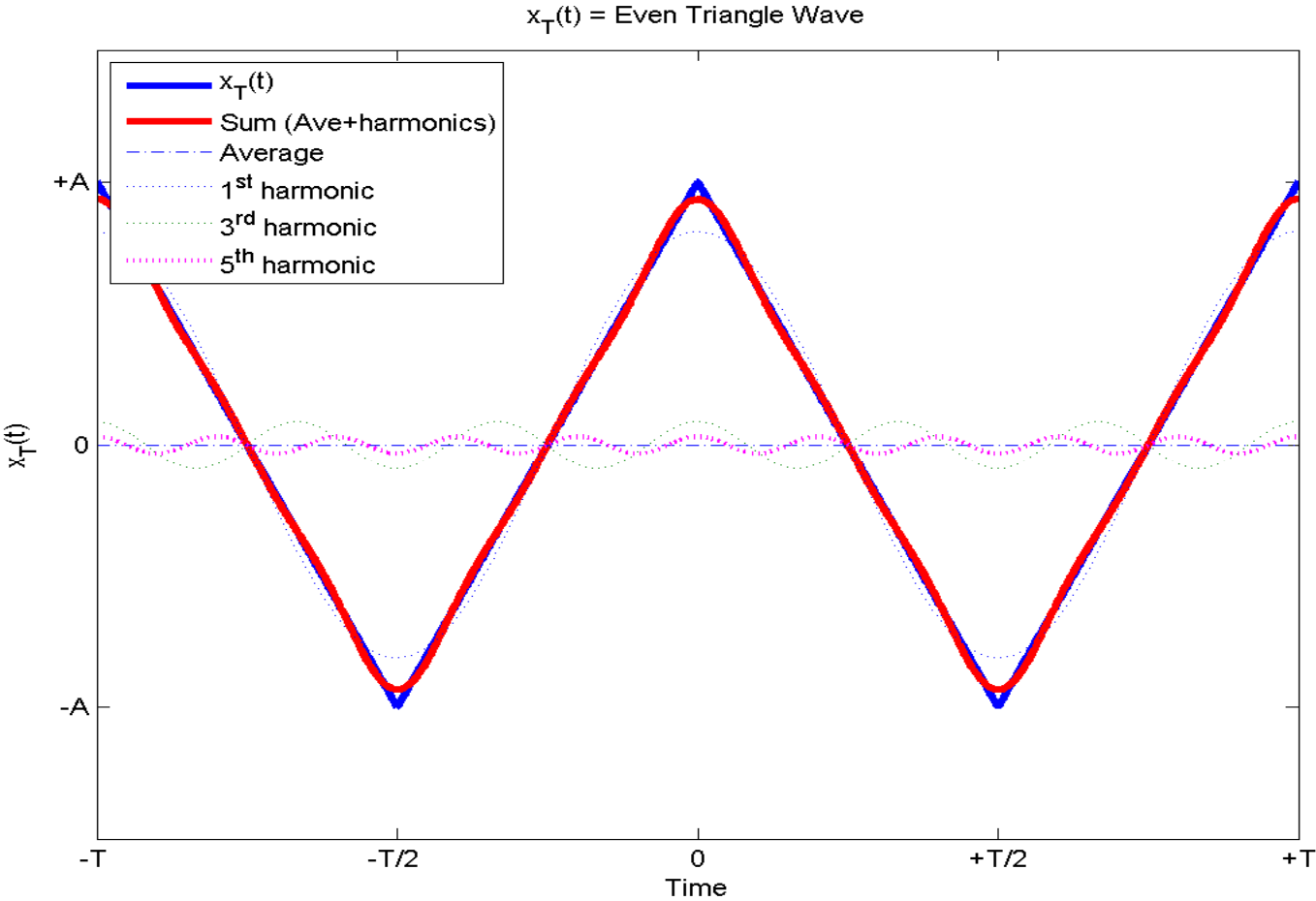
Onde triangular

Triangular waveforms have positive-going and negative-going ramps of equal duration.



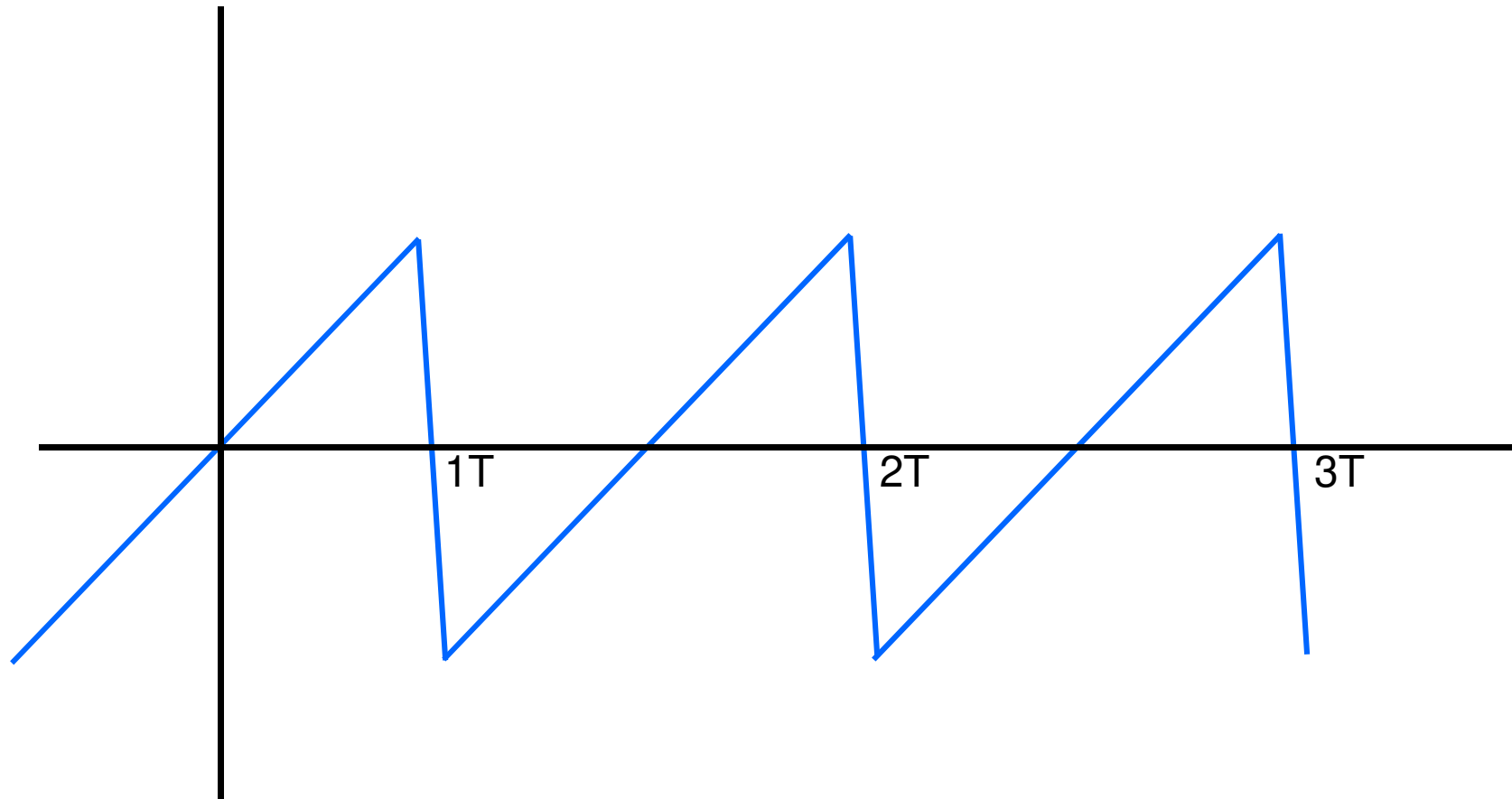
<https://www.quora.com/How-do-I-convert-a-triangular-wave-into-a-square-wave>

Série de Fourier de uma onda triangular

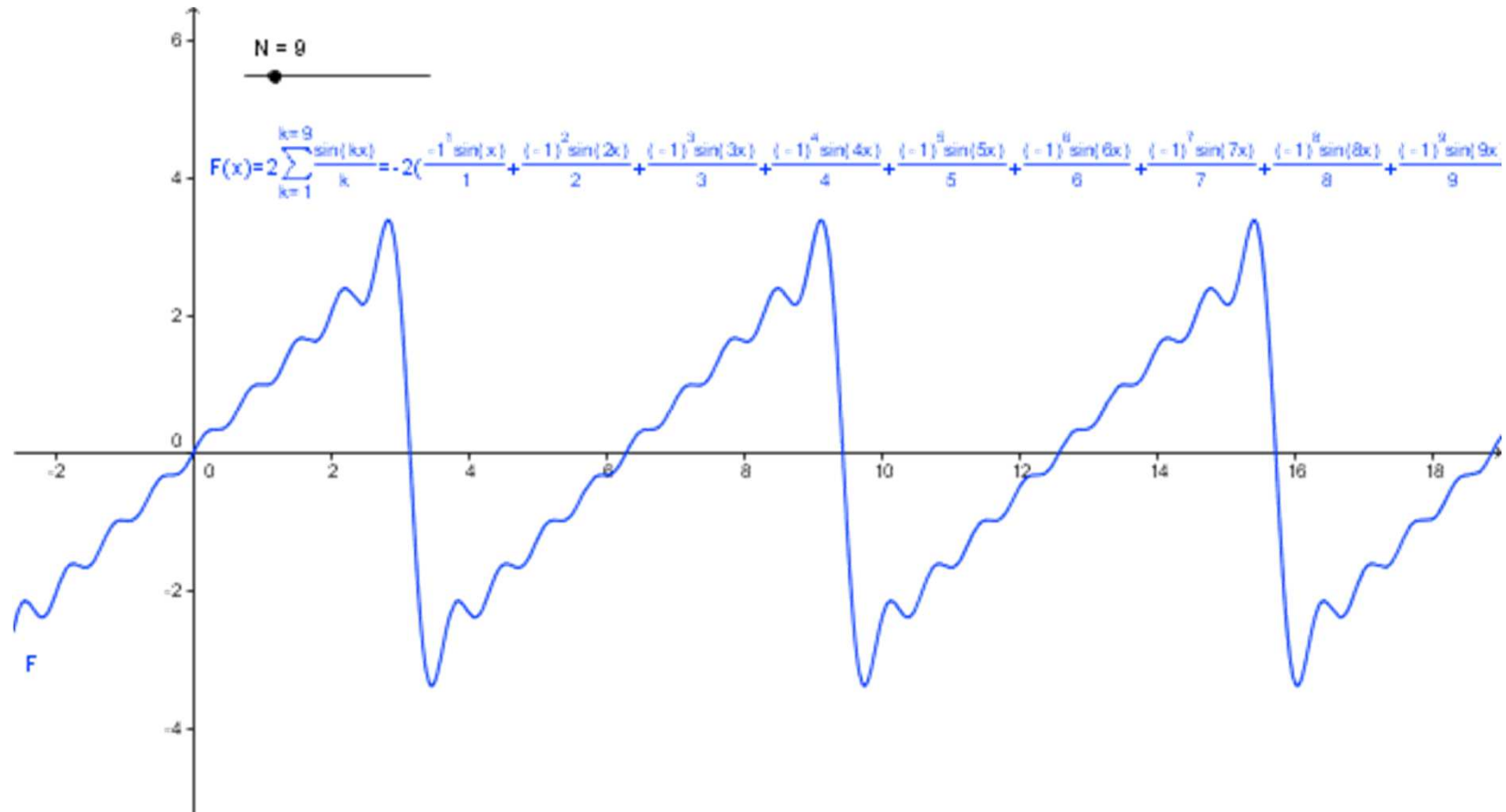


Função dente-de-serra

The sawtooth waveform consists of two ramps, one of much longer duration than the other.

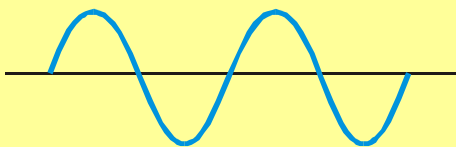
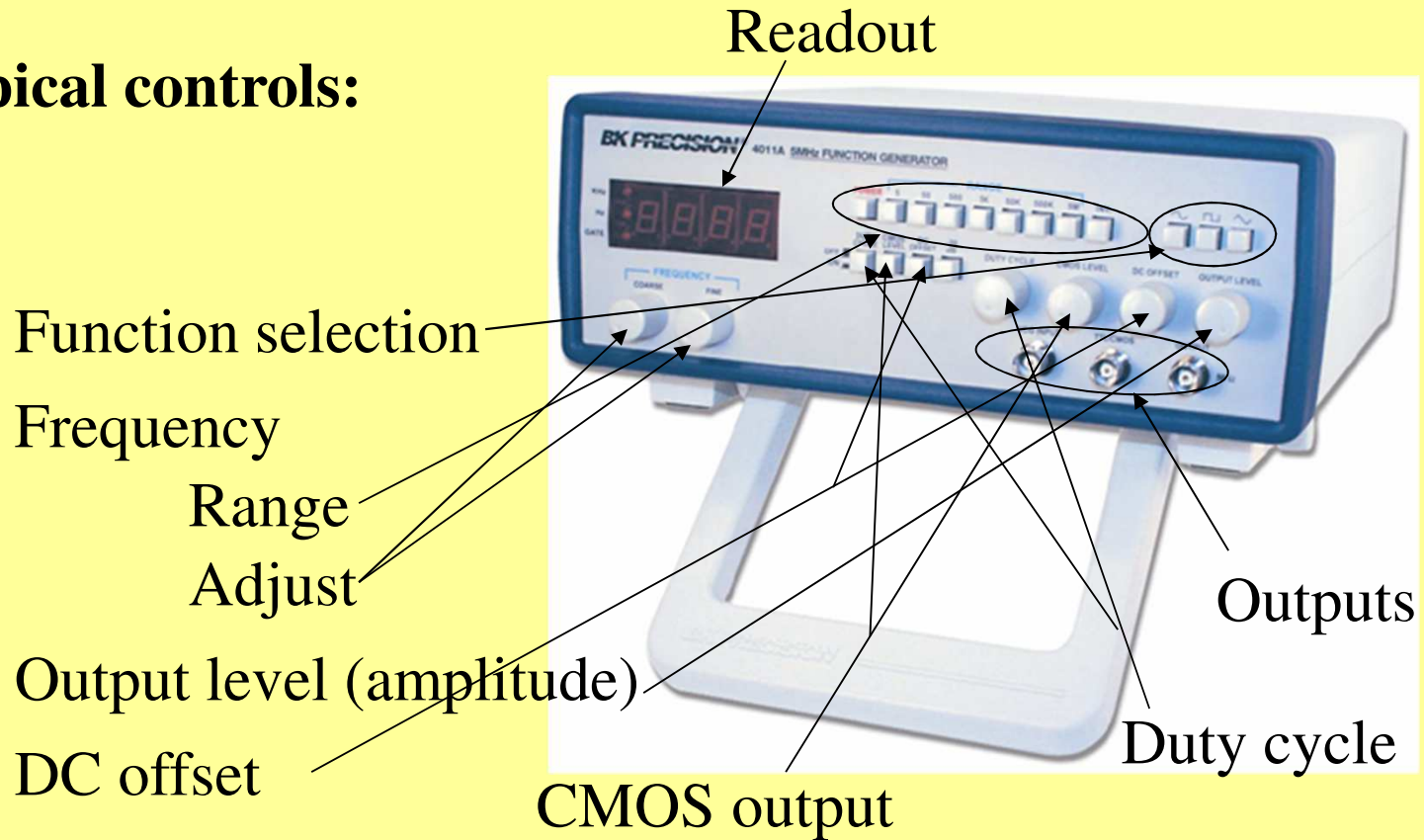


Série de Fourier da função dente-de-serra



Gerador de funções/sinais

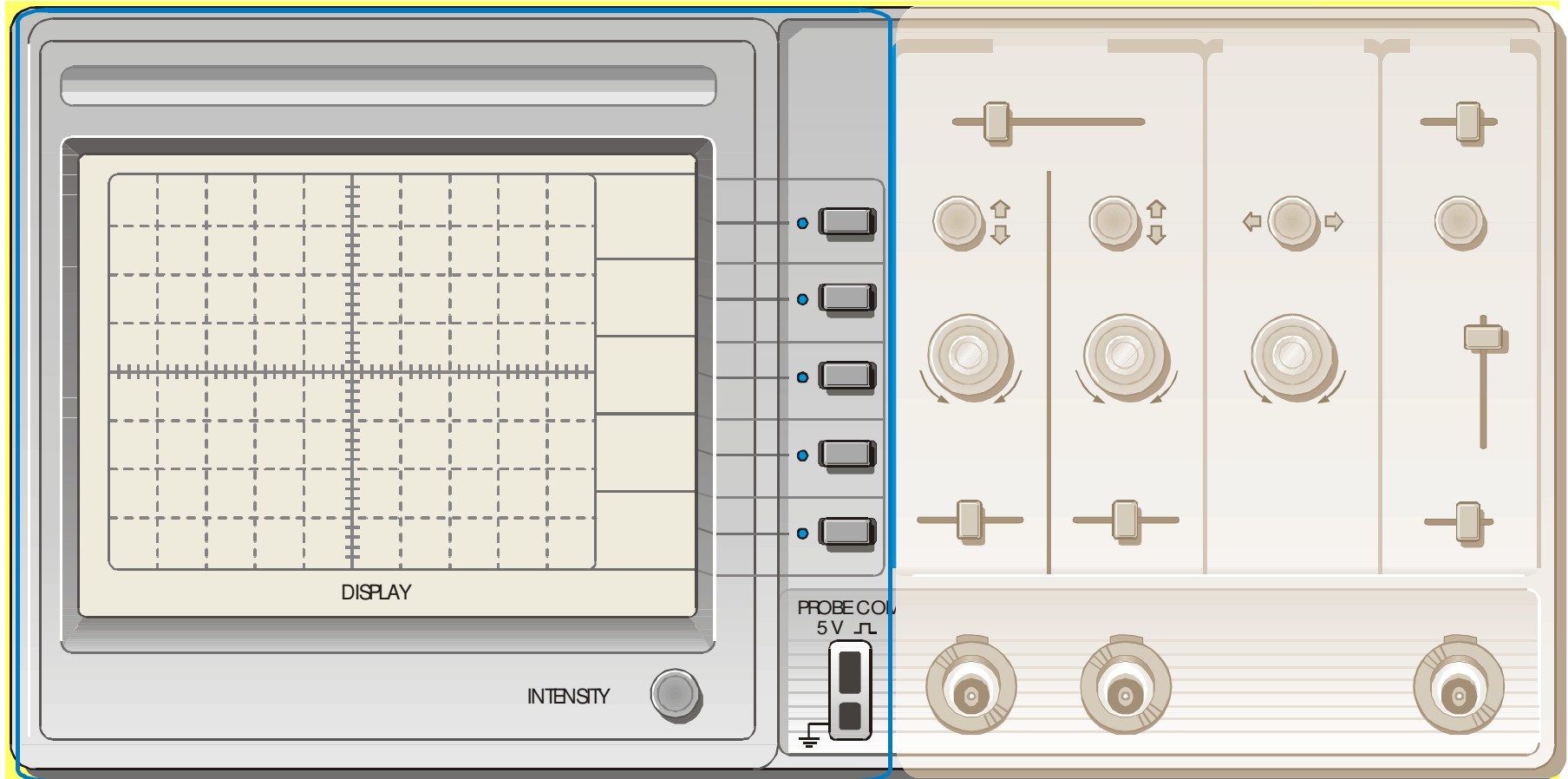
Typical controls:



Osciloscópios

Display

Vertical Horizontal Trigger



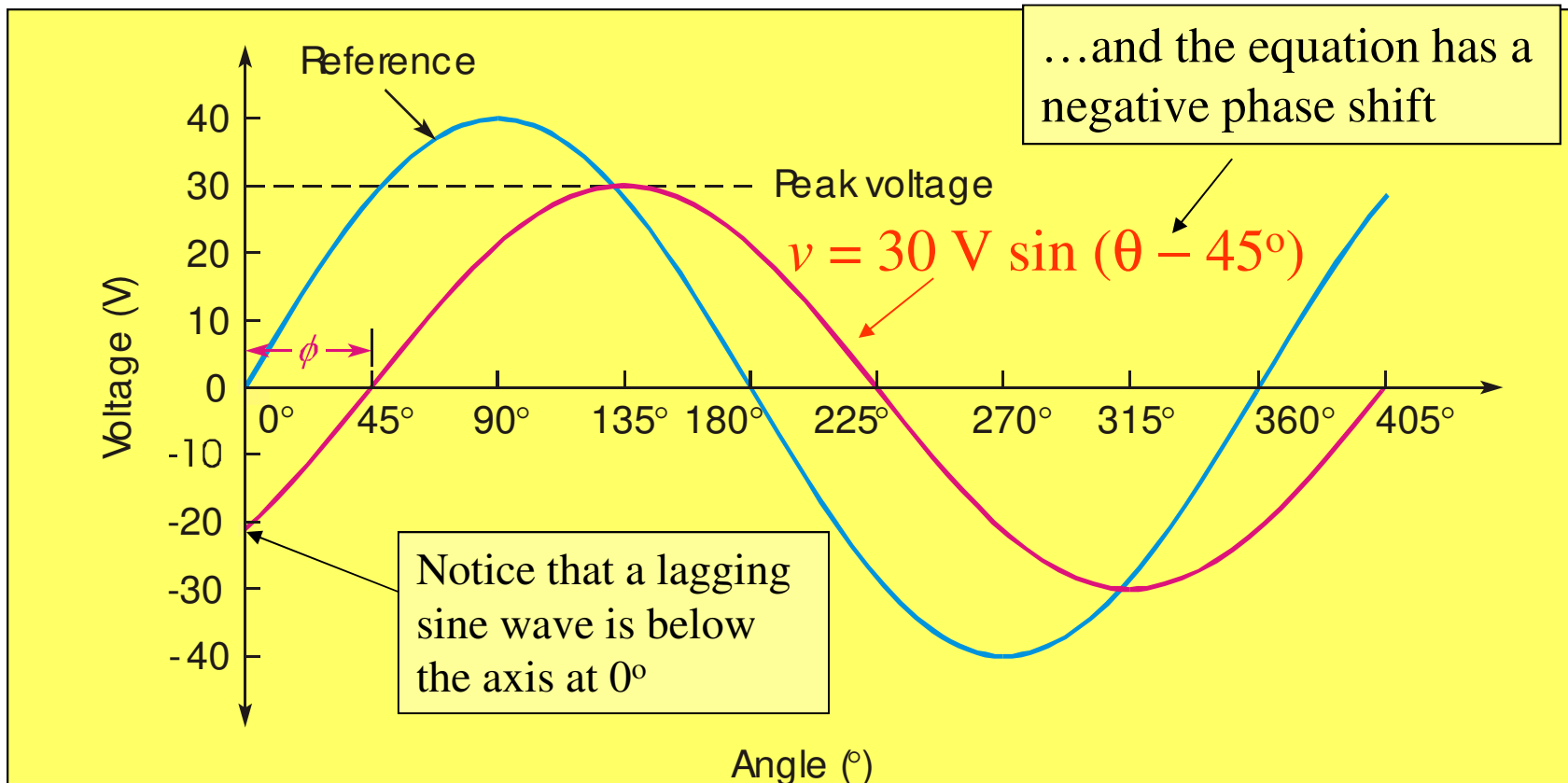
Circuitos Elétricos e Sistemas Digitais

2018-2019 - 1.º Semestre

Medição do desvio de fase entre duas ondas sinusoidais

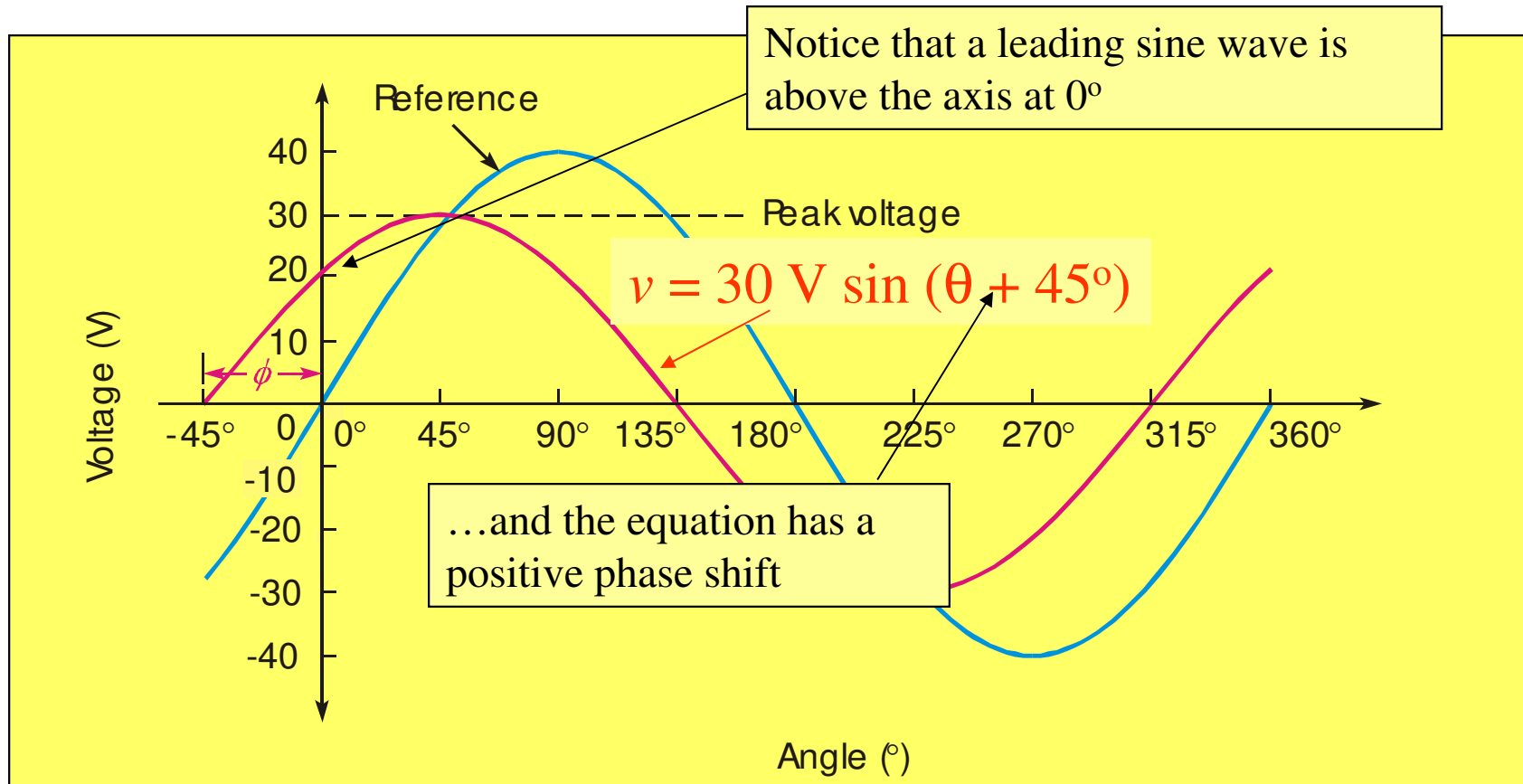
Desvio de fase: atraso de fase

Example of a wave that lags the reference



Desvio de fase: adianto de fase

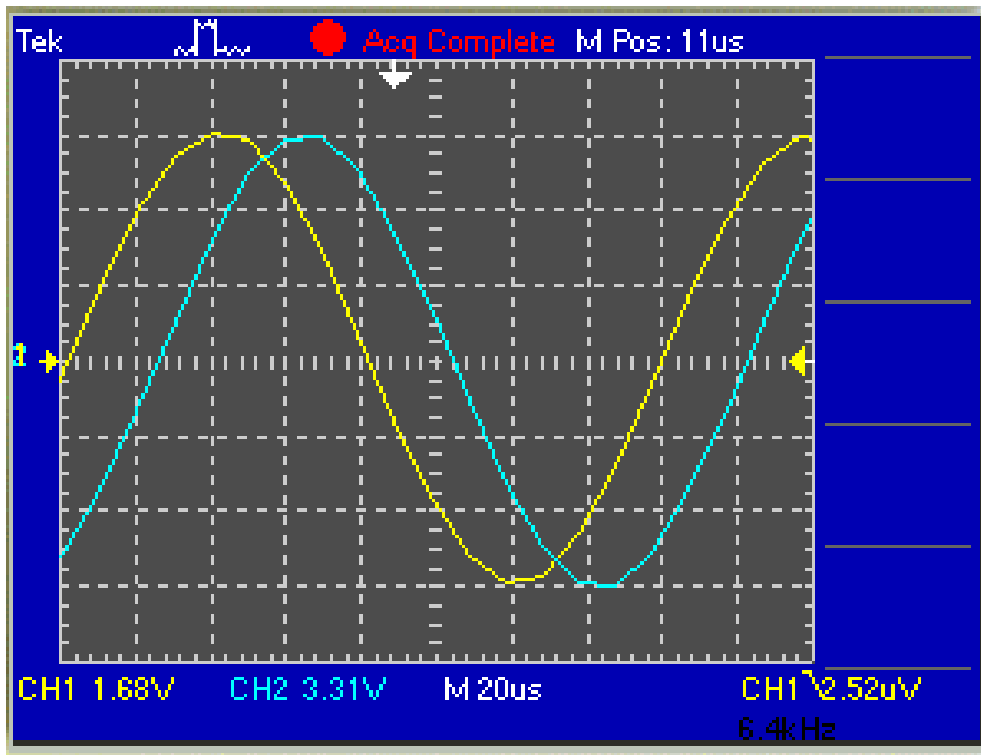
Example of a wave that leads the reference



Medição do desvio de fase

An oscilloscope is commonly used to measure phase angle in reactive circuits. The easiest way to measure phase angle is to set up the two signals to have the same apparent amplitude and measure the period. An example of a Multisim simulation is shown, but the technique is the same in lab.

Set up the oscilloscope so that two waves *appear* to have the same amplitude as shown.

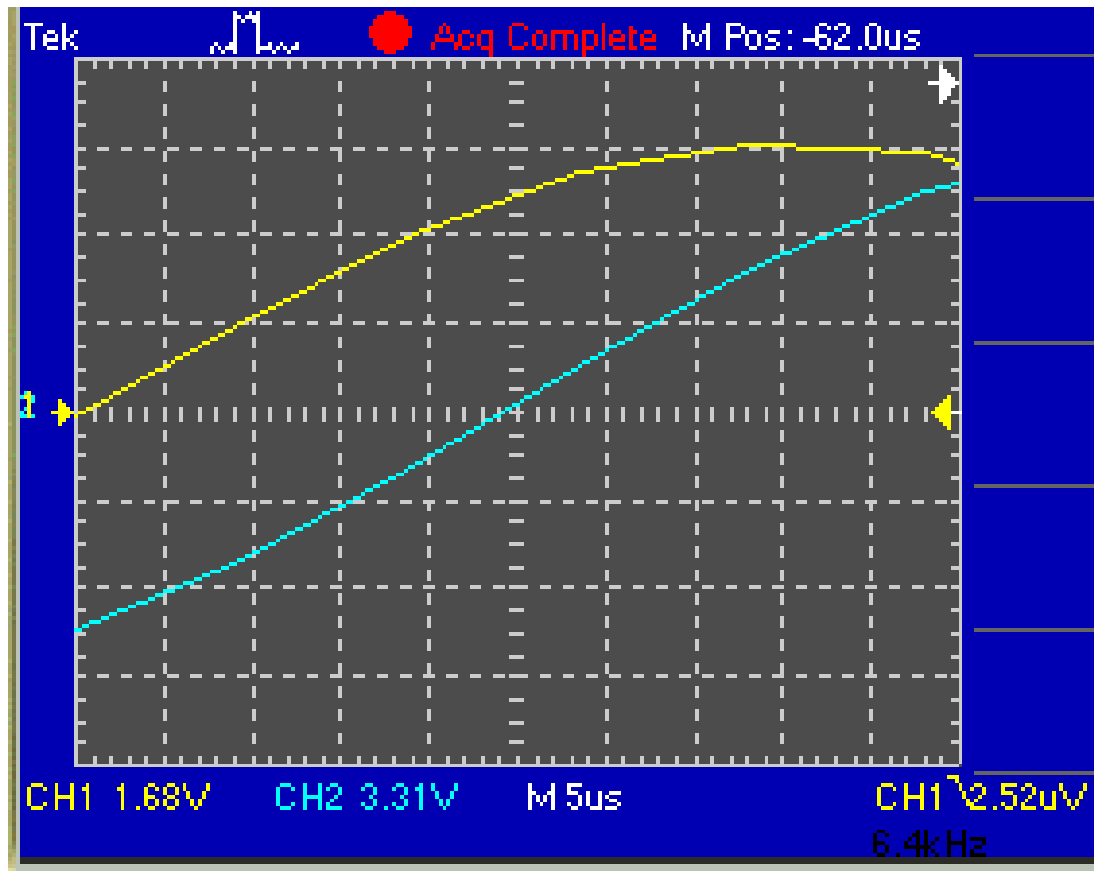


Determine the period. For the wave shown, the period is

$$T = 8.0 \text{ div} \left(\frac{20 \mu\text{s}}{\text{div}} \right) = 160 \mu\text{s}$$

Medição do desvio de fase

Next, spread the waves out using the SEC/DIV control in order to make an accurate measurement of the time difference between the waves. In the case illustrated, the time difference is



$$\Delta t = 4.9 \text{ div} \left(\frac{5 \mu\text{s}}{\text{div}} \right) = 24.5 \mu\text{s}$$

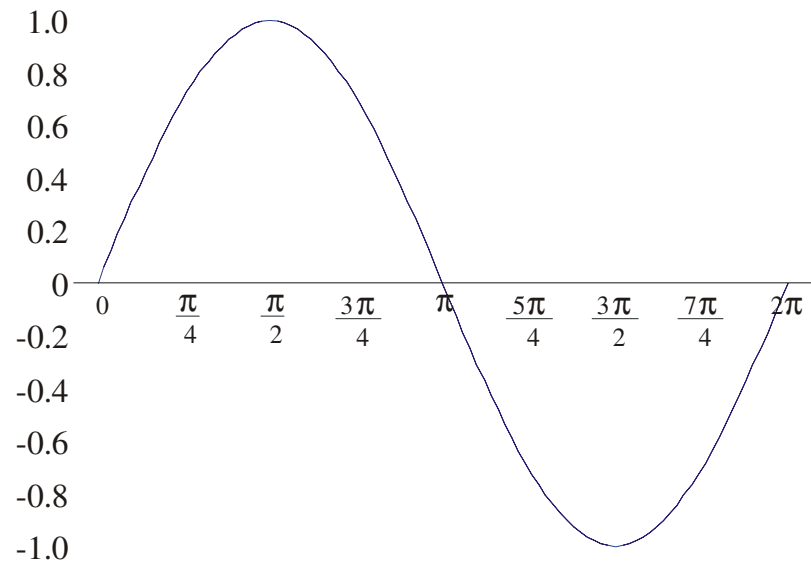
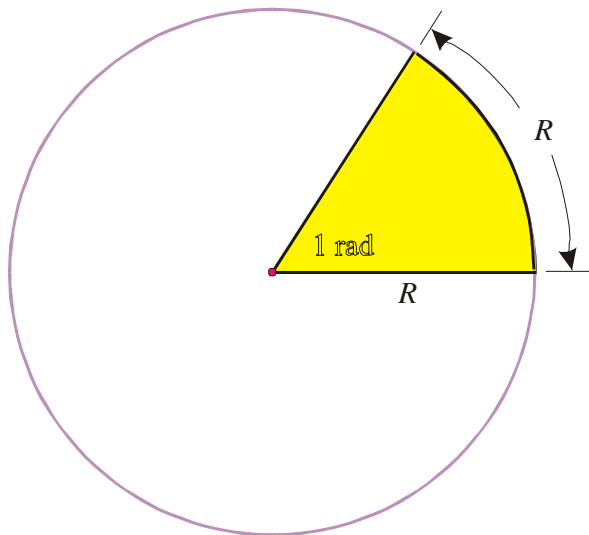
The phase shift is calculated from

$$\theta = \left(\frac{\Delta t}{T} \right) 360^\circ = \left(\frac{24.5 \mu\text{s}}{160 \mu\text{s}} \right) 360^\circ =$$

$$\theta = 55^\circ$$

Medida de ângulos: radianos vs graus

Angular measurements can be made in degrees ($^{\circ}$) or radians. The radian (rad) is the angle that is formed when the arc is equal to the radius of a circle. There are 360° or 2π radians in one complete revolution.



Medida de ângulos: radianos vs graus

There are 2π radians in one complete revolution and 360° in one revolution. To find the number of radians, given the number of degrees:

$$\text{rad} = \frac{2\pi \text{ rad}}{360^\circ} \times \text{degrees}$$

This can be simplified to: $\text{rad} = \frac{\pi \text{ rad}}{180^\circ} \times \text{degrees}$

To find the number of degrees, given the number of radians:

$$\text{deg} = \frac{180^\circ}{\pi \text{ rad}} \times \text{rad}$$

How many radians are in 45° ?

$$\begin{aligned} \text{rad} &= \frac{\pi \text{ rad}}{180^\circ} \times \text{degrees} \\ &= \frac{\pi \text{ rad}}{180^\circ} \times 45^\circ = 0.785 \text{ rad} \end{aligned}$$

How many degrees are in 1.2 radians?

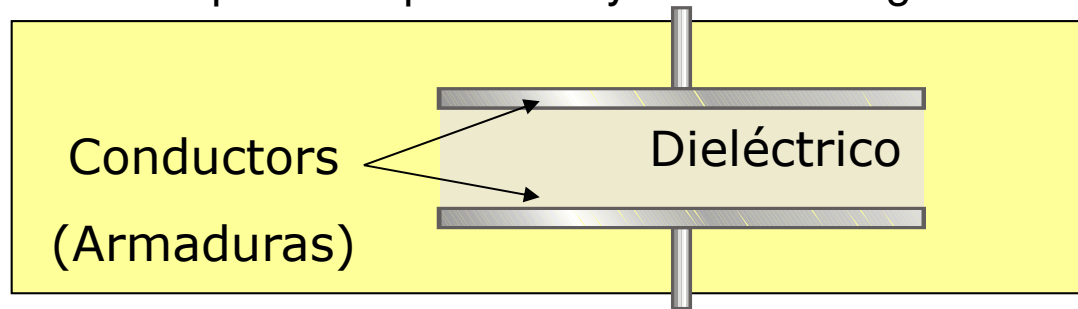
$$\begin{aligned} \text{deg} &= \frac{180^\circ}{\pi \text{ rad}} \times \text{rad} \\ &= \frac{180^\circ}{\pi \text{ rad}} \times 1.2 \text{ rad} = 69^\circ \end{aligned}$$

Condensadores

Condensadores e capacidade elétrica

Capacitors are one of the fundamental passive components. In its most basic form, it is composed of two conductive plates separated by an insulating dielectric.

The ability to store charge is the definition of **capacitance**.



Capacitance is the ratio of charge to voltage

$$C = \frac{Q}{V}$$

Rearranging, the amount of charge on a capacitor is determined by the size of the capacitor (C) and the voltage (V).

$$Q = CV$$

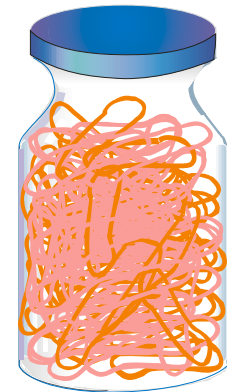
If a 22 mF capacitor is connected to a 10 V source, the charge is **220 μC**

An analogy:

Imagine you store rubber bands in a bottle that is nearly full.

You could store more rubber bands (like charge or Q) in a bigger bottle (capacitance or C) or if you push them in more (voltage or V).

Thus, $Q = CV$



Capacidade elétrica

A capacitor stores energy in the form of an electric field that is established by the opposite charges on the two plates. The energy of a charged capacitor is given by the equation

$$W = \frac{1}{2} CV^2$$

where

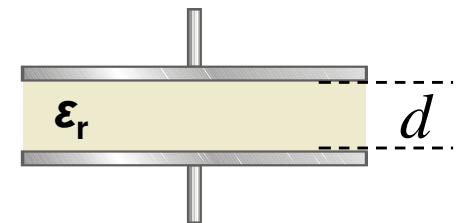
W = the energy in joules

C = the capacitance in farads

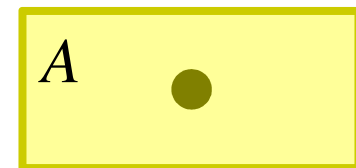
V = the voltage in volts

The capacitance of a parallel plate capacitor depends on three physical characteristics.

$$C = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m} \left(\frac{\epsilon_r A}{d} \right)$$



C is directly proportional to
the **relative dielectric constant ϵ_r**
and the **plate area A** .



C is inversely proportional to the **distance d** between the plates

Capacidade elétrica

Find the capacitance of a 4.0 cm diameter sensor immersed in oil if the plates are separated by 0.25 mm.

$$(\epsilon_r = 4.0 \text{ for oil})$$

$$C = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m} \left(\frac{\epsilon_r A}{d} \right)$$

$$\text{The plate area is } A = \pi r^2 = \pi (0.02 \text{ m})^2 = 1.26 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

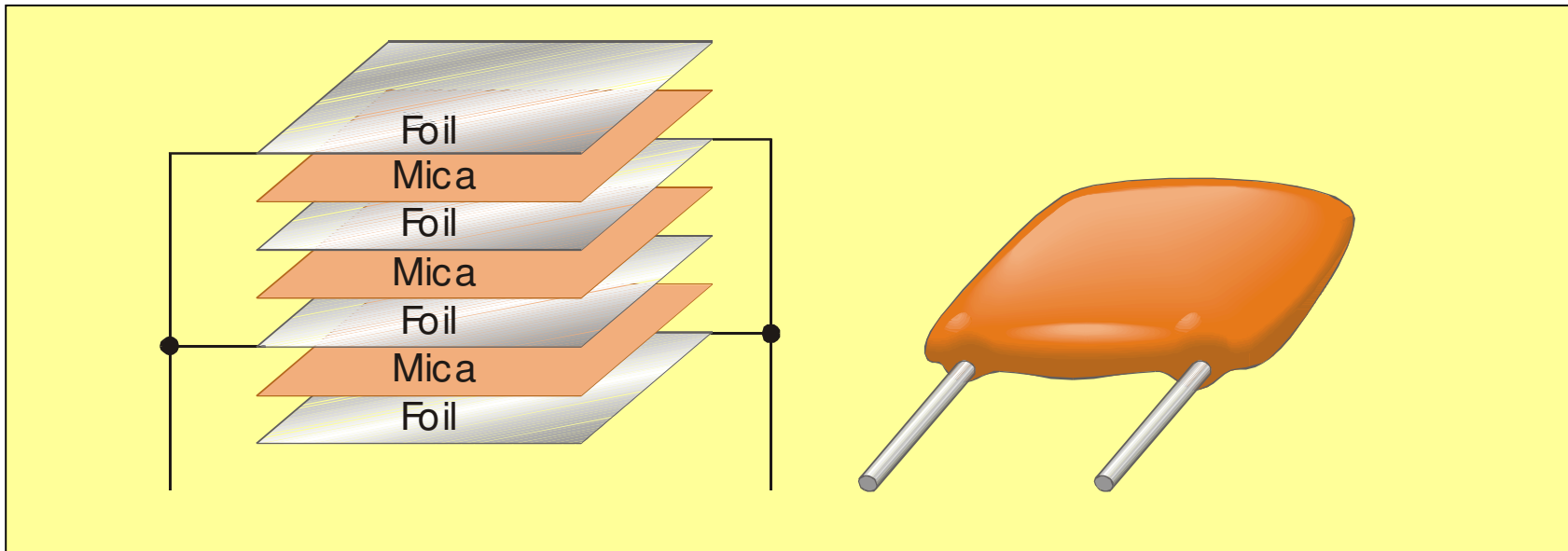
$$\text{The distance between the plates is } 0.25 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$C = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m} \left(\frac{(4.0)(1.26 \times 10^{-3} \text{ m}^2)}{0.25 \times 10^{-3} \text{ m}} \right) = 178 \text{ pF}$$

Tipos de condensadores

Mica

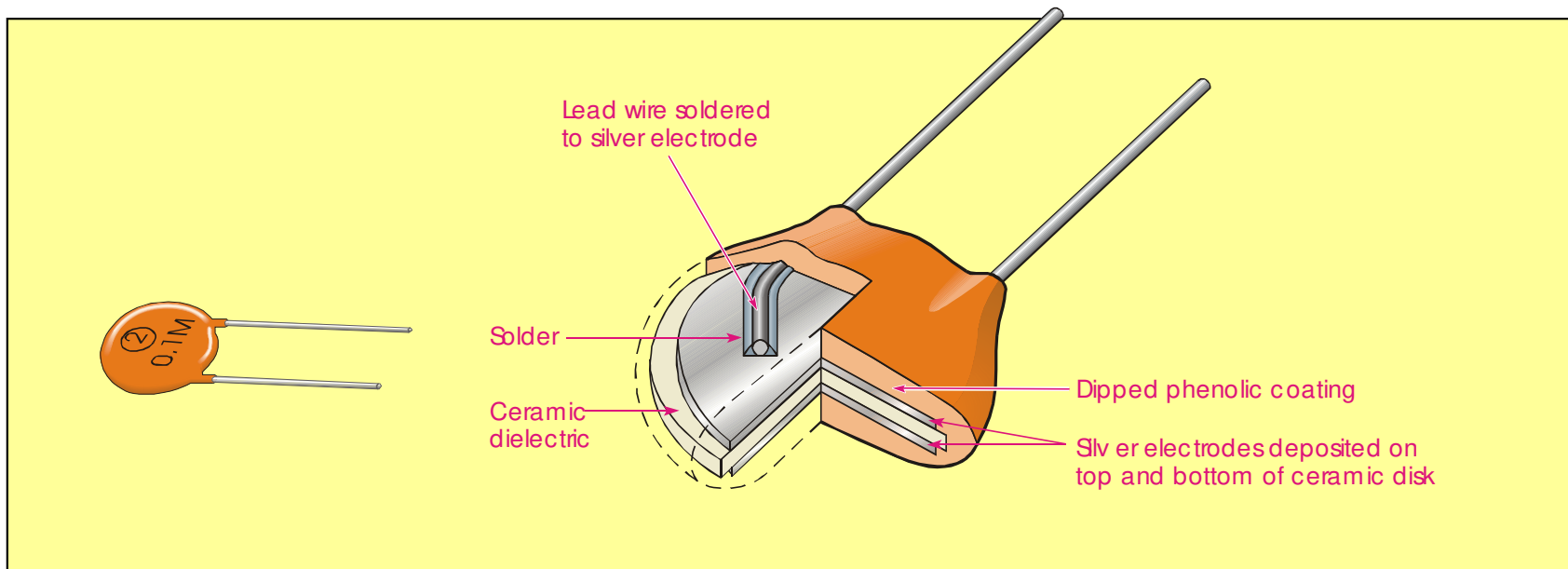
Mica capacitors are small with high working voltage. The **working voltage** is the voltage limit that cannot be exceeded.



Tipos de condensadores

Ceramic disk

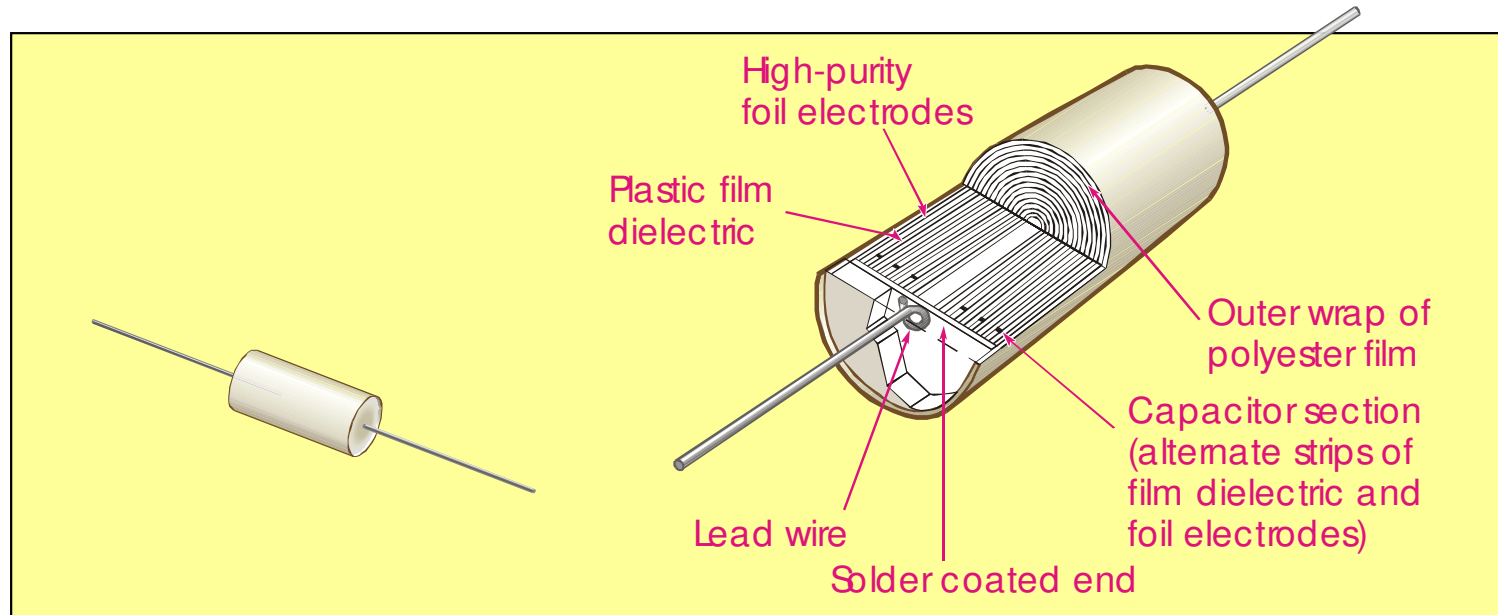
Ceramic disks are small nonpolarized capacitors. They have relatively high capacitance due to high ϵ_r .



Tipos de condensadores

Plastic Film

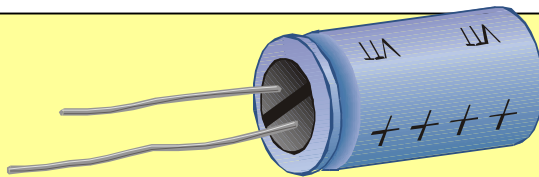
Plastic film capacitors are small and nonpolarized. They have relatively high capacitance due to larger plate area.



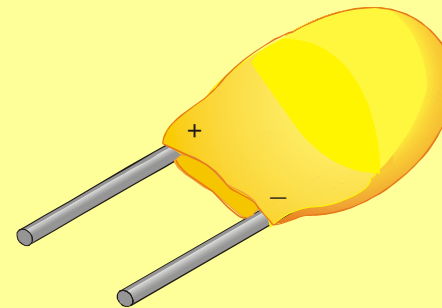
Tipos de condensadores

Electrolytic (two types)

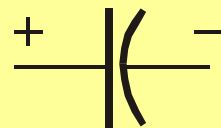
Electrolytic capacitors have very high capacitance but they are not as precise as other types and tend to have more leakage current. Electrolytic types are polarized.



Al electrolytic



Ta electrolytic



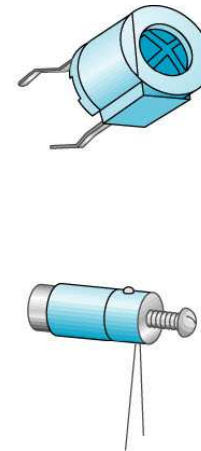
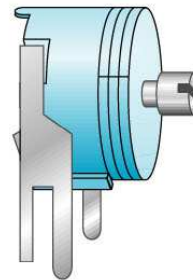
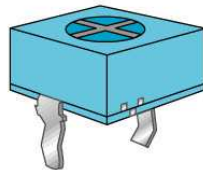
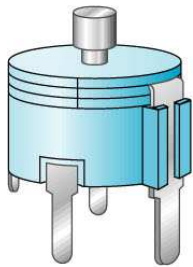
Symbol for any electrolytic capacitor

Condensadores de capacidade variável

Variable

Variable capacitors typically have small capacitance values and are usually adjusted manually.

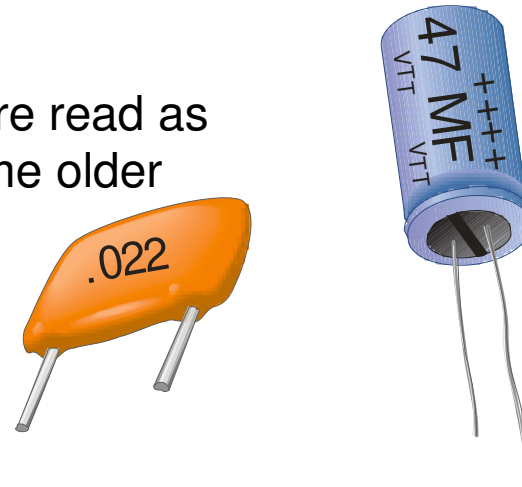
A solid-state device that is used as a variable capacitor is the varactor diode; it is adjusted with an electrical signal.



Leitura do valor da capacidade

Capacitors use several labeling methods. Small capacitors values are frequently stamped on them such as .001 or .01, which have implied units of microfarads.

Electrolytic capacitors have larger values, so are read as mF. The unit is usually stamped as mF, but some older ones may be shown as MF or MMF).

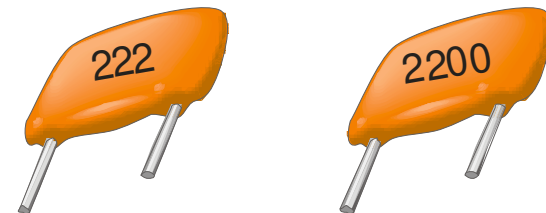


A label such as 103 or 104 is read as 10×10^3 (10,000 pF) or 10×10^4 (100,000 pF) respectively. (Third digit is the multiplier.)

When values are marked as 330 or 6800, the units are picofarad.

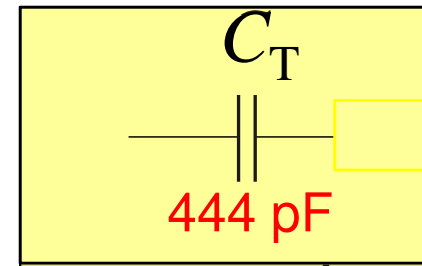
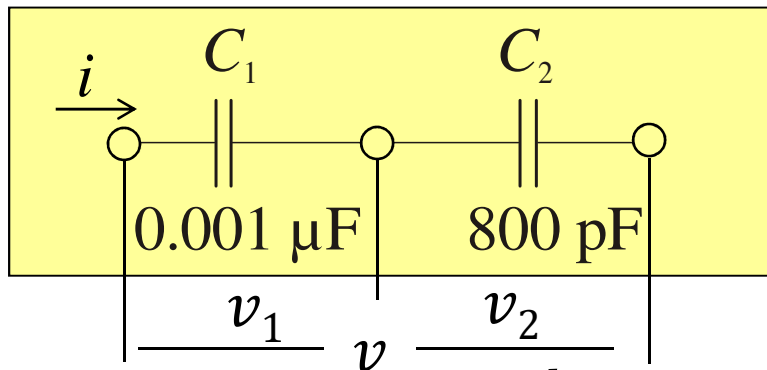
What is the value of each capacitor?

Both are 2200 pF.



Associação de condensadores

Associação de condensadores em série



$$v = v_1 + v_2; i = C_1 \frac{dv_1}{dt} = C_2 \frac{dv_2}{dt} = C_T \frac{dv}{dt} \rightarrow \frac{dv}{dt} = \frac{dv_1}{dt} + \frac{dv_2}{dt}$$

$$\rightarrow \frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

When capacitors are connected in series, the total capacitance is smaller than the smallest one. The general equation for capacitors in series is:

$$C_T = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_T}}$$

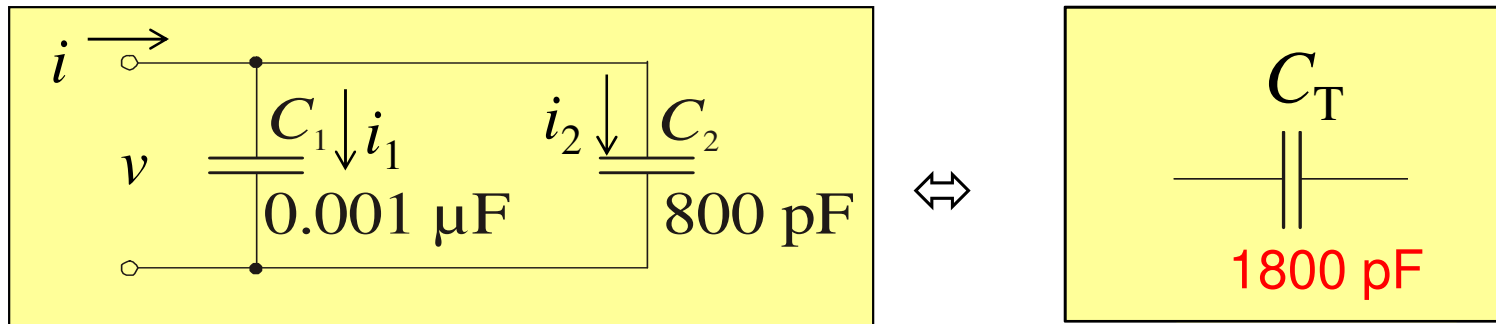
The total capacitance of two capacitors is

...or you can use the product-over-sum rule

$$C_T = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}}$$

If a 0.001 mF capacitor is connected in series with an 800 pF capacitor, the total capacitance is **444 pF**

Associação de condensadores em paralelo



$$i = i_1 + i_2; i = C_1 \frac{dv}{dt} + C_2 \frac{dv}{dt} = C_T \frac{dv}{dt} \rightarrow C_T = C_1 + C_2$$

When capacitors are connected in parallel, the total capacitance is the sum of the individual capacitors. The general equation for capacitors in parallel is

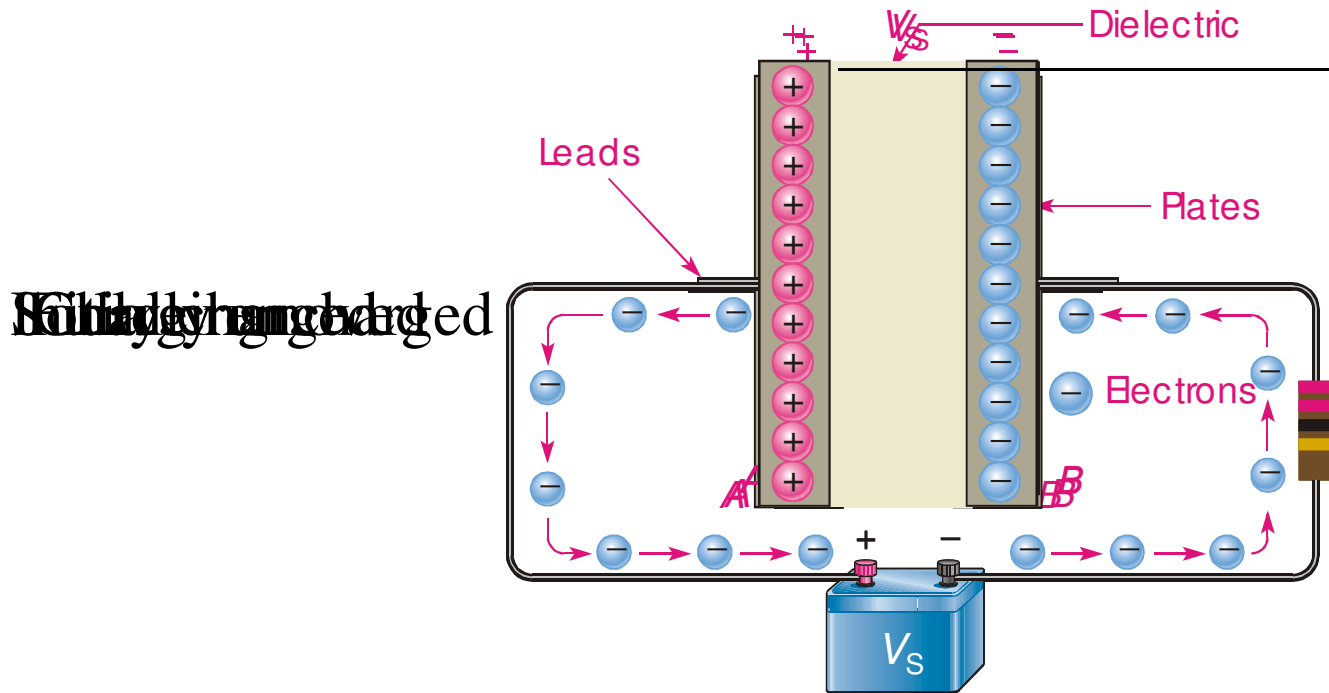
$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 + \dots C_n$$

If a 0.001 mF capacitor is connected in parallel with an 800 pF capacitor, the total capacitance is **1800 pF**

Curvas de carga e de descarga de condensadores

Carga e descarga de um condensador

The charging process...

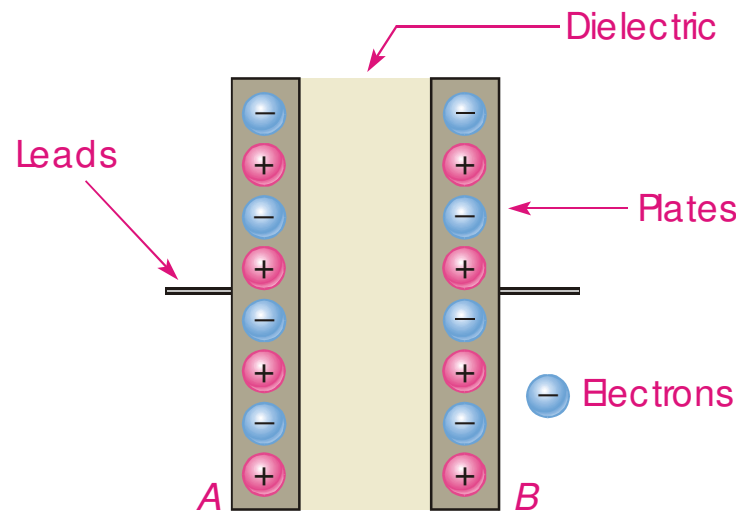


A capacitor with stored charge can act as a temporary battery.

Condensador descarregado

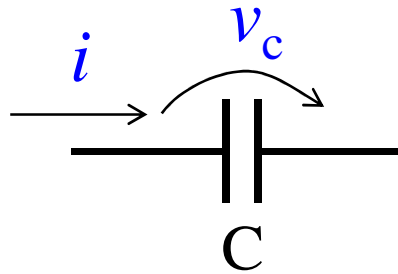
The charging process...

Initially uncharged



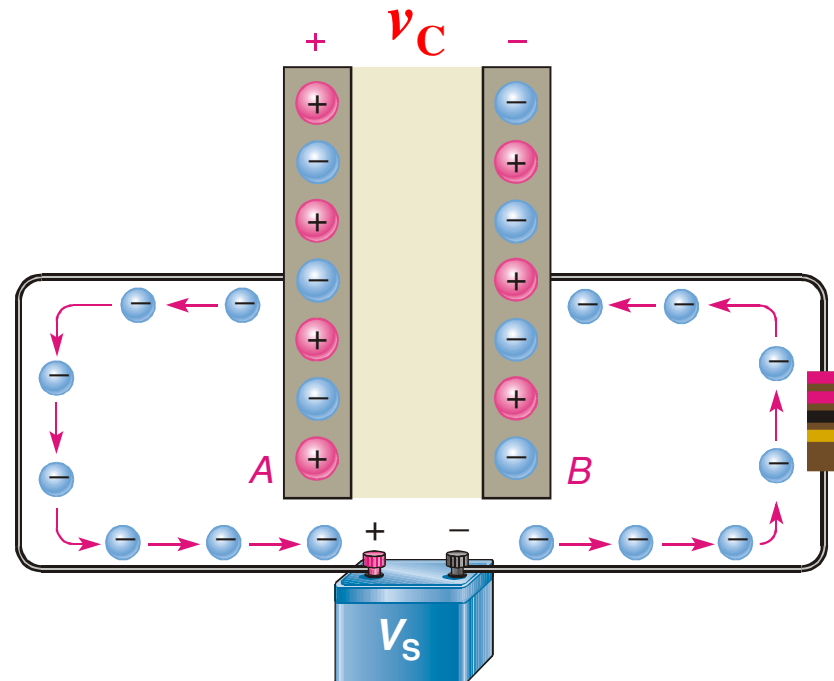
Condensador a carregar

The charging process...



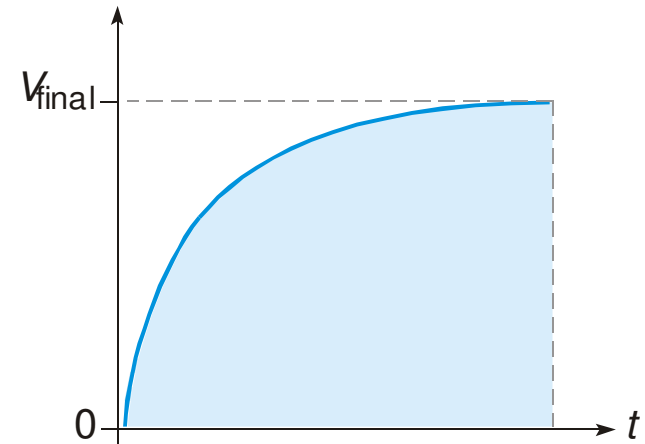
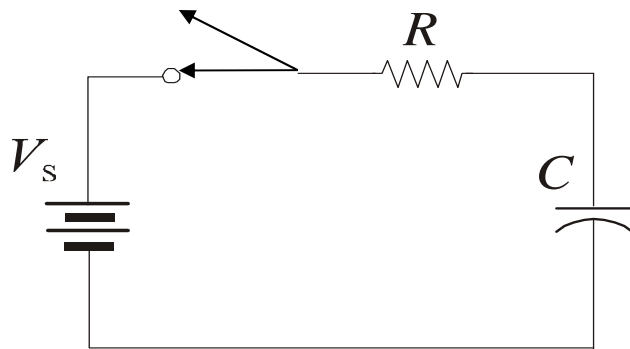
$$v_c = \frac{q}{C} \rightarrow i(t) = \frac{dq(t)}{dt} = C \frac{dv_c(t)}{dt}; v_c(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(t) dt$$

Charging

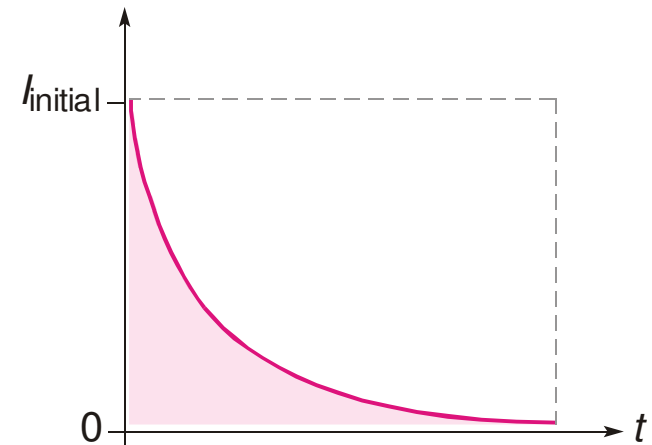


Constante de tempo RC de um circuito

When a capacitor is charged through a series resistor and dc source, the charging curve is exponential.



(a) Capacitor charging voltage



(b) Charging current

The general voltage formula is

$$v = V_F + (V_i - V_F) e^{-t/RC}$$

V_F = final value of voltage

V_i = initial value of voltage

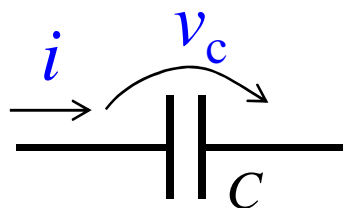
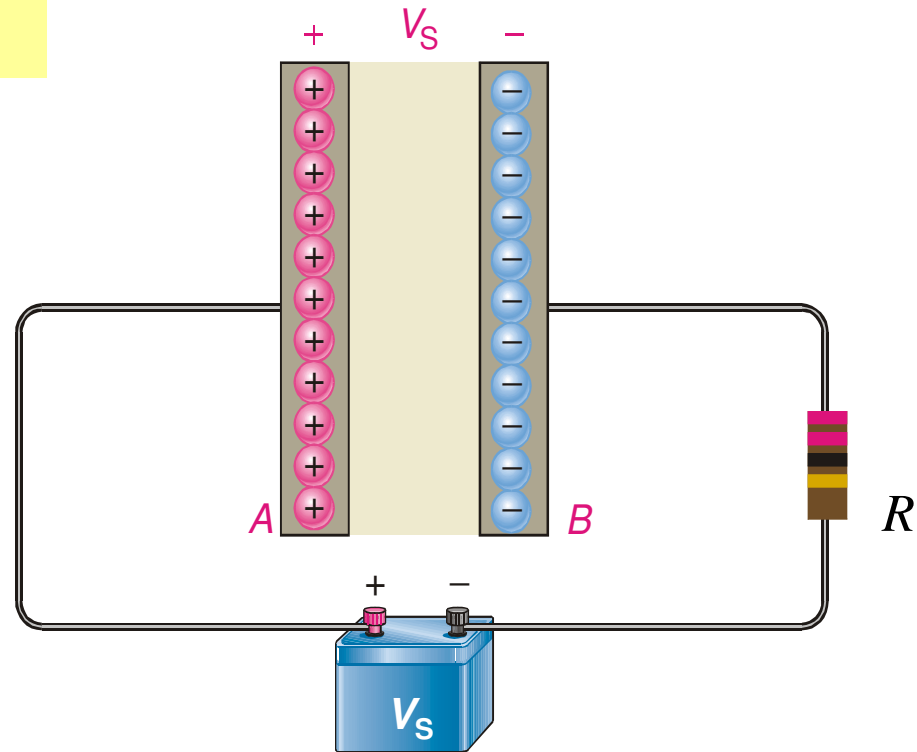
v = instantaneous value of voltage

The final capacitor voltage is greater than the initial voltage when the capacitor is charging.

Condensador carregado

The charging process...

Fully charged



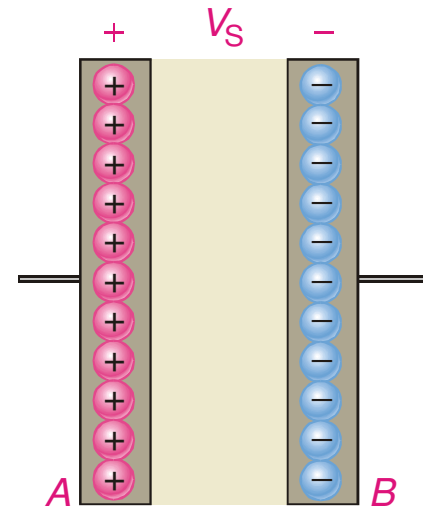
$$v_C = \frac{q}{C} = V_S \rightarrow i(t) = \frac{dq(t)}{dt} = C \frac{dv_C(t)}{dt} = 0$$

Após carregar, i.e., quando $v_C = V_S$, deixa de haver corrente no circuito. Em CC o condensador comporta-se, após o período de transiente, como um aberto.

Condensador carregado

The charging process...

Source removed



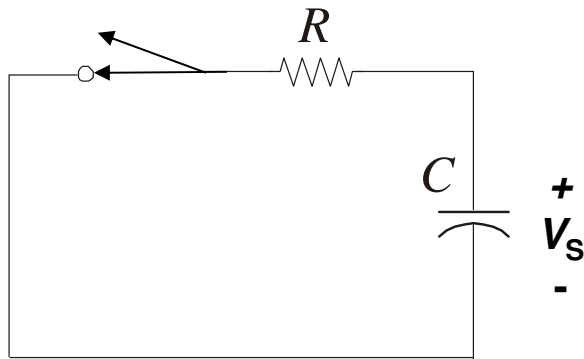
A capacitor with stored charge can act as a temporary battery. The energy stored is given by:

The circuit symbol for a capacitor consists of two parallel vertical lines of unequal length, with the longer line on the left. A curved arrow above the symbol points from the longer line to the shorter line, labeled v_c . The letter 'C' is placed below the shorter line.

$$p_C(t) = v_C(t)i_C(t) = v_C(t)C \frac{dv_C(t)}{dt} \rightarrow W = \frac{1}{2} C v_C^2 (t)$$

Descarga de um condensador

When a **charged** capacitor is discharged through a resistor, the discharge curve is also an exponential. (Note that the current is negative.)



The general voltage formula is

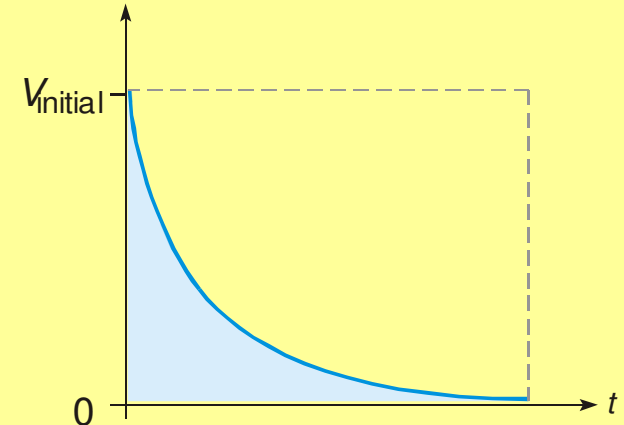
$$v = V_F + (V_i - V_F) e^{-t/RC}$$

V_F = final value of voltage

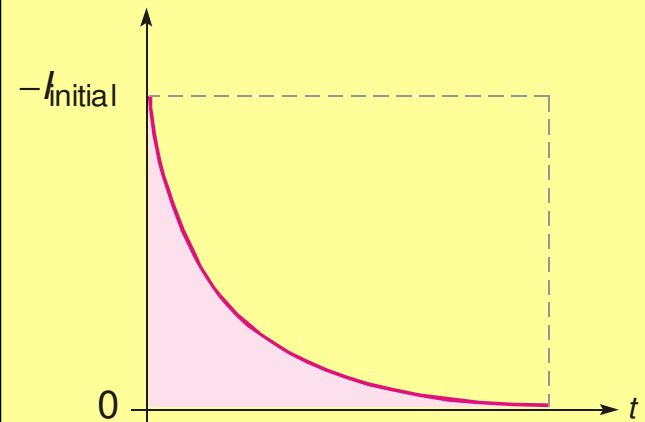
V_i = initial value of voltage

v = instantaneous value of voltage

The final capacitor voltage is less than the initial voltage when it is discharging.

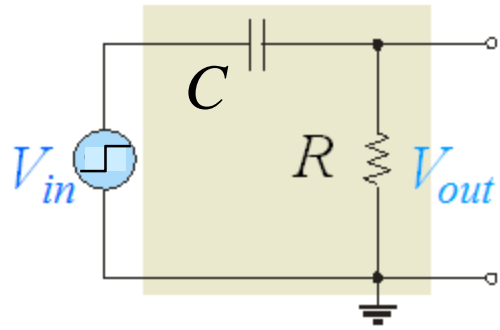


(a) Capacitor discharging voltage



(b) Discharging current

Resposta temporal de circuitos dinâmicos



Consideremos o circuito RC sujeito a uma tensão em degrau:

$$v_{IN}(t) = a \cdot H(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(t) dt + Ri(t)$$

Considerando o caso $i(t) = 0$ para $t < 0$, temos para $t > 0$ s:

$$v_{IN}(t) = a \cdot H(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt + Ri(t) \quad (1)$$

$$\text{Derivando ambos os termos da equação (1) obtém-se } 0 = \frac{1}{C} i(t) + R \frac{di(t)}{dt} \quad (2)$$

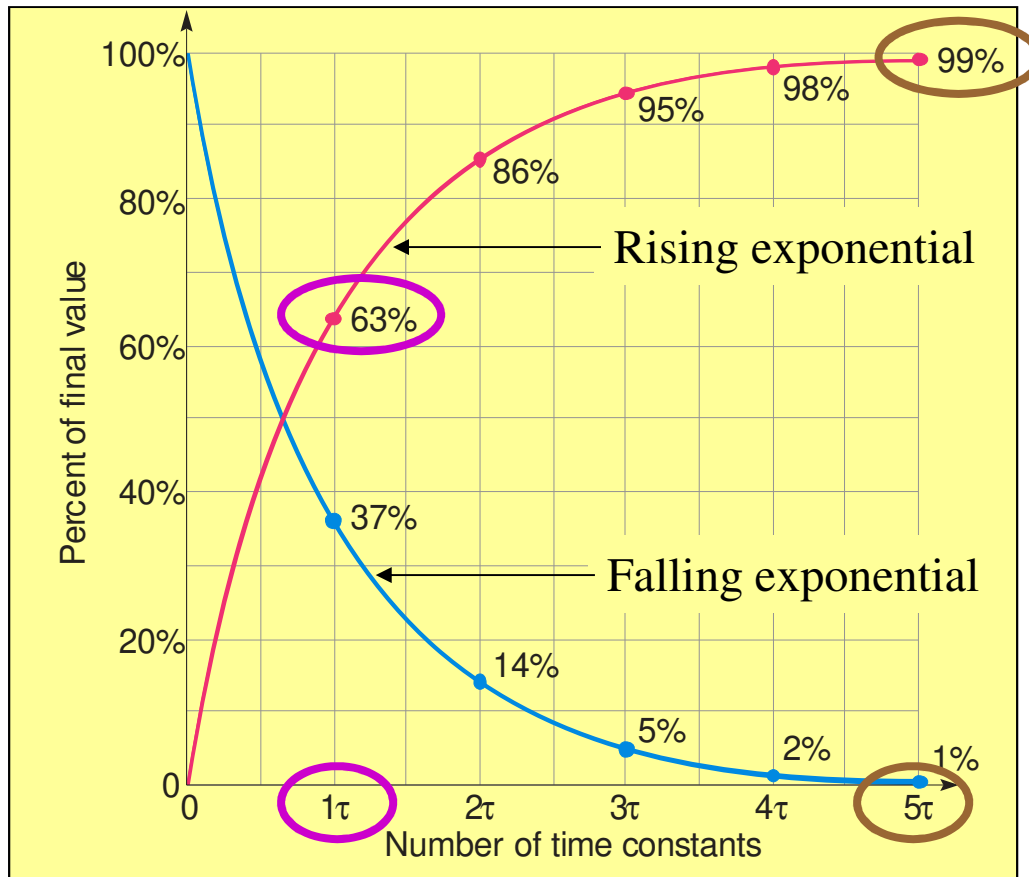
Assumindo uma solução do tipo $i(t) = \alpha e^{\beta t}$ e substituindo na equação (2), tem-se $0 = \frac{1}{C} \alpha e^{\beta t} + R \alpha \beta e^{\beta t}$, de onde se conclui que $\beta = -1/RC$.

Se no instante inicial a tensão aos terminais do condensador for nula, temos que $i(t = 0) = \frac{a}{R}$ e $v_{out}(t) = v_R(t) = Ri(t) = a e^{-t/\tau}$, com $\tau = RC$.

Trocando a ordem dos componentes, obtém-se $v_{out}(t) = v_C(t) = a (1 - e^{-t/\tau})$

Universal exponential curves

Specific values for current and voltage can be read from a universal curve. For an RC circuit, the time constant is



$$\tau = RC$$

The general voltage formula is

$$v = V_F + (V_i - V_F) e^{-t/RC}$$

V_F = final value of voltage

V_i = initial value of voltage

v = instantaneous value of voltage

The final capacitor voltage is less than the initial voltage when it is discharging.

Universal exponential curves

The universal curves can be applied to general formulas for the voltage (or current) curves for RC circuits. The general voltage formula is

$$v = V_F + (V_i - V_F) e^{-t/RC}$$

V_F = final value of voltage

V_i = initial value of voltage

v = instantaneous value of voltage

$$\tau = RC$$

The final capacitor voltage is greater than the initial voltage when the capacitor is charging, or less than the initial voltage when it is discharging.

The general voltage formula gives that when $t = \tau$ s:

$v(t=\tau=RC) = V_F + (V_i - V_F) e^{-1} \approx V_F + (V_i - V_F) \times 0,63$. Se $V_i = 0$ V, têm-se $v(t) = V_F (1 - e^{-t/RC})$. $v(t=\tau=RC) = V_F (1 - e^{-1}) \approx V_F \times 0,63$.

Impedância em circuitos de corrente alternada sinusoidal

Circuitos de corrente alternada: impedância

Em corrente alternada (ca) sinusoidal os componentes passivos são caracterizados por uma grandeza complexa designada **impedância**, **Z**. A impedância representa a oposição do componente ao estabelecimento de uma corrente sinusoidal.

Em corrente alternada sinusoidal a lei de Ohm toma a forma: $V=Z \cdot I$, onde V e I representam a amplitude/valor eficaz da tensão e da amplitude da corrente, respetivamente, e Z é a impedância do componente.

Em CA a lei de Ohm não é válida para os valores instantâneos das grandezas. Para assegurar a sua correta aplicação, a tensão e a corrente devem ser expressas de forma consistente, i.e., ambas referidas aos valores de pico, aos valores eficaz, etc.

Em geral, a impedância Z é uma grandeza complexa.

Na representação complexa temos:

$$Z = V \cdot e^{j\omega t} / I \cdot e^{j\omega t} = V_p e^{j\phi} / I_p e^{j\alpha} = |Z| e^{j\theta}$$

onde $\theta = \phi - \alpha$ representa a diferença de fase entre a tensão e a corrente.

Na representação algébrica **Z** toma a forma: **$Z = R + jX$** , $j^2 = -1$, onde **R** e **X** representam as partes **resistiva** e **reativa** da impedância do elemento ou da parte do circuito em análise: **R** designa-se por **resistência óhmica** (unidade SI: ohm Ω) e **X** por **reactância** (unidade SI: ohm Ω). Se **X** for negativo diz-se que a **reactância** é capacitiva $X = X_C$; se **X** for positivo diz-se que a **reactância** é indutiva $X = X_L$.

O modulo e a fase de **Z** são dados, respetivamente, por: $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$, $\theta = \tan^{-1}(X/R)$

Impedância

Na representação complexa temos: $Z = V \cdot e^{j\omega t} / I \cdot e^{j\omega t} = V_p e^{j\phi} / I_p e^{j\phi} = |Z| e^{j\theta}$, onde $\theta = \phi - \phi$ representa a diferença de fase entre a tensão e a corrente.

Na representação algébrica Z toma a forma: $Z = R + jX$, $j^2 = -1$, onde R e X representam as partes **resistiva** e **reactiva** da impedância do elemento ou parte do circuito em análise. R designa-se por **resistância óhmica** (uSI: ohm Ω) e X por **reactância** (uSI: ohm Ω).

Se X for negativo diz-se que a **reactância** é capacitiva $X = X_C$; se X for positivo diz-se que a **reactância** é indutiva $X = X_L$.

O módulo e a fase de Z são dados, respectivamente, por: $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ e $\theta = \tan^{-1} \left(\frac{X}{R} \right)$.

O inverso da impedância designa-se **admitância complexa** ou simplesmente **admitância** Y : $Y = 1/Z = G + jB$.

G denomina-se **condutância** (unidade SI: S) e B **susceptância** (unidade SI: S).

Associação de impedâncias em série: $Z_{eq} = Z_1 + Z_2 + \dots + Z_{n-1} + Z_n$.

Associação de impedâncias em paralelo: $1/Z_{eq} = 1/Z_1 + 1/Z_2 + \dots + 1/Z_{n-1} + 1/Z_n$.

Impedância de condensadores

A impedância é uma grandeza complexa, que pode ser escrita como:

$$Z = R + jX$$

R representa a parte real (resistiva) da impedância

X corresponde à componente imaginária da impedância, designada reactância.

Lei de Ohm em corrente alternada:

$$I = \frac{V}{Z} \quad V = Z \cdot I \quad Z = \frac{V}{I}$$

Seja uma tensão alternada sinusoidal $v_{in}(t) = V_0 \cos(\omega t)$. Tendo presente que

$$i_C(t) = C \frac{dv_{in}(t)}{dt}, i_C(t) = -C\omega V_0 \sin(\omega t) = C\omega V_0 \cos(\omega t + 90).$$

Na representação complexa: fazendo $v_{in}(t) = V_0 e^{j\omega t}$, temos:

$$i_C(t) = I_0 e^{j\omega t} = j\omega C V_0 e^{j\omega t}. \text{ Pela lei de Ohm } I = \frac{V}{Z} \text{ obtêm-se: } Z = 1/(j\omega C) = -jX_C.$$

Impedância do condensador:

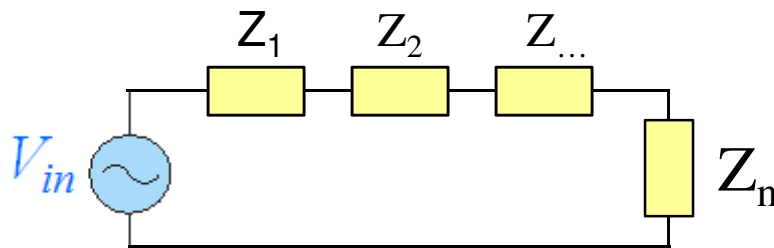
$$Z_C = \frac{1}{j2\pi f C} = -jX_C, \text{ onde } X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{\omega C}$$

Associação de impedâncias

Em corrente alternada os componentes passivos são caracterizados pela respectiva impedância Z , e a lei de Ohm toma a forma:

$$I = \frac{V}{Z}; \quad V = Z \cdot I; \quad Z = \frac{V}{I}$$

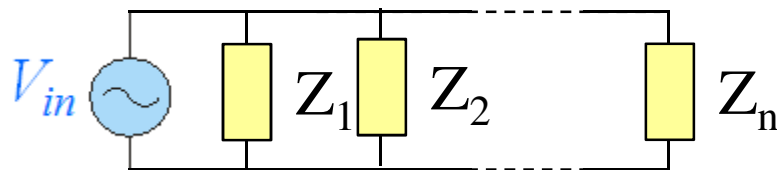
Associação em série de impedâncias



$$Z_{eq} = Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n$$

Because I is the same everywhere in a **series circuit**, you can obtain the voltages across different components by multiplying the impedance of that component by the current. As consequence the impedance of the series is equal to the sum of the individual impedances.

Associação em paralelo de impedâncias



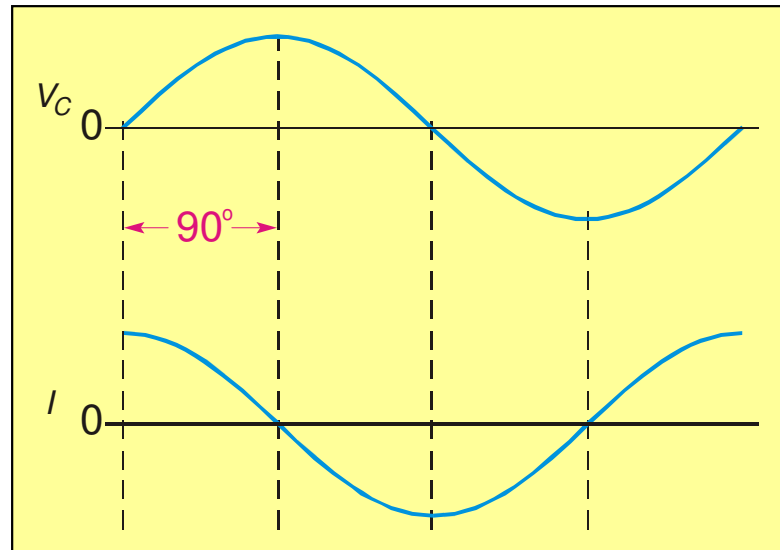
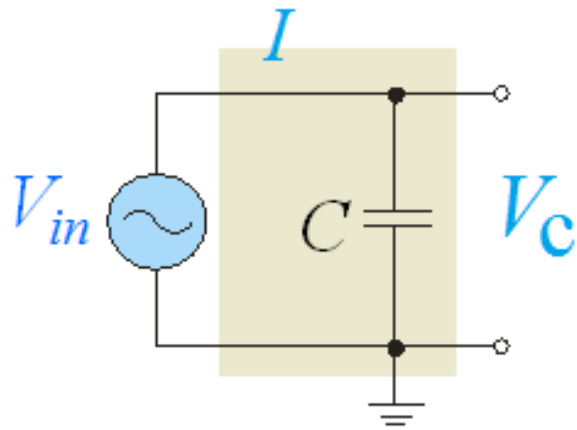
$$\frac{1}{Z_{eq}} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \dots + \frac{1}{Z_n}$$

Because V is the same everywhere in a **parallel circuit**, you can obtain the current across each component by dividing the voltage across it by its impedance. As consequence the reciprocal of the impedance of the parallel is equal to the sum of the individual impedance reciprocals.

Impedância de condensadores

Impedância de um condensador

When a sine wave is applied to a capacitor, there is a phase shift between voltage and current such that current always leads the voltage by 90°.



$$v(t) = V_{in} e^{j\omega t} \rightarrow i(t) = C \frac{dv(t)}{dt} = j\omega C v(t) \rightarrow V_{in} = \frac{1}{j\omega C} I_C$$

$$V = IZ \quad I = \frac{V}{Z} \quad Z = \frac{V}{I}$$

$$Z_C = \frac{1}{j2\pi f C} = \frac{1}{j\omega C} = j \left(-\frac{1}{\omega C} \right) \rightarrow I_C = j\omega C \cdot V_{in}$$

Reactância capacitiva

Capacitive reactance is the opposition to ac by a capacitor. The equation for capacitive reactance is

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} = -j \frac{1}{j\omega C} = -jX_C \rightarrow X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

The reactance of a 0.047 μF capacitor when a sinusoidal voltage of frequency of 15 kHz is applied is **226 Ω** .

When capacitors are in series, the total reactance is the sum of the individual reactances. That is,

$$X_{C(\text{tot})} = X_{C1} + X_{C2} + X_{C3} + \cdots + X_{Cn}$$

Assume three 0.033 μF capacitors are in series with a 2.5 kHz ac source. What is the total reactance? The reactance of each capacitor is

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi(2.5 \text{ kHz})(0.033 \mu\text{F})} = 1.93 \text{ k}\Omega$$

$$\begin{aligned} X_{C(\text{tot})} &= X_{C1} + X_{C2} + X_{C3} \\ &= 1.93 \text{ k}\Omega + 1.93 \text{ k}\Omega + 1.93 \text{ k}\Omega = \mathbf{5.79 \text{ k}\Omega} \end{aligned}$$

Reactância capacitiva

When capacitors are in parallel, the total reactance is the reciprocal of the sum of the reciprocals of the individual reactances. That is,

$$X_{C(tot)} = \frac{1}{\frac{1}{X_{C1}} + \frac{1}{X_{C2}} + \frac{1}{X_{C3}} + \dots + \frac{1}{X_{Cn}}}$$

If the three 0.033 uF capacitors from the last example are placed in parallel with the 2.5 kHz ac source, what is the total reactance?

The reactance of each capacitor is 1.93 kΩ

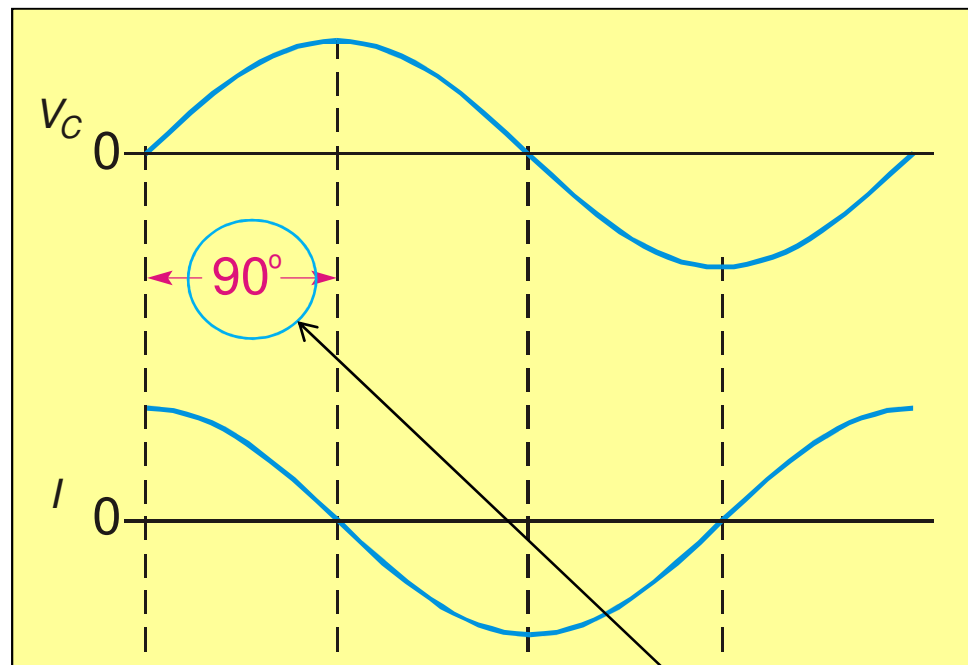
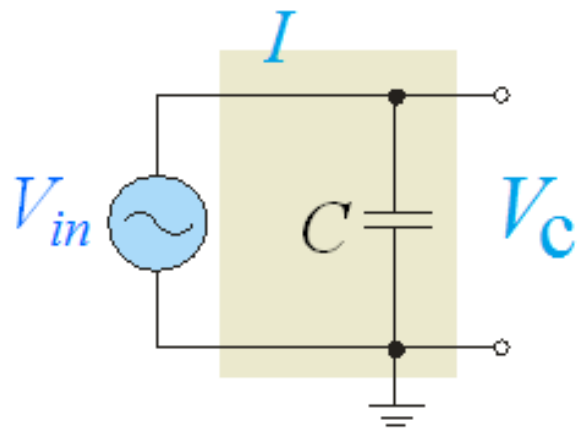
$$X_{C(tot)} = \frac{1}{\frac{1}{X_{C1}} + \frac{1}{X_{C2}} + \frac{1}{X_{C3}}} = \frac{1}{\frac{1}{1.93 \text{ k}\Omega} + \frac{1}{1.93 \text{ k}\Omega} + \frac{1}{1.93 \text{ k}\Omega}} = 643 \text{ }\Omega$$

Circuitos com condensadores

Desfasamento capacitivo

(Capacitive phase shift)

When a sine wave is applied to a capacitor, there is a phase shift between voltage and current such that current always leads the voltage by 90°.



$$V = IZ \quad I = \frac{V}{Z} \quad Z = \frac{V}{I}$$

$$Z_C = \frac{1}{j2\pi fC} = \frac{1}{j\omega C} \rightarrow I = j\omega C \cdot V$$

Divisor de tensão com condensadores

Two capacitors in series are commonly used as a capacitive voltage divider. The capacitors split the output voltage in proportion to their reactance (and inversely proportional to their capacitance).

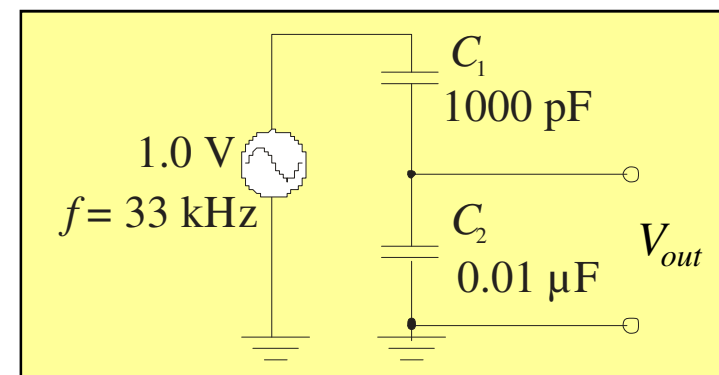
What is the output voltage for the capacitive voltage divider?

$$X_{C1} = \frac{1}{2\pi f C_1} = \frac{1}{2\pi (33 \text{ kHz})(1000 \text{ pF})} = 4.82 \text{ k}\Omega$$

$$X_{C2} = \frac{1}{2\pi f C_2} = \frac{1}{2\pi (33 \text{ kHz})(0.01 \text{ }\mu\text{F})} = 482 \text{ }\Omega$$

$$\begin{aligned} X_{C(\text{tot})} &= X_{C1} + X_{C2} \\ &= 4.82 \text{ k}\Omega + 482 \text{ }\Omega = 5.30 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

$$V_{out} = \left(\frac{X_{C2}}{X_{C(\text{tot})}} \right) V_s = \left(\frac{482 \text{ }\Omega}{5.30 \text{ k}\Omega} \right) 1.0 \text{ V} = 91 \text{ mV}$$

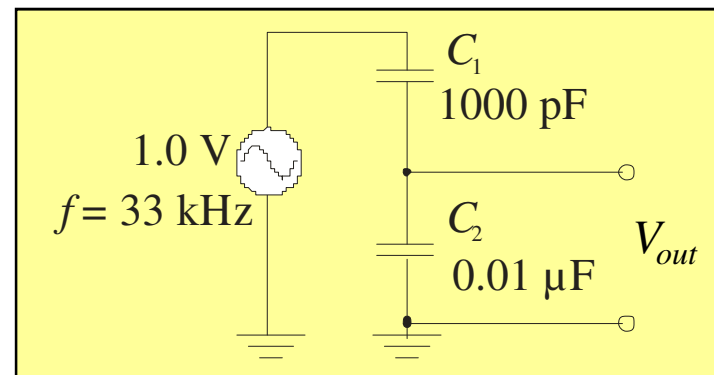


Divisor de tensão com condensadores

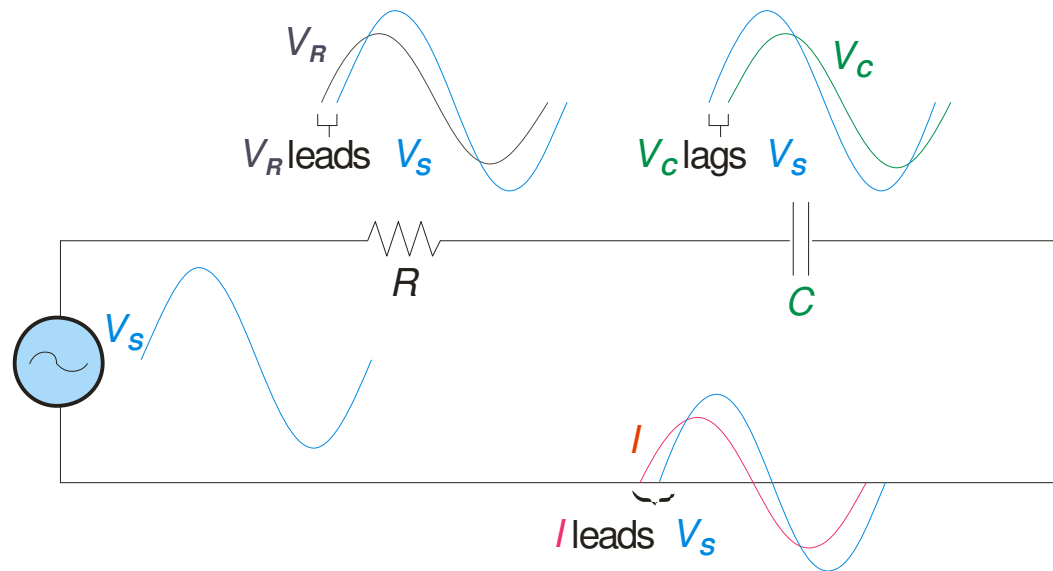
Instead of using a ratio of reactances in the capacitor voltage divider equation, you can use a ratio of the total series capacitance to the output capacitance (multiplied by the input voltage). The result is the same. For the problem presented in the last slide,

$$C_{(tot)} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{(1000 \text{ pF})(0.01 \text{ } \mu\text{F})}{1000 \text{ pF} + 0.01 \text{ } \mu\text{F}} = 909 \text{ pF}$$

$$V_{out} = \left(\frac{C_{(tot)}}{C_2} \right) V_s = \left(\frac{909 \text{ pF}}{0.01 \text{ } \mu\text{F}} \right) 1.0 \text{ V} = 91 \text{ mV}$$



Circuito série com condensador e resistância



When both resistance and capacitance are in a series circuit, the phase angle between the applied voltage and total current is between 0° and 90° , depending on the values of resistance and reactance.

Representa a impedância no plano complexo para o circuito acima, com $R = 1.2 \text{ k}\Omega$ e $X_C = 960 \Omega$, e determine a fase da impedância.

$$Z = \sqrt{(1.2 \text{ k}\Omega)^2 + (0.96 \text{ k}\Omega)^2}$$

$$= 1.33 \text{ k}\Omega$$

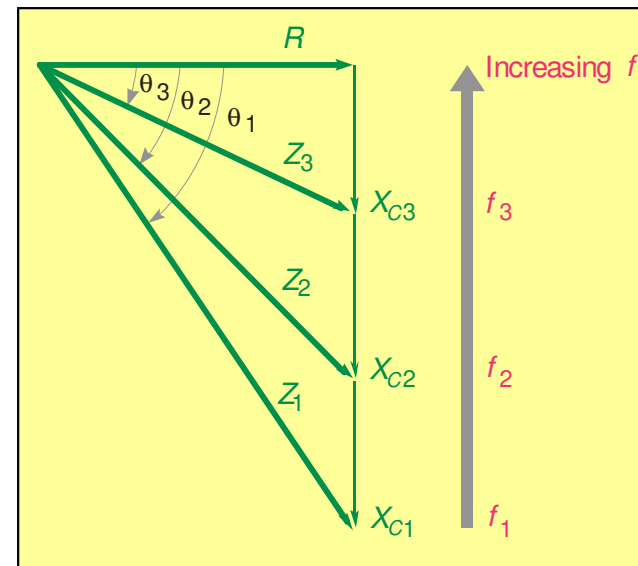
$$\theta = \tan^{-1} \frac{0.96 \text{ k}\Omega}{1.2 \text{ k}\Omega}$$

$$= 39^\circ$$

Variação do ângulo de fase com a frequência

Phasor diagrams that have reactance phasors can only be drawn for a single frequency because X is a function of frequency.

As frequency changes, the impedance triangle for an RC circuit changes as illustrated here because X_C decreases with increasing f . This determines the *frequency response* of RC circuits.



Assume the current in the previous example is $10 \text{ mA}_{\text{rms}}$. Sketch the voltage phasor diagram. The impedance triangle from the previous example is shown for reference.

The voltage phasor diagram can be found from Ohm's law. Multiply each impedance phasor by 10 mA .

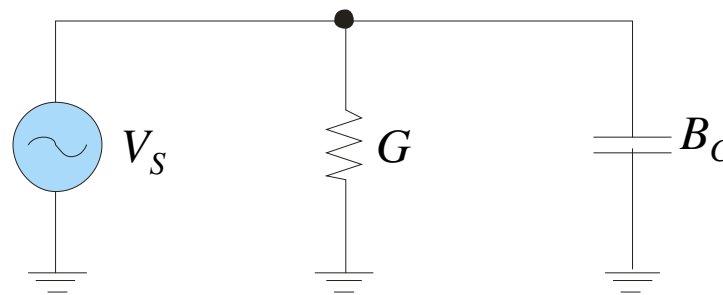
Circuitos RC paralelo

For parallel circuits, it is useful to introduce two new quantities (susceptance and admittance) and to review conductance.

Conductance is the reciprocal of resistance. $G = \frac{1}{R}$

Capacitive susceptance is the reciprocal of capacitive reactance. $B_C = \frac{1}{X_C}$ $B_C = 2\pi fC$

Admittance is the reciprocal of impedance. $Y = \frac{1}{Z}$



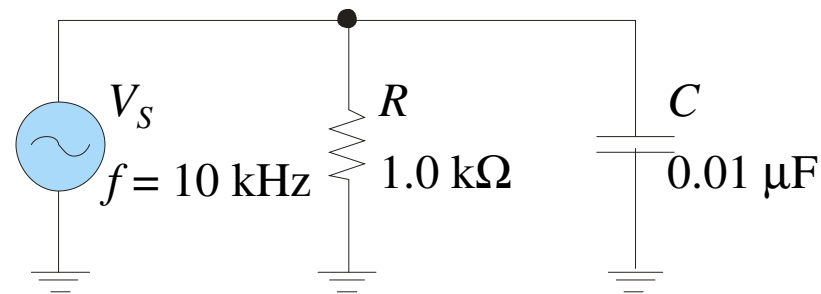
In a parallel RC circuit, the admittance phasor is the sum of the conductance and capacitive susceptance phasors. The magnitude can be expressed as

$$Y = \sqrt{G^2 + B_C^2}$$

From the diagram, the phase angle is $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{B_C}{G}\right)$

Circuitos RC paralelo

Desenhe o diagrama do fasor da admitância para os circuito acima



As magnitudes da condutância e da susceptância são:

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{1.0 \text{ k}\Omega} = 1.0 \text{ mS} \quad B_C = 2\pi(10 \text{ kHz})(0.01 \text{ }\mu\text{F}) = 0.628 \text{ mS}$$

$$Y = \sqrt{G^2 + B_C^2} = \sqrt{(1.0 \text{ mS})^2 + (0.628 \text{ mS})^2} = 1.18 \text{ mS}$$

If the voltage in the previous example is 10 V, sketch the current phasor diagram. The admittance diagram from the previous example is shown for reference.

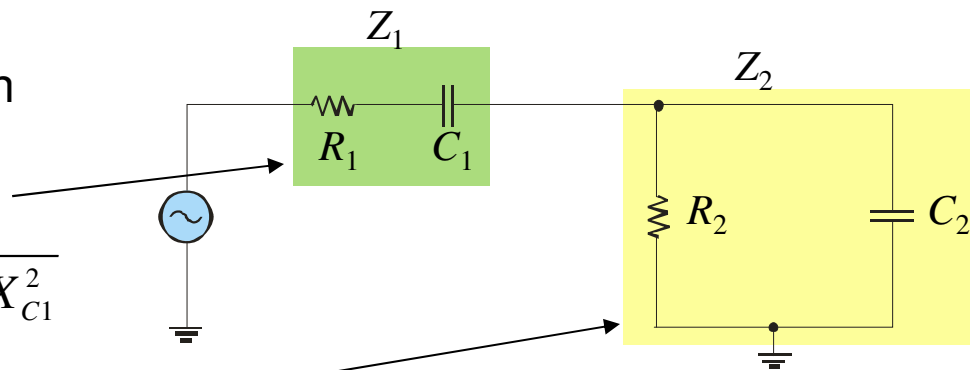
The current phasor diagram can be found from Ohm's law. Multiply each admittance phasor by 10 V.

Circuitos RC Séries-Paralelo

Series-parallel *RC* circuits are combinations of both series and parallel elements. These circuits can be solved by methods from series and parallel circuits.

For example, the components in the green box are in series:

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_{C1}^2}$$



The components in the yellow box are in parallel:

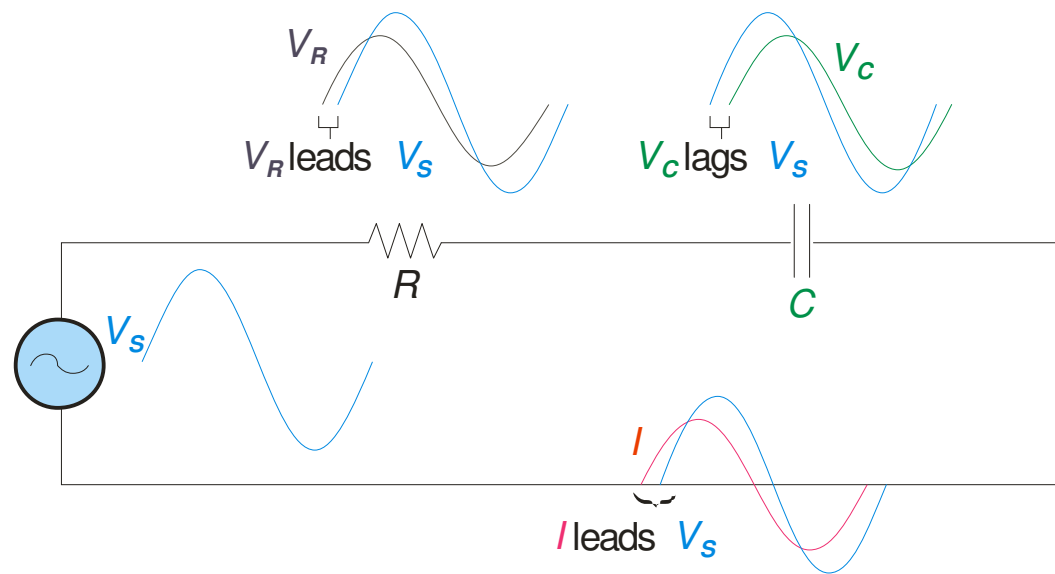
$$Z_2 = \frac{R_2 X_{C2}}{\sqrt{R_2^2 + X_{C2}^2}}$$

The total impedance can be found by converting the parallel components to an equivalent series combination, then adding the result to R_1 and X_{C1} to get the total reactance.

Resposta de circuitos RC a sinais sinusoidais

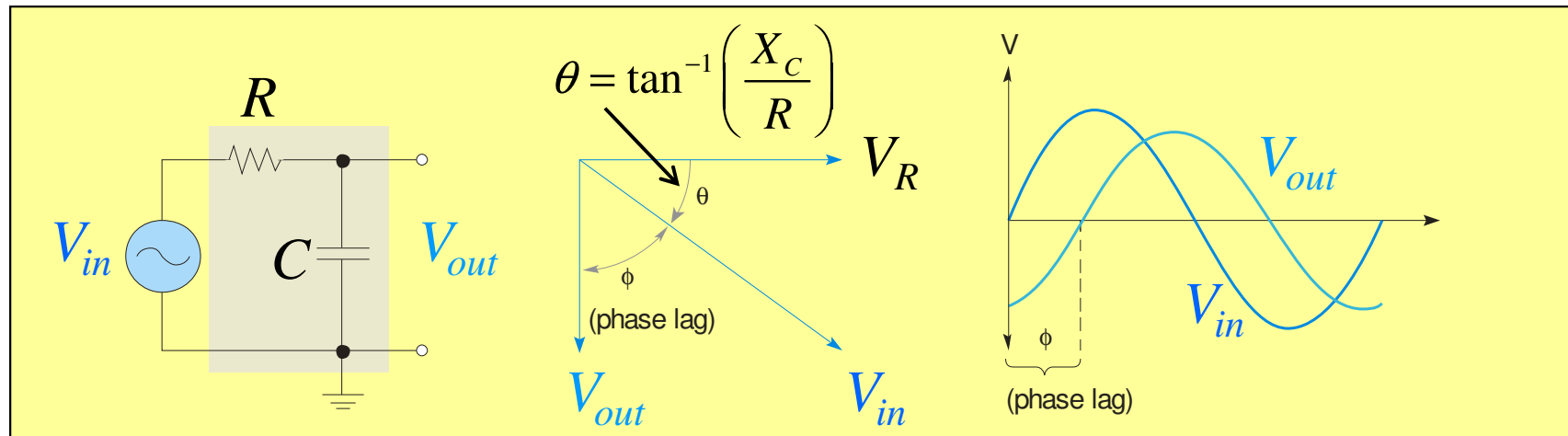
Resposta de circuitos RC a sinais sinusoidais (Sinusoidal response of RC circuits)

When both resistance and capacitance are in a series circuit, the phase angle between the applied voltage and total current is between 0° and 90° , depending on the values of resistance and reactance.



Análise de circuitos RC série

For a given frequency, a series RC circuit can be used to produce a phase lag by a specific amount between an input voltage and an output by taking the output across the capacitor. This circuit is also a basic *low-pass filter*, a circuit that passes low frequencies and rejects all others.



Ohm's law is applied to series RC circuits using Z , V , and I . $V = IZ$ $I = \frac{V}{Z}$ $Z = \frac{V}{I}$

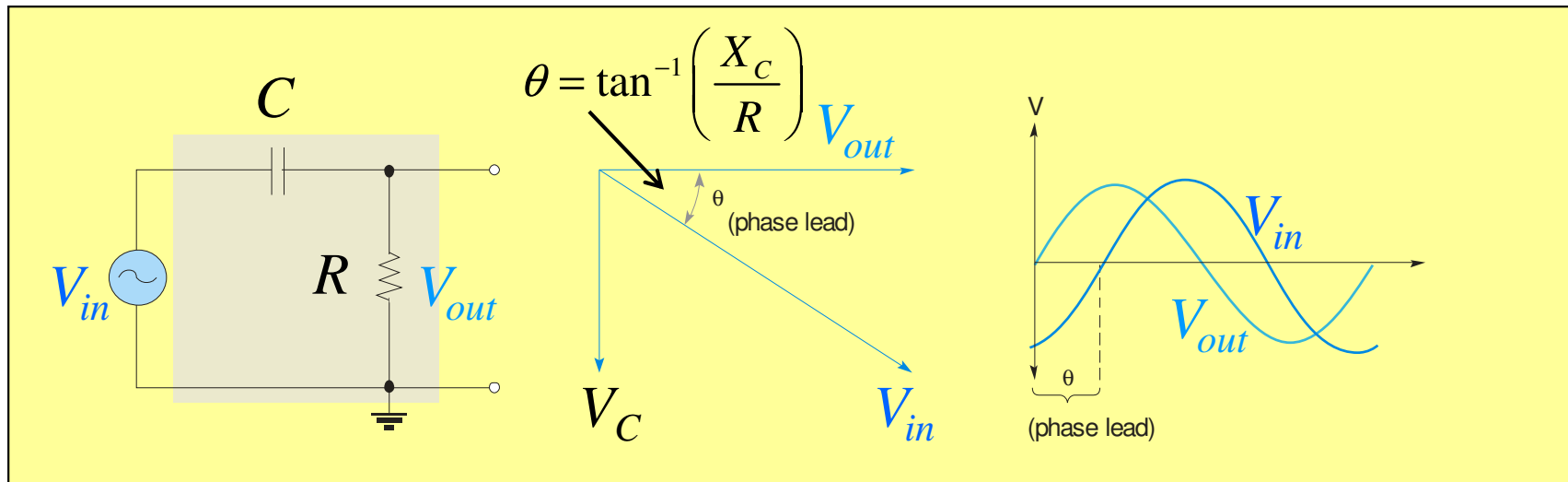
A diferença de fase ϕ entre as tensões V_{out} e V_{in} é $\phi = 90 - \theta$, onde $\theta = \tan^{-1}(X_C/R)$:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{\omega C}$$

Because I is the same everywhere in a series circuit, you can obtain the voltages across different components by multiplying the impedance of that component by the current as shown in the following example.

Circuitos CR série

Reversing the components in the previous circuit produces a circuit that is a basic lead network. This circuit is also a basic *high-pass filter*, a circuit that passes high frequencies and rejects all others. This filter passes high frequencies down to a frequency called the *cutoff* frequency.



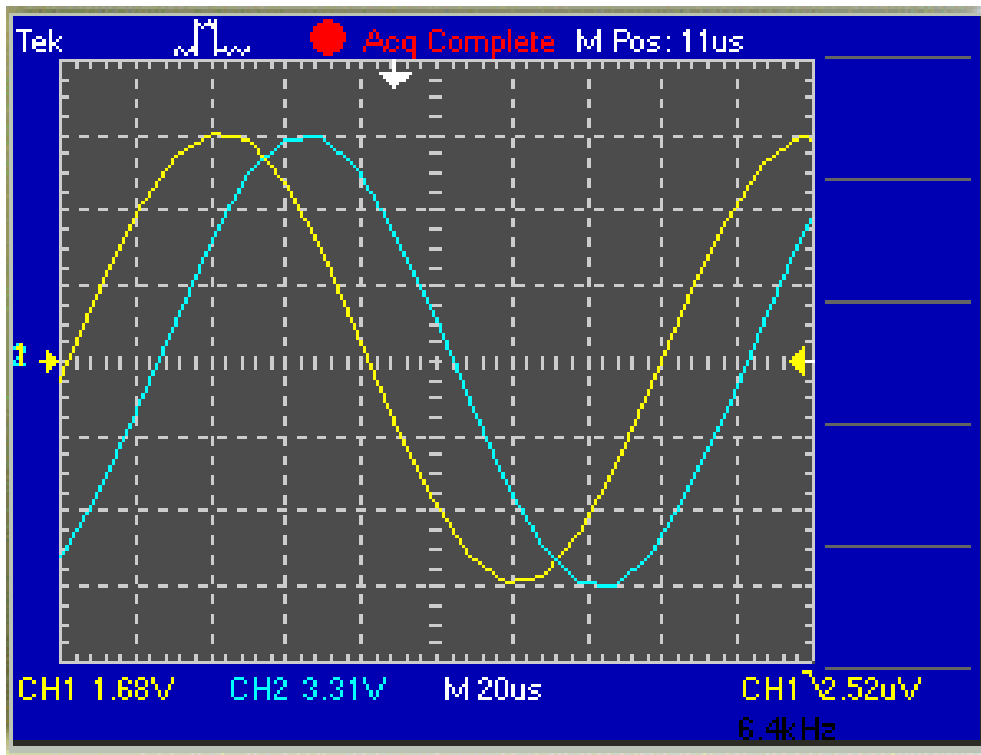
A diferença de fase ϕ entre as duas tensões é $\phi = \theta = \tan^{-1}(X_C/R)$, com

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{\omega C}$$

Medição da diferença de fase

An oscilloscope is commonly used to measure phase angle in reactive circuits. The easiest way to measure phase angle is to set up the two signals to have the same apparent amplitude and measure the period. An example of a Multisim simulation is shown, but the technique is the same in lab.

Set up the oscilloscope so that two waves *appear* to have the same amplitude as shown.

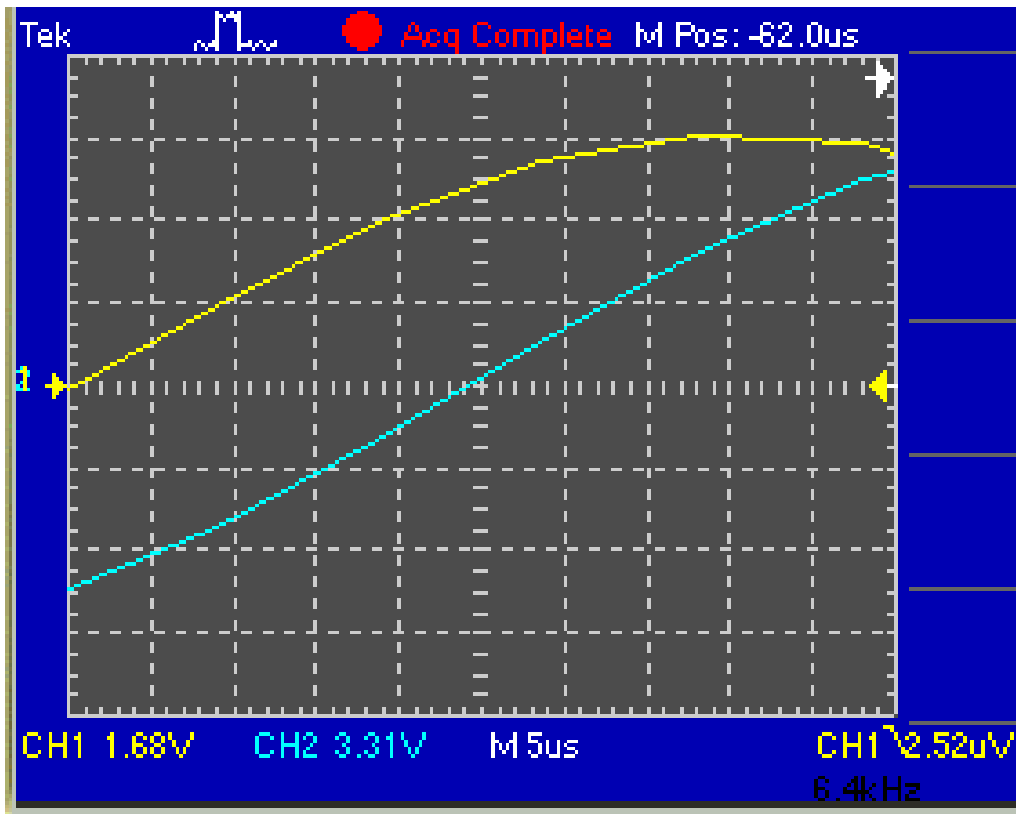


Determine the period. For the wave shown, the period is

$$T = 8.0 \text{ div} \left(\frac{20 \mu\text{s}}{\text{div}} \right) = 160 \mu\text{s}$$

Medição da diferença de fase

Next, spread the waves out using the SEC/DIV control in order to make an accurate measurement of the time difference between the waves. In the case illustrated, the time difference is



$$\Delta t = 4.9 \text{ div} \left(\frac{5 \mu\text{s}}{\text{div}} \right) = 24.5 \mu\text{s}$$

The phase shift is calculated from

$$\theta = \left(\frac{\Delta t}{T} \right) 360^\circ = \left(\frac{24.5 \mu\text{s}}{160 \mu\text{s}} \right) 360^\circ =$$

$$\theta = 55^\circ$$

Exercícios

1. The capacitance of a capacitor will be larger if
 - a. the spacing between the plates is increased.
 - b. air replaces oil as the dielectric.
 - c. the area of the plates is increased.
 - d. all of the above.

2. The major advantage of a mica capacitor over other types is
 - a. they have the largest available capacitances.
 - b. their voltage rating is very high
 - c. they are polarized.
 - d. all of the above.

3. Electrolytic capacitors are useful in applications where
 - a. a precise value of capacitance is required.
 - b. low leakage current is required.
 - c. large capacitance is required.
 - d. all of the above.

4. If a $0.015\ \mu\text{F}$ capacitor is in series with a $6800\ \text{pF}$ capacitor, the total capacitance is
 - a. $1568\ \text{pF}$.
 - b. $4678\ \text{pF}$.
 - c. $6815\ \text{pF}$.
 - d. $0.022\ \mu\text{F}$.

Exercícios

5. Two capacitors that are initially uncharged are connected in series with a dc source. Compared to the larger capacitor, the smaller capacitor will have
- a. the same charge.
 - b. more charge.
 - c. less voltage.
 - d. the same voltage.
6. When a capacitor is connected through a resistor to a dc voltage source, the charge on the capacitor will reach 50% of its final charge in
- a. less than one time constant.
 - b. exactly one time constant.
 - c. greater than one time constant.
 - d. answer depends on the amount of voltage.
7. When a capacitor is connected through a series resistor and switch to a dc voltage source, the voltage across the resistor after the switch is closed has the shape of
- a. a straight line.
 - b. a rising exponential.
 - c. a falling exponential.
 - d. none of the above.
8. The capacitive reactance of a 100 μF capacitor to 60 Hz is
- a. 6.14 $\text{k}\Omega$.
 - b. 265 Ω .
 - c. 37.7 Ω .
 - d. 26.5 Ω
9. If an sine wave from a function generator is applied to a capacitor, the current will
- a. lag voltage by 90° .
 - b. lag voltage by 45° .
 - c. be in phase with the voltage.
 - d. none of the above.

Circuitos Elétricos e Sistemas Digitais

2018-2019 - 1.º Semestre

Análise de circuitos dinâmicos (análise no tempo e em frequência)

- Resposta em frequência de circuitos RC
- Função de transferência
- Decibel
- Ponto -3 dB
- Diagramas de Bode
- Frequências de corte, largura de banda e rejeita banda
- Resposta temporal de circuitos RC
- Circuitos RC diferenciador e integrador

Impedância em circuitos de corrente alternada sinusoidal

A impedância depende da frequência

Em corrente alternada (CA) sinusoidal os componentes passivos são caracterizados por uma grandeza complexa designada **impedância**, **Z**. A impedância representa a oposição do componente ao estabelecimento de uma corrente sinusoidal, **e em geral depende da frequência do sinal sinusoidal. A lei de Ohm toma a forma: $V=Z \cdot I$, onde V e I representam a amplitude/valor eficaz da tensão e da amplitude da corrente, respectivamente, e Z é a impedância do componente (função da frequência do sinal sinusoidal). Em CA a lei de Ohm não é válida para os valores instantâneos das grandezas. Para assegurar a sua correta aplicação, a tensão e a corrente devem ser expressas de forma consistente, i.e., ambas referidas aos valores de pico, aos valores eficaz, etc.**

Em geral, a impedância Z é uma grandeza complexa. Na representação complexa temos:

$$\mathbf{Z} = V(\omega) \cdot e^{j\omega t} / I(\omega) e^{j\omega t} = |Z(\omega)| e^{j\theta}, \quad |Z(\omega)| = \sqrt{R^2 + X(\omega)^2}, \quad \theta = \tan^{-1}(X(\omega)/R)$$

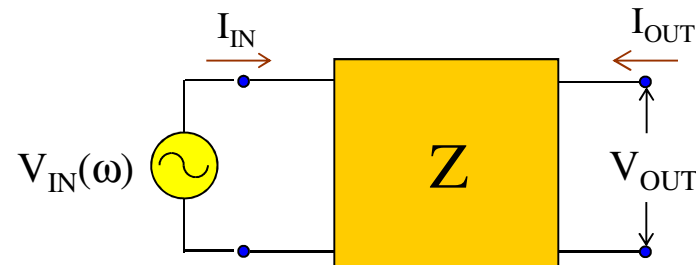
onde $\theta = \phi - \alpha$ representa a diferença de fase entre a tensão e a corrente. Na representação algébrica **Z** toma a forma: **$Z(\omega) = R + jX(\omega)$** , $j^2 = -1$, onde R e $X(\omega)$ representam as partes **resistiva** e **reativa** da impedância do elemento ou da parte do circuito em análise: R designa-se por **resistência ôhmica** (unidade SI: ohm Ω), e **aqui considera-se que não depende da frequência do sinal sinusoidal**, e X é **reactância** (unidade SI: ohm Ω), e é função da frequência do sinal sinusoidal. Se X for negativo diz-se que a **reactância** é capacitiva $X = X_C$; se X for positivo diz-se que a **reactância** é indutiva $X = X_L$.

Função de transferência do circuito, Diagramas de Bode, frequências de corte e largura de banda

Resposta em Frequência de um Circuito

(Ver Microelectronics Circuits, A. S. Sedra & K. C. Smith, Saunders College Publishing, capítulo 1)

Considere o circuito linear abaixo, ao qual é aplicada uma tensão $v_{in}(t)=V_{IN}\cos(\omega t)$, representada no esquema pela amplitude $V_{IN}(\omega)$.



Pretende-se estudar o comportamento do sinal de saída, V_{OUT} , em função da frequência do sinal de entrada $V_{IN}(\omega)$, i.e., caracterizar a resposta em frequência do circuito.

A **resposta em frequência** é descrita pela **função de transferência do circuito**, $\mathbf{H}(\omega)$, que é a razão entre a tensão a saída, $V_{OUT}(\omega)$, e a tensão na entrada, $V_{IN}(\omega)$, com a saída em aberto (i.e., $I_{OUT}=0$).

Em geral, $\mathbf{H}(\omega)$ é uma função complexa:

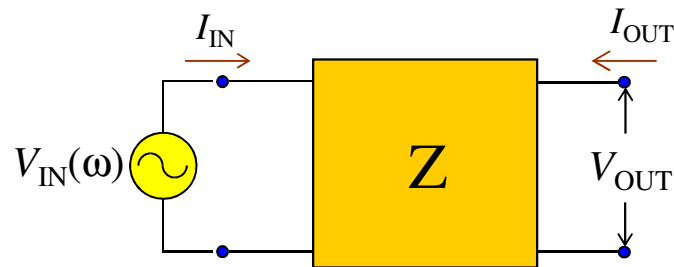
$$\mathbf{H}(\omega)=|H(\omega)|e^{j\theta(\omega)},$$

onde $|H(\omega)|=|V_{OUT}/V_{IN}|$ e $\theta(\omega)$ é a ddf entre a tensão a entrada e a tensão a saída.

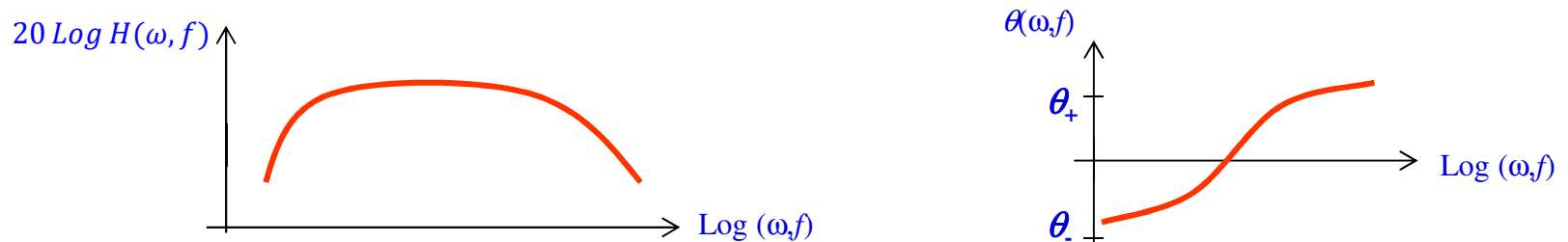
Diagramas de Bode

(Ver Microelectronics Circuits, A. S. Sedra & K. C. Smith, Saunders College Publishing, capítulo 1)

Considere o circuito linear abaixo, ao qual é aplicada uma tensão $v_{in}(t)=V_{IN}\cos(\omega t)$, representada no esquema pela amplitude $V_{IN}(\omega)$:

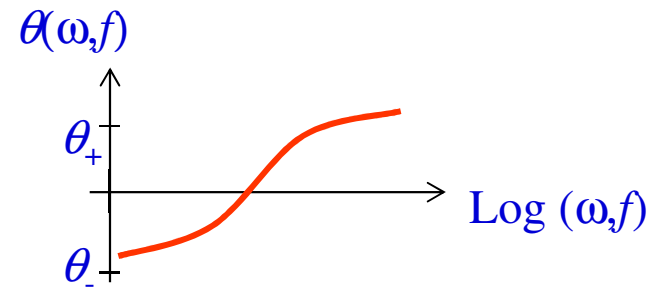
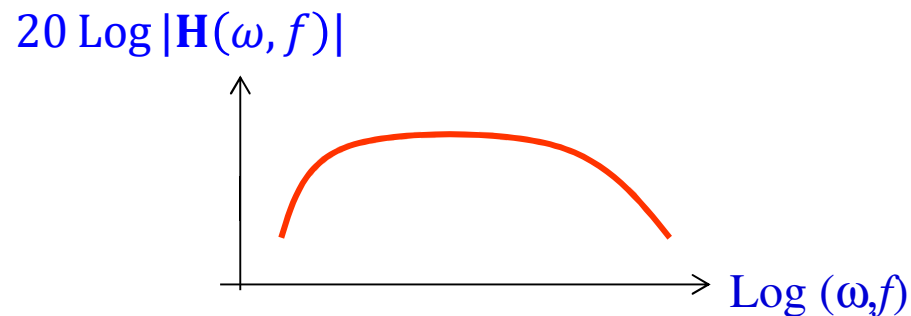


Conhecida a resposta em frequência, descrita pela **função de transferência do circuito**, $\mathbf{H}(\omega)$, que é a razão entre a tensão a saída, $V_{OUT}(\omega)$, e a tensão na entrada, $V_{IN}(\omega)$, com a saída em aberto (i.e., $I_{OUT}=0$), $\mathbf{H}(\omega)=|\mathbf{H}(\omega)|e^{j\theta(\omega)}=H(\omega)e^{j\theta(\omega)}$, é corrente apresentar a resposta em frequência do circuito representando graficamente o comportamento do módulo $H(\omega)$ e da fase $\theta(\omega)$ da função de transferência, obtendo-se os **diagramas de Bode**, representações gráficas das funções $H(\omega)$ e $\theta(\omega)$ na forma $20 \text{ Log } H(\omega, f)$ e $\theta(\omega) = \arg \mathbf{H}(\omega, f)$, e no eixo ω/f é representado o logaritmo de ω/f :



Diagramas de Bode

Diagramas de Bode: representações gráficas das funções $|\mathbf{H}(\omega)|$ e $\theta(\omega)$ na forma $20 \text{ Log } |\mathbf{H}(\omega, f)|$ e $\theta(\omega) = \arg \mathbf{H}(\omega, f)$, e o eixo das abcissas corresponde ao logaritmo de ω/f :



Decibel:

-3 dB

$$\text{dB} = 20 \log \left(\left| \frac{V_{\text{OUT}}}{V_{\text{IN}}} \right| \right)$$

$$-3 \text{ dB} \equiv \left| \frac{V_{\text{OUT}}(\omega_{\text{ci}})}{V_{\text{IN}}(\omega_{\text{ci}})} \right| = \left| \frac{V_{\text{OUT}}(\omega_{\text{cs}})}{V_{\text{IN}}(\omega_{\text{cs}})} \right| = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$\boxed{1/\sqrt{2} (\approx 0.707)}$$

Ver: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Decibel>

<https://en.wikipedia.org/wiki/Decibel>

Decibéis

Circuit/filter responses are often given in terms of decibels, which is defined as

$$\text{dB} = 10 \log \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right)$$

Because it is a ratio, the decibel is dimensionless. One of the most important decibel ratios occurs when the power ratio is 1:2. This is called the *−3 dB frequency*, because

$$\text{dB} = 10 \log \left(\frac{1}{2} \right) = -3 \text{ dB}$$

Another useful definition for the decibel, when measuring voltages across the **same impedance** is

$$\text{dB} = 20 \log \left(\frac{V_{out}}{V_{in}} \right)$$

Decibel

The **decibel** (symbol: dB) is a [unit](#) of measurement used to express the ratio of one value of a [physical property](#) to another on a logarithmic scale. It can be used to express a change in value (e.g., +1 dB or −1 dB) or an absolute value. In the latter case, it expresses the ratio of a value to a reference value; when used in this way, the decibel symbol should be appended with a suffix that indicates the reference value, or some other property. For example, if the reference value is 1 [volt](#), then the suffix is "[V](#)" (e.g., "20 dBV"), and if the reference value is one [milliwatt](#), then the suffix is "[m](#)" (e.g., "20 dBm").^[1]

Uses:

Electronics

In electronics, the decibel is often used to express power or amplitude ratios ([gains](#)), in preference to [arithmetic](#) ratios or [percentages](#). One advantage is that the total decibel gain of a series of components (such as [amplifiers](#) and [attenuators](#)) can be calculated simply by summing the decibel gains of the individual components. Similarly, in telecommunications, decibels denote signal gain or loss from a transmitter to a receiver through some medium ([free space](#), [waveguide](#), [coaxial cable](#), [fiber optics](#), etc.) using a [link budget](#).

The decibel unit can also be combined with a suffix to create an absolute unit of electric power. For example, it can be combined with "m" for "milliwatt" to produce the "[dBm](#)". A power level of 0 dBm corresponds to one milliwatt, and 1 dBm is one decibel greater (about 1.259 mW).

In professional audio specifications, a popular unit is the [dBU](#). This is relative to the [root mean square](#) voltage which delivers 1 mW (0 dBm) into a 600-ohm resistor, or $\sqrt{1 \text{ mW} \times 600 \ \Omega} \approx 0.775 \text{ V}_{\text{RMS}}$. When used in a 600-ohm circuit (historically, the standard reference impedance in telephone circuits), dBU and dBm are [identical](#).

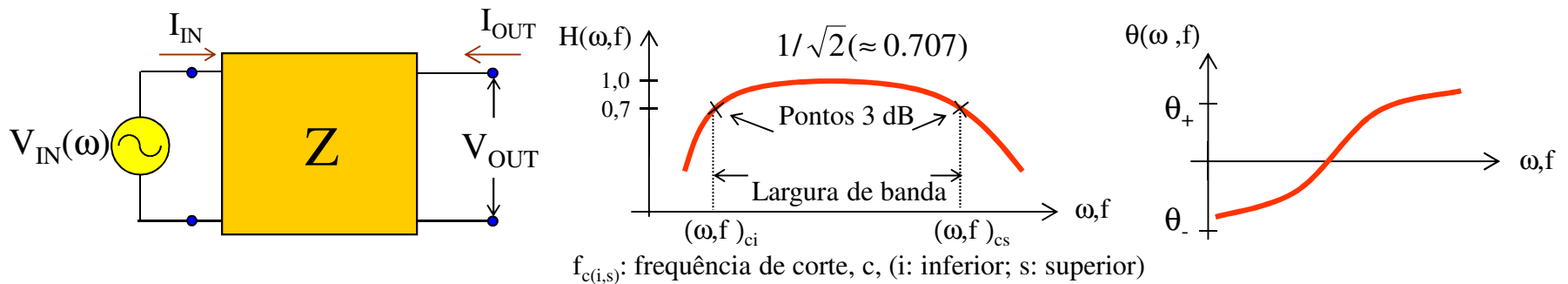
dB	Power ratio	Amplitude ratio
100	10000000000	100000
90	1000000000	31623
80	100000000	10000
70	10000000	3162
60	1000000	1000
50	100000	316.2
40	10000	100
30	1000	31.62
20	100	10
10	10	3.162
6	3.981 \approx 4	1.995 \approx 2
3	1.995 \approx 2	1.413 \approx $\sqrt{2}$
1	1.259	1.122
0	1	1
-1	0.794	0.891
-3	0.501 \approx $\frac{1}{2}$	0.708 \approx $\sqrt{\frac{1}{2}}$
-6	0.251 \approx $\frac{1}{4}$	0.501 \approx $\frac{1}{2}$
-10	0.1	0.3162
-20	0.01	0.1
-30	0.001	0.03162
-40	0.0001	0.01
-50	0.00001	0.003162
-60	0.000001	0.001
-70	0.0000001	0.0003162
-80	0.00000001	0.0001
-90	0.000000001	0.00003162
-100	0.0000000001	0.00001

An example scale showing power ratios x , amplitude ratios \sqrt{x} , and dB equivalents $10 \log_{10} x$.

Frequências de corte e largura de banda

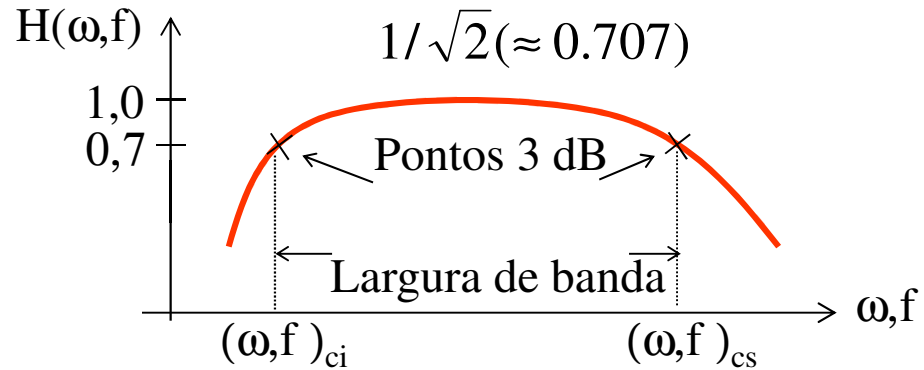
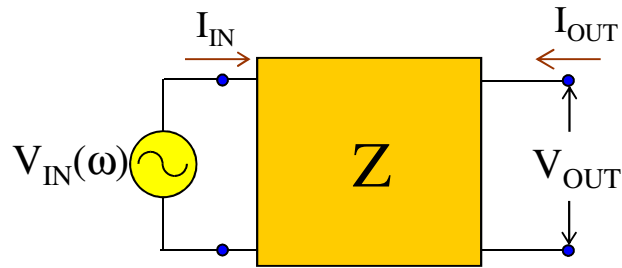
(Ver Microelectronics Circuits, A. S. Sedra & K. C. Smith, Saunders College Publishing, capítulo 1)

Função de transferência de um circuito, $H(\omega)$, definida como a razão entre a tensão à saída, $V_{OUT}(\omega)$, e a tensão à entrada, $V_{IN}(\omega)$, com a saída em aberto ($I_{OUT}=0$): $\mathbf{H}(\omega)=|\mathbf{H}(\omega)|e^{j\theta(\omega)}$, onde $|\mathbf{H}(\omega)|=|V_{OUT}/V_{IN}|$ e $\theta(\omega)$ é a ddf entre a tensão à entrada e a tensão à saída.



Define-se **largura de banda** de um circuito, **LB**, como o **gama de frequências**, Δf , para a qual o módulo da função de transferência é maior ou igual a $1/\sqrt{2}$, ver gráfico $H(\omega, f)$. (Ter presente que $f=\omega/2\pi$.) Quando $f_{ci}=0$, diz-se que o circuito é um **passa-baixo**; se $f_{cs}=\infty$, o circuito funciona como um **passa-alto**. Se $0 < f_{ci} < f_{cs} < \infty$, o circuito actua como **passa-banda**, permitindo apenas a passagem de sinais de frequência f na banda $[f_{cs}, f_{ci}]$. Há ainda circuitos cuja resposta em frequência pode ser representada como a combinação de um passa-alto (pa) com um passa-baixo (pb), em que $f_{c-pb} < f_{c-pa}$: circuitos **rejeita-banda**. Estes não permitem a passagem de sinais de frequência $f \in [f_{c-pb}, f_{c-pa}]$.

Frequências de corte e largura de banda



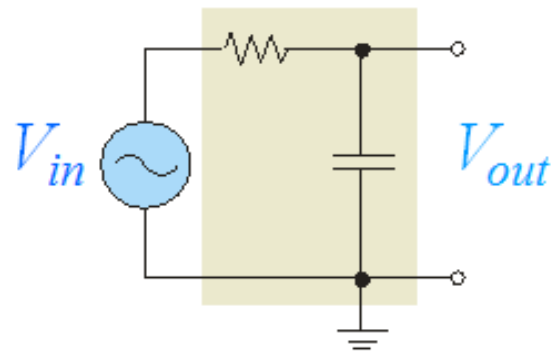
$f_{c(i,s)}$: frequência de corte, c, (i: inferior; s: superior)

Define-se **largura de banda** de um circuito, **LB**, como o **gama de frequências**, Δf , para a qual o módulo da função de transferência é maior ou igual a $1/\sqrt{2}$, ver gráfico $H(\omega, f)$. (Ter presente que $f = \omega/2\pi$.) Quando $f_{ci} = 0$, diz-se que o circuito é um **passa-baixo**; se $f_{cs} = \infty$, o circuito funciona como um **passa-alto**. Se $0 < f_{ci} < f_{cs} < \infty$, o circuito actua como **passa-banda**, permitindo apenas a passagem de sinais de frequência f na banda $[f_{cs}, f_{ci}]$. Há ainda circuitos cuja resposta em frequência pode ser representada como a combinação de um passa-alto (pa) com um passa-baixo (pb), em que $f_{c-pb} < f_{c-pa}$: circuitos **rejeita-banda**. Estes não permitem a passagem de sinais de frequência $f \in [f_{c-pb}, f_{c-pa}]$.

Resposta em frequência de circuitos com condensadores

Resposta em frequência de circuitos RC

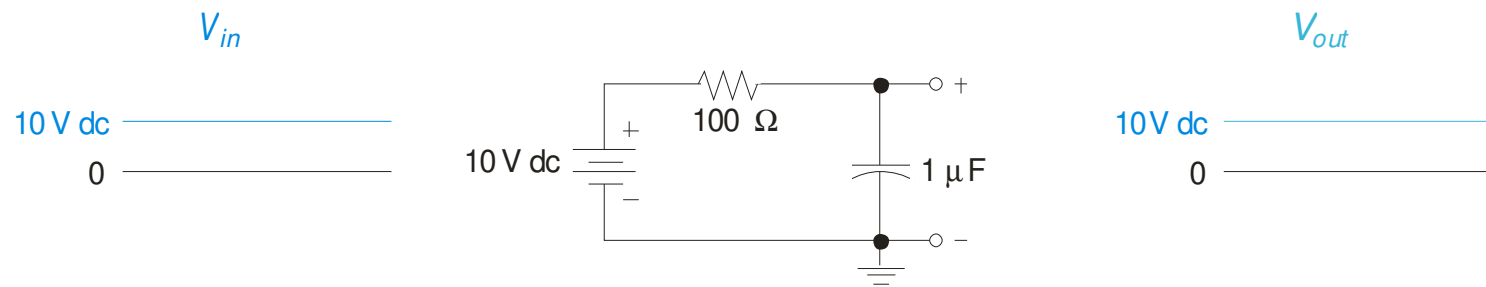
Consider a signal is applied to an RC circuit, and the output is taken across the capacitor as shown:



Resposta em frequência de circuitos RC

When a signal is applied to an RC circuit, and the output is taken across the capacitor as shown, the circuit acts as a low-pass filter.

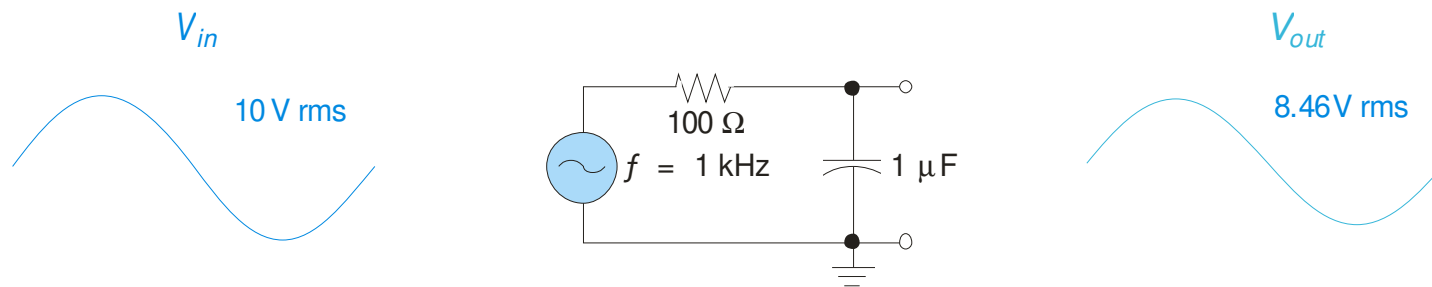
As the frequency increases, the output amplitude decreases.



Resposta em frequência de circuitos RC

When a signal is applied to an RC circuit, and the output is taken across the capacitor as shown, the circuit acts as a low-pass filter.

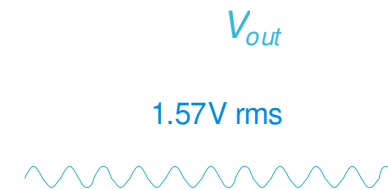
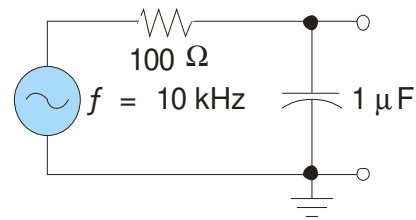
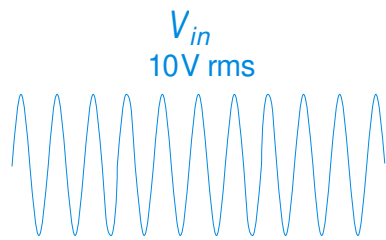
As the frequency increases, the output amplitude decreases.



Resposta em frequência de circuitos RC

When a signal is applied to an RC circuit, and the output is taken across the capacitor as shown, the circuit acts as a low-pass filter.

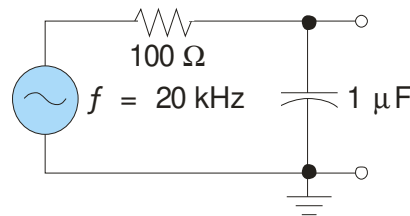
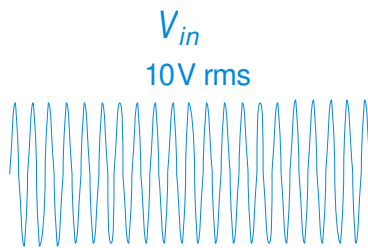
As the frequency increases, the output amplitude decreases.



Resposta em frequência de circuitos RC

When a signal is applied to an RC circuit, and the output is taken across the capacitor as shown, the circuit acts as a low-pass filter.

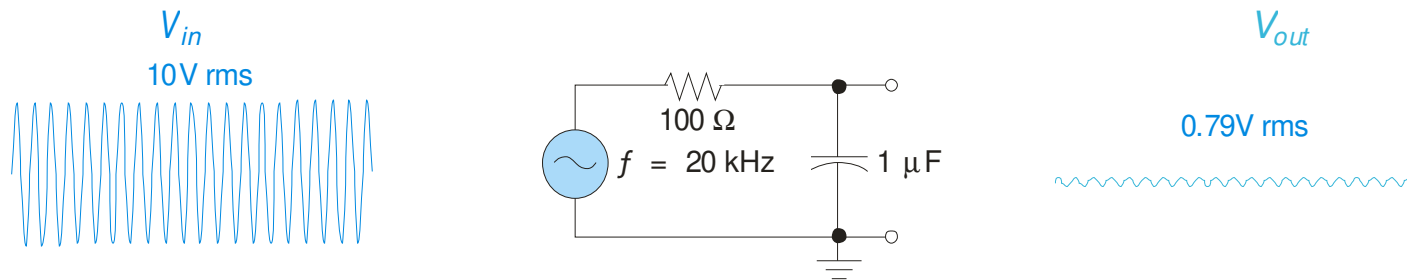
As the frequency increases, the output amplitude decreases.



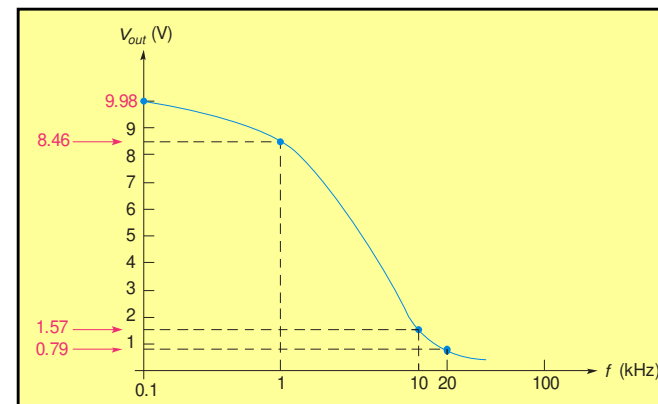
Resposta em frequência de circuitos RC

When a signal is applied to an RC circuit, and the output is taken across the capacitor as shown, the circuit acts as a low-pass filter.

As the frequency increases, the output amplitude decreases.



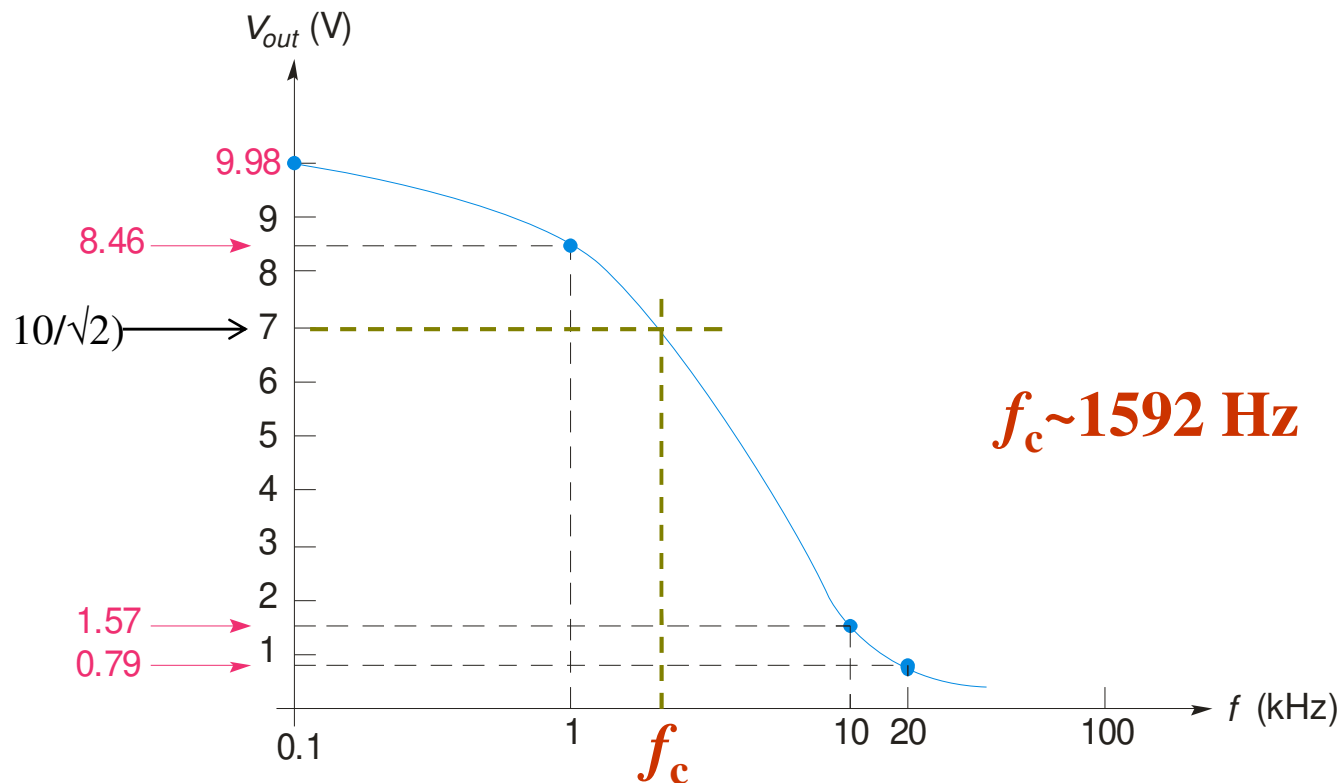
Plotting the frequency response:



Frequência de corte

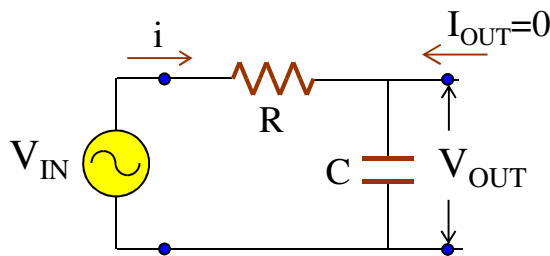
Frequency response: In electric circuits, the variation of the output voltage (or current) over a specified range of frequencies.

Cutoff frequency (f_c): The frequency at which the output voltage of a filter is 70.7% ($1/\sqrt{2}$) of the maximum output voltage, or **the frequency at which the output power is reduced to half its maximum value.**



Função de Transferência de Circuitos RC: filtro RC passa-baixo

Circuito RC Passa-Baixo



$$H(\omega) = |H(\omega)|e^{j\theta} = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{Z_C}{Z_R + Z_C}$$

$$|H(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}$$

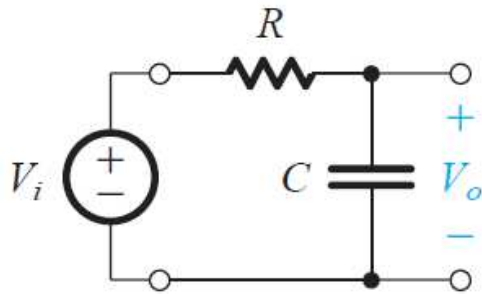
$$\theta = -\tan^{-1}(\omega RC)$$

A amplitude da tensão aos terminais do condensador (tensão de saída V_{OUT}), decresce à medida que a frequência do sinal de entrada, V_{IN} , aumenta.

A **frequência angular de corte** deste circuito, ω_c , é $|H(\omega_c)| = |V_{OUT}/V_{IN}| = 1/\sqrt{2}$: $\omega = \omega_c = 1/RC$. A frequência angular $\omega_{ci} = 0$ e $\omega_{cs} = 1/RC$. A largura de banda é $LB = \omega_{cs}/2\pi - \omega_{ci}/2\pi = 1/(2\pi RC)$.

O circuito comporta-se como um **filtro passa-baixo**: só os sinais de entrada de frequência inferior a ω_c são “bem” transferidos para a saída.

Diagrama de Bode - circuito RC passa-baixo

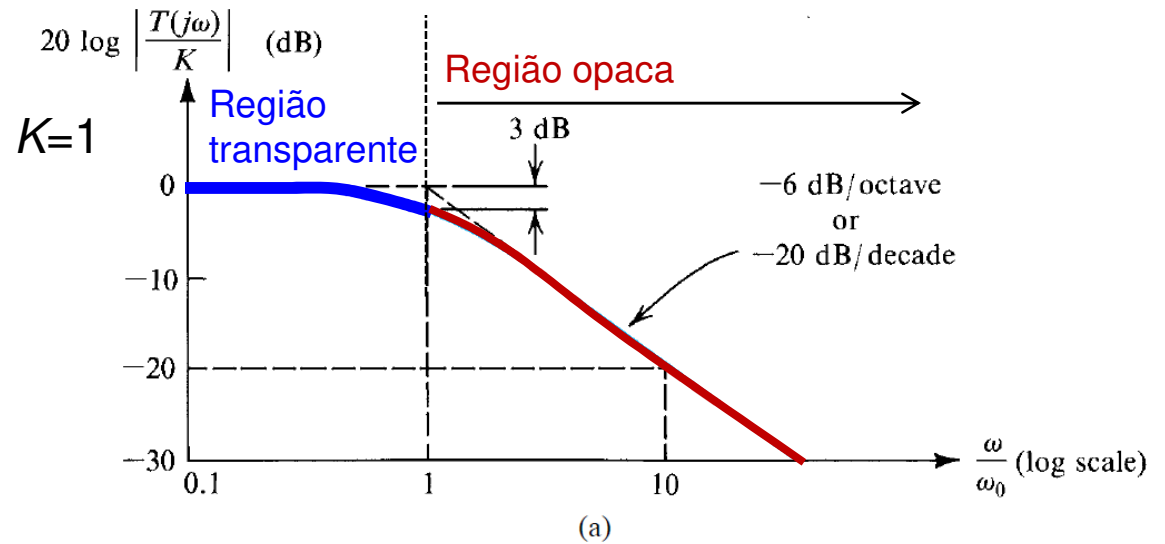


(a)

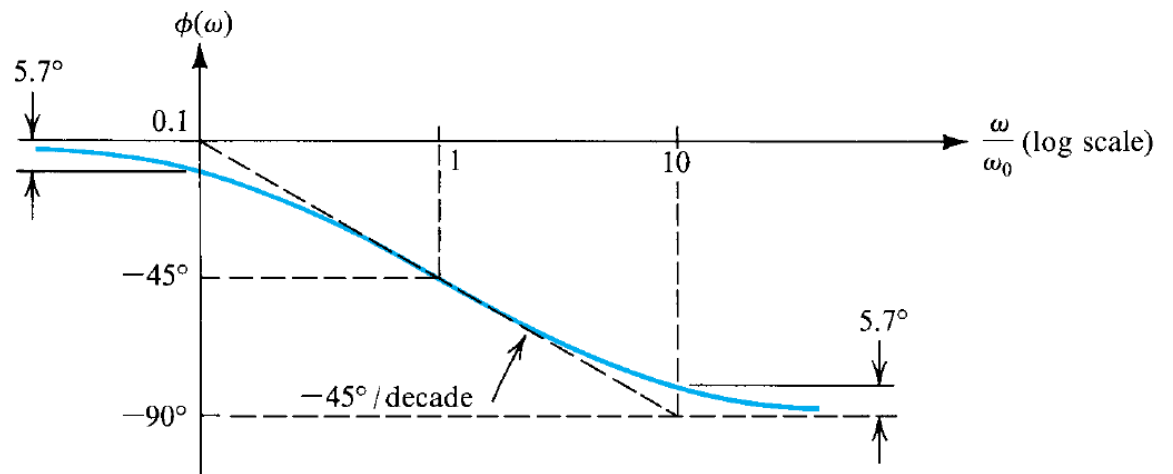
$$H(\omega) = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)^2}} e^{-j \arctan \frac{\omega}{\omega_C}}$$

$$\omega_C = \frac{1}{RC} \quad \text{frequência de corte}$$



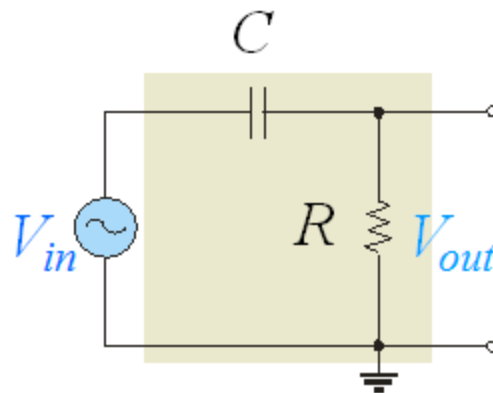
(a)



(b)

Resposta em frequência de circuitos “CR”

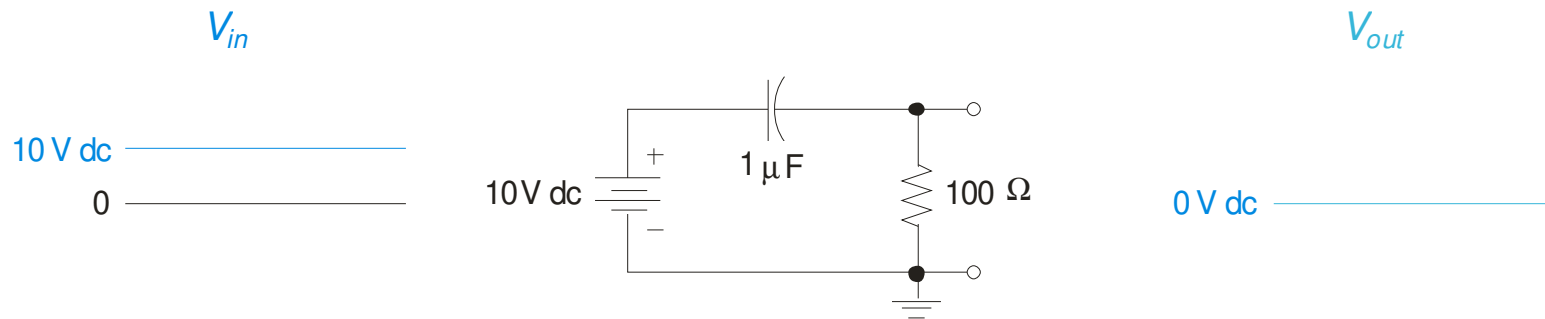
Considered the RC circuit obtained by reversing the components, and taking the output across the resistor as shown:



Resposta em frequência de circuitos RC

Reversing the components, and taking the output across the resistor as shown, the circuit acts as a high-pass filter.

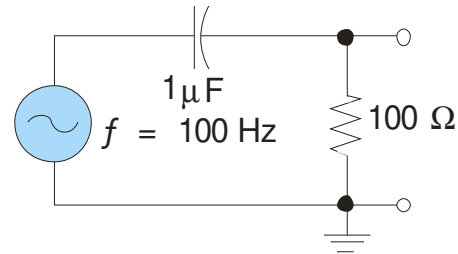
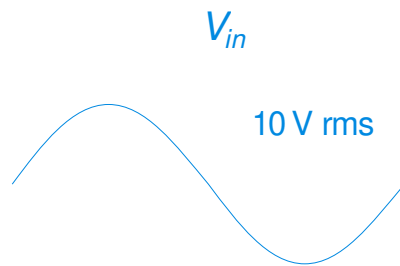
As the frequency increases, the output amplitude also increases.



Resposta em frequência de circuitos RC

Reversing the components, and taking the output across the resistor as shown, the circuit acts as a high-pass filter.

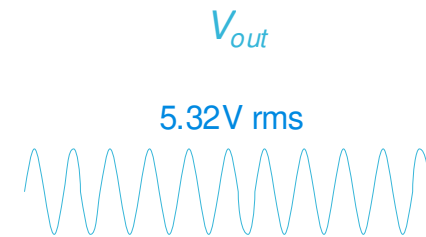
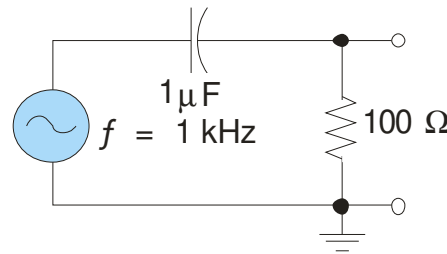
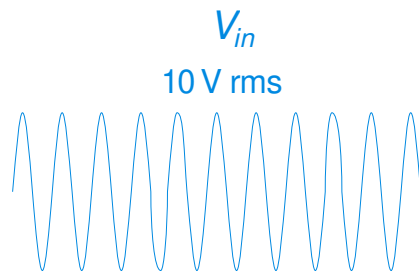
As the frequency increases, the output amplitude also increases.



Resposta em frequência de circuitos RC

Reversing the components, and taking the output across the resistor as shown, the circuit acts as a high-pass filter.

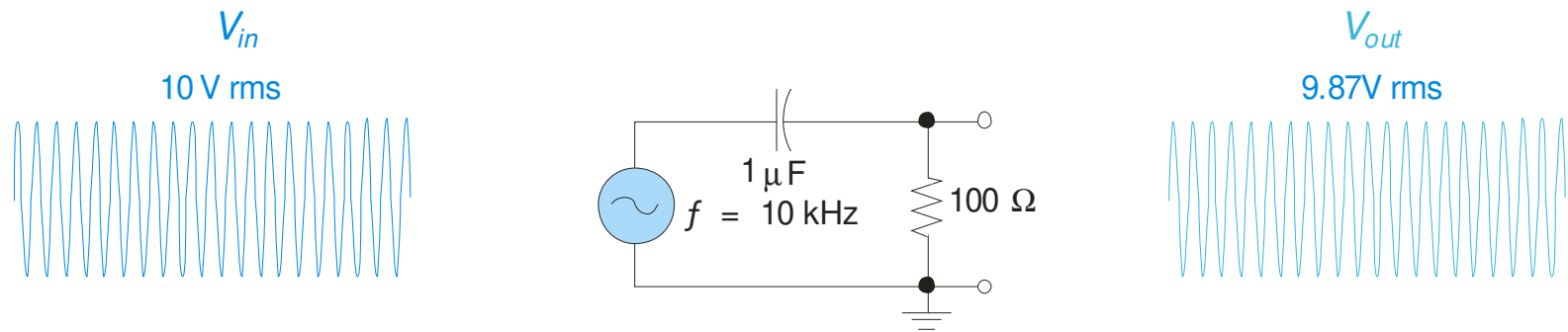
As the frequency increases, the output amplitude also increases.



Resposta em frequência de circuitos RC

Reversing the components, and taking the output across the resistor as shown, the circuit acts as a high-pass filter.

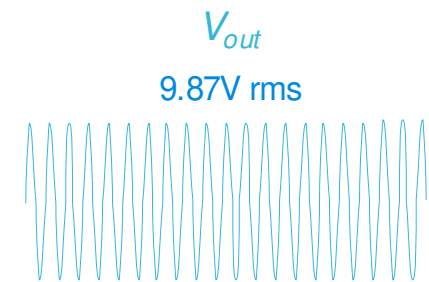
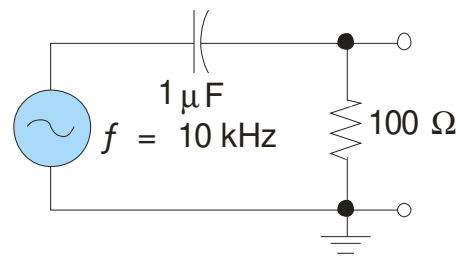
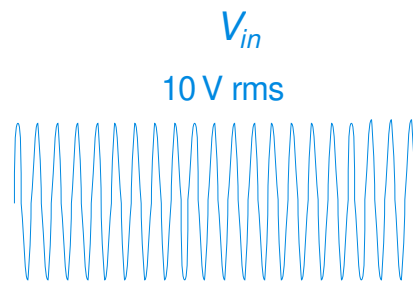
As the frequency increases, the output amplitude also increases.



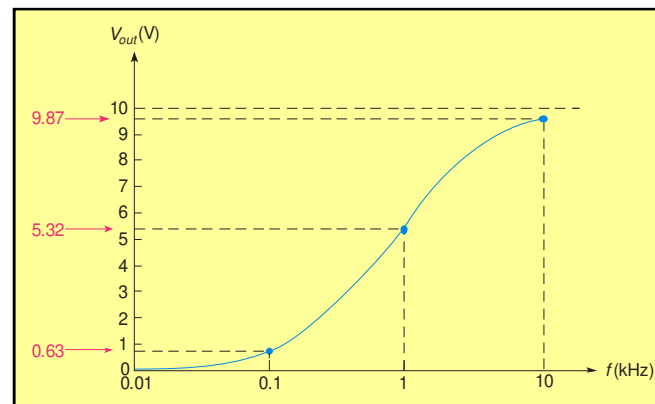
Resposta em frequência de circuitos RC

Reversing the components, and taking the output across the resistor as shown, the circuit acts as a high-pass filter.

As the frequency increases, the output amplitude also increases.



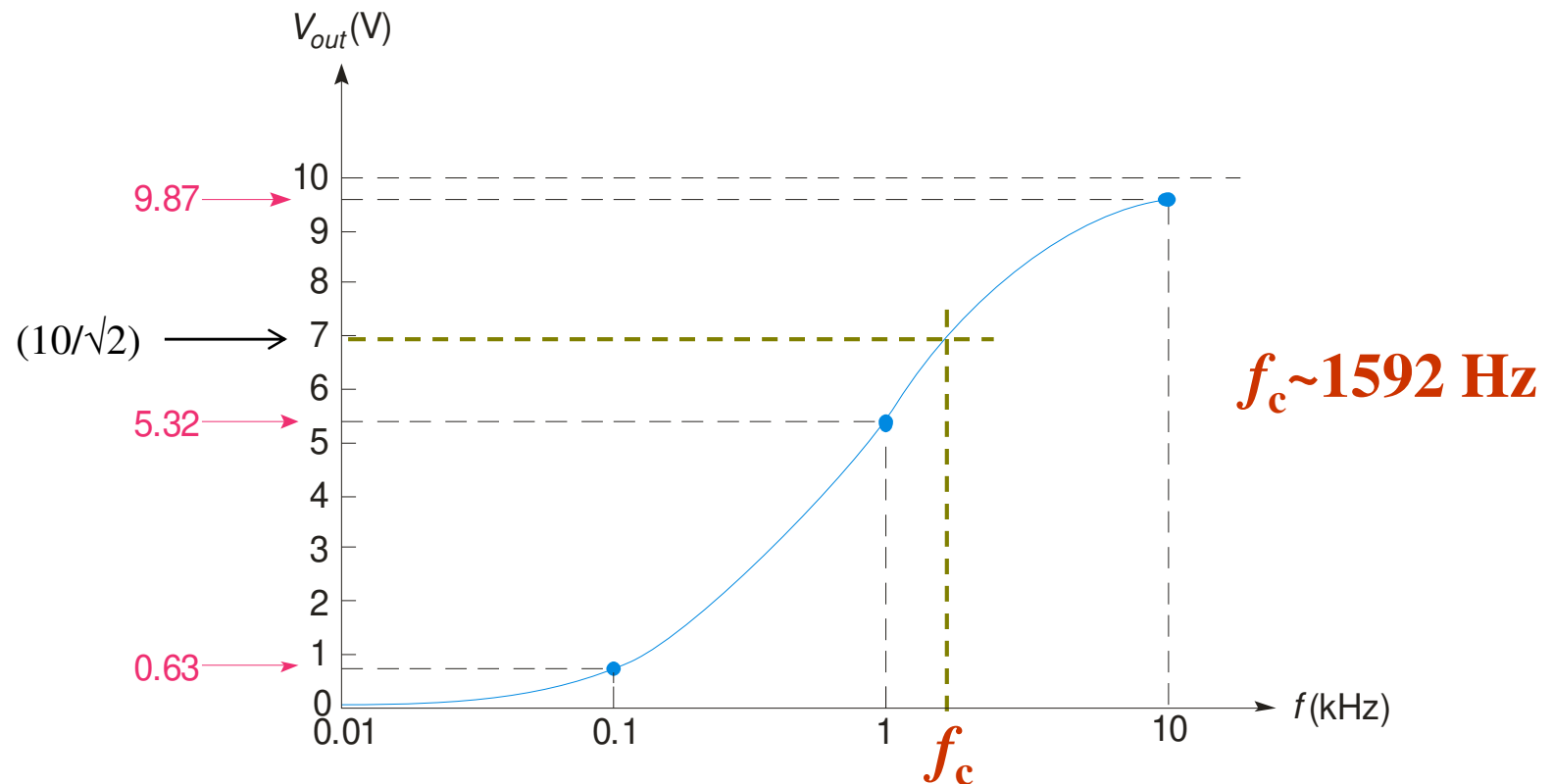
Plotting the response:



Frequência de corte

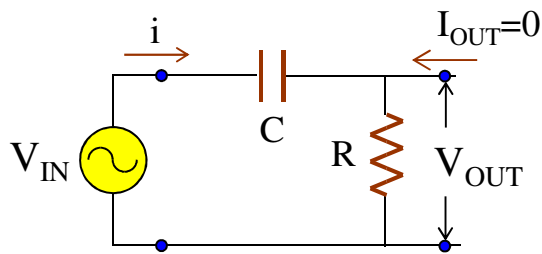
Frequency response: In electric circuits, the variation of the output voltage (or current) over a specified range of frequencies.

Cutoff frequency (f_c): The frequency at which the output voltage of a filter is 70.7% ($1/\sqrt{2}$) of the maximum output voltage or **the frequency at which the output power is reduced to half its maximum value.**



Função de Transferência de Circuitos RC: filtro RC passa-alto

Circuito RC Passa-Alto



$$H(\omega) = |H(\omega)|e^{j\theta} = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{Z_R}{Z_R + Z_C}$$

$$|H(\omega)| = \frac{\omega RC}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}$$

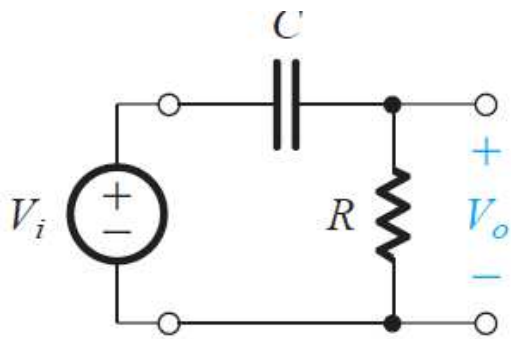
$$\theta = \tan^{-1}(1/\omega RC)$$

Nesta montagem, a amplitude da tensão aos terminais da resistência (tensão de saída V_{OUT}), decresce à medida que a frequência do sinal de entrada, V_{IN} , diminui.

A **frequência de corte** deste circuito, ω_c , é $|H(\omega_c)| = |V_{OUT}/V_{IN}| = 1/\sqrt{2}$: $\omega = \omega_c = 1/RC$. A frequência $\omega_{ci} = 1/RC$ e $\omega_{cs} = \infty$. A largura de banda é $LB = \infty$, com $f_{ci} = 1/2\pi RC$.

O circuito comporta-se como um **filtro passa-alto**: só os sinais de entrada com frequência superior a ω_c são transferidos, *de forma eficiente*, para a saída.

Diagramas de Bode assintóticos

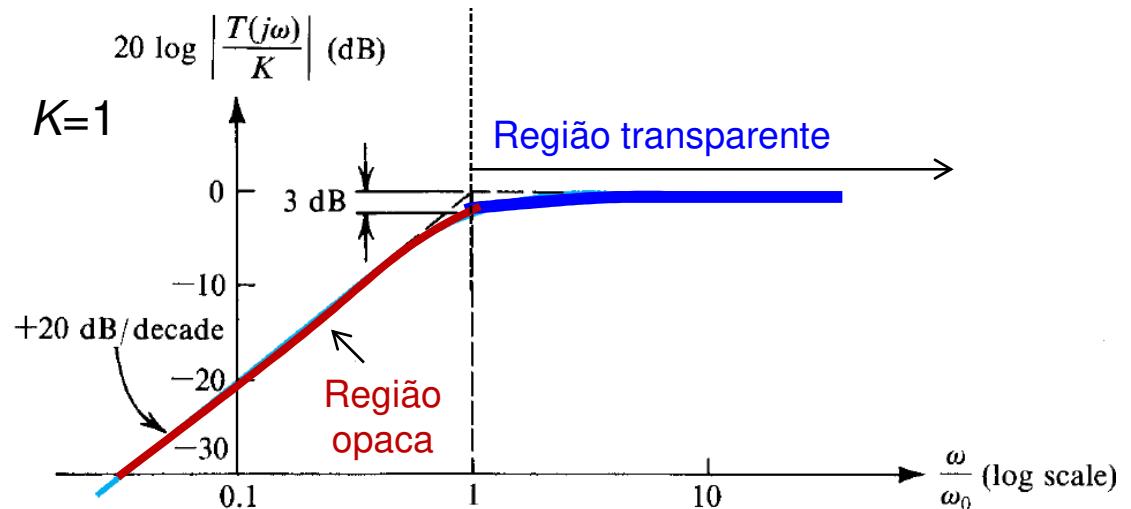


(b)

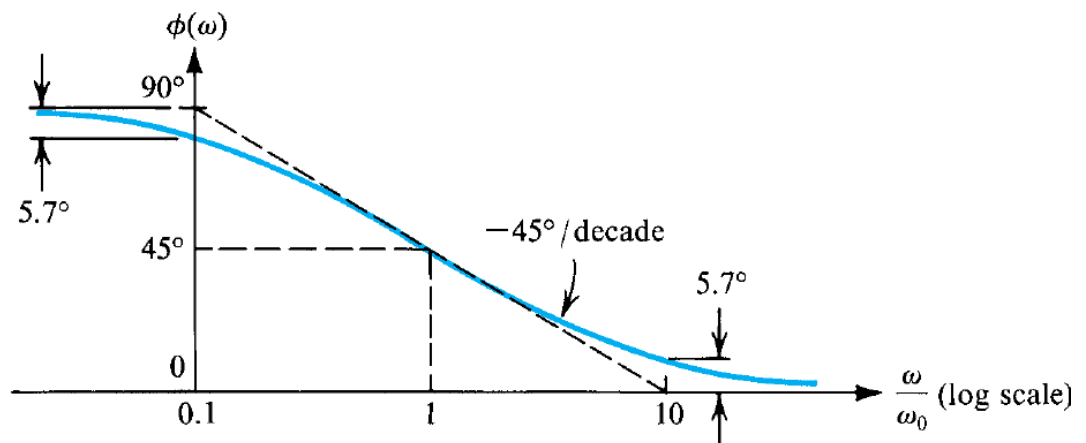
$$H(\omega) = \frac{v_{out}(\omega)}{v_{in}(\omega)} = \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + j\omega RC}}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)^2}} e^{+j\arctan\frac{\omega_C}{\omega}}$$

$$\omega_C = \frac{1}{RC} \quad \text{frequência de corte}$$



(a)



(b)

Circuitos Eléctricos e Sistemas Digitais

2018-2019 - 1.º Semestre

Filtros de ordem n

Filtros de ordem n

- A ordem n de um filtro é dada pelo número n de componente do circuito que dependem da frequência;
- Atenuação à frequência de corte é igual a $-n \times 3$ dB, onde n é a ordem do filtro;
- Taxa de atenuação na região de opacidade: $-n \times 20$ dB/década
- A diferença de fase (uma década antes e uma década depois da frequência de corte): $-n \cdot 45^\circ$ dB/década;

Dimensionamento de filtros

- Dimensionamento das impedâncias:

$$R \rightarrow k \cdot R \qquad C \rightarrow C/k \qquad L \rightarrow k \cdot L$$

A frequência de corte é invariante a esta transformação

- Dimensionamento da frequência: $\omega'_c = k \cdot \omega_c$

$$R \rightarrow R \qquad C \rightarrow C \cdot k \qquad L \rightarrow L/k$$

Circuitos Eléctricos e Sistemas Digitais

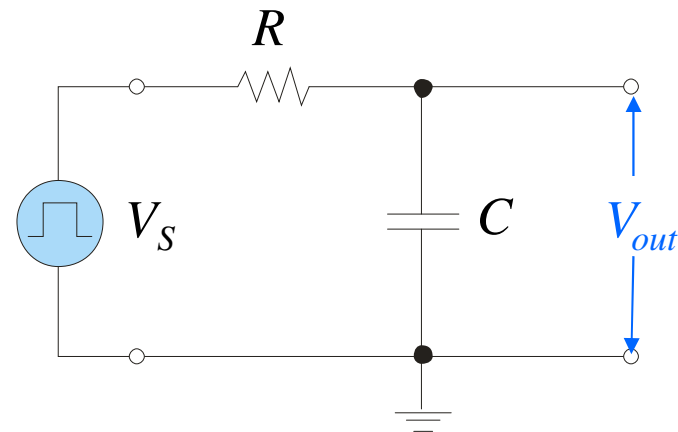
2018-2019 - 1.º Semestre

Resposta temporal de circuitos RC

Resposta de um circuito RC a pulsos de tensão

An RC integrator is a circuit that approximates the mathematical process of integration. Integration is a summing process, and a basic integrator can produce an output that is a running sum of the input under certain conditions.

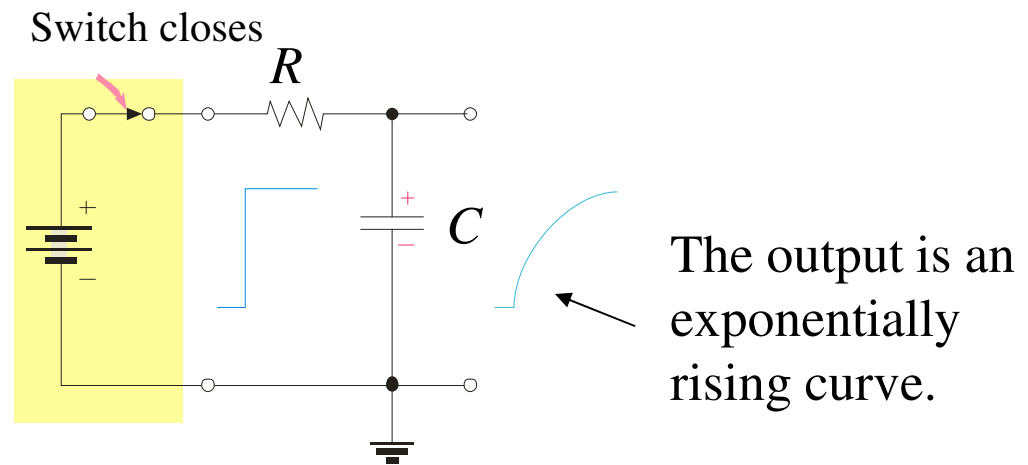
A basic RC integrator circuit is simply a capacitor in series with a resistor and the source. The output is taken across the capacitor.



Resposta de um circuito RC a pulsos de tensão

When a pulse generator is connected to the input of an RC integrator, the capacitor will charge and discharge in response to the pulses.

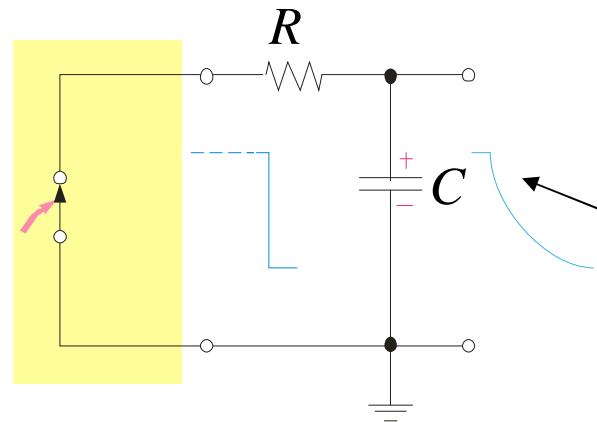
When the input pulse goes HIGH, the pulse generator acts like a battery in series with a switch and the capacitor charges.



Resposta de um circuito RC a pulsos de tensão

When the pulse generator goes low, the small internal impedance of the generator makes it look like a closed switch has replaced the battery.

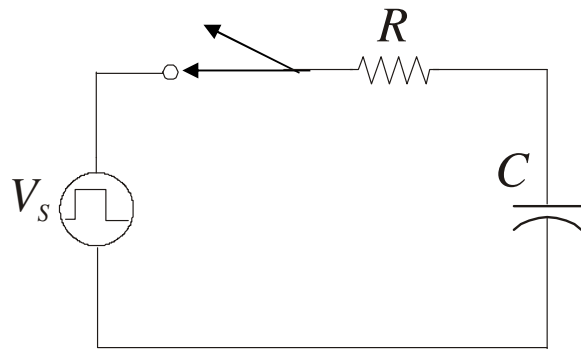
The pulse generator now acts like a closed switch and the capacitor discharges.



The output is an exponentially falling curve.

Carga e descarga de um condensador

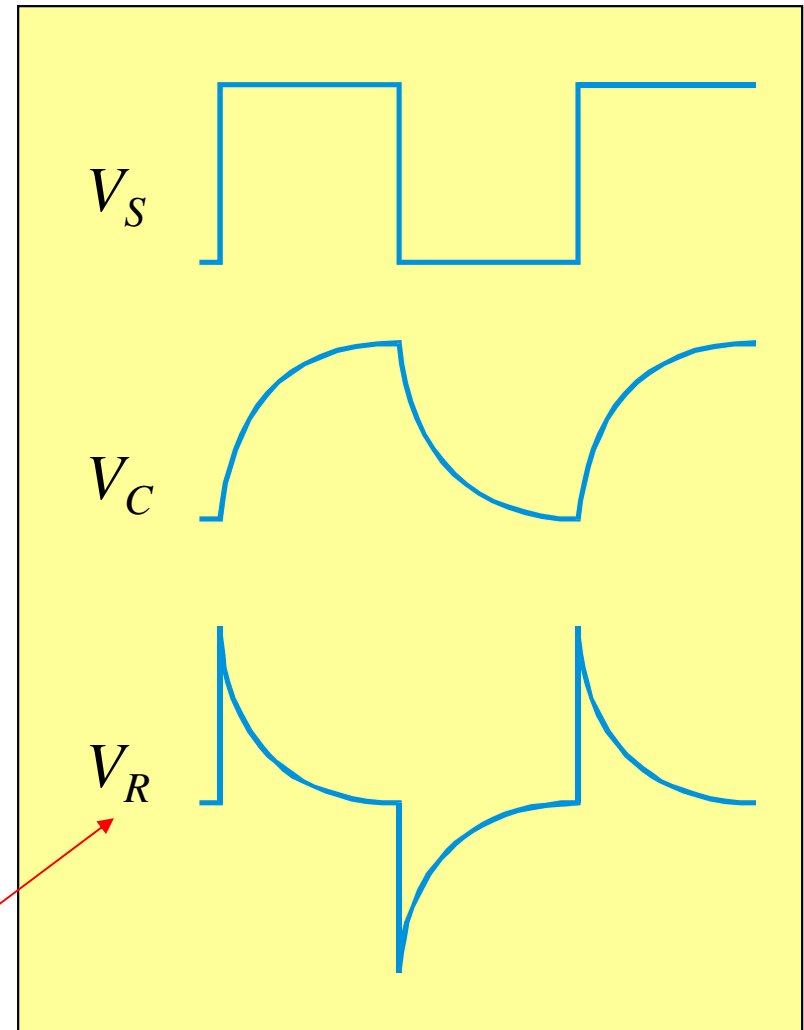
The same shape curves are seen if a square wave is used for the source.



$$\tau = RC$$

What is the shape of the current curve?

The current has the same shape as V_R .



Circuitos RC integrador e diferenciador

Integrator: A circuit producing an output that approaches the mathematical integral of the input.

Differentiator: A circuit producing an output that approaches the mathematical derivative of the input.

Circuito RC integrador

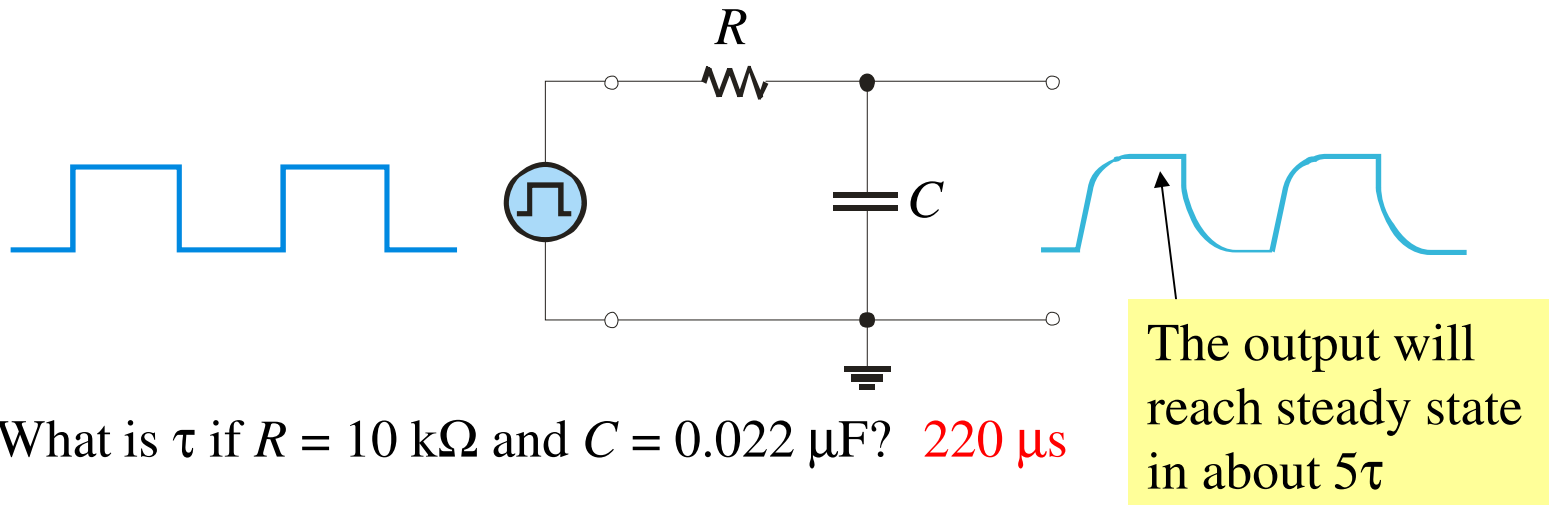
Waveforms for the RC integrator depend on the time constant (t) of the circuit.

Time constant A fixed time interval, set by R and C , or R and L values, that determines the time response of a circuit.

Transient time An interval equal to approximately five time constants.

If the time constant is short compared to the period of the input pulses, the capacitor will fully charge and discharge.

For an RC circuit, $\tau = RC$. The output will reach 63% of the final value in 1τ .

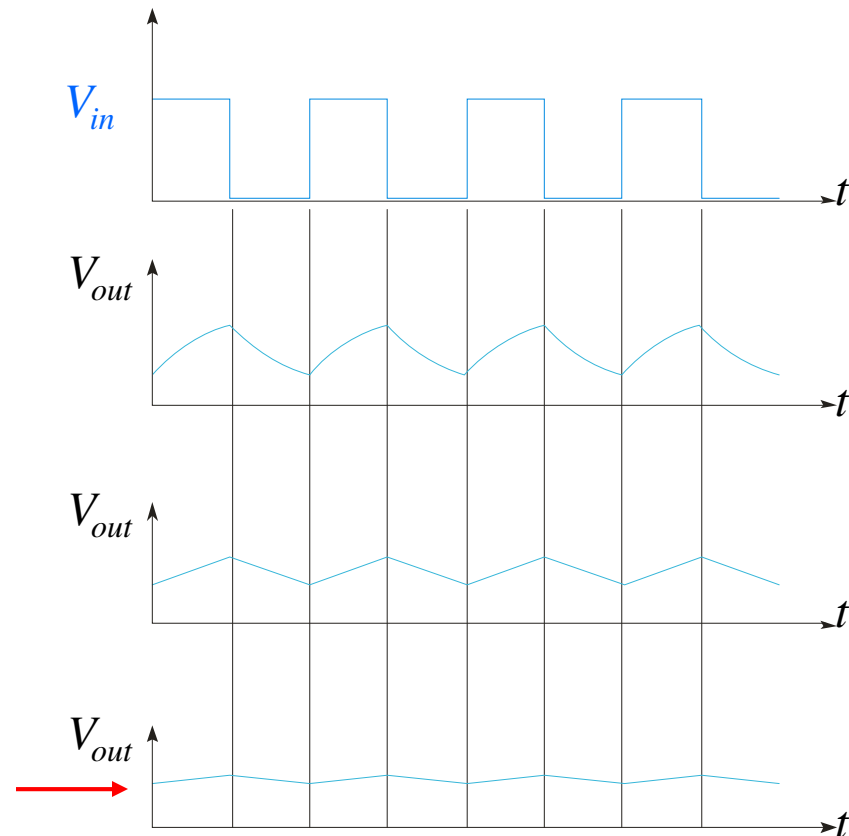


What is τ if $R = 10 \text{ k}\Omega$ and $C = 0.022 \text{ }\mu\text{F}$? **$220 \text{ }\mu\text{s}$**

Circuito RC integrador

Se o período da onda de entrada diminuir (i.e., a frequência aumentar), a onda de saída tende para o valor médio da onda de entrada, e onda de saída vai-se assemelhando cada vez mais a uma onda triangular, mas com uma amplitude menor.

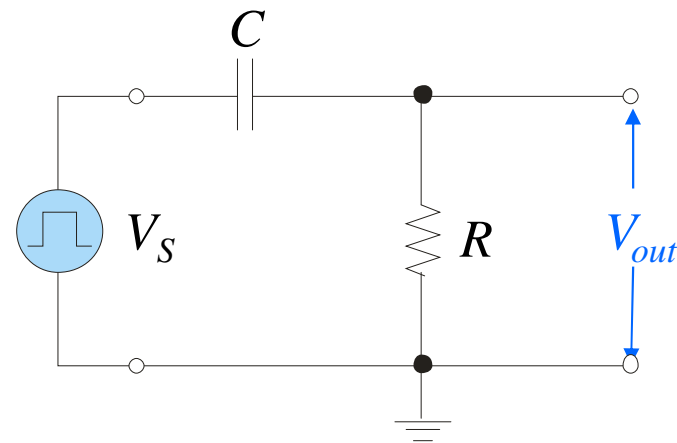
A onda triangular pode ser interpretada como o “integral” de uma onda quadrada.



Resposta de um circuito CR a pulsos de tensão

An RC differentiator is a circuit that approximates the mathematical process of differentiation. Differentiation is a process that finds the rate of change, and a basic differentiator can produce an output that is the rate of change of the input under certain conditions.

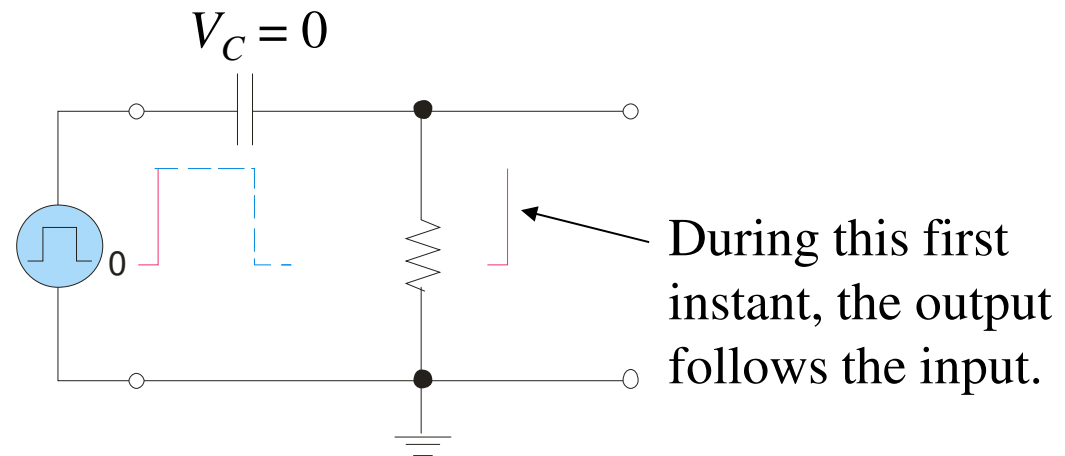
A basic RC differentiator circuit is simply a resistor in series with a capacitor and the source. The output is taken across the resistor.



Resposta de um circuito CR a pulsos de tensão

When a pulse generator is connected to the input of an RC differentiator, the capacitor appears as an instantaneous short to the rising edge and passes it to the resistor.

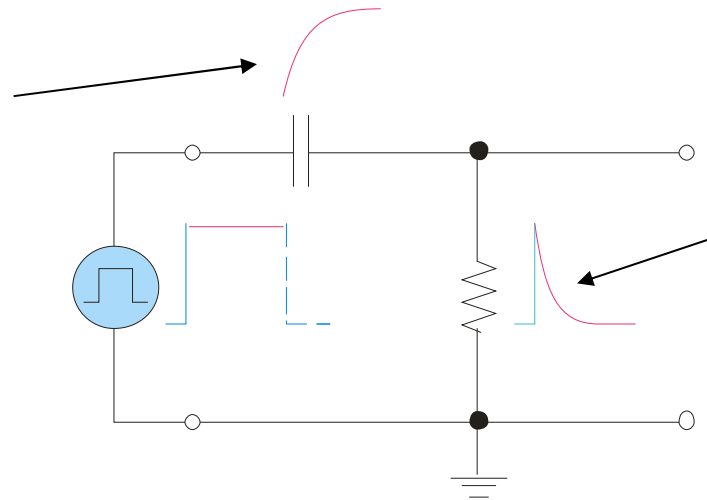
The capacitor looks like a short to the rising edge because voltage across C cannot change instantaneously.



Resposta de um circuito CR a pulsos de tensão

After the initial edge has passed, the capacitor charges and the output voltage decreases exponentially.

The voltage across C is the traditional charging waveform.

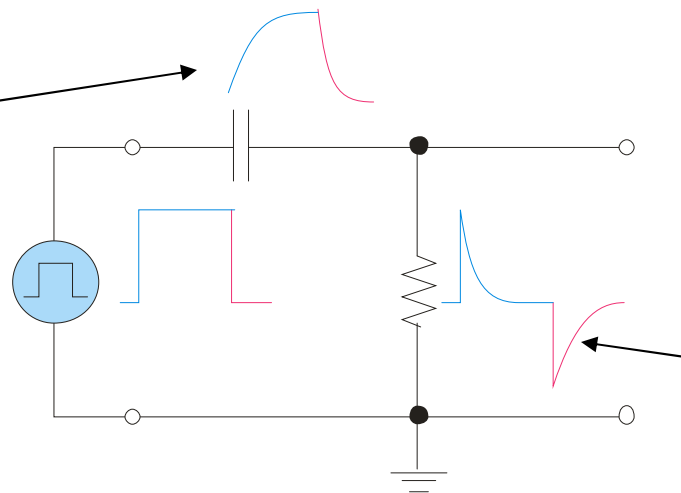


The output decreases as the pulse levels off.

Resposta de um circuito CR a pulsos de tensão

The falling edge is a rapid change, so it is passed to the output because the capacitor voltage cannot change instantaneously. The type of response shown happens when τ is much less than the pulse width ($\tau \ll t_w$).

The voltage across C when the input goes low decreases exponentially.



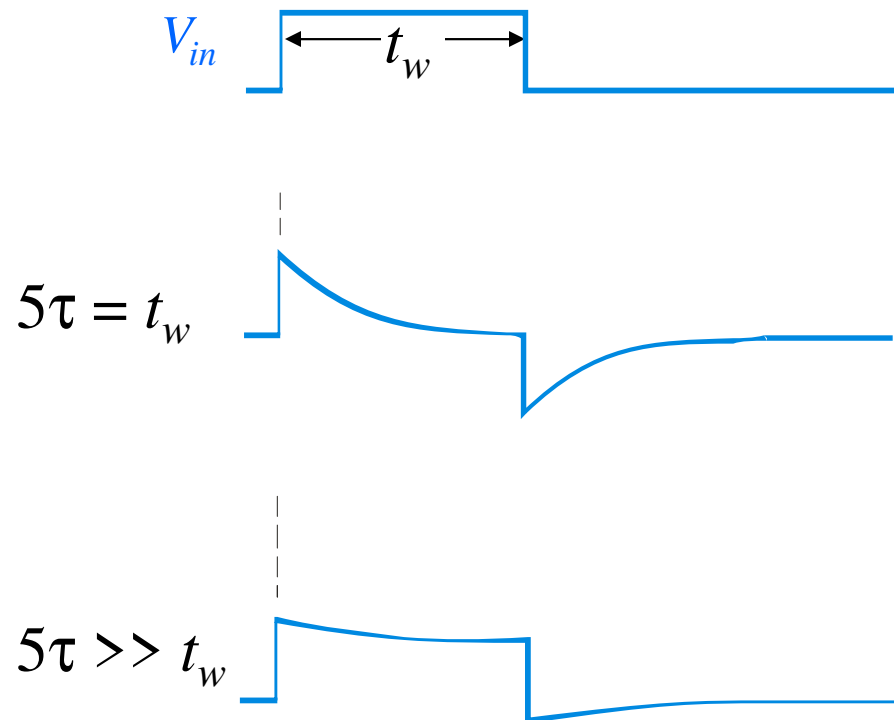
After dropping to a negative value, the output voltage increases exponentially as the capacitor discharges.

Resposta de um circuito CR a pulsos de tensão

The output shape is dependent on the ratio of τ to t_w .

When $5\tau = t_w$, the pulse has just returned to the baseline when it repeats.

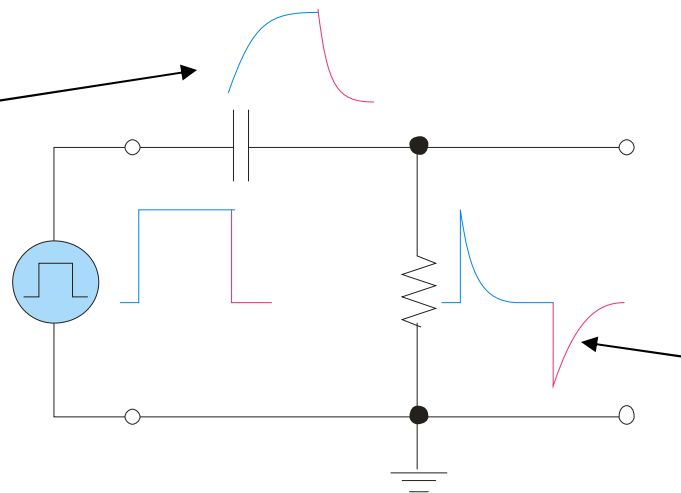
If τ is long compared to the pulse width, the output does not have time to return to the original baseline before the pulse ends. The resulting output looks like a pulse with “droop”.



Circuito CR diferenciador

The falling edge is a rapid change, so it is passed to the output because the capacitor voltage cannot change instantaneously. The type of response shown happens when τ is much less than the pulse width ($\tau \ll t_w$).

The voltage across C when the input goes low decreases exponentially.

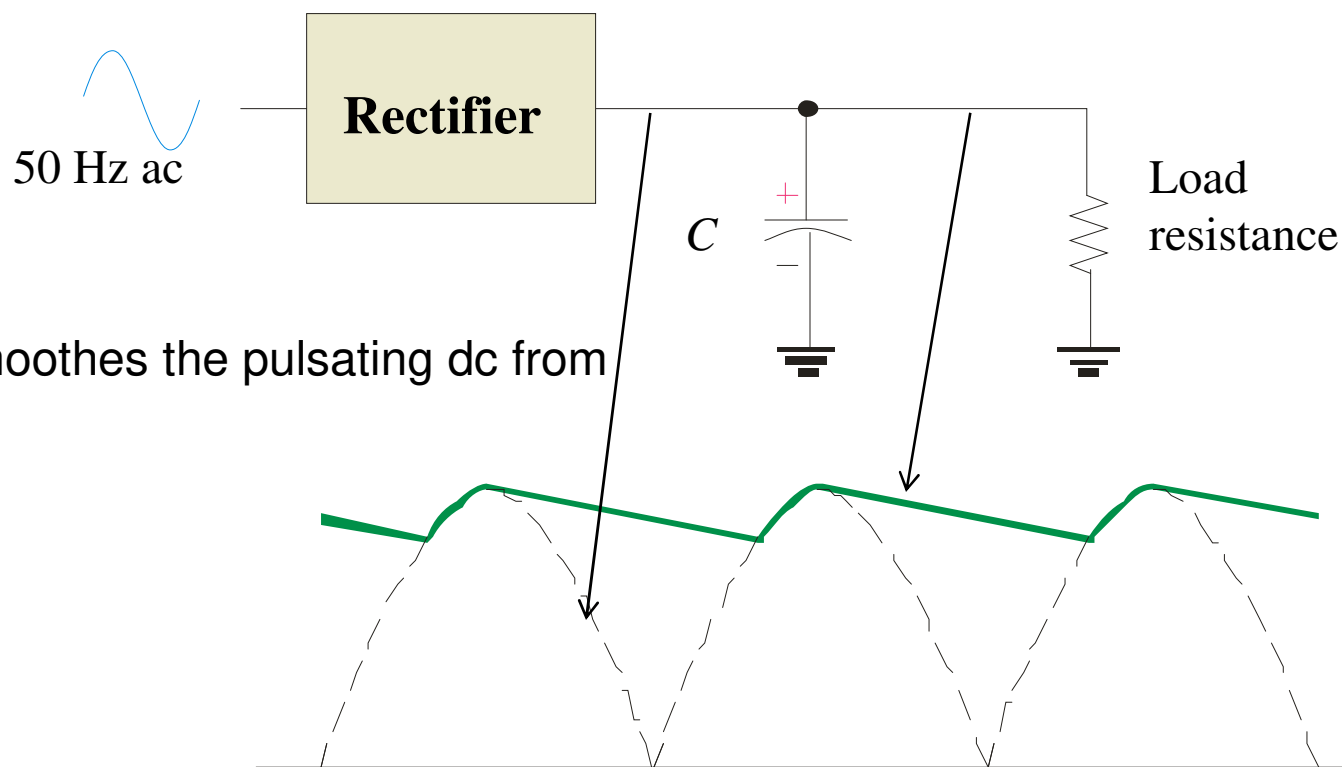


After dropping to a negative value, the output voltage increases exponentially as the capacitor discharges.

Aplicações de circuitos com condensadores

Filtragem de sinais usando condensadores (Power supply filtering)

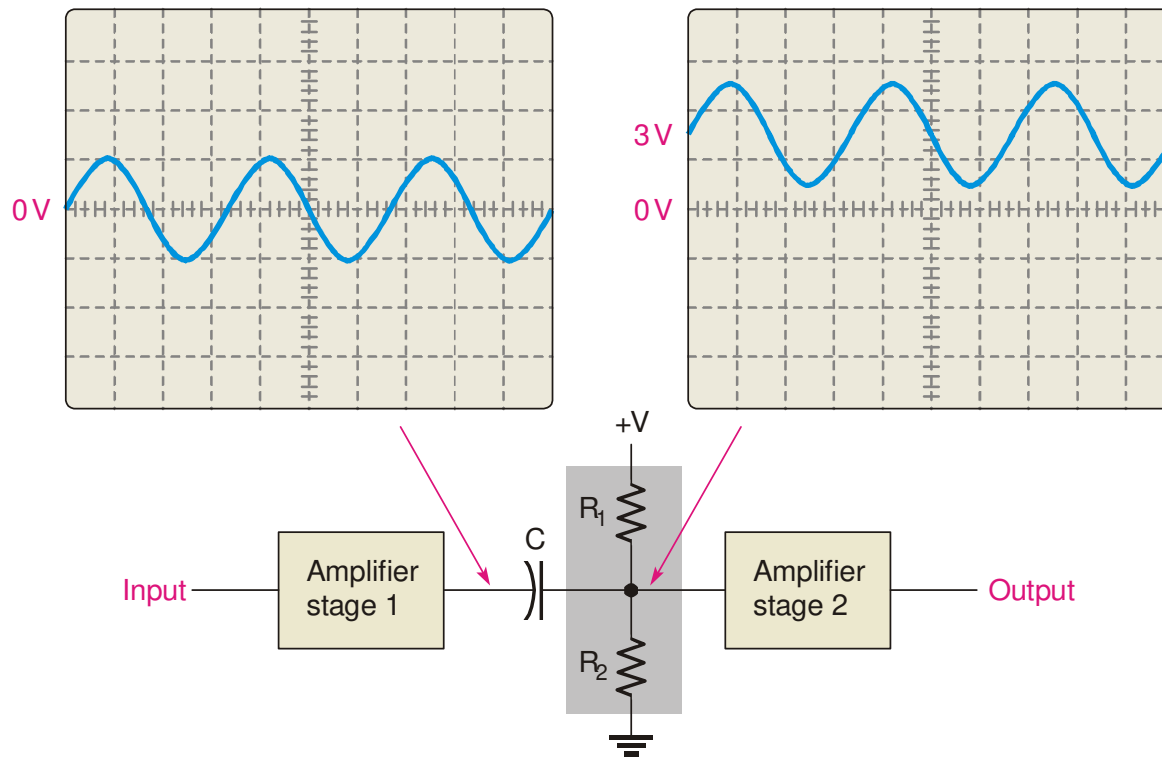
There are many applications for capacitors. One is in filters, such as the power supply filter shown here.



The filter smooths the pulsating dc from the rectifier.

Acoplamento/desacoplamento de sinais dc e ac usando condensadores (Coupling capacitors)

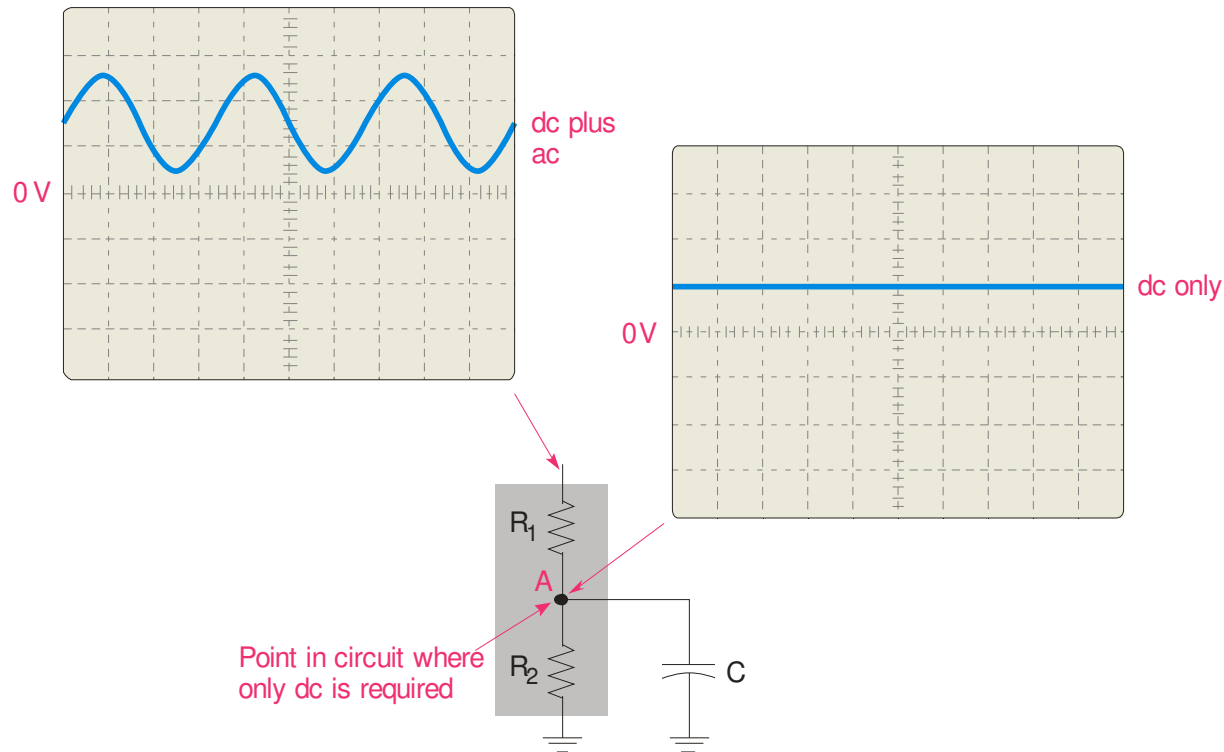
Coupling capacitors are used to pass an ac signal from one stage to another while blocking dc.



The capacitor isolates dc between the amplifier stages, preventing dc in one stage from affecting the other stage.

Bypass capacitors

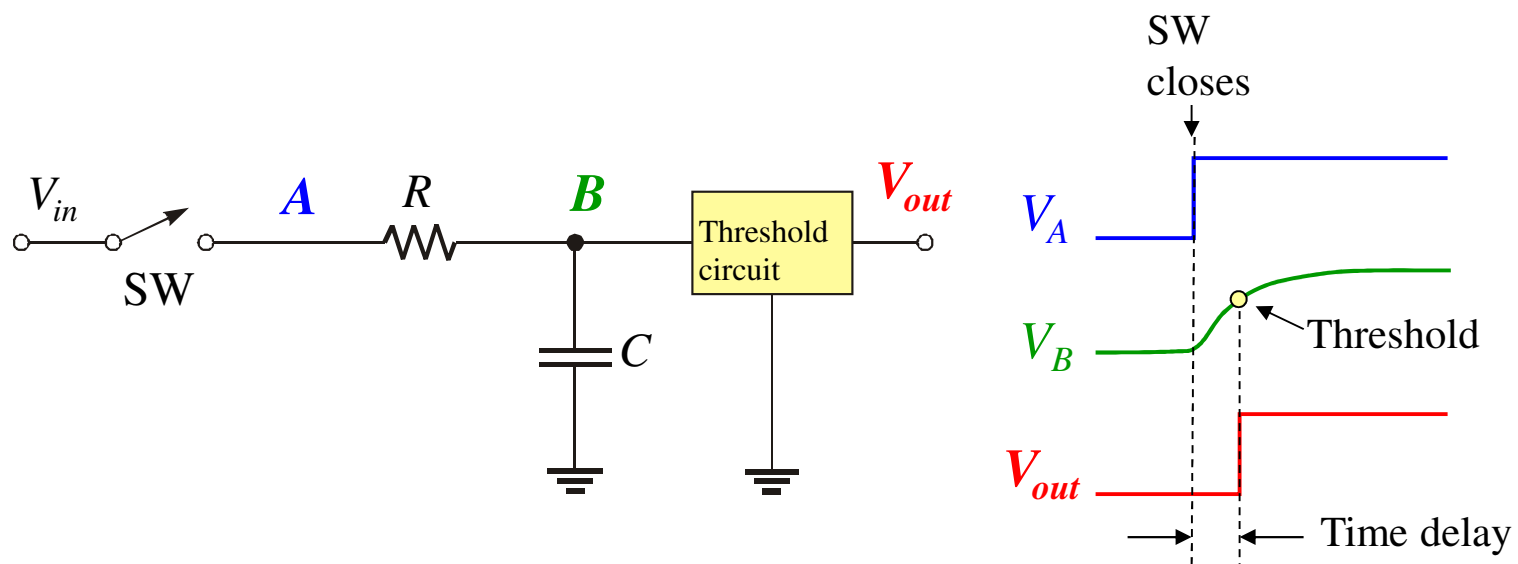
Another application is to **bypass** an ac signal to ground but retain a dc value. This is widely done to affect gain in amplifiers.



The bypass capacitor places point A at ac ground, keeping only a dc value at point A.

Aplicação do circuito RC integrador

An application of an integrator is to generate a time delay. The voltage at **B** rises as the capacitor charges until the threshold circuit detects that the capacitor has reached a predetermined level.



Circuitos Elétricos e Sistemas Digitais

2018-2019 - 1.º Semestre

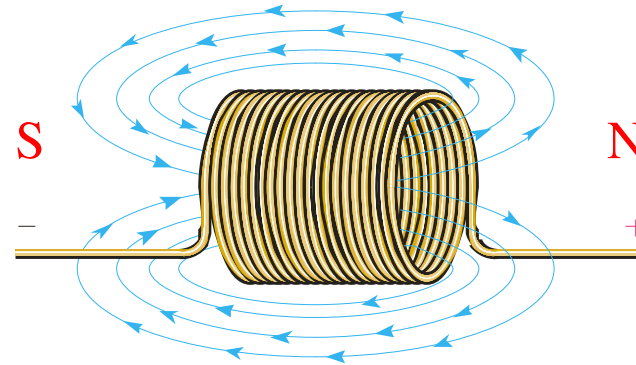
Análise de circuitos dinâmicos (análise no tempo e em frequência)

- Bobines/Indutâncias
- Associação de indutâncias
- Impedância e reatância indutiva
- Circuitos RL
- Resposta temporal
- Resposta em frequência
- Filtros RL e RCL
- Filtros passa-baixo, passa-alto, passa-banda, rejeita-banda
- Filtros de ordem superior (filtros de ordem n)
- Taxa de atenuação por oitava e por década

Bobine/indutor básico

When a length of wire is formed into a coil., it becomes a basic inductor. When there is current in the inductor, a three-dimensional magnetic field is created.

A change in current causes the magnetic field to change. This in turn induces a voltage across the inductor that opposes the original change in current.



Uma bobine/indutância é um dispositivo elétrico que produz um fluxo magnético quando percorrida por uma corrente elétrica. Se a corrente for variável o fluxo criado também é variável, e a variação de fluxo induz uma força eletromotriz de autoindução na própria bobine.

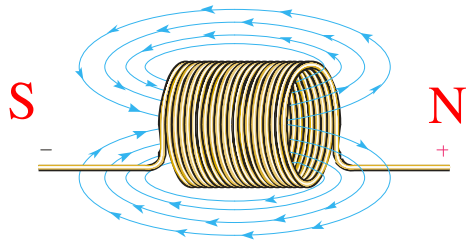
A grandeza que caracteriza uma indutância é o seu coeficiente de autoindução, que se designa simplesmente por indutância e que se representa por L .

Inductance (L): The property of an inductor whereby a change in current causes the inductor to produce a voltage that opposes the change in current.

Bobines e indutância

Lei de Faraday: The amount of voltage induced in a coil is directly proportional to the rate of change of the magnetic field with respect to the coil.

Lei de Lenz: When the current through a coil changes and an induced voltage is created as a result of the changing magnetic field, the direction of the induced voltage is such that it always opposes the change in the current.



A tensão aos terminais de uma bobine é proporcional à taxa temporal de variação da corrente que atravessa a bobine:

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

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

$$W(t) = \frac{1}{2}L \cdot i(t)^2 \quad \text{energia armazenada num bobine}$$

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

A constante de proporcionalidade chama-se indutância e representa-se por L .

A unidade de indutância é o henry (H):

1 henry corresponde à indutância de uma bobine quando a corrente, a variar à taxa de 1 A por segundo, induz uma diferença de tensão de 1 V aos terminais da bobine.

Fatores que afetam a indutância

Four factors affect the amount of inductance for a coil. The equation for the inductance of a coil is

$$L = \frac{N^2 \mu A}{l}$$



where

L = inductance in Henry

N = number of turns of wire

μ = permeability in H/m (same as Wb/At-m)

l = coil length on meters

Símbolo da bobine/indutância

What is the inductance of a 2 cm long, 150 turn coil wrapped on an low carbon steel core that is 0.5 cm diameter? The permeability of low carbon steel is 2.5×10^{-4} H/m (Wb/At-m).

$$A = \pi r^2 = \pi (0.0025 \text{ m})^2 = 7.85 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

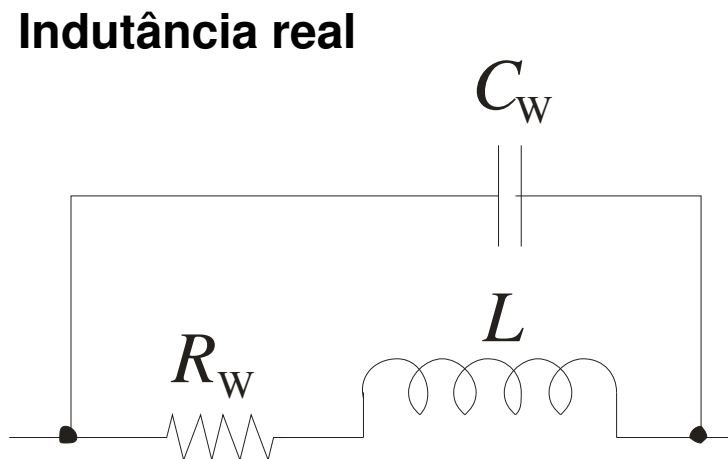
$$L = \frac{N^2 \mu A}{l} = \frac{(150 \text{ t})^2 (2.5 \times 10^{-4} \text{ Wb/At-m}) (7.85 \times 10^{-5} \text{ m}^2)}{0.02 \text{ m}}$$
$$= 22 \text{ mH}$$

Modelo de uma bobine/indutor real

In addition to inductance, actual inductors have winding resistance (R_w) due to the resistance of the wire and winding capacitance (C_w) between turns. An equivalent circuit for a practical inductor including these effects is shown:



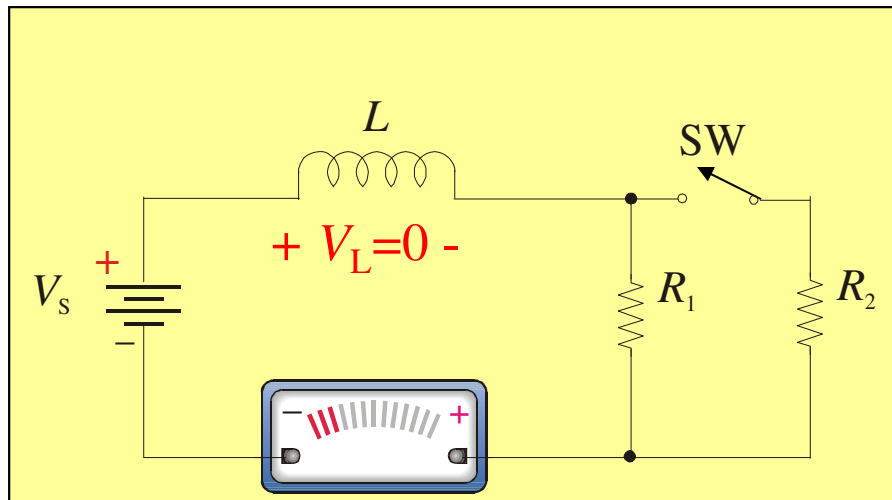
Símbolo da bobine/indutância ideal



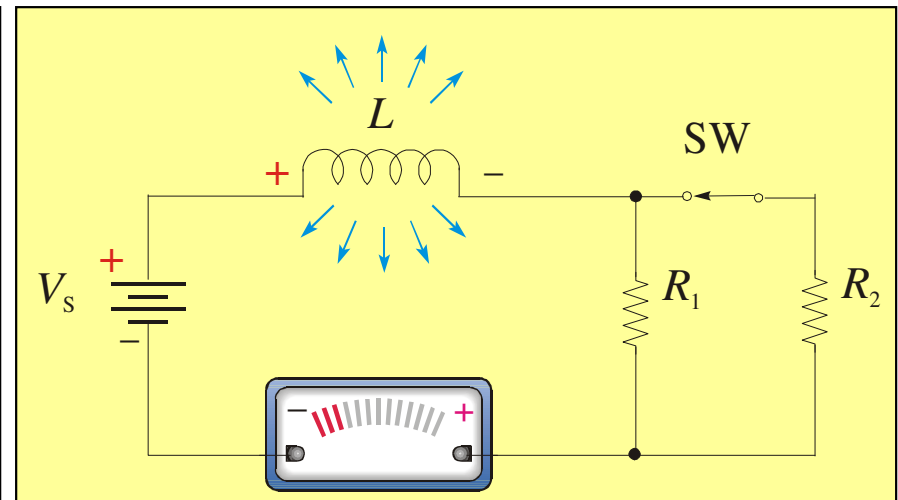
Notice that the winding resistance is in series with the coil and the winding capacitance is in parallel with both.

Circuito simples para demonstrar a lei de Lenz

Inicialmente o interruptor SW está aberto, e a bobine L e a resistência R_1 são percorridas por uma pequena corrente.

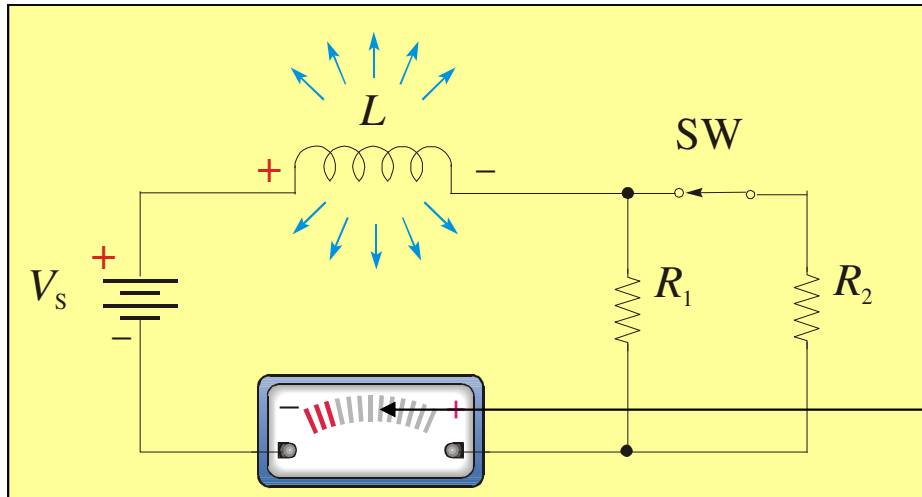


Imediatamente após se fechar o interruptor SW aparece uma tensão aos terminais de L que tende a a opor-se a qualquer alteração na corrente.



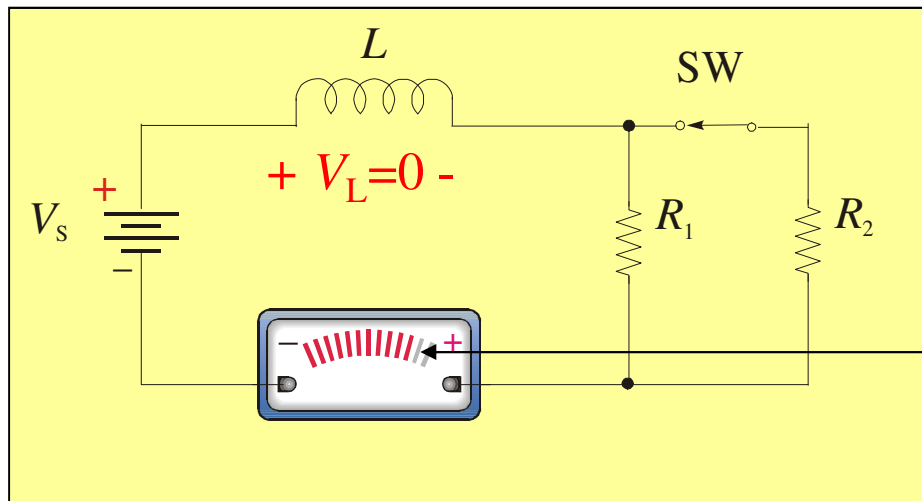
E o amperímetro indica exactamente a mesma intensidade de corrente que registava antes de fecharmos o interruptor SW.

Circuito simples para demonstrar a lei de Lenz



Initially, the meter reads same current as before the switch was closed.

Alguns tempos depois ($5\tau = 5L/(R_1//R_2)$), a corrente estabiliza num valor mais elevado, uma vez que tensão aos terminais da bobine decaiu novamente para zero.



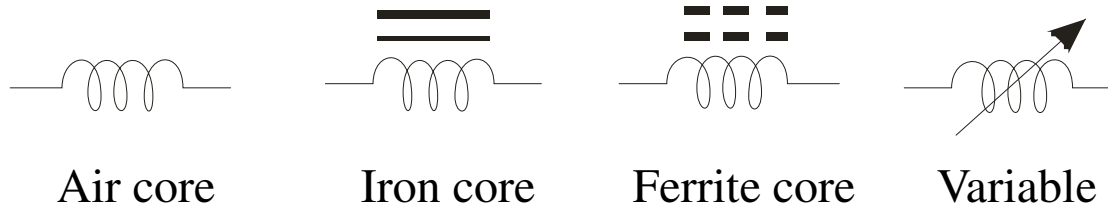
O amperímetro indica um valor superior de corrente devido à alteração da carga.

Qual foi a variação da carga?

Tipos de bobines/inductores

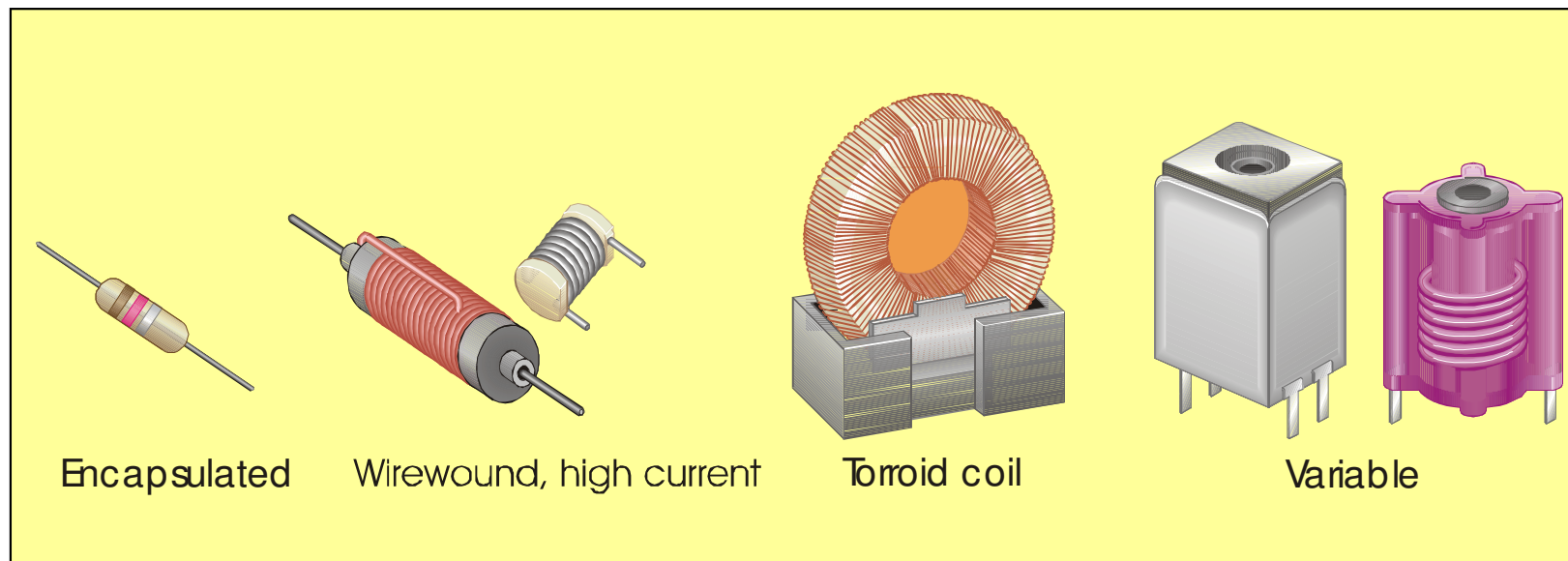
There are a variety of inductors, depending on the amount of inductance required and the application. Some, with fine wires, are encapsulated and may appear like a resistor.

Common symbols for inductors (coils) are



Bobines comerciais

Inductors come in a variety of sizes. A few common ones are shown here.



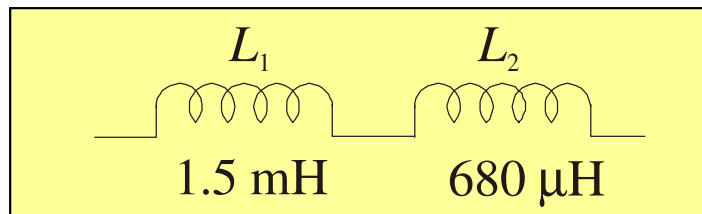
Associação de bobines

Associação de indutores em série

When inductors are connected in series, the total inductance is the sum of the individual inductors. The general equation for inductors in series is

$$L_T = L_1 + L_2 + L_3 + \dots L_n$$

If a 1.5 mH inductor is connected in series with an 680 μ H inductor, the total inductance is



2.18 mH

Associação de indutores em paralelo

When inductors are connected in parallel, the total inductance is smaller than the smallest one. The general equation for inductors in parallel is

$$L_T = \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots + \frac{1}{L_T}}$$

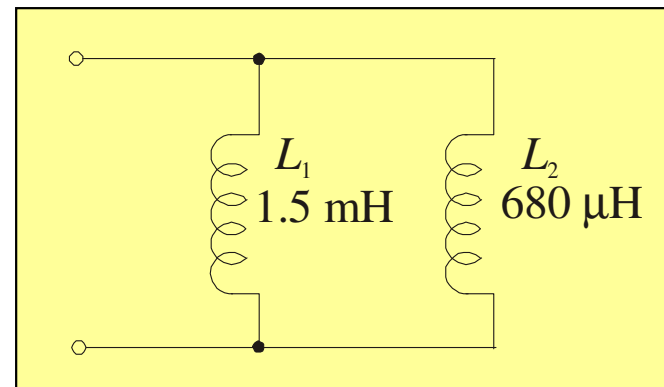
The total inductance of two inductors is

$$L_T = \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}}$$

...or you can use the product-over-sum rule.

If a 1.5 mH inductor is connected in parallel with an 680 μ H inductor, the total inductance is

468 μ H

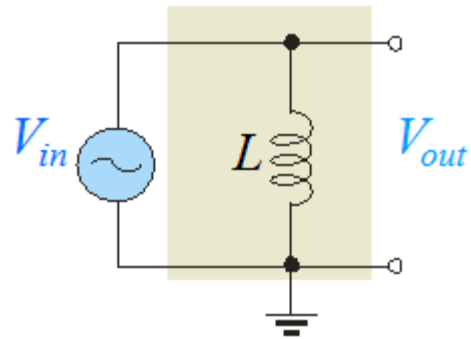


Impedância de uma bobine

Impedância de uma bobine

When a sine wave is applied to an inductor there is a phase shift (*desfasamento*) between voltage and current such that voltage always leads the current by 90°.

I.e., a V_L está adiantada 90° em relação à I_L .

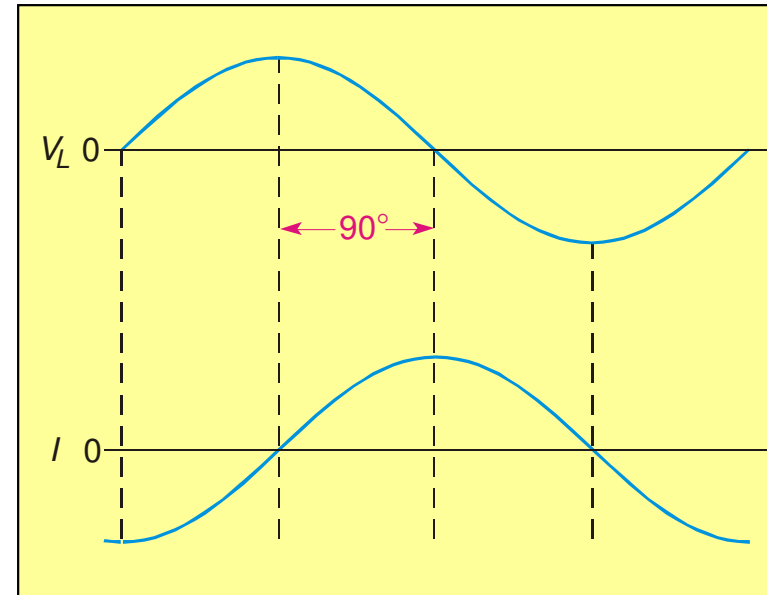


$$v_{\text{out}} = v_L = L \frac{di(t)}{dt}$$

$$i(t) = I_L e^{j\omega t} \rightarrow v(t) = L \frac{di(t)}{dt}$$

$$v(t) = j\omega L \cdot i(t)$$

$$v(t) = V_{in} e^{j\omega t} \rightarrow i(t) = \frac{1}{L} \int v(t) dt = \frac{1}{j\omega L} v(t) \rightarrow V_{out} = j\omega L \cdot I_L$$



$$I = \frac{V}{Z} \quad V = IZ \quad Z = \frac{V}{I}$$

$$Z_L = j2\pi fL = j\omega L \rightarrow I = -j \frac{V_L}{\omega L}$$

Reactância indutiva

Inductive reactance is the opposition to ac by an inductor. The equation for inductive reactance is

$$Z_L = j2\pi fL = jX_L$$

$$X_L = 2\pi fL$$

$$X_L = \omega L$$

The reactance of a 33 μH inductor when a frequency of 550 kHz is applied is

$$114 \Omega$$

When inductors are in series, the total reactance is the sum of the individual reactances. That is,

$$X_{L(\text{tot})} = X_{L1} + X_{L2} + X_{L3} + \cdots + X_{Ln}$$

Assume three 220 μH inductors are in series with a 455 kHz ac source. What is the total reactance?

The reactance of each inductor is

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi(455 \text{ kHz})(220 \mu\text{H}) = 629 \Omega$$

$$\begin{aligned} X_{L(\text{tot})} &= X_{L1} + X_{L2} + X_{L3} \\ &= 629 \Omega + 629 \Omega + 629 \Omega = 1.89 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

Inductive reactance

When inductors are in parallel, the total reactance is the reciprocal of the sum of the reciprocals of the individual reactances. That is,

$$X_{L(tot)} = \frac{1}{\frac{1}{X_{L1}} + \frac{1}{X_{L2}} + \frac{1}{X_{L3}} + \dots + \frac{1}{X_{Ln}}}$$

If the three 220 μH inductors from the last example are placed in parallel with the 455 kHz ac source, what is the total reactance?

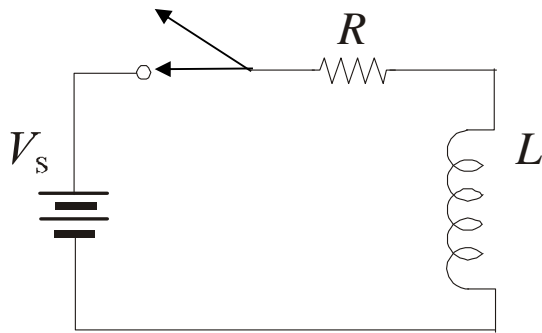
The reactance of each inductor is 629 Ω

$$X_{L(tot)} = \frac{1}{\frac{1}{X_{L1}} + \frac{1}{X_{L2}} + \frac{1}{X_{L3}}} = \frac{1}{\frac{1}{629 \Omega} + \frac{1}{629 \Omega} + \frac{1}{629 \Omega}} = 210 \Omega$$

Resposta temporal de circuitos com bobines

Bobines em circuitos DC

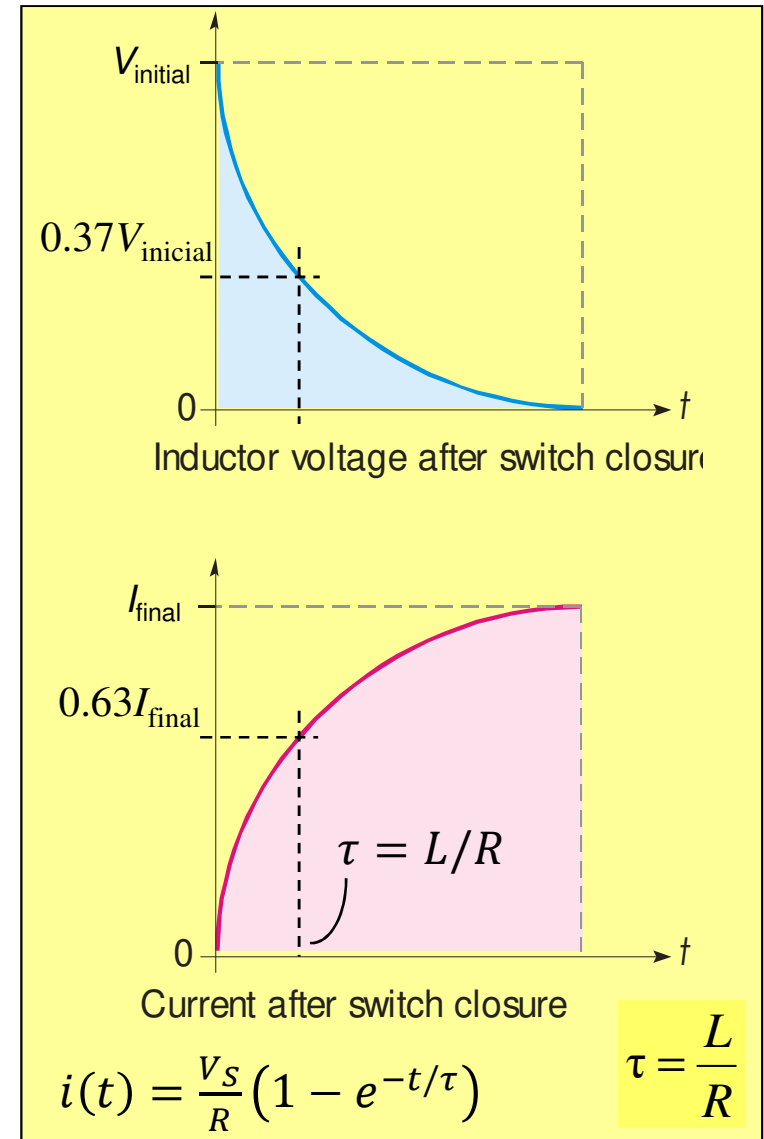
When an inductor is connected in series with a resistor and dc source, the current change is exponential.



$$V_L = L \frac{di(t)}{dt} \rightarrow i(t) = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t v(t) dt$$

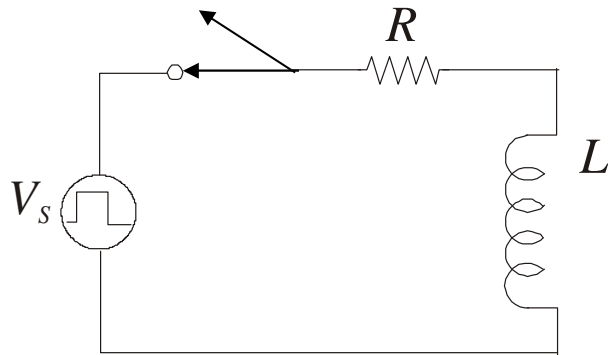
A corrente numa bobine não pode variar bruscamente.

$i(t) = \text{constante} \rightarrow$ curto – circuito



Bobines em circuitos DC

The same shape curves are seen if a square wave is used for the source.



$$V_L = L \frac{di(t)}{dt}$$

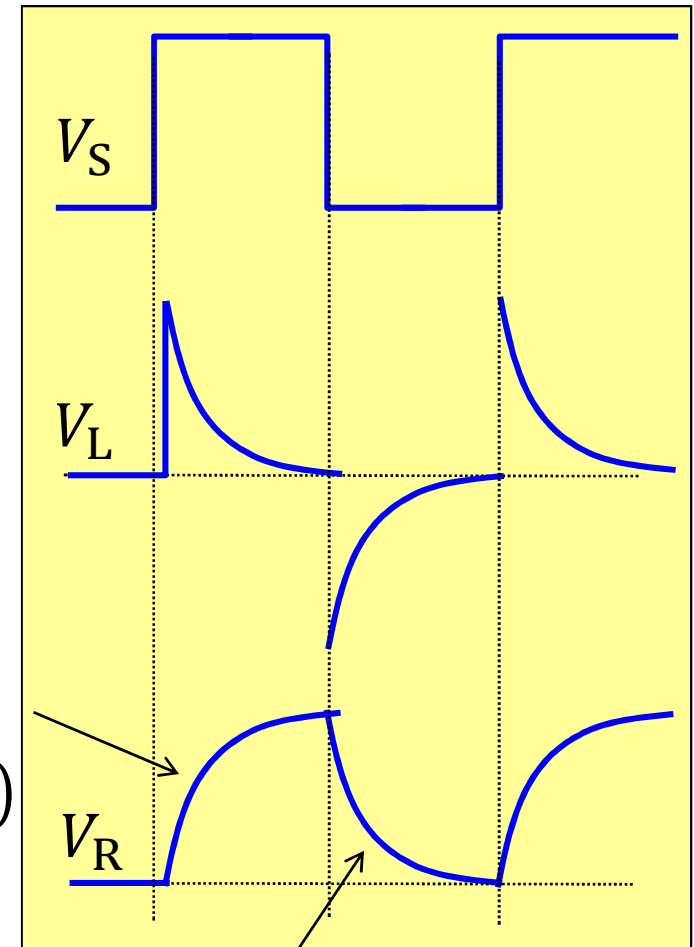
$$V_S = V_R + V_L$$

$$V_S = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt}$$

$$\frac{V_S}{R} = i(t) + \frac{L}{R} \frac{di(t)}{dt} \rightarrow i(t) = \frac{V_S}{R} (1 - e^{-t/(L/R)})$$

Constante de tempo de um circuito RL:

$$\tau = \frac{L}{R}$$



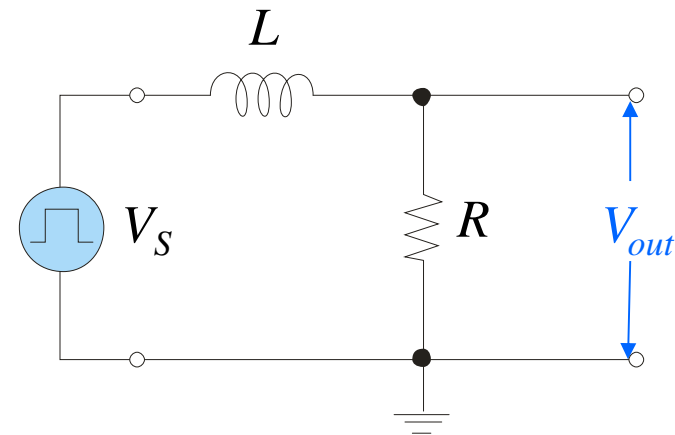
$$i(t) = \frac{V_S}{R} e^{-t/(L/R)}$$

Circuito RL integrador

Circuito RL integrador

Like the RC integrator, an RL integrator is a circuit that approximates the mathematical process of integration. Under equivalent conditions, the waveforms look like the RC integrator. For an RL circuit, $\tau = L/R$.

A basic RL integrator circuit is a resistor in series with an inductor and the source. The output is taken across the resistor.

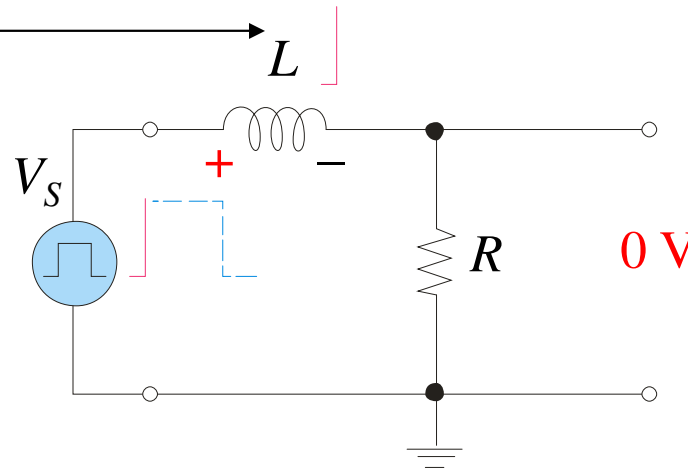


What is the time constant if $R = 22 \text{ k}\Omega$
and $L = 22 \text{ }\mu\text{H}$? **1.0 ms**

Circuito RL integrador

When the pulse generator output goes high, a voltage immediately appears across the inductor in accordance with Lenz's law. The instantaneous current is zero, so the resistor voltage is initially zero.

The induced voltage across L opposes the initial rise of the pulse.



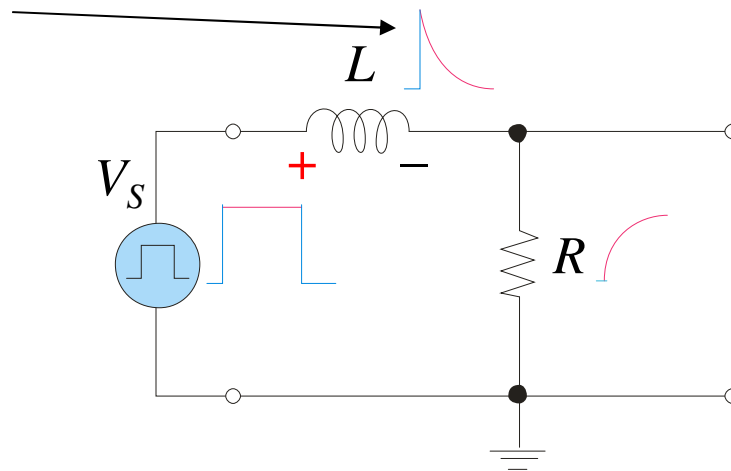
The output is initially zero because there is no current.

A corrente numa bobine não pode variar bruscamente.

Circuito RL integrador

At the top of the input pulse, the inductor voltage decreases exponentially and current increases. As a result, the voltage across the resistor increases exponentially. As in the case of the RC integrator, the output will be 63% of the final value in 1τ .

The induced voltage across L decreases.



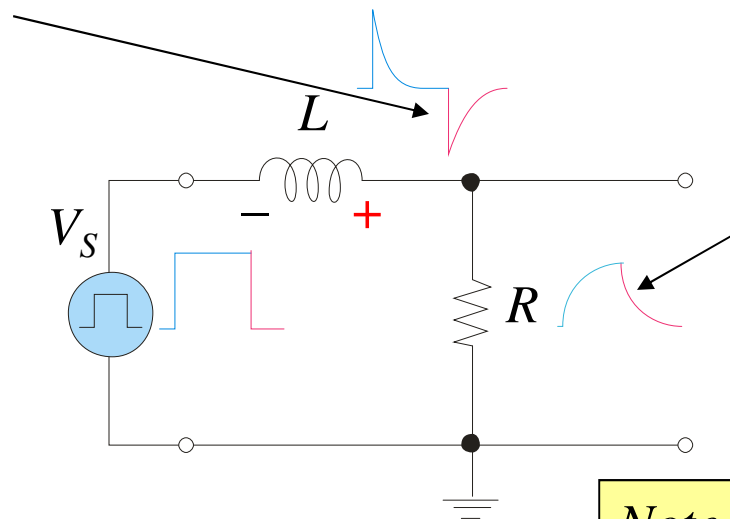
The output voltage increases as current builds in the circuit.

A corrente numa bobine não pode variar bruscamente.

Circuito RL integrador

When the pulse goes low, a reverse voltage is induced across L opposing the change. The inductor voltage initially is a negative voltage that is equal and opposite to the generator; then it exponentially increases.

The induced voltage across L initially opposes the change in the source voltage.



The output voltage decreases as the magnetic field around L collapses.

Note that these waveforms were the same in the RC integrator.

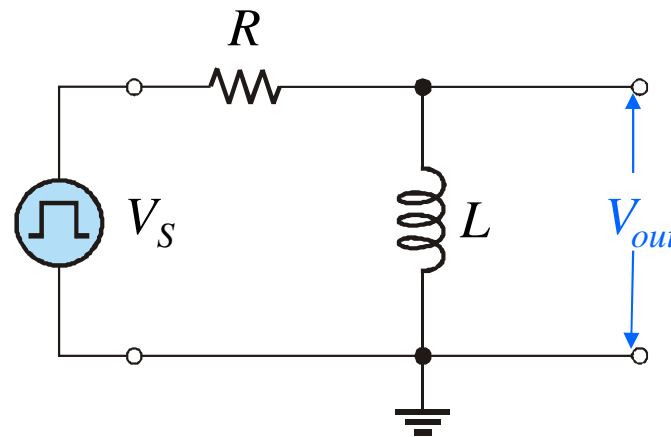
A corrente numa bobine não pode variar bruscamente.

Circuito RL diferenciador

Circuito RL diferenciador

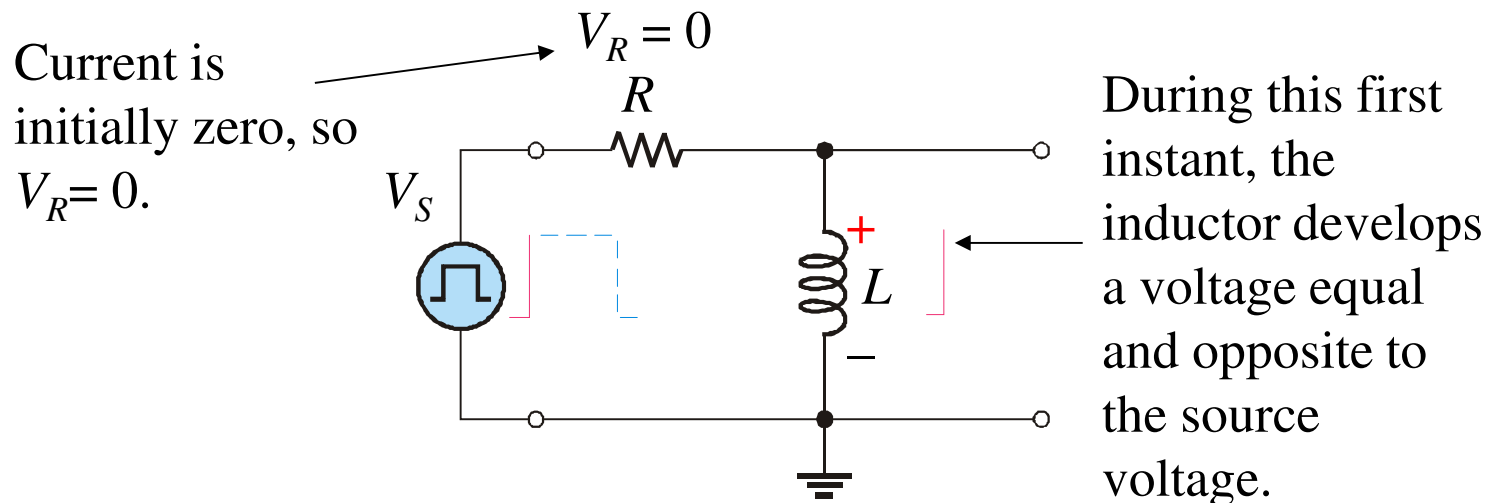
An RL differentiator is also a circuit that approximates the mathematical process of differentiation. It can produce an output that is the rate of change of the input under certain conditions.

A basic RL differentiator circuit is an inductor in series with a resistor and the source. The output is taken across the inductor.



Circuito RL diferenciador

When a pulse generator is connected to the input of an RL differentiator, the inductor has a voltage induced across it that opposes the source; initially, no current is in the circuit.

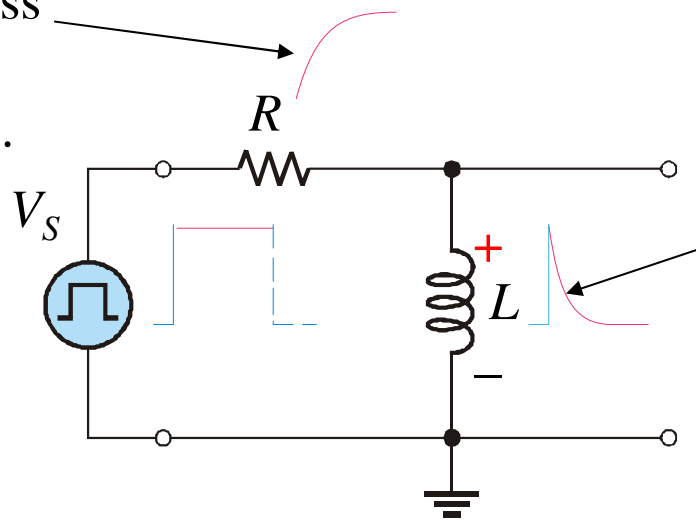


A corrente numa bobine não pode variar bruscamente.

Circuito RL diferenciador

After the initial edge has passed, current increases in the circuit. Eventually, the current reaches a steady state value given by Ohm's law.

The voltage across R increases as current increases.



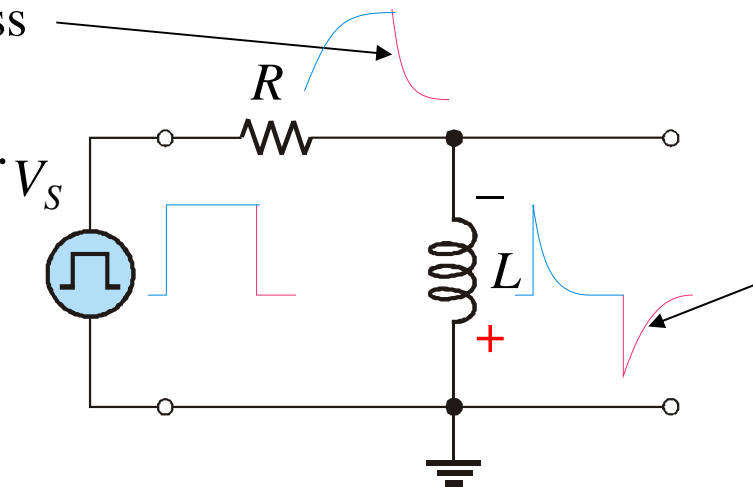
The output decreases as the pulse levels off.

A corrente numa bobine não pode variar bruscamente.

Circuito RL diferenciador

Next, the falling edge of the pulse causes a (negative) voltage to be induced across the inductor that opposes the change. The current decreases as the magnetic field collapses.

The voltage across R decreases as current decreases.



The output decreases initially and then increases exponentially.

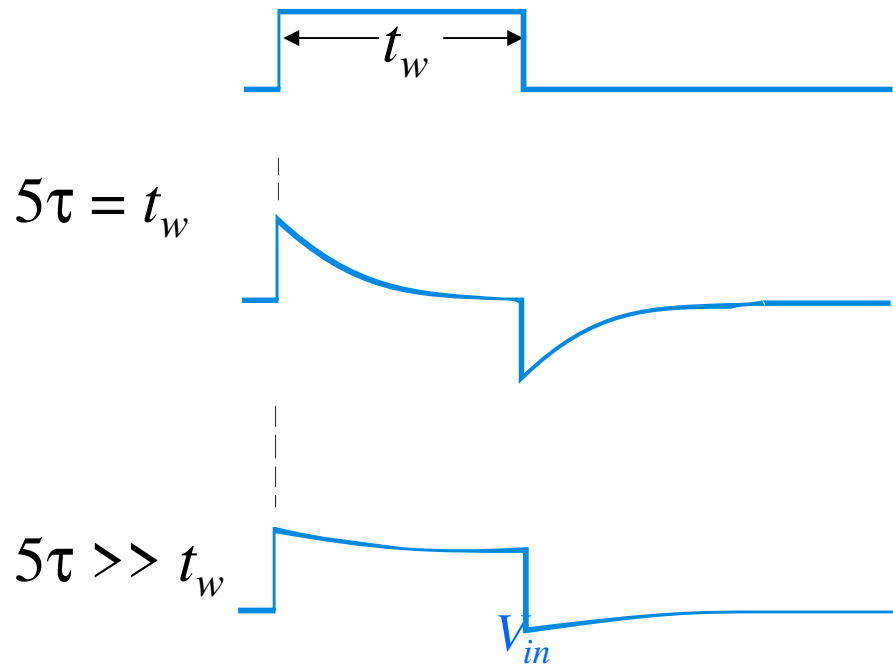
A corrente numa bobine não pode variar bruscamente.

Circuito RL diferenciador

As in the case of the *RC* differentiator, the output shape is dependent on the ratio of τ to t_w .

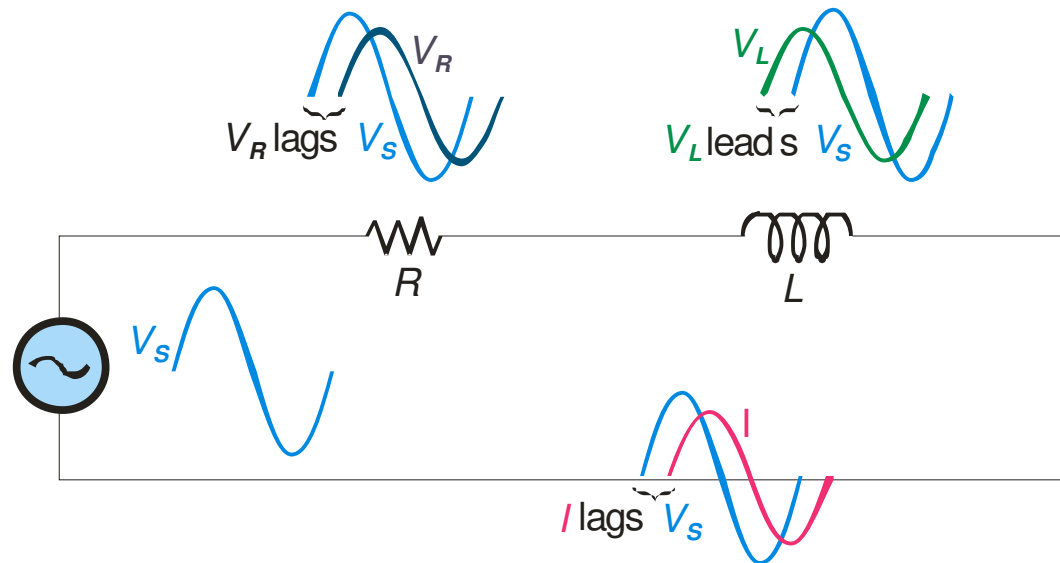
When $5\tau = t_w$, the pulse has just returned to the baseline when it repeats.

If τ is long compared to the pulse width, the output looks like a pulse with “droop”.



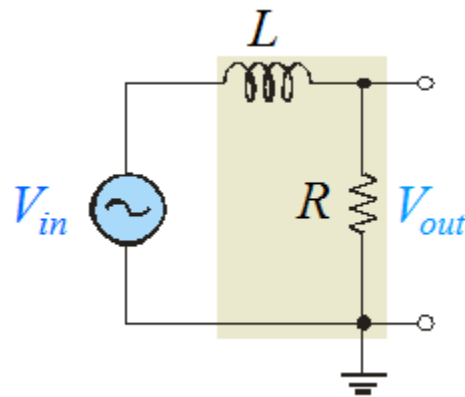
Sinusoidal response of *RL* circuits

When both resistance and inductance are in a series circuit, the phase angle (*desfasamento*) between the applied voltage and total current is between 0° and 90° , depending on the values of resistance and reactance.



Desfasamento entre dois sinais: diferença de fase entre esses sinais.

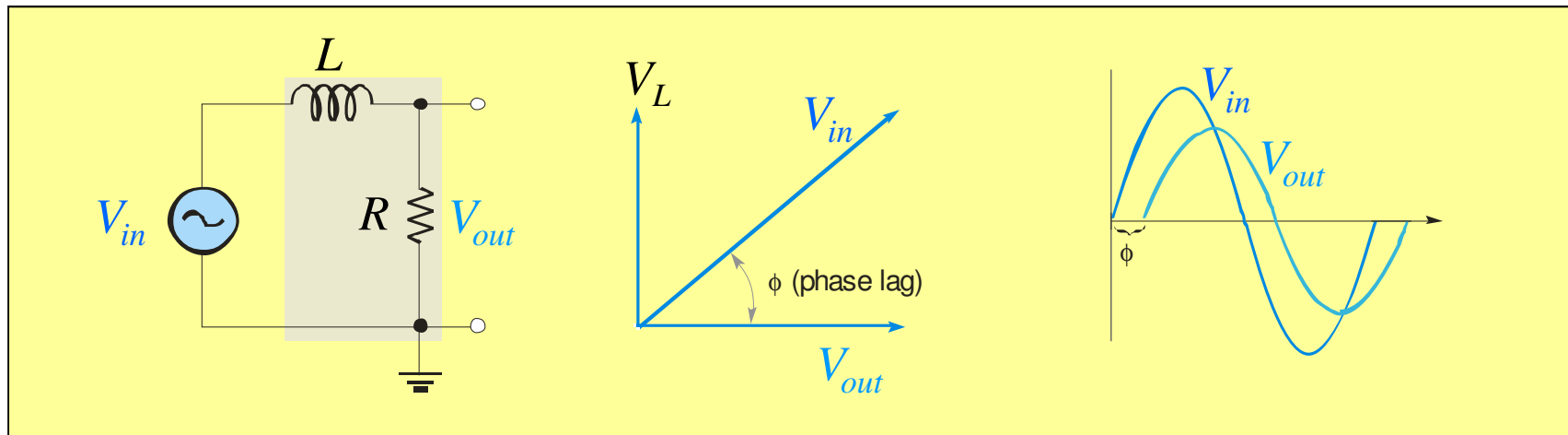
Resposta em frequência de circuitos RL



RL time constant: A fixed time interval set by the L and R values, that determines the time response of a circuit. It equals the ratio of L/R .

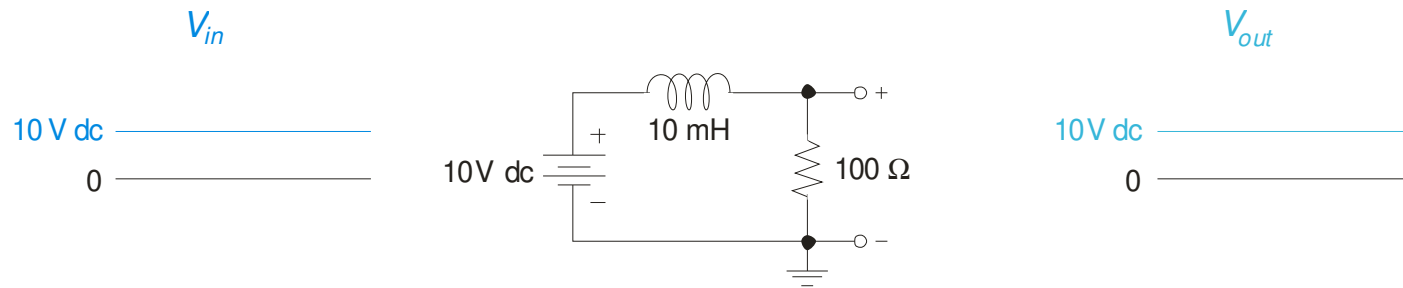
Desfasamento (atraso) em circuito LR

Reversing the components in the previous circuit produces a circuit that is a basic lag network (a **tensão de saída está atrasada relativamente à tensão da entrada**). This circuit is also a basic low-pass filter, a circuit that passes low frequencies and rejects all others.



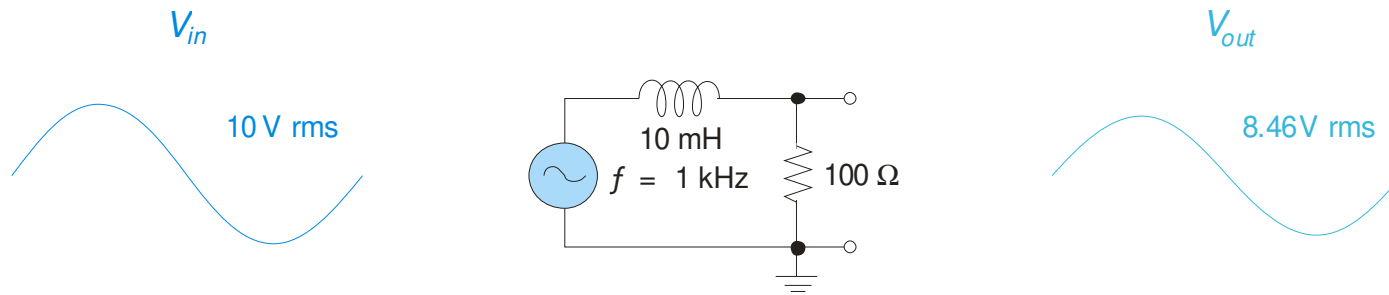
Frequency Response of *RL* Circuits

Series *RL* circuits have a frequency response similar to series *RC* circuits. In the case of the low-pass response shown here, the output is taken across the resistor.



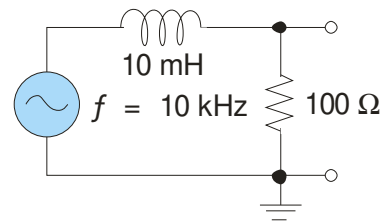
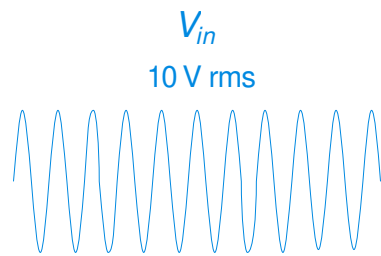
Frequency Response of RL Circuits

Series RL circuits have a frequency response similar to series RC circuits. In the case of the low-pass response shown here, the output is taken across the resistor.



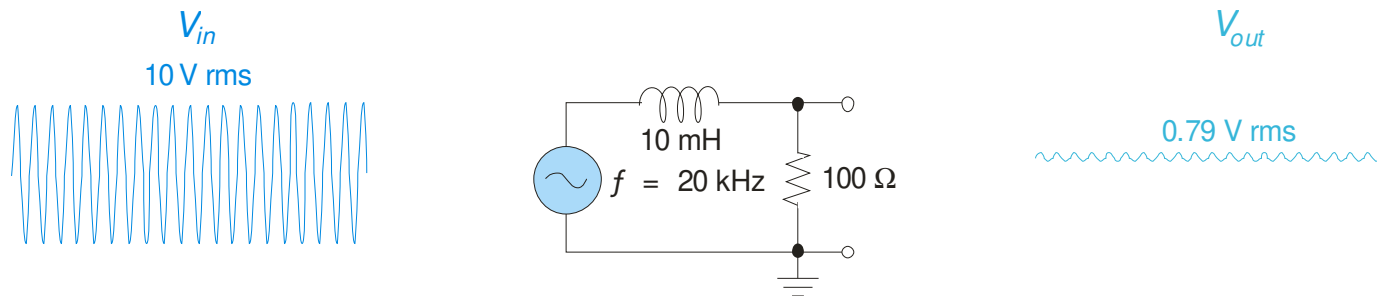
Frequency Response of *RL* Circuits

Series *RL* circuits have a frequency response similar to series *RC* circuits. In the case of the low-pass response shown here, the output is taken across the resistor.



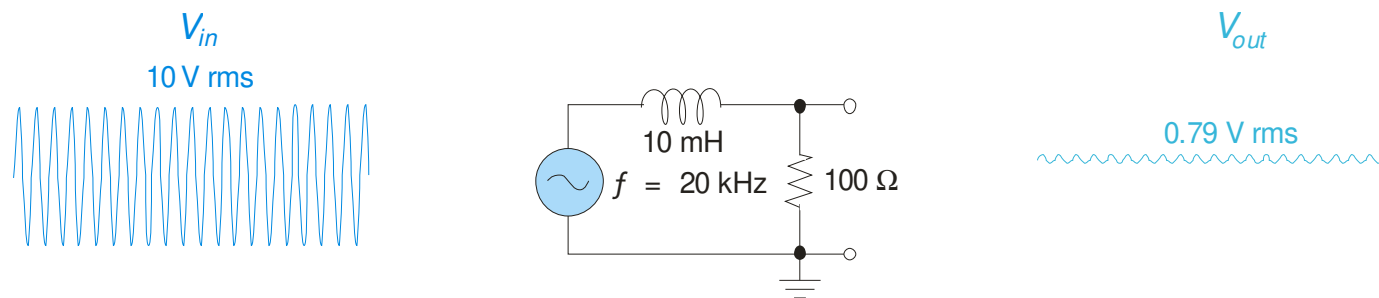
Frequency Response of RL Circuits

Series RL circuits have a frequency response similar to series RC circuits. In the case of the low-pass response shown here, the output is taken across the resistor.

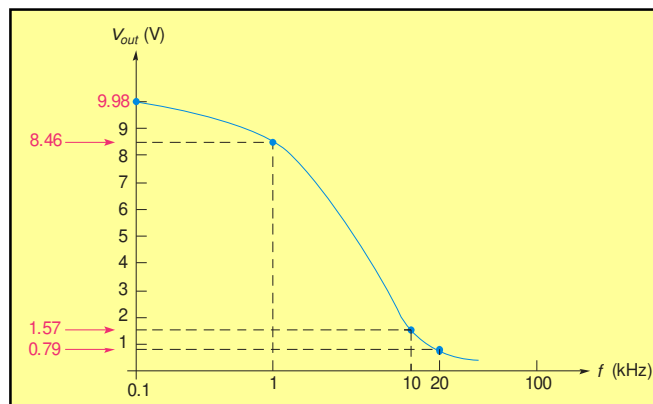


Frequency Response of *RL* Circuits

Series *RL* circuits have a frequency response similar to series *RC* circuits. In the case of the low-pass response shown here, the output is taken across the resistor.



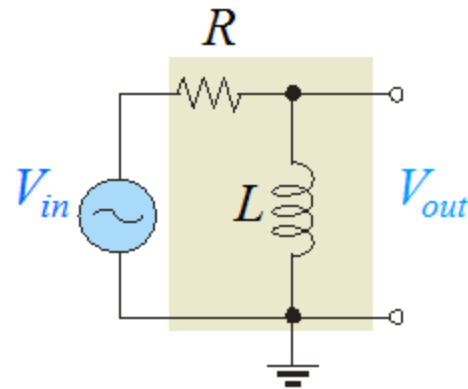
Plotting the response:



Cutoff frequency (f_c): The frequency at which the output voltage of a filter is 70.7% ($1/\sqrt{2}$) of the maximum output voltage.

$$f_c \sim 1592 \text{ Hz}$$

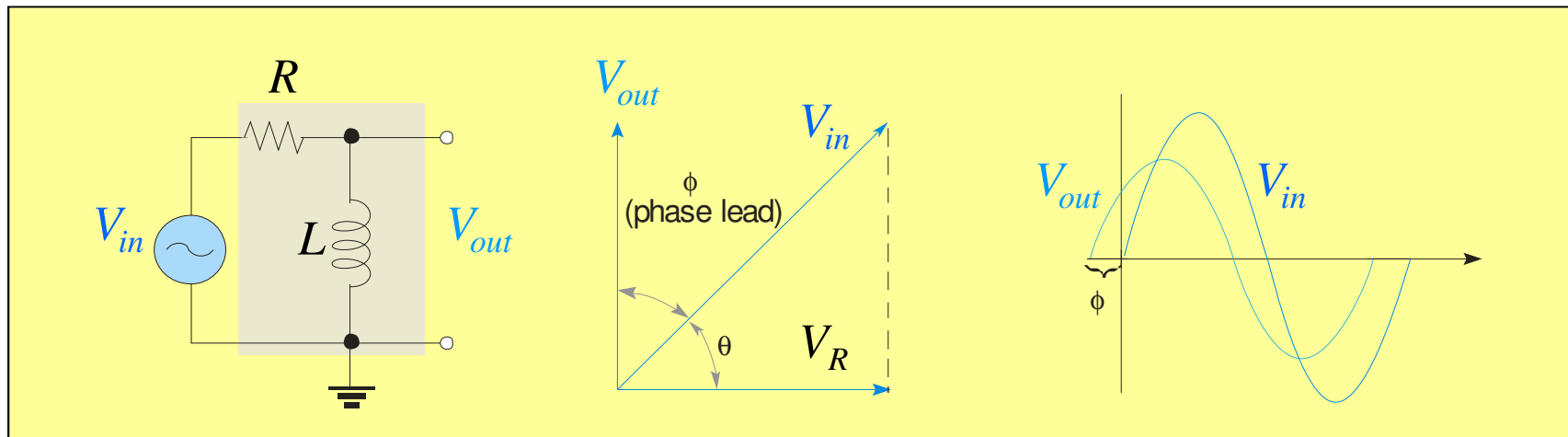
Resposta em frequência de circuitos RL



RL time constant: A fixed time interval set by the L and R values, that determines the time response of a circuit. It equals the ratio of L/R .

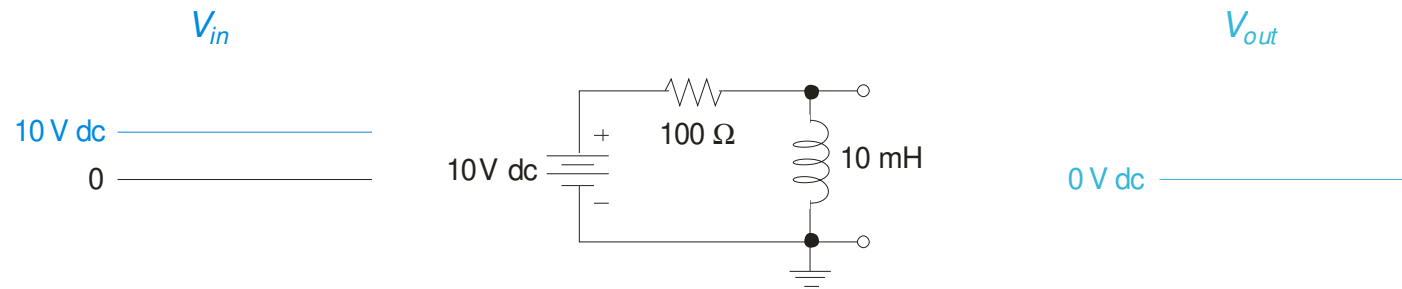
Desfasamento (adiantamento) em circuitos RL

For a given frequency, a series RL circuit can be used to produce a phase lead by a specific amount between an input voltage and an output by taking the output across the inductor (*adiantamento da tensão de saída relativamente à tensão da entrada*). This circuit is also a basic high-pass filter, a circuit that passes high frequencies and rejects all others.



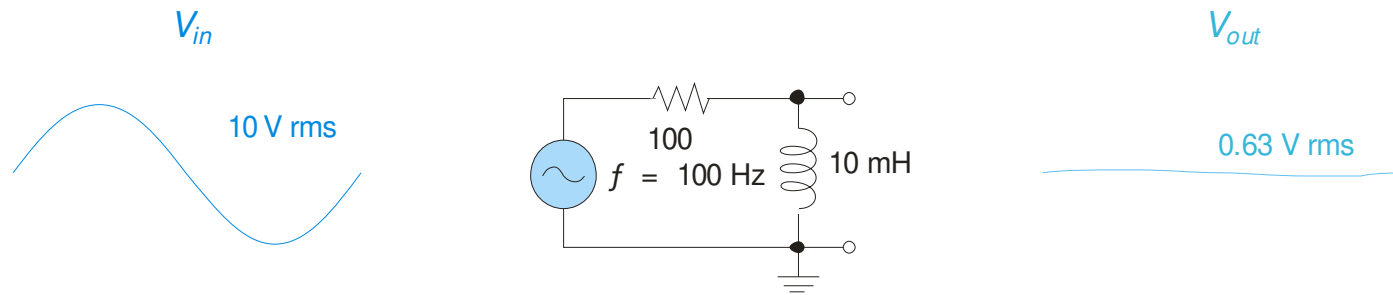
Frequency Response of *RL* Circuits

Reversing the position of the *R* and *L* components, produces the high-pass response. The output is taken across the inductor.



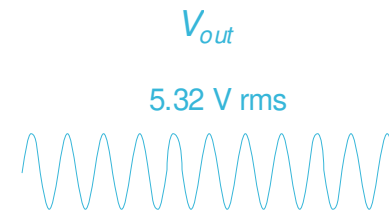
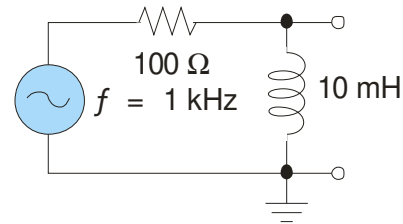
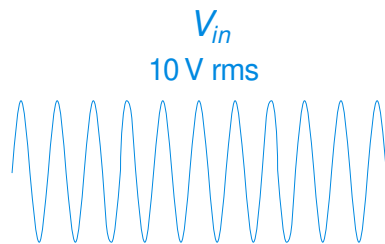
Frequency Response of *RL* Circuits

Reversing the position of the *R* and *L* components, produces the high-pass response. The output is taken across the inductor.



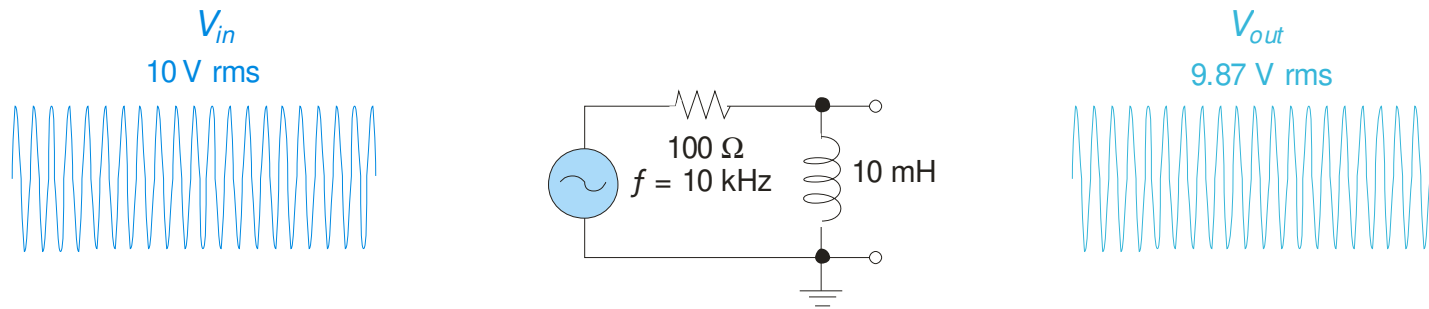
Frequency Response of *RL* Circuits

Reversing the position of the *R* and *L* components, produces the high-pass response. The output is taken across the inductor.



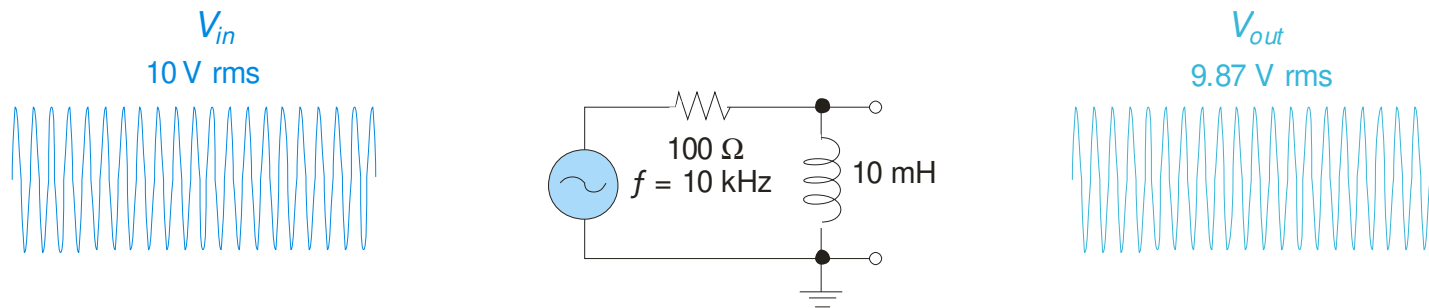
Frequency Response of RL Circuits

Reversing the position of the R and L components, produces the high-pass response. The output is taken across the inductor.

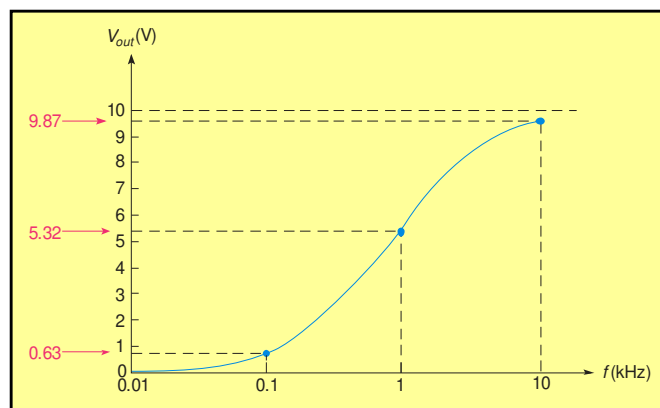


Frequency Response of *RL* Circuits

Reversing the position of the *R* and *L* components, produces the high-pass response. The output is taken across the inductor.



Plotting the response:



Cutoff frequency (f_c): The frequency at which the output voltage of a filter is 70.7% ($1/\sqrt{2}$) of the maximum output voltage.

$$f_c \sim 1592 \text{ Hz}$$

Potência em Corrente Alternada

Potência em Corrente Alternada

Seja um elemento de um circuito percorrido por uma corrente $i(t)=I_p \cos(\omega t)$, e aos terminais do qual se estabelece uma tensão $v(t)=V_p \cos(\omega t+\phi)$.

A **potência instantânea** fornecida ao elemento é dada por:

$$p=v \cdot i=[V_p \cos(\omega t+\phi)][I_p \cos(\omega t)].$$

Valores positivos de potência indicam que o elemento está a dissipar/armazenar energia; valores negativos indicam que o elemento está a “gerar”/devolver energia ao circuito. Em corrente alternada definem-se as seguinte potências:

Potência Aparente, p_Z : potência que é transferida pela fonte ao circuito,

$$p_Z=i^2 Z \text{ (unidade: volt-ampere, VA)}$$

Potência Reactiva, p_X : potência fornecida aos elementos reativos

$$p_X=i^2 X \text{ (unidade: volt-ampere reactivo, VAr)}$$

Potência em Corrente Alternada

Potência Real (verdadeira), p_R : parte da potência dissipada no circuito

$$p_R = i^2 R \quad (\text{unidade: watt, W}).$$

A potência média é dada por: $P = \langle p \rangle = 1/2 V_p I_p \cos(\phi) = V_{Ef} I_{Ef} \cos(\phi)$.

O factor $\cos(\phi)$ é designado **factor de potência**.

Em circuitos de potência é desejável que $\cos(\phi) \sim 1$. Caso contrário, para um dado par tensão e potência, é necessário fornecer ao circuito uma intensidade de corrente superior ao que ser necessário se o fator de potência fosse igual a 1, o que origina perdas elevadas, por exemplo, nas linhas de transmissão.

Exercício de aplicação:

Num secador de cabelo está indicado 1500 W a 220 V. Determine a resistência, a corrente eficaz e a potência instantânea máxima. Assuma que o secador é uma resistência pura. **Sol.:** 32,3 Ω , 6,8 A, 3000 W. (Alguns vendedores de equipamentos de áudio, e não só, anunciam valores de potência que correspondem aos valores máximos de potência como sendo a potência média, o que é não correto).

Potência num indutor

True Power:

Ideally, inductors do not dissipate power. However, a small amount of power is dissipated in winding resistance given by the equation:

$$P_{\text{true}} = (I_{\text{rms}})^2 R_W$$

Reactive Power:

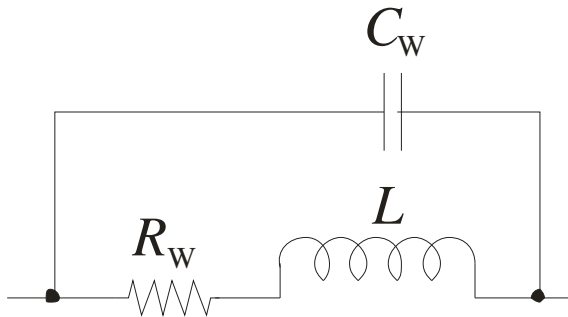
Reactive power is a measure of the rate at which the inductor stores and returns energy. One form of the reactive power equation is:

$$P_r = V_{\text{rms}} I_{\text{rms}}$$

The unit for reactive power is the VAR.

Fator de qualidade de uma bobine

An equivalent circuit for a practical inductor includes the winding resistance (R_W) due to the resistance of the wire and winding capacitance (C_W) between turns:



Notice that the winding resistance is in series with the coil and the winding capacitance is in parallel with both.

The **quality factor** (Q) of a coil is given by the ratio of reactive power to true power.

$$Q = \frac{I^2 X_L}{I^2 R_W}$$

For a series circuit, I cancels, leaving:

$$Q = \frac{X_L}{R_W}$$

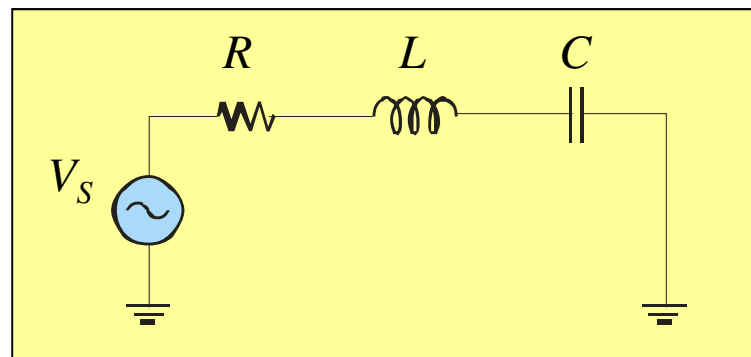
Circuitos Elétricos e Sistemas Digitais

2018-2019 - 1.º Semestre

Análise de circuitos dinâmicos (análise no tempo e em frequência)

- Circuitos RCL série
- Impedância
- Ressonância
- Filtros
- Filtros não ideais
- Circuitos RCL paralelo
- Impedância
- Ressonância
- Filtros
- Filtros não ideais

Circuito RLC série



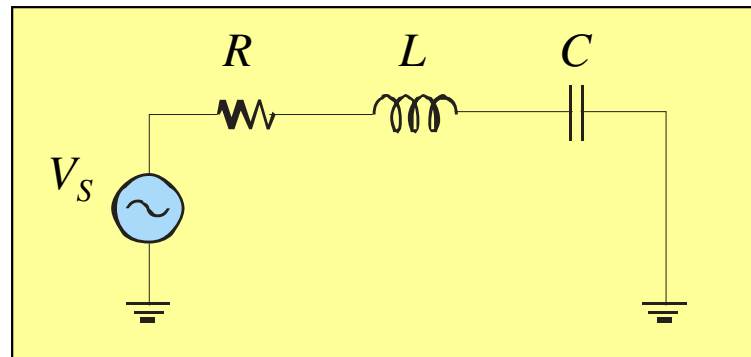
Circuito RLC série

When a circuit contains an inductor and capacitor in series, the reactance of each tend to cancel. The total reactance is given by

$$X_{tot} = |X_L - X_C|$$

The total impedance is given by $Z_{tot} = \sqrt{R^2 + X_{tot}^2}$

The phase angle is given by $\theta = \tan^{-1} \left(\frac{X_{tot}}{R} \right)$



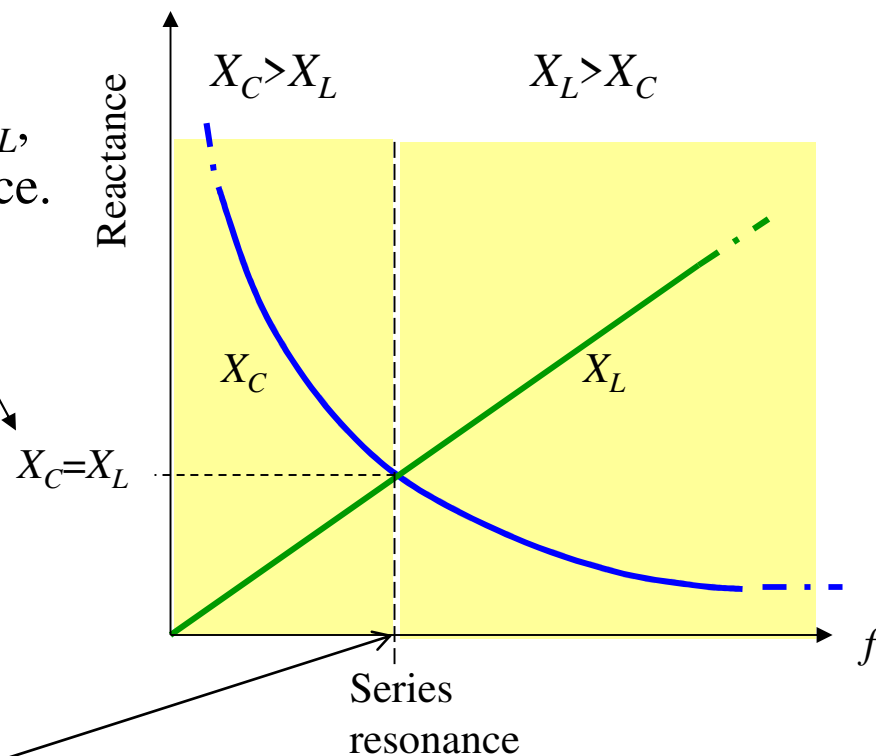
Circuito RLC série: variação de X_L e X_C com a frequência

In a series *RLC* circuit, the circuit can be capacitive or inductive, depending on the frequency.

At the frequency where $X_C = X_L$, the circuit is at series resonance.

Below the resonant frequency, the circuit is predominantly capacitive.

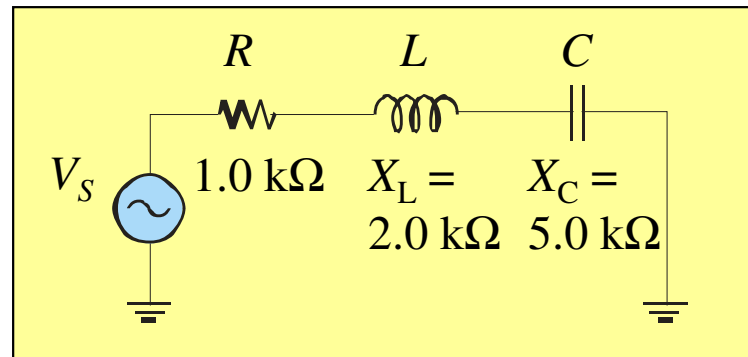
Above the resonant frequency, the circuit is predominantly inductive.



Frequência de ressonância

Circuito RLC série: impedância

What is the total impedance and phase angle of the series RLC circuit if $R=1.0\text{ k}\Omega$, $X_L = 2.0\text{ k}\Omega$, and $X_C = 5.0\text{ k}\Omega$?



The total reactance is $X_{tot} = |X_L - X_C| = |2.0\text{ k}\Omega - 5.0\text{ k}\Omega| = 3.0\text{ k}\Omega$

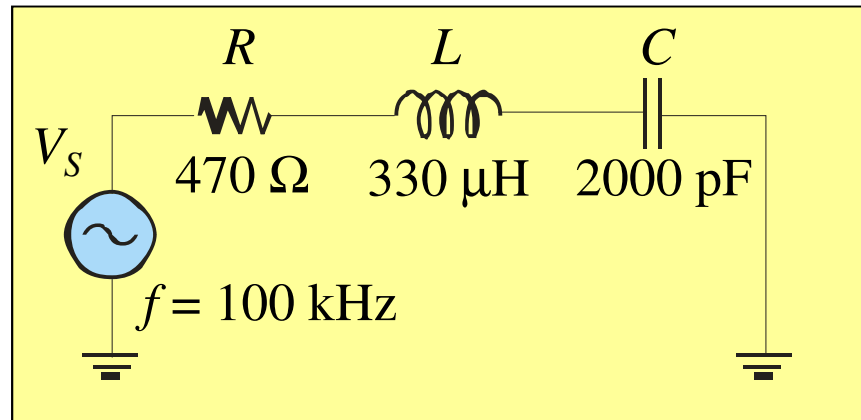
The total impedance is $Z_{tot} = \sqrt{R^2 + X_{tot}^2} = \sqrt{1.0\text{ k}\Omega^2 + 3.0\text{ k}\Omega^2} = 3.16\text{ k}\Omega$

The phase angle is $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{X_{tot}}{R}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{3.0\text{ k}\Omega}{1.0\text{ k}\Omega}\right) = 71.6^\circ$

The circuit is capacitive,
so I leads V by 71.6° .

Circuito RLC série: impedância

What is the magnitude of the impedance for the circuit?



$$X_L = 2\pi fL = 2\pi(100 \text{ kHz})(330 \mu\text{H}) = 207 \Omega$$

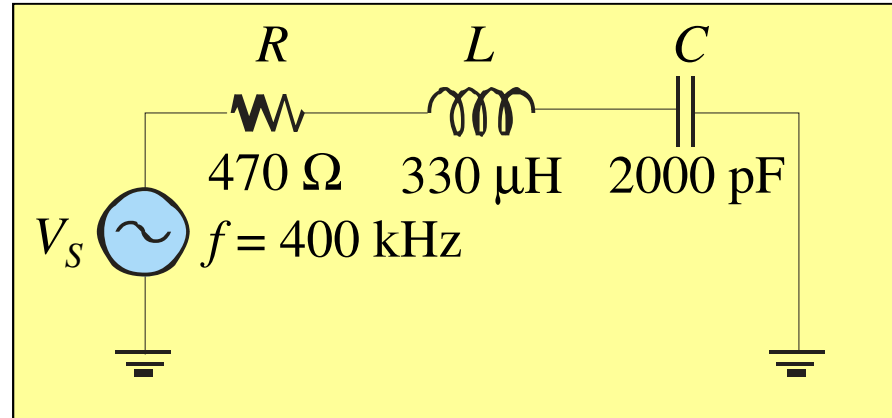
$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(100 \text{ kHz})(2000 \text{ pF})} = 796 \Omega$$

$$X_{tot} = |X_L - X_C| = |207 \Omega - 796 \Omega| = 589 \Omega$$

$$Z = \sqrt{(470 \Omega)^2 + (589 \Omega)^2} = 753 \Omega$$

Circuito RLC série: impedância

What is the total impedance for the circuit when the frequency is increased to 400 Hz?



$$X_L = 2\pi fL = 2\pi(400 \text{ kHz})(330 \mu\text{H}) = 829 \Omega$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(400 \text{ kHz})(2000 \text{ pF})} = 199 \Omega$$

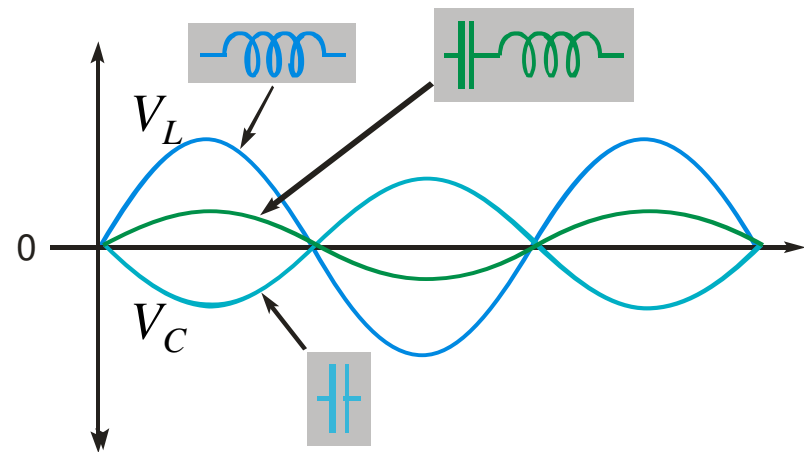
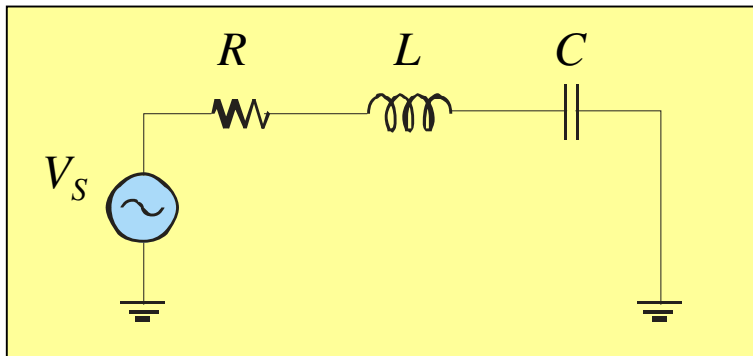
$$X_{tot} = |X_L - X_C| = |829 \Omega - 199 \Omega| = 630 \Omega$$

$$Z = \sqrt{(470 \Omega)^2 + (630 \Omega)^2} = 786 \Omega$$

The circuit is now inductive.

Tensão em circuito RLC série

The voltages across the *RLC* components must add to the source voltage in accordance with KVL. Because of the opposite phase shift due to *L* and *C*, V_L and V_C effectively subtract.

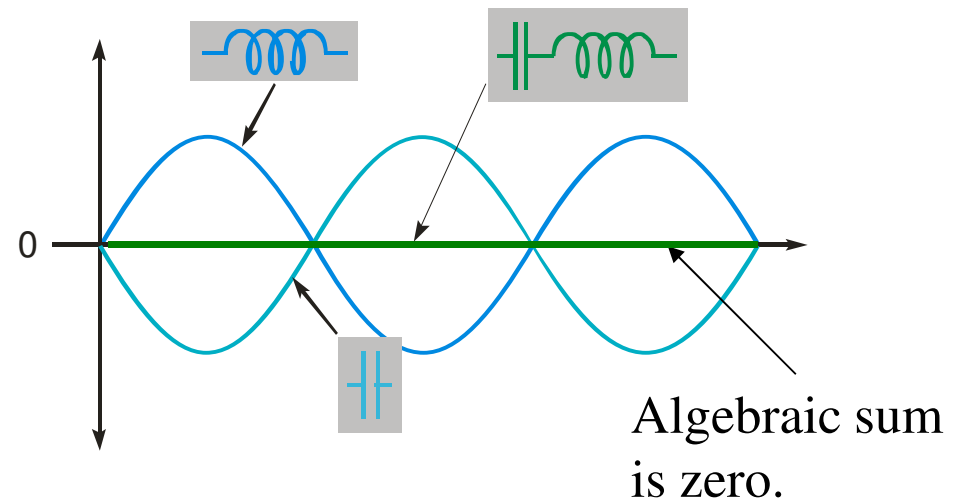
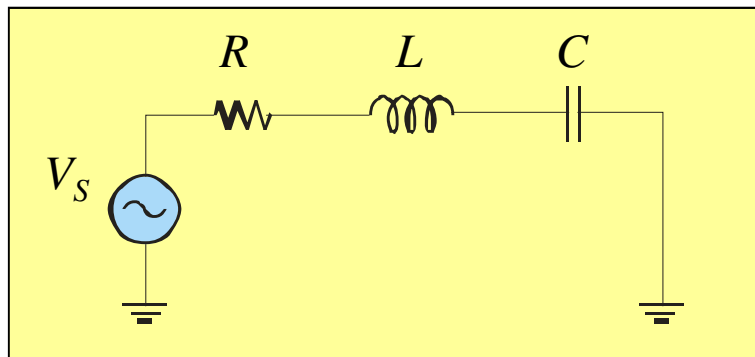


This example is inductive.

Notice that V_C is out of phase with V_L . When they are algebraically added, the result is....

Circuito RLC série: ressonância

At series resonance, X_C and X_L cancel. V_C and V_L also cancel because the voltages are equal and opposite. The circuit is purely resistive at resonance.

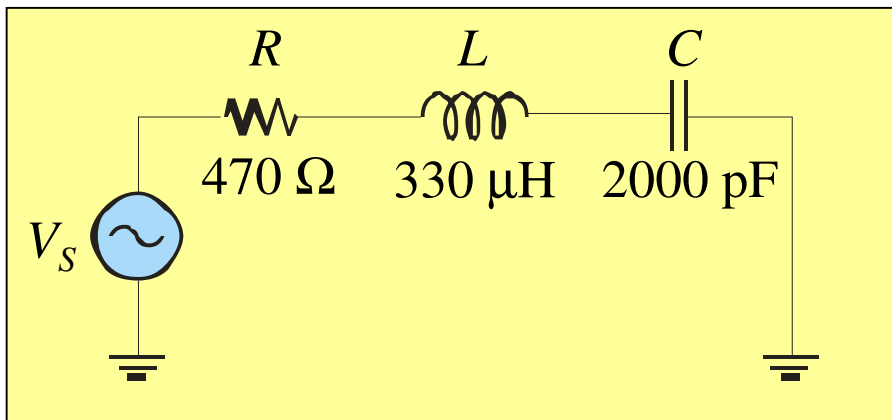


Circuito RLC série: ressonância

The formula for resonance can be found by setting $X_C = X_L$. The result is

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

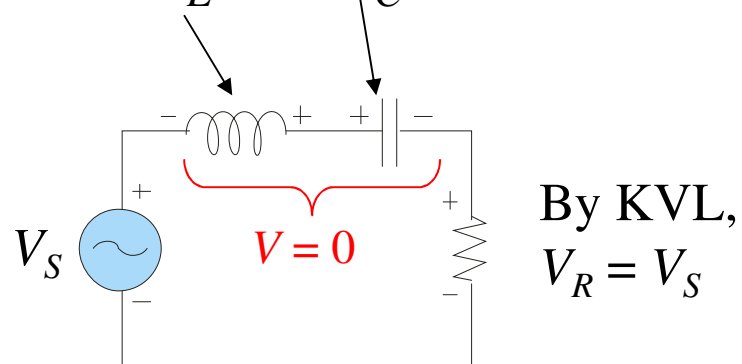
What is the resonant frequency for the circuit?



$$\begin{aligned} f_r &= \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \\ &= \frac{1}{2\pi\sqrt{(330 \mu\text{H})(2000 \text{ pF})}} \\ &= \mathbf{196 \text{ kHz}} \end{aligned}$$

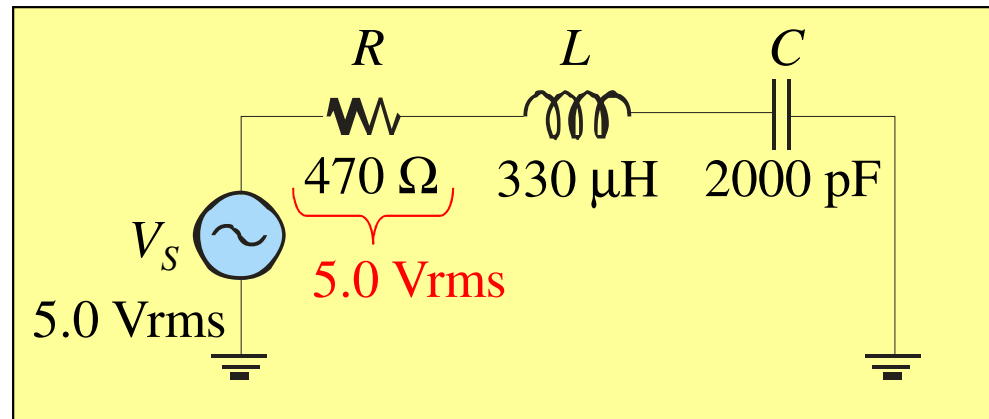
Circuito RLC série: ressonância

Ideally, at resonance the sum of V_L and V_C is zero.



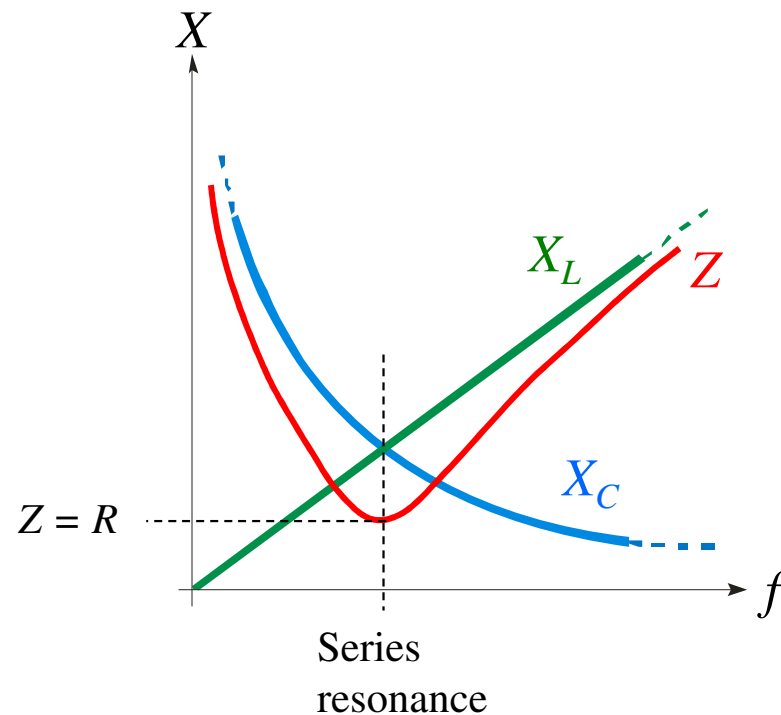
What is V_R at resonance?

5.0 Vrms



Circuito RLC série: impedância vs frequência

The general shape of the impedance versus frequency for a series *RLC* circuit is superimposed on the curves for X_L and X_C . Notice that at the resonant frequency, the circuit is resistive, and $Z = R$.



Circuito RLC série: ressonância

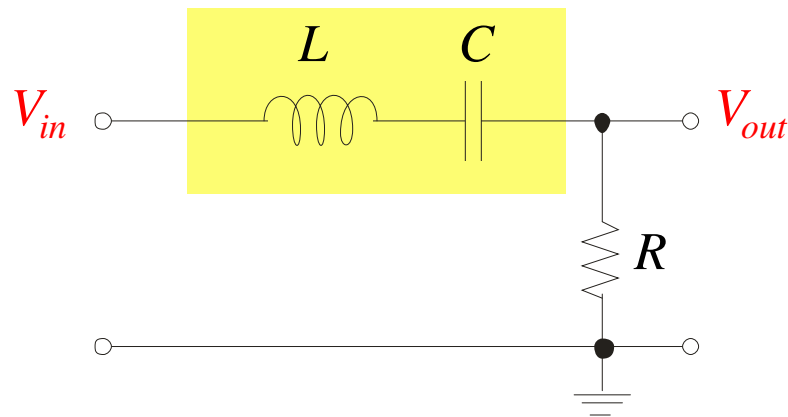
Summary of important concepts for series resonance:

- Capacitive and inductive reactances are equal.
- Total impedance is a minimum and is resistive.
- The current is maximum.
- The phase angle between V_S and I_S is zero.
- f_r is given by $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

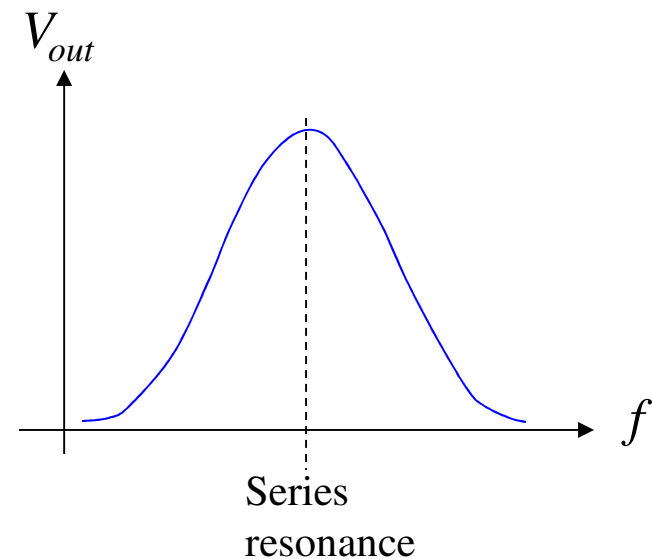
Circuito RLC série: filtro ressonante

An application of series resonant circuits is in filters. A **band-pass filter** allows signals within a range of frequencies to pass.

Resonant circuit

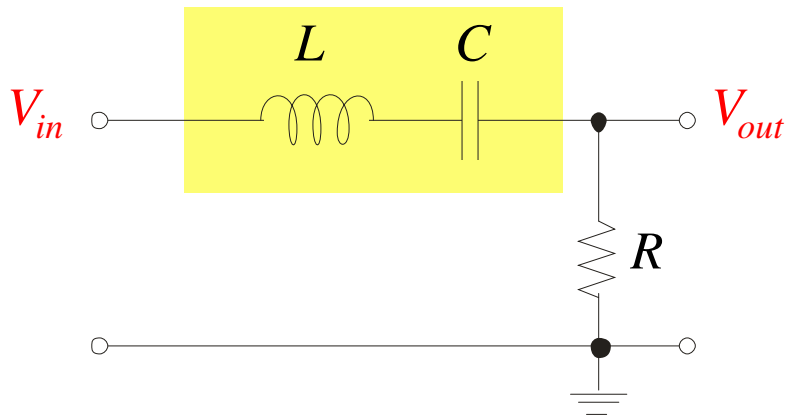


Circuit response:

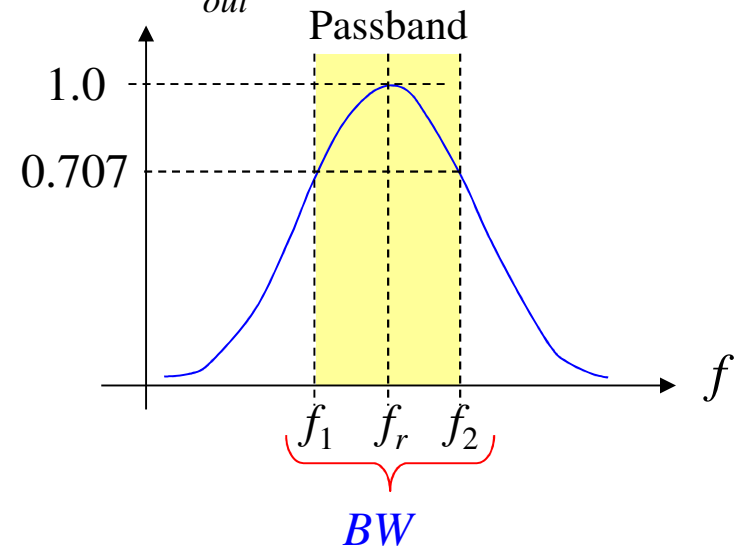


Circuito RLC série: filtro ressonante

Resonant circuit



Circuit response: I or V_{out}



An application of series resonant circuits is in filters. A **band-pass filter** allows signals within a range of frequencies to pass.

The response has a peak because at the *series* resonant frequency, the current is maximum at resonance and falls off before and after resonance. This develops the maximum voltage across the resistor at resonance.

The bandwidth (*BW*) of the filter is the range of frequencies for which the output is equal to or **greater than 70.7% of the maximum value**. f_1 and f_2 are commonly referred to as the *critical frequencies*, *cutoff frequencies* or *half-power frequencies*.

Decibéis

Filter responses are often given in terms of decibels, which is defined as

$$\text{dB} = 10 \log \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right)$$

Because it is a ratio, the decibel is dimensionless. One of the most important decibel ratios occurs when the power ratio is 1:2. This is called the *-3 dB frequency*, because

$$\text{dB} = 10 \log \left(\frac{1}{2} \right) = -3 \text{ dB}$$

Another useful definition for the decibel, when measuring voltages across the same impedance is

$$\text{dB} = 20 \log \left(\frac{V_{out}}{V_{in}} \right)$$

Fator de qualidade de uma bobine

The **quality factor** (Q) of a coil is given by the ratio of reactive power to true power:

$$Q = \frac{I^2 X_L}{I^2 R_W}$$

For a series circuit, I cancels, leaving:

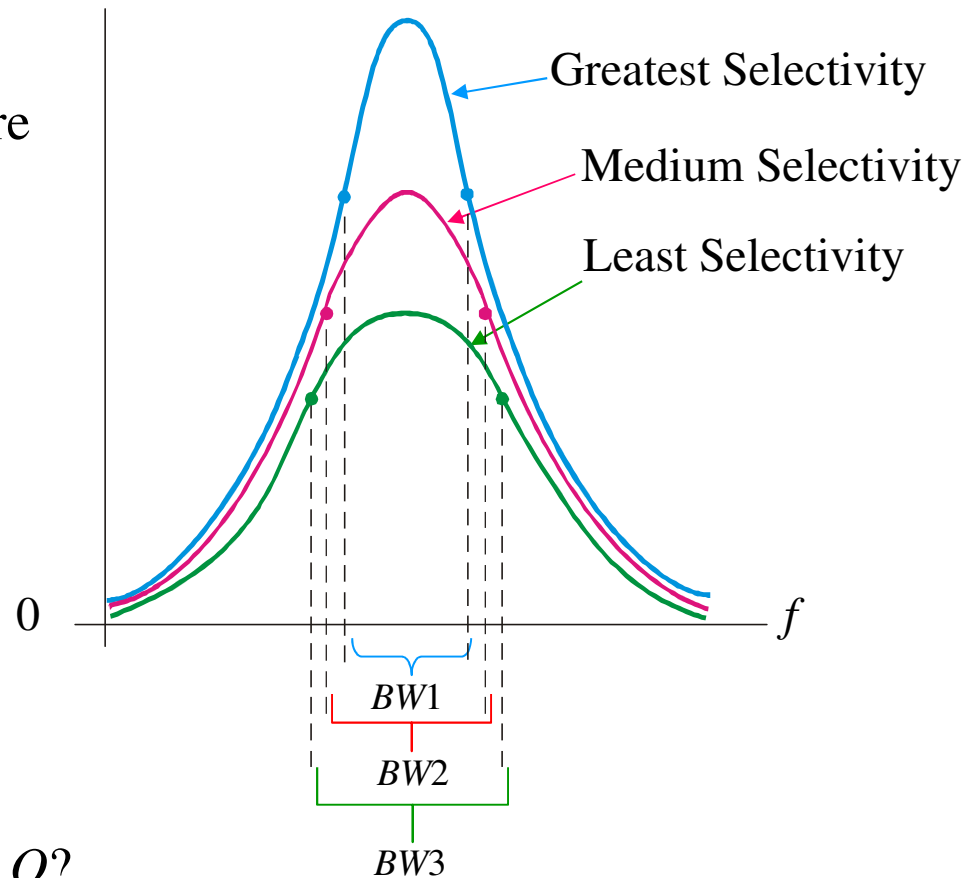
$$Q = \frac{X_L}{R_W}$$

Circuito RLC série: seletividade

Selectivity describes the basic frequency response of a resonant circuit. (The -3 dB frequencies are marked by the dots.)

The bandwidth is inversely proportional to Q in accordance with the formula,

$$BW = \frac{f_r}{Q}$$

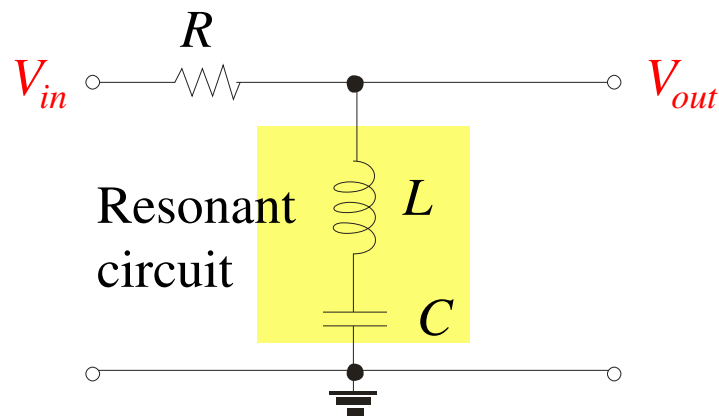


Which curve represents the highest Q ?

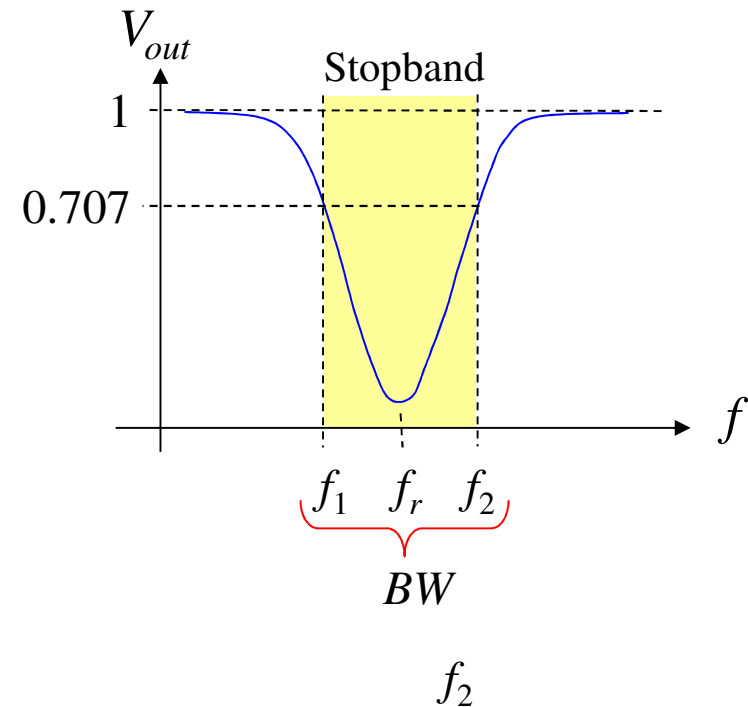
The one with the greatest selectivity.

Circuito RLC série: filtro ressonante

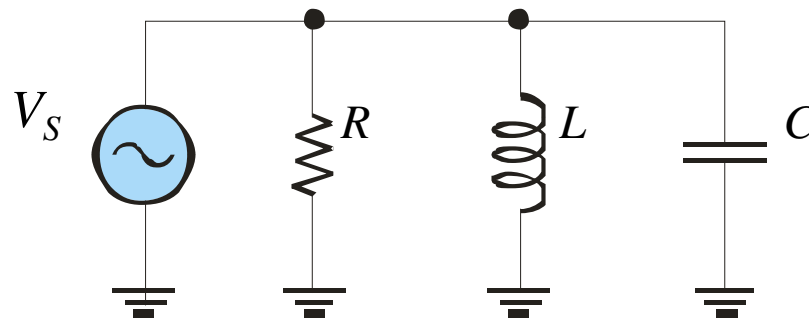
By taking the output across the resonant circuit, a **band-stop** (or **notch**) filter is produced.



Circuit response:



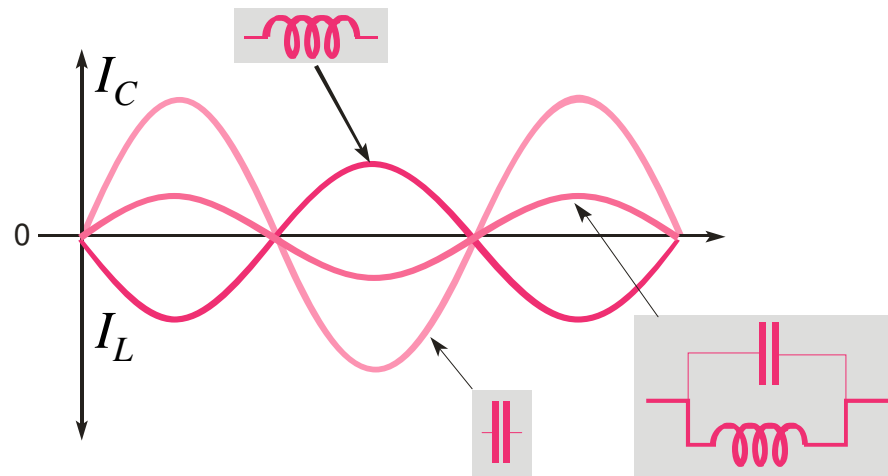
Circuito RLC paralelo



Corrente em circuitos RLC paralelo

The currents in the *RLC* components must add to the source current in accordance with KCL. Because of the opposite phase shift due to *L* and *C*, I_L and I_C effectively subtract.

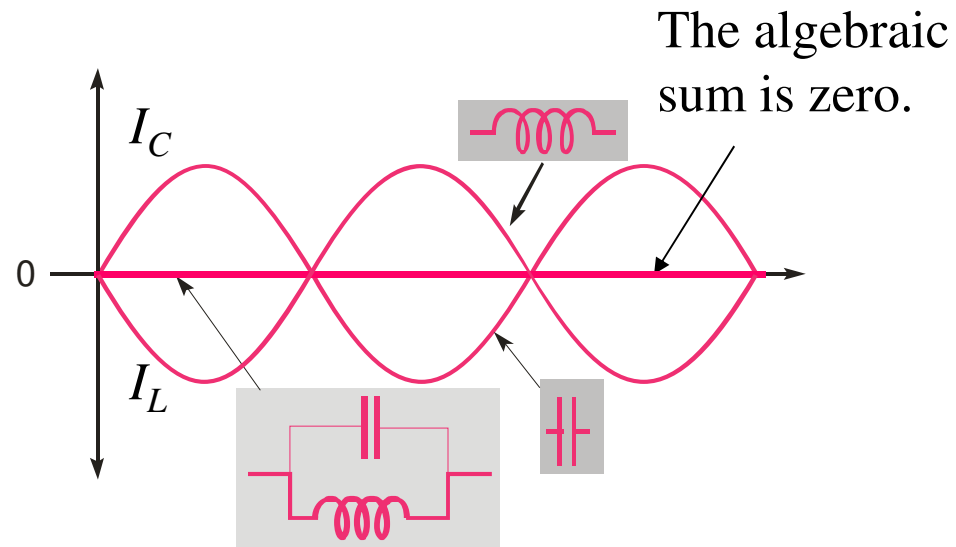
Notice that I_C is out of phase with I_L . When they are algebraically added, the result is....



Circuito RLC paralelo: ressonância

Ideally, at parallel resonance, I_C and I_L cancel because the currents are equal and opposite. The circuit is purely resistive at resonance.

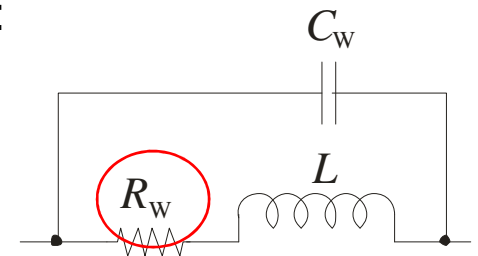
Notice that I_C is out of phase with I_L . When they are algebraically added, the result is....



Circuito RLC paralelo: ressonância em circuitos não ideais

In practical circuits, when the coil resistance is considered, there is a small current at resonance and the resonant frequency is not exactly given by the ideal equation. The Q of the coil affects the equation for resonance:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{Q^2}{Q^2 + 1}} \quad (\text{non-ideal})$$

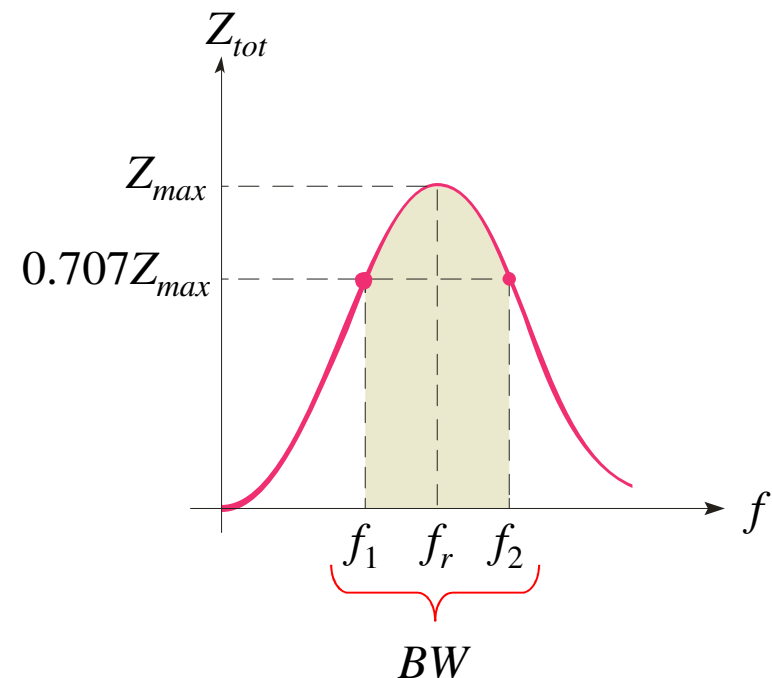
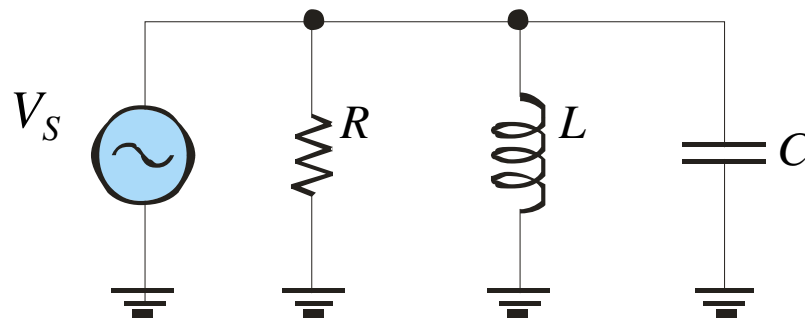


For $Q > 10$, the difference between the ideal and the non-ideal formula is less than 1%, and generally can be ignored.

Circuito RLC paralelo: largura de banda

At the *parallel* resonant frequency, impedance is maximum, so current is a minimum at resonance. The bandwidth (*BW*) can be defined in terms of the impedance curve.

A parallel resonant circuit is commonly referred to as a *tank circuit* because of its ability to store energy like a storage tank.



Circuito RLC paralelo: ressonância

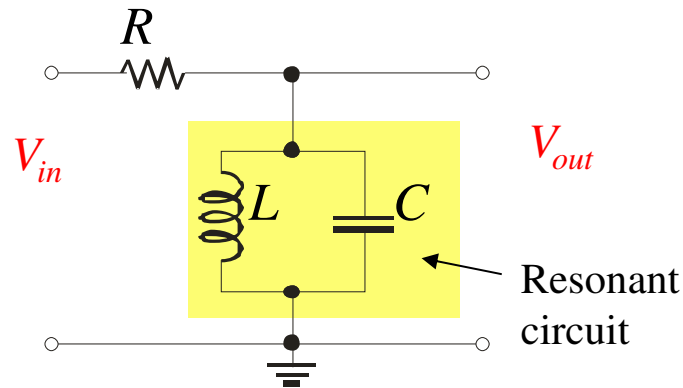
Summary of important concepts for parallel resonance:

- Capacitive and inductive susceptance are equal.
- Total impedance is a maximum (ideally infinite).
- The current is minimum.
- The phase angle between V_S and I_S is zero.
- f_r is given by

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

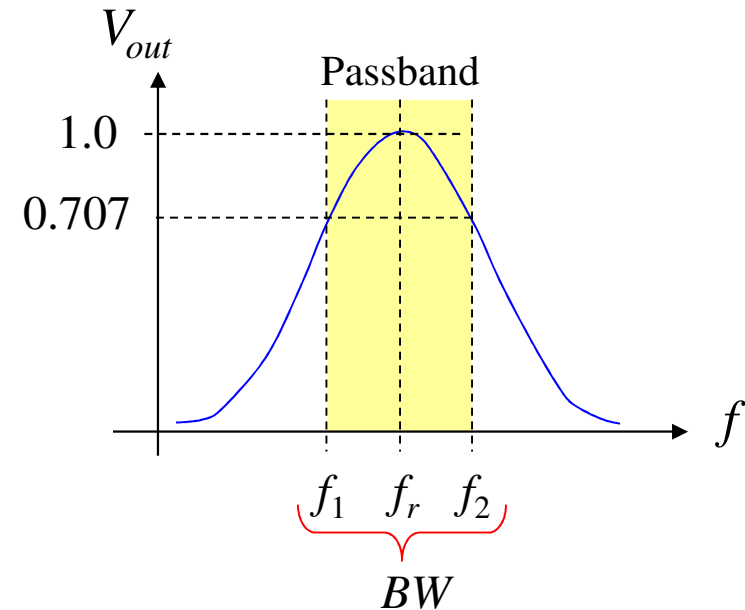
Circuito RLC paralelo: filtro passa-banda

Parallel resonant circuits can also be used for band-pass or band-stop filters. A basic **band-pass filter** is shown.



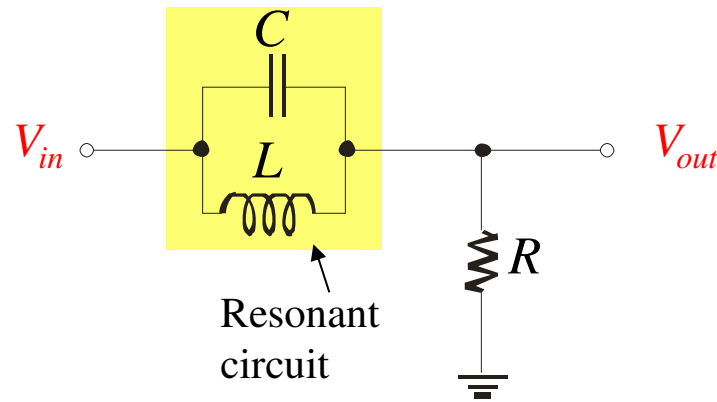
Parallel resonant
band-pass filter

Circuit response:



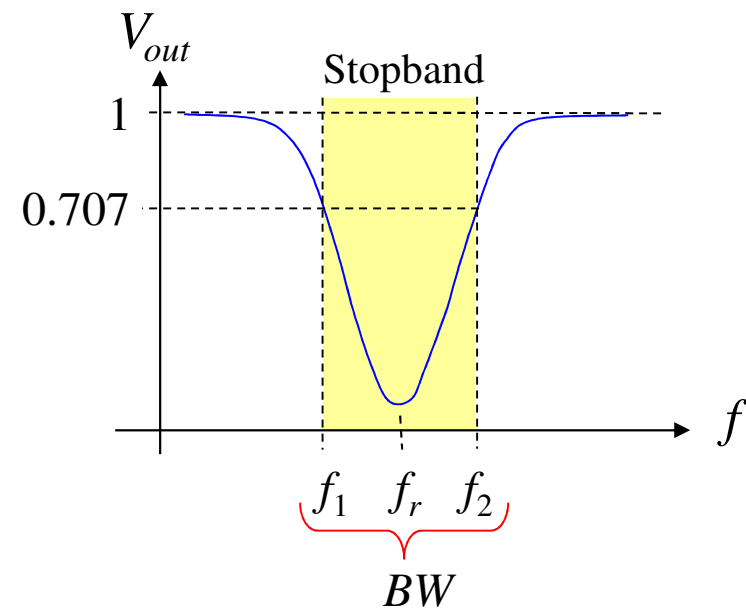
Circuito RLC paralelo: filtro rejeita-banda

For the **band-stop filter**, the resonant circuit and resistance are reversed as shown here.



Parallel resonant
band-stop filter

Circuit response:



Circuitos Eléctricos e Sistemas Digitais

2018-2019 - 1.º Semestre

Filtros: conceitos e definições a reter

Filtros de ordem n

- A ordem n de um filtro é dada pelo número n de componente do circuito que dependem da frequência;
- Atenuação à frequência de corte é igual a $-n \times 3$ dB, onde n é a ordem do filtro;
- Taxa de atenuação na região de opacidade: $-n \times 20$ dB/década
- A diferença de fase (uma década antes e uma década depois da frequência de corte): $-n \cdot 45^\circ$ dB/década;

Dimensionamento de filtros

- Dimensionamento das impedâncias:

$$\bullet \quad R \rightarrow k \cdot R \qquad C \rightarrow C/k \qquad L \rightarrow k \cdot L$$

A frequência de corte é invariante a esta transformação

- Dimensionamento da frequência: $\omega'_c = k \cdot \omega_c$

$$\bullet \quad R \rightarrow R \qquad C \rightarrow C \cdot k \qquad L \rightarrow L/k$$

Filtros ressonantes: ideias a reter

- A **band-pass** filter allows frequencies between two critical frequencies and rejects all others.
- A **band-stop** filter rejects frequencies between two critical frequencies and passes all others.
- **Band-pass** and band-stop filters can be made from both series and parallel resonant circuits.
- The **bandwidth of a resonant filter** is determined by the Q and the resonant frequency.
- The output voltage at a critical frequency is 70.7% of the maximum.

Terms to remember

Series resonance: A condition in a series *RLC* circuit in which the reactances ideally cancel and the impedance is a minimum.

Resonant frequency (f_r): The frequency at which resonance occurs; also known as the *center frequency*.

Parallel resonance: A condition in a parallel *RLC* circuit in which the reactances ideally are equal and the impedance is a maximum.

Tank circuit: A parallel resonant circuit.

Termos a reter

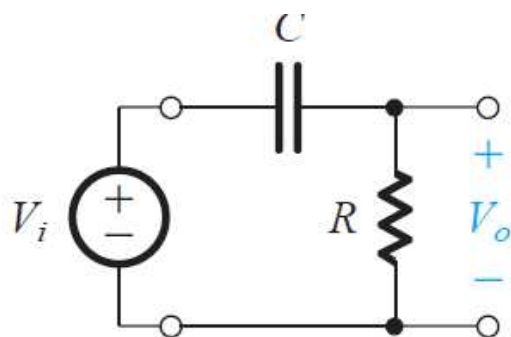
Half-power frequency: The frequency at which the output power of a resonant circuit is 50% of the maximum value (the output voltage is 70.7% of maximum); another name for critical or cutoff frequency.

Decibel: Ten times the logarithmic ratio of two powers.

Selectivity: A measure of how effectively a resonant circuit passes desired frequencies and rejects all others. Generally, the narrower the bandwidth, the greater the selectivity.

Diagramas de Bode assintóticos: exemplo circuito CR passa-alto

Diagramas de Bode assintóticos



$$\mathbf{H}(\omega) = \frac{\mathbf{v}_{out}(\omega)}{\mathbf{v}_{in}(\omega)} = \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + j\omega RC}} = |\mathbf{H}(\omega)|e^{j\phi}$$
$$= \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)^2}} e^{+j\arctan\frac{\omega_C}{\omega}}, \quad \omega_C = \frac{1}{RC} \quad \text{frequência de corte}$$

Vamos considerar três situações: para o módulo da função de transferência

i) $\omega \ll \omega_C : H(\omega) \rightarrow \frac{\omega}{\omega_C}, H(\omega)_{dB} = 20 \text{ Log}_{10} \left(\frac{\omega}{\omega_C} \right)$ (-20 dB por década)

ii) $\omega = \omega_C : H(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2}}, H(\omega)_{dB} = 20 \text{ Log}_{10} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right) = -3 \text{ dB}$

iii) $\omega \gg \omega_C : H(\omega) \rightarrow 1, H(\omega)_{dB} = 20 \text{ Log}_{10}(1) = 0 \text{ dB}$

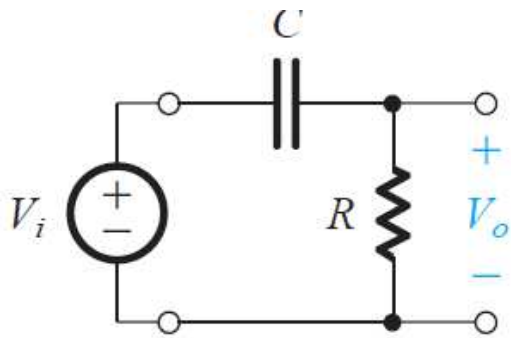
Da mesma forma para a fase função de transferência:

i) $\omega \ll \omega_C : \phi(\omega) \rightarrow 90^\circ$

ii) $\omega = \omega_C : \phi(\omega) = 45^\circ,$

iii) $\omega \gg \omega_C : \phi(\omega) \rightarrow 0^\circ,$

Diagramas de Bode assintóticos

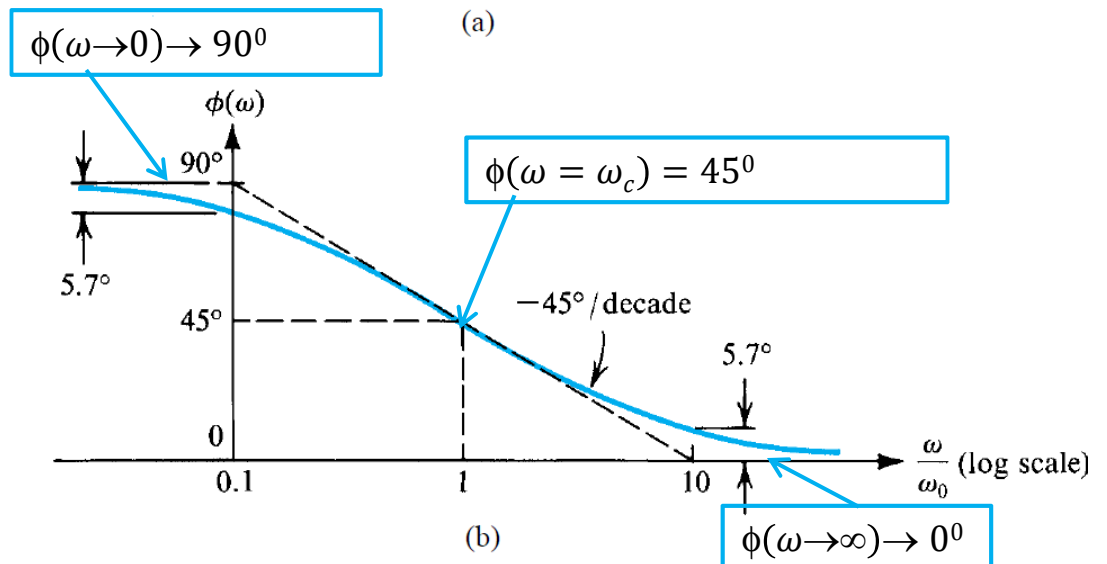
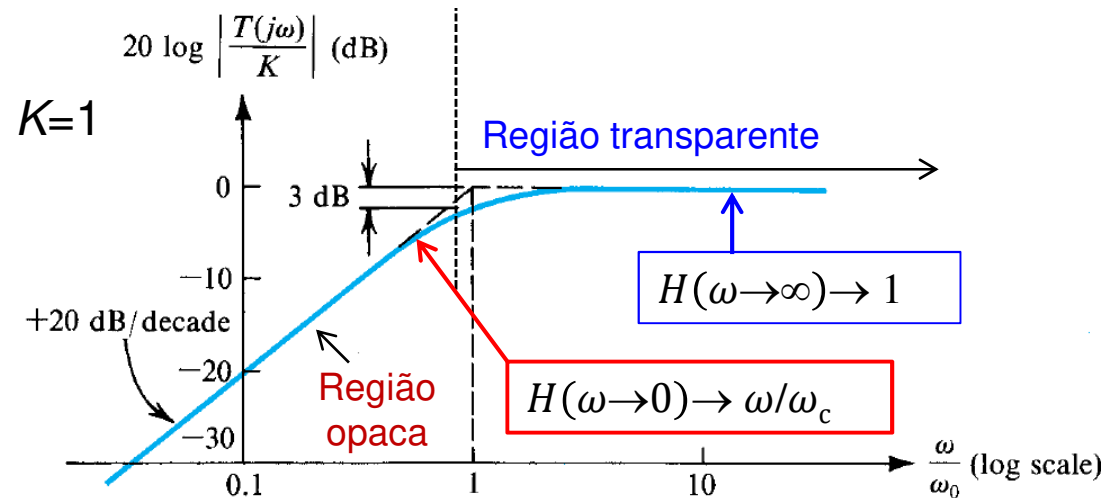


$$\mathbf{H}(\omega) = \frac{\mathbf{v}_{out}(\omega)}{\mathbf{v}_{in}(\omega)} = \frac{1}{1 + \frac{1}{j\omega RC}}$$

$$= |\mathbf{H}(\omega)| e^{j\phi}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)^2}} e^{+j \arctan \frac{\omega_C}{\omega}}$$

$$\omega_C = \frac{1}{RC} \quad \text{frequência de corte}$$



Microelectronic_Circuits_6th_Edition_Sedra

Figure 1.24 (a) Magnitude and (b) phase response of STC networks of the high-pass type.

http://www.ufrgs.br/eng04030/Aulas/teoria/cap_12/respfreq.htm

Circuitos Elétricos e Sistemas Digitais

2018-2019 - 1.º Semestre

Díodos e aplicações

- Semicondutores intrínsecos e semicondutores extrínsecos
- Junções p-n; característica corrente-tensão de uma junção p-n
- Díodo de junção pn
- Modelos lineares do díodo: Díodo ideal, díodo ideal em serie com uma queda de tensão, díodo ideal em serie com uma queda de tensão e uma resistência
- Circuitos rectificadores: rectificação de meia onda e de onda completa
- Circuitos detectores de pico
- Circuitos de fixação de nível
- Circuitos limitadores
- Circuitos multiplicadores de tensão
- Díodo de Zener; regulação de tensão
- Díodo (de efeito de) túnel e díodo de efeito de túnel ressonante
- Díodos emissores de luz (LEDs) e díodos laser
- Fotodíodo e célula solares.

As figuras apresentadas neste capítulo são na sua maioria retiradas do manual *Electronics Fundamentals: Circuits, Devices & Applications*, Pearson New International Edition (8e) By Thomas L Floyd, David Buchla.

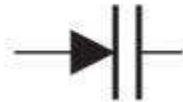
Símbolos de diferentes tipos de díodos



(a) Rectifier



(b) Zener



(c) Varactor



(d) LED



(e) Photodiode

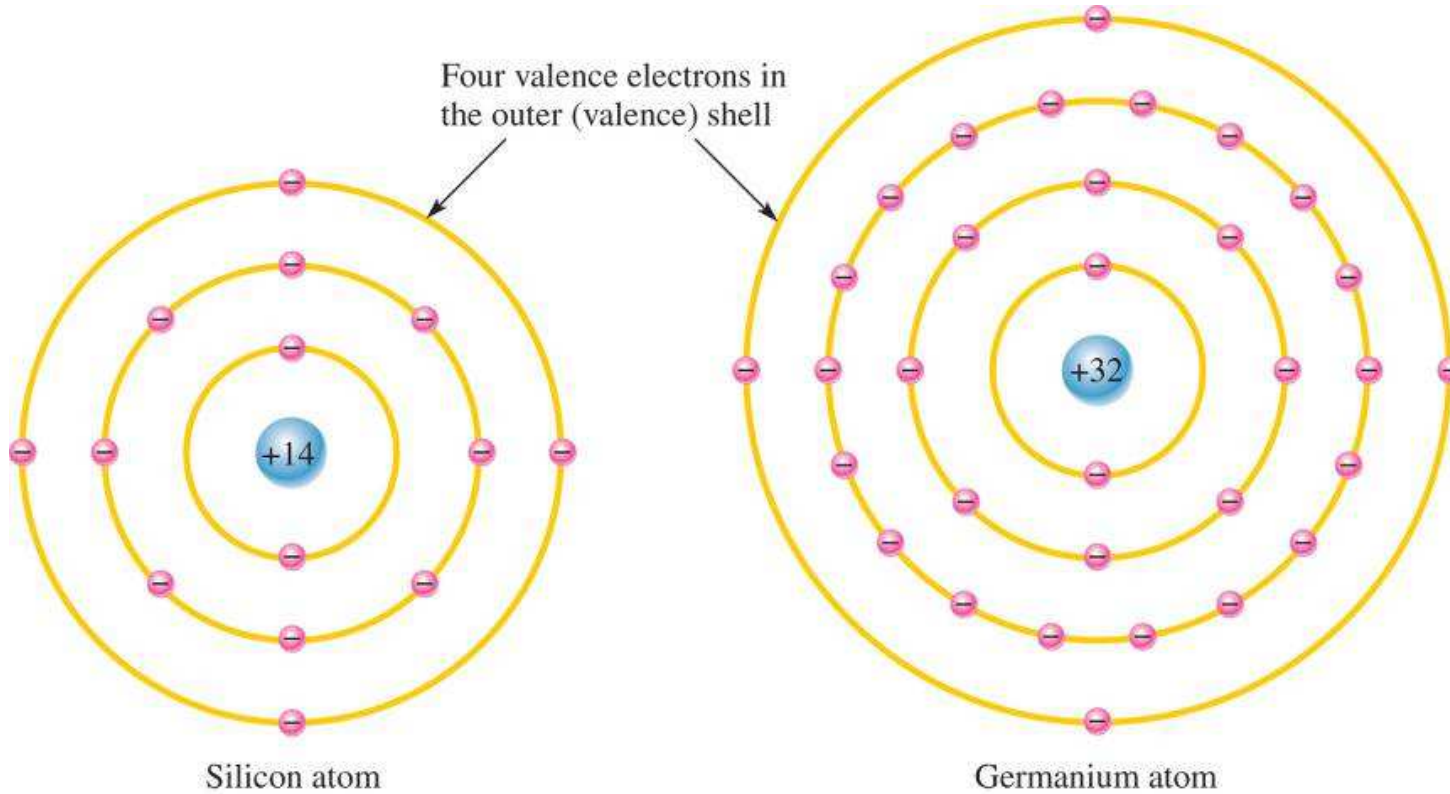
or



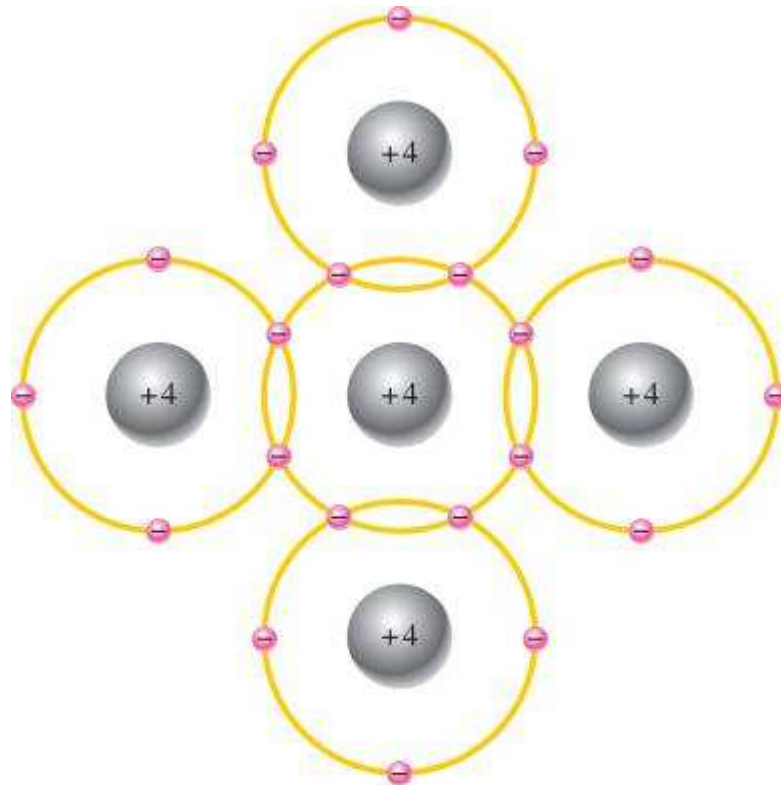
... e ainda o laser de díodo, o díodo de efeito de túnel, etc. etc.

Semiconductors

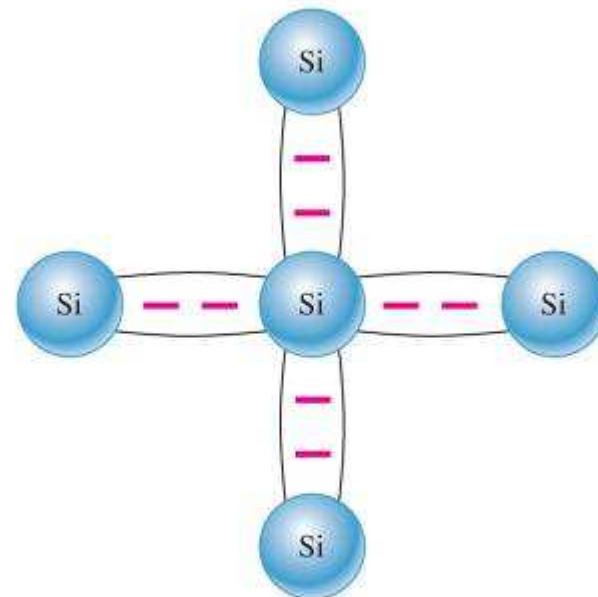
Diagrams of the silicon and germanium atoms.



Covalent bonds in a silicon crystal. The actual crystal is three dimensional.

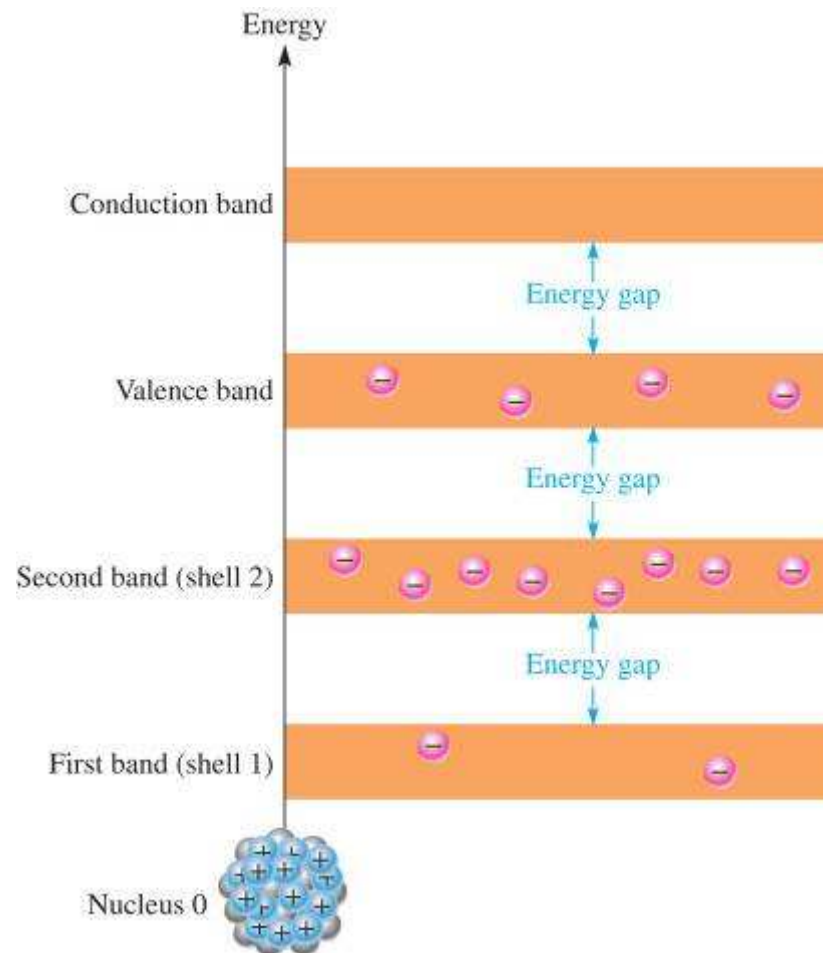


(a) The center silicon atom shares an electron with each of the four surrounding silicon atoms, creating a covalent bond with each. The surrounding atoms are in turn bonded to other atoms, and so on.



(b) Bonding diagram. The red negative signs represent the shared valence electrons.

Energy band diagram for a pure silicon crystal with unexcited atoms. There are no electrons in the conduction band.



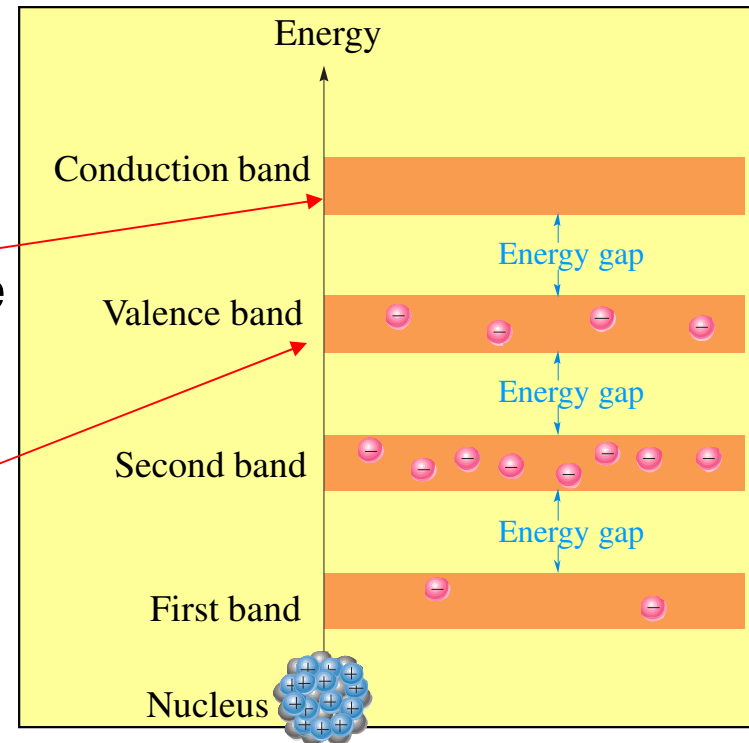
Semiconductores. Hiato de energia (“bandgap”)

Semiconductors are crystalline materials that are characterized by specific energy bands for electrons.

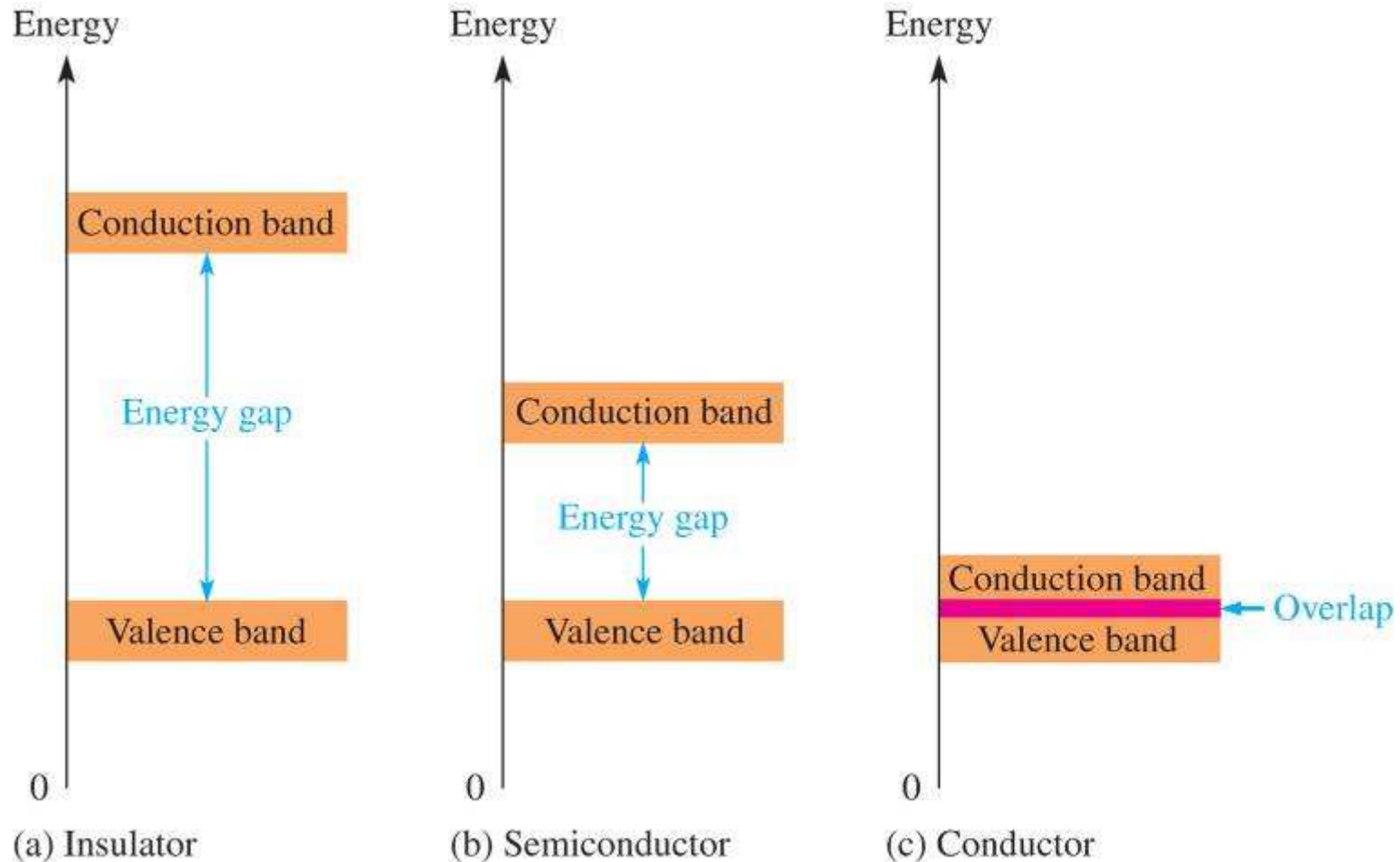
Between the bands are gaps; these gaps represent energies that electrons cannot possess.

The last energy band is the **conduction band**, where electrons are mobile.

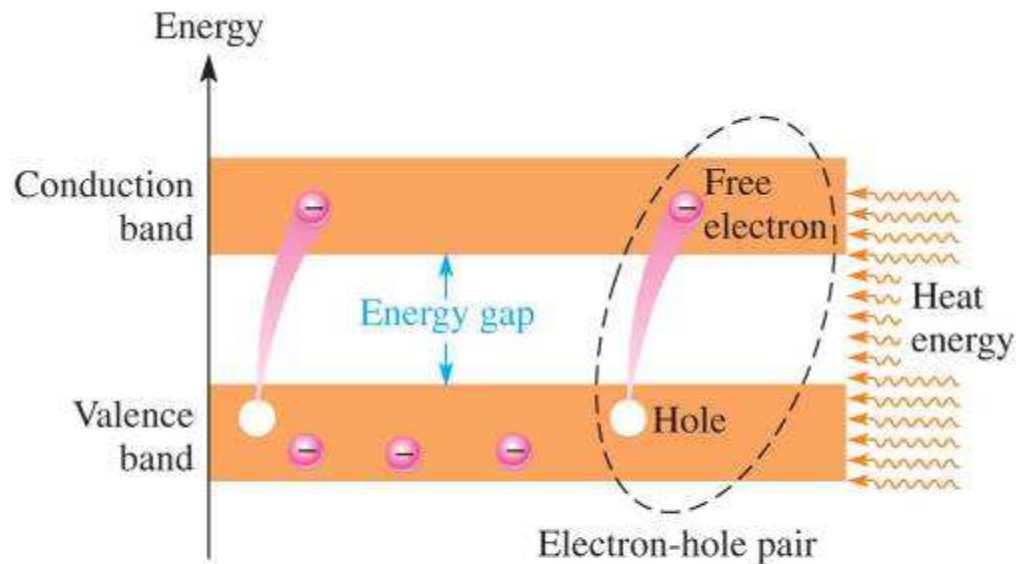
The next to the last band is the **valence band**, which is the energy level associated with electrons involved in bonding.



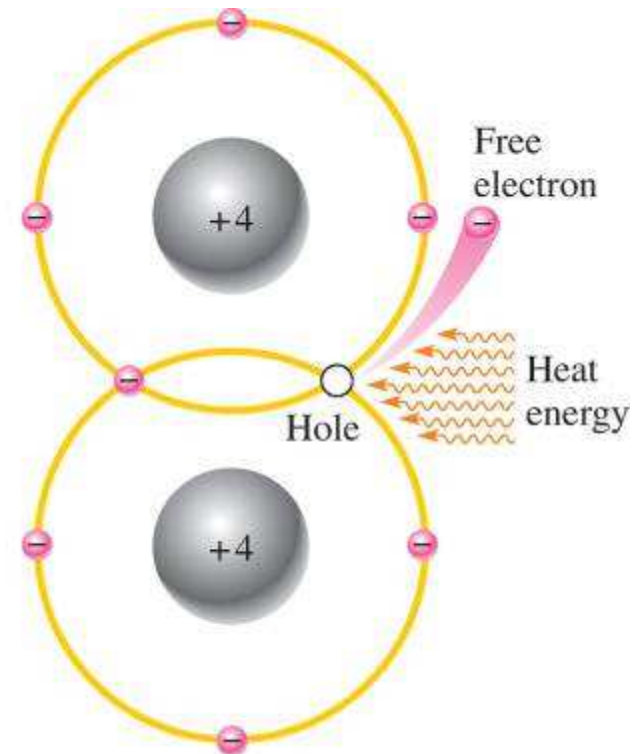
Energy diagrams for the three types of materials.



Creation of electron-hole pairs in a silicon crystal. Electrons in the conduction band are free electrons.



(a) Energy diagram



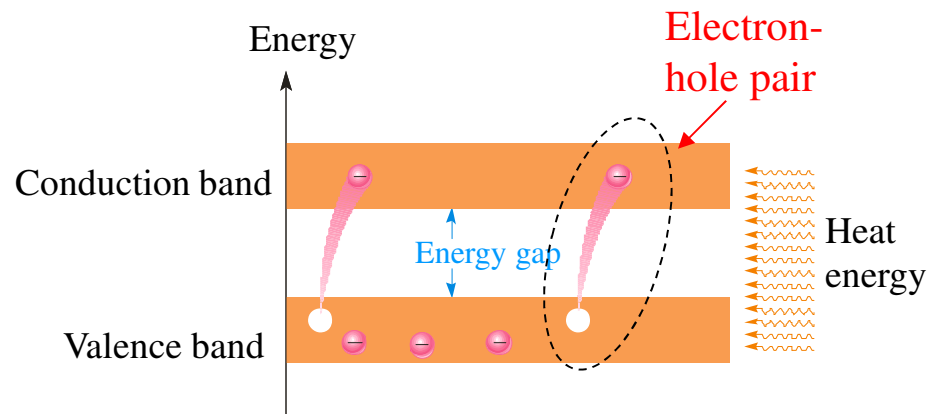
(b) Bonding diagram

Electron and hole current

At room temperature, some electrons have enough energy to jump into the conduction band.

After jumping the gap, these electrons are free to drift throughout the material and form electron current when a voltage is applied.

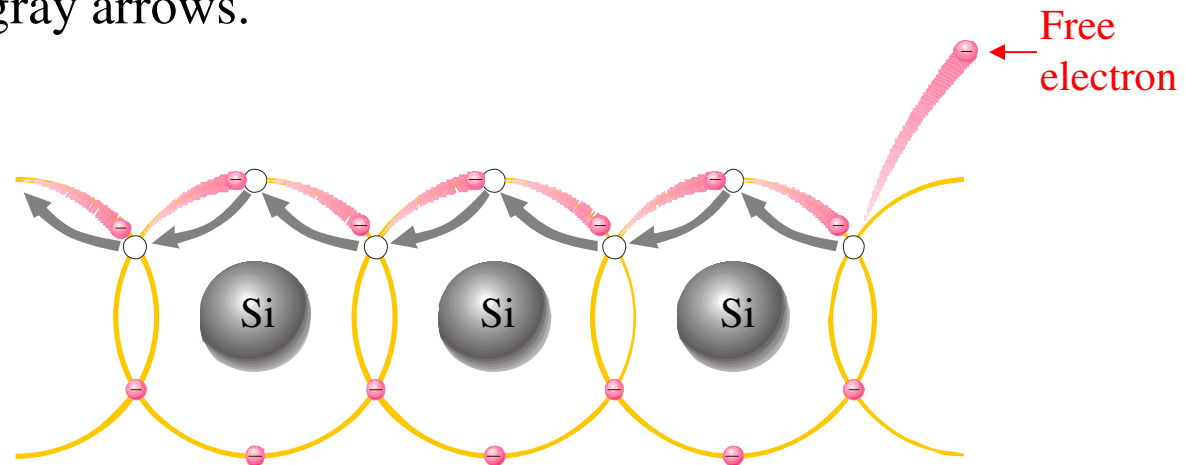
For every electron in the conduction band, a hole is left behind in the valence band.



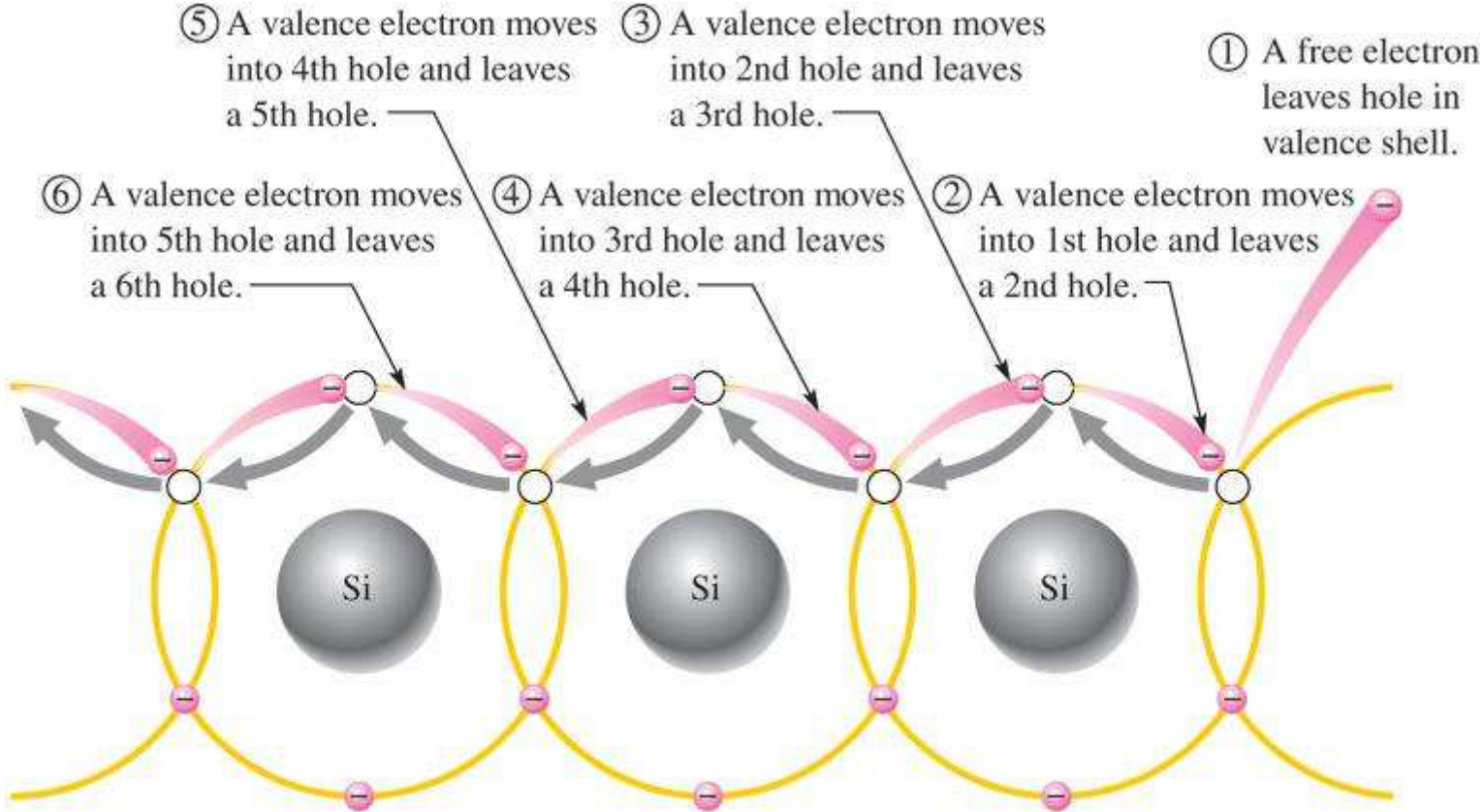
Electron and hole current

The electrons in the conduction band and the holes in the valence band are the charge carriers. In other words, current in the conduction band is by electrons; current in the valence band is by holes.

When an electron jumps to the conduction band, valence electrons move from hole-to-hole in the valence band, effectively creating “hole current” shown by gray arrows.

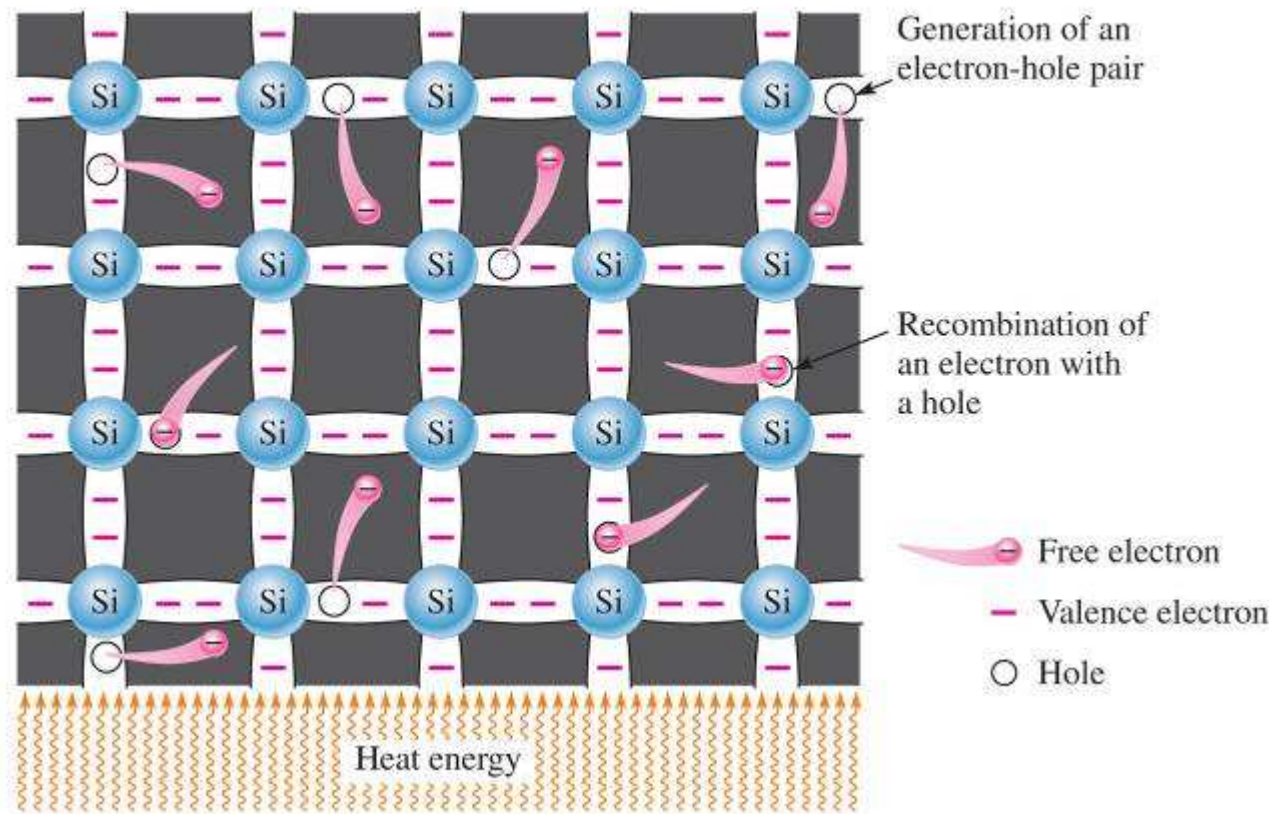


Hole current in intrinsic silicon.

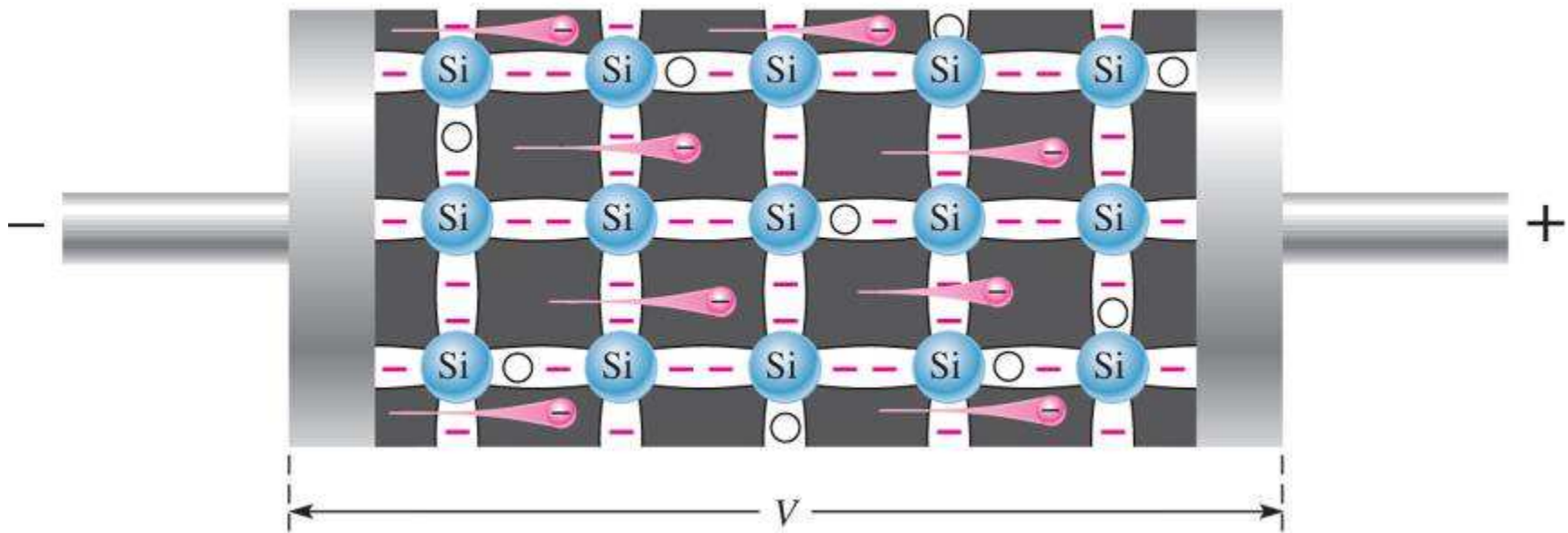


When a valence electron moves left to right to fill a hole while leaving another hole behind, the hole has effectively moved from right to left. Gray arrows indicate effective movement of a hole.

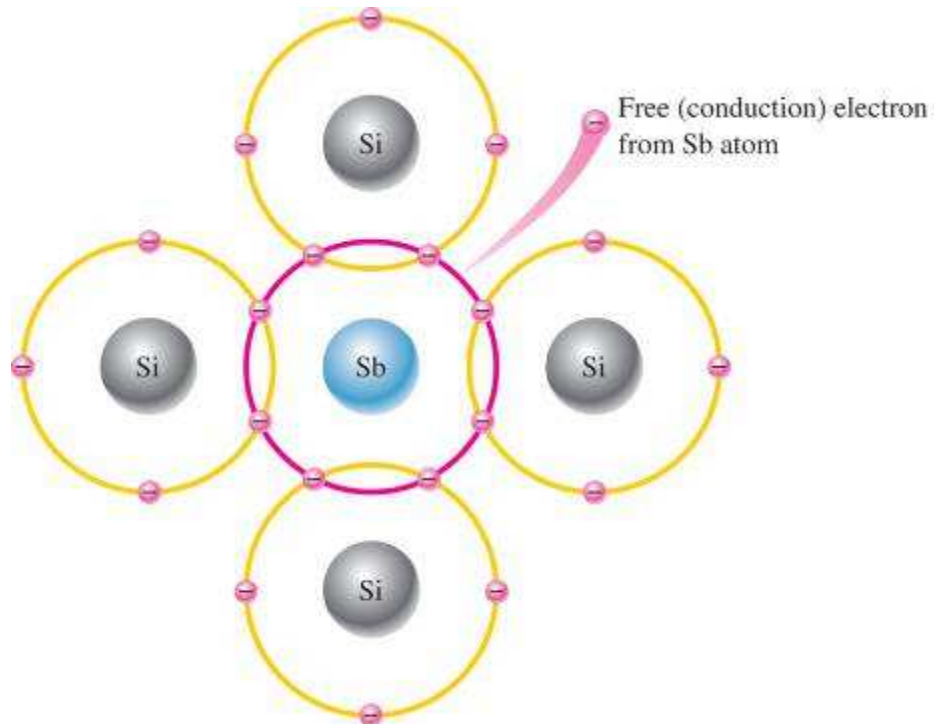
Electron-hole pairs in a silicon crystal. Free electrons are being generated continuously while some recombine with holes.



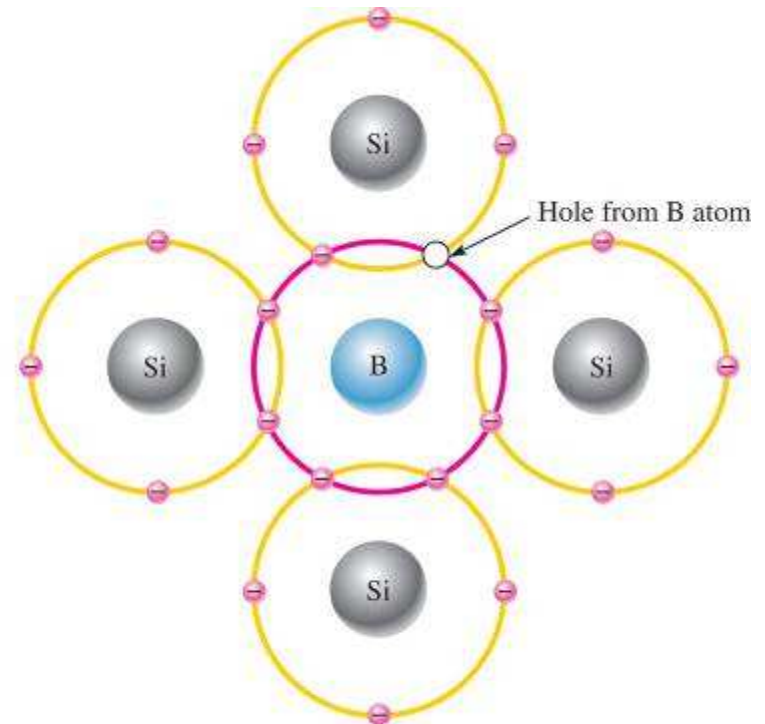
Free electron current in intrinsic silicon is produced by the movement of thermally generated free electrons in the conduction band.



Semiconductores extrínsecos. Impurezas



(a) Pentavalent impurity atom in a silicon crystal. An antimony (Sb) impurity atom is shown in the center. The extra electron from the Sb atom becomes a free electron.



(b) Trivalent impurity atom in a silicon crystal. A boron (B) impurity atom is shown in the center.

Semiconductores extrínsecos. Impurezas.

By adding certain impurities to pure (intrinsic) silicon, more holes or more electrons can be produced within the crystal.

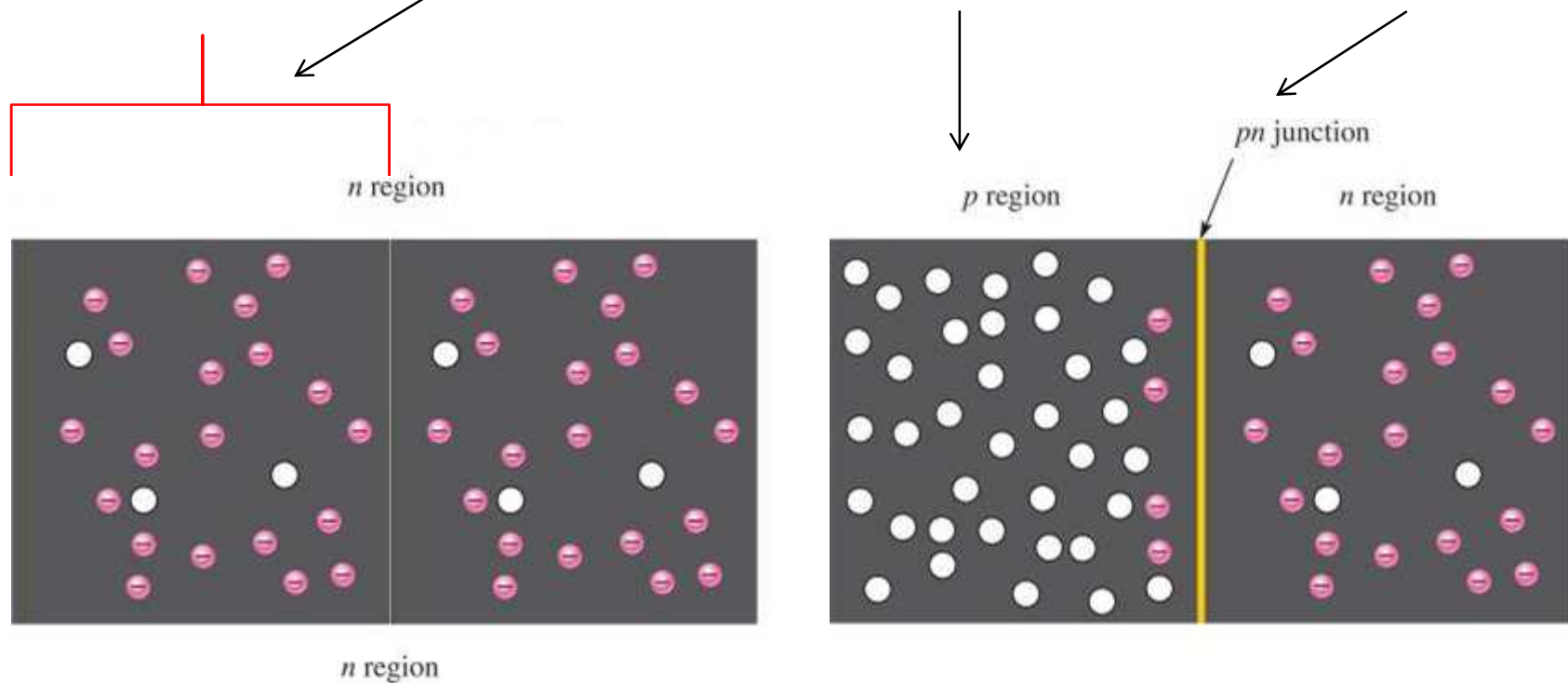
To increase the number of conduction band electrons, pentavalent impurities are added, forming an *n*-type semiconductor. These are elements to the right of Si on the Periodic Table.

To increase the number of holes, trivalent impurities are added, forming a *p*-type semiconductor. These are elements to the left of Si on the Periodic Table.

III	IV	V
B	C	N
Al	Si	P
Ga	Ge	As
In	Sn	Sb

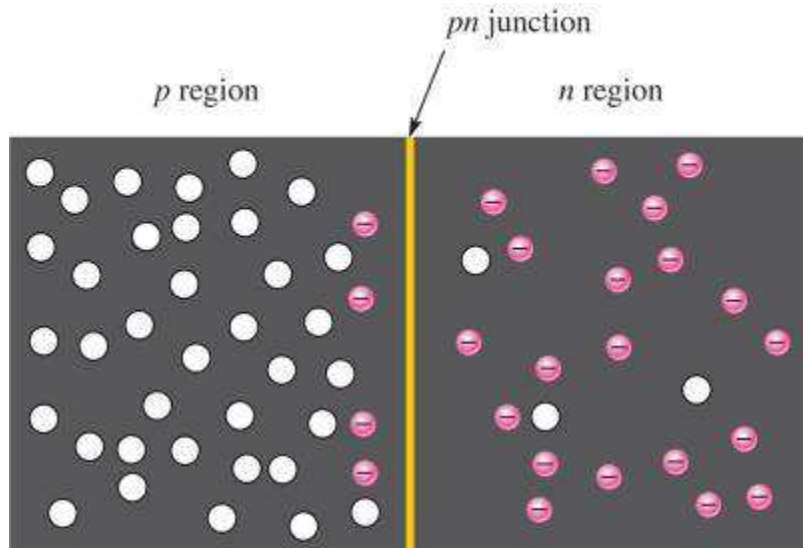
Formação de uma junção pn

Se doparmos esta região da esquerda, inicialmente tipo n, com impurezas do 3.º grupo da tabela periódica, obtemos uma região tipo p, e forma-se uma junção *pn*

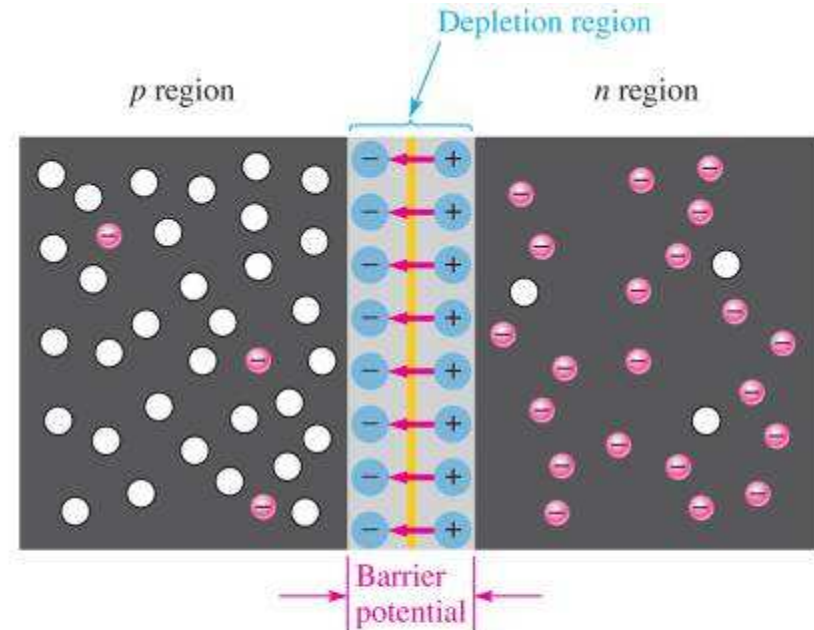


(a) At the instant of junction formation, free electrons in the *n* region near the *pn* junction begin to diffuse across the junction and fall into holes near the junction in the *p* region.

Formação da região de depleção numa junção pn.

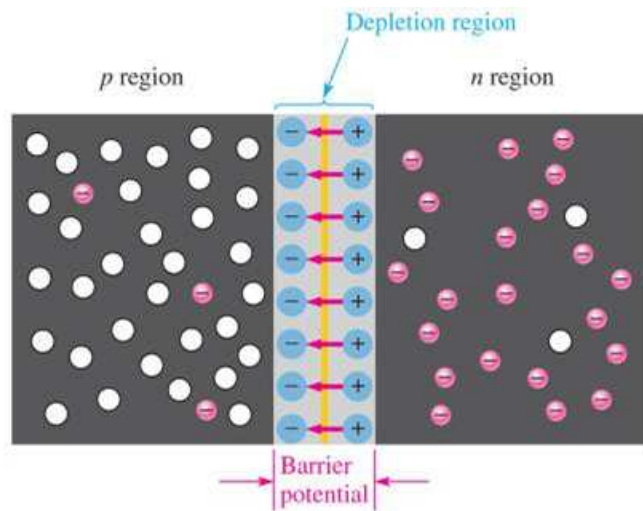


(a) At the instant of junction formation, free electrons in the n region near the pn junction begin to diffuse across the junction and fall into holes near the junction in the p region.

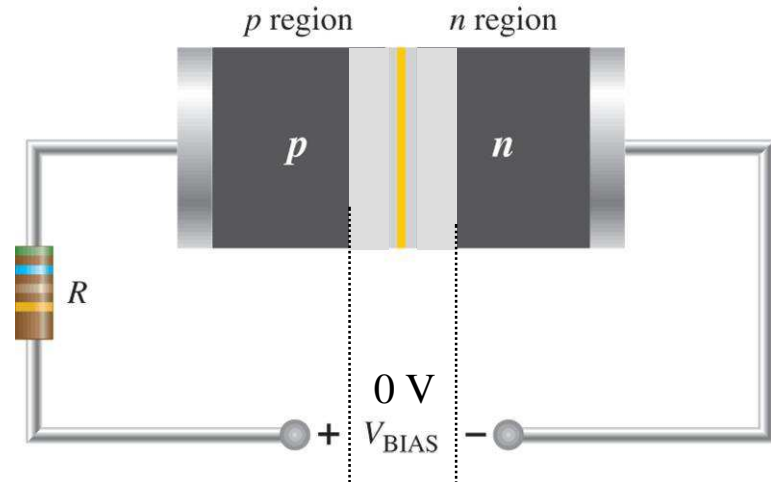


(b) For every electron that diffuses across the junction and combines with a hole, a positive charge is left in the n region and a negative charge is created in the p region, forming a barrier potential. This action continues until the voltage of the barrier repels further diffusion.

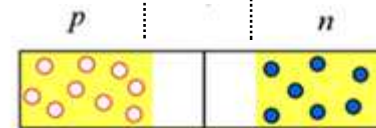
Junção pn não polarizada



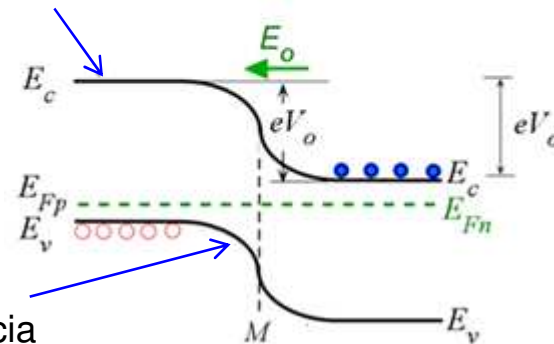
(b) For every electron that diffuses across the junction and combines with a hole, a positive charge is left in the n region and a negative charge is created in the p region, forming a barrier potential. This action continues until the voltage of the barrier repels further diffusion.



Diagramas de bandas da junção pn



Banda de condução

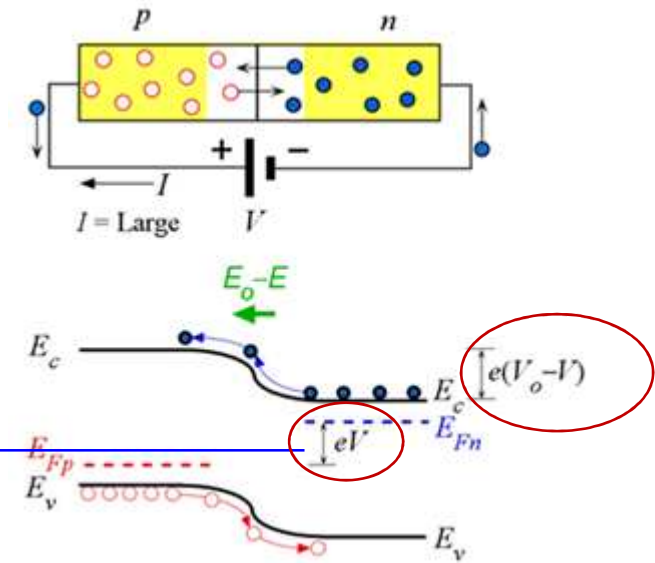
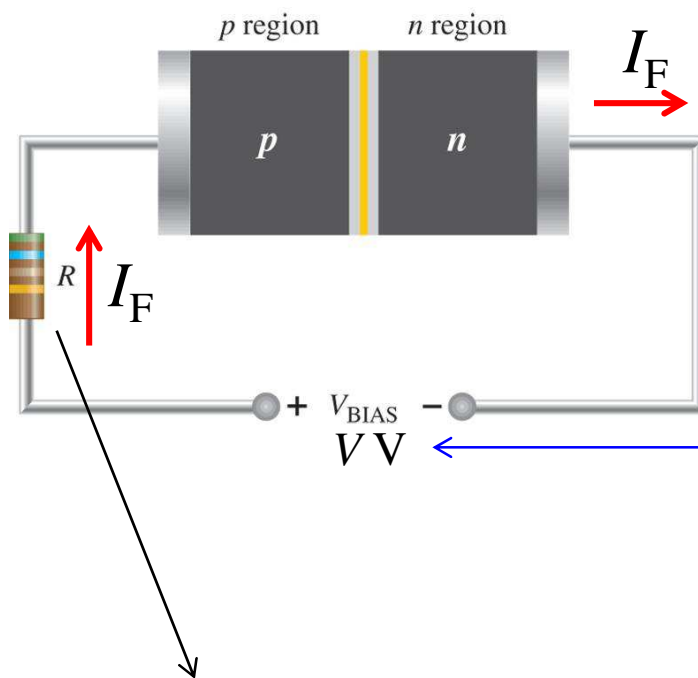


Banda de valência

Junção pn polarizada diretamente

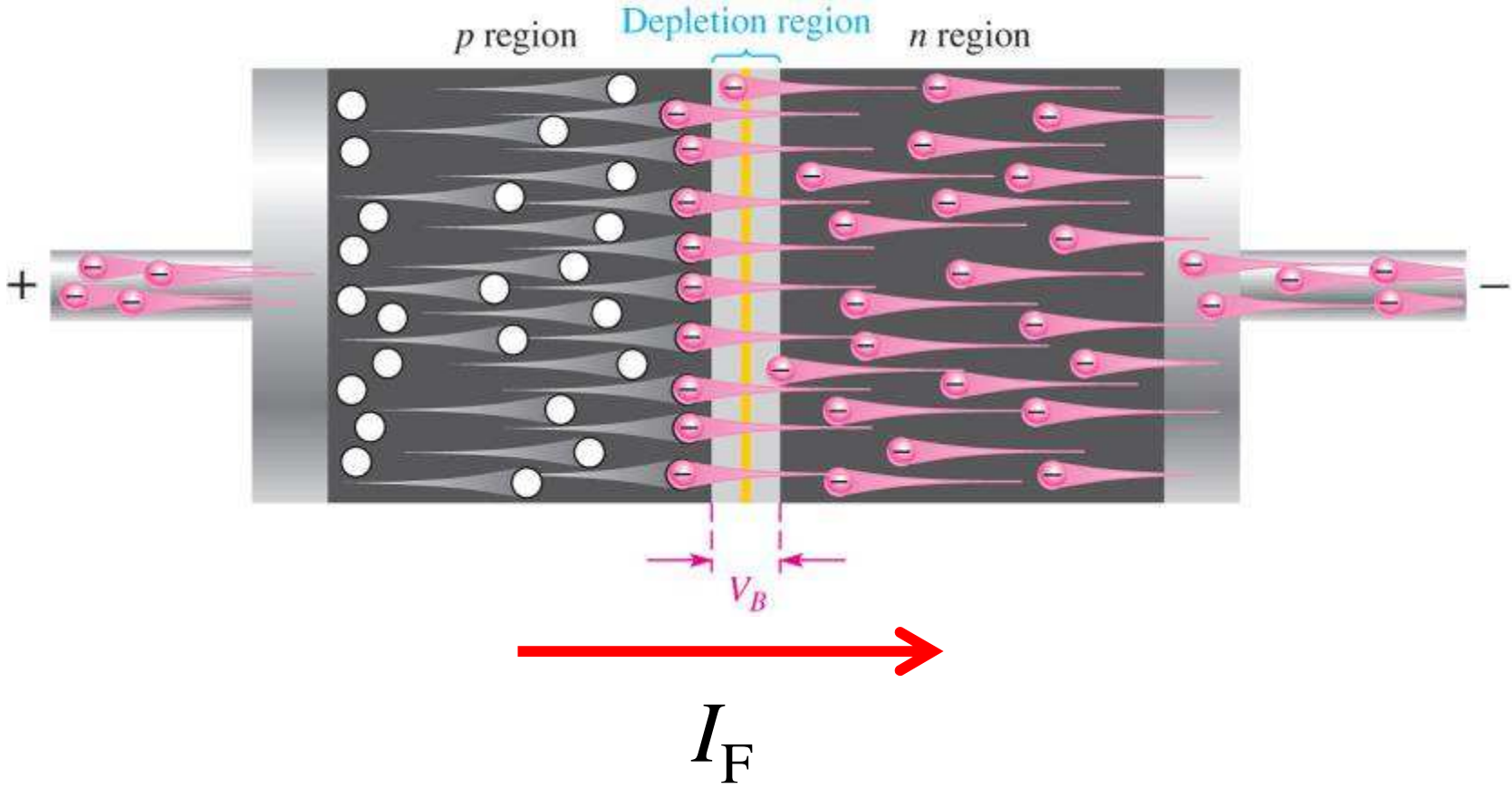
Forward-bias connection

Polarizar diretamente: aplicar uma diferença de potencial positiva entre o lado p e o lado n, i.e., colocar o lado p a um potencial superior ao lado n.



The resistor limits the forward current in order to prevent damage to the diode.

Current in a forward-biased pn junction



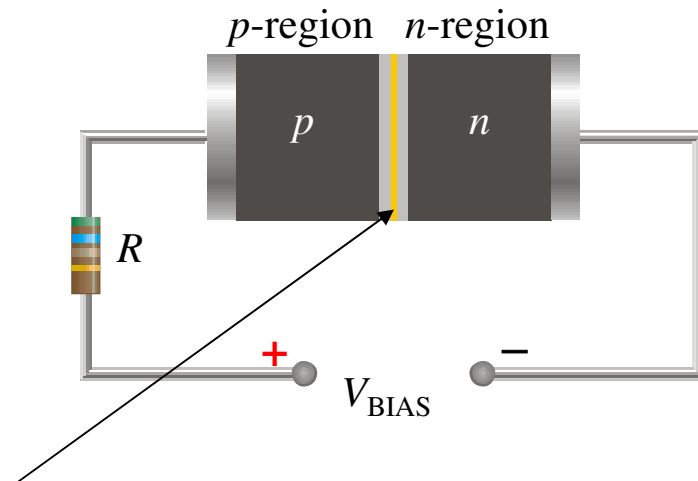
Junção polarizada diretamente

Forward-bias connection

When a pn junction is forward-biased, current is permitted. The bias voltage pushes conduction-band electrons in the n -region and holes in the p -region toward the junction where they combine.

The barrier potential in the depletion region must be overcome in order for the external source to cause current.

For a silicon diode, this is about 0.7 V.



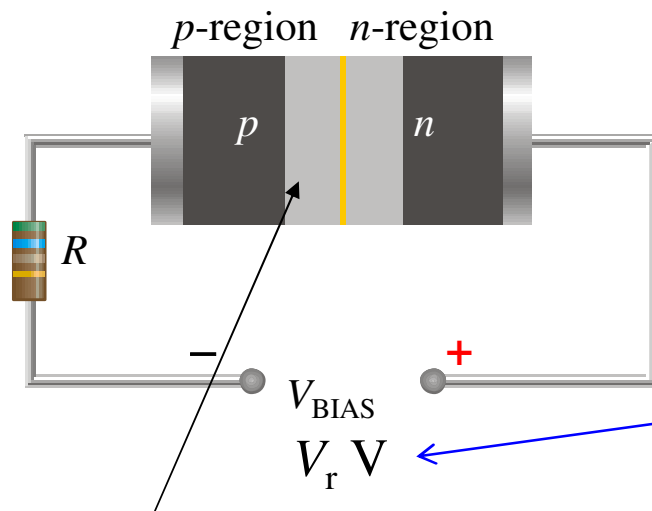
The forward-bias causes the depletion region to be narrow.

Junção polarizada inversamente

Reverse-bias connection - Reverse bias

When a pn junction is reverse-biased, the bias voltage moves conduction-band electrons and holes away from the junction, so current is prevented.

The junction effectively acts as an insulator. A relatively few electrons manage to diffuse across the junction, creating only a tiny reverse current (*corrente de fuga*).



The reverse-bias causes the depletion region to widen.

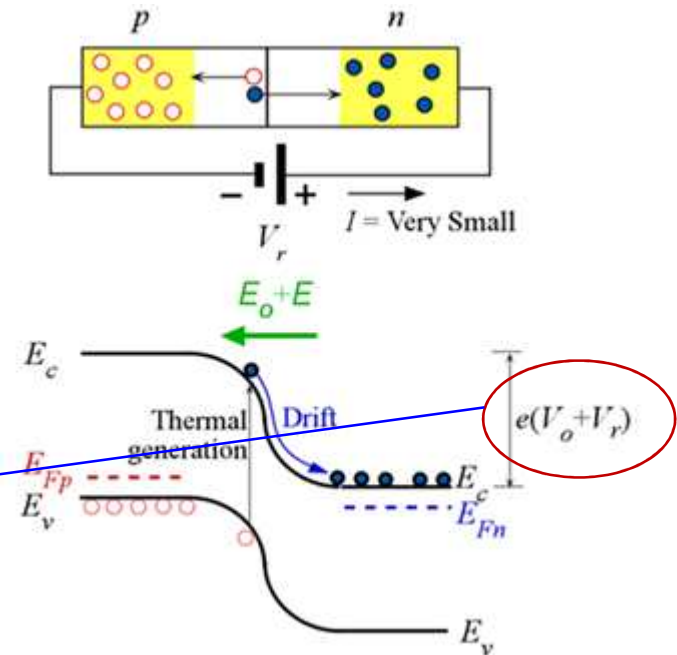
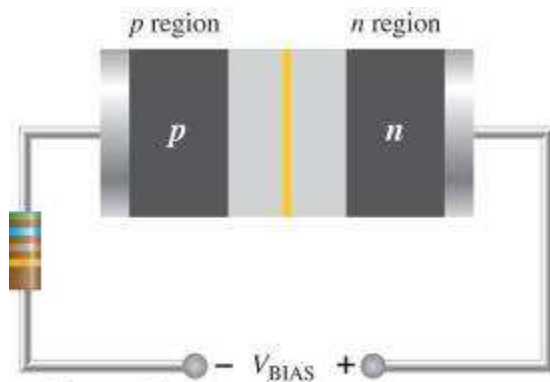
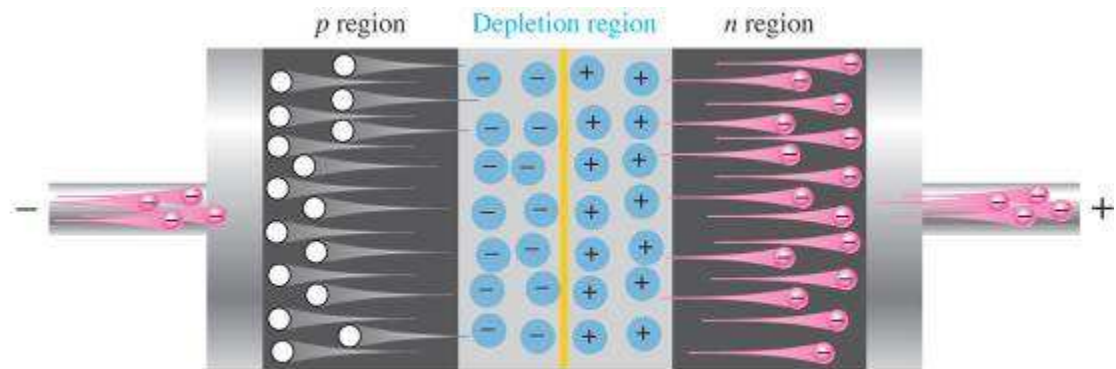


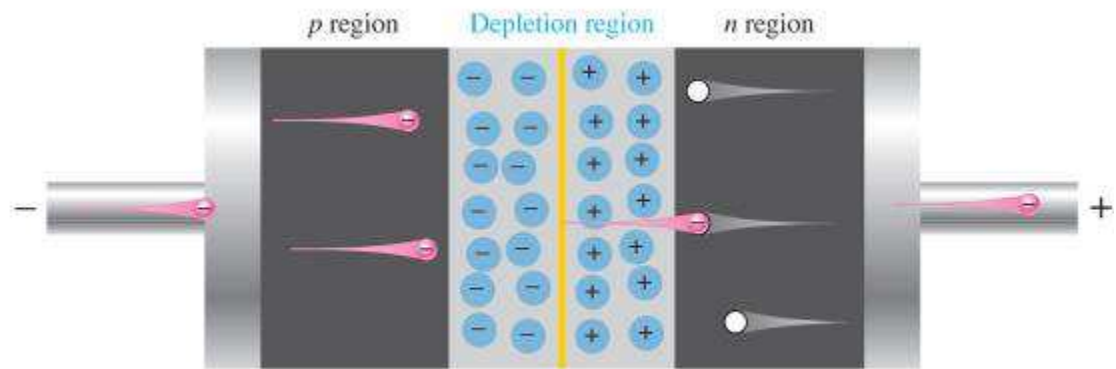
Illustration of reverse bias.



(a) Reverse-bias connection.



(b) There is transient current as depletion region widens.

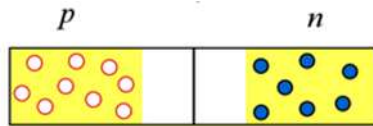


(c) Majority current ceases when barrier potential equals bias voltage. There is an extremely small reverse current due to minority carriers.

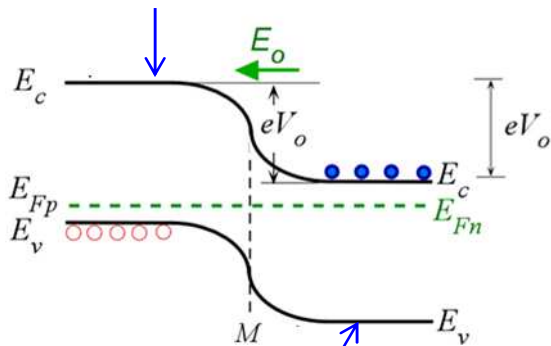
Díodo de junção pn

Esquemas e diagramas de bandas da junção pn

Não polarizada

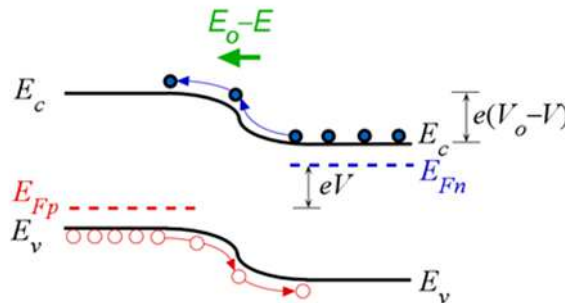
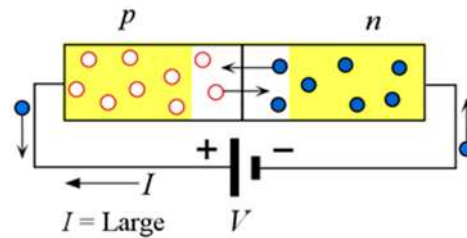


Banda de condução

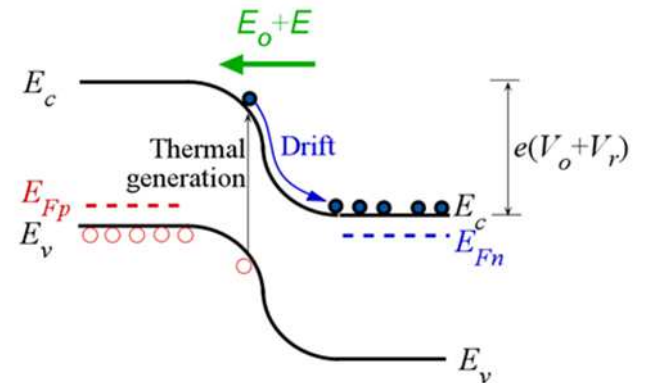
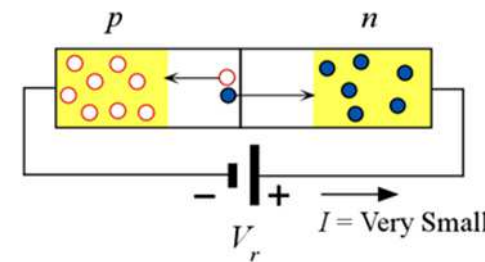


Banda de valência

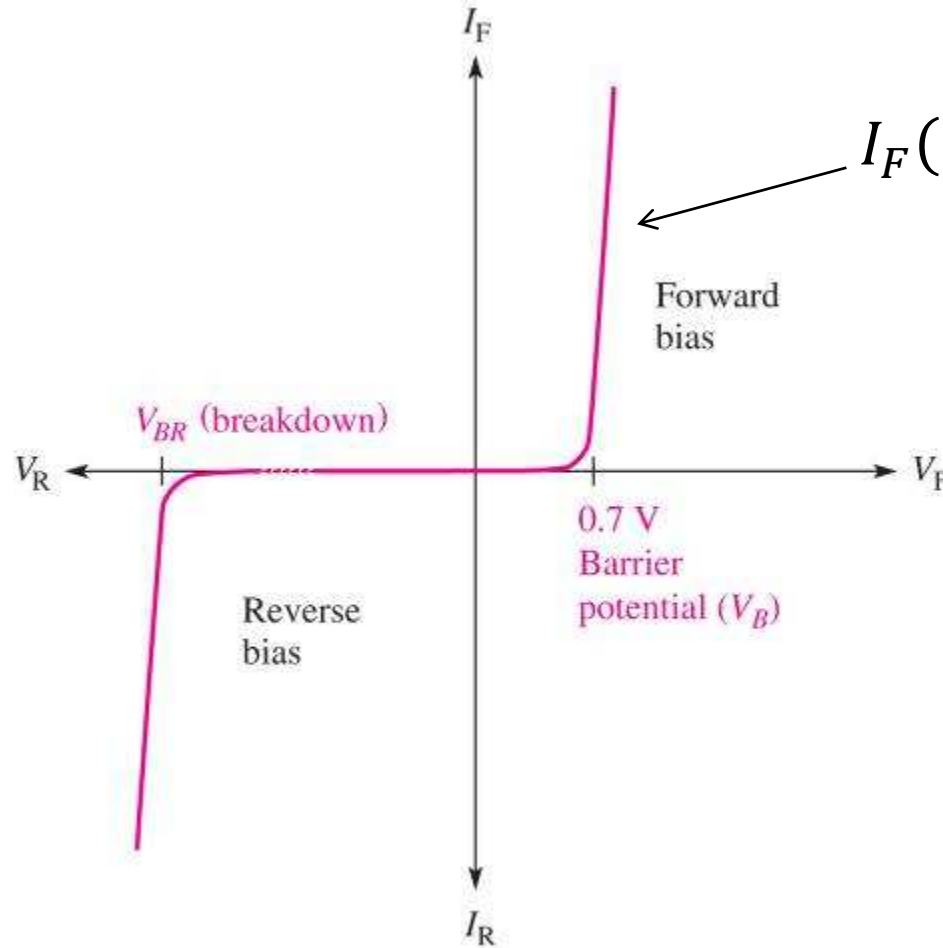
polarizada diretamente



polarizada inversamente



General diode V-/I characteristic curve.



$$I_F(V_F) = I_S \left(e^{\frac{V_F}{nV_T}} - 1 \right)$$

$$V_T = \frac{k_B T}{q_e}$$

$$T = 300 \text{ K}$$

$$V_T = 26 \text{ mV}$$

$$n \sim 1.5 - 2$$

F: forward; R: reverse
D: diode/direct “D=F”

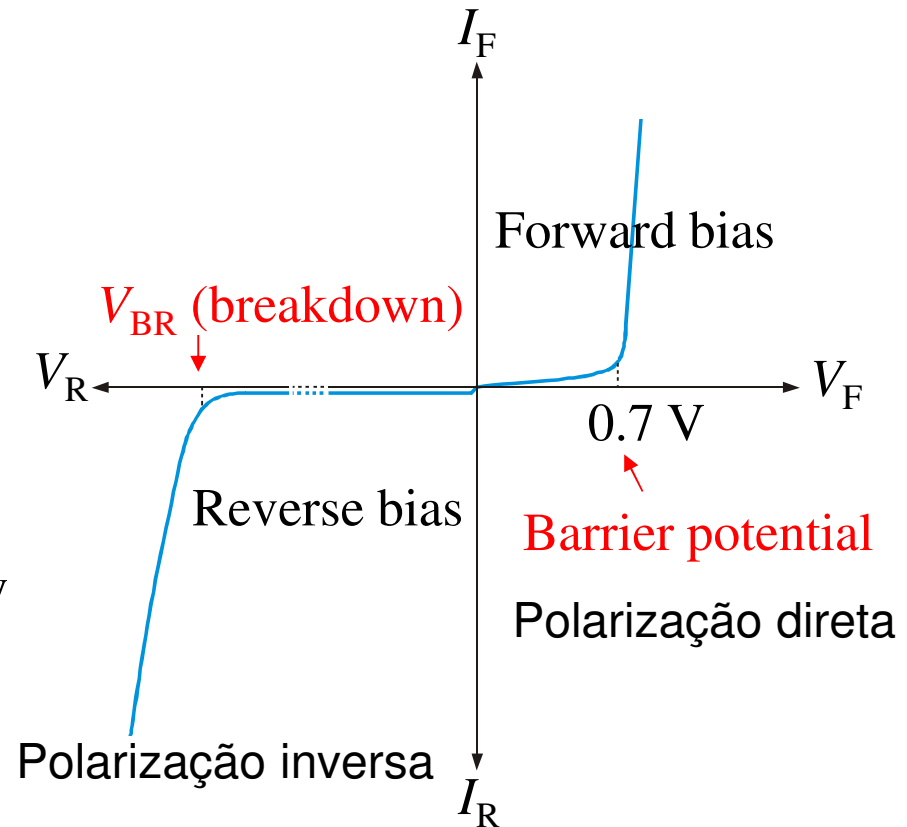
$$I_D(V_D) = I_S \left(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right)$$

Característica corrente-tensão de um diodo de junção pn

The forward and reverse characteristics are shown on a V - I characteristic curve.

In the forward bias region, current increases dramatically after the barrier potential (0.7 V for Si) is reached. The voltage across the diode remains approximately equal to the barrier potential.

The reverse-biased diode effectively acts as an insulator until breakdown is reached.

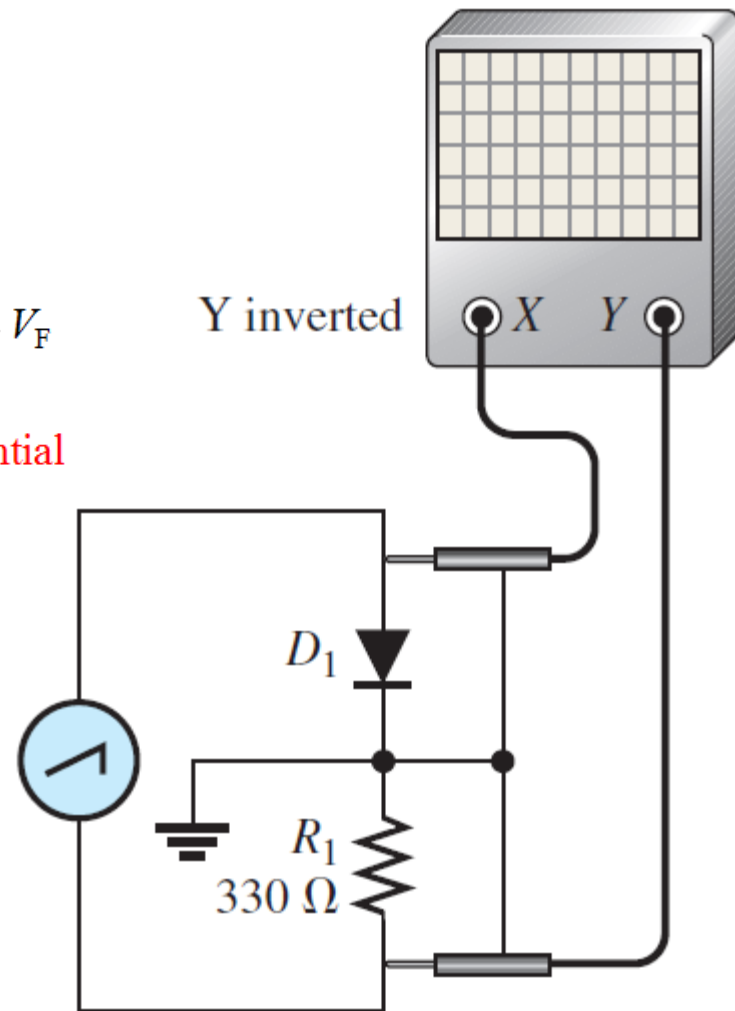
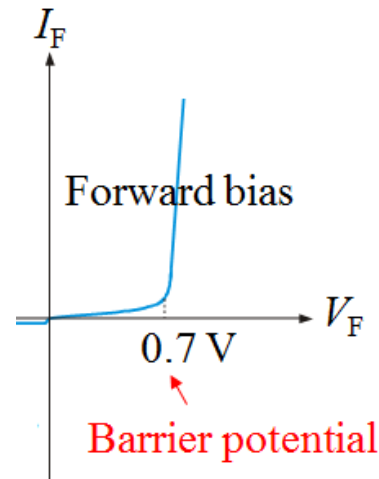


Traçar/visualizar a característica corrente-tensão de um diodo de junção pn usando um osciloscópio



The diode forward $V-I$ characteristic curve can be plotted on the oscilloscope using the circuit

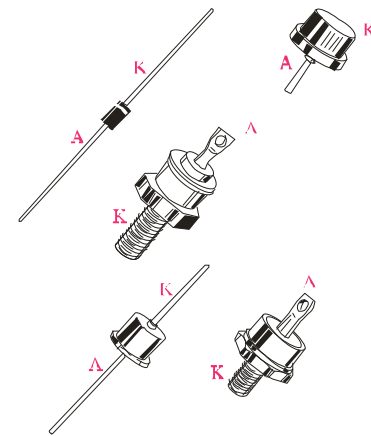
shown below. Channel 1 senses the voltage across the diode and channel 2 senses a signal that is proportional to the current. The scope must be in the X-Y mode. The signal generator provides a 5 Vpp sawtooth or triangular waveform at 50 Hz, and its ground must not be the same as the scope ground. Channel 2 (the Y channel) must be inverted for the displayed curve to be properly oriented.



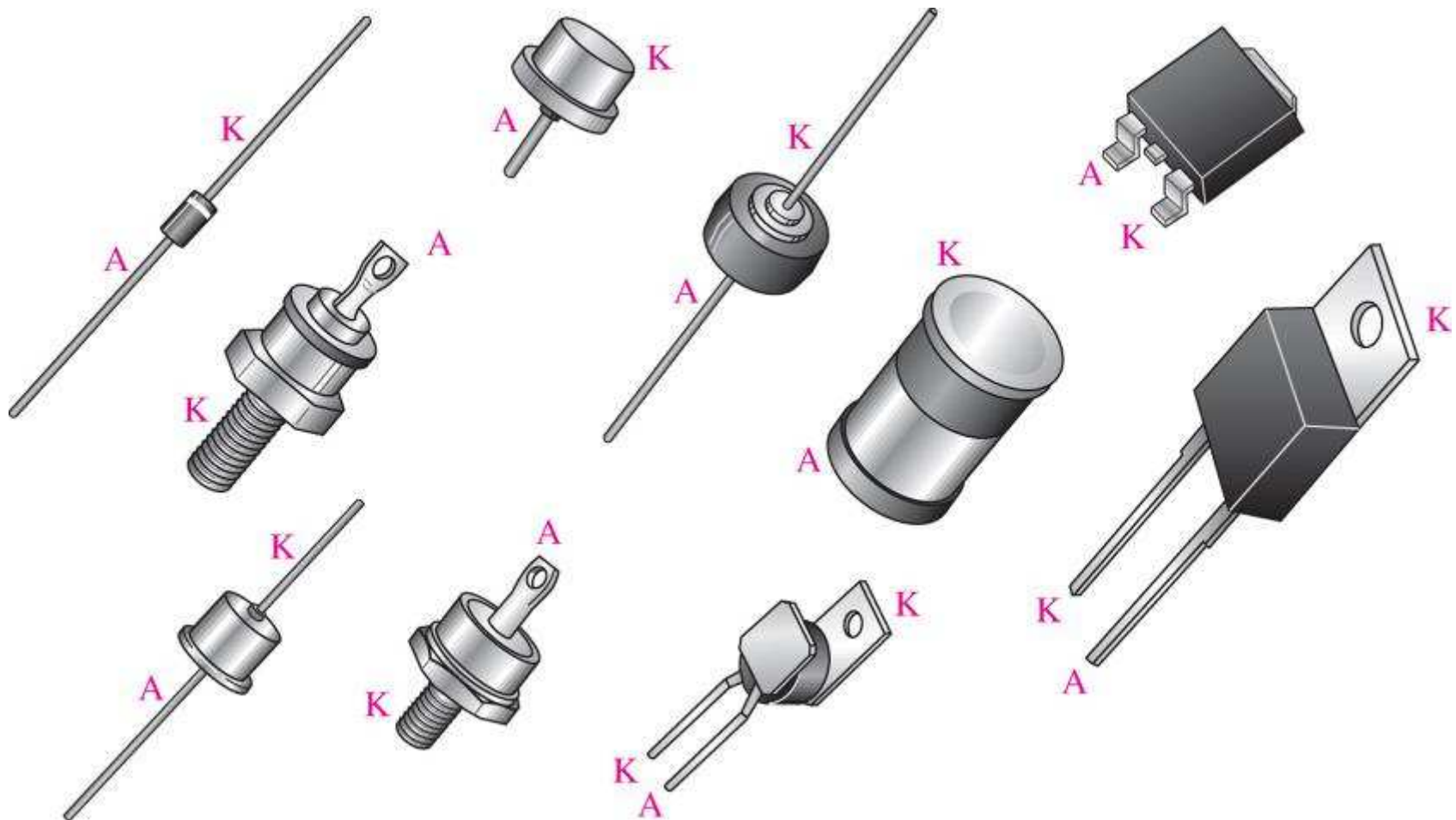
The *pn* junction diode

When a *pn* junction is formed, electrons in the *n*-material diffuse across the junction and recombine with holes in the *p*-material. This action continues until the voltage of the barrier repels further diffusion. Further diffusion across the barrier requires the application of a voltage.

The *pn* junction is basically a diode, which is a device that allows current in only one direction. A few typical diodes are shown.

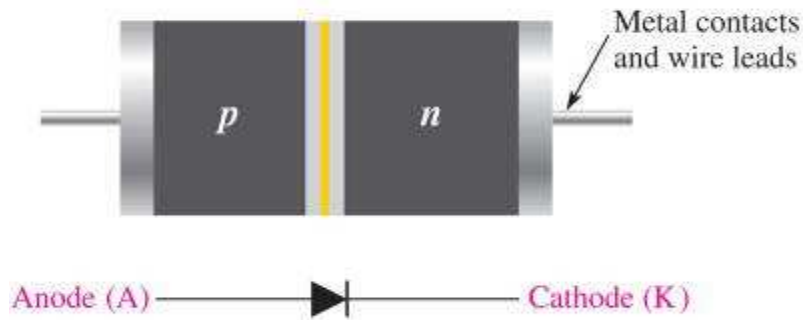


Typical diode packages and terminal identification. A is anode and K is cathode.

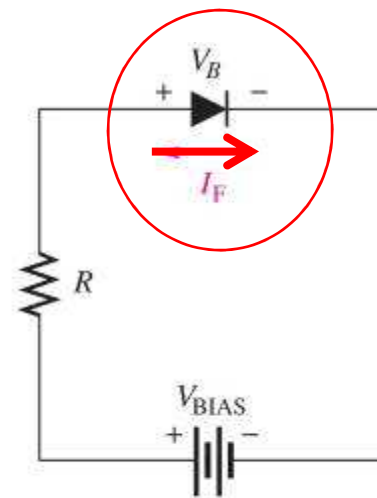


Diode structure, schematic symbol, and bias circuits.

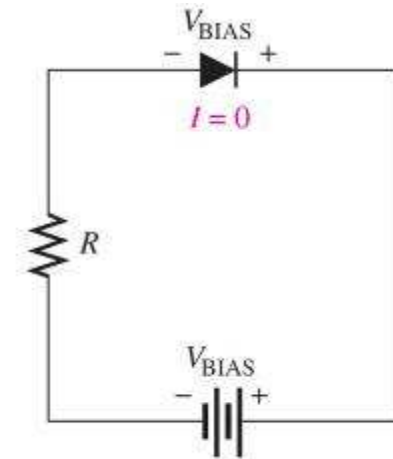
V_{BIAS} is the bias voltage, and V_B is the barrier potential.



(a) Basic diode structure and symbol



(b) Forward bias



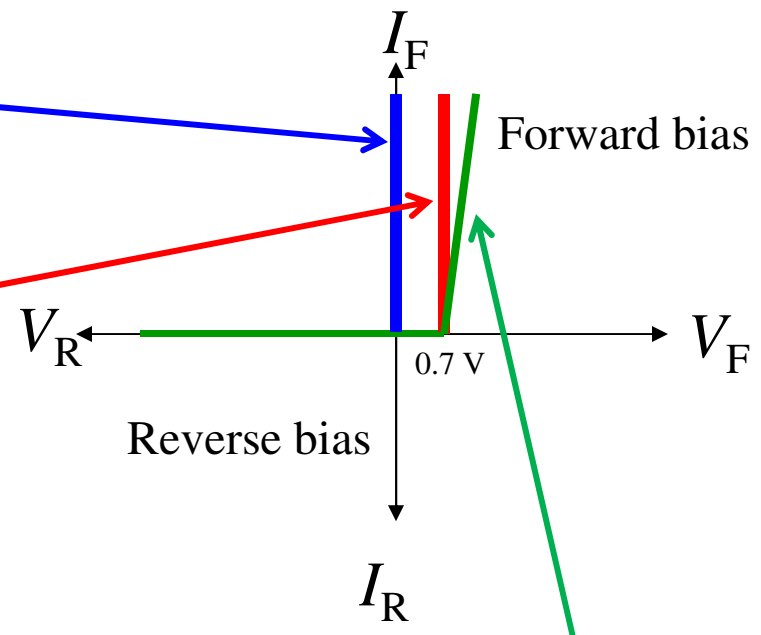
(c) Reverse bias

Modelos da característica I-V de díodos de junção pn

The characteristic curve for a diode can be approximated by various models of diode behavior. The model you will use depends on your requirements.

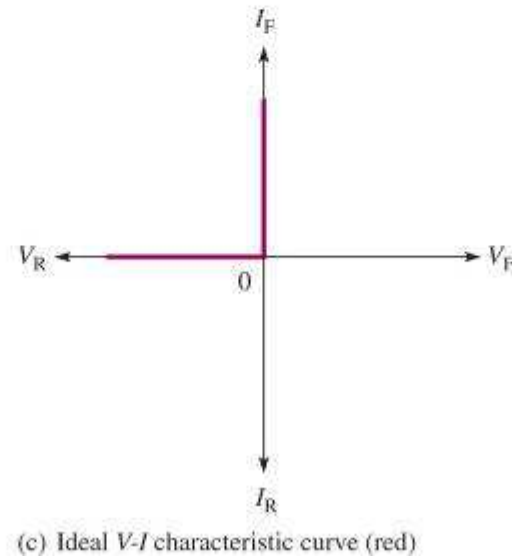
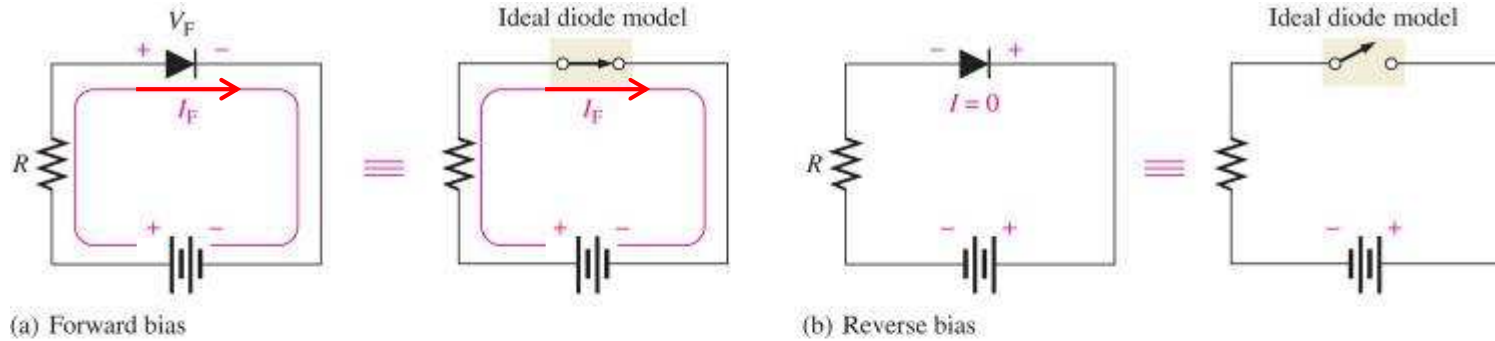
The ideal model assumes the diode is either an open or closed switch (traço azul).

The practical model includes the barrier voltage in the approximation (traço a vermelho).

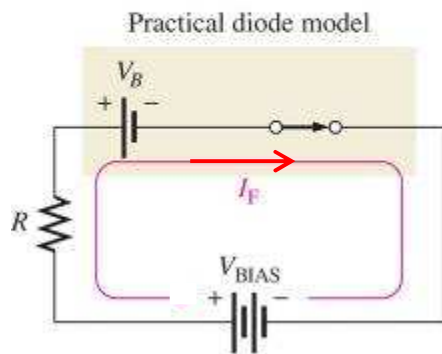


The complete model includes the forward resistance of the diode (traço verde).

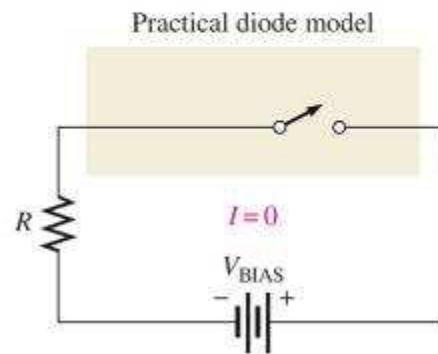
Ideal model of the diode as a switch.



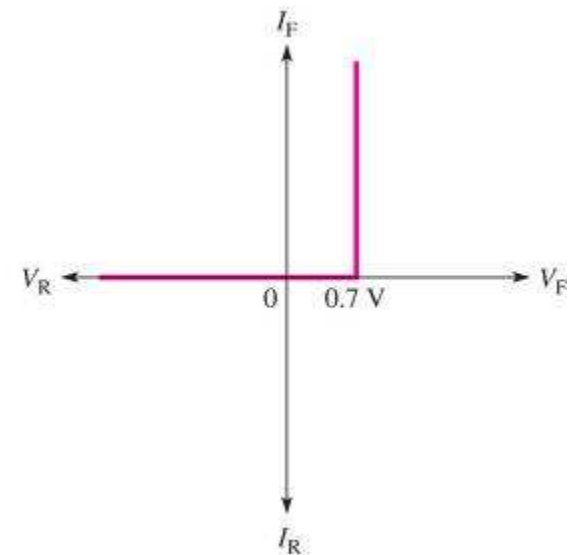
The practical model of a diode.



(a) Forward bias

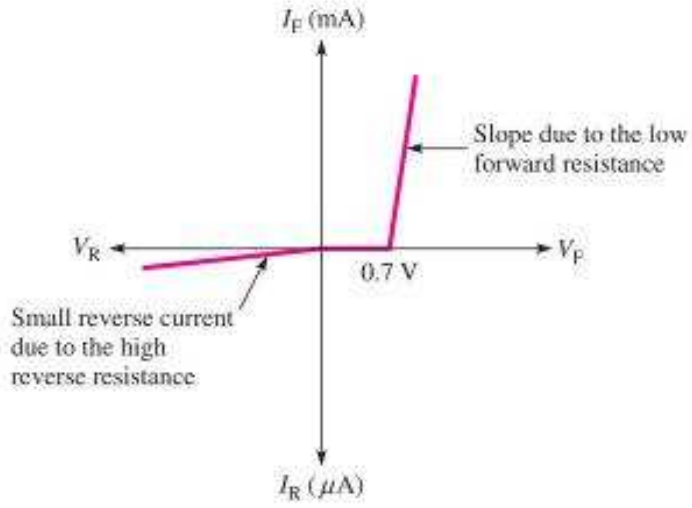
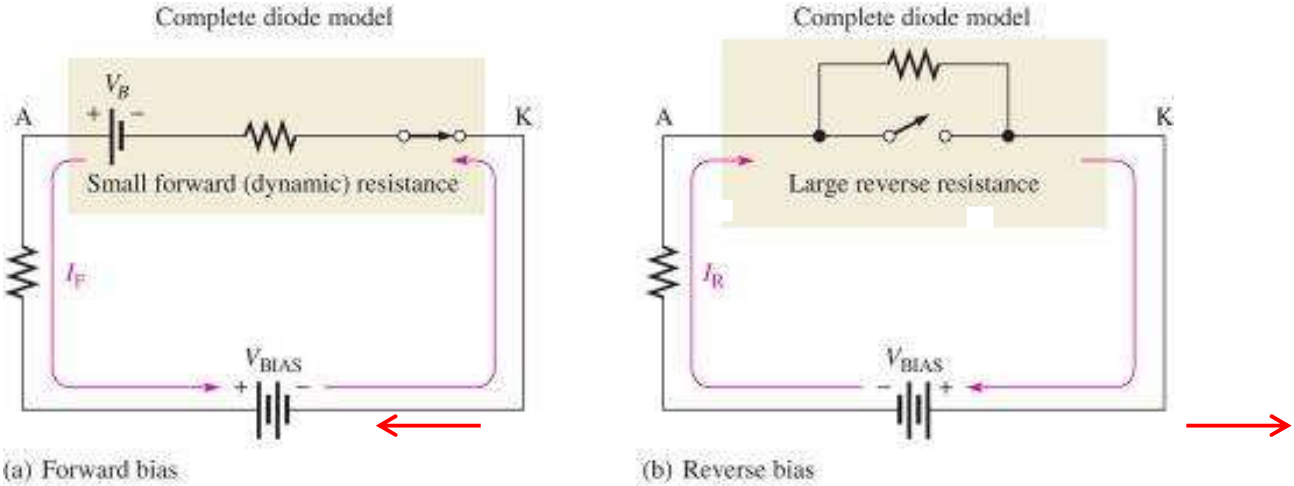


(b) Reverse bias



(c) V - I characteristic curve

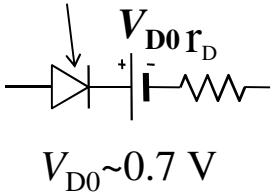
The complete diode model includes barrier potential, forward resistance, and reverse resistance.



(c) V-I characteristic curve

Modelo de pequeno sinal de um díodo

díodo ideal



$$r_D = (2k_B T / e) / I_D = (2V_T) / I_D$$

Barrier potential and dynamic resistance equivalent for a diode.

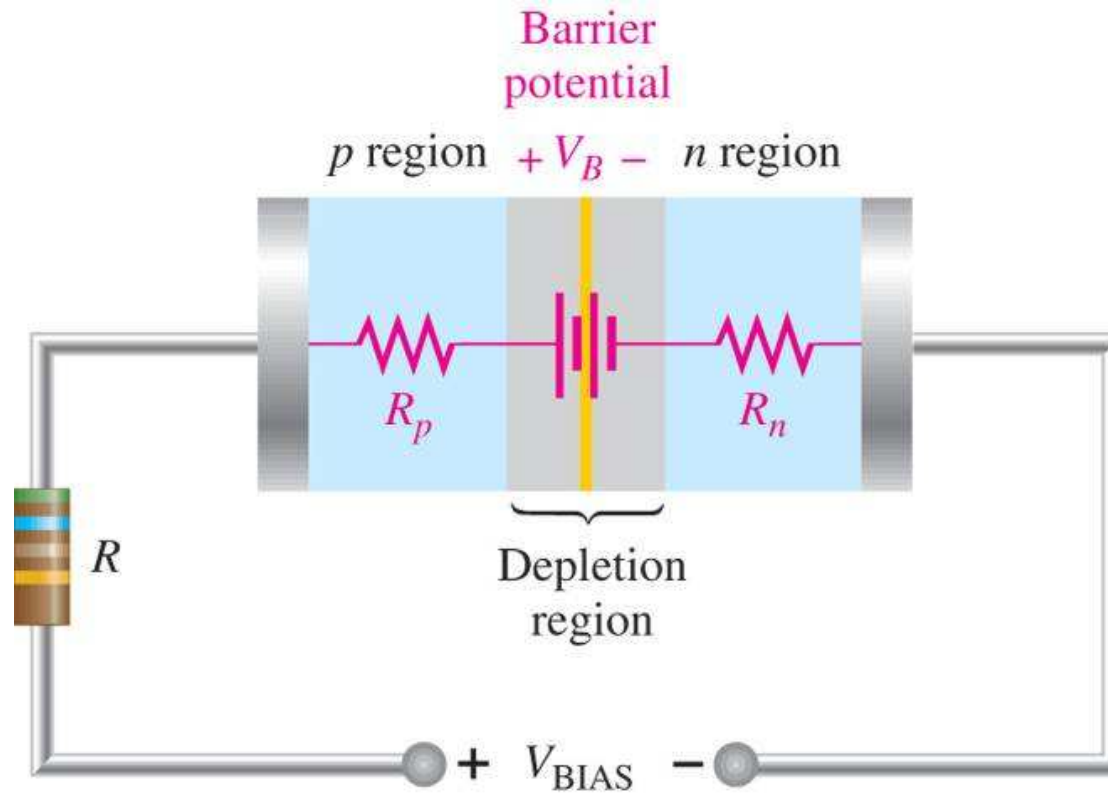
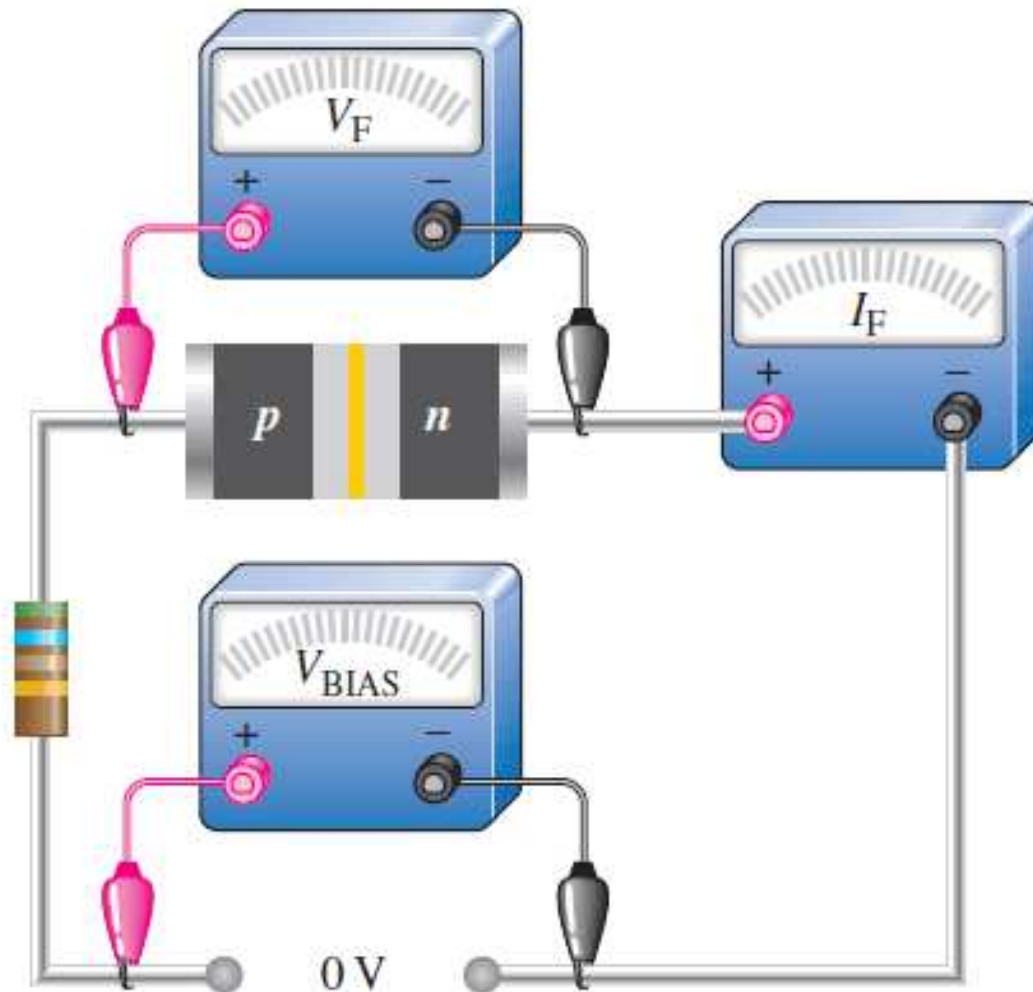
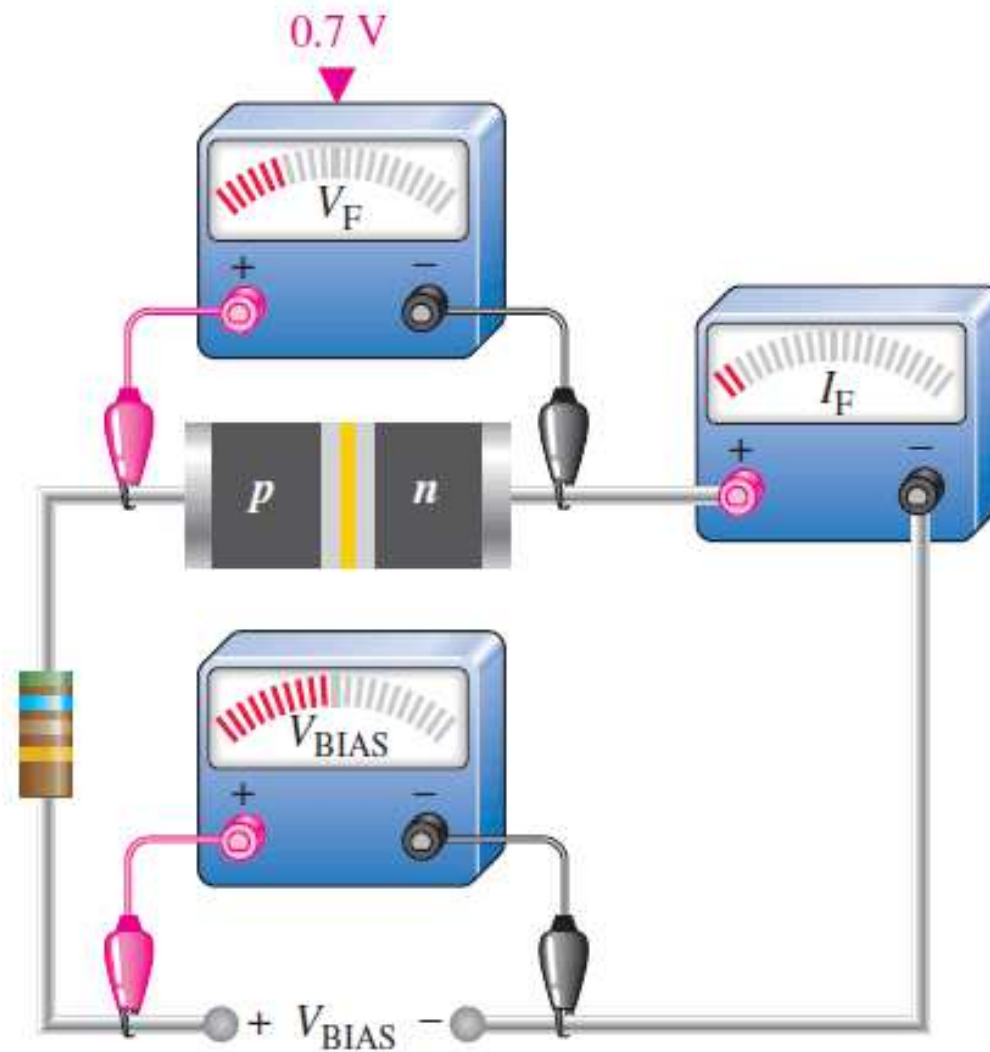


Ilustração da operação do díodo – junção não polarizada



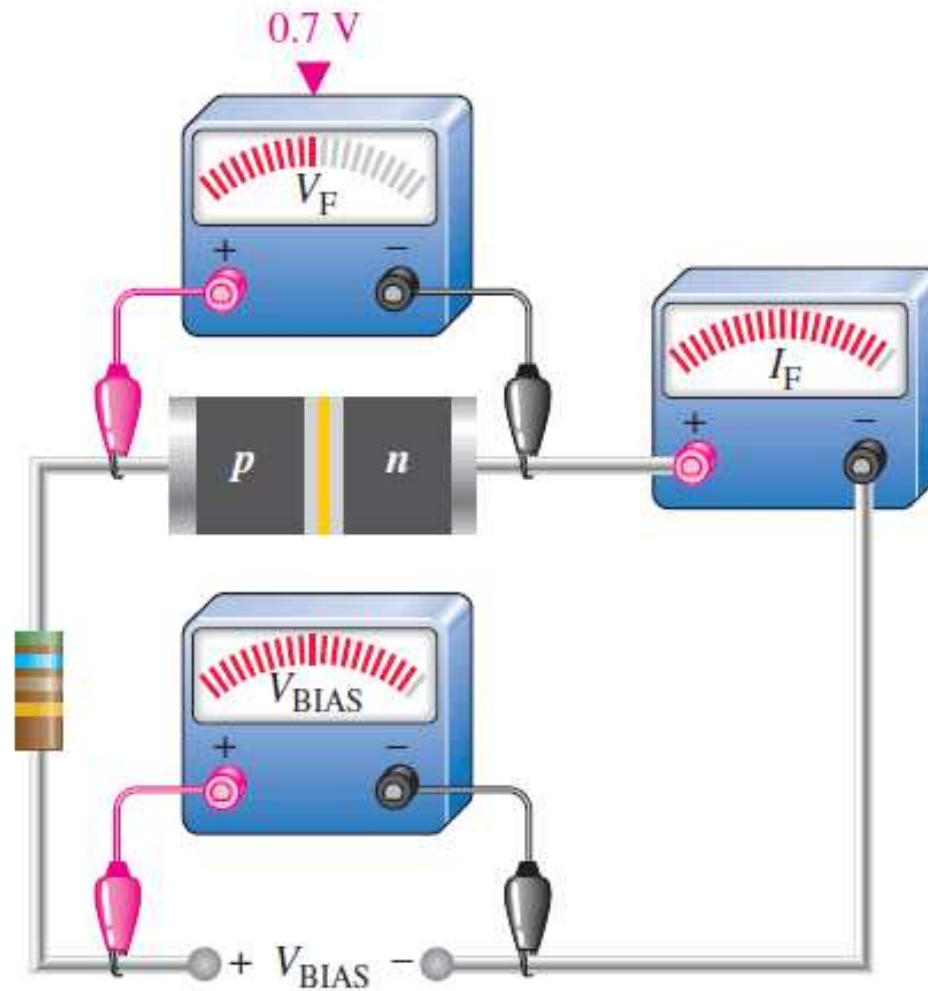
(a) No bias voltage. The pn junction of the diode is at equilibrium.

Operação do díodo: junção polarizada diretamente com $V_F < 0,7 \text{ V}$



(b) Small forward-bias voltage ($V_F < 0.7 \text{ V}$), very small forward current.

Operação do díodo: junção polarizada diretamente ($V_F=0,7\text{ V}$).



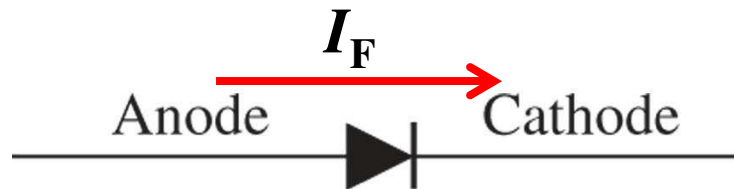
(c) Forward voltage reaches and remains at approximately 0.7 V. Forward current continues to increase as the bias voltage is increased.

Circuitos com díodos

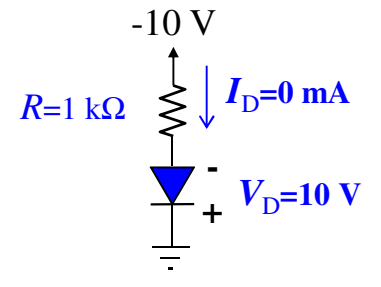
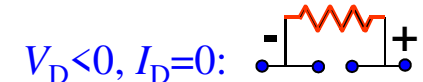
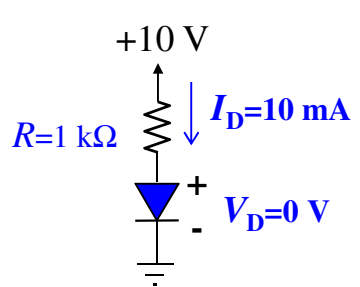
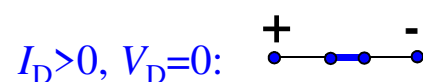
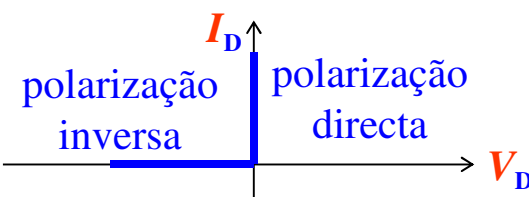
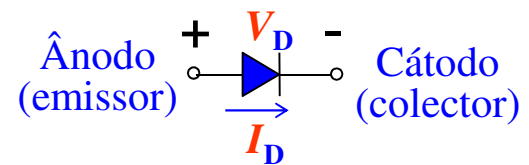
Até agora foram estudados circuitos lineares. Contudo, há várias funções que só podem ser desempenhadas por elementos/circuitos não-lineares. Os exemplos incluem a geração de uma corrente directa a partir de uma corrente alternada, bem como de outras formas de onda. Como veremos os circuitos digitais são, também, circuitos não-lineares.

O elemento não-linear mais simples e fundamental de um circuito não linear é o díodo rectificador. Tal como uma resistência, um díodo tem dois terminais. Porém, e ao contrário de uma resistência que apresenta uma relação corrente-tensão linear, o díodo apresenta uma característica I-V não-linear.

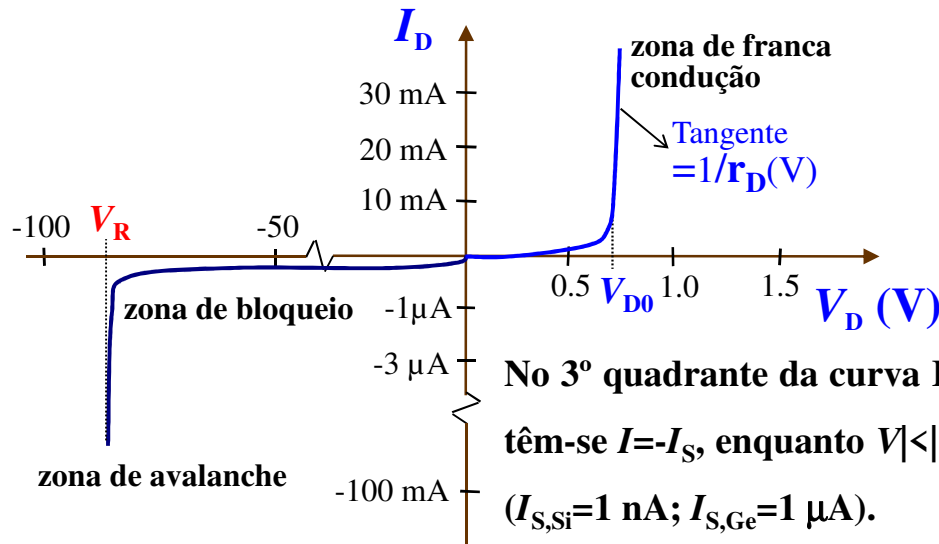
Símbolo do díodo



Díodo IDEAL



Característica Corrente-Tensão de uma Junção p-n de Si



No 3º quadrante da curva I-V, têm-se $I = -I_S$, enquanto $V < |V_R|$ ($I_{S,Si} = 1 \text{ nA}$; $I_{S,Ge} = 1 \text{ } \mu\text{A}$).

A curva característica típica de um diodo de junção p-n apresenta três regiões distintas:

- região de polarização directa ($V > 0$)
- região de polarização inversa ($V < 0$)
- região de ruptura ou avalanche ($V \leq -V_R$)

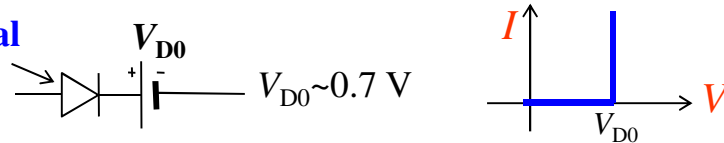
V_R : Tensão de ruptura

No 1º quadrante da característica I-V, a corrente é dada, aproximadamente, por:

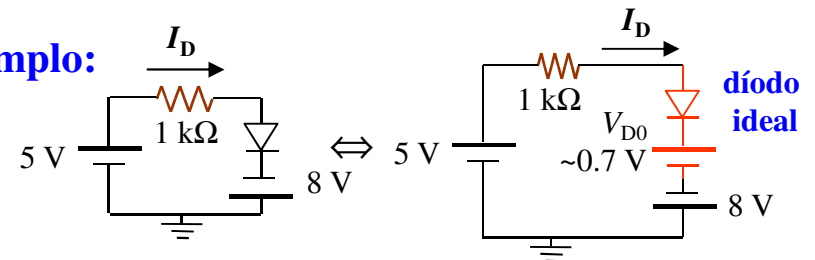
$$I(V) \cong I_S \left[\exp\left(\frac{eV}{2k_B T}\right) - 1 \right], \text{ com } I_S \propto \exp\left(-\frac{eV_{D0}}{2k_B T}\right)$$

Modelo aproximado de um diodo de junção p-n

díodo ideal



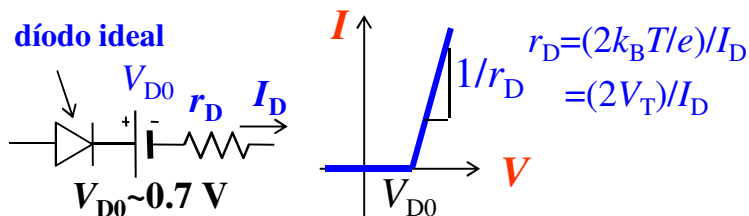
Exemplo:



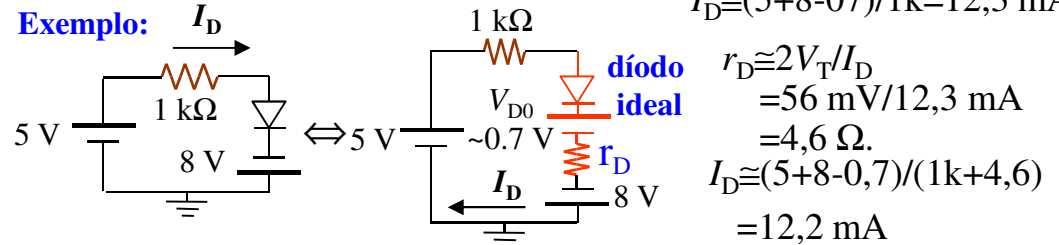
$$I_D \cong (5 + 8 - 0.7) / 1k = 12,3 \text{ mA}$$

Modelo de pequeno sinal de um diodo de junção p-n

díodo ideal



Exemplo:

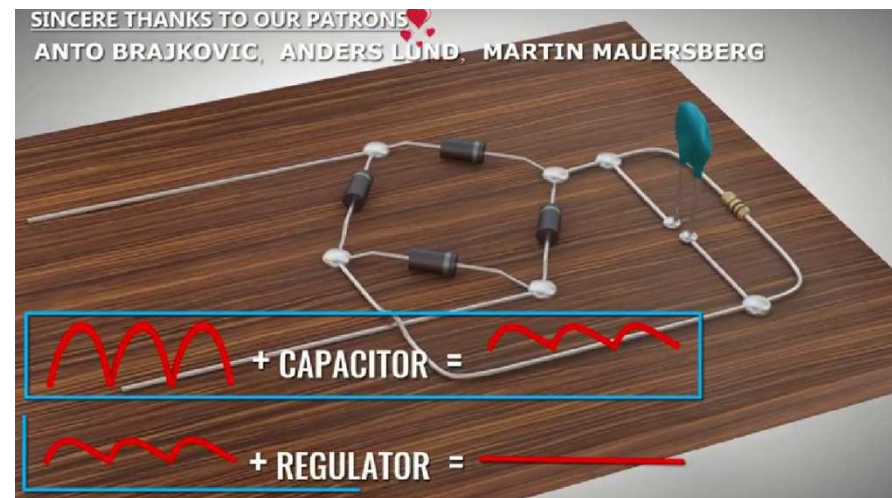
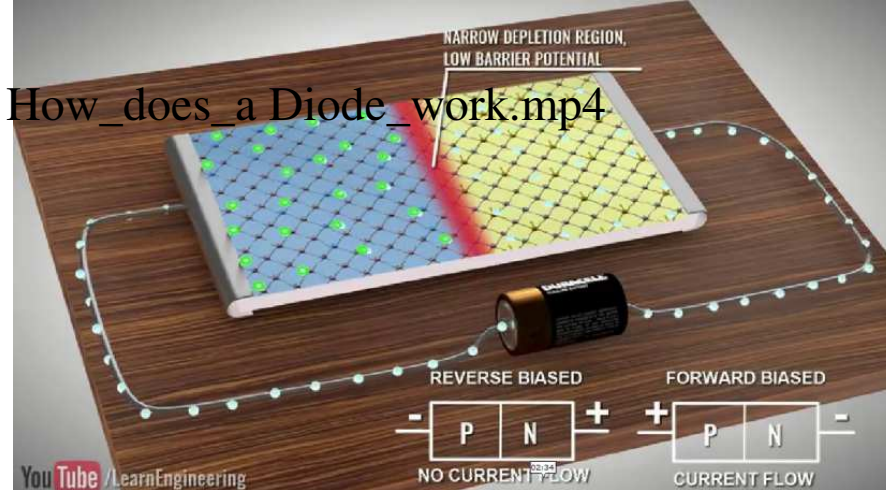
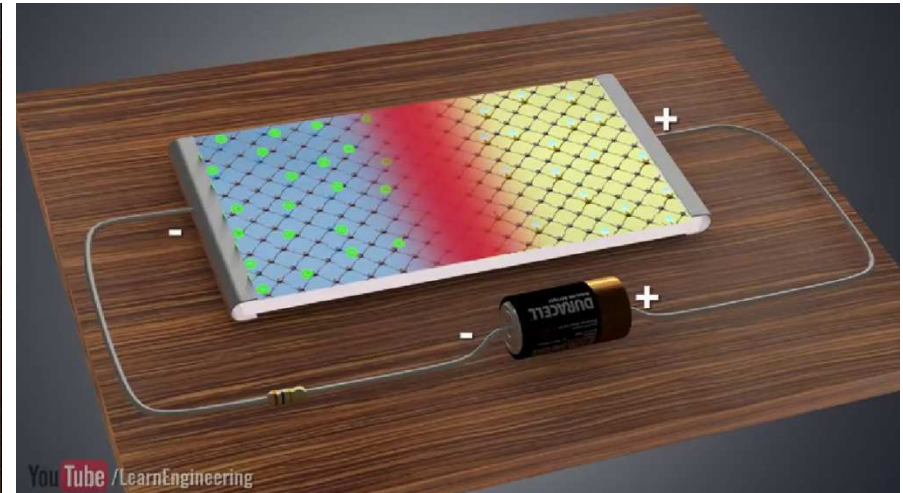
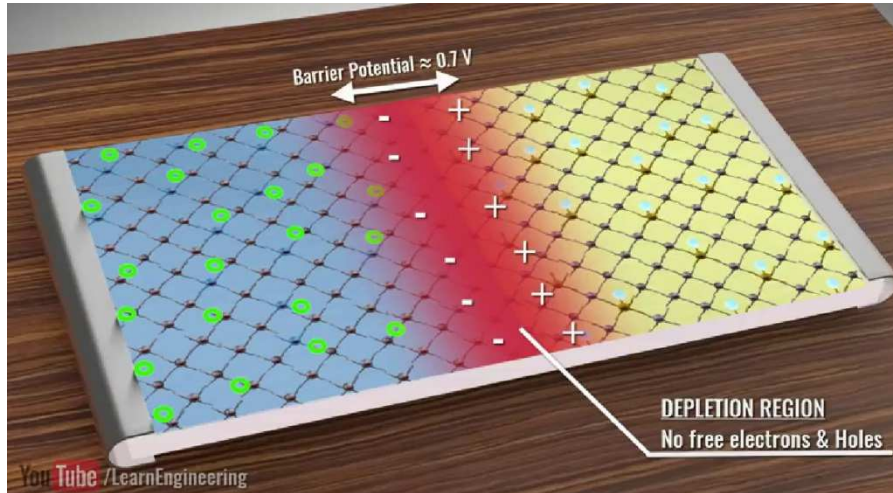


$$r_D \cong 2V_T / I_D = 56 \text{ mV} / 12,3 \text{ mA} = 4,6 \Omega$$

$$I_D \cong (5 + 8 - 0,7) / (1k + 4,6) = 12,2 \text{ mA}$$

No que se segue, admite-se que, quando em condução, o diodo apresenta aos seus terminais uma queda de tensão constante e igual a 0,7 V, podendo ou não ter-se em conta a sua resistência dinâmica.

Como é que o díodo funciona?



<https://www.youtube.com/watch?v=JNi6WY7WKAI>

http://webpages.ciencias.ulisboa.pt/~jmfigueiredo/aulas/How_does_a%20Diode_work.mp4

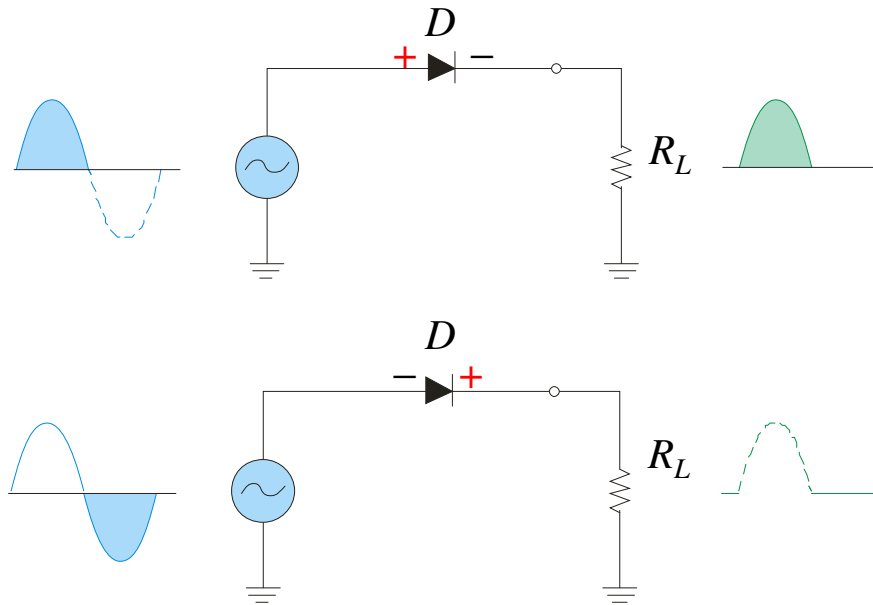
Retificação de meia onda

Half-wave Rectifier

Rectifiers are circuits that convert ac to dc. Special diodes, called rectifier diodes, are designed to handle the higher current requirements in these circuits.

The half-wave rectifier converts ac to pulsating dc by acting as a closed switch during the positive alteration.

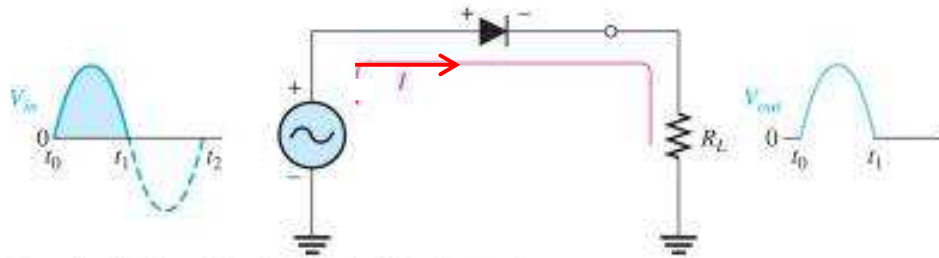
The diode acts as an open switch during the negative alteration.



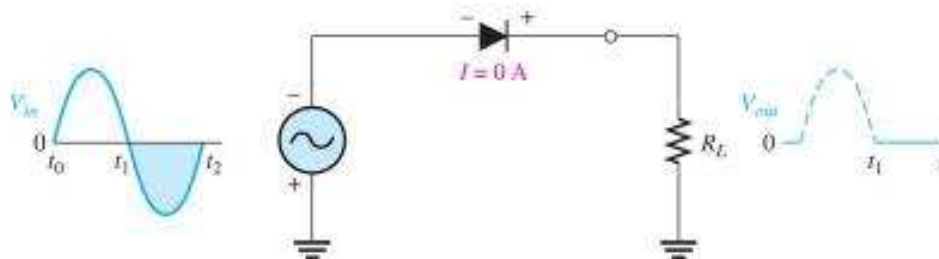
Operation of a half-wave rectifier.



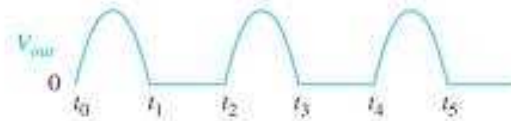
(a) Half-wave rectifier circuit



(b) Operation during positive alternation of the input voltage.



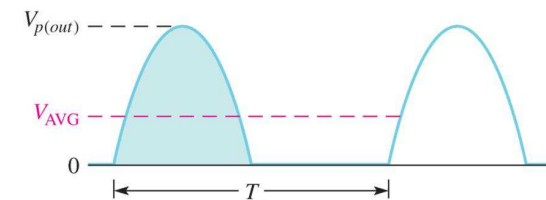
(c) Operation during negative alternation of the input voltage



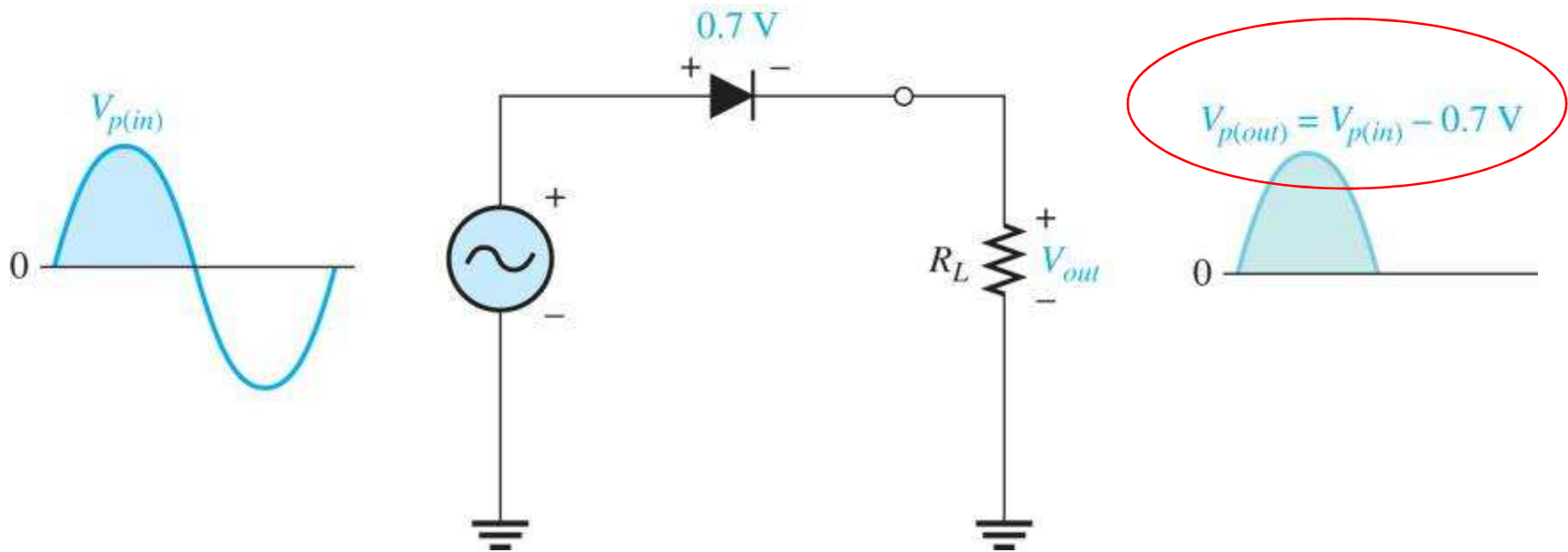
(d) Half-wave output voltage for three input cycles

Average value of the half-wave rectified signal.

$$V_{AVG} = \frac{V_{p(out)}}{\pi}$$

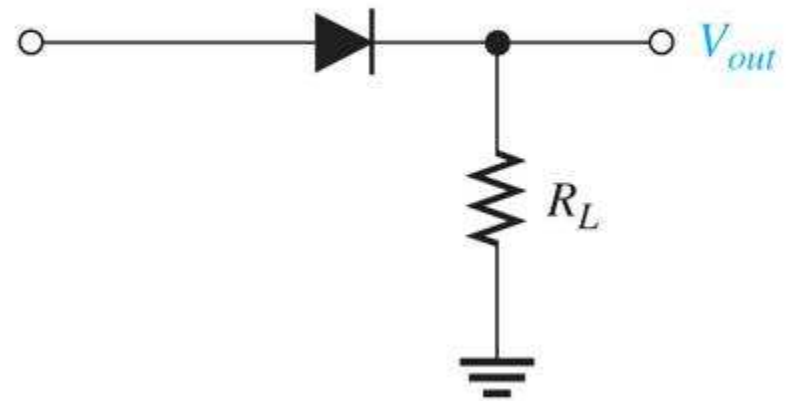
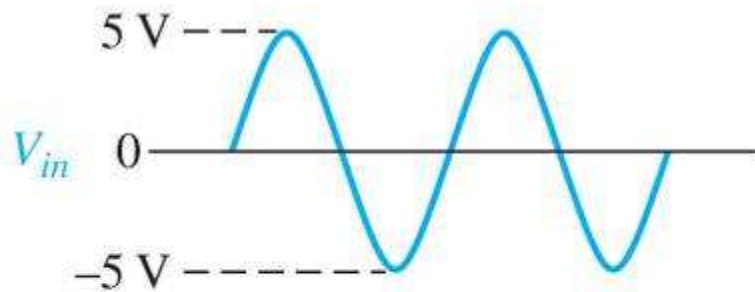


Effect of barrier potential on half-wave rectified output voltage.



$$V_{p(out)} = V_{p(in)} - 0.7\text{ V}$$

Exemplo



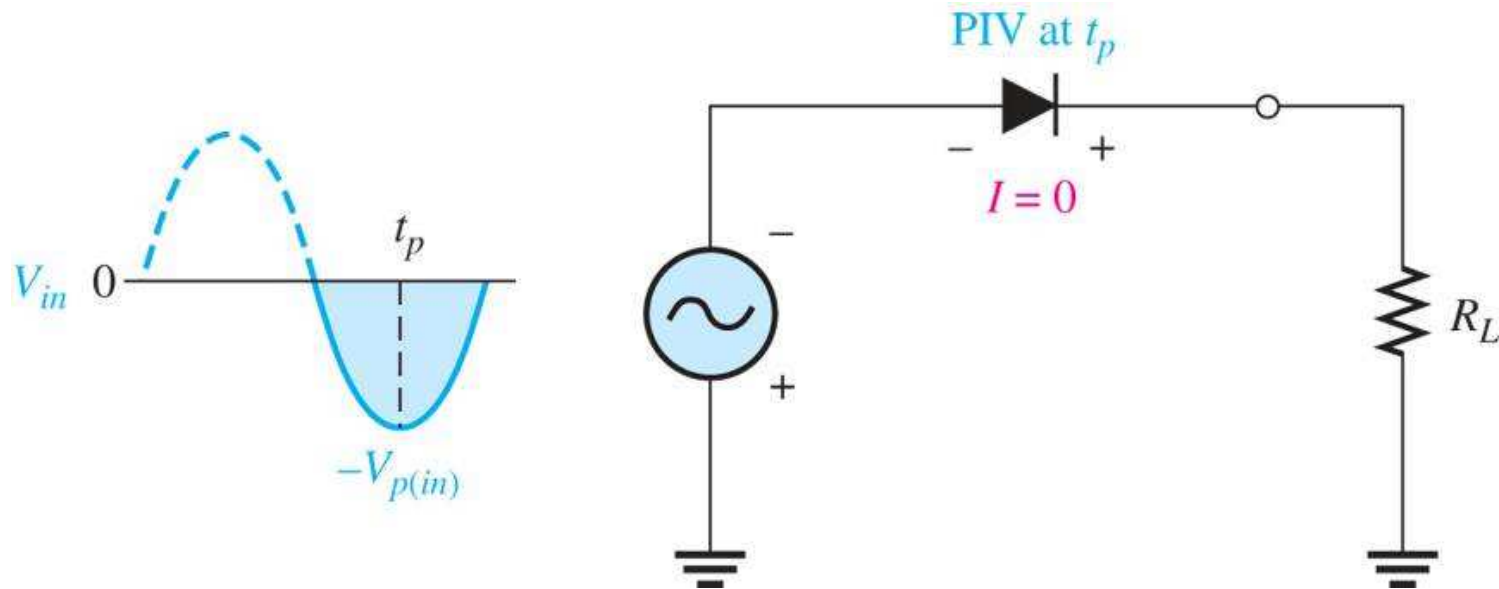
$$V_{p(out)} = V_{p(in)} - 0.7 \text{ V} = 5 \text{ V} - 0.7 \text{ V} = 4.3 \text{ V}$$

$$V_{AVG} = \frac{V_{p(out)}}{\pi} = \frac{4.3 \text{ V}}{\pi} = 1.37 \text{ V}$$

Tensão inversa de pico

Peak inverse voltage

The PIV occurs at the peak of each half-cycle of the input voltage when the diode is reverse-biased. In this circuit, the PIV occurs at the time (t_p) of the peak of each negative half-cycle.

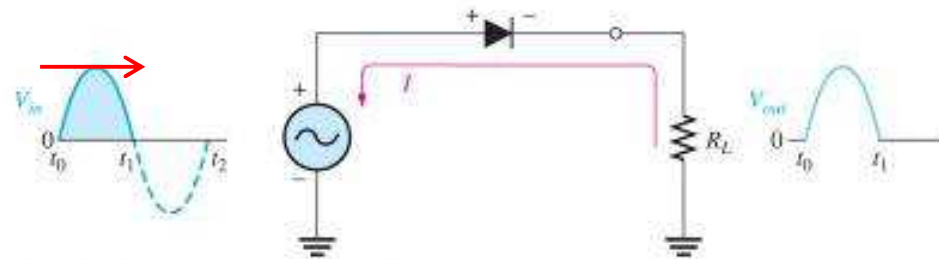


Detetor de pico

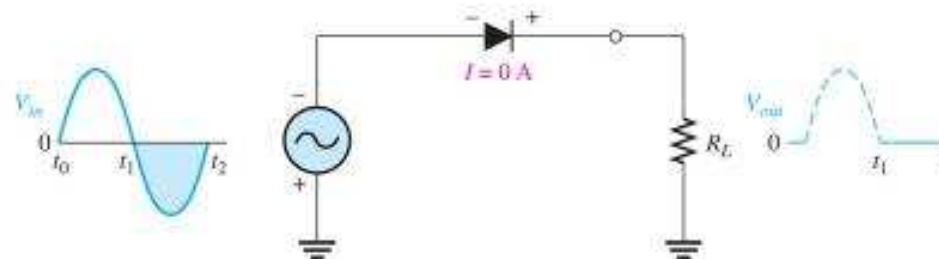
Operation of a half-wave rectifier



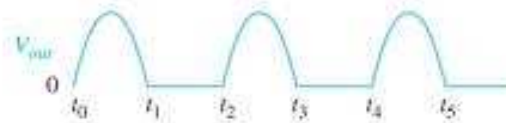
(a) Half-wave rectifier circuit



(b) Operation during positive alternation of the input voltage

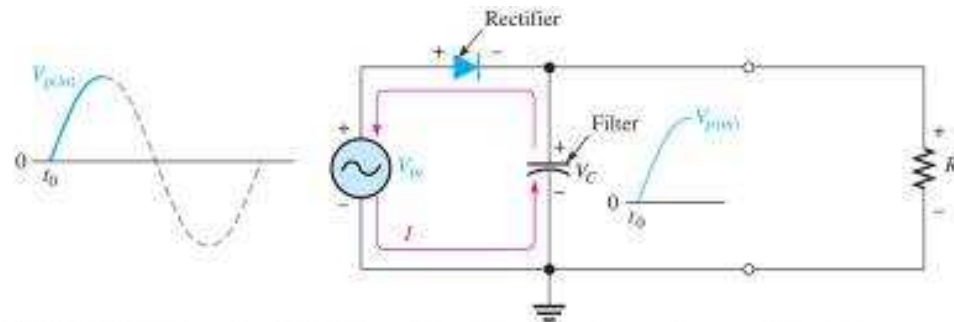


(c) Operation during negative alternation of the input voltage

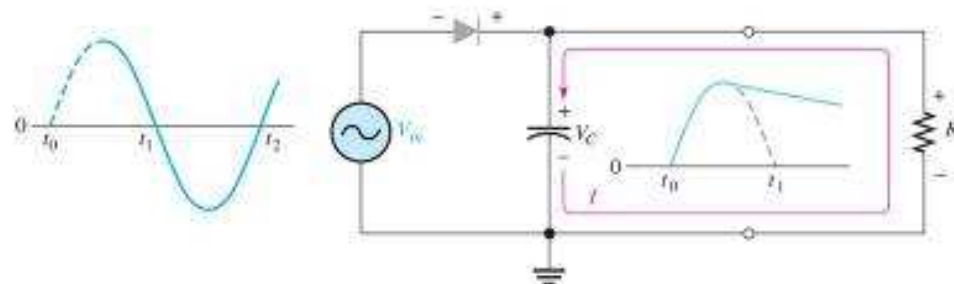


(d) Half-wave output voltage for three input cycles

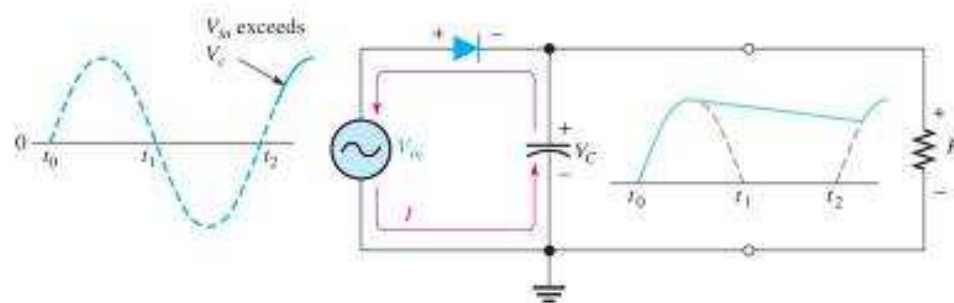
Operation of a half-wave rectifier with a capacitor-input filter



(a) Initial charging of capacitor (diode is forward-biased) happens only once when power is turned on.



(b) The capacitor discharges through R_L after peak of positive alternation when the diode is reverse-biased. This discharging occurs during the portion of the input voltage indicated by the solid dark blue curve.

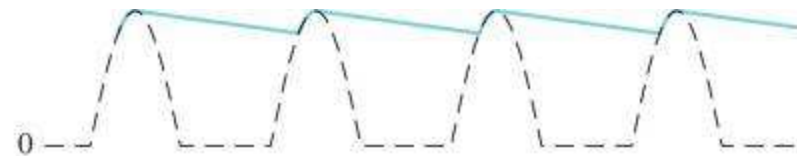


(c) The capacitor charges back to peak of input when the diode becomes forward-biased. This charging occurs during the portion of the input voltage indicated by the solid dark blue curve.

Half-wave ripple voltage

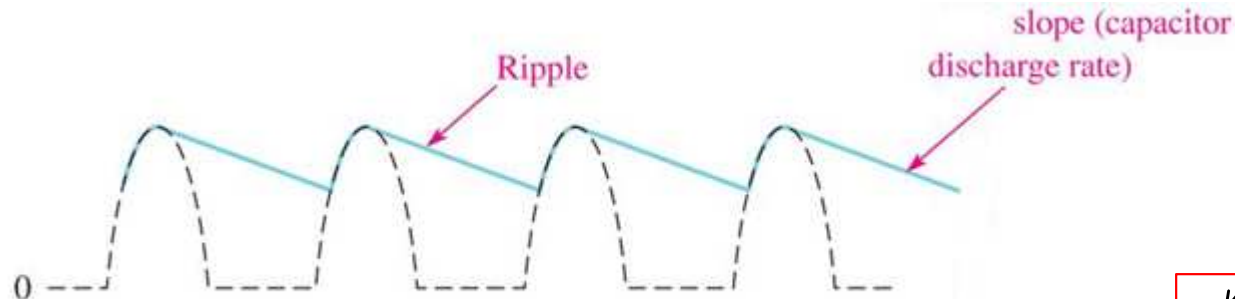


(a) Greater ripple means less effective filtering.



(b) Smaller ripple means more effective filtering.

A good rule of thumb for effective filtering is to make $R_L C \geq 10T$, where T is the period of the rectified voltage.

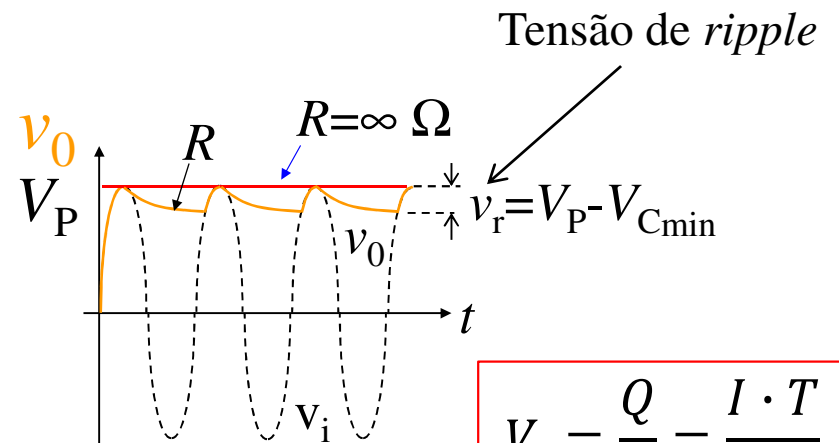
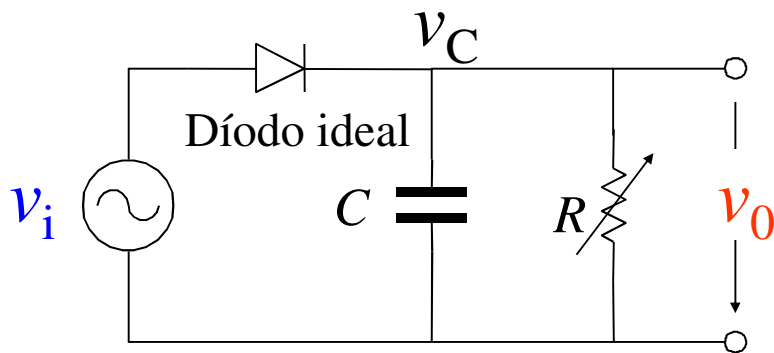
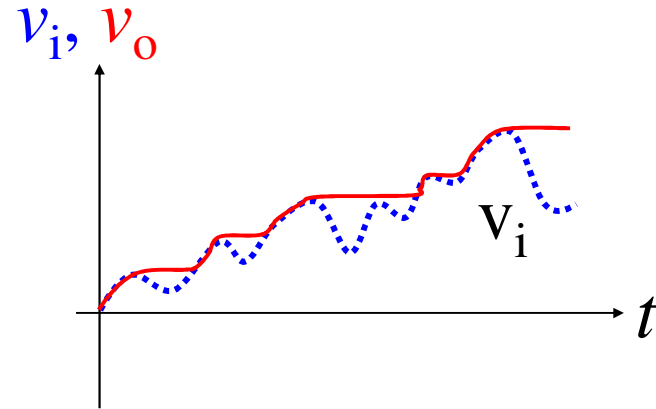
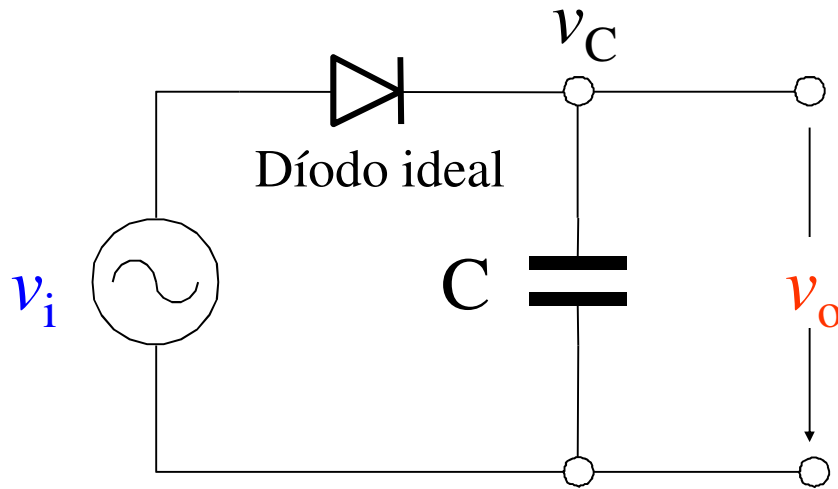


(a) Half-wave

Tensão de *ripple*

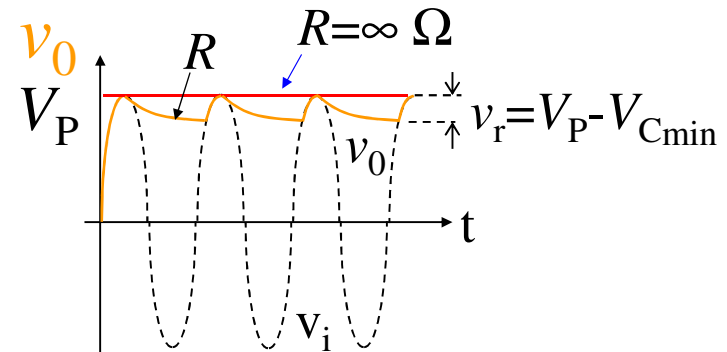
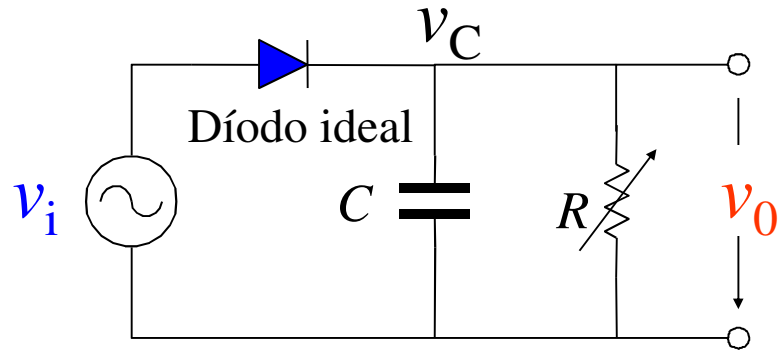
$$V_r = \frac{Q}{C} = \frac{I \cdot T}{C}$$

Circuito Detetor de Pico



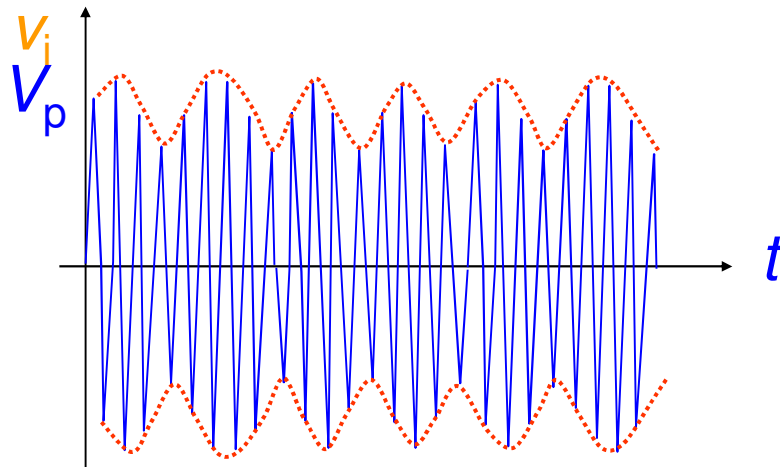
$$V_r = \frac{Q}{C} = \frac{I \cdot T}{C}$$

Retificação com Filtragem – Desmodulador

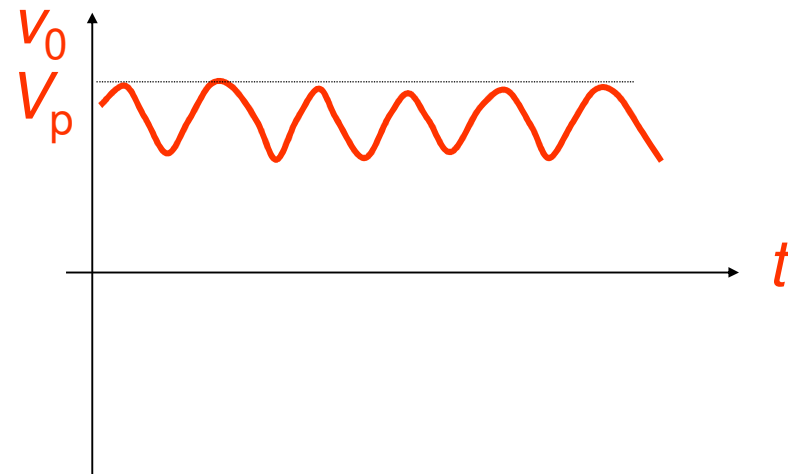


Desmodulador (detetor da envolvente)

Onda sinusoidal de alta frequência modulada por um sinal de áudio

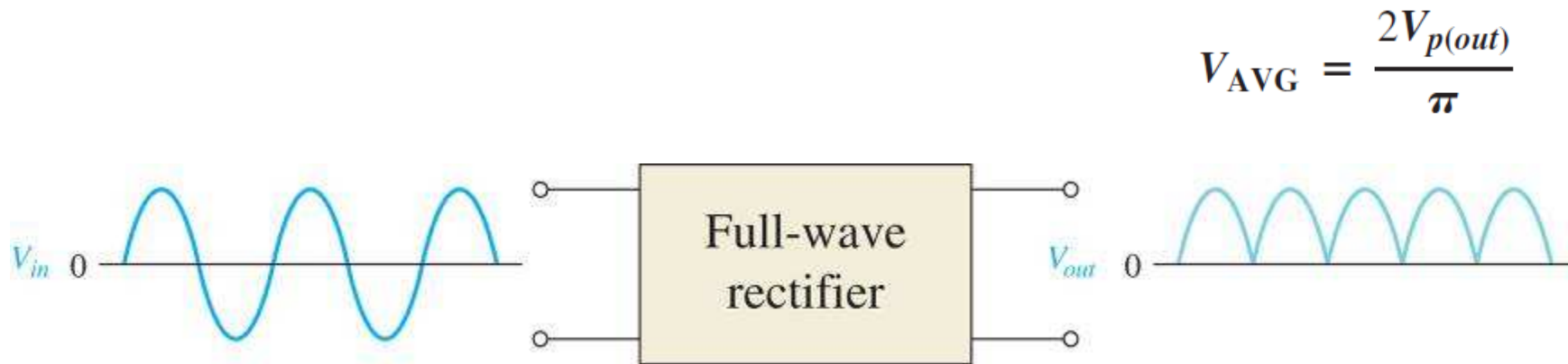


Sinal de áudio à saída do detetor de pico



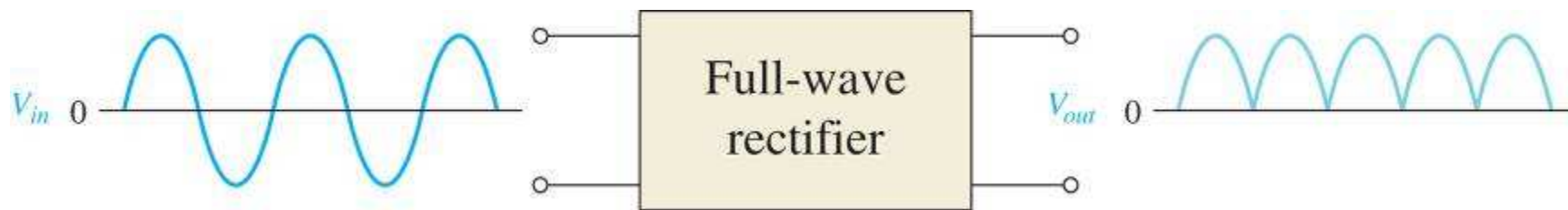
Retificação de onda completa

Full-wave rectification.

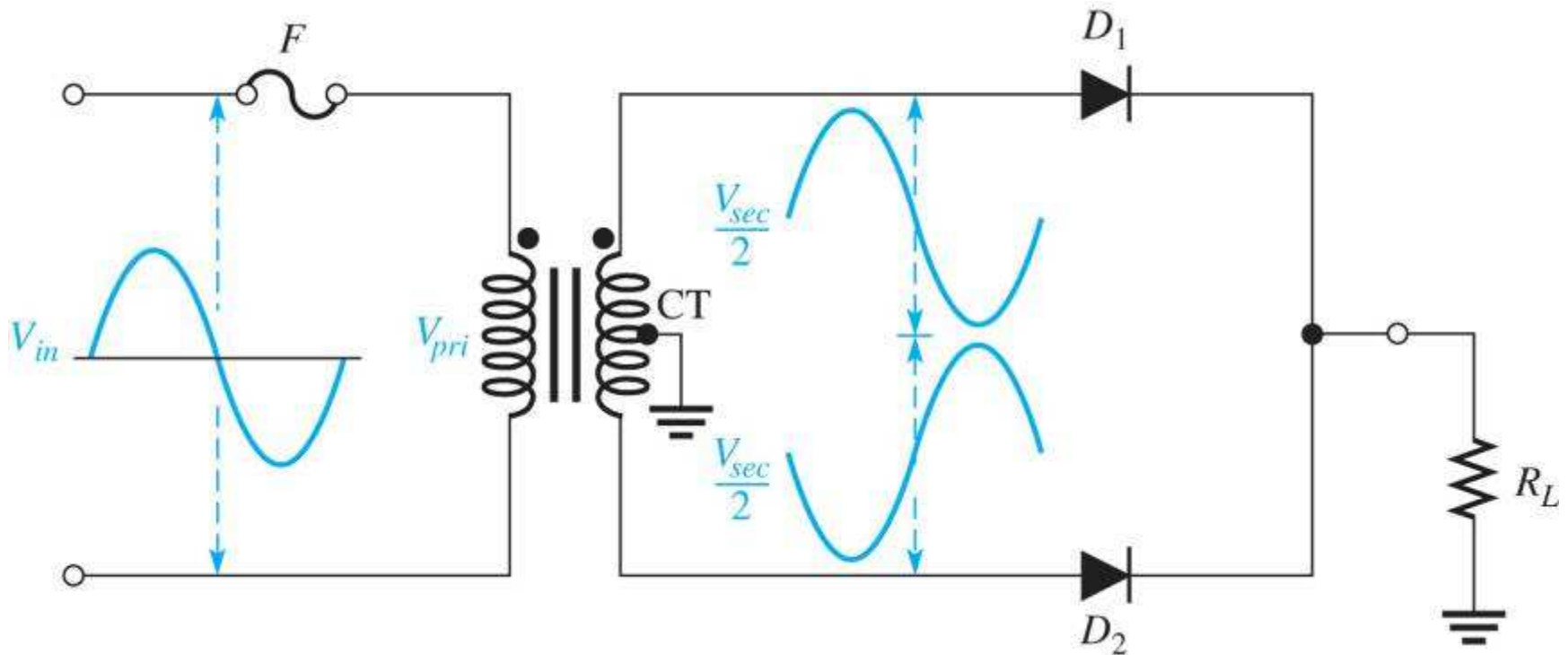


$$V_{AVG} = \frac{2V_{p(out)}}{\pi}$$

Full-wave rectification.



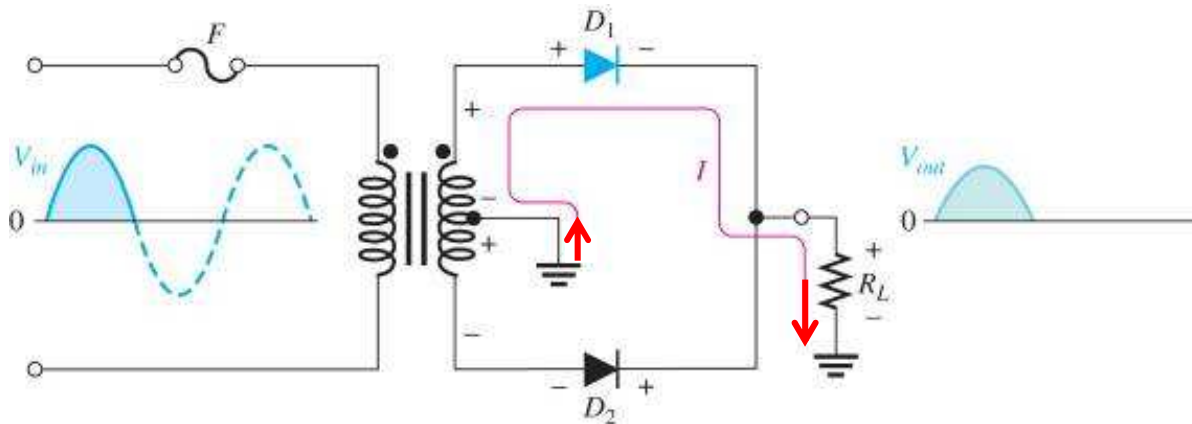
Rectifier



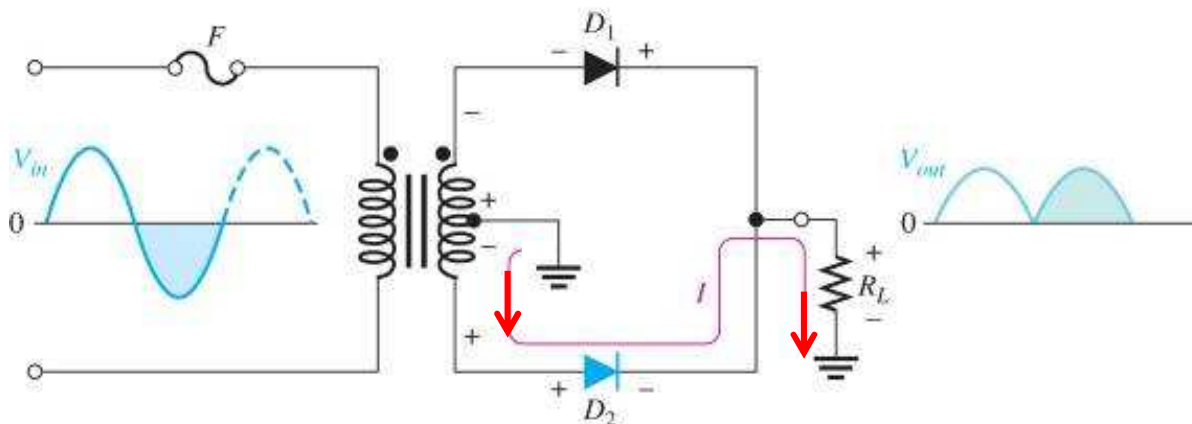
$$V_{pri} = V_{in}$$

$$V_{p(out)} = \frac{nV_{p(in)}}{2}$$

Basic operation of a center-tapped full-wave rectifier. Note that the current through the load resistor is in the same direction during the entire input cycle.



(a) During positive half-cycles, D_1 is forward-biased and D_2 is reverse-biased.

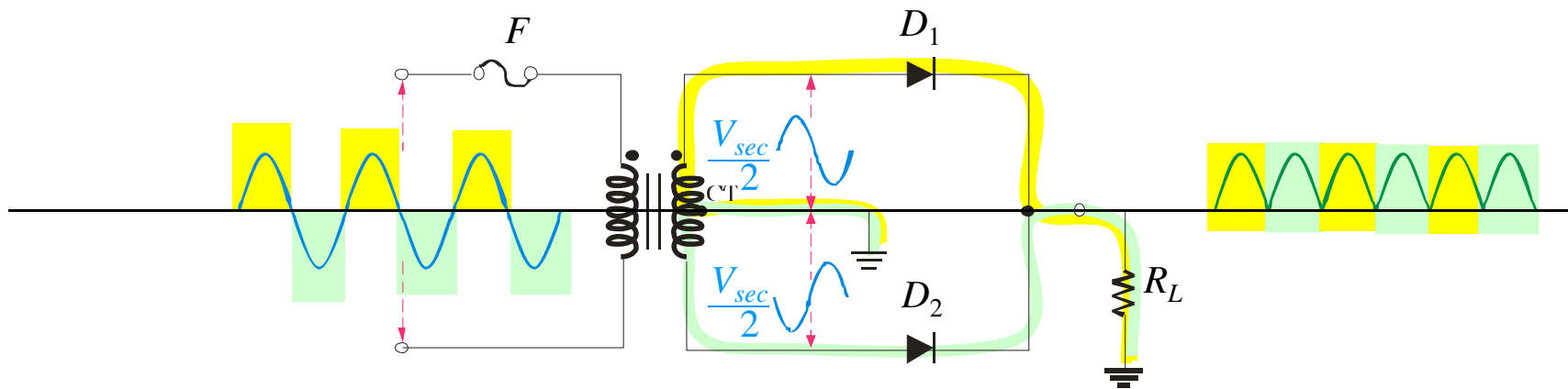


(b) During negative half-cycles, D_2 is forward-biased and D_1 is reverse-biased.

Full-wave Rectifier

The full-wave rectifier allows unidirectional current on both alterations of the input. The center-tapped full-wave rectifier uses two diodes and a center-tapped transformer.

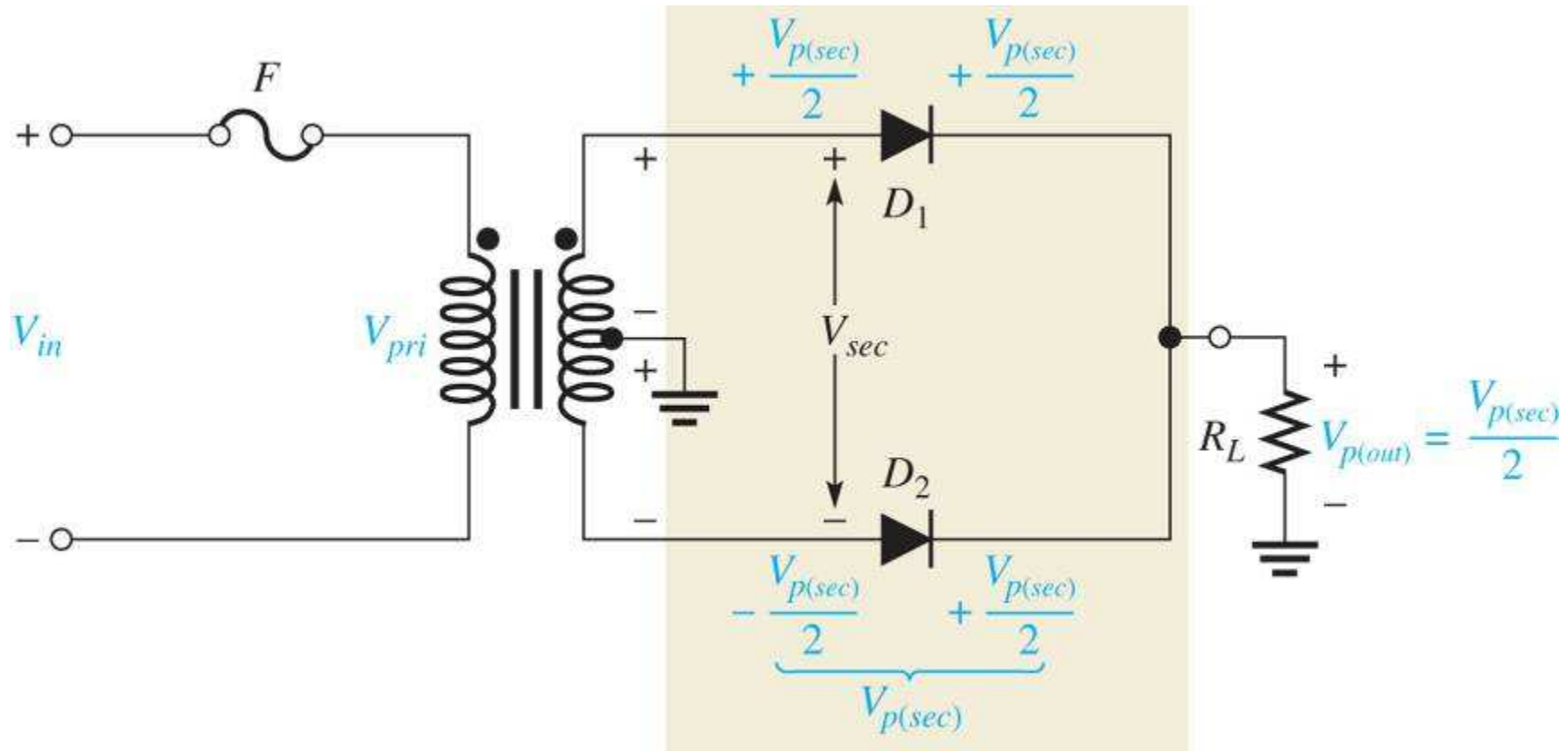
The ac on each side of the center-tap is $\frac{1}{2}$ of the total secondary voltage. Only one diode will be biased on at a time.



Tensão inversa de pico

Peak inverse voltage

Diode D_1 is shown forward-biased and D_2 is reverse-biased with PIV across it. The PIV across either diode is equal to the peak secondary voltage, which is twice the peak output voltage.



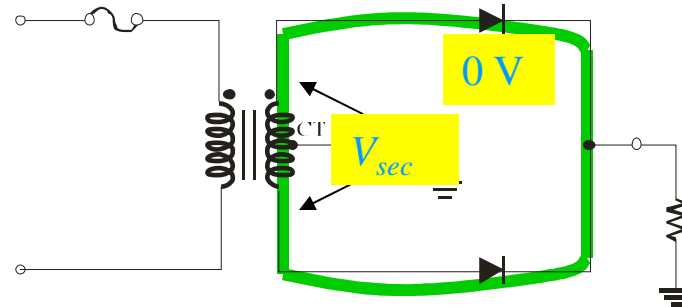
Tensão inversa de pico

Peak inverse voltage

Diodes must be able to withstand a reverse voltage when they are reverse biased. This is called the peak inverse voltage (PIV). The PIV depends on the type of rectifier circuit and the maximum secondary voltage.

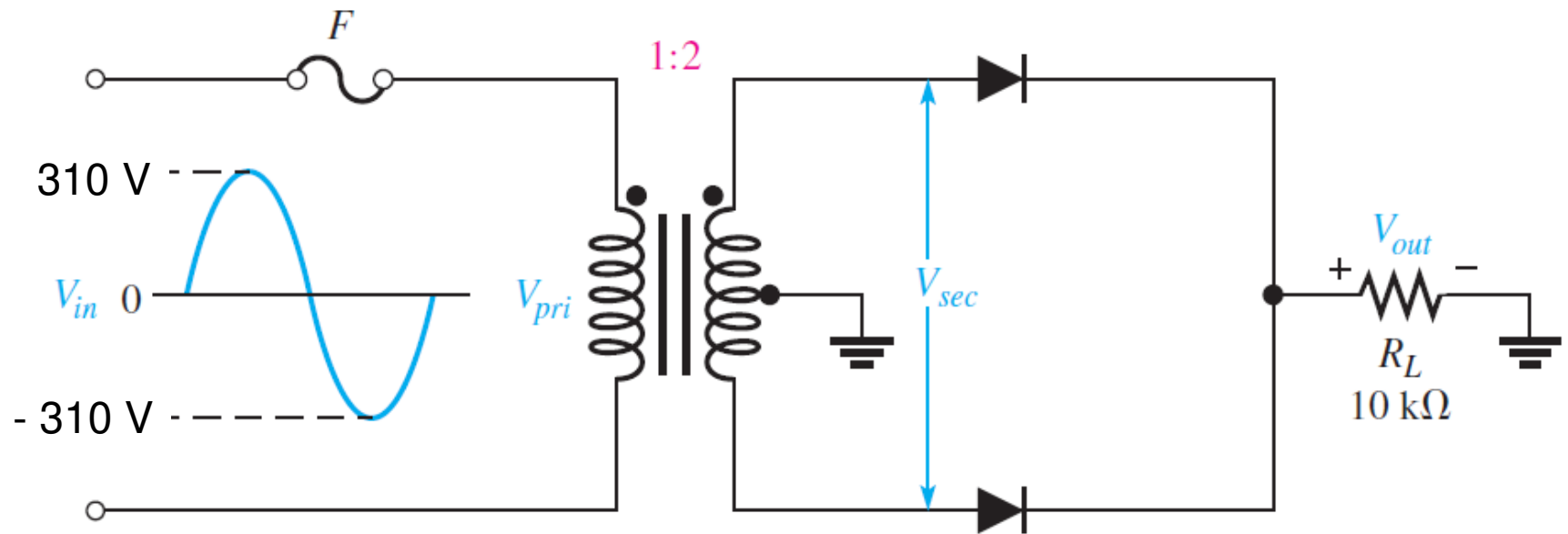
For example, in a full-wave circuit, if one diode is conducting (assuming 0 V drop), the other diode has the secondary voltage across it as you can see from applying KVL around the green path.

Notice that $V_{p(sec)} = 2V_{p(out)}$ for the full-wave circuit because the output is referenced to the center tap.

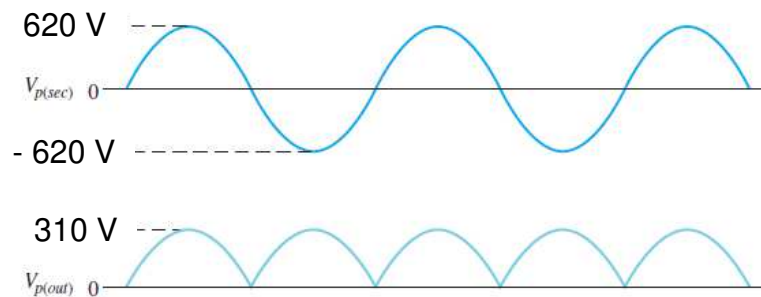


Tensão inversa de pico

Qual é a tensão de pico mínima (inversa) que os díodos devem suportar?



310 V



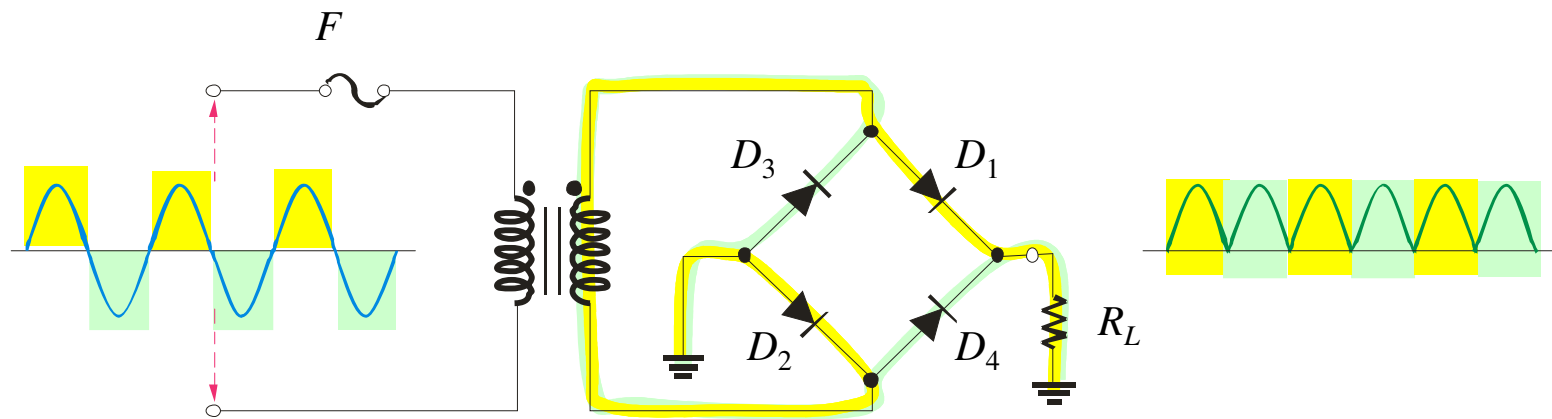
R: 620 V

Ponte retificadora

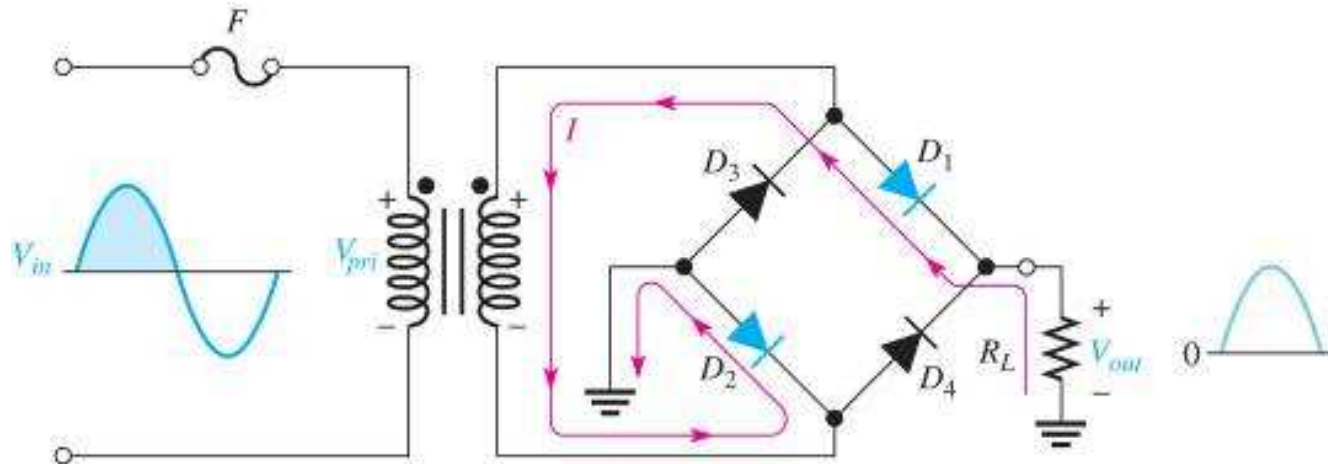
Ponte retificadora

The bridge rectifier is a type of full-wave circuit that uses four diodes. The bridge rectifier does not require a center-tapped transformer.

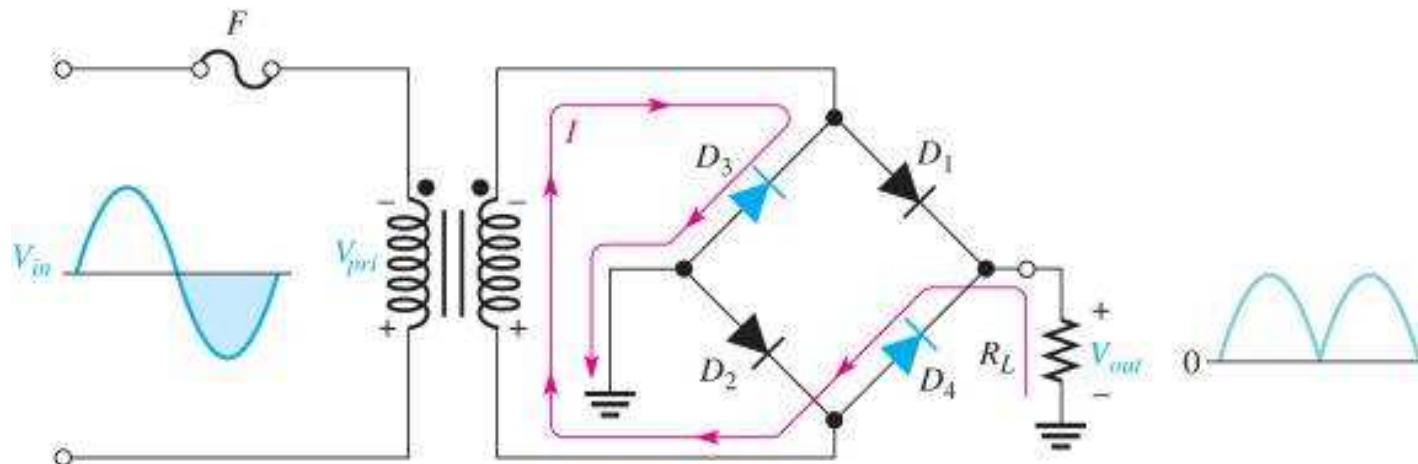
At any instant, two of the diodes are conducting and two are off.



Operation of full-wave bridge rectifier.



(a) During positive half-cycle of the input, D_1 and D_2 are forward-biased and conduct current. D_3 and D_4 are reverse-biased.

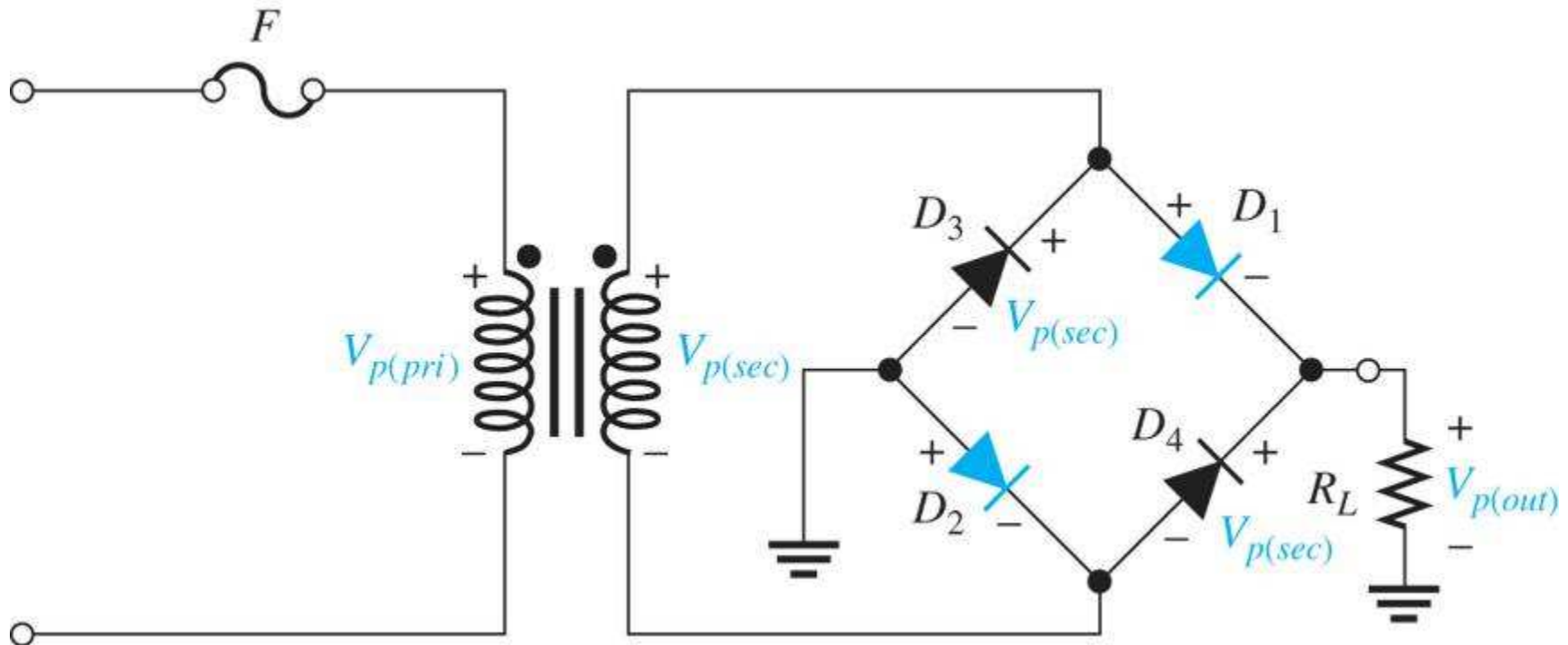


(b) During negative half-cycle of the input, D_3 and D_4 are forward-biased and conduct current. D_1 and D_2 are reverse-biased.

Tensão inversa de pico

Peak inverse voltage

PIV across diodes D_3 and D_4 in a bridge rectifier during the positive half-cycle of the input voltage.

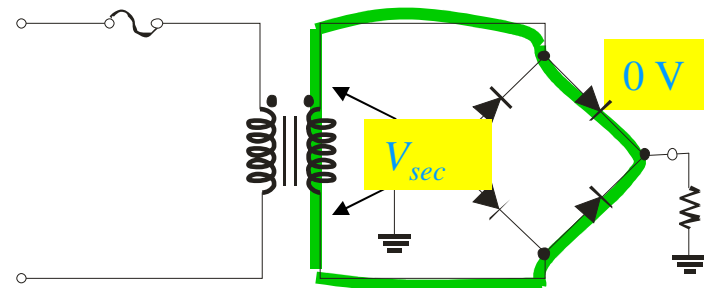


Tensão inversa de pico

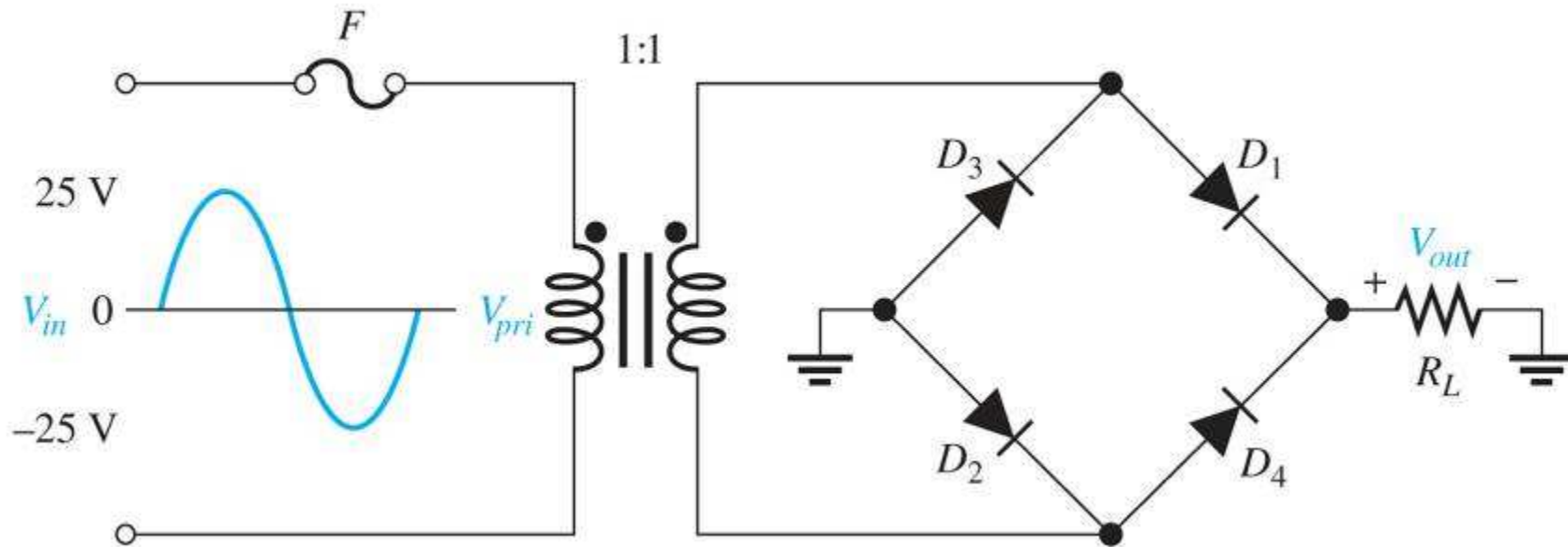
Peak inverse voltage

For the bridge rectifier, KVL can be applied to a loop that includes two of the diodes. Assume the top diode is conducting (ideally, 0 V) and the lower diode is off. The secondary voltage will appear across the non-conducting diode in the loop.

Notice that $V_{p(sec)} = V_{p(out)}$ for the bridge because the output is across the entire secondary.



Tensão inversa de pico na ponte retificadora



The peak output voltage is

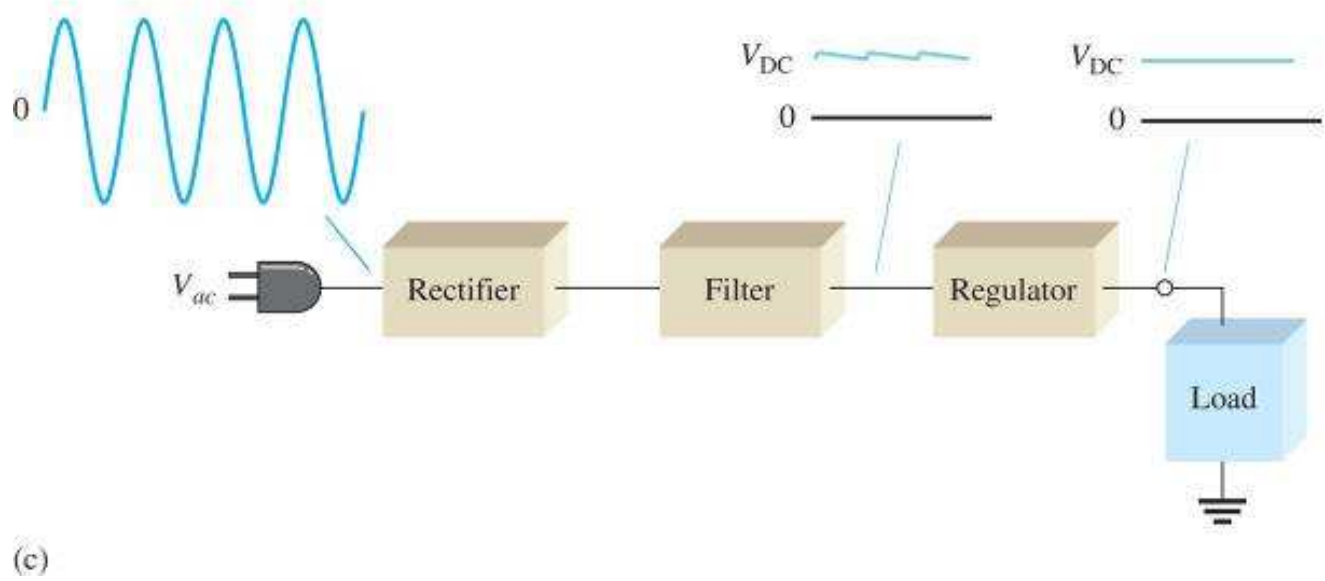
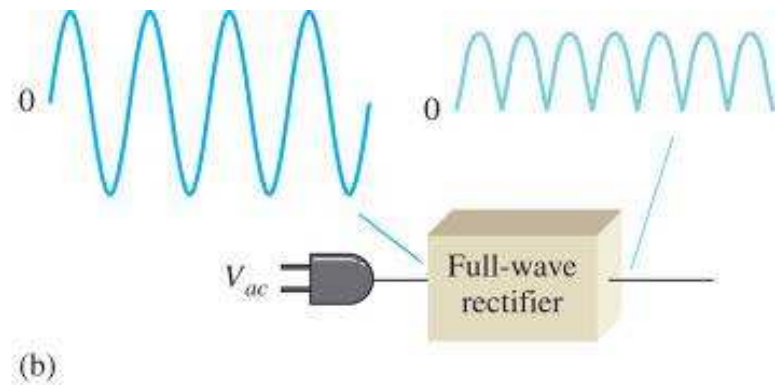
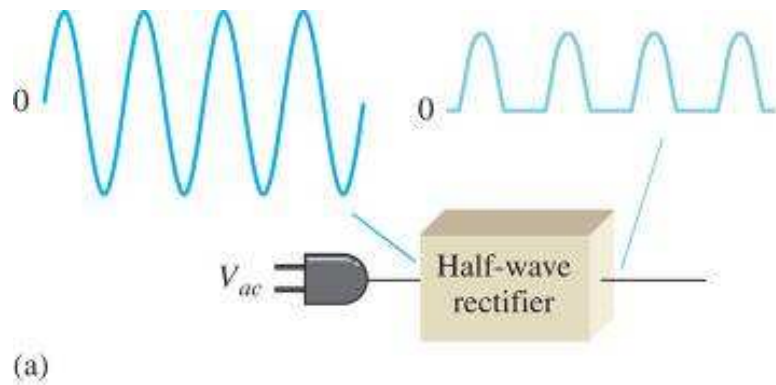
$$V_{p(out)} = V_{p(sec)} = nV_{p(in)} = (1)25 \text{ V} = 25 \text{ V}$$

The PIV for each diode is

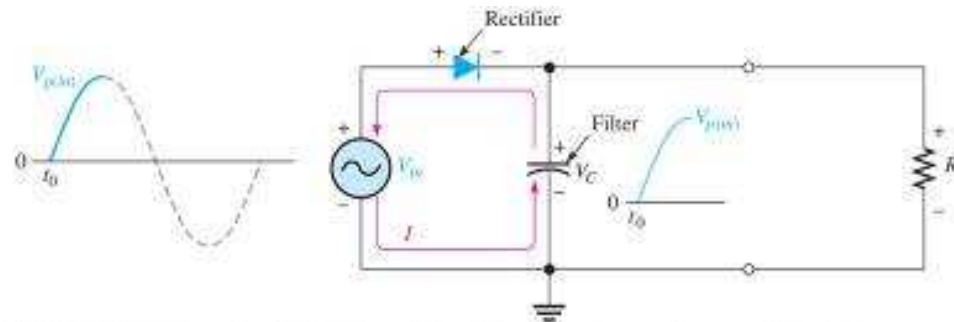
$$\text{PIV} = V_{p(out)} = 25 \text{ V}$$

Fontes de tensão

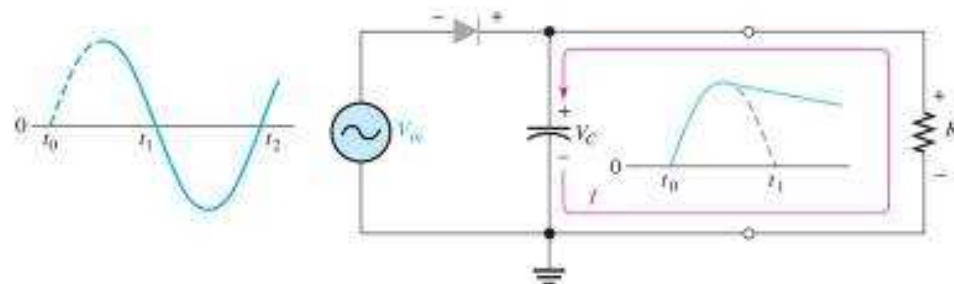
Block diagrams showing basic operation of rectifiers and a regulated dc power supply.



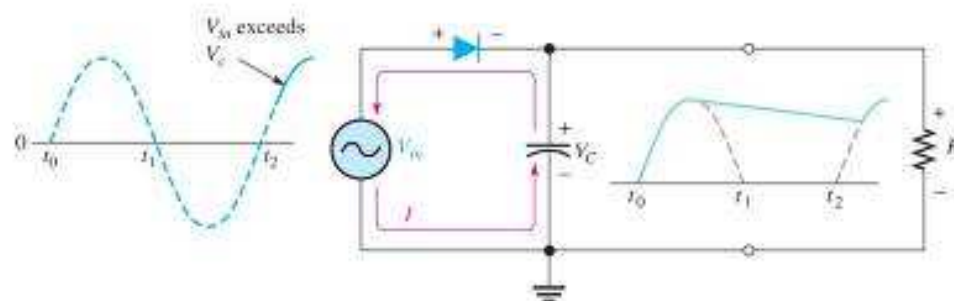
Operation of a half-wave rectifier with a capacitor-input filter.



(a) Initial charging of capacitor (diode is forward-biased) happens only once when power is turned on.



(b) The capacitor discharges through R_L after peak of positive alternation when the diode is reverse-biased. This discharging occurs during the portion of the input voltage indicated by the solid dark blue curve.

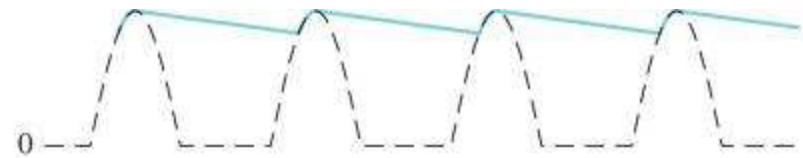


(c) The capacitor charges back to peak of input when the diode becomes forward-biased. This charging occurs during the portion of the input voltage indicated by the solid dark blue curve.

Half-wave vs full-wave ripple voltage

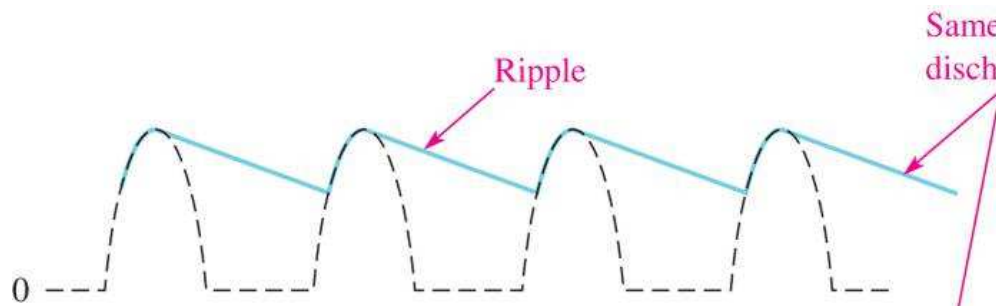


(a) Greater ripple means less effective filtering.



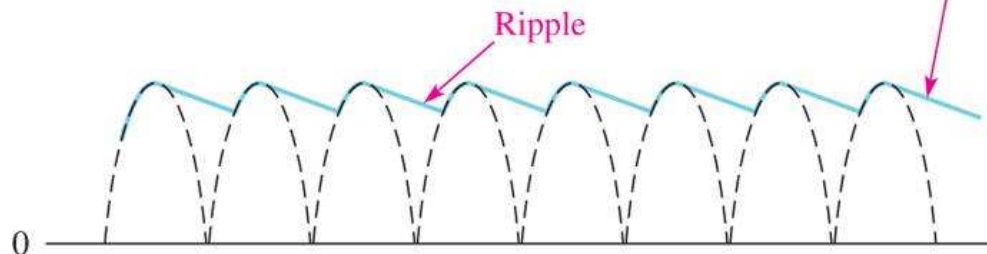
(b) Smaller ripple means more effective filtering.

A good rule of thumb for effective filtering is to make $R_L C \geq 10T$, where T is the period of the rectified voltage.



(a) Half-wave

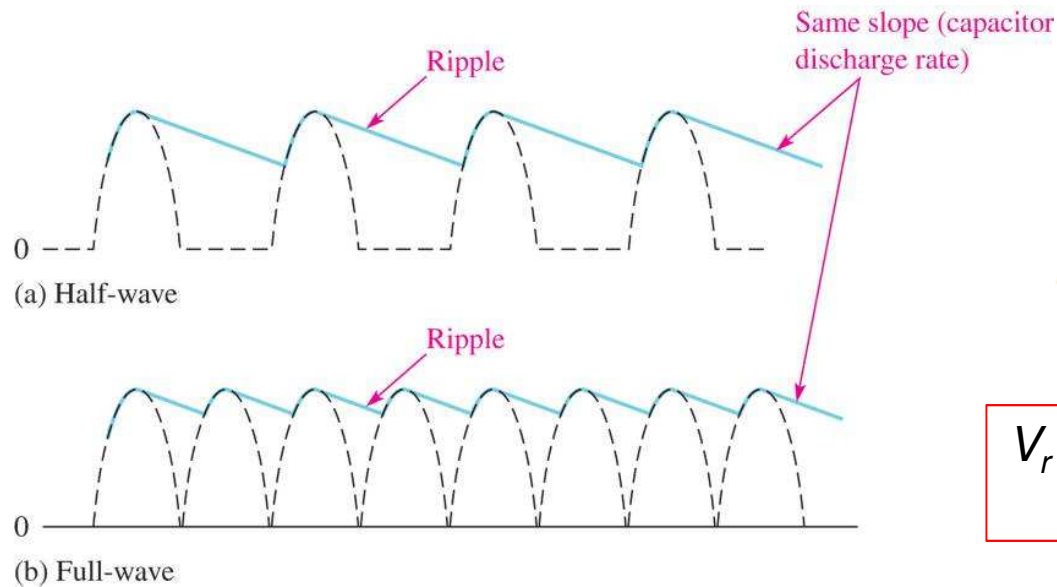
$$V_r = \frac{Q}{C} = \frac{I \cdot T}{C}$$



(b) Full-wave

$$V_r = \frac{Q}{C} = \frac{I \cdot T}{2C}$$

Comparison of ripple voltages for half-wave and full-wave signals with same filter and same input frequency. For clarity, the amount of ripple showed is exaggerated.

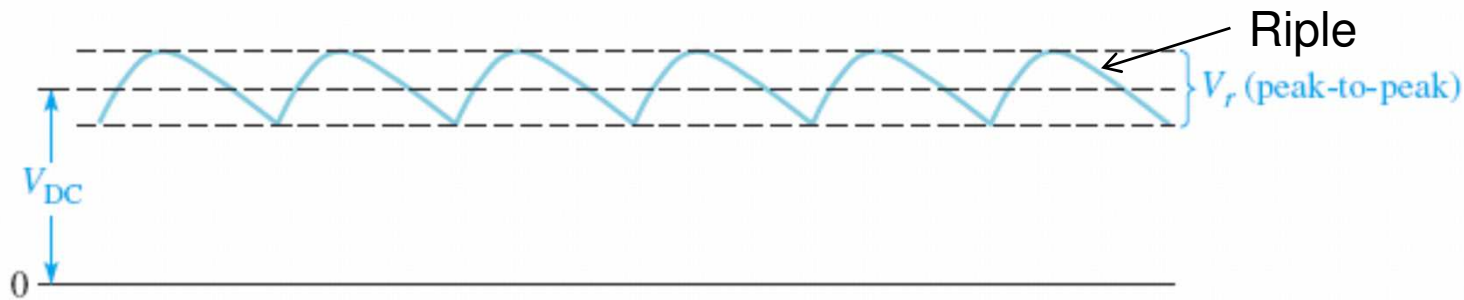


Ripple factor

$$r = \left(\frac{V_r}{V_{DC}} \right) 100\%$$

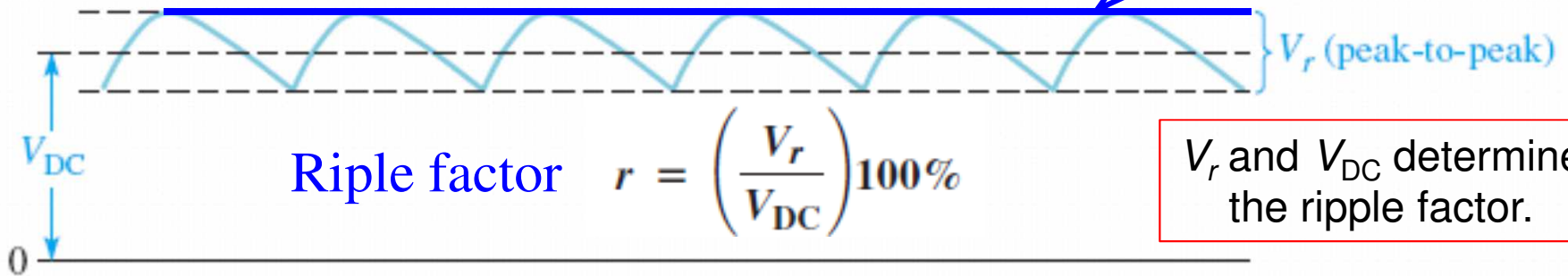
V_r and V_{DC} determine the ripple factor.

A good rule of thumb for effective filtering is to make $R_L C \geq 10T$, where T is the period of the rectified voltage.



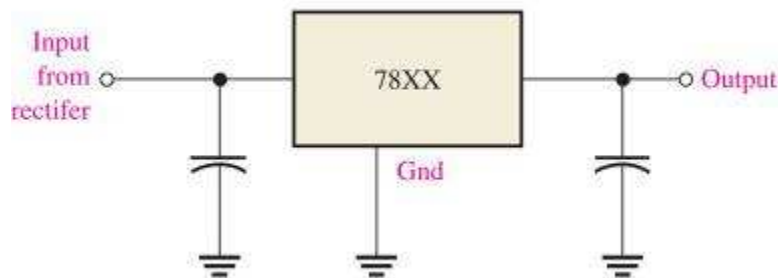
Regulador de tensão

Objetivo: V_{out}



Reguladores de tensão integrados

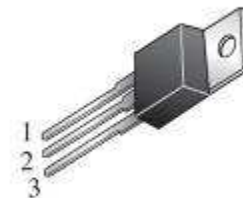
The 7800 series regulator



(a) Standard configuration

Type number	Output voltage
7805	+5.0 V
7806	+6.0 V
7808	+8.0 V
7809	+9.0 V
7812	+12.0 V
7815	+15.0 V
7818	+18.0 V
7824	+24.0 V

(b) The 7800 series



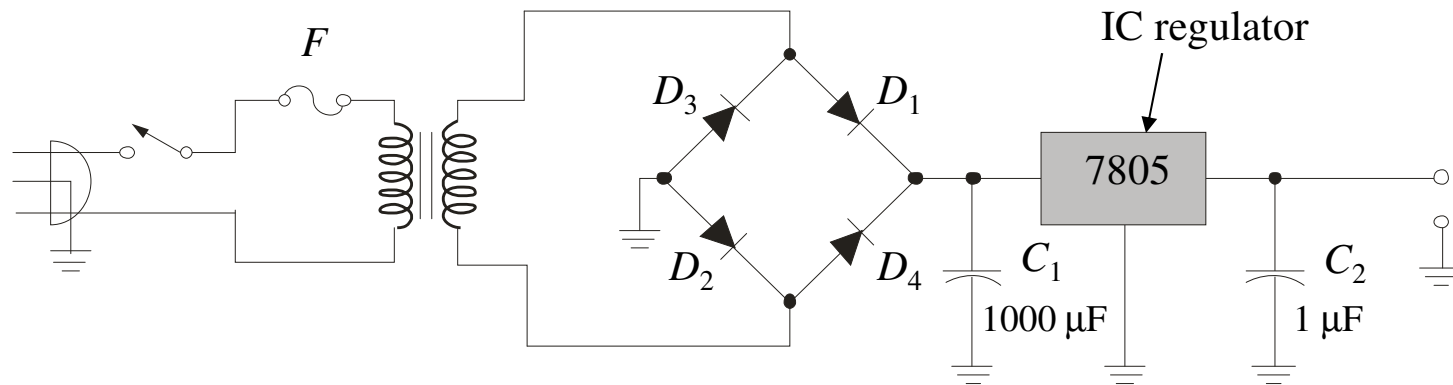
(Heatsink surface connected to Pin 2)

(c) Typical package

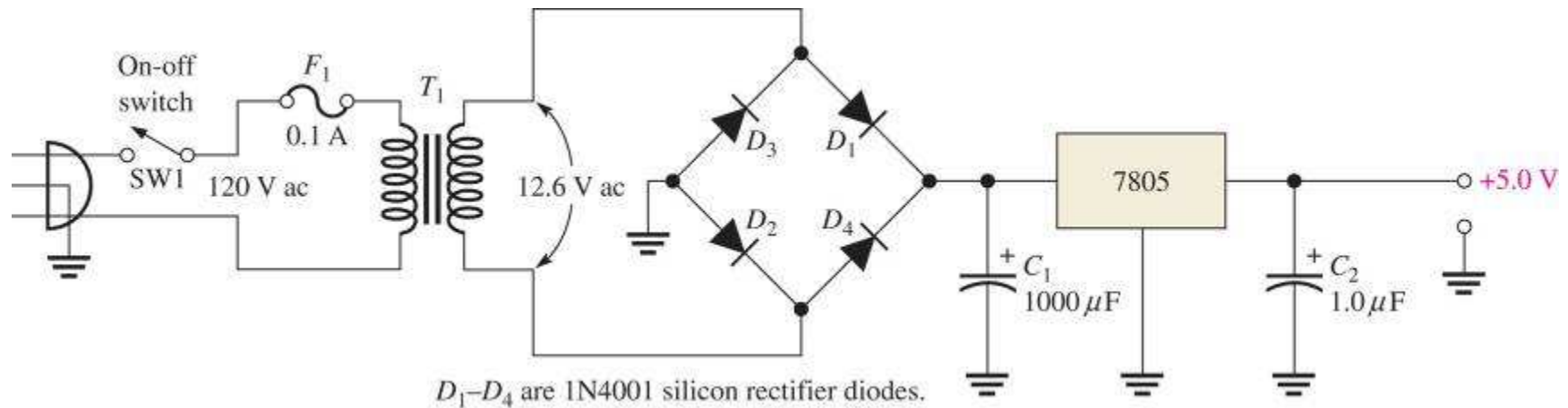
Fontes de tensão de 5 V

By adding a filter and regulator to the basic rectifier, a basic power supply is formed.

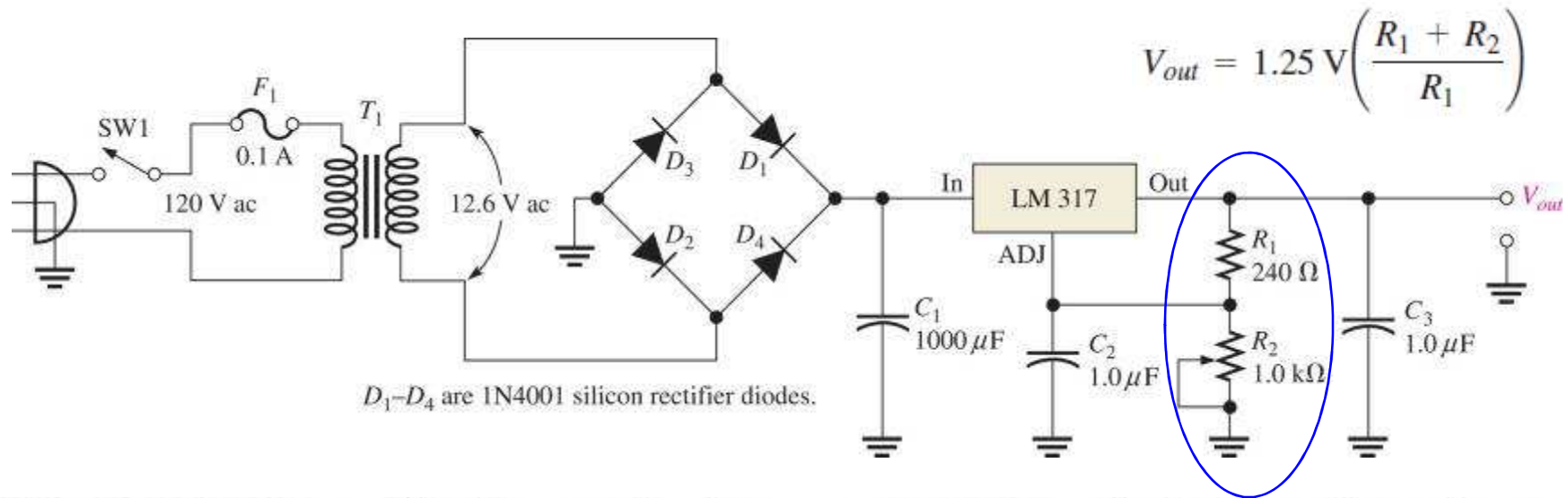
Typically, a large electrolytic capacitor is used as a filter before the regulator, with a smaller one following the regulator to complete filtering action.



A basic +5.0 V regulated power supply.



Fonte de tensão variável (de 1.25 V a 6.5 V).



Line regulation specifies how much change occurs in the output voltage for a given change in the input voltage. It is typically defined as a ratio of a change in output voltage for a corresponding change in the input voltage expressed as a percentage.

$$\text{Line regulation} = \left(\frac{\Delta V_{\text{OUT}}}{\Delta V_{\text{IN}}} \right) 100\%$$

Load regulation specifies how much change occurs in the output voltage over a certain range of load current values, usually from minimum current (no load, NL) to maximum current (full load, FL). It is normally expressed as a percentage and can be calculated with

$$\text{Load regulation} = \left(\frac{V_{\text{NL}} - V_{\text{FL}}}{V_{\text{FL}}} \right) 100\%$$

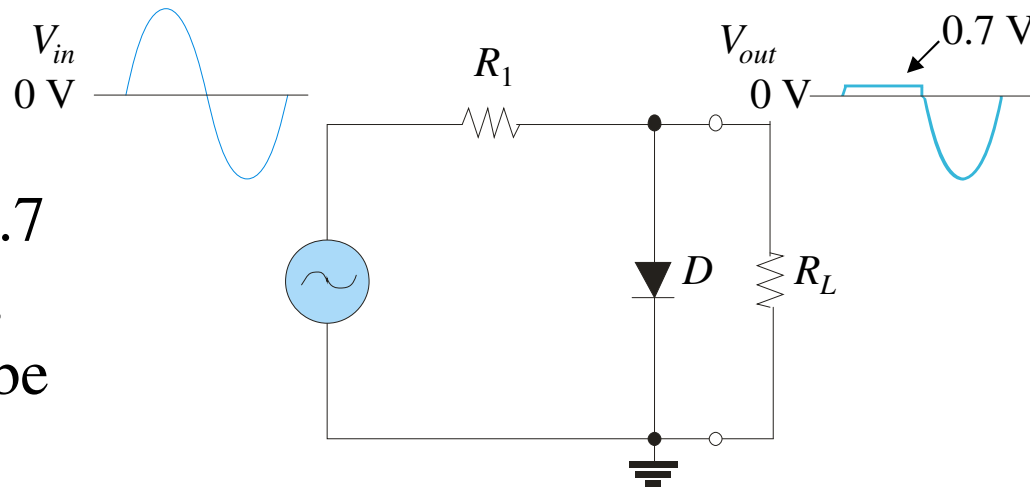
Circuitos limitadores

Circuitos limitadores – “limitador positivo”

Limiting circuits

Diode limiters (clippers) are circuits that limit voltage above or below a specified level. A basic limiter circuit that clips voltages below 0.7 V is shown.

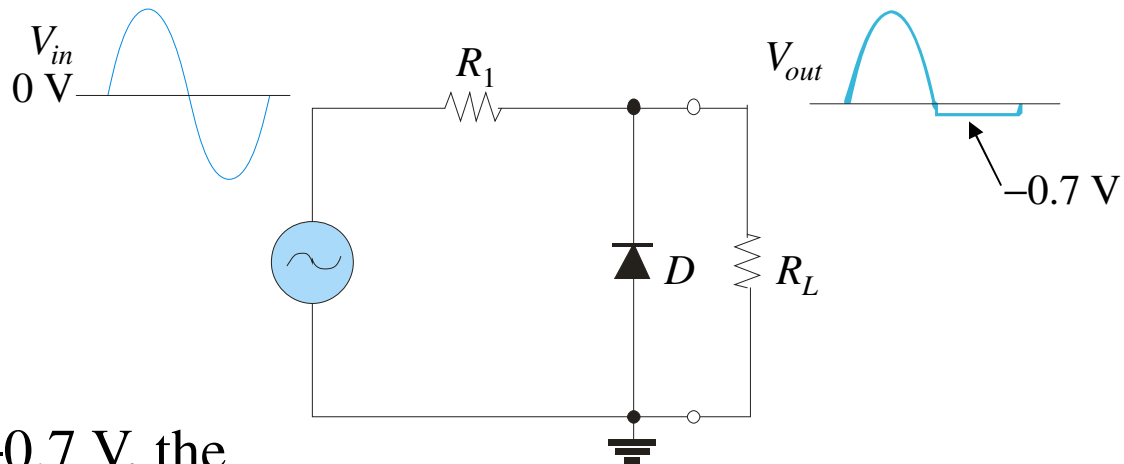
If the input is above 0.7 V, the diode conducts, causing the output to be limited to this level.



Circuitos limitadores – “limitador negativo”

Limiting circuits

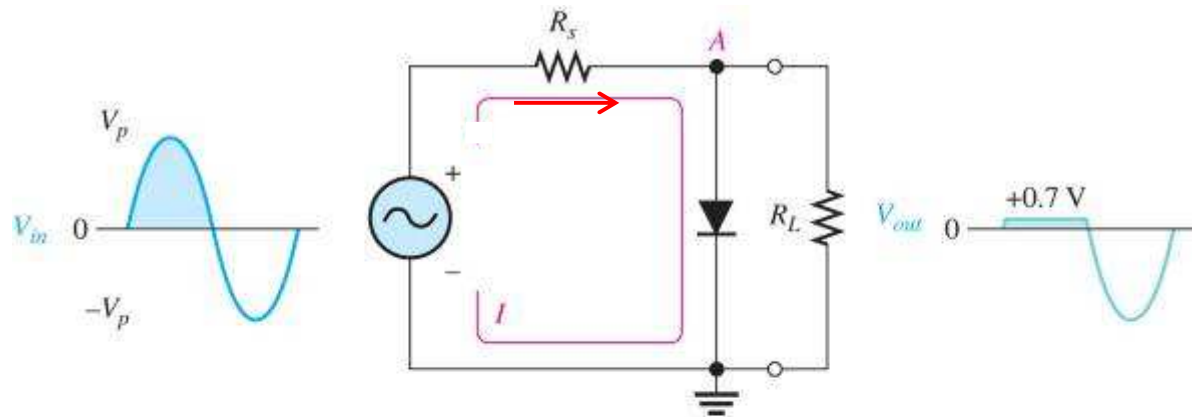
Reversing the diode causes the limiter to clip signal voltages that are below -0.7 V .



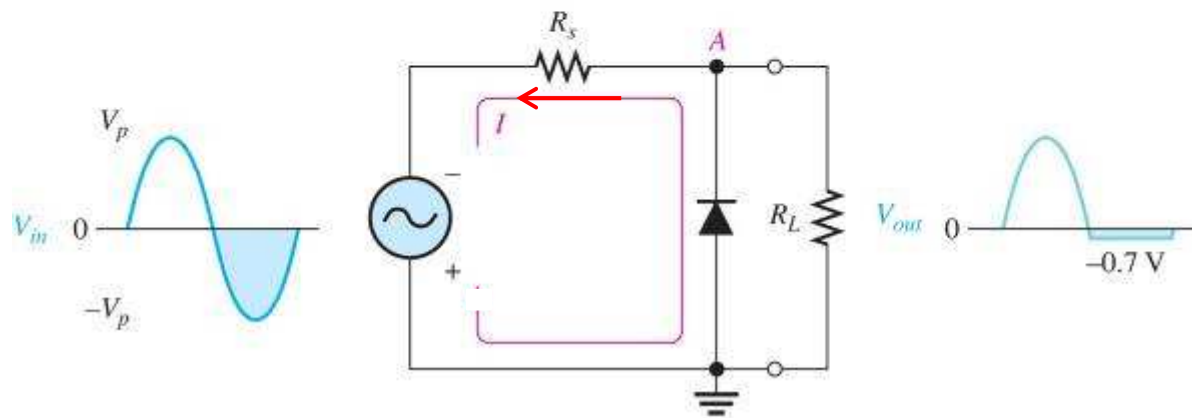
If the input is below -0.7 V , the diode conducts, causing the output to be limited (clipped) for voltages less than this level.

Circuitos limitadores básicos com díodos

Basic diode limiters



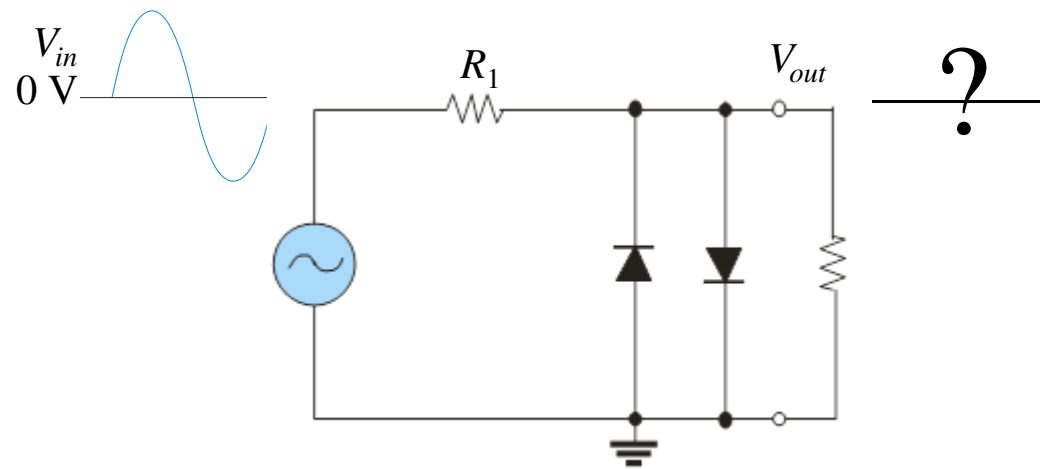
(a) Limiting of the positive alternation



(b) Limiting of the negative alternation

Circuitos limitadores

Limiting circuits

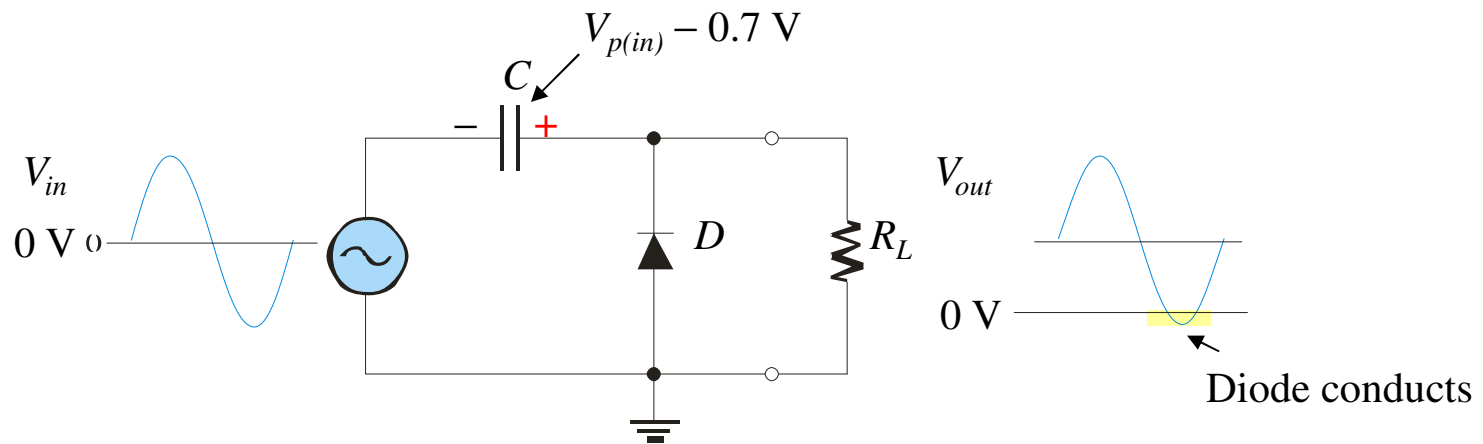


Circuitos fijadores de nivel

Circuitos fijadores de nivel - positivo

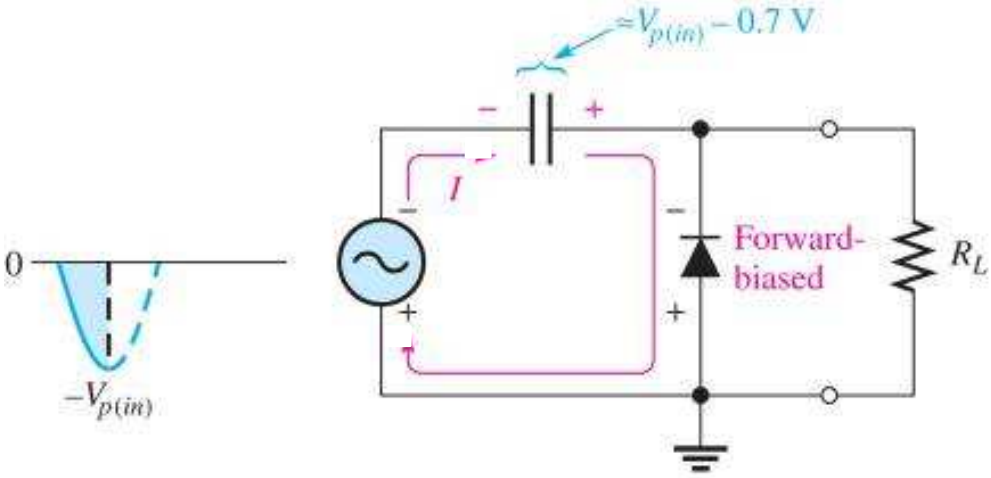
Clamping circuits

A basic clamping circuit (also called a dc restorer) adds a dc level to a signal voltage using a diode and capacitor.

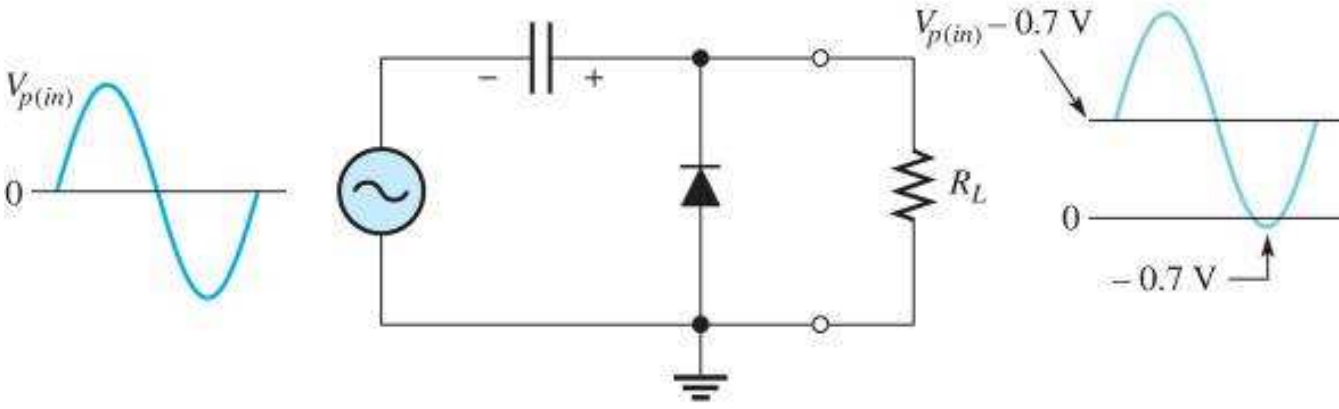


The first negative cycle of the signal biases the diode on and causes the capacitor to charge to $V_{p(in)} - 0.7 \text{ V}$. The long time constant keeps the capacitor charged, which adds a dc voltage to the signal voltage at the output.

Positive clamping operation with a passive clamper.



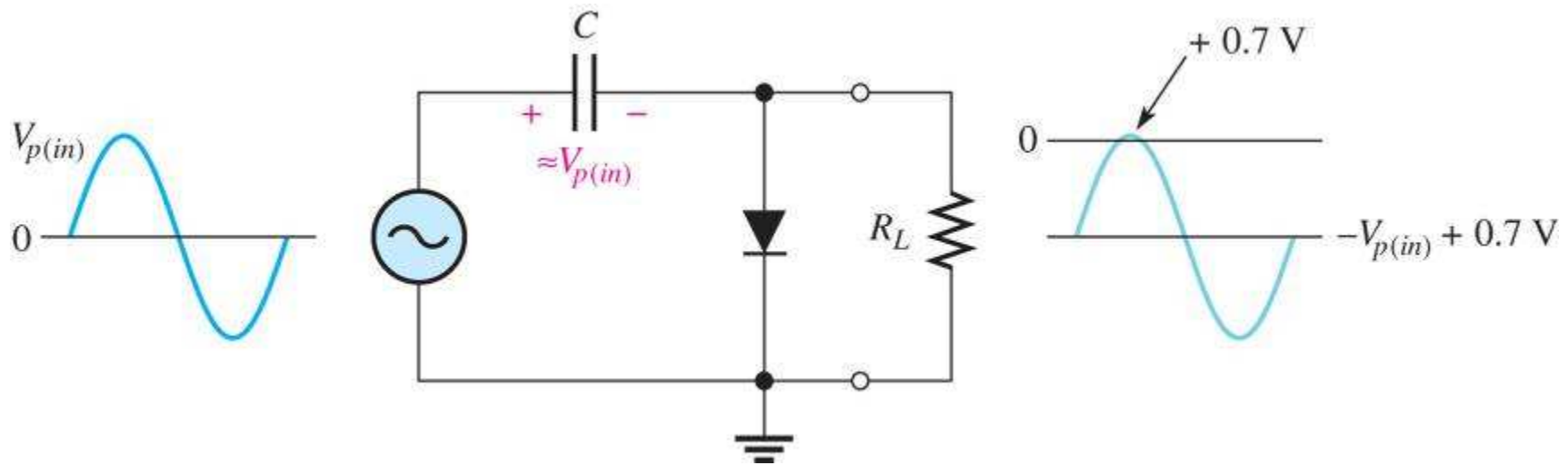
(a)



(b)

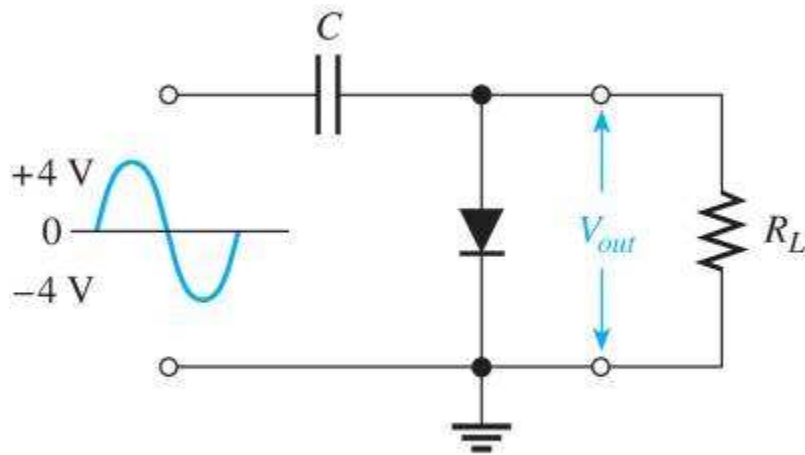
Circuitos fixadores de nível - negativo

Negative clamping circuits

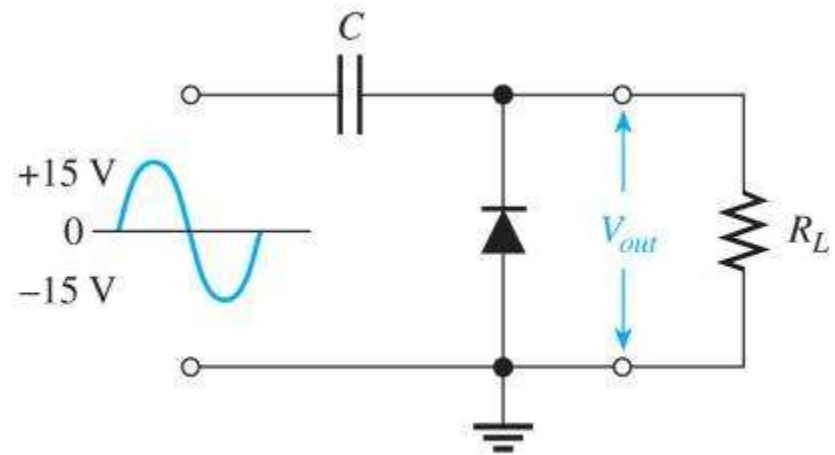


Circuitos fixadores de nível

Exercício: Traçar a tensão aos terminais da carga para os circuitos abaixo:



(a)

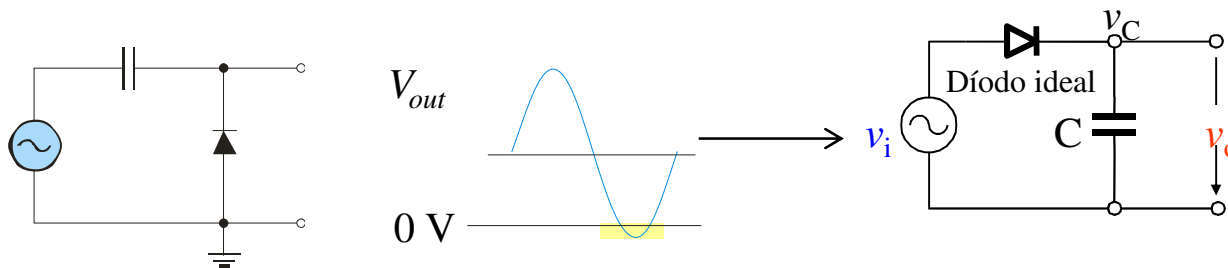
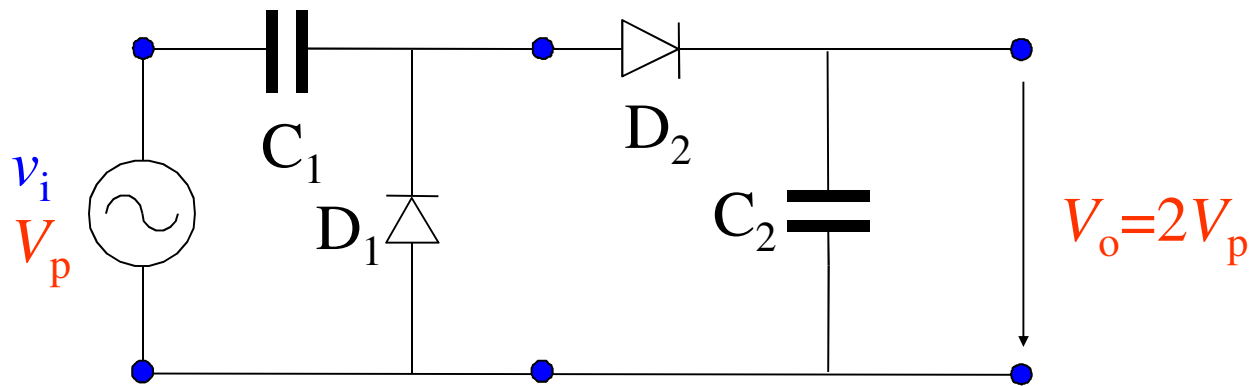


(b)

Multiplicador de Tensão

Duplicador e Multiplicador de Tensão

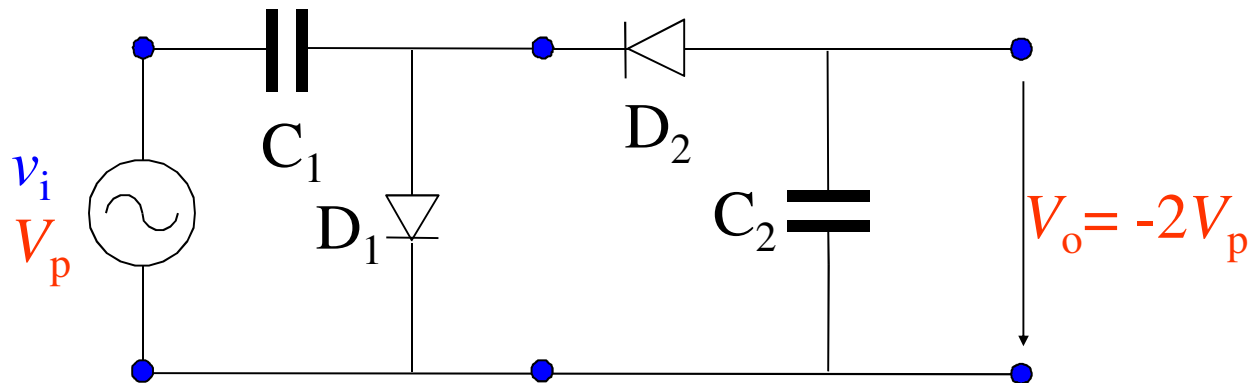
Da combinação dos circuitos fixador de nível e detetor de pico, obtém-se um circuito que duplica da tensão de pico.



Se o conjunto, com as devidas adaptações, for colocado em cascata, a tensão é sucessivamente aumentada.

Duplicador e Multiplicador de Tensão

Da combinação dos circuitos fixador de nível e detetor de pico, obtém-se um circuito que duplica da tensão de pico.

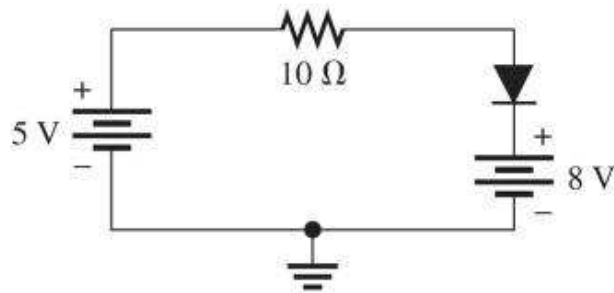


Se o conjunto, com as devidas adaptações, for colocado em cascata, a tensão à saída é sucessivamente aumentada (em módulo).

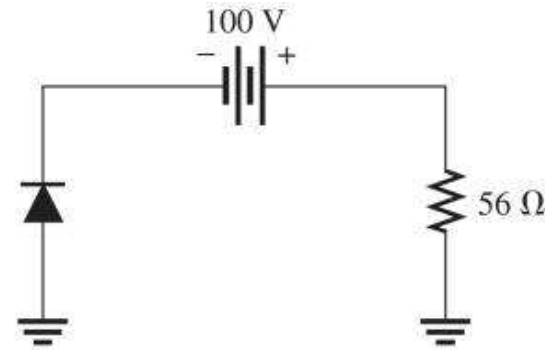
Circuitos com díodos: exercícios

Exercícios

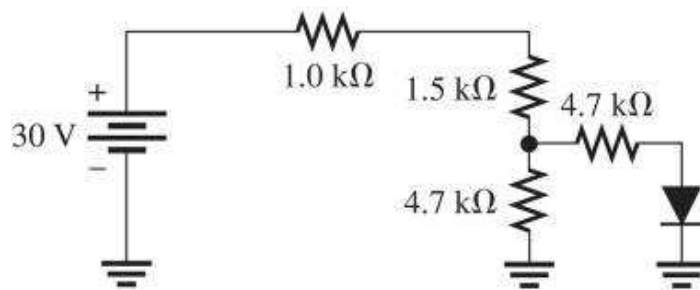
Determinar as correntes e as tensões aos terminais dos díodos. Considere que quando em condução a tensão aos terminais do díodo é 0,7 V.



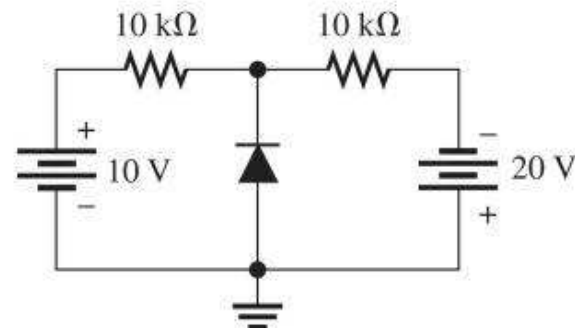
(a)



(b)



(c)

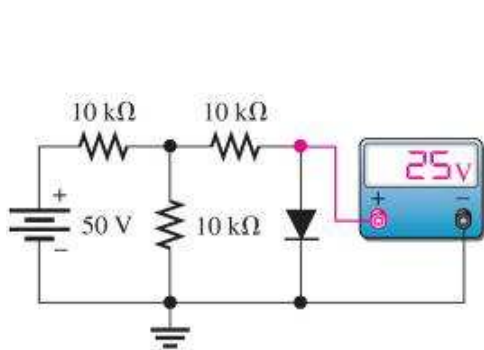


(d)

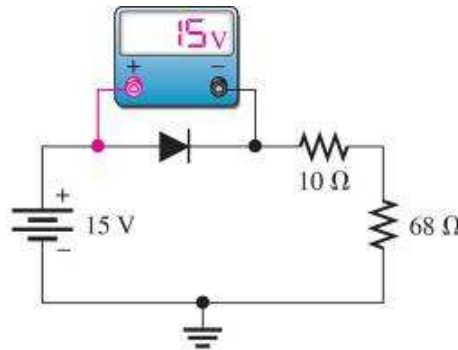
- (a) $V_R = 3 \text{ V}$
- (b) $V_F = 0.7 \text{ V}$
- (c) $V_F = 0.7 \text{ V}$
- (d) $V_F = 0.7 \text{ V}$

Exercícios

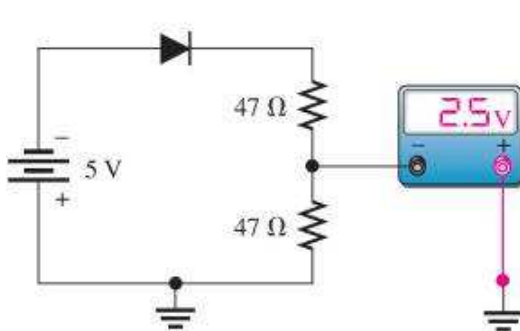
Considere os circuitos da figuras abaixo. Verificar se o valor indicado pelo voltímetro está correto.



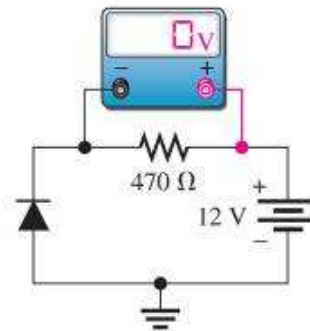
(a)



(b)

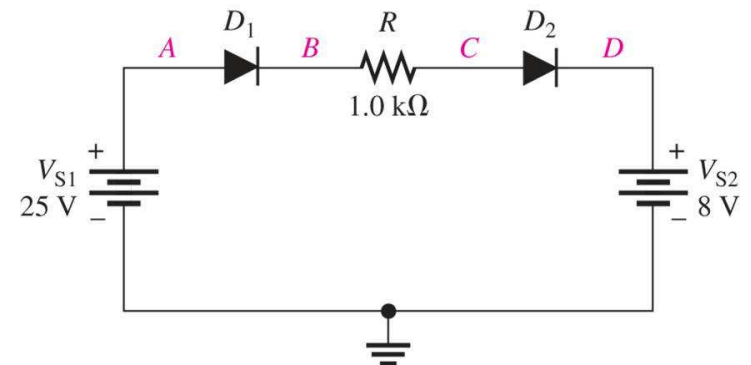


(c)



(d)

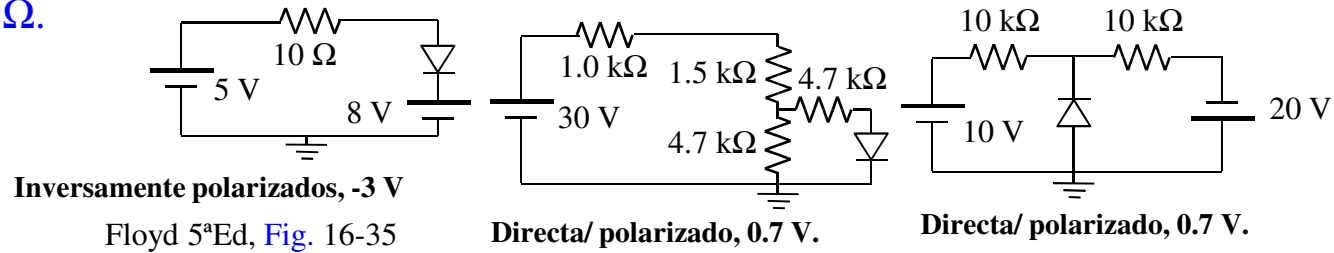
Determinar a tensão nos pontos A, B, C e D relativamente à terra /comum. Considere que quando em condução a tensão aos terminais do díodo é 0,7 V.



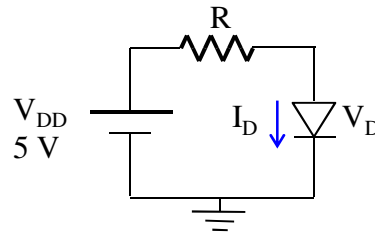
$$V_A = 25\text{ V}; V_B = 24.3\text{ V}; V_C = 8.7\text{ V}; V_D = 8\text{ V}$$

Exercícios

Ex. 1: Determine se os diodos estão polarizados directa ou inversamente, e calcule a tensão aos seus terminais. Use $r_D=0 \Omega$.



Ex. 2: Determine a corrente I_D e a tensão aos terminais do diodo V_D ? Tome $V_{D0}=0.65 \text{ V}$, $r_D=20 \Omega$, e $R=1 \text{ k}\Omega$.

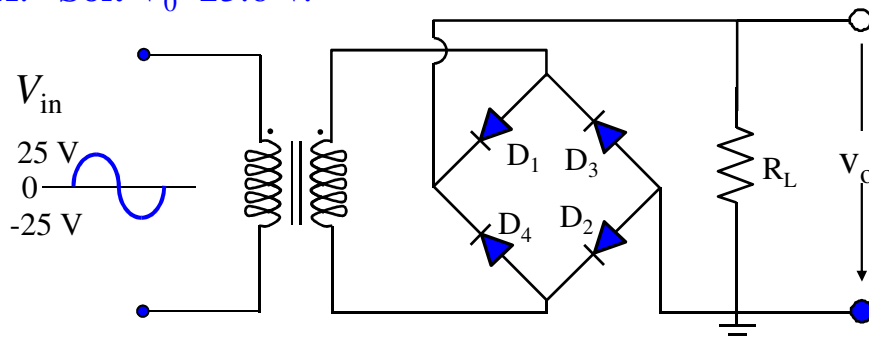


$$I_D = \frac{V_{DD} - V_{D0}}{R + r_D} = 4.26 \text{ mA}$$

$$V_D = V_{D0} + r_D I_D = 0.735 \text{ V}$$

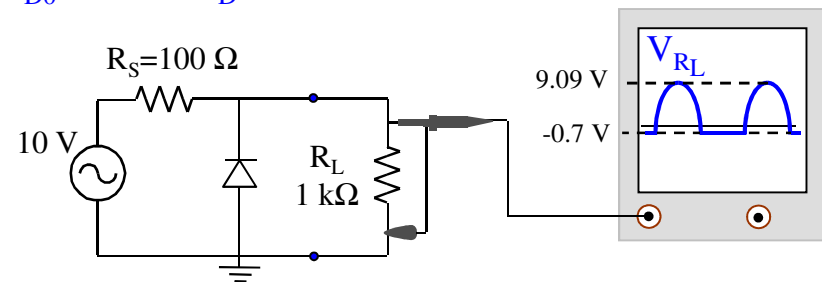
Sedra & Smith 3ªEd, Fig. 3.10, 3.14

Ex. 3: Explique o funcionamento do circuito. Determine a tensão aos terminais de R_L . Assuma $V_{D0}=0.7 \text{ V}$ e $r_D=0 \Omega$. **Sol:** $V_0=23.6 \text{ V}$.



Floyd 5ªEd, Fig. 17-18

Ex. 4: Considere o circuito abaixo. O que é que espera observar no osciloscópio? Assuma que a base de tempo permite visualizar um ciclo e meio. Tome $V_{D0}=0.7 \text{ V}$ e $r_D=0 \Omega$. **Sol:**



Floyd 5ªEd, Fig. 17-29

Exercícios

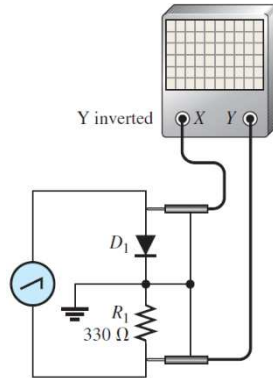
Ex. 5: Explique como pode obter a característica corrente-tensão de um diodo correspondente à polarização directa.



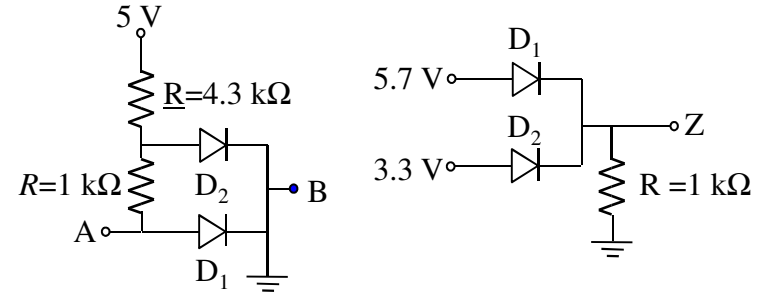
The diode forward V-I characteristic curve can be plotted on the oscilloscope using the circuit

shown below. Channel 1 senses the voltage across the diode and channel 2 senses a signal that is proportional to the current. The scope must be in the X-Y mode. The signal generator provides a 5 Vpp sawtooth or triangular waveform at 50 Hz, and its ground must not be the same as the scope ground. Channel 2 (the Y channel) must be inverted for the displayed curve to be properly oriented.

Floyd 5ªEd, Fig. 16-7 (13)

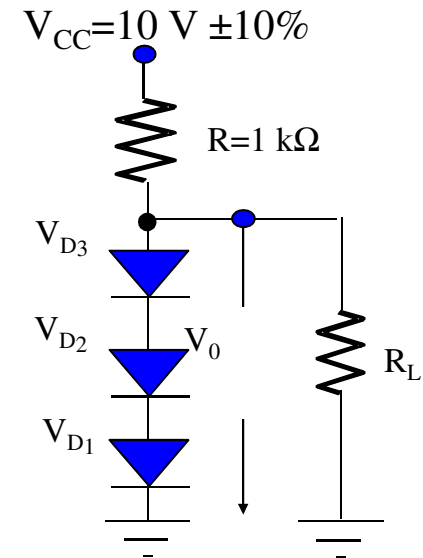


Ex. 6: Qual a tensão em A e em B, e em Z? Considere $V_{D0}=0.7\text{ V}$ e $r_D=0\ \Omega$.



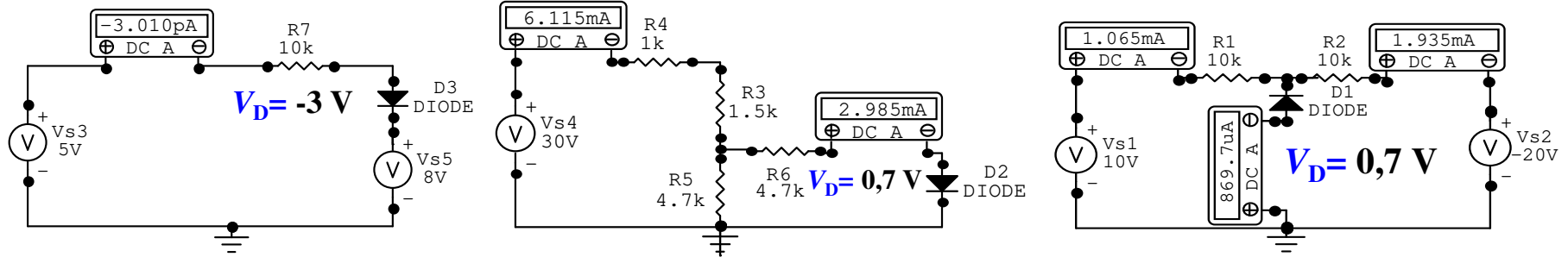
Ex. 7: O conjunto dos três díodos garante uma tensão de 2.1 V. Determine R_D , a variação percentual da tensão regulada, em aberto e com uma carga de 1 kΩ, quando a tensão de alimentação varia $\pm 10\%$.

Sol: $I=(V_{CC}-2.1)/R=7,9\text{ mA}$, $R_D=V_T(293\text{ K})/I=6,3\ \Omega$; $R_{3D}=18,9\ \Omega$. A resistência dos 3 díodos e R formam um divisor de tensão. A variação da tensão ΔV_0 devido a ΔV_{CC} é $1 \times 18,9 / (1000 + 18,9) = 18,5\text{ mV}$ (0,9%). Quando se liga a carga, a corrente através dos díodos decresce de 2,1 mA, resultando num decréscimo da tensão aos terminais dos 3 díodos $\Delta V_0 = -2,1\text{ mA} \times 18,9 = -39,7\text{ mV}$, ou 13,2 mV por diodo.



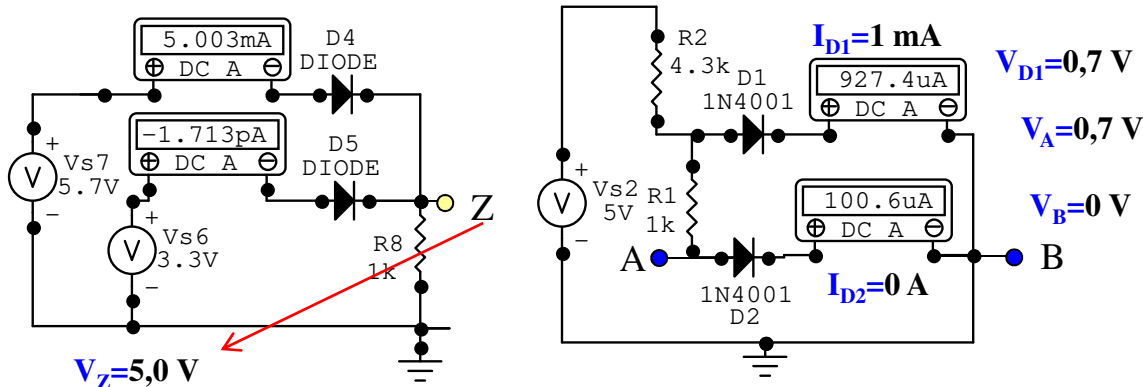
Resolução dos exercícios

Res. Ex. 1: Para cada diódo determine V_D .



Análise do último circuito: da equação das malhas para a malha da esquerda $10=RI_1+0,7$ (admitindo que o diódo está em condução), resulta $I_1=0,93$ mA; da equação das malhas para a malha da direita $20=RI_2+0,7$ (admitindo que o diódo está em condução), resulta $I_2=1,93$ mA; da lei nos nodos obtém-se $I_D=1$ mA. **Nota:** Os valores determinados analiticamente diferem dos apresentados acima, uma vez que o simulador considera os diódos reais.

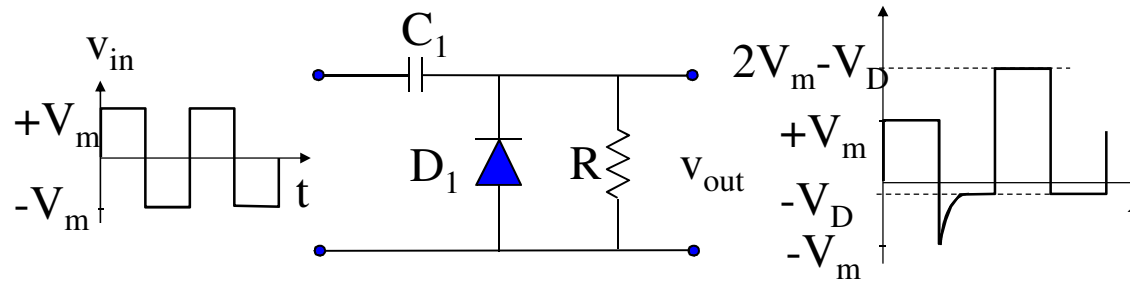
Ex. 6: Qual a tensão em A e em B, e em Z? Considere $V_{D0}=0,7$ V e $r_D=0$ Ω .



$V_{D2}=V_A=0,7$ V, porque apenas o diódo 1 pode estar em franca condução.

Exercícios

Represente/trace/esboce a forma de onda aos terminais de R e descreva o funcionamento do circuito:



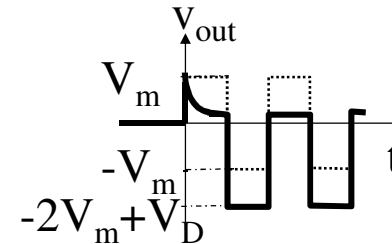
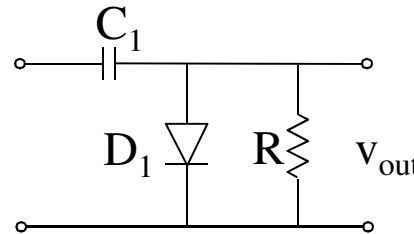
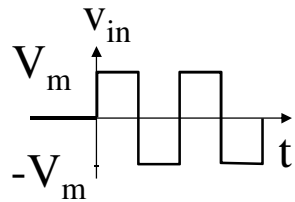
Funcionamento do circuito: Quando a tensão de entrada passa de zero a $+V_m$, a tensão no cátodo do diodo, sobe de zero para $+V_m$, porque a tensão no condensador não pode variar instantaneamente, fazendo com que a subida de tensão na armadura esquerda ocorra também na armadura direita. Assim, estando a armadura direita ao potencial $+V_m$, o diodo não conduz, e a tensão aos tensões na saída é igual à tensão da entrada. Quando a tensão v_{in} diminui de $+V_m$ para $-V_m$, pelas razões já expostas, a tensão no cátodo do diodo passa para $-V_m$. Agora, o diodo está polarizado directamente e se $-V_m$ for inferior a $-V_D$, o diodo entra em condução, permitindo que o condensador carregue, com a constante de tempo $\tau=R_D C$. (onde R_D representa a resistência do diodo em condução), que é, em geral, muito pequena quando comparada com o período do sinal de entrada. A tensão no condensador será $V_C=V_m - V_D$, em que a armadura da direita está a um potencial superior à da esquerda, igual a $-V_D$. (o potencial na armadura da esquerda é $-V_m$). Quando o sinal de entrada, passa de $-V_m$ para $+V_m$, o potencial na armadura da esquerda sobe $2V_m$, e como a ddp aos terminais do condensador não pode variar instantaneamente, a tensão na armadura da direita sobe de $-V_D$ para $2V_m - V_D$, o que polariza inversamente o diodo. A tensão de saída mantém-se igual a $2V_m - V_D$ até que a tensão de entrada comute novamente para $-V_m$, o que faz com a tensão no cátodo do diodo desça para $-V_D$. ($= 2V_m - V_D - 2V_m$), mantendo-se em $-V_D$, até que a tensão de entrada comute novamente.

Exercícios

Esboce a forma do sinal aos terminais da resistência R. Considere que o condensador não descarrega pela resistência acoplada à saída e que o diodo é real (freq. a)/ideal (freq. b).

Sol:

Freq. b



Funcionamento do circuito (diodo ideal): Quando a tensão de entrada passa de zero a $+V_m$, a tensão na armadura direita do C passa também de zero para $+V_m$, porque a tensão aos terminais do C não pode variar instantaneamente. Então, a tensão no cátodo do D sobe de zero para $+V_m$. Se V_m for maior que V_D , o D entra em condução, carregando o C com a constante de tempo $\tau=r_D C \ll T/2$ (onde r_D representa a resistência do D em condução). Uma vez em condução o D assegura que a tensão na saída é igual a $V_D=0,7$ V, enquanto o D conduzir. A tensão no condensador será $V_C=V_m-V_D$, em que a armadura da direita está a $V_D=0,7$ V e a da esquerda, que está a $+V_m$. Quando a tensão v_{in} decresce de $+V_m$ para $-V_m$, a tensão na armadura da direita sofre a mesma variação de tensão que a esquerda ($-2V_m$), passando de $+V_D$ para $-2V_m+V_D$. O diodo fica polarizado inversamente, impedindo que o condensador descarregue com a constante de tempo $\tau=r_D C \ll T/2$. O C praticamente não descarrega através da R porque $\tau=RC \gg T/2$. Quando o sinal de entrada, passa de $-V_m$ para $+V_m$, o potencial na armadura da esquerda do C sobe $2V_m$ e, como a ddp aos seus terminais não pode variar instantaneamente, a tensão na armadura da direita sobe $-2V_m+V_D$ para $+V_D$, o que polariza directamente o D. Agora a tensão de saída é igual a V_D , até que a tensão de entrada comute novamente para $-V_m$, o que faz com a tensão no cátodo do diodo desça para $-2V_m+V_D$, mantendo-se em $-2V_m+V_D$, até que a tensão de entrada comute novamente e assim sucessivamente (ver figura).

Díodos com funcionalidades específicas

Special purpose diodes include

Um díodo rectificador consiste numa junção semicondutora p-n. Para além de poder funcionar como um díodo rectificador, a junção p-n é a base de muitos outros componentes electrónicos e optoelectrónicos de estado sólido, incluindo os transístores bipolares e os díodos laser.

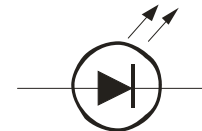
Zener diodes – used for establishing a reference voltage



Varactor diodes – used as variable capacitors



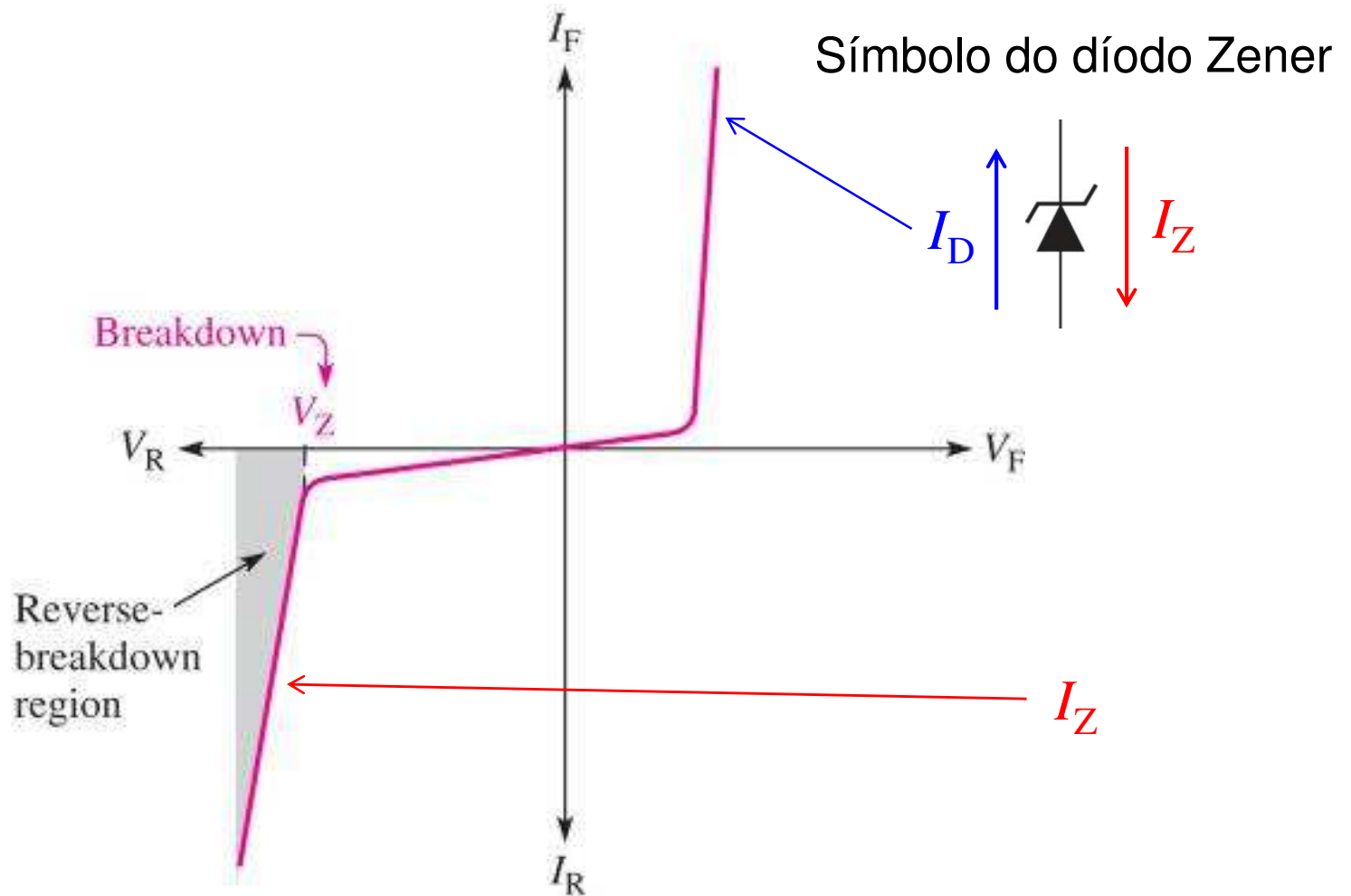
Light-emitting diodes – used in displays



Photodiodes – used as light sensors

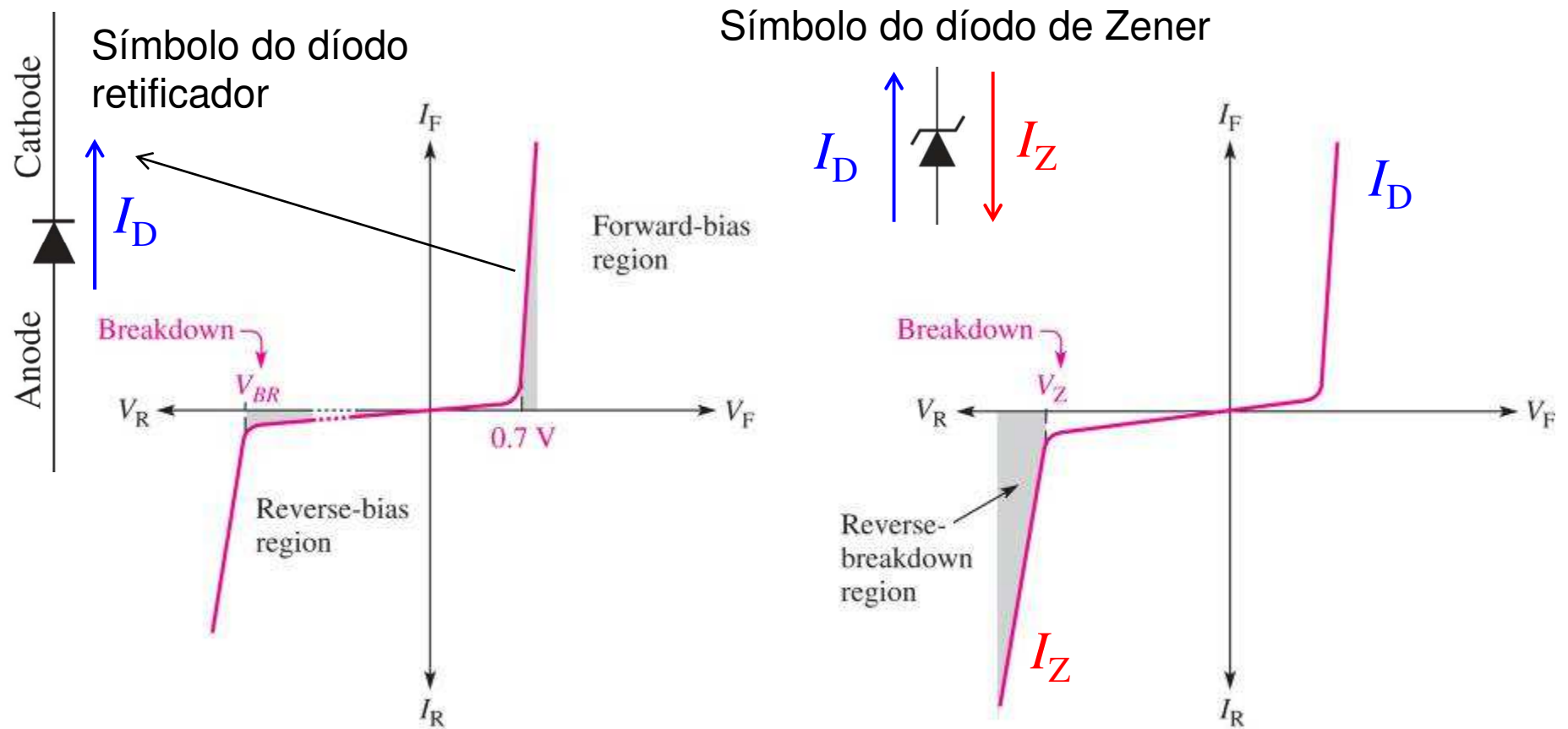


Curva I-V de um díodo Zener



(b) The normal operating region for a zener diode is shaded.

Diode V - I characteristic illustrating the operation of a Zener diode compared to a rectified diode.



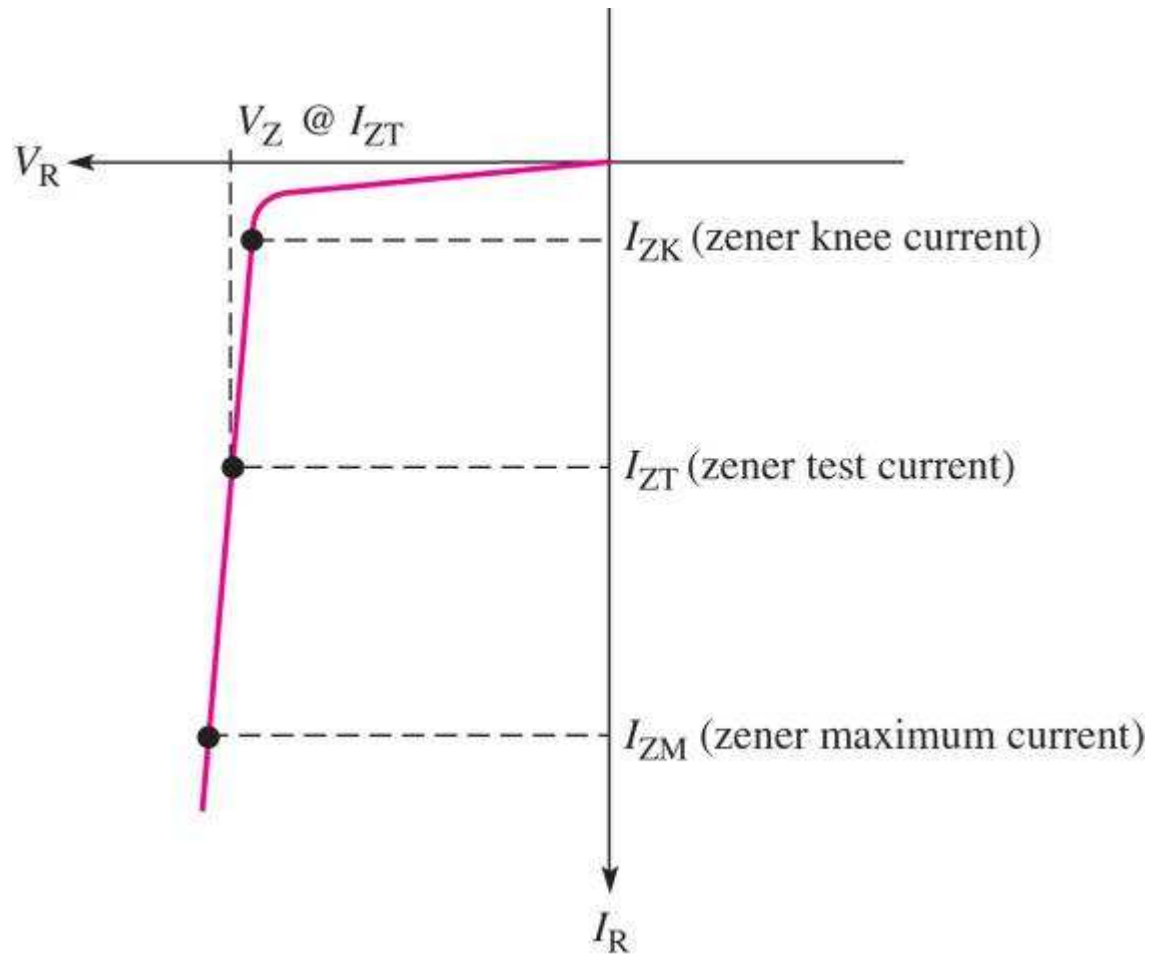
(a) The normal operating regions for a rectifier diode are shown as shaded areas.

(b) The normal operating region for a zener diode is shaded.

The slope of the reverse-breakdown region is exaggerated to show detail.

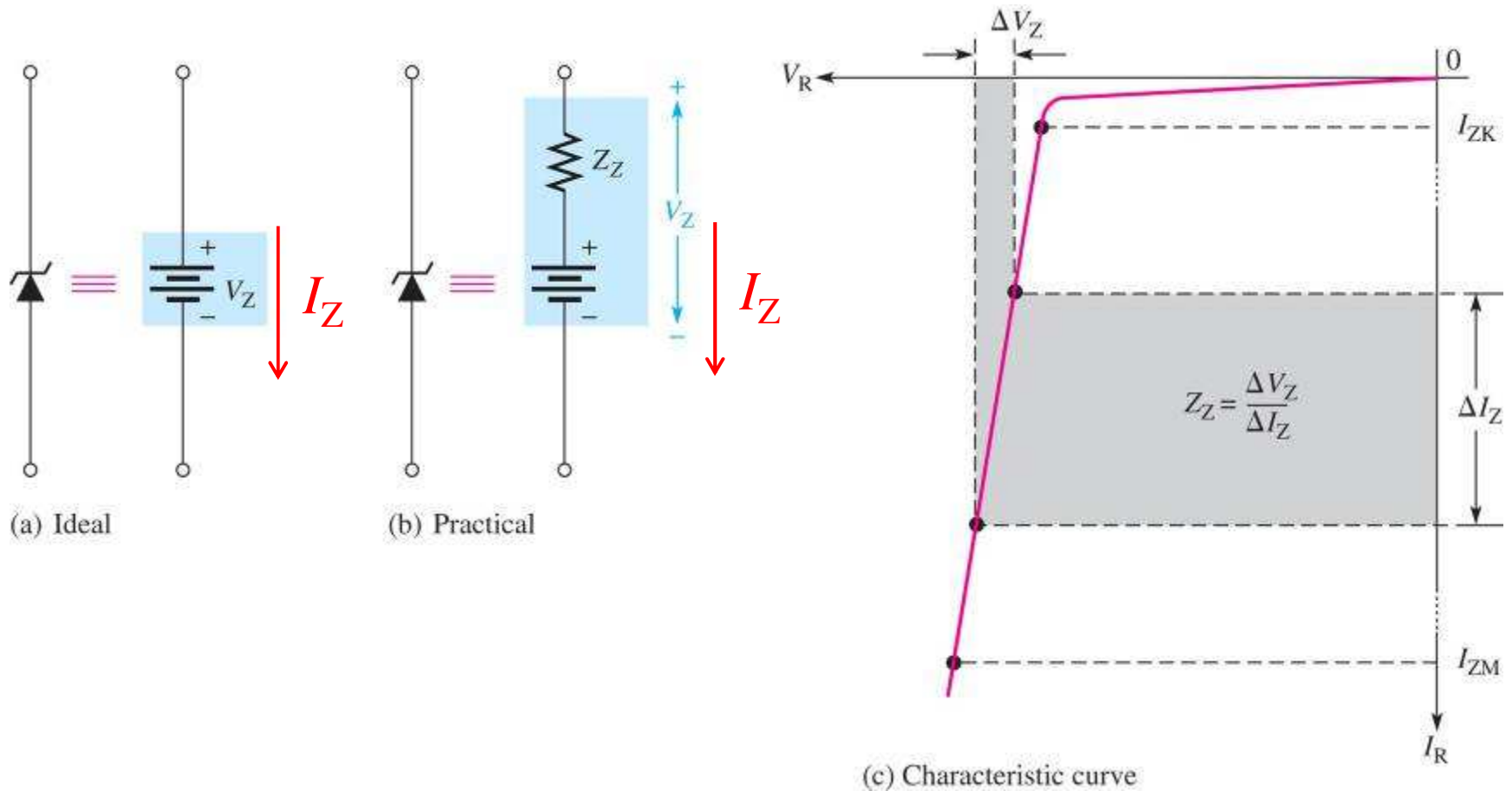
Reverse characteristic of a Zener diode.

V_Z is usually specified at the Zener test current, I_{ZT} and is designated V_{ZT} .



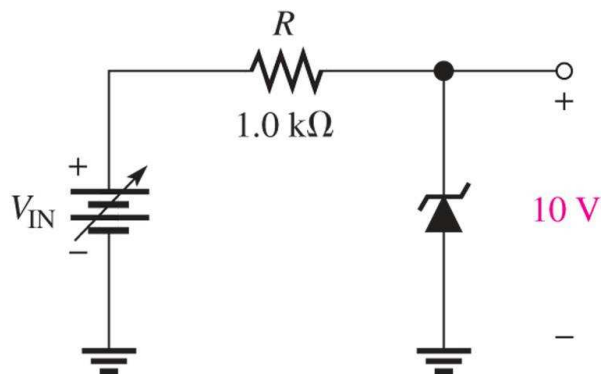
Zener equivalent circuits

The slope is exaggerated to clarify the definition of Z_Z

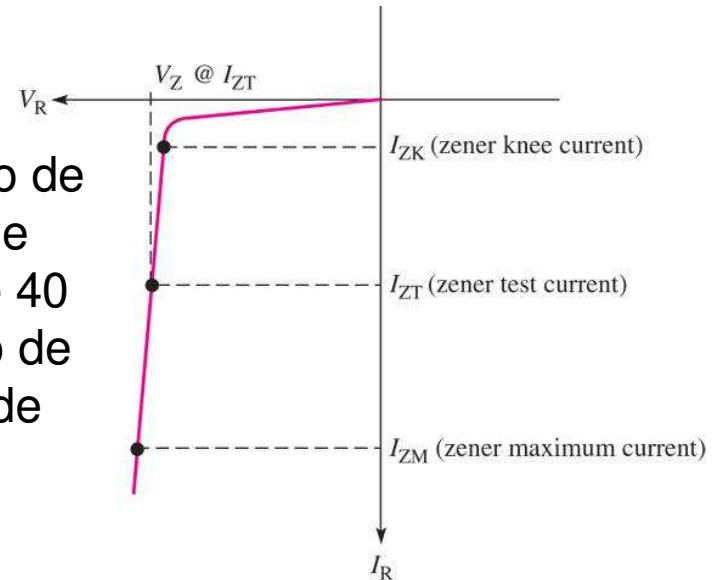


Regulação de tensão usando um diodo Zener

$$V_{IN} > V_Z$$



Se o diodo Zener assegurar a regulação de tensão para valores de corrente entre 4 mA e 40 mA, qual é o intervalo de de tensão que ele pode regular?



Consideremos o valor mínimo de corrente: 4 mA

$$V_R = (4 \text{ mA})(1.0 \text{ k}\Omega) = 4 \text{ V}$$

$$V_R = V_{IN} - V_Z$$

$$V_{IN} = V_R + V_Z = 4 \text{ V} + 10 \text{ V} = 14 \text{ V}$$

Consideremos agora o valor máximo de corrente: 40 mA

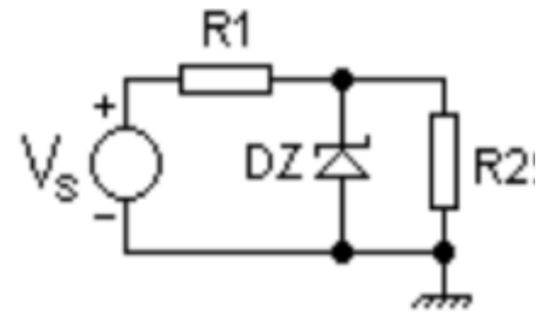
$$V_R = (40 \text{ mA})(1.0 \text{ k}\Omega) = 40 \text{ V}$$

$$V_{IN} = 40 \text{ V} + 10 \text{ V} = 50 \text{ V}$$

Reguladores Lineares

Os reguladores são circuitos que permitem obter uma tensão contínua a partir de outra tensão contínua. Dividem-se em dois grandes grupos: **reguladores lineares** e **reguladores comutados**. Um exemplo de um regulador linear básico é mostrado na figura. Neste, a tensão regulada é aquela que aparece aos terminais da resistência R2. Esta resistência representa a carga (i.e., circuito alimentado pelo regulador) à qual queremos fornecer uma alimentação.

Regulador básico com díodos de Zener. A corrente I_Z nos díodos de Zener é positiva se se considerar que flui de cima para baixo nos esquemas, mas negativa se se considerar a convenção geralmente aplicada aos díodos. R2 é a resistência de carga em cujos terminais a tensão é regulada, representando o circuito alimentado pelo regulador.



No laboratório faça $V_S = 15\text{ V}$ e use um Zener com uma tensão V_S situada entre 5 e 10 V. Os Zeners que tem à sua disposição no laboratório dissipam no máximo $P_{MAX} = 0,5\text{ watt}$. A corrente I_Z tem dois limites: um valor mínimo, I_{Zmin} , necessário para que a regulação do Zener corresponda ao seu V_Z ; e um valor máximo, I_{Zmax} , deduzido a partir da potência máxima que o dispositivo pode dissipar ($P_{MAX} = V_Z I_{Zmax}$).

Nos díodos de Zener do laboratório considere $I_{Zmin} = 5\text{ mA}$. Para um dado Zener, o valor da resistência R1 no regulador tem de ser escolhido por forma a não violar P_{MAX} quando o regulador está em vazio ($R2 \text{ @ } \infty$) e para suprir a corrente máxima que se pretende fornecer à carga R2 (que será sempre menor que I_{Zmax}) somada à corrente mínima no Zener, I_{Zmin} . Construa e teste o regulador da figura 2. Para o Zener que selecionou, e escolhendo para R2 um valor típico entre 500 Ω e 1,5 k Ω , dimensione R1 por forma a satisfazer os requisitos mencionados. Depois verifique se o seu regulador dá uma tensão aproximadamente constante na saída quando R2 varia de um fator de 10 (porém dentro dos limites do regulador).

Díodo de Zener como regulador de tensão

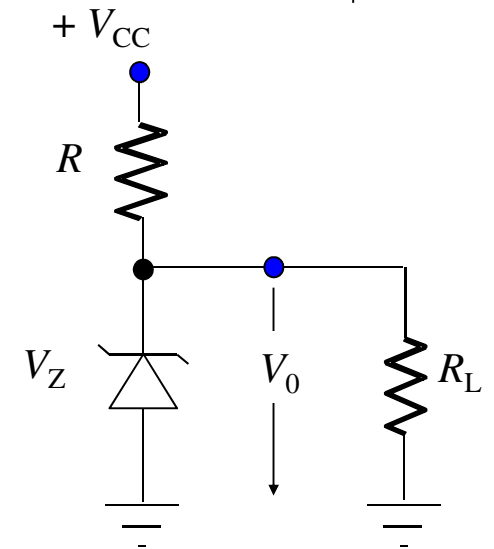
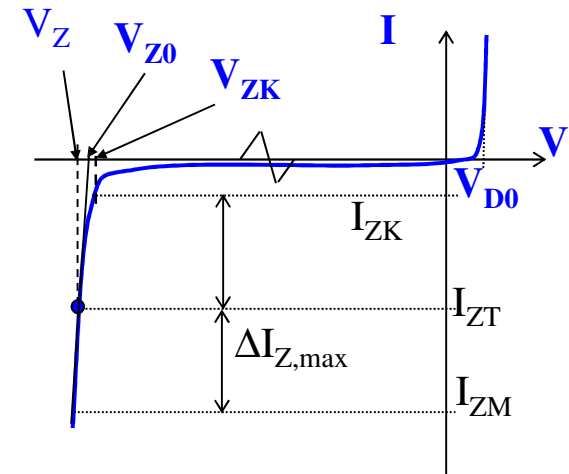
Os **díodos de Zener** são junções p-n **especialmente** fabricadas para operarem na região de ruptura (ou de Zener), i.e., numa zona de polarização inversa onde a tensão se mantém praticamente constante, mesmo que a corrente varie significativamente. Considere o circuito da figura ao lado. **Se a carga estiver desligada**, flui no díodo uma corrente inversa $I_{ZT}=(V_{CC}-V_{ZT})/R$.

Nestas condições dissipa-se no díodo uma potência $P=V_Z \cdot I_{ZT}$ (o conhecimento deste valor é fundamental para a escolha do díodo.)

E se a tensão de alimentação V_{CC} se alterar? Da análise da característica na região de Zener, verifica-se que variações significativas de corrente no díodo pouco influem no valor da tensão aos seus terminais. A **resistência dinâmica** (incremental, diferencial ou de Zener) na região de Zener, r_Z , é: $r_Z=\Delta V_Z/\Delta I_Z$.

A resistência R e a resistência de Zener **formam um divisor de tensão**, e como r_Z é, em geral, muito pequena, quando comparada com R , as flutuações de tensão no díodo, devidas às variações da tensão de alimentação, são bastante atenuadas (admitindo, claro, que o díodo continua a operar na região de ruptura ou de avalanche, i.e., $I_Z \geq I_{ZK}$): $\Delta V_Z=r_Z/(r_Z+R) \cdot \Delta V_{CC}$; $\Delta V_Z=r_Z \cdot \Delta I_Z$; $V_R(I_Z)=V_{CC}-V_Z$; $V_{CC}=I_Z \cdot R + V_0$.

Região de ruptura ou de zener



Díodo de Zener como regulador de tensão

Ligando a carga R_L , a corrente no díodo vai diminuir. Para que o díodo Zener continue a desempenhar a sua função, é essencial que a corrente que percorre o díodo seja suficiente para manter o díodo na região de ruptura ou avalanche, i.e., $I_Z \geq I_{ZK}$.

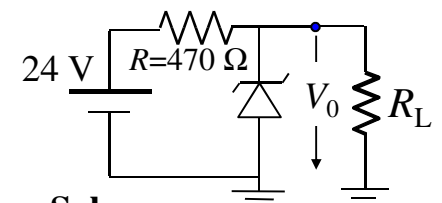
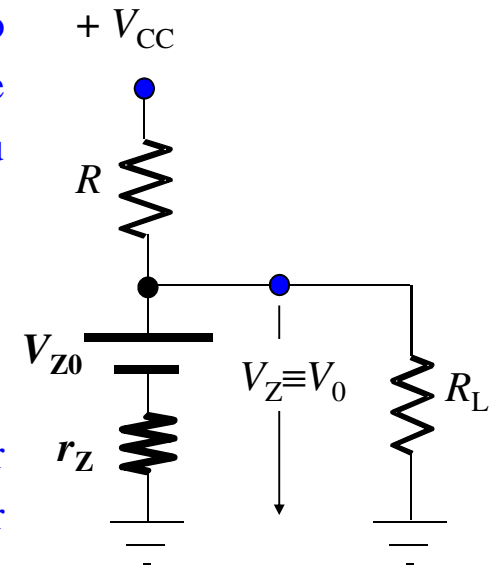
Assumindo que $V_Z \geq V_{ZK}$, em R_L vai circular a corrente

$$I_L = V_Z / R_L; \quad V_{CC} = I_R \cdot R + R_L \cdot I_L \quad \text{com} \quad I_Z = I_R - I_L.$$

IMPORTANTE: O raciocínio só é válido se o valor de $I_Z (= I_{ZT} - I_L)$ assegurar a manutenção do díodo na zona de avalanche, i.e., se $I_Z \geq I_{ZK}$. Assim, qualquer alteração da resistência de carga que não desvie o ponto de funcionamento do Zener da região (I_{ZK}, I_{ZM}) , não altera o bom funcionamento do regulador, i.e., não varia significativamente V_0 . É conveniente, antes de usar um zener, verificar a respectiva característica I-V.

Problema: Determine as correntes mínima e a máxima na resistência de carga que asseguram que o Zener actua como regulador. Qual o valor mínimo de R_L que pode ser usado? $I_{ZK} = 3 \text{ mA}$; $I_{ZM} = 90 \text{ mA}$; Assuma que $V_Z = 12 \text{ V}$ e $R_Z = 0 \Omega$ em todo o intervalo de correntes.

Floyd 5ªEd, Fig. 17-51



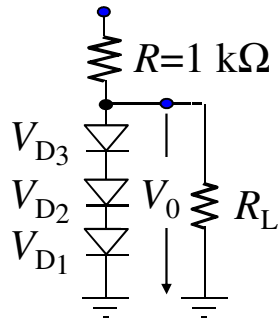
Sol:

$$I_L = 0 \text{ A}, 22.5 \text{ mA},$$

$$R_L = 533 \Omega.$$

Exercícios: Reguladores de tensão com díodos Zener

$V_{CC}=10\text{ V} \pm 10\%$



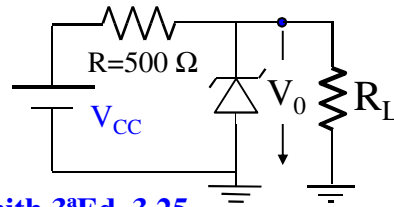
E se a tensão a regular for baixa? Os díodos zener apresentam transições pouco abruptas, e não são, portanto, a escolha mais favorável. Neste caso, a situação pode ser melhorada usando um número conveniente de díodos “normais” associados em série, polarizados directamente. No caso da Figura ao lado tem-se $V_0=V_{D1}+V_{D2}+V_{D3}$.

Exercício 1: Considere o circuito ao lado. Os três díodos, quando em franca condução, garantem que $V_0 \approx 2.1\text{ V}$. Determine a variação percentual da tensão regulada, em aberto e com uma carga de $1\text{ k}\Omega$, quando a tensão de alimentação varia $\pm 10\%$. Tome $r_D=6.3\ \Omega$. **Sol:** $\Delta V_0(\Delta V_{CC}=2\text{ V})=-37.1\text{ mV}$ e $\Delta V_0=-39.7\text{ mV}$.

Sedra & Smith 3ªEd, 3.21

Exercício 2: O díodo zener no circuito abaixo apresenta as seguintes características: $V_{ZT}=6.8\text{ V}$ para $I_{ZT}=5\text{ mA}$, $r_z=20\ \Omega$ e $I_{ZK}=0.2\text{ mA}$. A tensão V_{CC} com $+10\text{ V}$ nominais, pode apresentar uma variação de $\pm 1\text{ V}$.

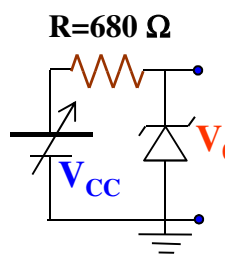
Determine V_0 com V_{CC} à tensão nominal, e a variação de V_0 resultante da variação $\pm 1\text{ V}$ de V_{CC} . Calcule a variação em V_0 resultante da ligação de $R_L=2\text{ k}\Omega$.



Sedra & Smith 3ªEd, 3.25

Sol: $I_Z=I=(V_{CC}-V_{ZT})/R=6.4\text{ mA}$; $V_0=V_{ZT}+(I_Z-I_{ZT})r_z=6.83\text{ V}$; $\Delta V_0=\pm 1 \times r_z/(R+r_z)=\pm 38.5\text{ mV}$. Quando a carga é ligada a corrente na carga é 3.4 mA , e a variação da corrente no díodo é -3.4 mA , originando um decréscimo de $\Delta V_0=-68\text{ mV}$ na tensão da carga.

Exercício 3: Determine as tensões V_{CC} mínima e máxima que podem ser reguladas pelo díodo zener com $I_{ZK}=1\text{ mA}$; $I_{ZM}=15\text{ mA}$; $V_{ZT}=5.1\text{ V}$ @ $I_{ZT}=7\text{ mA}$, e $Z_Z=10\ \Omega$.



Floyd 5ªEd, 17-48

Sol: Para $I_Z=I_{ZK}=1\text{ mA}$, a tensão de saída é $V_{0,\min}(I_{ZK})=V_{ZT}-Z_Z\Delta I_Z=V_{ZT}-Z_Z(I_{ZT}-I_{ZK})=5.1-0.06=5.04\text{ V}$;

a tensão V_{CC} mínima é

$$V_{CC,\min}=R \cdot I_{ZK}+V_{0,\min}=5.72\text{ V};$$

Para $I_Z=I_{ZK}=15\text{ mA}$, a tensão de saída é

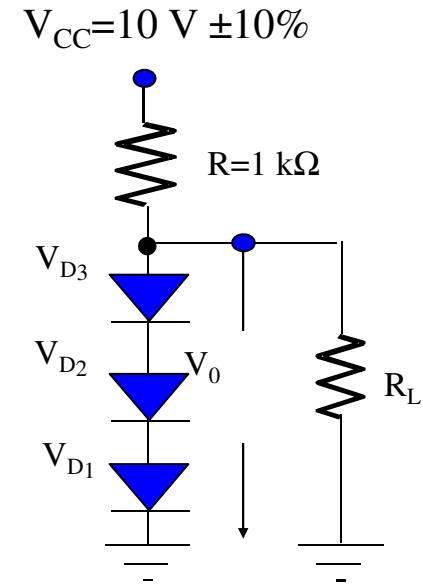
$$V_{0,\text{Máx}}(I_{ZM})=V_{ZT}+Z_Z(I_{ZM}-I_{ZT})=5.18\text{ V};$$

$$V_{CC,\text{Máx}}=R \cdot I_{ZM}+V_{0,\text{Máx}}=15.38\text{ V}.$$

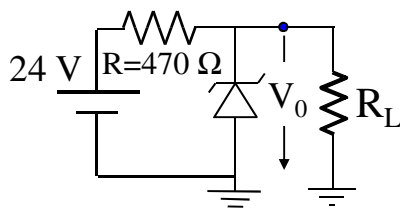
Exercícios

Ex1 pag 69: O conjunto dos três díodos garante uma tensão de 2.1 V. Determine R_D , a variação percentual da tensão regulada, em aberto e com uma carga de 1 k Ω , quando a tensão de alimentação varia $\pm 10\%$.

Sol: $I=(V_{CC}-2.1)/R=7,9$ mA, $R_D=V_T(293\text{ K})/I=6,3$ Ω ; $R_{3D}=18,9$ Ω . A resistência dos 3 díodos e R formam um divisor de tensão. A variação da tensão ΔV_0 devido a ΔV_{CC} é $1 \times 18,9/(1000+18,9)=18,5$ mV (0,9%). Quando se liga a carga, a corrente através dos díodos decresce de 2,1 mA, resultando num decréscimo da tensão aos terminais dos 3 díodos $\Delta V_0=-2,1$ mA \times 18,9 = -39.7 mV, ou 13,2 mV por díodo.

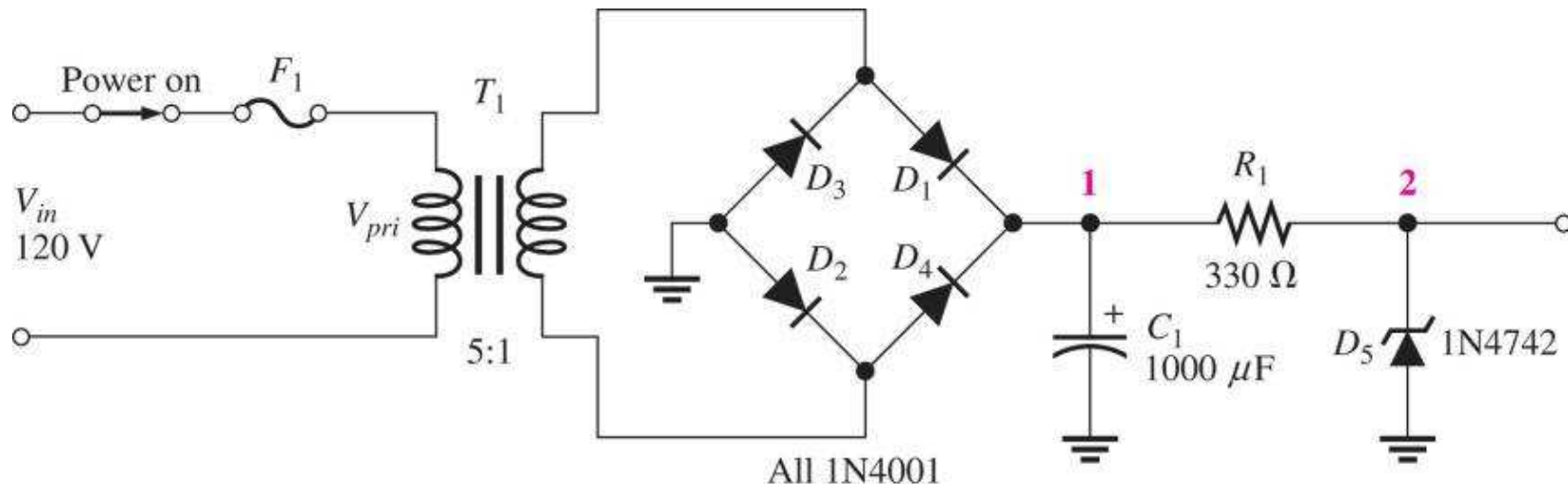


Ex. 2: Determine as correntes mínima e a máxima na resistência de carga que asseguram que o zener actua como regulador. Qual o valor mínimo de R_L que pode ser usado? $I_{ZK}=3$ mA; $I_{ZM}=90$ mA. Para simplificar, assuma que $V_Z=12$ V e $R_Z=0$ Ω em todo o intervalo de correntes.



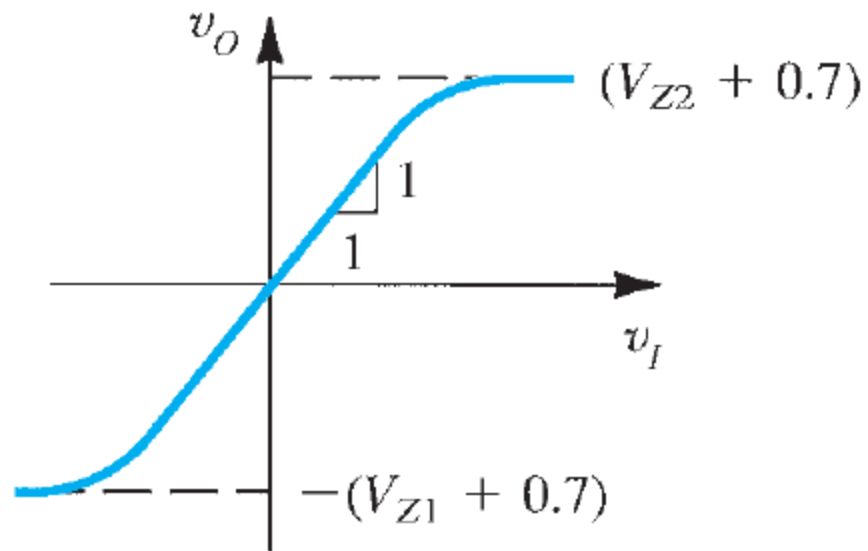
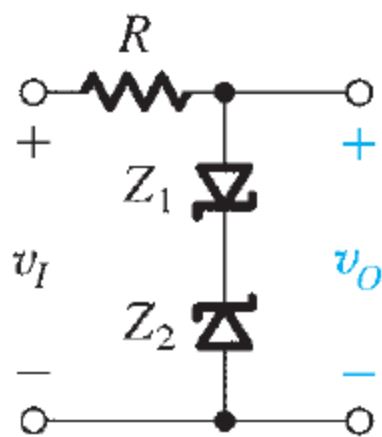
Sol: A corrente mínima (menor possível) na carga é 0 A. Neste caso a corrente no zener é igual a 25,5 mA ($[24-12]/470$), que é inferior a $I_{ZM}=90$ mA; O valor máximo da corrente na carga permitido ocorre quando $I_Z=I_{ZK}=3$ mA, obtendo-se $I_{LM\acute{a}x}=25,5-3=22,5$ mA. O valor mínimo de R_L igual a $12\text{ V}/I_{LM\acute{a}x}=533$ Ω .

Regulação de tensão usando um diodo Zener



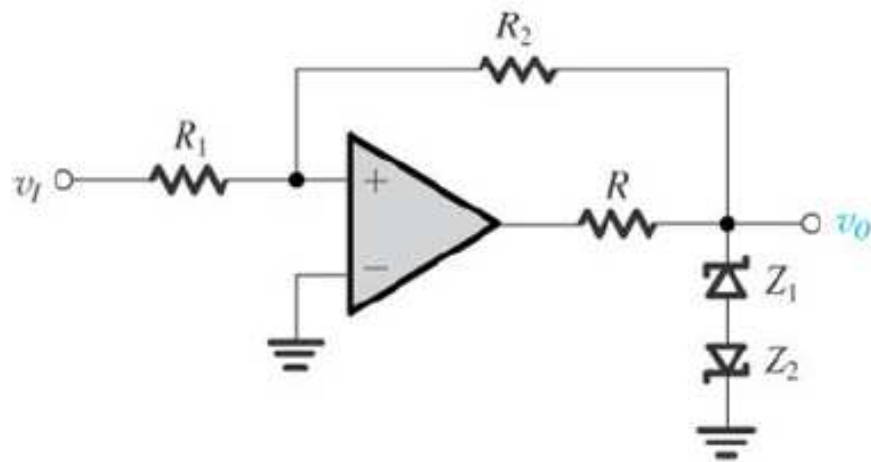
Normalmente usam-se, como vimos, reguladores de tensão integrados, que são circuitos integrados capazes de proporcionar uma tensão constante e regulável entre o terminal de saída e o terminal comum à entrada e à saída, dependendo da interação com o circuito exterior. As características destes dispositivos podem ser consultadas em catálogos de electrónica linear (assim como as de outros elementos lineares). Um conjunto de reguladores de uso geral é a série de reguladores 78XX, onde XX representa os valores da tensão de saída (XX volt). Por exemplo, o regulador 7815 apresenta na sua saída uma tensão de 15 V. Em geral, a atenuação da ondulação (ripple) é bastante elevada, várias dezenas de dB. Estes dispositivos estão protegidos internamente contra curto-circuitos e sobrecargas. Nos catálogos são fornecidas, pelos fabricantes, sugestões de circuitos de aplicação.

Limitadores com díodos de Zener



(a)

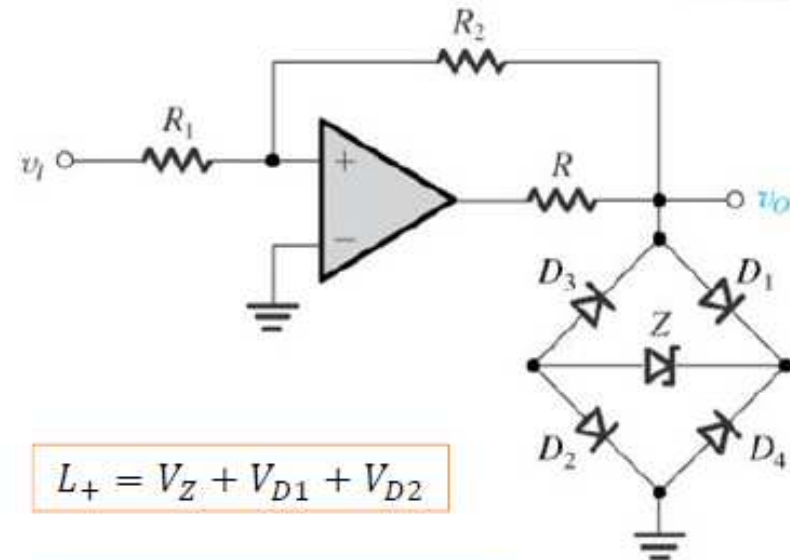
Limitadores com díodos de Zener



$$L_+ = V_{Z1} + V_D$$

$$L_- = -(V_{Z2} + V_D)$$

Nota: O valor R deve permitir o correto funcionamento dos díodos zener.



$$L_+ = V_Z + V_{D1} + V_{D2}$$

$$L_- = -(V_Z + V_{D3} + V_{D4})$$

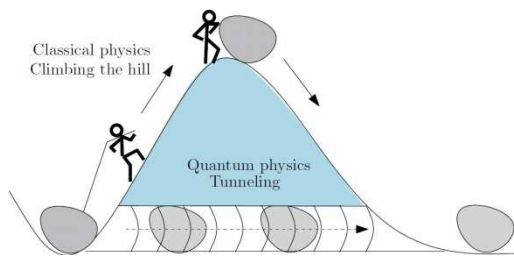
Nota: O valor R deve permitir o correto funcionamento dos díodos de sinal e do díodo zener.

Díodo túnel (díodo de efeito de túnel) e díodos Schottky

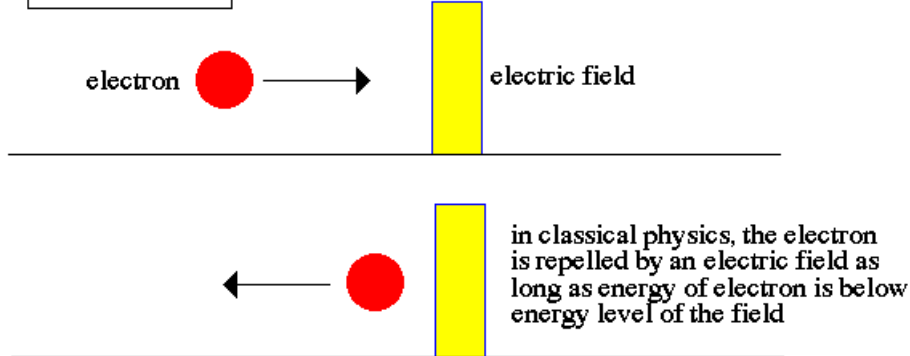
Efeito de túnel

Tunelamento quântico (ou **efeito túnel**) é um fenômeno da [mecânica quântica](#) no qual partículas podem transpor um estado de [energia](#) classicamente proibido. Isto é, uma partícula pode escapar de regiões cercadas por barreiras potenciais mesmo se a sua [energia cinética](#) for menor que a [energia potencial](#) da barreira. Existem muitos exemplos e aplicações para os quais o tunelamento tem extrema importância, podendo ser observado no [decaimento radioativo](#) alfa, na [fusão nuclear](#), na [memória Flash](#), no [díodo túnel](#) e no [microscópio de corrente de tunelamento](#) (STM).^[1]

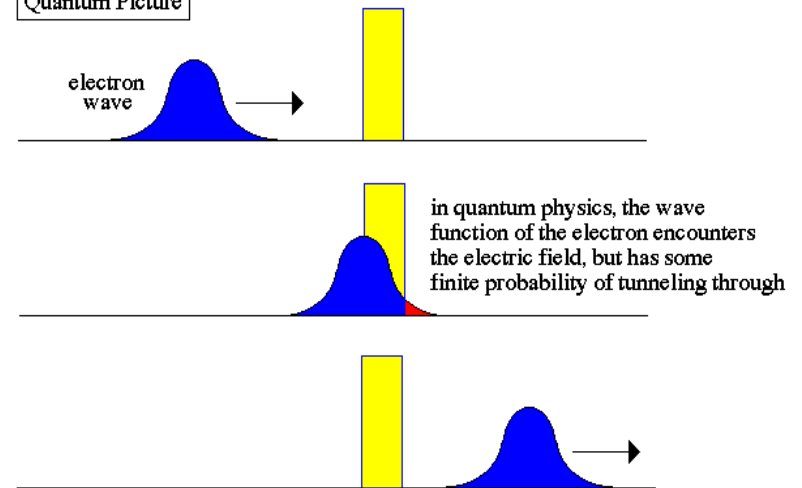
https://pt.wikipedia.org/wiki/Tunelamento_qu%C3%A2ntico



Classical Picture

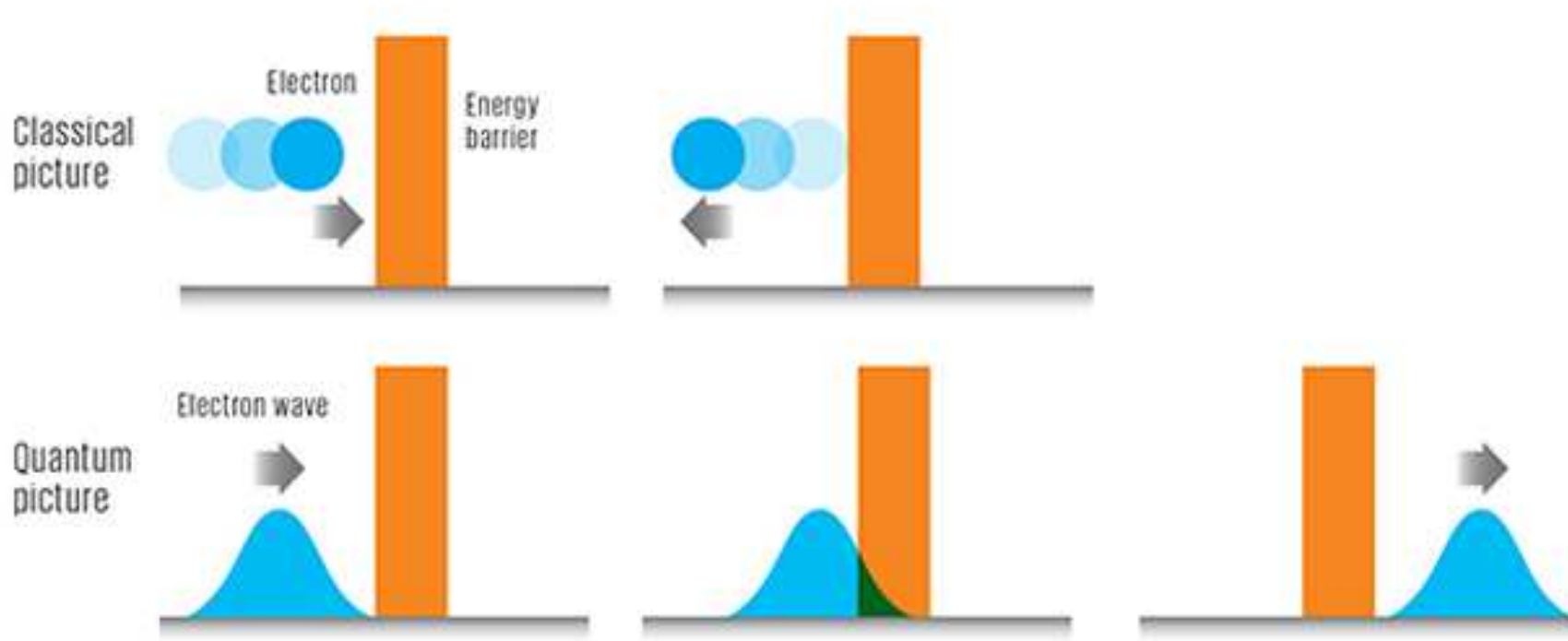


Quantum Picture



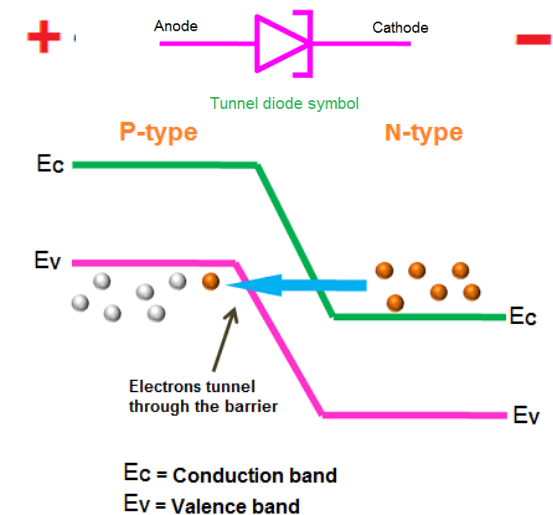
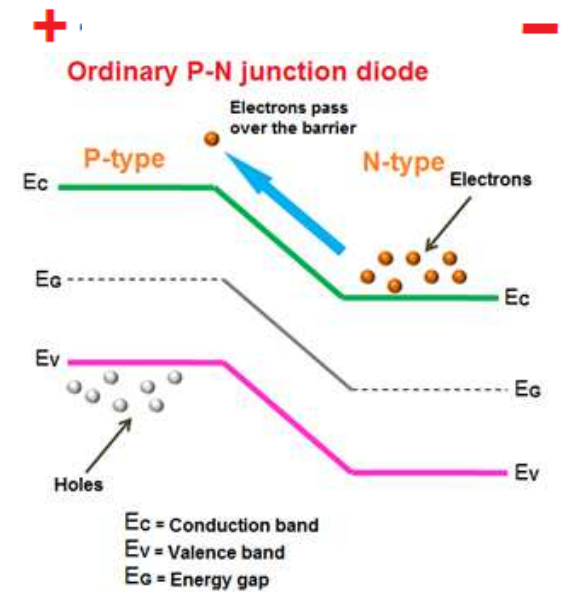
Efeito de túnel

Ver, por exemplo, <https://physicsopenlab.org/2017/05/30/tunnel-effect/>

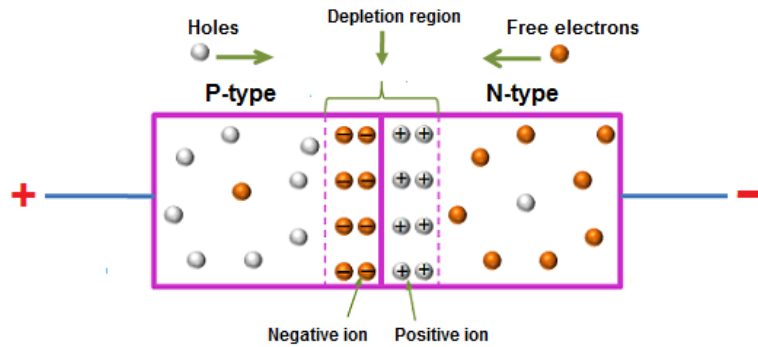


Como funciona um díodo túnel

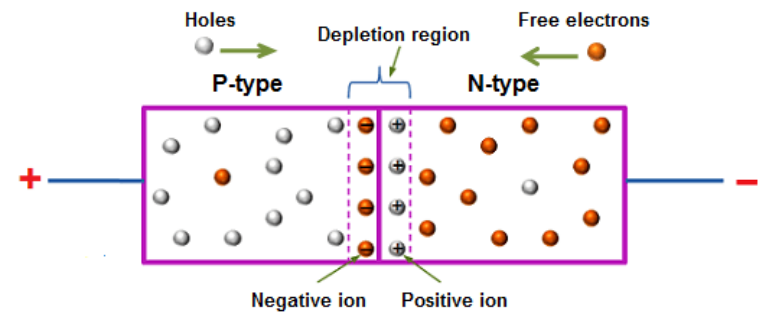
O díodo túnel ou díodo Esaki é uma junção pn fortemente dopada, em que a característica I-V apresenta uma região onde um aumento de tensão aplicada leva a uma diminuição de corrente – região de condutância (resistência) diferencial negativa. Num díodo túnel a corrente é majoritariamente devida ao processo de condução de elétrons por efeito de túnel (um fenômeno explicado pela física/mecânica quântica). O díodo túnel é um dispositivos muito rádio, sendo por isso usado em osciladores e em amplificadores de alta frequência. Estes dispositivo foi inventado por Leo Esaki, em 1958. (Leo Esaki recebeu o prêmio Nobel da Física, em 1973, por ter descoberto o fenômeno de transporte de elétrons por efeito de túnel.) Num díodo túnel a região p do semiconductor atua como ânodo e a região n atua como cátodo. Num díodo túnel, os elétrons fluem diretamente através da região de depleção da banda de condução do lado n para a banda de valência do lado p. Numa junção pn a região de depleção (região onde não há cargas elétricas (elétrons ou lacunas livres) moveis) atua como uma barreira que se opõe ao fluxo de elétrons do lado n e de lacunas do lado p, para os lados p e n respetivamente. A largura da região de depleção depende da densidade de impurezas adicionadas na dopagem. Num díodo túnel o grau de dopagem é muito elevado, e a região de depleção fica muito estreita, permitindo que os elétrons passem diretamente da banda de condução do lado n para a banda de valência do lado p.



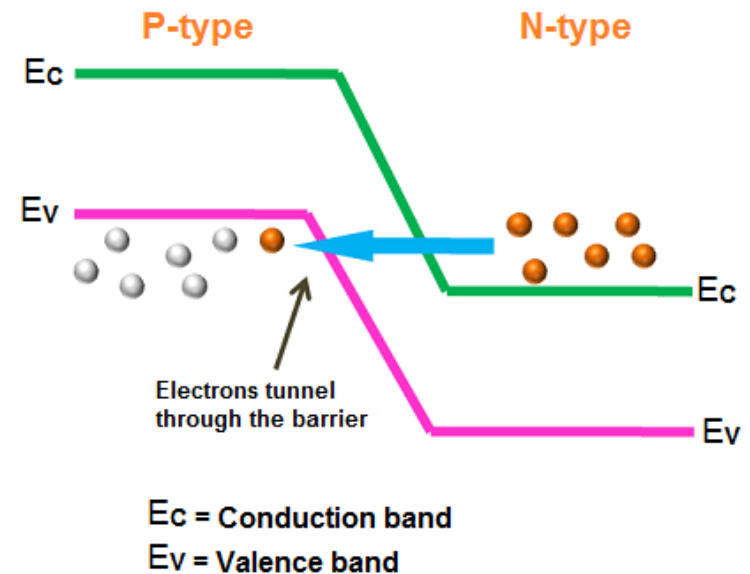
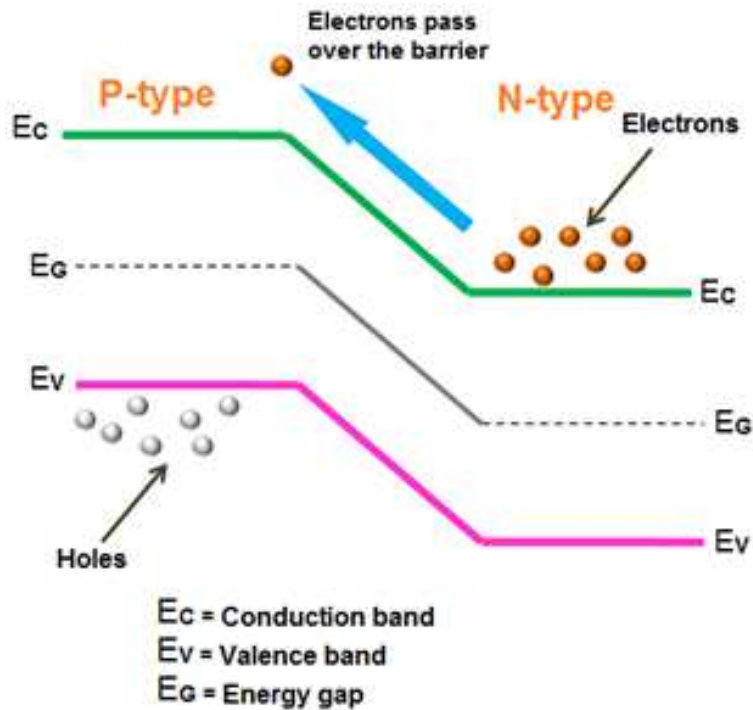
Como funciona um díodo túnel



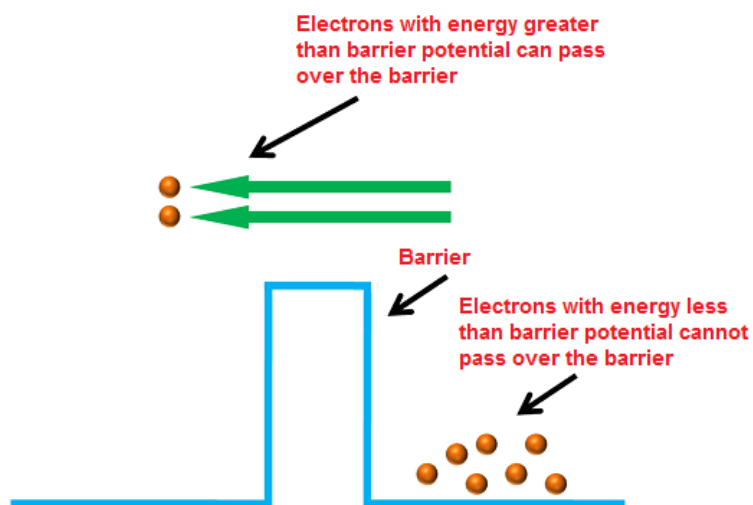
Forward bias p-n junction diode



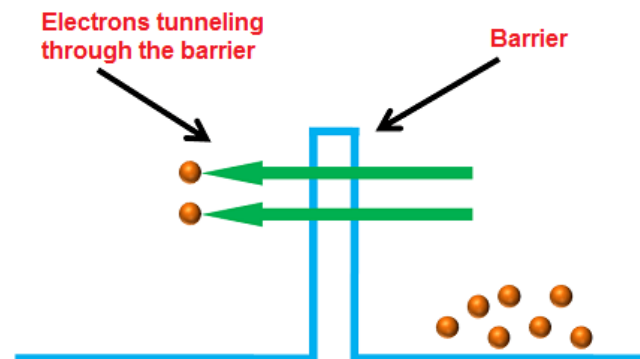
Forward bias tunnel diode



Como funciona um díodo túnel



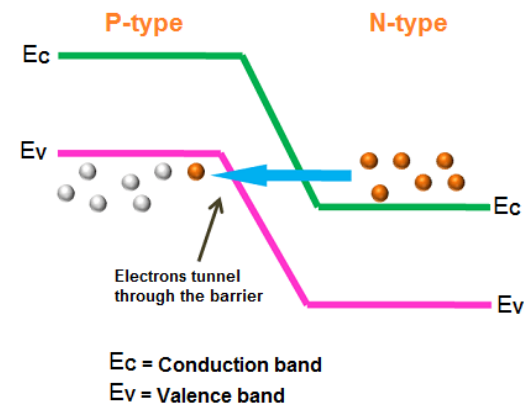
Ordinary p-n junction diode



Tunnel diode

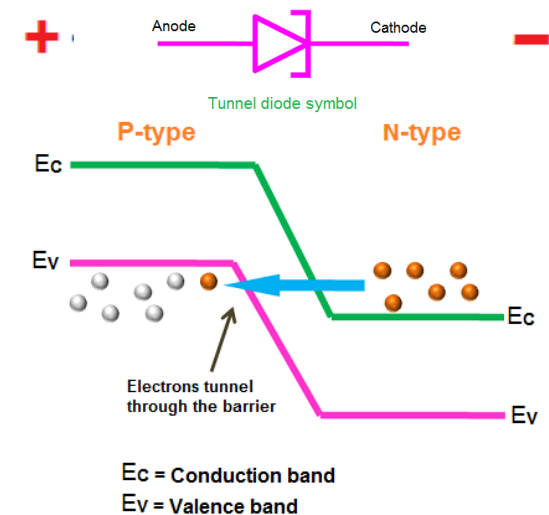
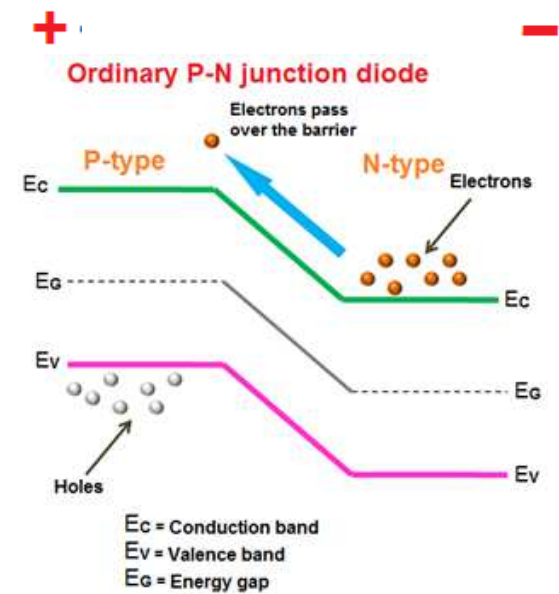
Nos díodos de junção comuns, a corrente é significativa apenas quando a tensão aplicada é igual à altura da barreira de potencial entre o lado p e n, aproximadamente equivalente a 0,7 V para díodos de silício.

Nos díodos túnel uma tensão bastante inferior à altura da barreira é suficiente para produzir uma corrente significativa, porque os elétrões não precisam de subir a barreira de potencial, passando, por efeito de túnel, diretamente da banda de condução do lado n para a banda de valência do lado p.

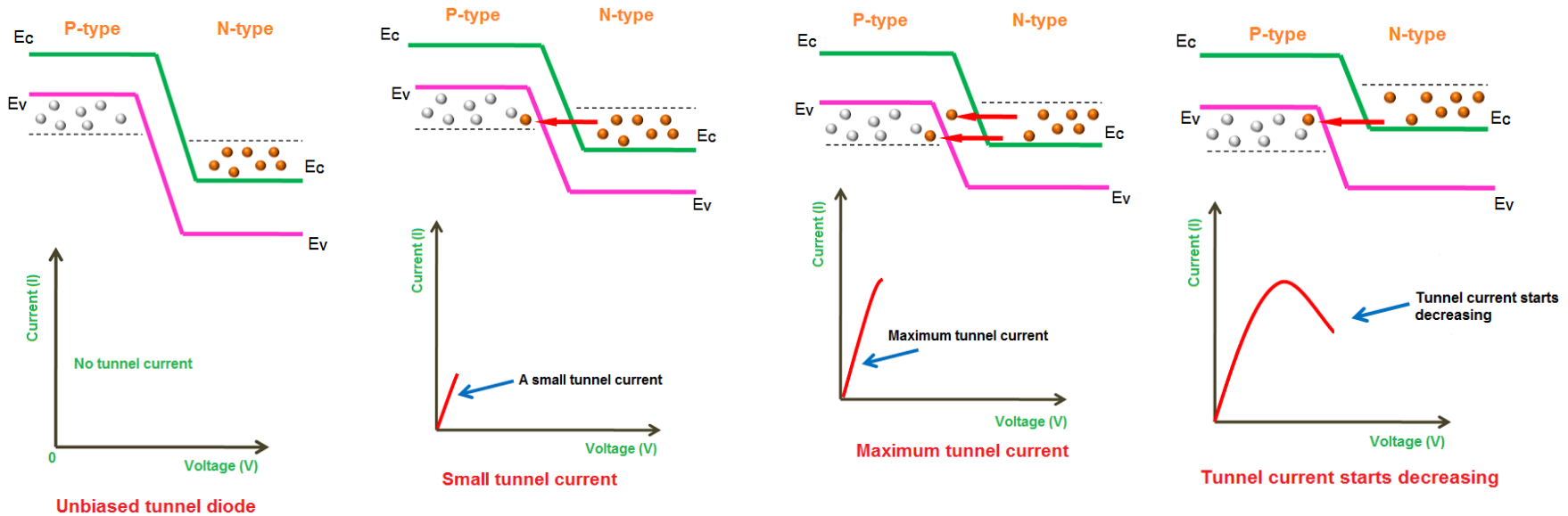


Princípio de funcionamento do díodo túnel

O díodo túnel ou díodo Esaki é uma junção pn fortemente dopada, em que a característica I-V apresenta uma região onde um aumento de tensão aplicada leva a uma diminuição de corrente – região de condutância (resistência) diferencial negativa. Num díodo túnel a corrente é maioritariamente devida ao processo de condução de eletrões por efeito de túnel (um fenómeno explicado pela física/mecânica quântica). O díodo túnel é um dispositivos muito rádio, sendo por isso usado em osciladores e em amplificadores de alta frequência. Estes dispositivo foi inventado por Leo Esaki, em 1958. (Leo Esaki recebeu o prémio Nobel da Física, em 1973, por ter descoberto o fenómeno de transporte de eletrões por efeito de túnel.) Num díodo túnel a região p do semiconductor atua como ânodo e a região n atua como cátodo. Num díodo túnel, os eletrões fluem diretamente através da região de depleção da banda de condução do lado n para a banda de valência do lado p. Numa junção pn a região de depleção (região onde não há cargas elétricas (eletrões ou lacunas livres) moveis) atua como uma barreira que se opõe ao fluxo de eletrões do lado n e de lacunas do lado p, para os lados p e n respetivamente. A largura da região de depleção depende da densidade de impurezas adicionadas na dopagem. Num díodo túnel o grau de dopagem é muito elevado, e a região de depleção fica muito estreita, permitindo que os eletrões passem diretamente da banda de condução do lado n para a banda de valência do lado p.



Como funciona um díodo túnel



Se a tensão aplicada for superior à altura da barreira de potencial passa a dominar a componente da corrente correspondente à da junção pn clássica.

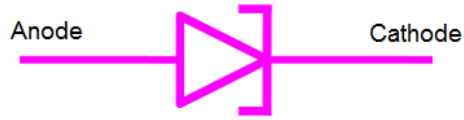
Se o díodo túnel for usado na região da curva I-V em que apresenta condutância (resistência) diferencial negativa o díodo pode ser usado como um amplificador ou um oscilador de alta frequência (até alguns gigahertz).

Região de condutância diferencial negativa

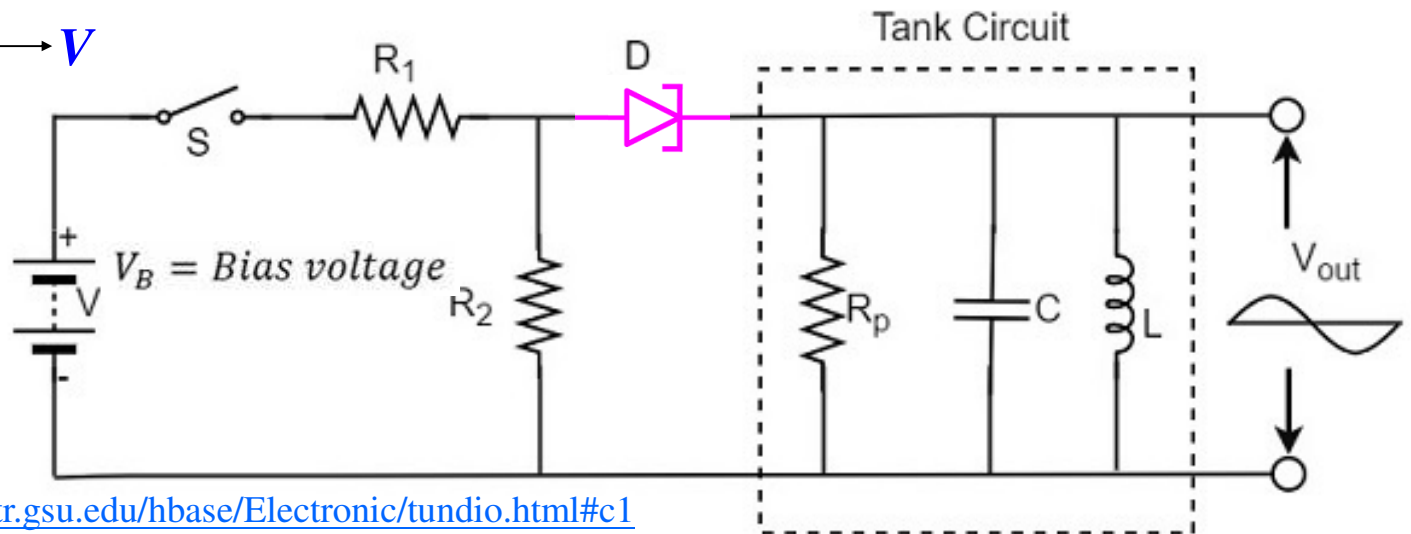
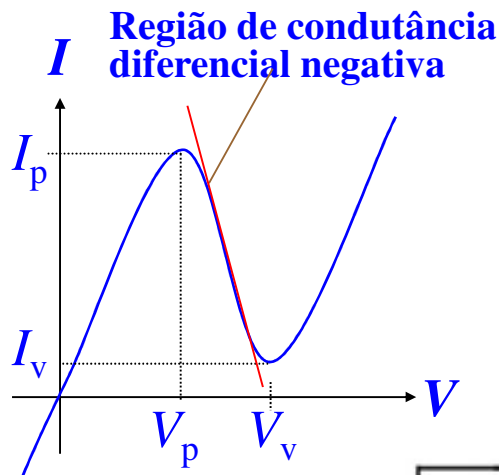
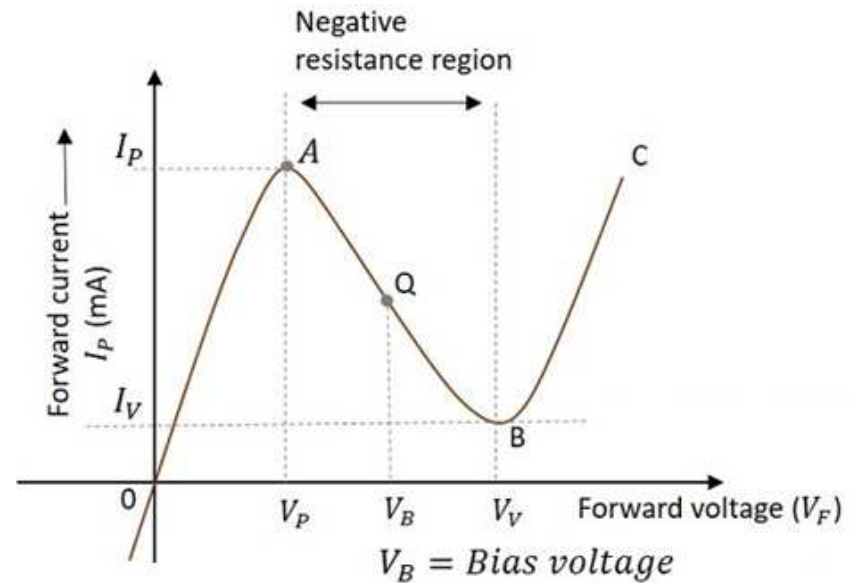
Zero tunnel current; maximum forward current

https://www.tutorialspoint.com/sinusoidal_oscillators/sinusoidal_tunnel_diode_oscillator.htm

Oscilador de diodo túnel (até ~10 GHz)



Tunnel diode symbol



<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/tundio.html#c1>

https://www.tutorialspoint.com/sinusoidal_oscillators/sinusoidal_tunnel_diode_oscillator.htm

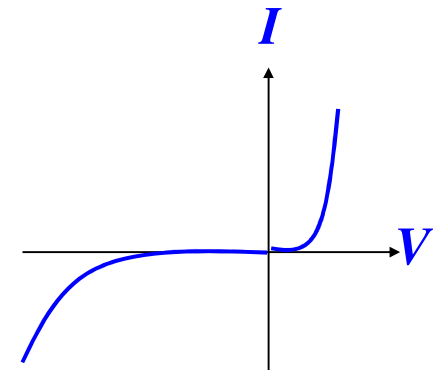
Junções Metal-Semicondutor: barreiras de Schottky e contactos óhmicos

Junções metal-semicondutor: barreiras de schottky e contactos óhmicos

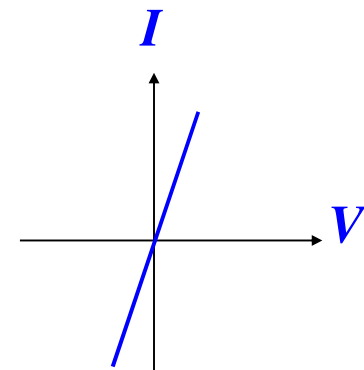
Em geral, o contacto entre um metal e um semicondutor não é óhmico, exibindo um comportamento semelhante ao de uma junção p-n (ver figura ao lado). Neste caso o contacto designa-se por contacto ou barreira de **Schottky** e o dispositivo baseado neste efeito designa-se por **díodo schottky**. A queda de tensão, em condução, nestes díodos é cerca de metade da de uma junção p-n. Estes dispositivos são muito mais rápidos do que o díodo rectificador porque no processo de condução só intervêm os portadores majoritários (não há lugar à recombinação dos portadores minoritários).

Para a junção p-n ter aplicação prática, é necessário fazer a sua ligação com um circuito exterior, i.e., obter duas junções metal-semicondutor (uma no lado n e outra no lado p). Estas junções não devem alterar ou mascarar as propriedades do dispositivo SC em apreço. Por outras palavras, o contacto (junção) metal-semicondutor deve ter uma característica **corrente-tensão linear**, i.e., o contacto deve ser **óhmico**. Claro que o metal a usar depende do material SC de que é feito o dispositivo.

Contato schottky

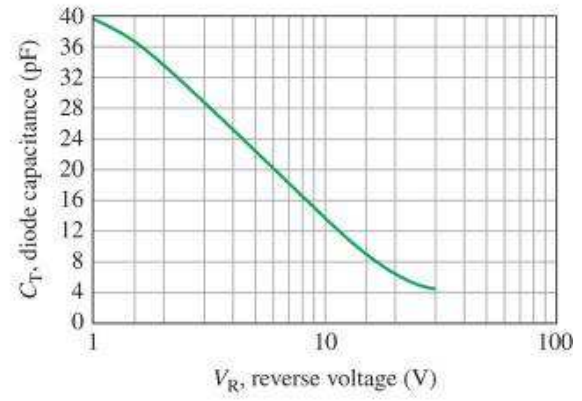
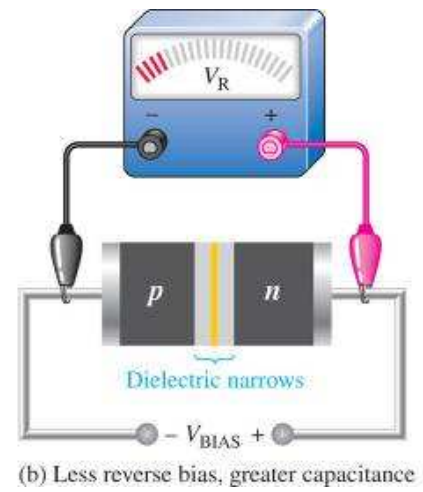
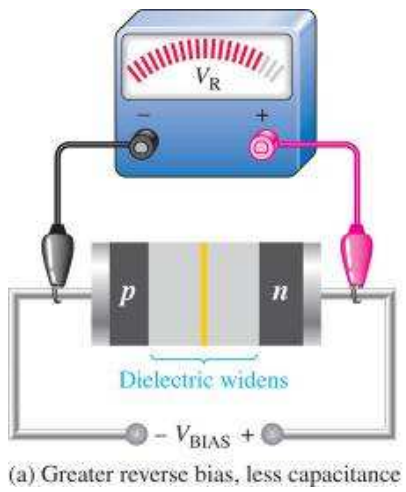
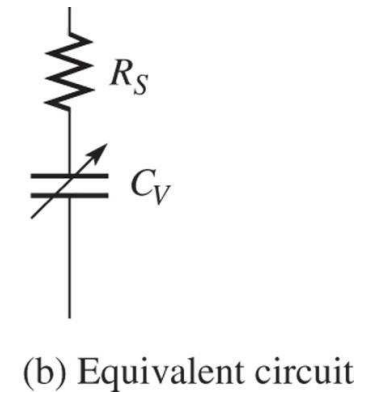
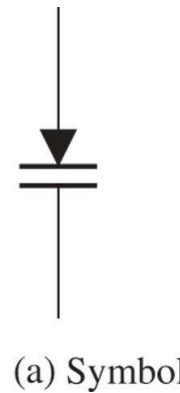
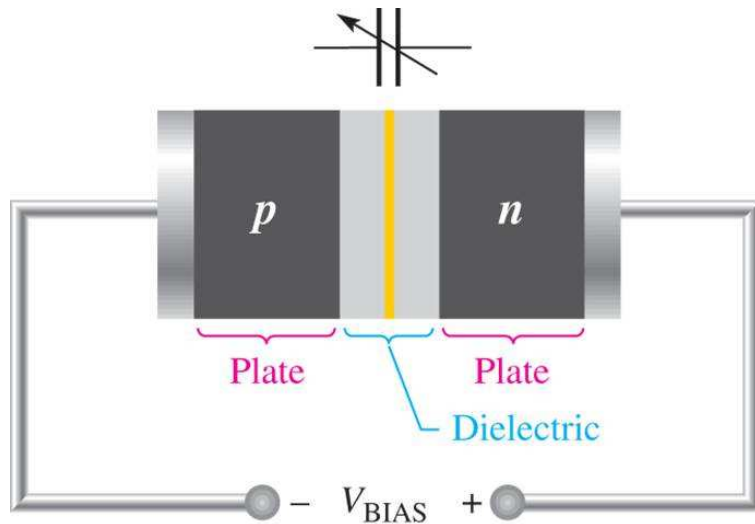


Contato óhmico



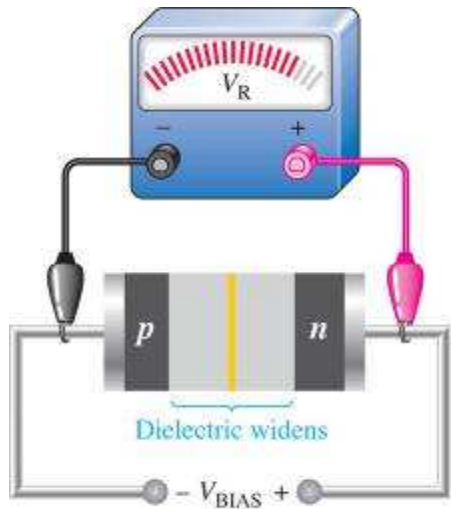
Díodo varactor (capacidade variável)

The reverse-biased varactor diode acts as a variable capacitor

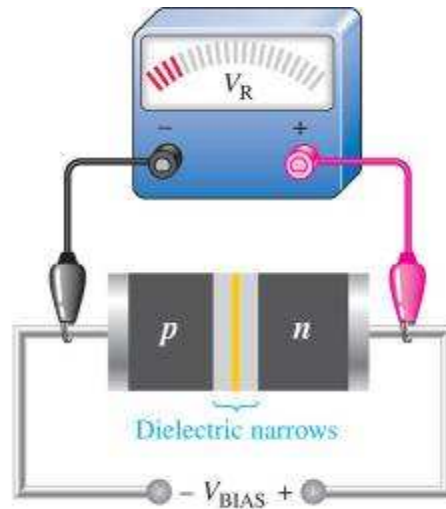


(c) Graph of diode capacitance versus reverse voltage

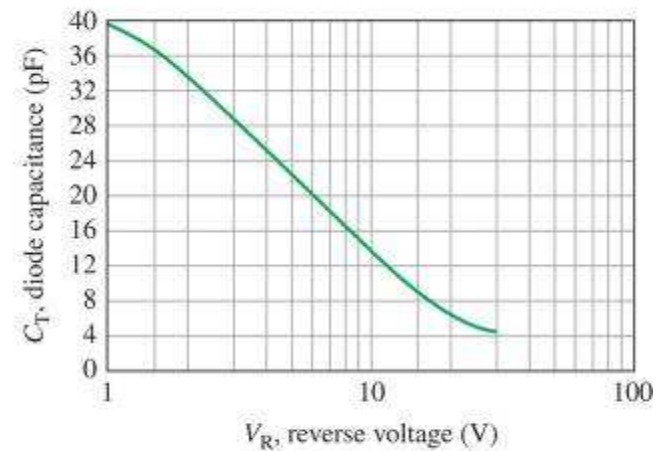
Varactor diode capacitance varies with reverse voltage



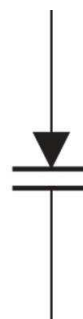
(a) Greater reverse bias, less capacitance



(b) Less reverse bias, greater capacitance



(c) Graph of diode capacitance versus reverse voltage



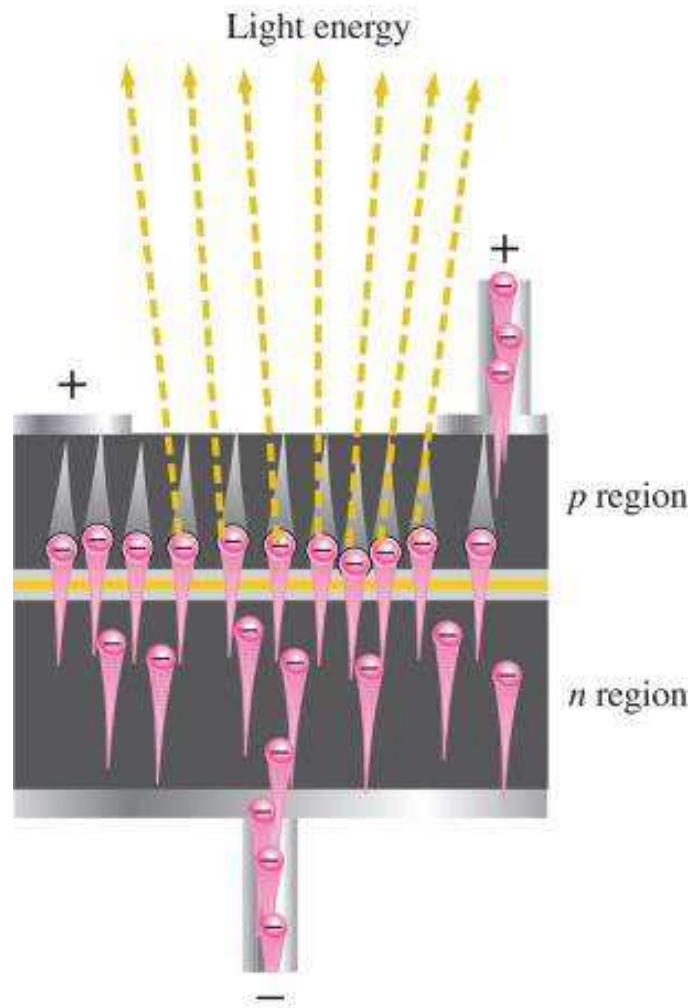
(a) Symbol



(b) Equivalent circuit

Díodo emissor de luz ("Light Emitting Diode", LED) e díodos laser

Light energy Electroluminescence in a forward-biased LED.

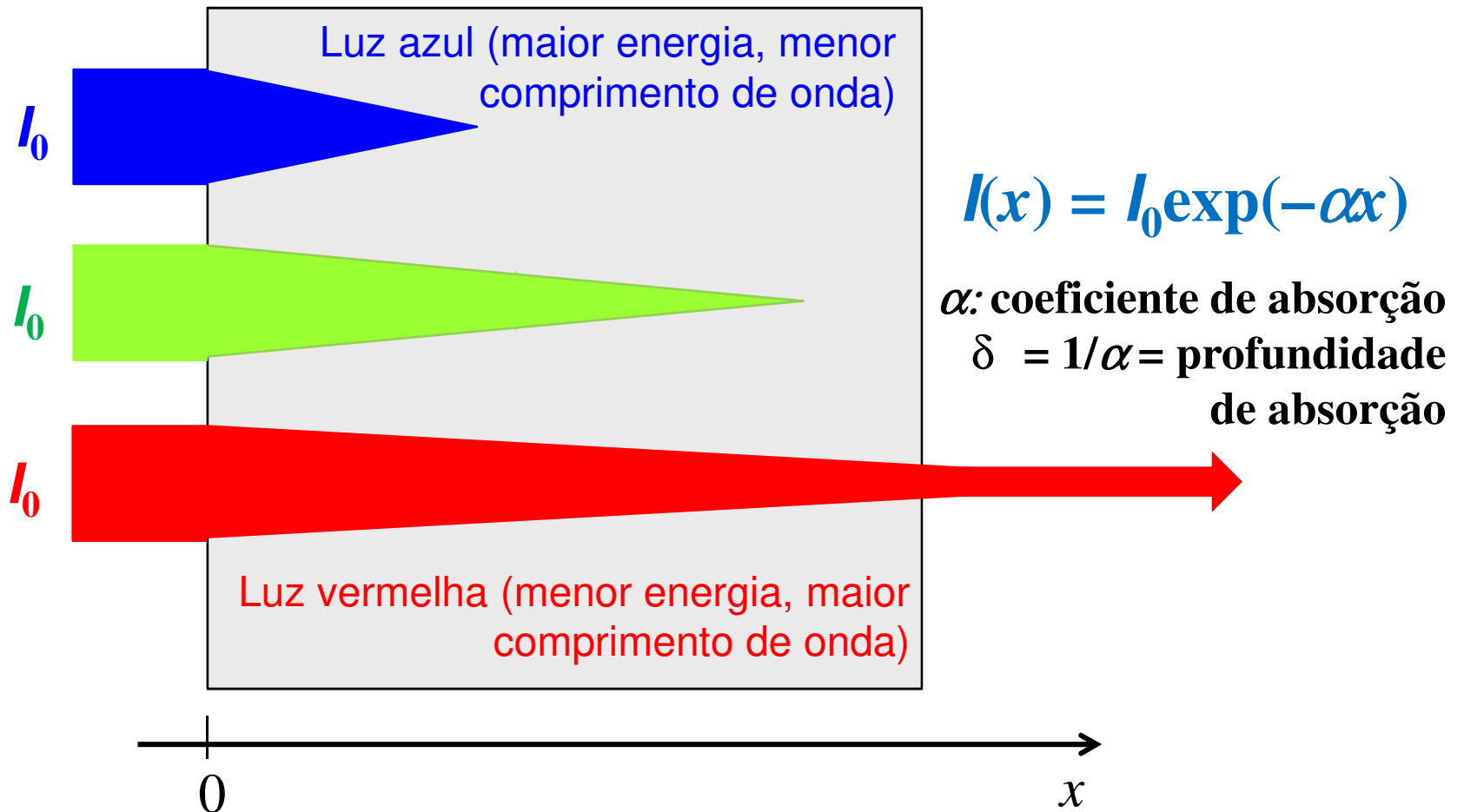


Symbol for an LED.



Absorção de luz pelos materiais

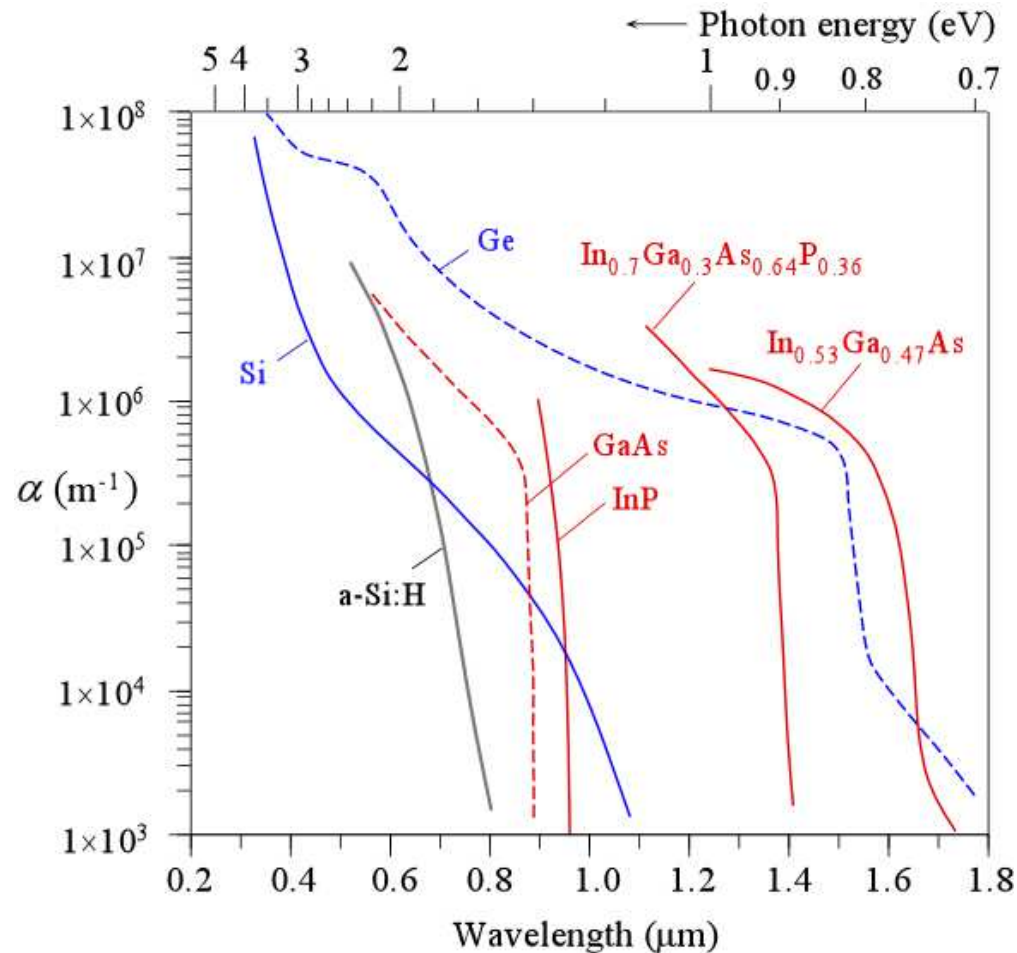
I_0 : intensidade da luz para $x=0$



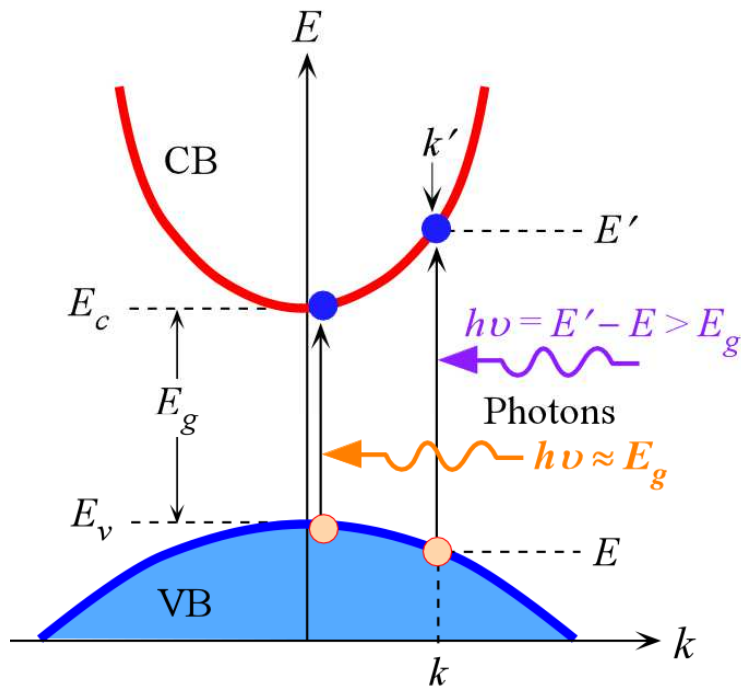
Coeficiente de absorção α

$$I(x) = I_0 \exp(-\alpha x)$$

$\delta = 1/\alpha =$ profundidade de absorção

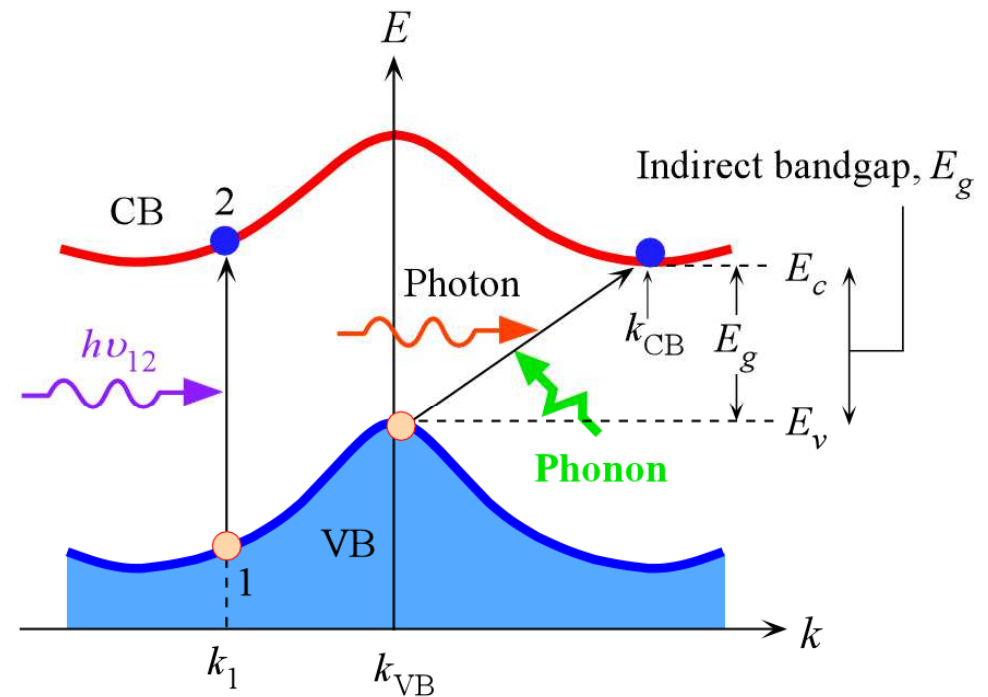


Absorção e transições diretas e transições indiretas em semicondutores



GaAs (Direct bandgap)

(a)

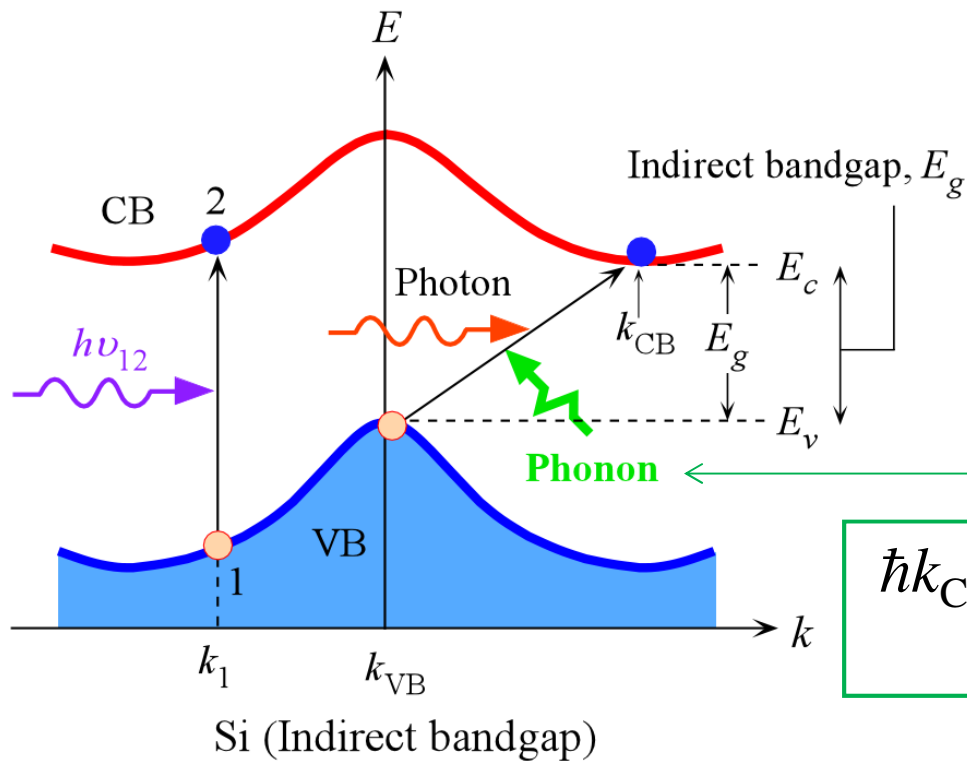


Si (Indirect bandgap)

(b)

(a) Photon absorption in a direct bandgap semiconductor. (b) Photon absorption in an indirect bandgap semiconductor (VB, valence band; CB, conduction band)

Transições indiretas em semicondutores



Photon energy absorbed

$$h\nu = E_g \pm h\nu$$

Phonon frequency

$$\hbar k_{CB} - \hbar k_{VB} = \text{Phonon momentum} = \hbar K$$

Photon energy absorbed, $h\nu = E_g \pm h\nu$

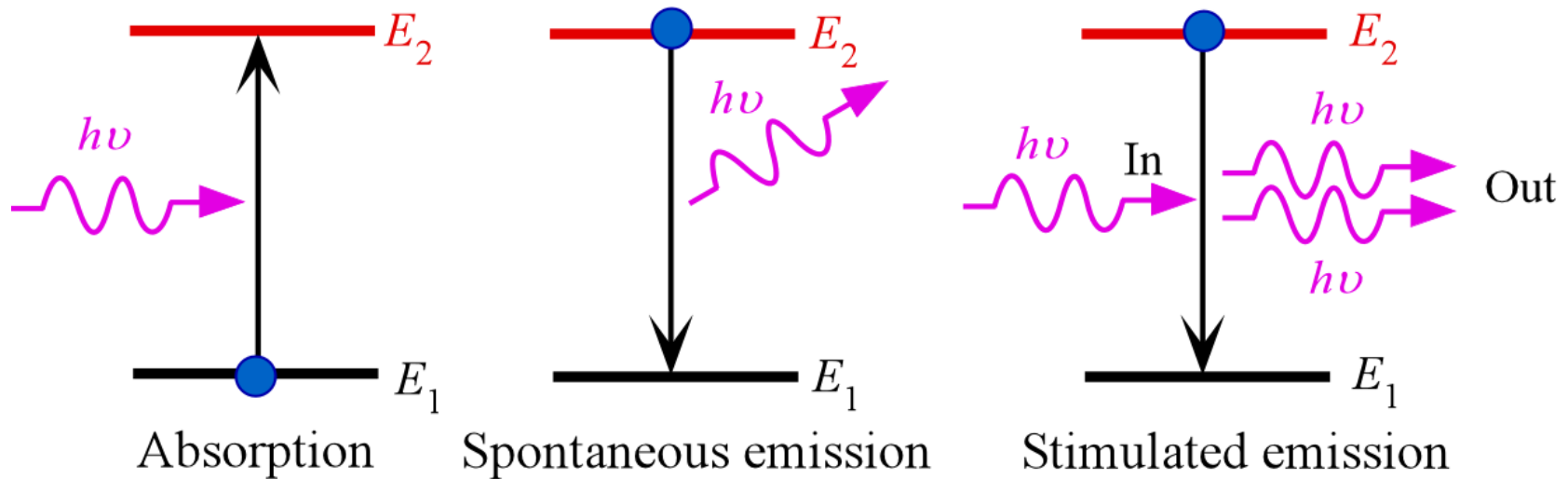
Phonon energy, small *e.g.* less than 0.1 eV

Semiconductores

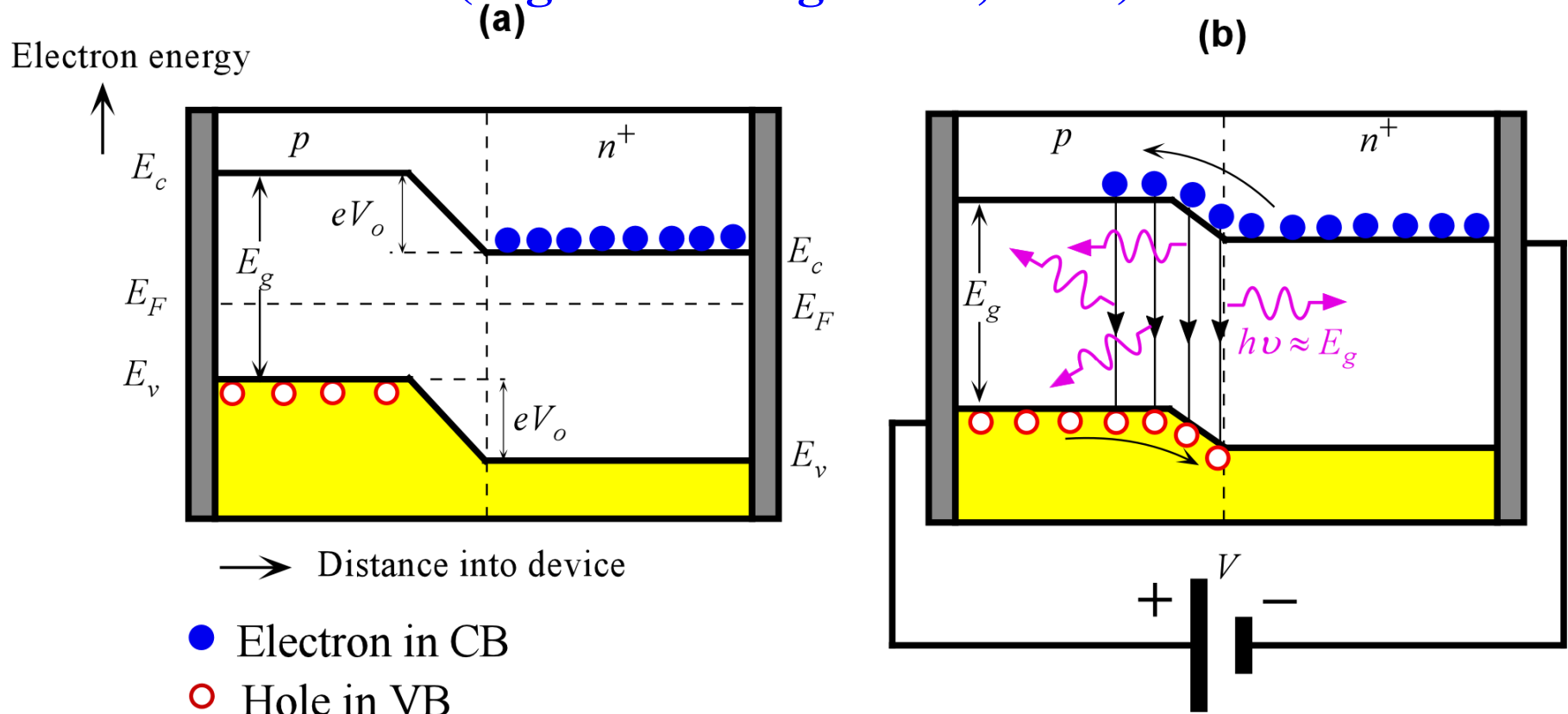
Band gap energy E_g at 300 K, cut-off wavelength λ_g and type of bandgap (D = Direct and I = Indirect) for some photodetector materials

Semiconductor	E_g (eV)	λ_g (eV)	Type
InP	1.35	0.91	D
GaAs _{0.88} Sb _{0.12}	1.15	1.08	D
Si	1.12	1.11	I
In _{0.7} Ga _{0.3} As _{0.64} P _{0.36}	0.89	1.4	D
In _{0.53} Ga _{0.47} As	0.75	1.65	D
Ge	0.66	1.87	I
InAs	0.35	3.5	D
InSb	0.18	7	D

Absorção (espontânea), emissão espontânea e emissão estimulada



Princípio básico de funcionamento de um diodo emissor de luz (Light Emitting Diode, LED)

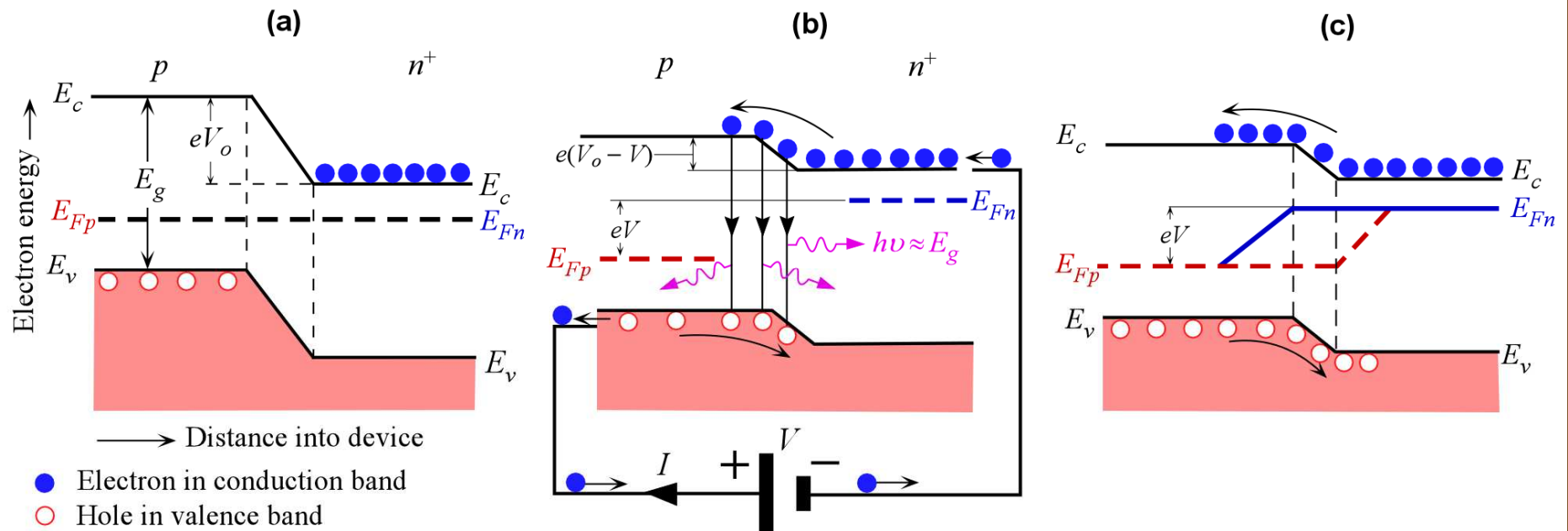


(a) The energy band diagram of a pn^+ (heavily n -type doped) junction without any bias.

Built-in potential V_o prevents electrons from diffusing from n^+ to p side.

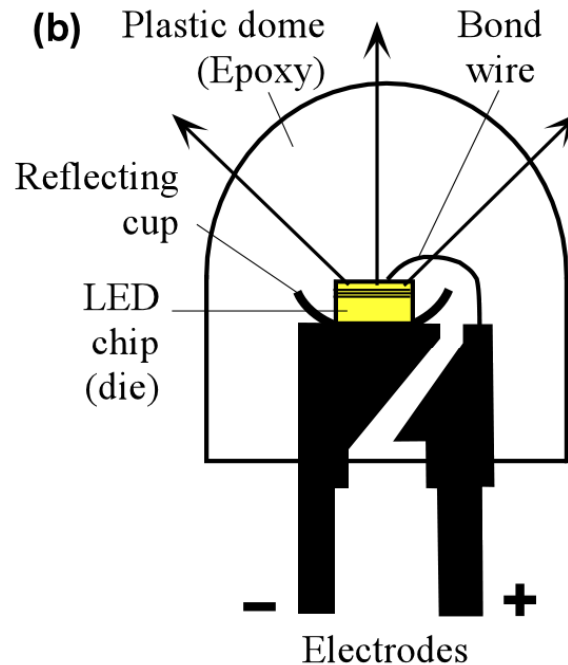
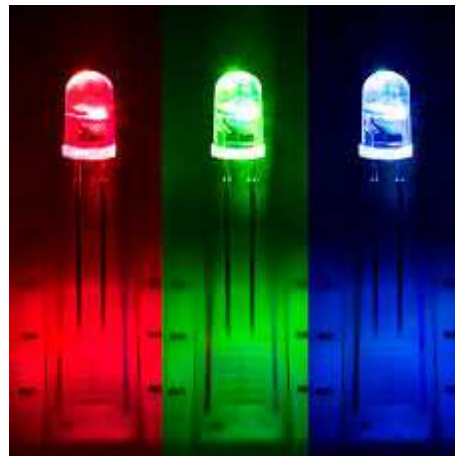
(b) The applied bias reduces V_o and thereby allows electrons to diffuse, be injected, into the p -side. Recombination around the junction and within the diffusion length of the electrons in the p -side leads to photon emission.

Princípio básico de funcionamento de um diodo emissor de luz (Light Emitting Diode, LED)



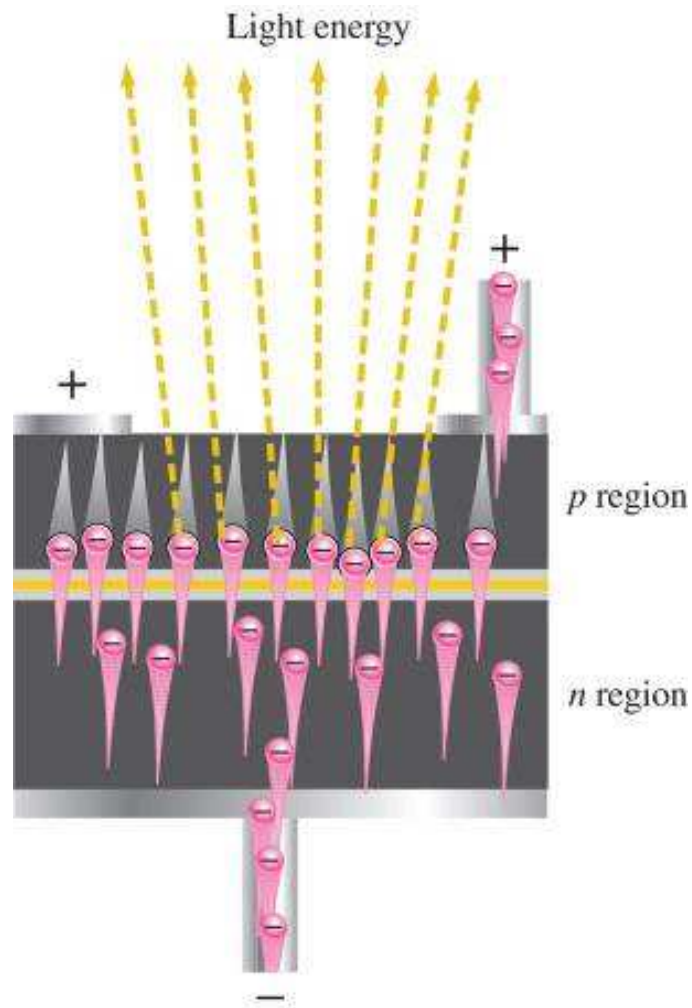
(a) The energy band diagram of a pn^+ (heavily n -type doped) junction without any bias. Built-in potential V_o prevents electrons from diffusing from n^+ to p side. (b) The applied bias potential V reduces V_o and thereby allows electrons to diffuse, be injected, into the p -side. Recombination around the junction and within the diffusion length of the electrons in the p -side leads to spontaneous photon emission. (c) Quasi-Fermi levels E_{Fp} and E_{Fn} for holes and electrons across a forward biased pn -junction.

Díodo emissor de luz (Light Emitting Diode, LED)



(a) Some of the internally generated light suffers total internal reflection (TIR) at the semiconductor/air interface and cannot be emitted into the outside. (b) A simple structure that overcomes the TIR problem by placing the LED chip at the centre of a hemispherical plastic dome. The epoxy is refractive index matched to the semiconductor and the rays reaching the dome's surface do not suffer TIR. (b) An example of a textured surface that allows light to escape after a couple of (or more) reflections (highly exaggerated sketch).

Light energy Electroluminescence in a forward-biased LED.



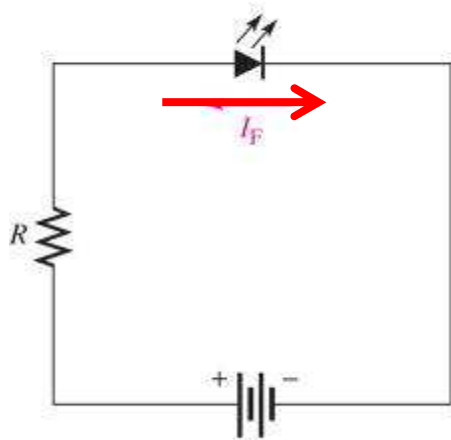
Symbol for an LED.



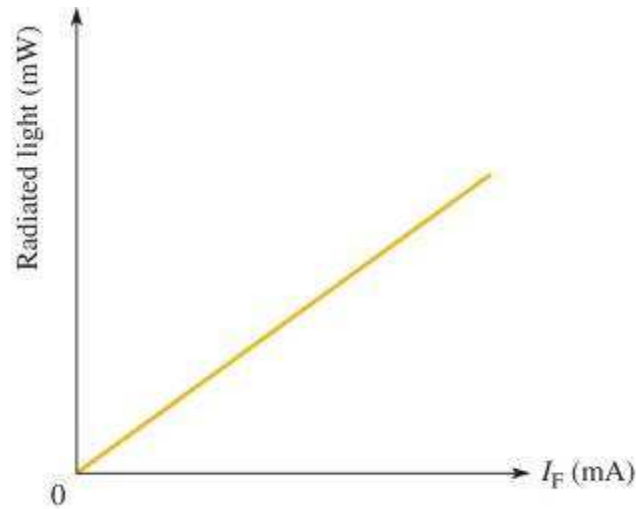
Light-emitting diodes (LEDs)



Symbol for an LED.



(a) Forward-biased operation



(b) Typical light output versus forward current

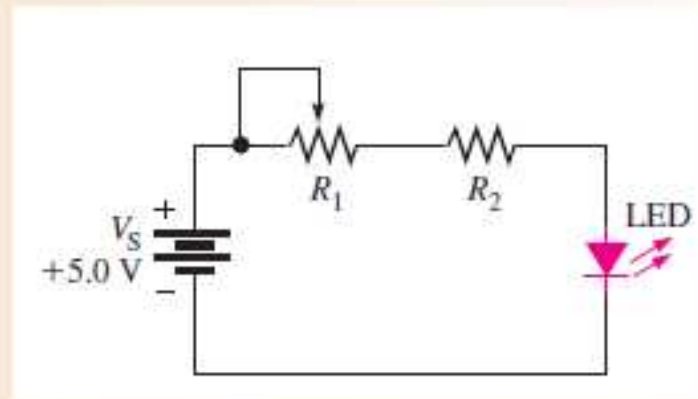


(c) Typical LEDs

Circuito com um LED

Series connections often involve using resistance to limit current to some level. For example, it is necessary to limit current to a light-emitting diode (LED) to prevent the LED from burning out. The circuit in Figure 21 shows a basic application, where a red LED is used as an indicator as part of a more complicated circuit. The rheostat is

► FIGURE 21



included to dim the LED, depending on ambient conditions. We will focus on just these two current-limiting resistors.

A red LED will always have a voltage across it of about +1.7 V when it is on and working within its normal operating range. The remaining voltage from the power supply will be across the two series resistors. Together, the rheostat and the fixed resistor will have a total of 3.3 V across them.

Assume you want current in the LED to range from a minimum of 2.5 mA (dim) to a maximum of 10 mA (bright). What values of R_1 and R_2 would you choose to accomplish this?

Circuito com um LED

Solution Start with the brightest condition when the resistance of the rheostat is adjusted for $0\ \Omega$. In this case, there will be no voltage across R_1 and $3.3\ \text{V}$ will be across R_2 . Because it is a series circuit, the same current is in R_2 as the LED. Therefore,

$$R_2 = \frac{V}{I} = \frac{3.3\ \text{V}}{10\ \text{mA}} = 330\ \Omega$$

Now determine the total resistance required to limit the current to $2.5\ \text{mA}$. The total resistance is $R_T = R_1 + R_2$, and the voltage drop across R_T is $3.3\ \text{V}$. From Ohm's law,

$$R_T = \frac{V}{I} = \frac{3.3\ \text{V}}{2.5\ \text{mA}} = 1.32\ \text{k}\Omega$$

To find R_1 , subtract the value of R_2 from the total resistance.

$$R_1 = R_T - R_2 = 1.32\ \text{k}\Omega - 330\ \Omega = 990\ \Omega$$

Choose a **1.0 k Ω** rheostat as the nearest standard value.

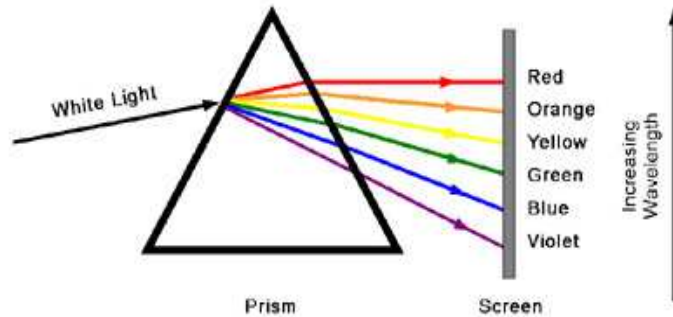
Related Problem What is the value of R_2 if the highest current is $12\ \text{mA}$?

What size should a series current-limiting resistor be to limit the current to a red LED to $10\ \text{mA}$ from a $3.0\ \text{V}$ source? Assume the LED drops $1.7\ \text{V}$.

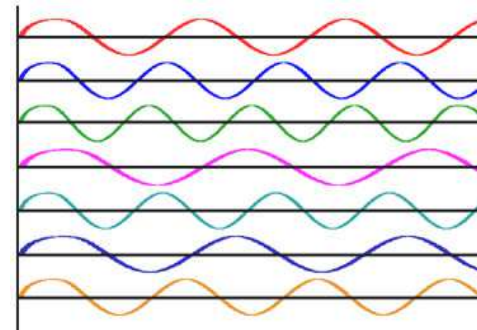
Lasers de diodo

Luz comum vs luz laser

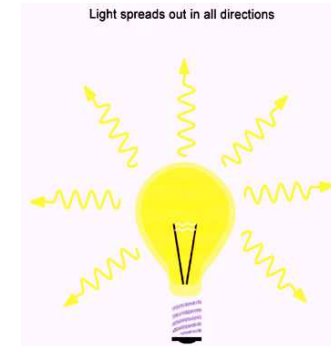
- Luz “comum”
Policromática



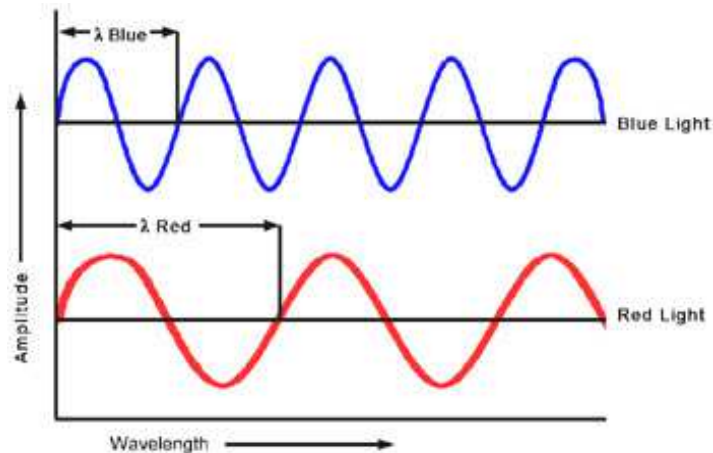
Incoerente



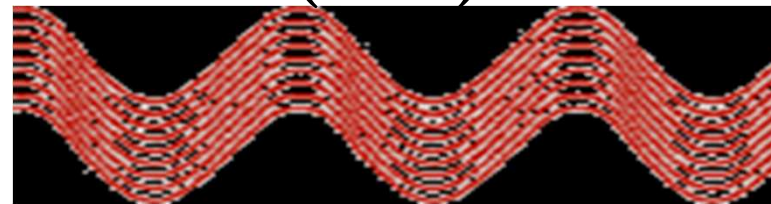
Muito divergente



- Luz laser
Quasi-monocromática (☺)

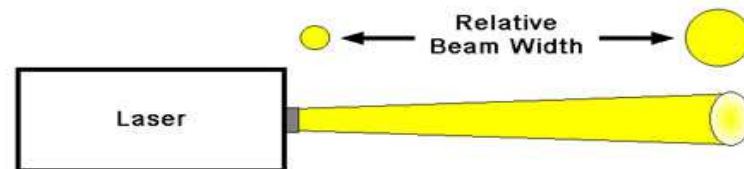


Coerente (☺ ☺)

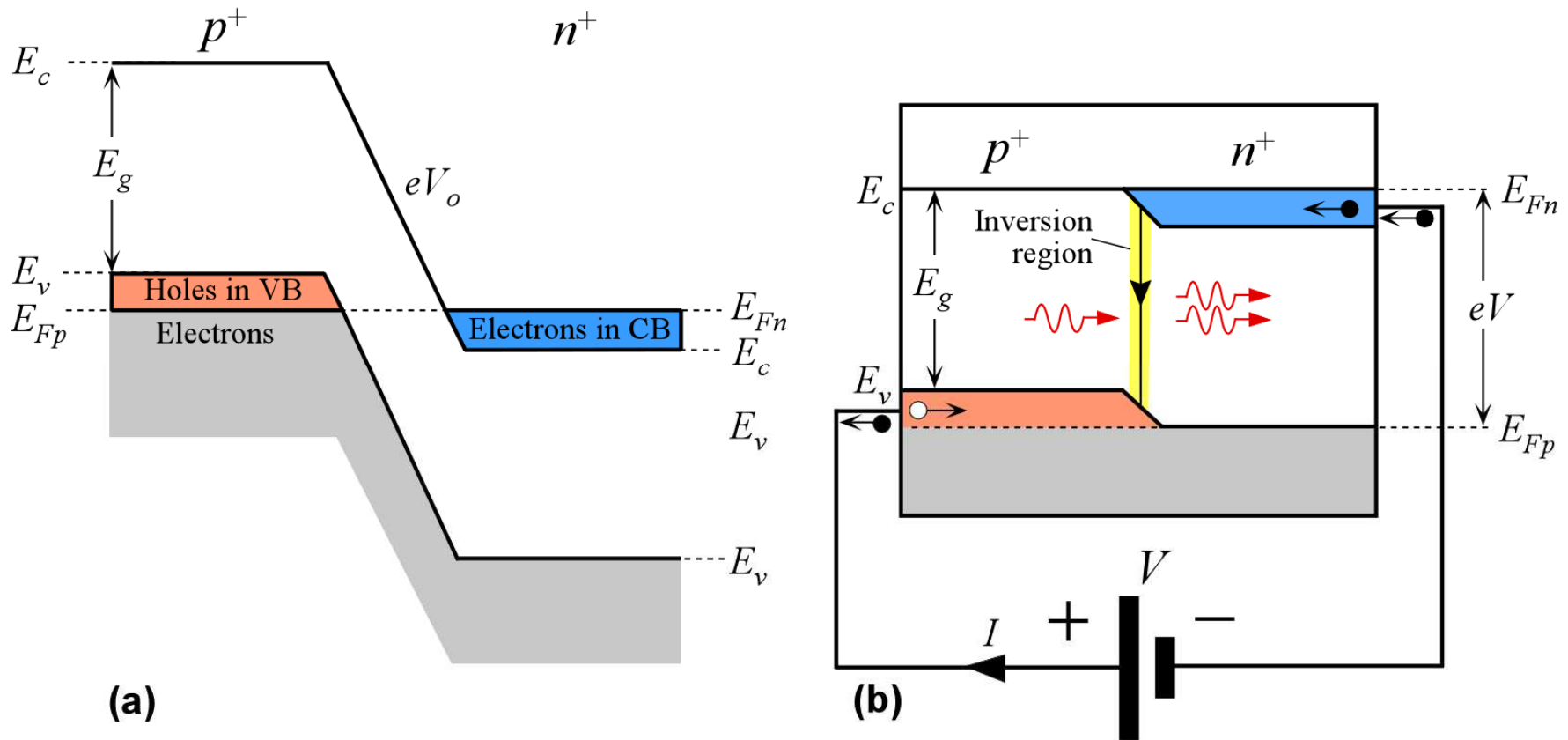


Pouco divergente (☺)

Highly Directional Beam
(Narrow Cone of Divergence)

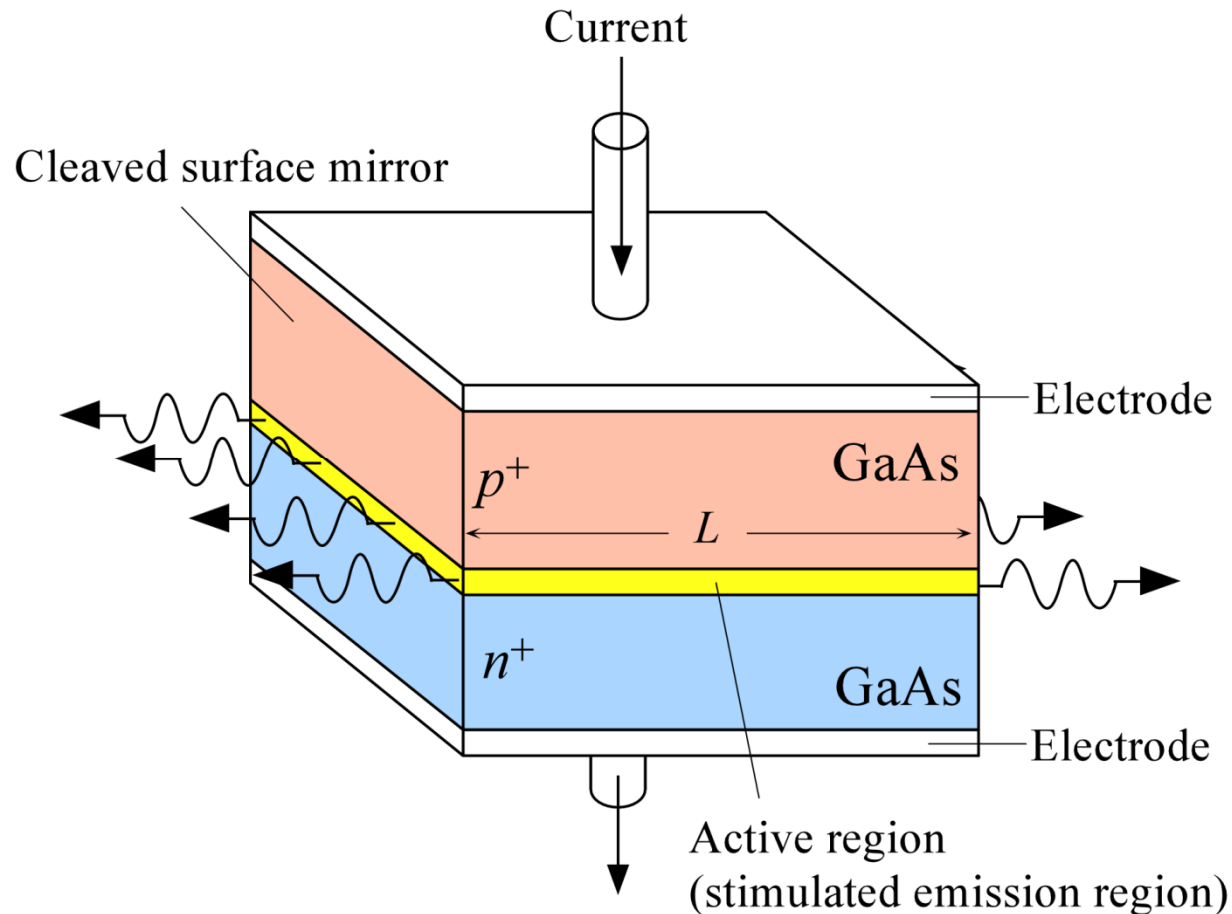


Laser de Díodo semiconductor



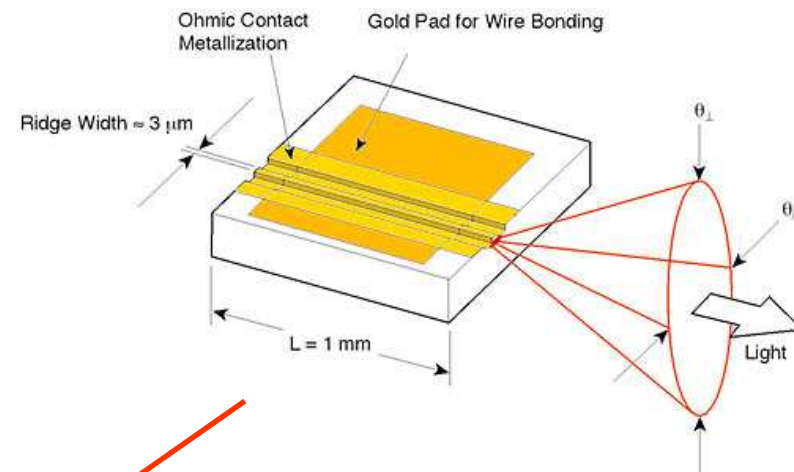
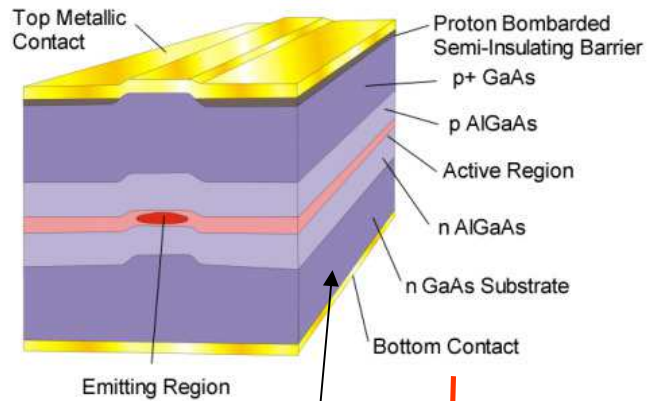
(a) The energy band diagram of a degenerately doped pn with no bias. (b) Band diagram with a sufficiently large forward bias to cause population inversion and hence stimulated emission.

Laser de Díodo Semiconductor

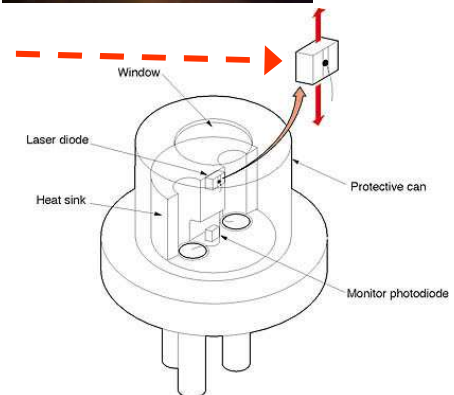
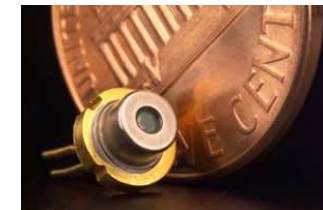
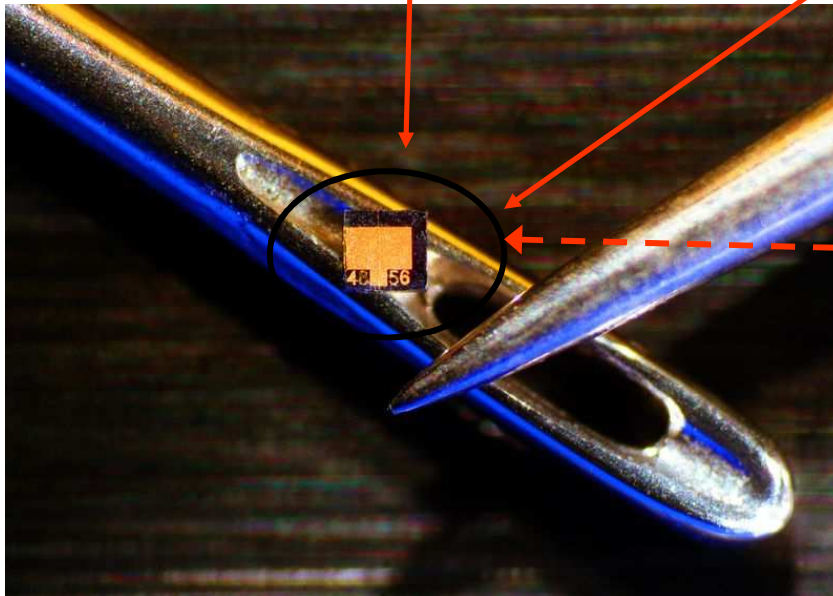


A schematic illustration of a GaAs homojunction laser diode. The cleaved surfaces act as reflecting mirrors.

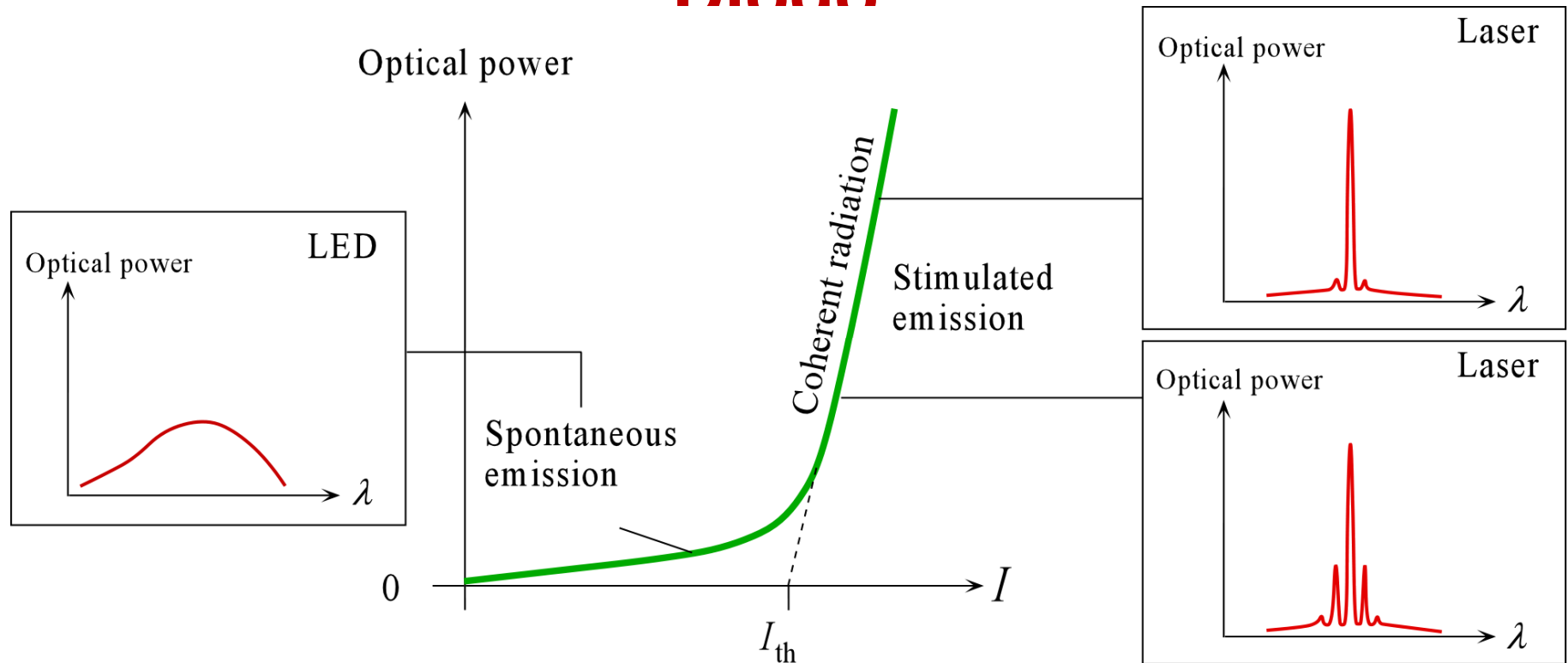
O laser de díodo



Materiais semicondutores

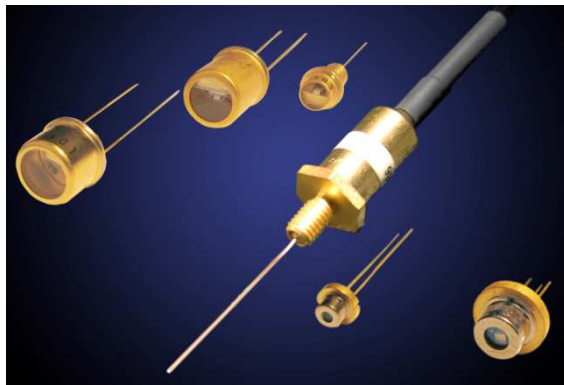
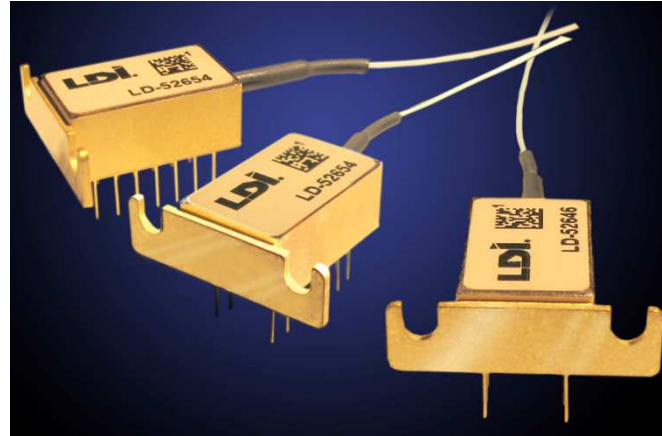
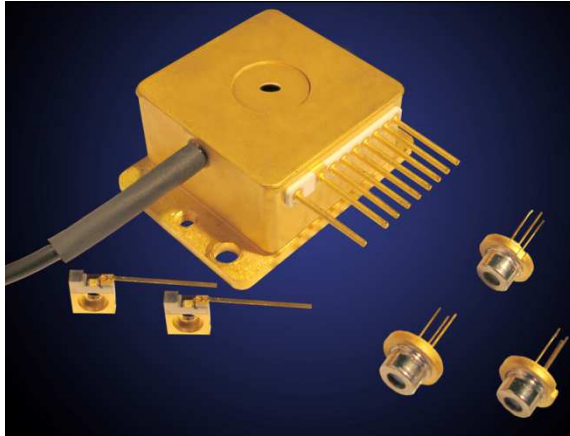


Corrente e potência ótica num laser de Díodo



Typical output optical power vs. diode current (I) characteristics and the corresponding output spectrum of a laser diode. I_{th} is the threshold current and corresponds to the extension of the coherent radiation output characteristic onto the I -axis.

Semiconductor Laser Diodes

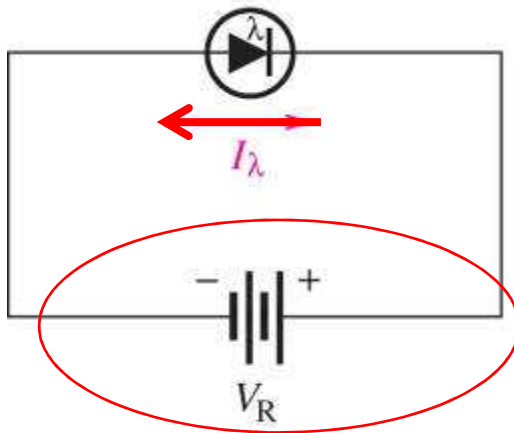


Top left: High power (0.5 – 7 W) CW laser diodes with emission at 805 nm and a spectral width of 2.5 nm. Applications include medical systems, diode pumped lasers, analytical equipment, illuminators, reprographics, laser initiated ordnance *etc.* Top right: Typical pigtailed laser diodes for telecom. These are Fabry-Perot laser diodes operating at peak wavelengths of 1310 and 1550 nm with spectral widths of 2 and 1.3 nm respectively. The threshold currents are 6 mA and 10 mA, and they can deliver 2 mW of optical power into a single mode fiber. Lower left: High power 850 and 905 nm pulsed laser diodes for use in range finders, ceilometers, weapon simulation, optical fuses, surveying equipment *etc.* (Courtesy of OSI Laser Diode Inc.)

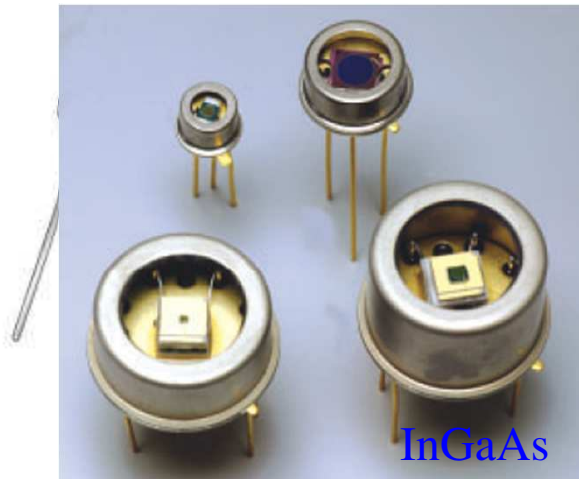
Fotodetectores o fotodiodo

Fotodíodo

Fotodíodo é um dispositivo semicondutor que converte luz em corrente elétrica. A corrente é gerada quando fótons são absorvidos no fotodíodo. As células solares convencionais, usadas para converter energia solar em energia elétrica, são fotodíodos com grande superfícies. O fotodíodo é um componente [eletrônico](#) e um tipo de fotodetetor. É uma junção pn designada para responder a uma entrada óptica. Os fotodíodos possuem uma "janela" ou uma conexão de [fibra ótica](#), responsável por deixar a [luz](#) passar e incidir na parte sensível do dispositivo.



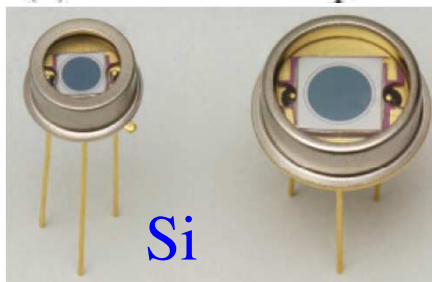
(a) Reverse-bias operation



(b) Typical devices

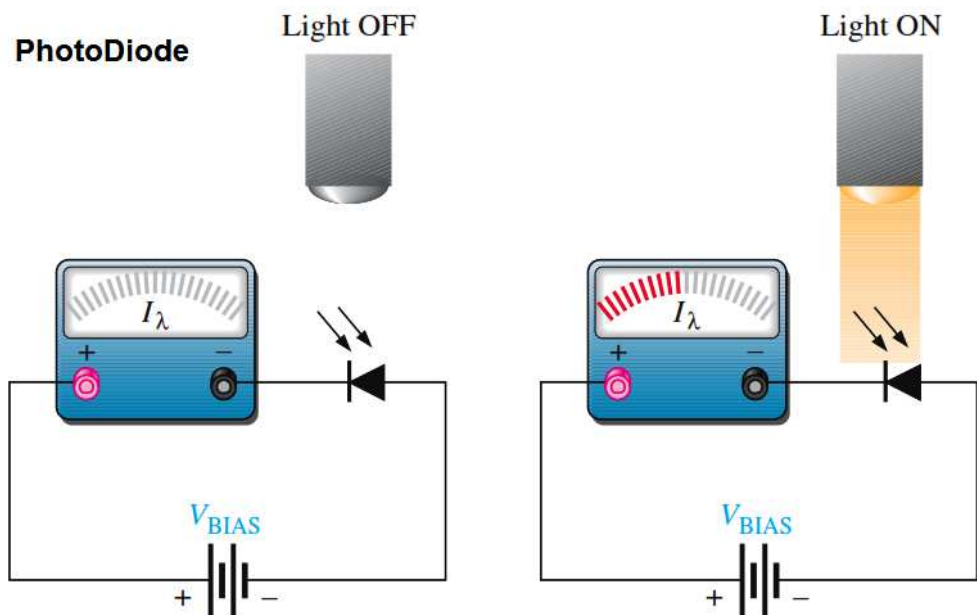


(c) Alternate symbol



Courtesy of Hamamatsu

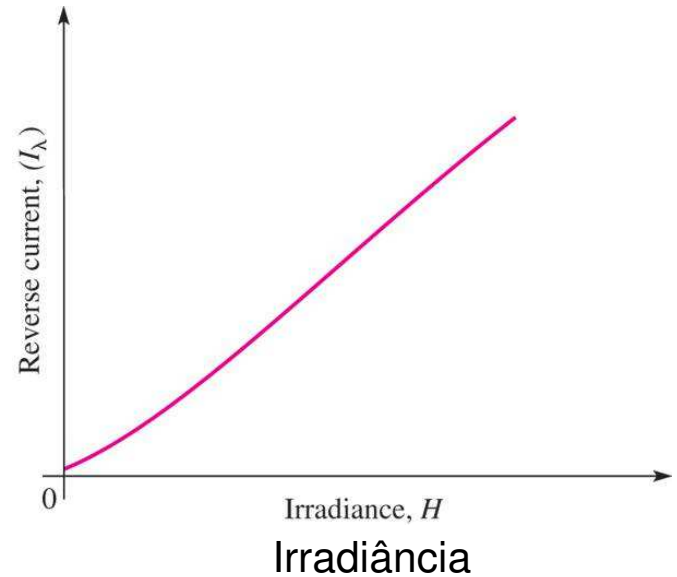
General graph of reverse current versus irradiance for a photodiode.



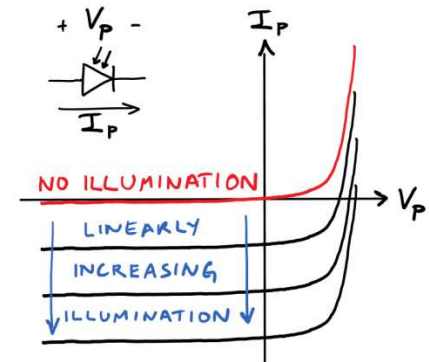
(a) No light, no current except negligible dark current

(b) Where there is incident light, resistance decreases and there is reverse current.

Fotocorrente

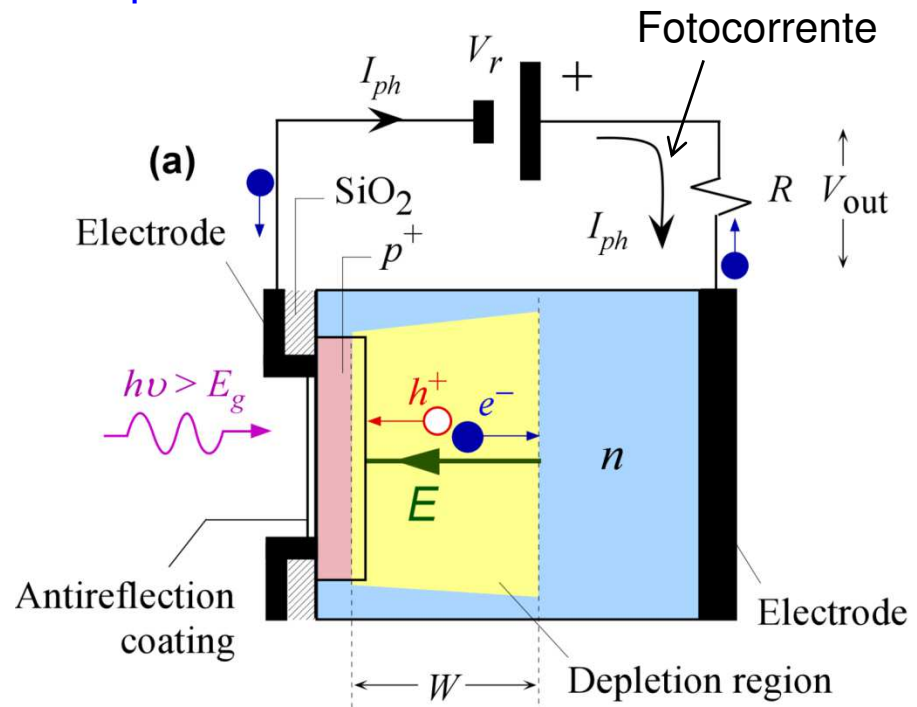
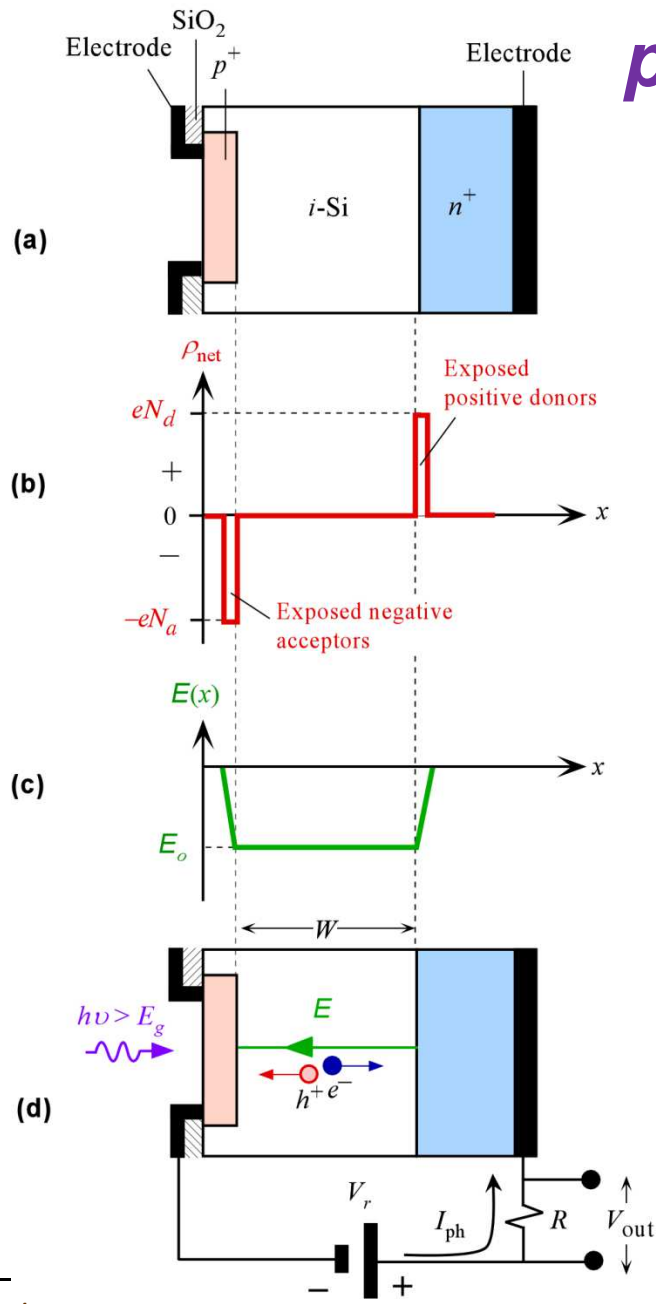


A fotocorrente I_{ph} aumenta linearmente com a iluminação



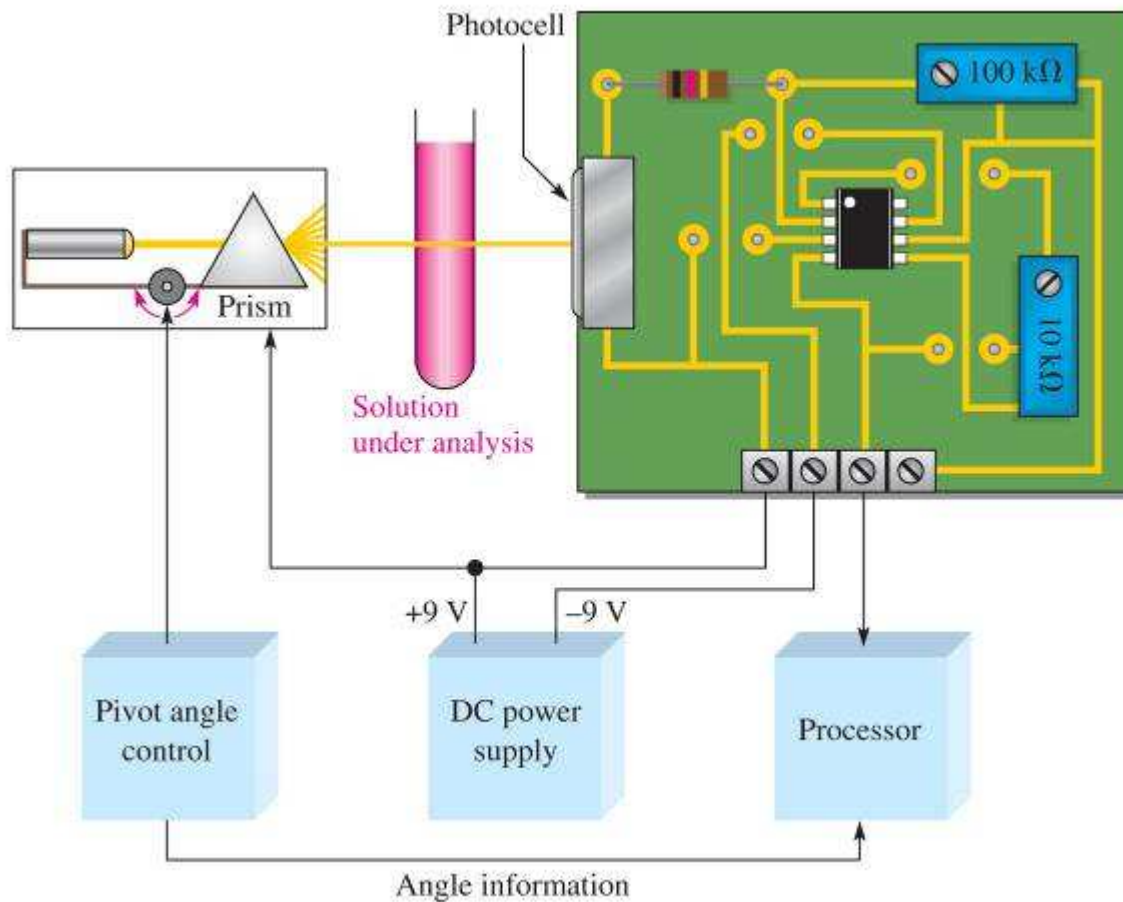
pin Photodiode

The schematic structure of an idealized pin photodiode (b) The net space charge density across the photodiode. (c) The built-in field across the diode. (d) The pin photodiode reverse biased for photodetection.

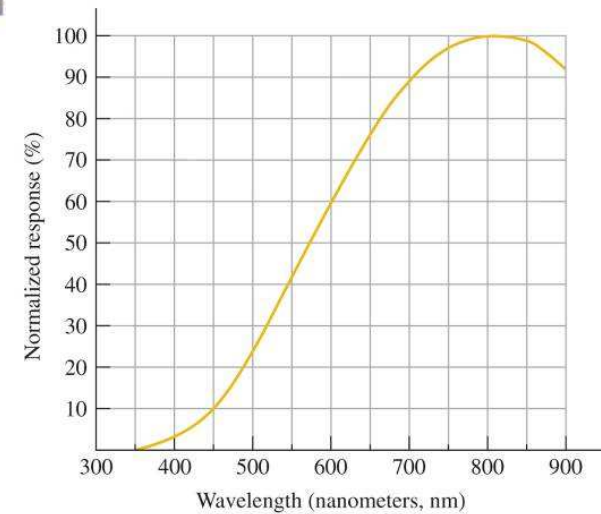


A schematic diagram of a reverse biased pn junction photodiode.

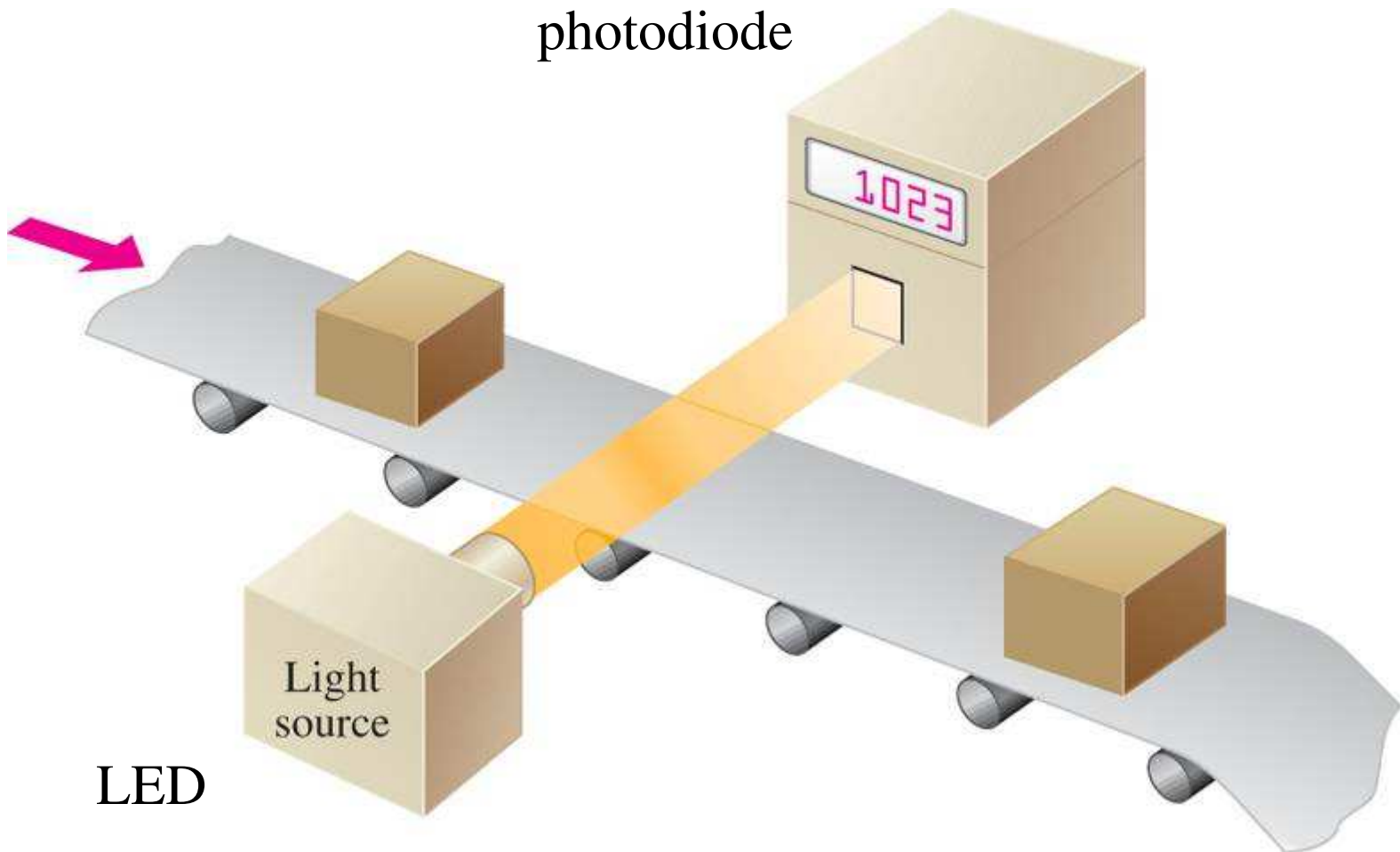
Spectrophotometer system.



Photocell response curve.

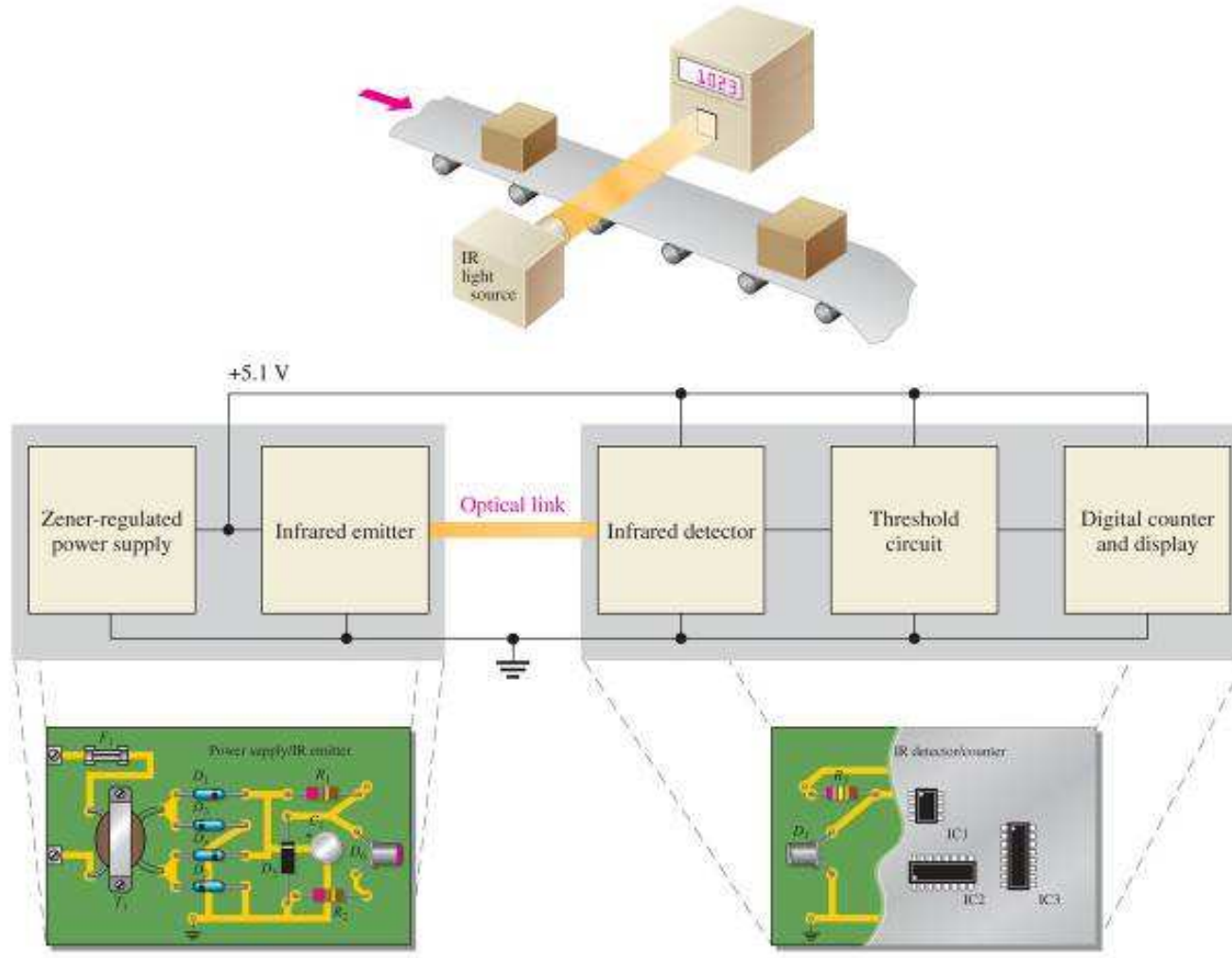


A photodiode circuit used in a system that counts objects as they pass on a conveyor belt.

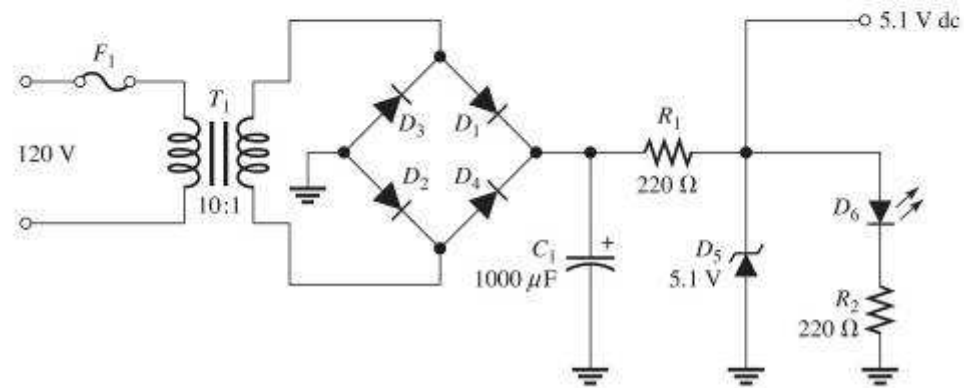
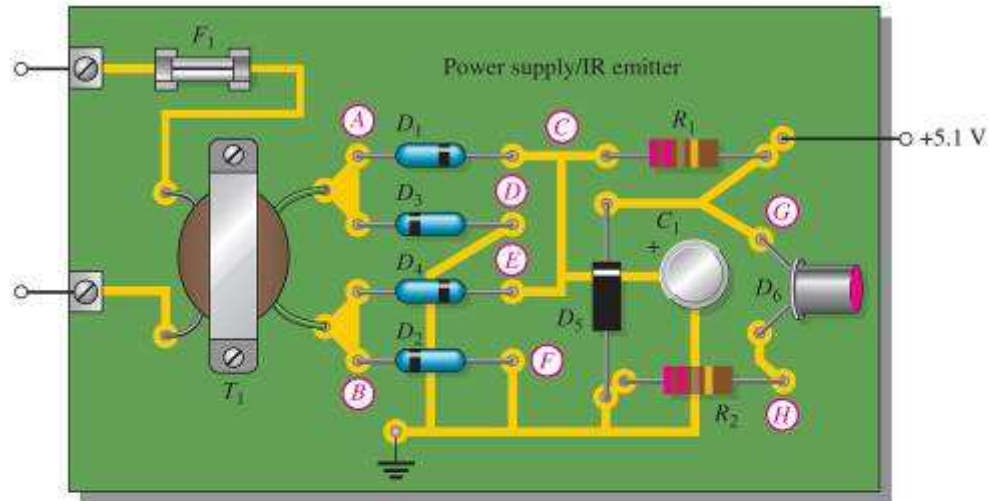


The optical counting system

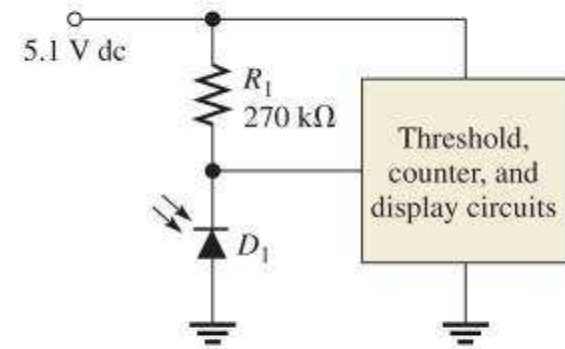
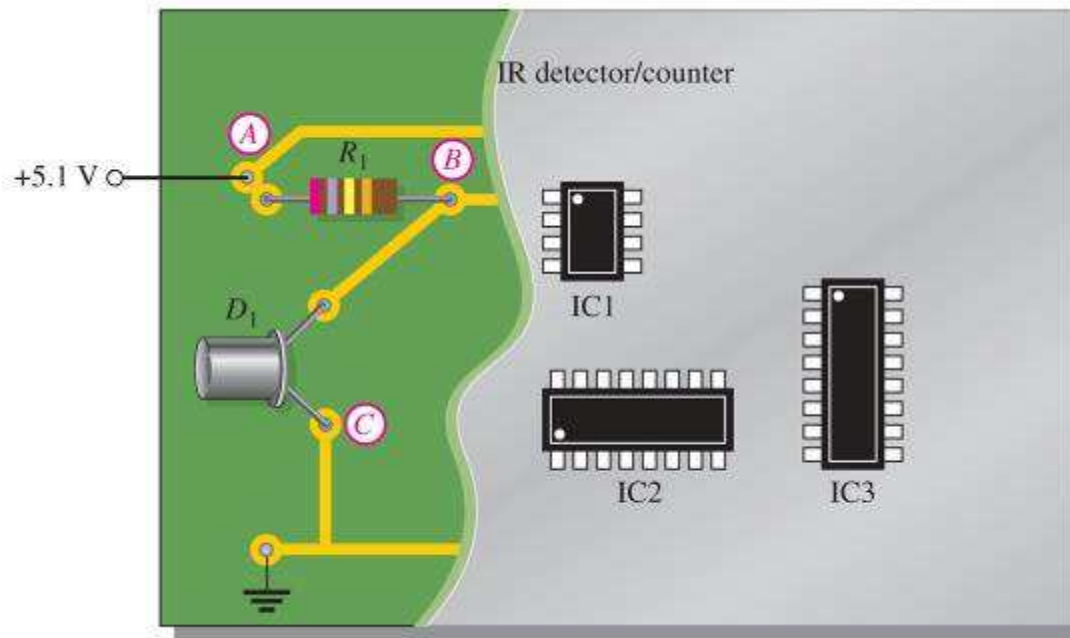
(the system concept, block diagram, and circuit boards)



Placa circuito impresso do circuito emissor



Placa circuito impresso do circuito fotodetector



Placas circuito impresso do contador ótico

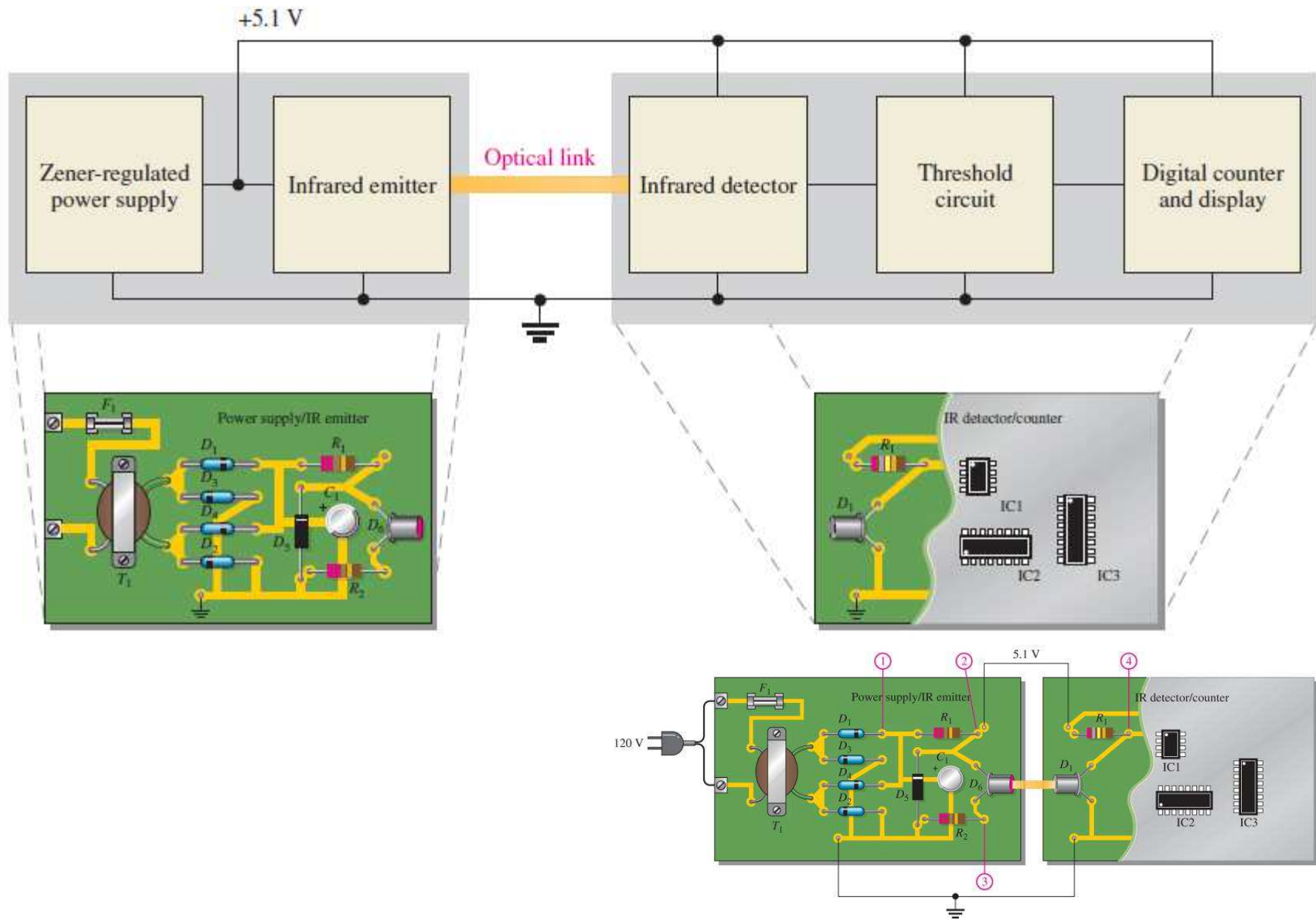
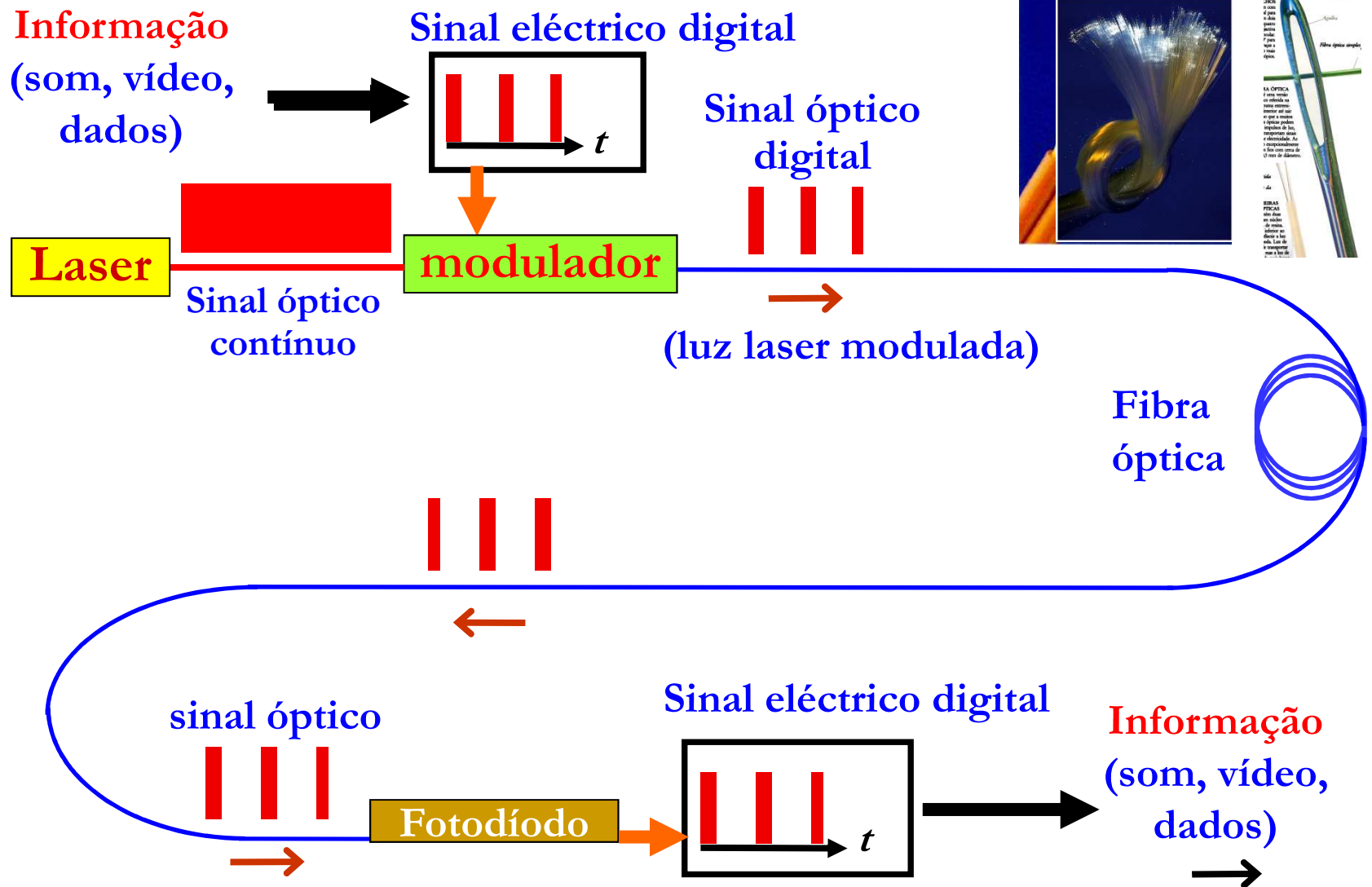
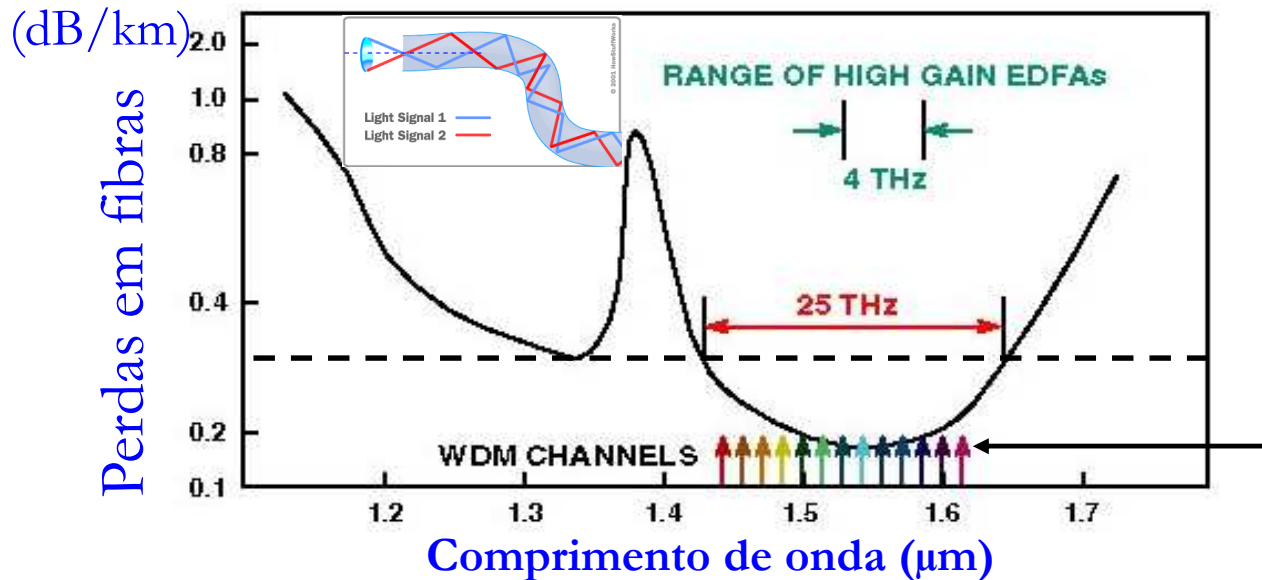


Diagrama esquemático de um sistema de comunicação por fibra óptica



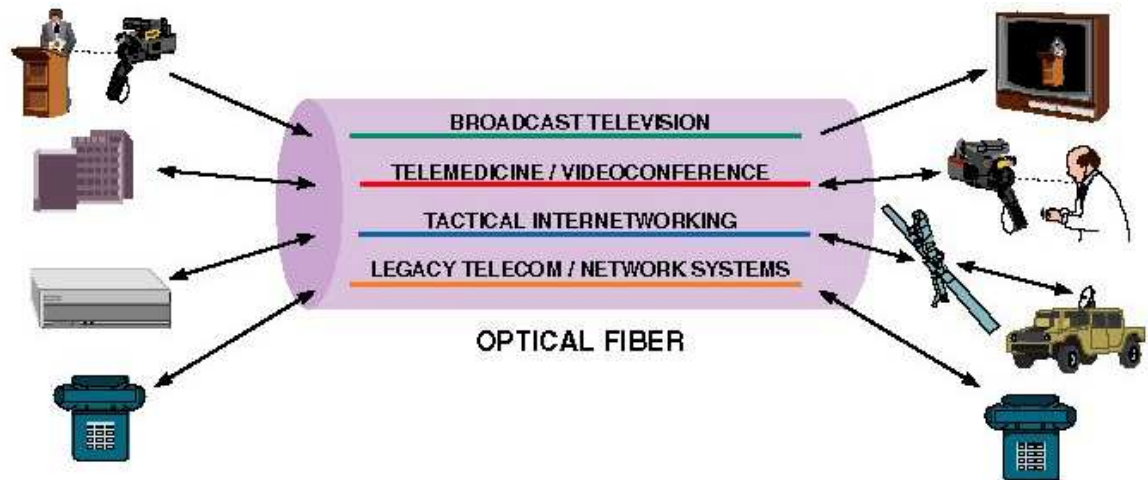
<http://webpages.ciencias.ulisboa.pt/~jmfigueiredo/aulas/TxRxOp.mov>

Largura de banda da fibra ótica



1 THz = 10^3 GHz
 25 THz / 50 GHz
 (500 canais)
 (13 canais representados)

Bel é a unidade logarítmica usada em engenharia, para comparar duas potências (usa-se mais o decibel, dB) (De A. G. Bell, antr., físico escocês, 1847-1922).



Cabos submarinos de fibra óptica

