

ELETRÔNICA ESSENCIAL PARA VLSI

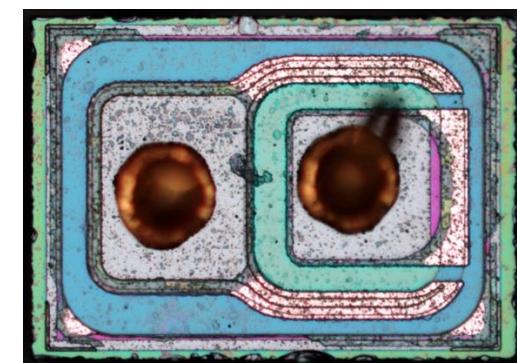
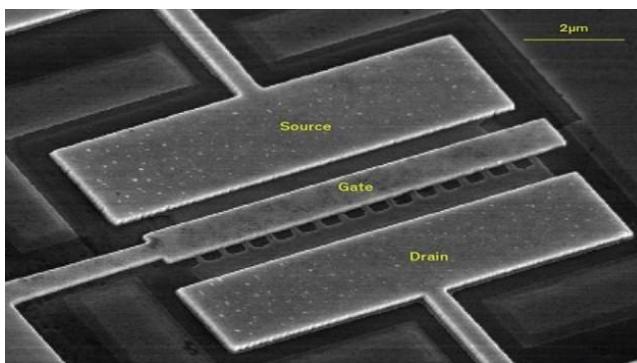
Conceitos base para desenvolver
circuitos.



AGENDA

Nesta apresentação iremos aprender o essencial de conceitos eletrônicos para o curso de desenvolvimento de circuitos integrados (VLSI)

1. Básico dos transistores
2. Introdução as Chaves, Amplificadores e Filtros
3. Diodos
4. Amplificadores
5. Realimentação Positiva e Negativa
6. Transistores BJT
7. MOSFET (PMOSFET e NMOSFET), e JFET (NJFET, o mais usado)
8. Uso como Chave
9. Criação de Portas Logicas
10. Amplificadores
11. Polarização
12. Tipos de Amplificadores
13. Filtros
14. Oscilação
15. VCO e PLL
16. NGSpice (e a linguagem SPICE)



INTRODUÇÃO AS CHAVES, AMPLIFICADORES E FILTROS

A eletrônica pode ser entendida em 5 grandes funções:

1 Controlar

- Chaves, ON / OFF / PWM
- Lógica digital

2 Amplificar

- Aumentar sinais fracos, Levar sinais a longas distâncias
- Áudio, RF, sensores

3 Filtrar

- Selecionar frequências
- Limpar sinais
- Definir frequência (osciladores)

4 Proteger e limitar Corrente e tensão

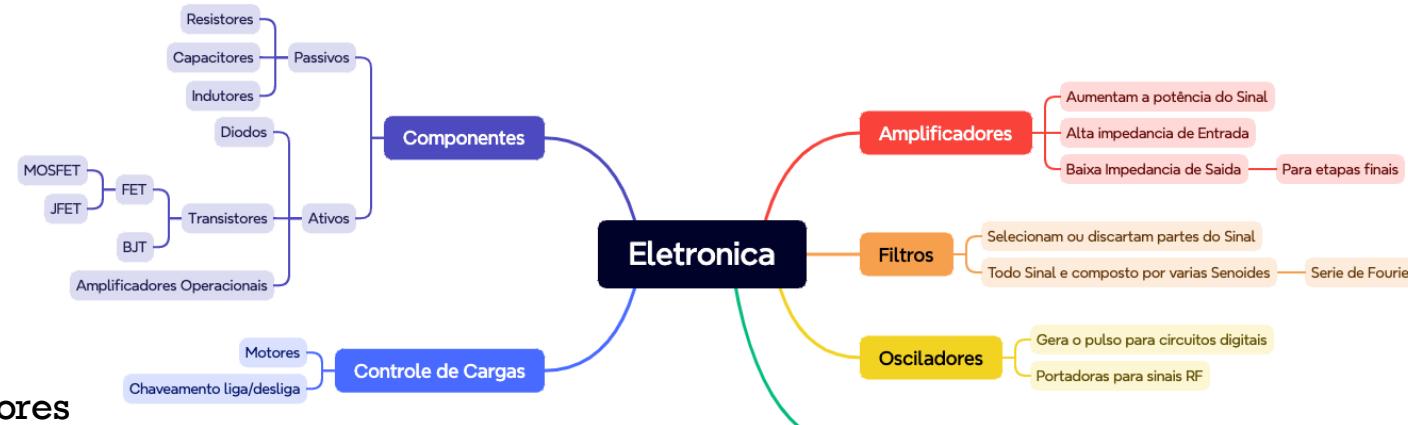
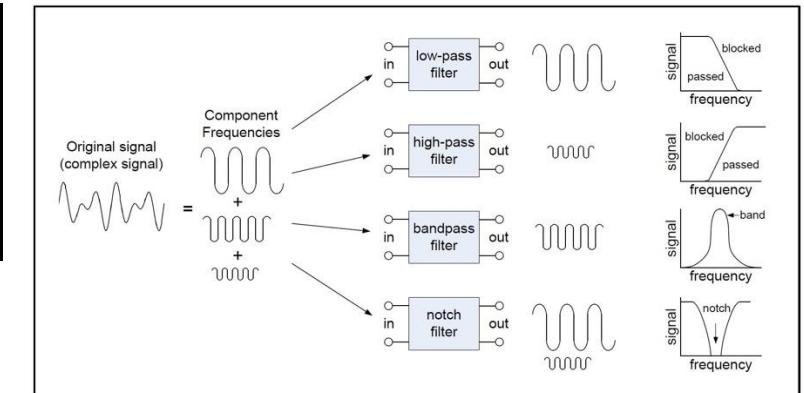
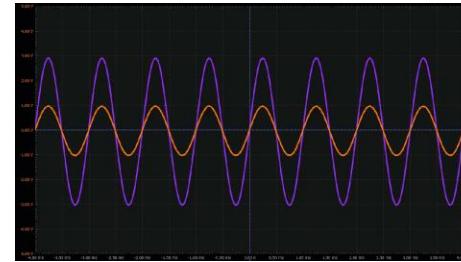
- Resistores
- Diodos

5 Armazenar energia, usando Baterias, Capacitores e Indutores

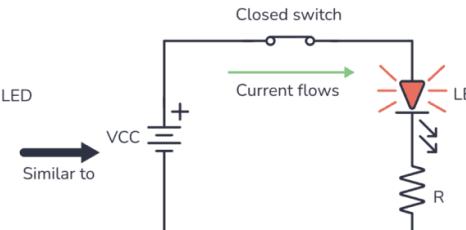
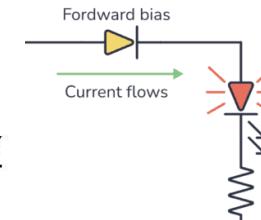
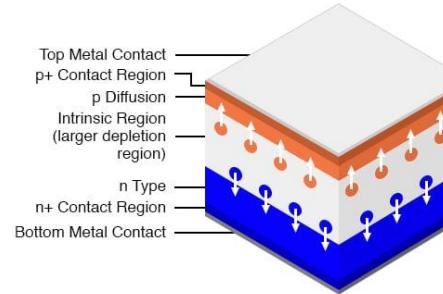
Um transistor pode ser:

- uma **chave**
- um **amplificador**
- parte de um **filtro**
- parte de um **oscilador**

Tudo depende de **como ele é polarizado e conectado**.



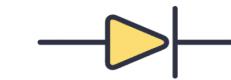
DIODOS



Anode (+)



Cathode (-)



Um **diodo** é um componente semicondutor formado por uma **junção PN**, cuja principal função é **permitir corrente em apenas um sentido**.

- Conduz quando **polarizado diretamente**
- Bloqueia quando **polarizado reversamente**
- É um **elemento não linear** ($\text{corrente} \neq \text{proporcional à tensão}$)

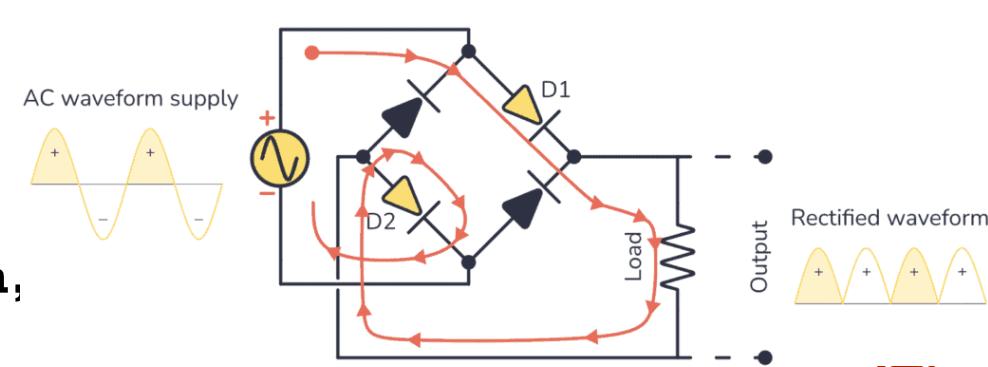
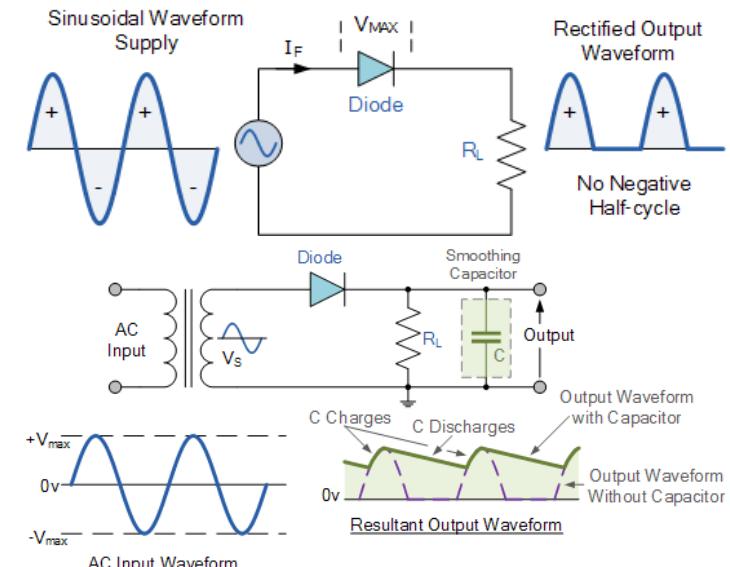
Por que diodos são fundamentais? Os diodos são a **base física** de:

- BJT's (duas junções PN)
- JFETs (gate PN reversamente polarizado)
- MOSFETs (diodo de corpo inevitável)

O que podemos fazer com Diodos?

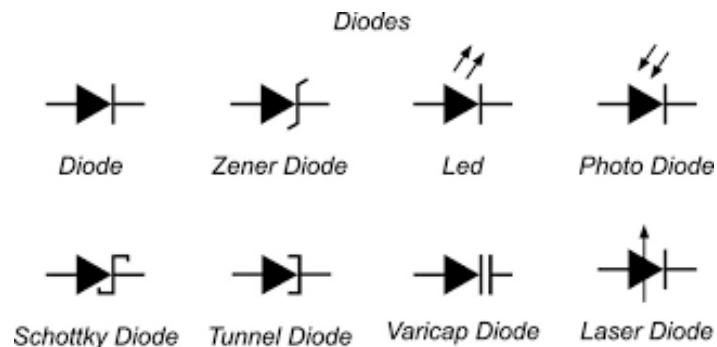
- **Retificação** (Converter AC em DC pulsante)
- **Direcionar Corrente**
- **Referencia e limitação de tensão** (Zenner)
- **Controle de Sinal, Detecção AM**

Lembre-se que em projetos VLSI iremos criar um diodo com, Mosfet com gate ligado ao dreno.



TIPOS DE DIODO E QUANDO USAR

Tipo	Característica principal	Onde usar
PN	Uso geral	Retificação, proteção
Zener	Tensão de ruptura controlada	Referência, clamp
Schottky	Baixa queda e alta velocidade	RF, fontes chaveadas
LED	Emissão de luz	Indicação, opto
Varicap/Varactor	Capacitância controlada por tensão	VCO, PLL, sintonia RF
Diodo de corpo (MOSFET)	Condução reversa inevitável	Conversores, freewheel



DETECTOR AM COM DIODO

O detector AM mais simples é composto por:

- **Um diodo**
- **Um capacitor**
- **Um resistor**

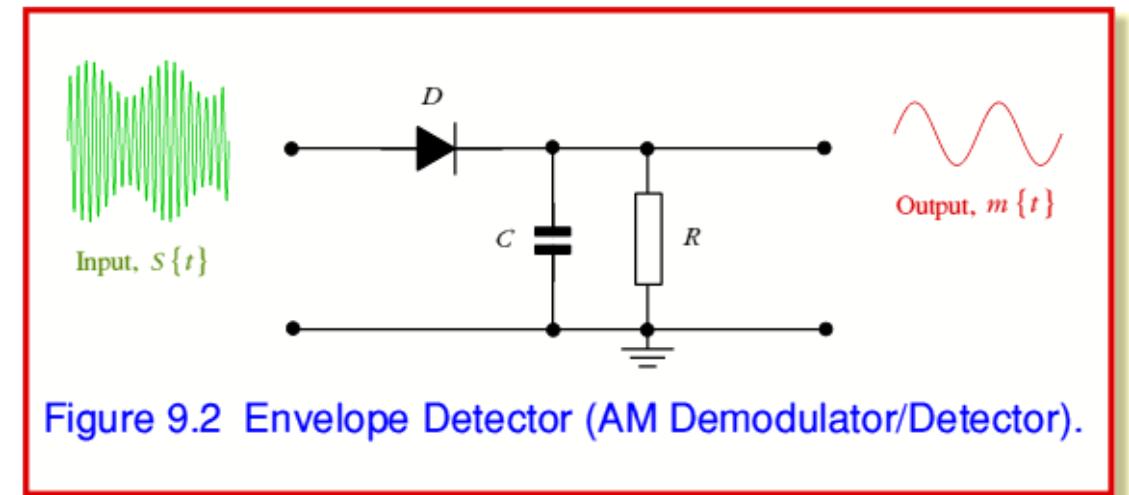


Figure 9.2 Envelope Detector (AM Demodulator/Detector).

Funcionamento passo a passo:

- 1 O **diodo retifica** o sinal AM (remove a parte negativa)
- 2 O **capacitor carrega** até o pico da portadora
- 3 O **resistor descarregava lentamente**, seguindo a portadora
- 4 O resultado é o **sinal de áudio recuperado**



VARIACAP

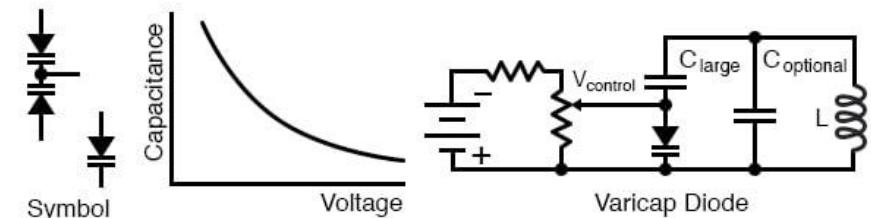
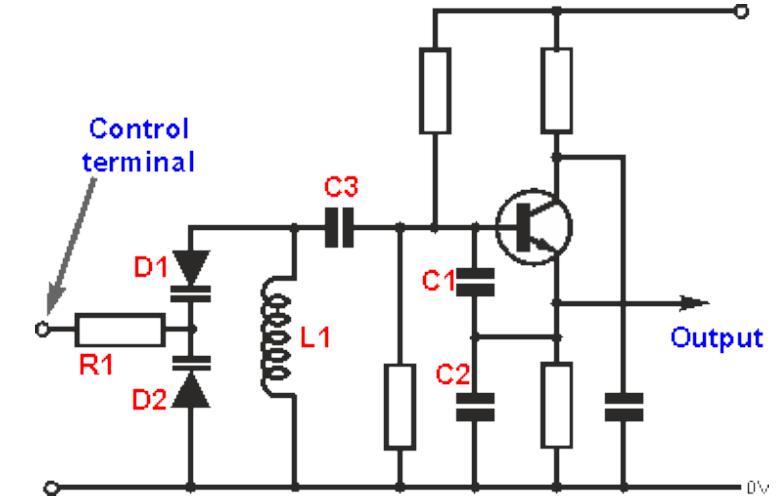
Um varicap (ou varactor) é um diodo PN operando sempre em polarização reversa, explorando o fato de que:

◆ A capacidade da junção PN depende da tensão reversa aplicada

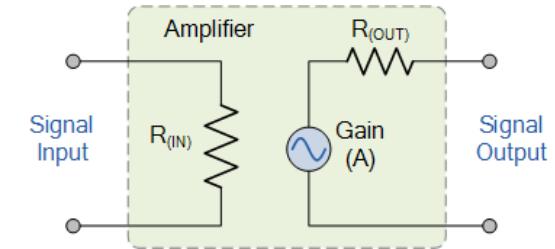
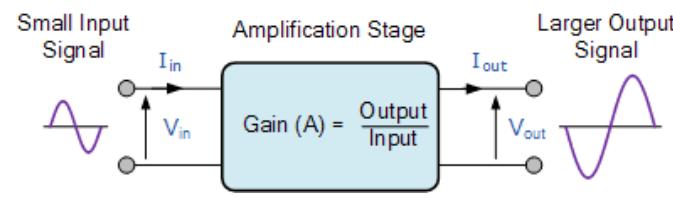
- Tensão reversa: Sobe, a capacidade diminui
- Tensão reversa: Desce, a capacidade aumenta

◆ O varicap não conduz corrente (idealmente), ele se comporta como um capacitor controlado por tensão.

Considere o Varicap como um capacitor que muda seu valor dependendo da tensão de entrada.



AMPLIFICADORES



São componentes eletrônicos responsáveis por aumentar a potencia (tensão e corrente) de um sinal de qualquer frequência, com menor distorção possível, sem “carregar” o circuito que gerou o sinal e permitir enviar esse sinal para qualquer “carga”.

Pelo menos essa é a parte “ideal” dos amplificadores, em termos ”eletrônicos” o que queremos:

- Ganho estável e controlável
- Alta impedância de entrada
- Baixa impedância de saída

O que buscamos em amplificadores reais? Na prática, projetamos amplificadores para otimizar:

- **Ganho suficiente e controlável**
- **Alta impedância de entrada** (pré-amplificação)
- **Baixa impedância de saída** (etapas de saída)
- **Boa linearidade** (baixa distorção)
- **Estabilidade térmica e elétrica**
- **Banda compatível com a aplicação**

Observação importante

- Nem todo amplificador aumenta tensão.
- Alguns amplificam **corrente**, outros **potência**, e muitos apenas **isolam impedâncias**.
- Não precisamos ter todas as características do amplificador em um único componente, Podemos ter vários estágios de amplificação em um mesmo amplificador.



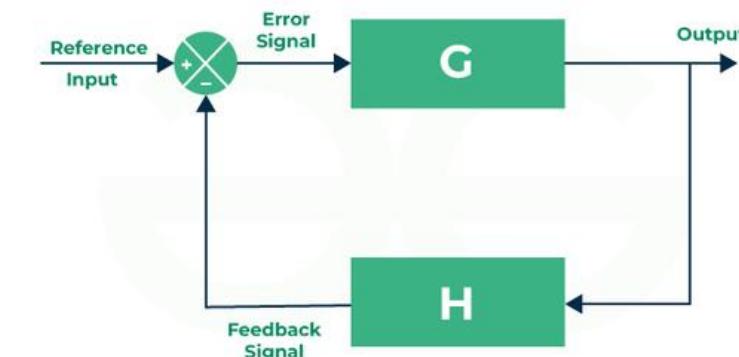
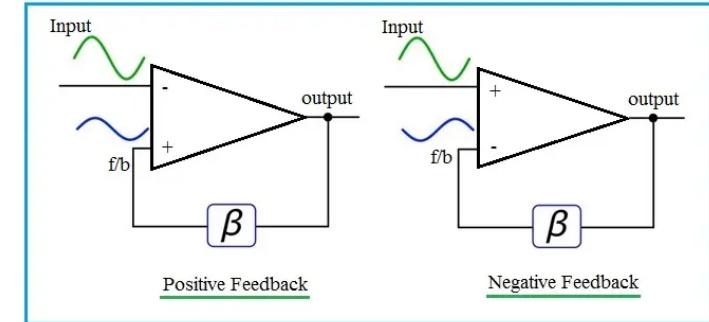
REALIMENTAÇÃO POSITIVA/NEGATIVA

Realimentação ocorre quando **parte da saída retorna à entrada** de um sistema.

- **Negativa** → estabiliza
- **Positiva** → reforça

🔥 A diferença não é o sinal “+” ou “-”, é o **efeito no erro**. A realimentação (ou **feedback**) é um conceito da engenharia de controle, mais em eletrônica e muito usado para criar oscilações desejadas ou fazer um circuito mais resiliente a perturbações externas.

A realimentação (feedback) é um conceito da engenharia de controle, e em eletrônica é amplamente usada para criar oscilações desejadas ou tornar circuitos mais estáveis e resilientes



Tipo	O que faz	Efeito no sistema	Onde aparece
Negativa	Devolve uma fração da saída em oposição ao sinal de entrada	<ul style="list-style-type: none"> • Reduz ganho • Aumenta estabilidade • Reduz distorção • Reduz sensibilidade a parâmetros 	<ul style="list-style-type: none"> • Amplificadores lineares • Op-amps • Degeneração de emissor/source • Filtros ativos • PLL (em regime)
Positiva	Devolve uma fração da saída em fase com a entrada	<ul style="list-style-type: none"> • Aumenta ganho efetivo • Reforça perturbações • Pode causar instabilidade • Permite oscilação 	<ul style="list-style-type: none"> • Osciladores (LC, RC, XTAL) • Schmitt Trigger • Latches e memórias • Start-up de osciladores



ESTABILIDADE

Um circuito amplificador é **estável** quando:

- A saída permanece limitada
- Pequenas perturbações **diminuem com o tempo**
- Não há oscilações sustentadas indesejadas

Por que a instabilidade acontece?

Todo amplificador real possui:

- Ganho alto
- Capacitâncias parasitas
- Atrasos internos

Veremos também como aumentar a estabilidade em circuitos eletrônicos.

Veremos mais tarde o que ganho com atraso de fase criam...

“A única diferença entre um amplificador e um oscilador é se a instabilidade foi evitada ou explorada.”

Veremos a seguir o diagrama de Bode que nos permite analisar a estabilidade



DIAGRAMA DE BODE

O Diagrama de **Bode** descreve o comportamento de um sistema no **domínio da frequência**, usando dois gráficos:

- **Magnitude (Ganho × Frequência)**
- **Fase (Defasagem × Frequência)**
- Sempre em escala logarítmica.

💡 Ele responde **todas as perguntas de estabilidade**.

Por que o Bode é essencial?

Todo amplificador real possui:

- Capacitâncias parasitas
- Atrasos internos
- Polos e zeros

Esses efeitos fazem:

- O ganho cair com a frequência
- A fase atrasar progressivamente

➡ O Bode mostra **quando a realimentação deixa de ser segura**.

Frequências Críticas

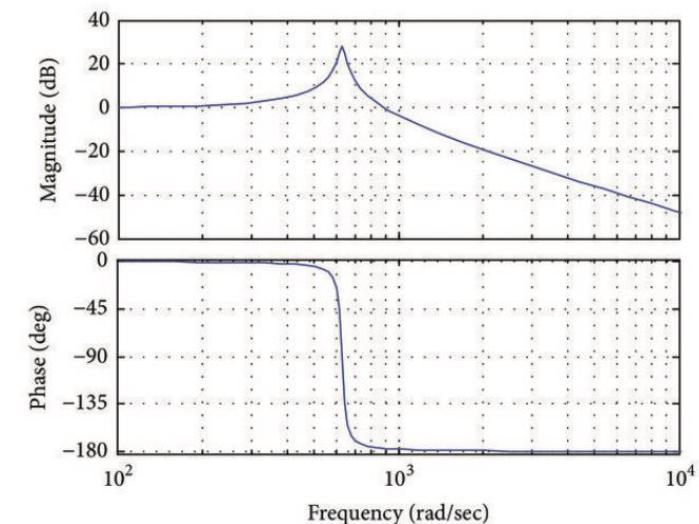
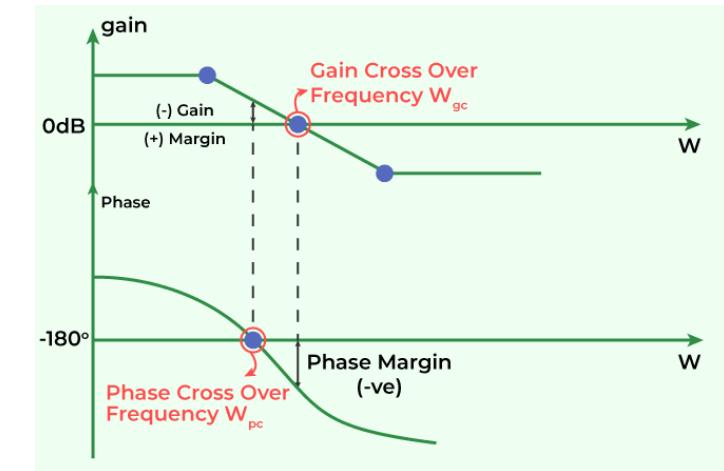
- ◆ **Frequência de cruzamento de ganho (0 dB)**
- Aqui medimos a **margem de fase**
- ◆ **Frequência de -180°**
- Onde a fase total do loop chega a -180°

💡 **Condição de instabilidade:**

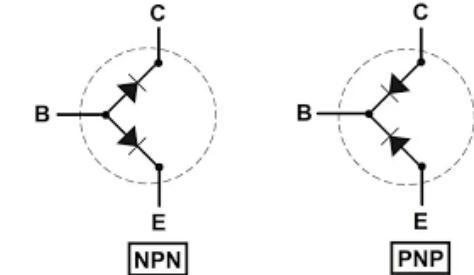
- Ganho de loop $|A\beta| \geq 1$
- E fase total $\approx -180^\circ$ (ou 360°)

💡 **Condição de estabilidade desejada:**

- Quando a fase chega a -180° , o ganho de loop deve ser:
- $|A\beta| < 1$



INTRODUÇÃO AOS TRANSISTORES BJT



Os BJT's (Bipolar Junction Transistors) são transistores fundamentais da eletrônica clássica e ainda amplamente utilizados em **amplificação analógica, RF, etapas de potência e circuitos discretos**.

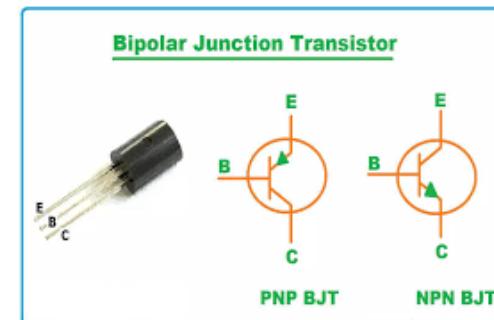
Diferente dos MOSFETs, os BJT's são **dispositivos controlados por corrente**, baseados no transporte de **portadores majoritários e minoritários** (elétrons e lacunas), daí o termo **bipolar**.

Estrutura básica do BJT: Um BJT é formado por **duas junções PN** e três terminais:

- **Base (B)** – controla o transistor
- **Emissor (E)** – injeta portadores
- **Coletor (C)** – coleta os portadores

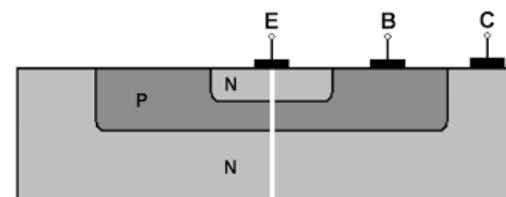
Tipos principais:

- **NPN:** Conduz quando a base fica mais positiva que o emissor $V_{be} = 0.7V$
- **PNP:** Conduz quando a base fica mais negativa que o emissor $V_{be} = -0.7V$



Como o BJT opera: Uma **pequena corrente na base** controla uma **corrente muito maior** entre coletores e emissor

- A relação é aproximadamente:
- $I_C = \beta \cdot I_b$, onde beta (ou hFE) é o ganho de corrente
- O BJT é essencialmente um **amplificador de corrente**.



ÁREAS DE OPERAÇÃO DO TRANSISTOR BJT

É o nosso trabalho como desenvolvedores do circuito em usar a polarização para definir como o transistor vai operar:

Amplificador

- Iremos usar a polarização para posicionar o ponto de operação Q na área ativa
- Vale lembrar que a polarização influencia nos parâmetros de impedância (entrada e saída) do amplificador

Chave

- Aí forçamos o transistor a operar alternando entre corte e saturação.

Elemento de controle de corrente

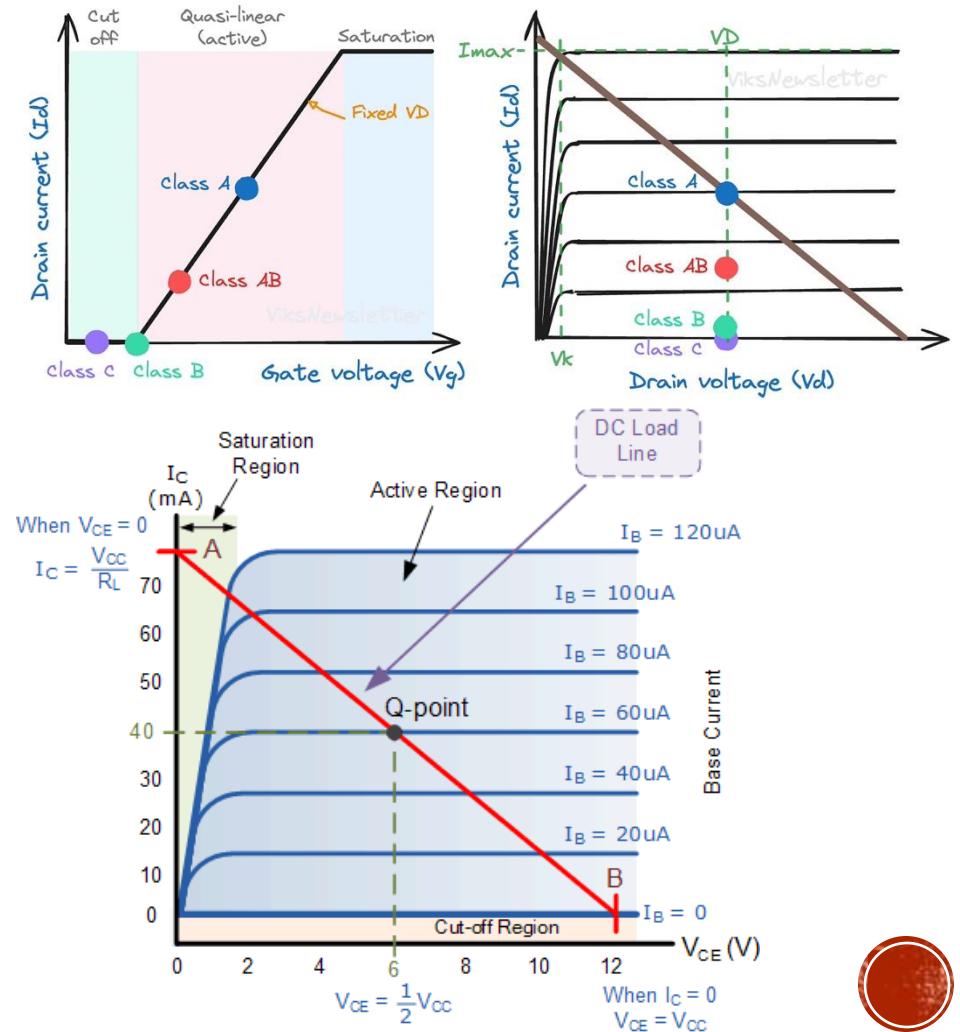
- Nesse caso também queremos o transistor na área ativa, um dos casos de uso seria os espelhos de corrente.

E o que devemos controlar no transistor BJT para definir a área de trabalho Q?

- Tensão Base Emissor (VBE)
 - $V_{BE} < 0.6V \rightarrow$ corte
 - $V_{BE} \approx 0.6 - 0.7V \rightarrow$ conduz
- Corrente de Emissor: $I_E = I_B + I_C \approx I_C$, por isso Re e fontes de Corrente no emissor são tão importantes, pois vai indiretamente controlar I_C
- Tensão VCE

→ Quem controla I_E controla o ponto de operação.

A variável que a gente não controla é o Beta, por isso compensamos com polarização inteligente, realimentação e fontes de corrente. β é um parâmetro do dispositivo, não um parâmetro de projeto.



INTRODUÇÃO MOSFET

Os **MOSFETs** (*Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistors*) são transistores fundamentais da eletrônica moderna e a **base dos circuitos integrados VLSI** (*Very-Large-Scale Integration*). Eles podem operar de diferentes formas dentro de um circuito, atuando como:

- **Chaves eletrônicas**
- **Amplificadores de sinais**
- **Resistores controlados por tensão**
- **Espelhos de corrente e fontes de corrente**

Nesta apresentação, iremos aprender **como polarizar, configurar e utilizar MOSFETs** em suas principais **regiões de operação**, entendendo **quando e por que** cada modo de funcionamento é utilizado.

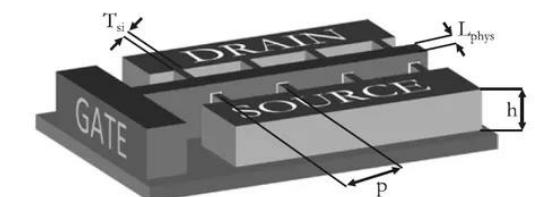
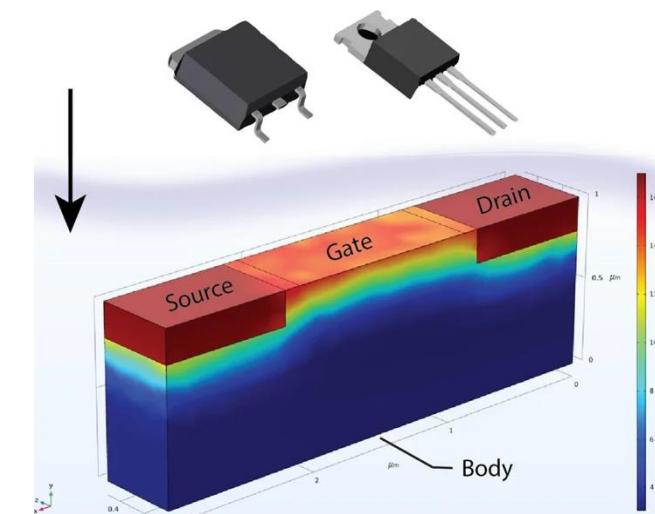
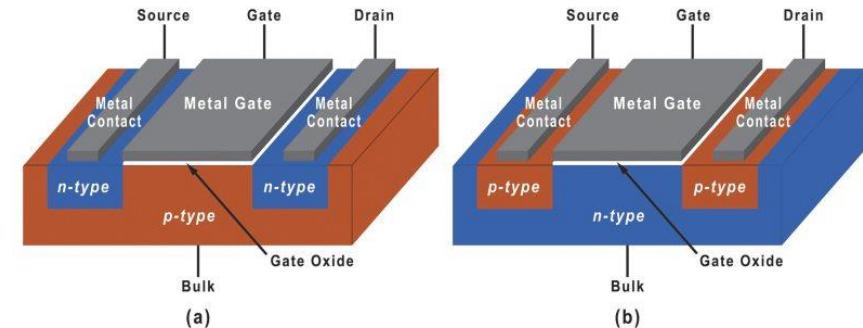


Fig. 1 Multi-fin FinFET [17]

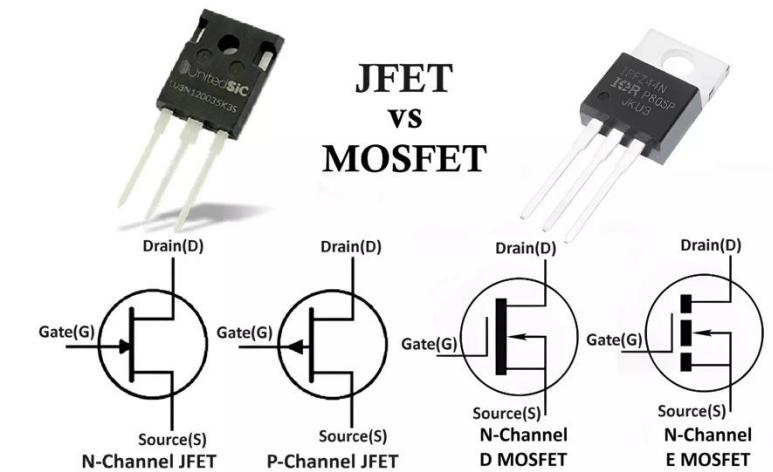
MOSFET PORTAS E TIPOS

O MOSFET é um transistor que possui **três terminais principais** (na prática são quatro, mas o terminal de corpo/bulk geralmente é ligado ao Source ou ao GND):

- **Gate** – Porta de controle (controlada por tensão)
- **Drain** – Terminal por onde a corrente é drenada
- **Source** – Terminal por onde a corrente entra no dispositivo

O MOSFET controla a **corrente entre Drain e Source** a partir da **tensão aplicada no Gate**, funcionando como um **dispositivo controlado por tensão**. Existem dois tipos principais de MOSFET:

- **NMOSFET (canal N)**
 - Conduz quando a tensão entre Gate e Source satisfaz: $V_{gs} > V_{th}$. Em condução, apresenta **baixa resistência ($R_{ds(on)}$)**
 - Muito usado em:
 - Lógica digital (CMOS)
 - Amplificadores
 - Chaveamento de cargas (low-side)
- **PMOSFET (canal P)**
 - Conduz quando a tensão entre Gate e Source satisfaz: $V_{gs} < V_{th}$ (V_{th} negativo)
 - Muito comum em:
 - Pull-up em CMOS
 - Chaves high-side
 - Gerenciamento de potência



Existe também um transistor da família dos FETs chamado **JFET**, que possui características diferentes do MOSFET:

- Normalmente **conduz sem tensão no Gate** (normally-on)
- Gate baseado em **junção PN**, normalmente usamos JFET (N)
- Muito estável e de **baixo ruído**
- **Principais aplicações do JFET:**
 - Amplificadores de baixo ruído
 - Osciladores analógicos (Design mais fácil que MOSFET e BJTs)
 - Instrumentação e RF

ÁREAS DE OPERAÇÃO DO TRANSISTOR MOSFET

Já no caso dos **MOSFETs** que é um transistor controlado por tensão, cabe também a nos projetistas configura-los nas seguintes áreas:

1 Corte (Cut-off): $V_{GS} < V_{th}$, MOSFET desligado

- Chaves ou circuitos lógicos desligado, PWM em off

2 Região ôhmica: $V_{GS} > V_{th}$ e $V_{DS} < (V_{GS} - V_{th})$

- Chaves ou circuitos lógicos ligado, PWM on
- Conversores DC-DC

3 Região ativa (Saturação no MOSFET) (nome confuso!)

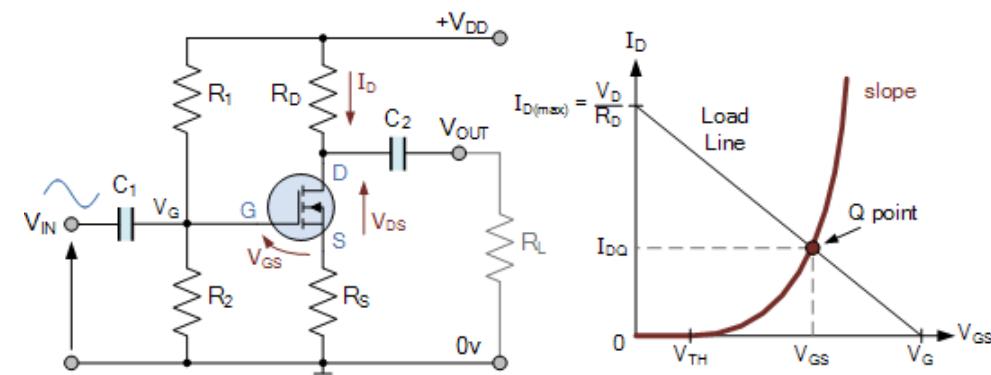
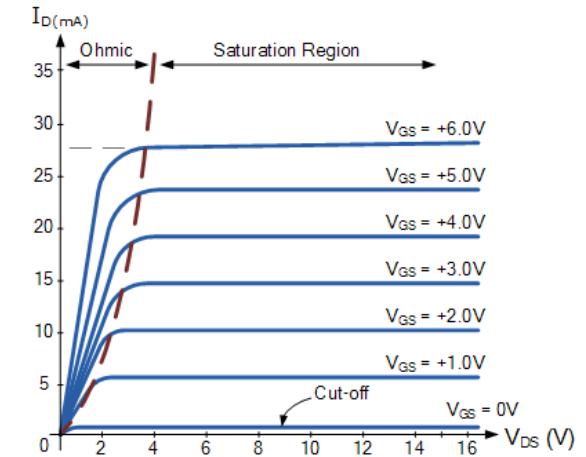
- Amplificadores Analógicos
- Fontes e espelhos de corrente
- Osciladores e amplificadores de RF

◆ O que controlamos no MOSFET para definir o ponto Q?

- Tensão Gate-Source V_{GS}
- Resistor de Source, define corrente e estabilidade, como o resistor de emissor que faz a realimentação negativa.
- Tensão Drain-Source V_{DS} , controlada indiretamente.
 - $V_{DS} = V_{DD} - I_D(R_D + R_S)$

🚫 O que Não controlamos diretamente:

- k_n
- V_{th} (varia com processo e temperatura)



MAIS DETALHES SOBRE O JFET

Podemos interpretar o JFET como uma chave controlada por tensão, onde uma tensão negativa entre Gate–Source controla a condução do canal.

- Quando $V_{GS} = 0$ → o canal está totalmente aberto
- À medida que V_{GS} fica mais negativo → o canal é estrangulado
- Em $V_{GS} = V_P$ → o canal é cortado (cutoff)

Principais Vantagens dos JFETs

- Altíssima impedância de entrada, Corrente de gate praticamente nula
- Ideal para sensores, pré-amplificadores e estágios de entrada
- Menor ruído em comparação com BJTs
- Comportamento mais previsível em pequenos sinais

Self-bias simples e estável

- Um único resistor no source cria o ponto de operação
- Excelente estabilidade térmica

Muito adequados para amplificadores e osciladores

- Boa linearidade em classe A
- Ganho suave (compressão natural do g_m)
- Facilita a estabilização da amplitude em osciladores senoidais

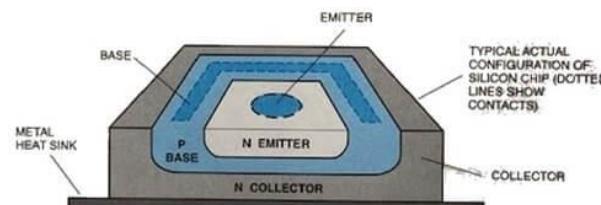
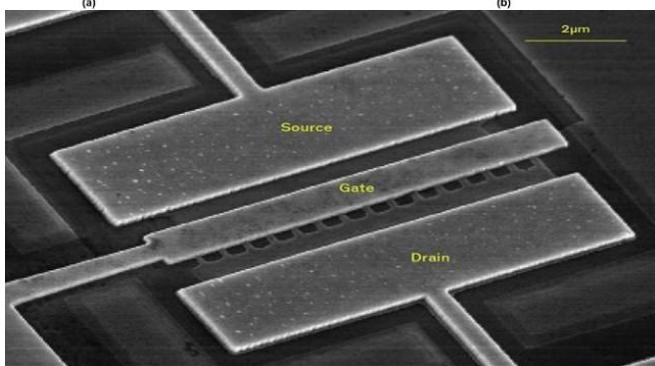
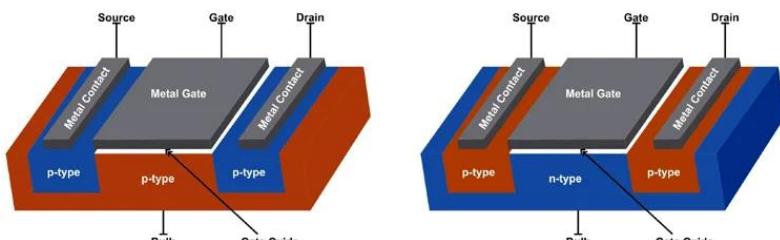
Desvantagens dos JFETs

- ⚠ Pouco usados como chaves digitais
 - Resistência $R_{DS(on)}$ maior que MOSFETs, fazendo serem mais lentos no chaveamento
- ⚠ Alta variabilidade de parâmetros (Dois JFETs do mesmo lote podem ter correntes muito diferentes)
 - Grande dispersão de: I_{DSS} e V_P (pinch-off)
- ➡ Isso exige circuitos de bias tolerantes, como o self-bias

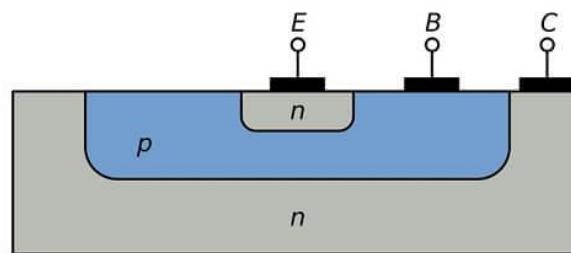


MOSFET VS BJT (GEOMETRIA VLSI)

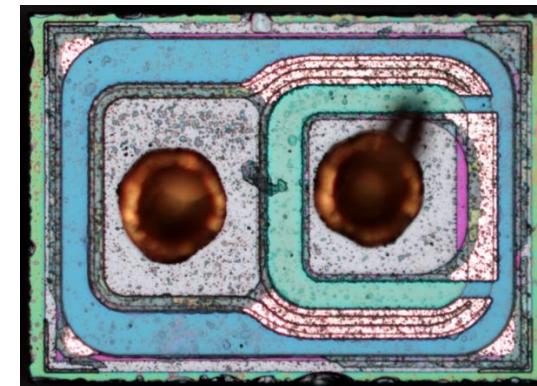
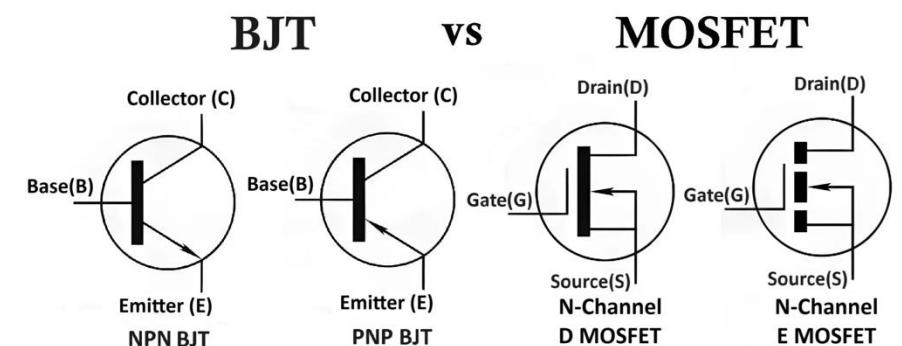
Os BJTs são mais complexos de produzir pois sua geometria é mais complexa. Essa é uma das razões que hoje em dia usamos MOSFET invés de BJTs.



(a) 3D cross section of NPN BJT



(b) 2D cross section of NPN BJT



BJT, MOSFET, JFET

BJT

- Amplificadores analógicos de precisão
- RF e áudio
- Etapas de potência
- Fontes e espelhos de corrente
- Osciladores clássicos

MOSFET

- Chaves eletrônicas (lógica digital)
- Processadores e memórias (CMOS)
- Conversores de potência
- Drivers e buffers
- VLSI / ULSI

JFET

- Pré-amplificadores de baixo ruído
- Entradas de instrumentos
- Buffers analógicos
- Osciladores (Pierce, Colpitts)
- Aplicações RF específicas

Característica	BJT	MOSFET	JFET
Tipo de controle	Corrente (I^B)	Tensão (V^{Gs})	Tensão ($V^{Gs} \leq 0$)
Corrente de entrada	Existe ($I^B \neq 0$)	~ 0 (ideal)	~ 0 (junção reversa)
Impedância de entrada	Baixa–Média	Muito alta	Alta
Linearidade	Alta	Média	Alta
Ruído	Baixo	Médio	Muito baixo
Integração VLSI	Ruim	Excelente	Limitada
Uso típico	Analógico / RF	Digital / Potência	Analógico / RF
Forma de polarização	Divisor de tensão + R_e	Divisor de tensão ou V^{Gs} fixo	Self-bias (R_s)
Parâmetro crítico	β (hFE)	$V^{Gs}(\text{th})$	I^{DSS} / V^P
Estabilidade térmica	Média (sensível)	Boa	Muito boa
Dificuldade de polarização	Alta	Média	Baixa



BJT, MOSFET (FORMULAS)

Fórmula	Descrição (o que ela diz)	Quando isso é importante
$I_D = K_n (V_{GS} - V_{TH})^2$	Modelo quadrático da corrente de dreno na região ativa (saturação). Relaciona tensão de controle com corrente.	Definir ponto de operação (Q) , estimar corrente em amplificadores Classe A, dimensionar bias em CI
$g_m = \frac{2I_D}{(V_{GS} - V_{TH})}$	Transcondutância: quanto o MOSFET converte variação de tensão em variação de corrente.	Ganho, ruído, linearidade, RF, op-amps
$A_v \approx g_m R_D$	Ganho de tensão com carga resistiva no dreno.	Amplificadores discretos de bancada , didática, estágios simples
$A_v \approx g_m r_o$	Ganho de tensão com carga ativa (fonte de corrente).	CIs analógicos , op-amps, ganho alto com pouco headroom
$r_o = \frac{1}{\lambda I_D}$	Resistência de saída causada pela modulação do comprimento do canal (efeito Early do MOSFET).	Ganho real em CI, precisão, espelhos de corrente
$f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_{gs} + C_{gd})}$	Frequência de transição: onde o ganho de corrente cai para 1.	RF , amplificadores rápidos, comparadores, VCOs
Capacitâncias C_{gs} , C_{gd} , C_{db}	Capacitâncias parasitas que limitam a resposta em frequência e causam efeito Miller.	Alta frequência, estabilidade, slew rate, layout

Fórmula	Descrição (o que ela diz)	Quando isso é importante
$I_C \approx \beta I_B$	Relação básica entre corrente de base e coletor.	Apenas didático; não projete dependendo de β
$I_E \approx I_C$	Aproximação prática (I_B é pequeno).	Análise rápida de corrente e polarização
$g_m = \frac{I_C}{V_T}$	Transcondutância do BJT ($V_T \approx 25$ mV).	Ganho, ruído, linearidade, RF, op-amps
$r_e = \frac{1}{g_m} = \frac{V_T}{I_E}$	Resistência dinâmica do emissor.	Ganho, degeneração, cálculo rápido de A_v
$A_v \approx -g_m R_C$	Ganho de tensão com carga resistiva no coletor.	Amplificadores discretos simples
$A_v \approx -\frac{R_C}{r_e + R_E}$	Ganho com degeneração no emissor (sem bypass).	Ganho previsível e estável em bancada
$A_v \approx -g_m r_o$	Ganho com carga ativa (fonte de corrente).	CIs analógicos, op-amps
$r_o = \frac{V_A}{I_C}$	Resistência de saída (efeito Early).	Ganho real, precisão, espelhos de corrente
$Z_{in} \approx r_{pi} + (\beta+1)R_E$	Impedância de entrada do emissor comum.	Interface com estágio anterior
$r_{pi} = \frac{\beta}{g_m}$	Resistência dinâmica da base.	Zin, ruído, matching
$V_{CE(Q)} \approx \frac{V_{CC}}{2}$	Ponto Q para máxima excursão Classe A.	Evitar clipping em bancada
f_T	Frequência de transição do BJT.	RF, amplificadores rápidos
Capacitâncias C_{be} , C_{bc}	Capacitâncias parasitas (efeito Miller).	Alta frequência, estabilidade

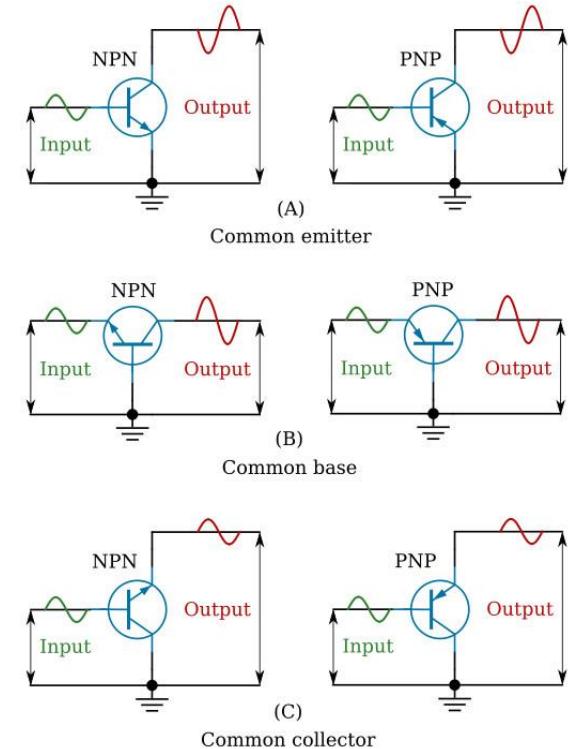
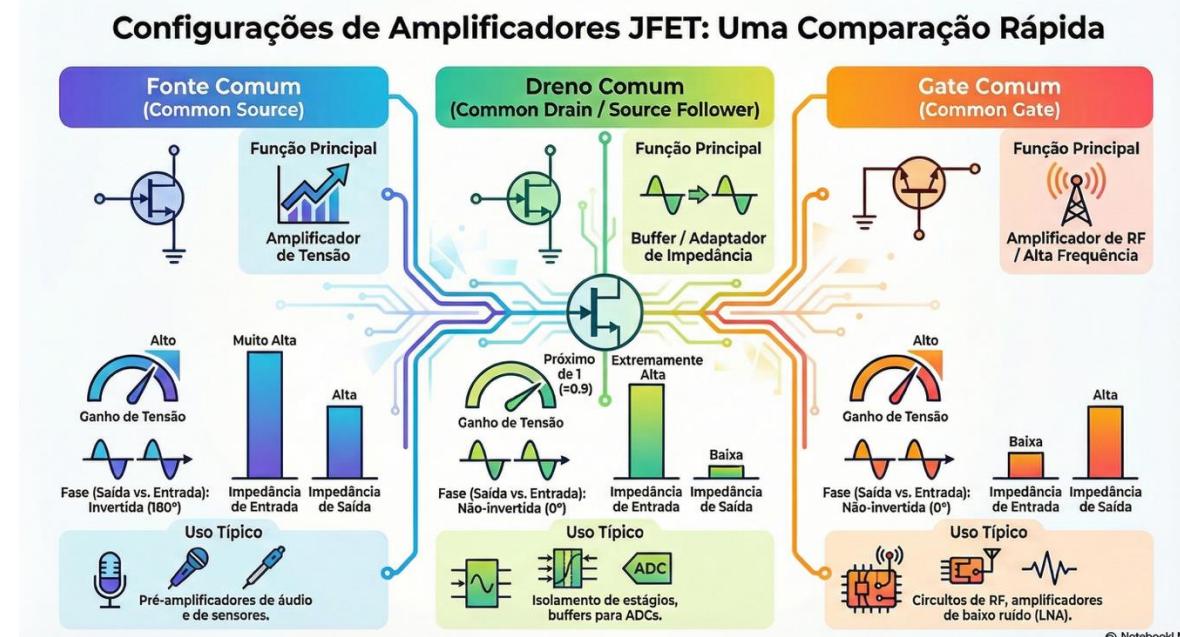
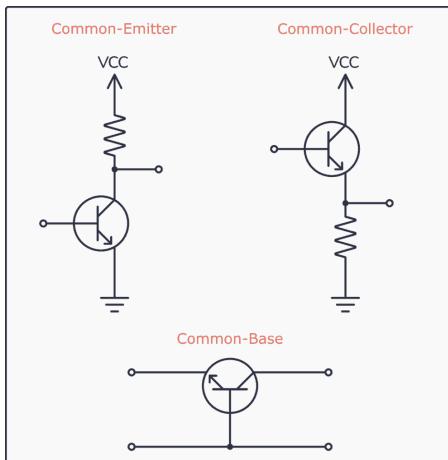
CONFIGURAÇÕES DOS TRANSISTORES

Existem 3 formas de conectar os transistores em um circuito (ie: BJT), e essas configurações são baseadas no terminal que vai ser ligado ao terra.

- Emissor Comum: Comum em Amplificadores e Osciladores
- Coletor Comum: Casamento de Impedâncias (entrada alta impedância, saída baixa impedância) saída em fase com a entrada e ganho de tensão quase unitário)
- Base Comum: Casamento de Impedâncias (entrada baixa impedância, saída alta impedância e circuitos osciladores RF). Saída em fase com entrada.

O mesmo serve para MOSFET e FETs so muda o nome (dreno, fonte, gate)

'Comum' significa o terminal em AC-ground, não necessariamente ligado diretamente ao terra DC.



POLARIZAÇÃO DE TRANSISTORES BJT

Polarização é o conjunto de resistores e fontes DC usado para:

- Definir o **ponto de operação (ponto Q)**
- Garantir que o BJT opere na **região desejada**
(corte, ativa ou saturação)
- Tornar o circuito **estável contra variações de β e temperatura**

⚠ Polarização x Configuração (conceito importante)

❓ As configurações mudam com a polarização?

- **Não.**
- As configurações **Emissor Comum, Base Comum e Coletor Comum**:
- **NÃO dependem** do circuito de polarização
- São definidas **apenas em análise AC**
- Dependem de **qual terminal está em AC-ground**

Polarização define o ponto de operação. Configuração define o comportamento do sinal.

Tipo de polarização	Descrição	Vantagens	Desvantagens	Uso típico
Polarização fixa de base	Base ligada a Vcc por um resistor	Circuito simples	Muito instável; alta dependência de β	💡 Didático
Polarização com resistor de emissor	Resistor no emissor cria realimentação negativa	Mais estável que base fixa	Ainda depende de β	💡 Amplificadores simples
Polarização por divisor de tensão	Divisor fixa Vb; R_e estabiliza Ic	Boa estabilidade; pouca dependência de β	Mais componentes	💡 Padrão industrial
Polarização com emissor bypassado	Igual ao divisor de tensão, com capacitor em paralelo com R_e	Estável em DC; alto ganho em AC	Menor linearidade em AC	💡 Amplificadores de áudio
Polarização por realimentação do coletor	Base ligada ao coletor	Autoestabilizante ; simples	Ganho reduzido	💡 Circuitos robustos
Polarização por fonte de corrente	Corrente definidaativamente	Máxima estabilidade; alta precisão	Maior complexidade	💡 CIs analógicos, espelhos de corrente

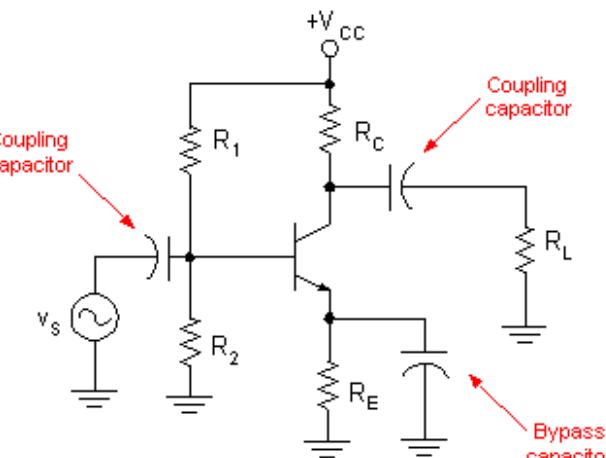
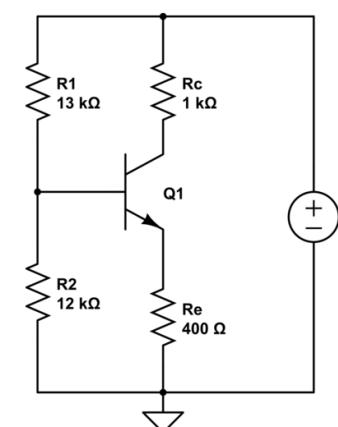
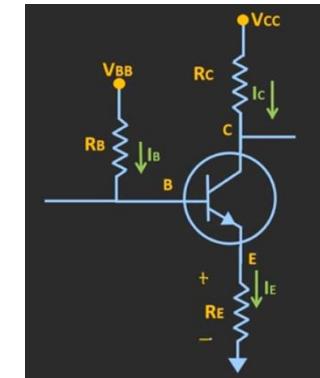
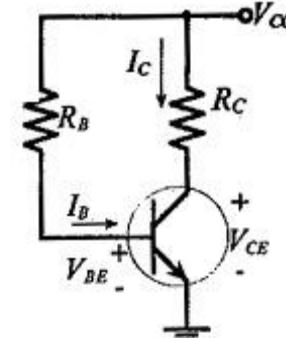


MAIS SOBRE POLARIZAÇÃO

Vemos aqui os tipos de polarização com transistores:

1. Polarização Fixa da Base: Simplesmente didático, não usado na prática.
2. Polarização com resistor de Emissor: Esse resistor melhora a dependência a variações térmicas, ele é usado em amplificadores simples.
3. Polarização com divisor e resistor de emissor: Essa é a melhor forma de polarizar pois o divisor de tensão limita a influencia do Beta
4. Uso do Emissor com Bypass que aumenta ainda mais o ganho de tensão em AC.

Lembre-se que a polarização só define a área de trabalho do transistor não a sua configuração (base, coletor, emissor) comum.



ESPELHOS DE CORRENTE

Um **espelho de corrente** é um circuito que:

- Gera uma **corrente de referência**
- **Replica (espelha)** essa corrente em um ou mais ramos
- Mantém a corrente **quase constante (limitada pela tensão de compliance do espelho)**, mesmo com variações de:
 - Tensão / carga
 - β (BJT) ou parâmetros do transistor

Nos usamos espelhos de corrente para implementar fontes de corrente.

◆ **Por que usar espelhos de corrente?** Espelhos de corrente são usados para:

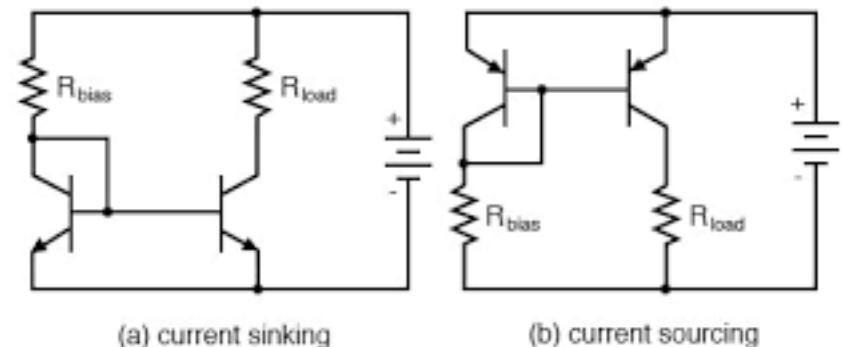
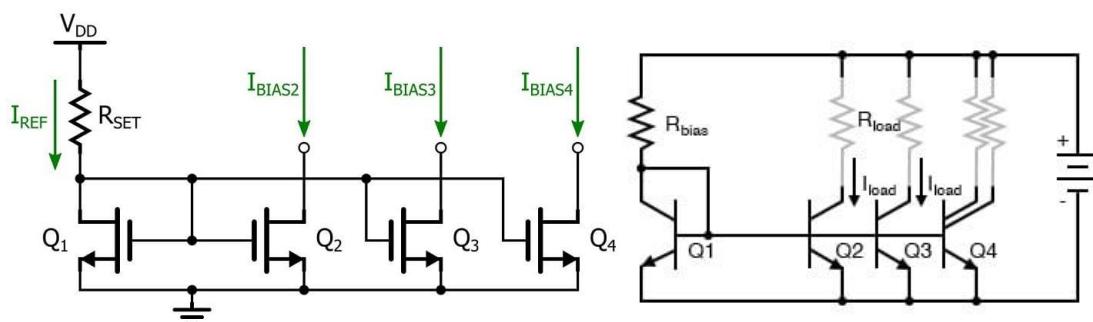
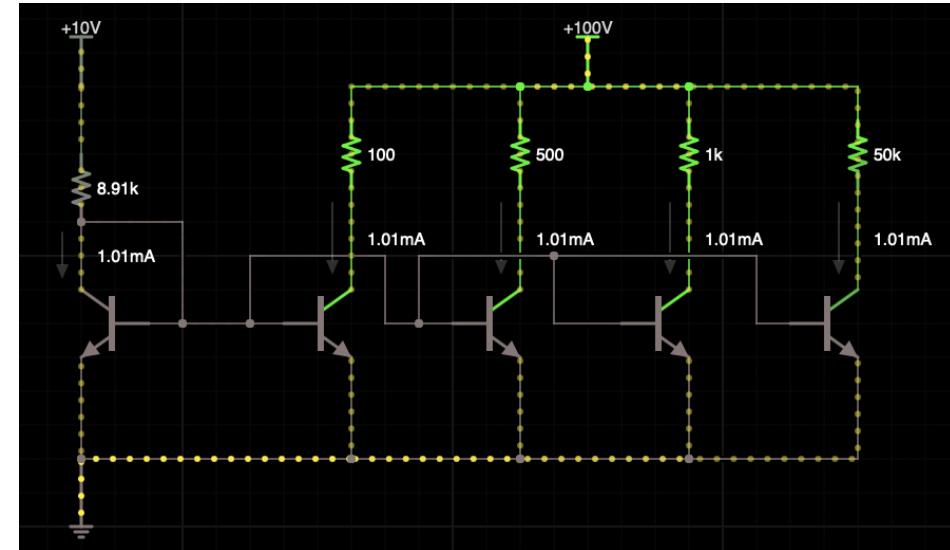
- Polarização estável de transistores
- Substituir resistores grandes
- Aumentar ganho de amplificadores
- Melhorar linearidade
- Reduzir dependência de β e V_{CC}

Os espelhos de Corrente podem ser do tipo:

- Source: Corrente sai (Usado com transistores P (ie: PMOS))
- Sink: Corrente entra (Mais usado em Polarização)

Os espelhos de Corrente podem ser feitos com MOSFET, JFET e BJT.

Espelhos de corrente são a base da polarização moderna em circuitos analógicos.



POLARIZACAO COM FONTES DE CORRENTE

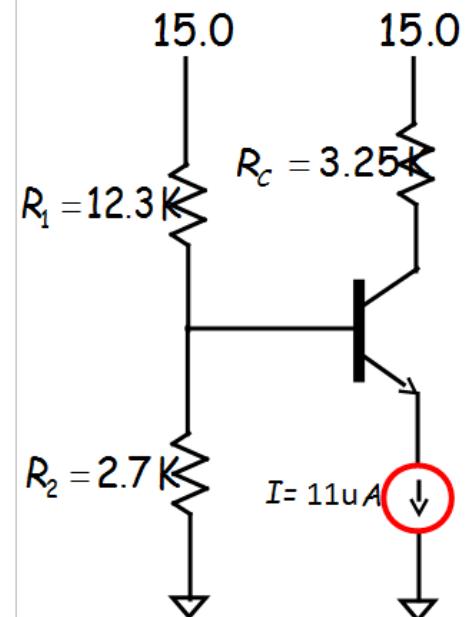
Na polarização por **fonte de corrente**, o ponto de operação do transistor é definido por uma **corrente fixa**, e **não diretamente por resistores ligados à tensão**.

💡 Essa fonte de corrente é, na prática, implementada com:

- **Espelhos de Corrente usando BJT's, MOSFETs ou JFETs**

❖ **Por que usar fontes de corrente na polarização?**

- Menor dependência do Beta ou parâmetros dos transistores
- Maior ganho de tensão
- *Menor variação com temperatura (comparado à polarização resistiva)*
- Maior linearidade
- Facilita projetos de circuitos integrados.
- Menor dependência do VCC
- São vantagens úteis até para osciladores
- Melhor para projetos VLSI
 - Resistores são grandes para implementar no CI
 - Temos mais controle nas características dos transistores que resistores



Fontes de corrente transformam polarização em controle preciso de operação

SELF-BIAS (AUTO POLARIZAÇÃO) NO JFET

O JFET é naturalmente controlado por tensão, e permite uma polarização simples e estável usando apenas um resistor no Source (Rs).

Como funciona o Self-Bias

- O Gate é mantido em 0 V (via resistor grande)
- A corrente de dreno cria uma queda em Rs
- Isso torna o Source positive

Etapas para polarização e design de amplificador Classe A, dado um ganho A, por exemplo 5

1. Escolha R_g entre 1Mohms e 10Mohms (livre). (Essa vai ser a impedância de entrada, Z_{in})
2. Definir uma Corrente de dreno I_d (1 a 3)mA
3. Escolha o R_s para obter a corrente de dreno I_d desejada, Para I_d de alguns mA, R_s tipicamente fica entre centenas de ohms e alguns kΩ
4. Escolha R_d para obter o ganho desejado, com R_s , lembrando que R_d também define a impedância de saída.
5. Se você fizer um Bypass capacitivo em R_s o ganho vai ficar mais alto e controlado pelo parâmetro G_m do JFET, por isso você pode por em serio um resistor menor (ie 470 ohms) e fazer o Bypass nele, para voltar a ter o ganho controlado.

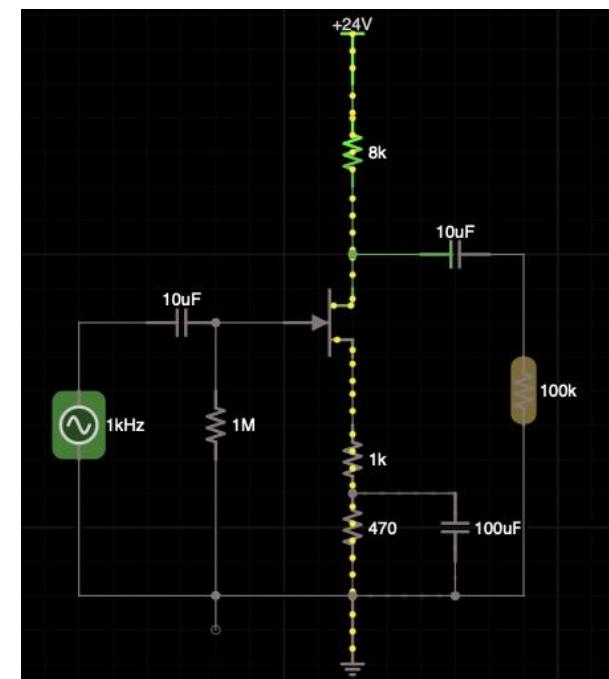
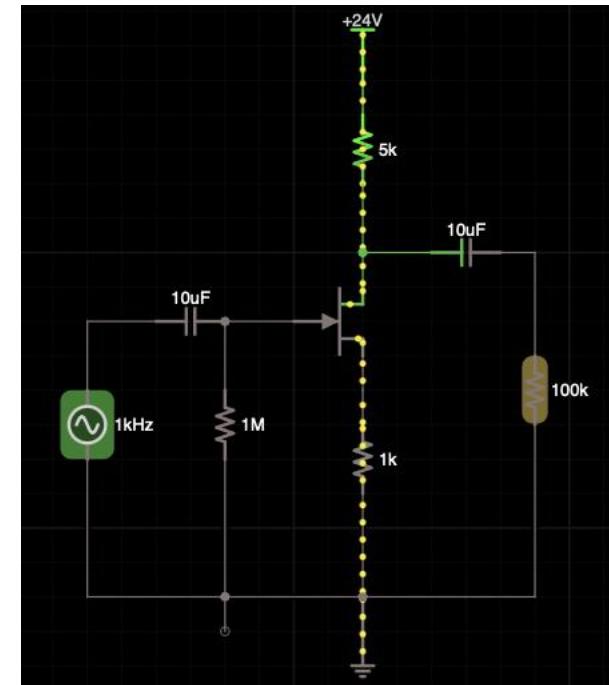
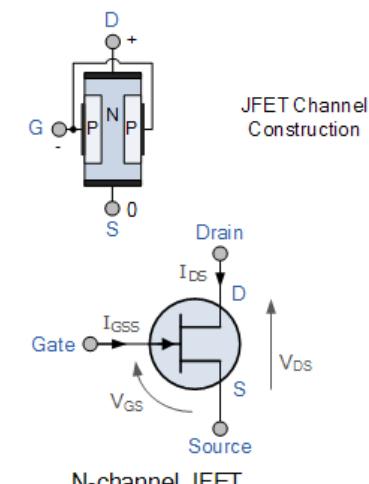
Observe como o JFET é o transistor mais fácil para ser usado em pré-amplificadores lineares (classe A), e osciladores.

$$A_v \approx -\frac{R_D}{R_S}$$

$$Z_{in} \approx R_G$$

$$Z_{out} \approx R_D$$

$$V_{GS} = -I_D \cdot R_S$$



POLARIZAÇÃO BJT, MOSFET, JFET

Tipo de polarização	BJT	MOSFET	JFET
Resistor simples	✓	✓	✓
Resistor no emissor/source	✓	✓	✓
Divisor de tensão	✓	✓	⚠️ menos comum
Self-bias	✗	⚠️	✓ (clássico)
Fonte de corrente	✓	✓✓✓	✓



EFEITO DA POLARIZAÇÃO E CONFIGURAÇÃO EM AMPLIFICADORES

A polarização define o ponto DC de operação.

A configuração (emissor, base ou coletor comum) define quem “vê” o sinal e, portanto, as impedâncias e o ganho.

1 O que a polarização realmente controla

- ganho
- impedância de entrada (Z_{in}), idealmente alta
- impedância de saída (Z_{out}), idealmente baixa (para etapas de saída), para pre-amplificação queremos ganho logo a impedância de saída será mais alta.

Ou seja a polarização não muda a topologia, mas influencia bastante nas características do circuito.

2 O que a configuração realmente controla

- onde o sinal entra
- onde a saída é observada
- se há inversão de fase
- ordem de grandeza das impedâncias

3 Vale lembrar aqui que a polarização com fonte de corrente (espelho de corrente) tem melhores resultados:

- Maior Ganho, Impedância de entrada mais previsível, e saída mais linear
- Maior Impedância de saída que é ideal para estágios de pré-amplificação e osciladores.



CONFIGURAÇÃO X IMPEDÂNCIA X GANHO X POLARIZAÇÃO

Configuração	Entrada (onde entra o sinal)	Saída (onde sai o sinal)	Zin	Zout	Ganho de Tensão	Ganho de Corrente	Fase	Onde o ganho é definido	Influência da polarização
Emissor Comum (CE)	Base	Coletor	Média ($\approx r_{\pi} \parallel$ rede de polarização)	Alta ($\approx RC \parallel r_o$)	Alto	Alto ($\approx \beta$)	Invertida (180°)	RC, gm, RE (se não bypassado)	Define gm → define ganho, Zin e linearidade
Base Comum (CB)	Emissor	Coletor	Muito baixa ($\approx 1/gm$)	Alta	Alto	≈ 1	Não inverte	RC e gm	Crítica: IC define diretamente Zin
Coletor Comum (CC)	Base	Emissor	Alta	Baixa	≈ 1	Alto	Não inverte	Não há ganho de tensão	Define Zout, corrente máxima e faixa linear



CONFIGURACAO (BJT, MOSFET, JFET)

Configuração	BJT	Nome MOSFET / JFET	Zin	Zout	Ganho (V)	Fase	Observação
Emissor / Source comum	Emissor comum	Source comum	Média (BJT)Alta (FET)	Alta	Alto	180°	Principal amplificador
Base / Gate comum	Base comum	Gate comum	Muito baixa (BJT)Baixa– média (FET)	Alta	Alto	0°	RF, alta frequência
Coletor / Dreno comum	Coletor comum	Dreno comum	Alta	Baixa	≈ 1	0°	Buffer / seguidor



POLARIZAÇÃO COM FONTES DE CORRENTE VS RESISTORES

Parâmetro	Com resistor	Com fonte de corrente
Ganho de tensão	Médio	Alto
Zout	Média	Muito alta
Zin	Normal	Igual ou mais previsível
Dependência de Vcc	Alta	Baixa
Dependência térmica	Alta	Baixa
Linearidade	Média	Melhor



CLASSES DE AMPLIFICADORES

As classes de amplificadores descrevem **como o transistor é polarizado e por quanto tempo do ciclo do sinal ele conduz**.

Elas determinam **linearidade, eficiência, distorção e aplicação**.

Classe A: Mais linear, menos eficiente

- Transistores polarizados no meio da região ativa, ele fica sempre ligado, usando a configuração emissor (BJT) ou Fonte (FET) comum.

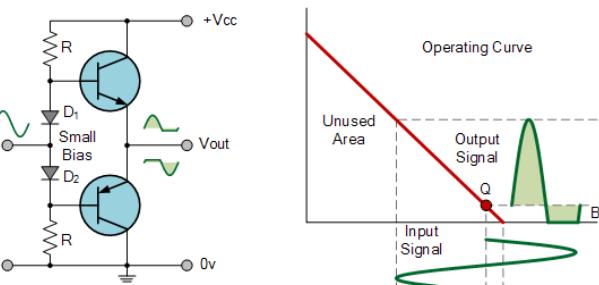
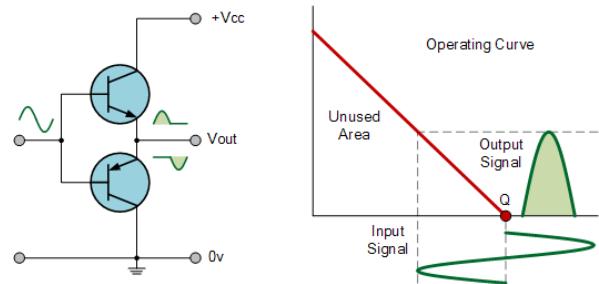
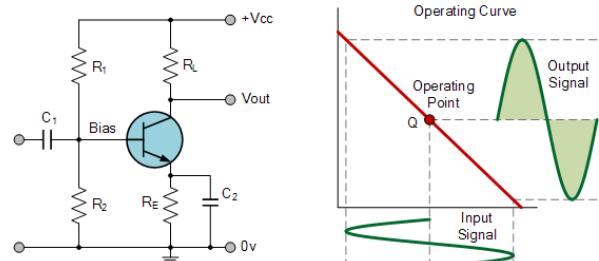
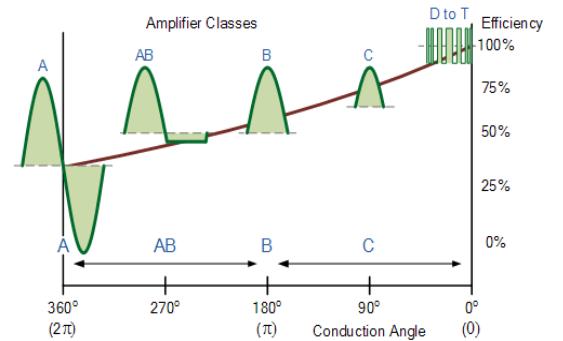
Classe B: Dois transistores P e N (NPN / PNP) “complementares”, polarizados no limiar da condução, na configuração seguidor de emissor (BJT) / source (FET). Ele é mais eficiente que a classe A, porém tem a distorção de cross-over. Puramente didático pouco usado na prática.

Classe A/B: Dois transistores complementares (push/pull) levemente polarizados na condução, usando diodos ou multiplicadores VBE. Menos distorção e melhor eficiência.

Classe C: Transistor cortado, conduzindo apenas nos picos do sinal, muito eficiente, porém o sinal fica bem distorcido. Normalmente usados em osciladores RF e transmissores sintonizados, nunca em áudio.

Classe D: Requer a modulação do sinal em PWM, uma etapa de filtragem, esse amplificador tem uma eficiência altíssima porém requer filtragem para remover as distorção e ruídos.

Vale lembrar que os amplificadores B, A/B, C e D são normalmente amplificadores usados na saída, ou seja queremos que ele tenha um ganho de corrente alto (baixa impedância de saída) e um ganho de tensão quase unitário. O ganho de tensão na prática vem de outras etapas anteriores.



PROJETANDO AMPLIFICADOR CLASSE A/B

Escolha uma corrente que ligue os diodos, porém lembre-se que esses resistores irão influenciar a impedância de entrada do circuito, resistores muito baixo irão fazer o Z_{in} diminuir. Também na prática usamos resistores em cada emissor de valor baixo (até 50 ohms) para estabilização térmica, proteção contra curtos e melhorar a distorção. Podemos também substituir os diodos por um [VBE multiplier](#) que permite ajustar a tensão nas bases

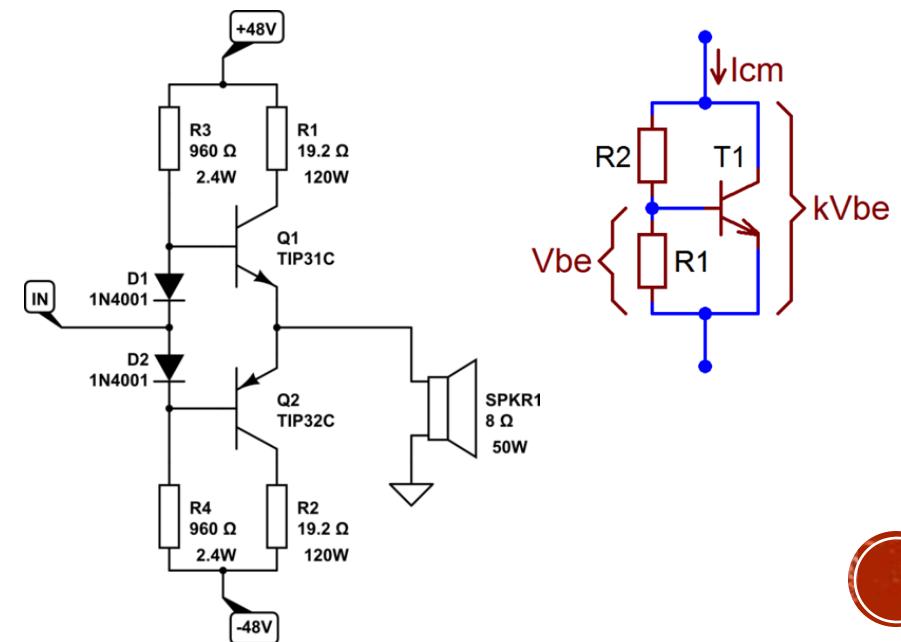
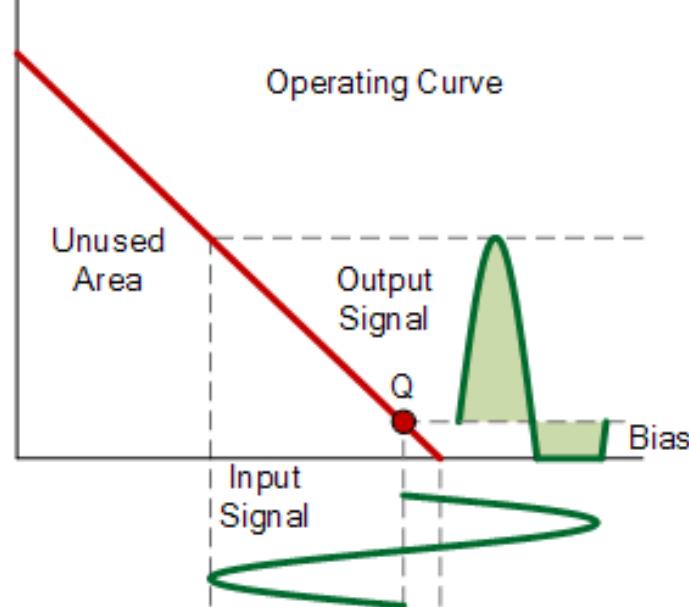
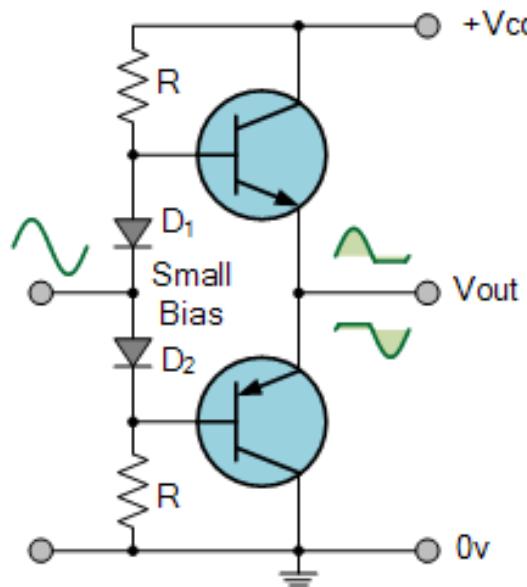
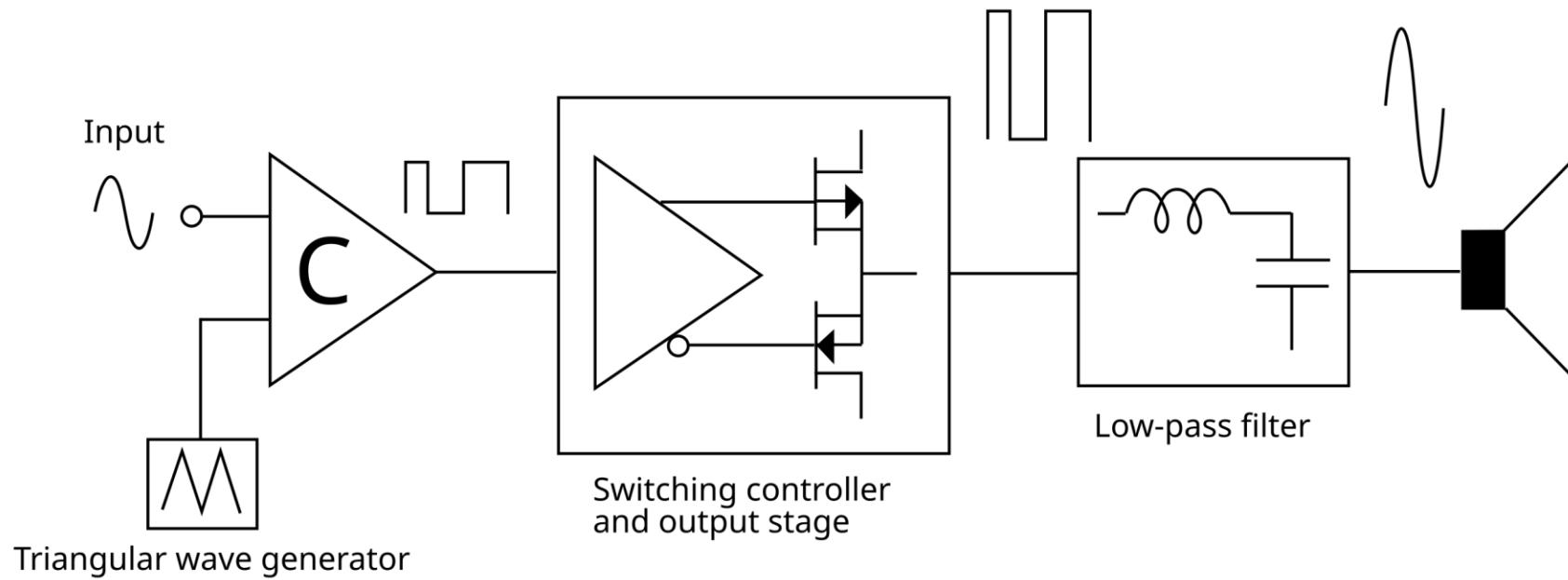


DIAGRAMA DE BLOCOS AMPLIFICADOR CLASSE D



AMPLIFICADOR DIFERENCIAL

Um amplificador diferencial amplifica a diferença entre dois sinais, rejeitando tudo que é comum aos dois.

- $V_{out} \propto (V_1 - V_2)$
- Ele não amplifica tensão absoluta, apenas diferença.

Por que ele é tão importante?

O amplificador diferencial é a **célula fundamental da eletrônica analógica moderna**:

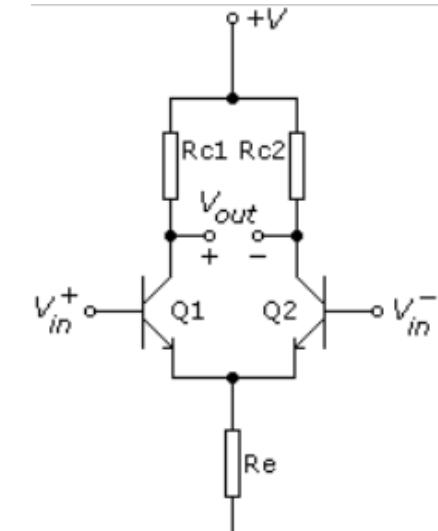
- Base de **amplificadores operacionais (primeira etapa) e comparadores**
- Base de **circuitos integrados analógicos**
- Excelente **rejeição de ruído (CMRR)**

Funcionamento conceitual

O circuito é composto por:

- Dois transistores **idênticos, com entradas independentes (V1 e V2)**
- Uma **fonte de corrente comum** (cauda)
- Cargas iguais nos coletores (ou drenos)
- A fonte de corrente força a **corrente total fixa**, que é **dividida** entre os dois transistores.

💡 O amplificador diferencial não mede sinais, ele mede diferenças, esse circuito é muito usado em sensores medicos onde queremos eliminar do sinal o ruído comum (ele fontes eletricas de alimentacao) em sinais super pequenos (por exemplo ECG)



◆ Comparação BJT x JFET no diferencial

Característica	BJT	JFET
Controle	Corrente	Tensão
Impedância de entrada	Média	Muito alta
Ruído	Médio	Muito baixo
Ganho	Alto	Médio
Estabilidade	Alta	Média



AMPLIFICADOR DIFERENCIAL COM JFET

1 Par diferencial (Q1, Q2 – 2N4392)

- Dois JFETs iguais
- Gates = entradas V^+ e V^-
- Corrente total quase constante

2 Cargas de dreno ($3.3 \text{ k}\Omega$)

- Convertem corrente em tensão
- Definem o ganho de saída, com resistores de Source
- $\Delta V_{out} \approx -\Delta I_D \cdot R_D$

3 Degeneração de source (100Ω)

- Aumenta linearidade, igual ao resistor de emissor que melhora dependência térmica.
- Reduz sensibilidade a variações do JFET
- Estabiliza o ganho

4 Polarização de gate ($100 \text{ k}\Omega$)

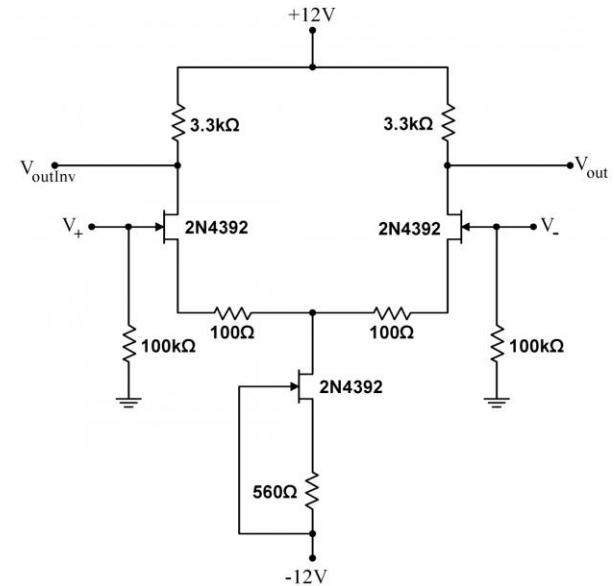
- Define referência DC
- Evita gates flutuantes
- Mantém alta impedância de entrada

5 Cauda (JFET + 560Ω → current sink)

- Define a **corrente total** do par
- Atua como **constant current diode (CRD)**, mas poderia ser um **current mirror Sink**
- Melhora CMRR e estabilidade

Queremos aqui definir um ganho em malha aberta de 20 a 50, definido por R_d , R_s e g_m , sendo que g_m depende da Corrente de dreno, e por isso queremos fixar a Corrente de dreno.

$$A_{diff} \approx \frac{g_m \cdot R_d}{1 + (g_m \cdot R_s)}$$



GILBERT CELL (MIXER RF)

A **Gilbert Cell** é um circuito que realiza **multiplicação analógica de sinais**:

$$V_{out} \propto V_1 \cdot V_2 \text{ (proporcional)}$$

Ela é construída **empilhando pares diferenciais**, e por isso é uma **extensão direta do amplificador diferencial**.

Por que a Gilbert Cell é tão importante?

A Gilbert Cell é um dos blocos mais importantes da eletrônica analógica e RF:

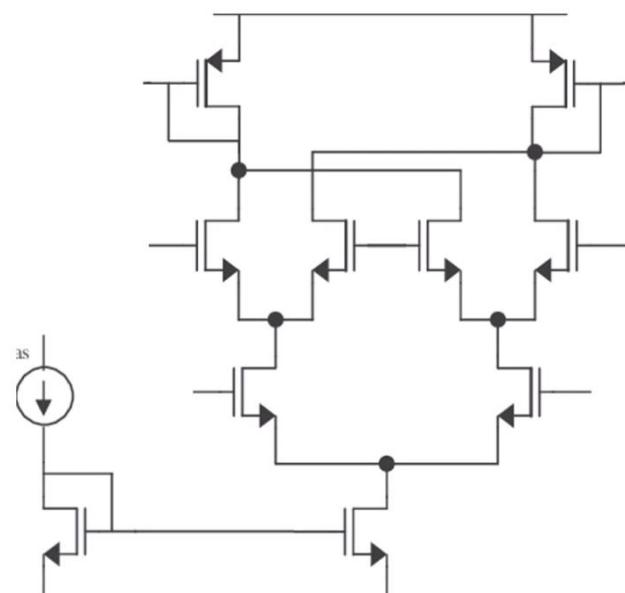
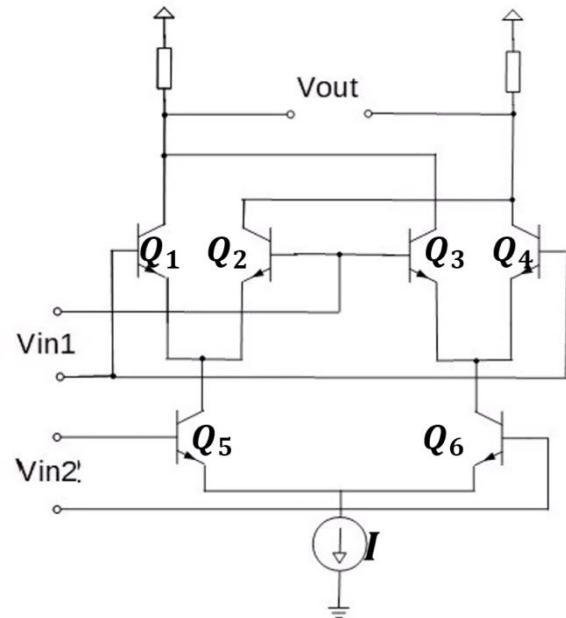
- Base de **mixers RF** (AM, FM, I/Q)
- Base de **multiplicadores analógicos**
- Base de **moduladores e demoduladores**

A Gilbert Cell combina **dois conceitos**:

- 1 **Par diferencial inferior**
 - Converte uma tensão em corrente (transcondutância)
- 2 **Par diferencial superior (chaveador)**
 - Direciona essa corrente de acordo com outro sinal

Estrutura da Gilbert Cell A **célula clássica** possui **6 transistores**:

- **Par diferencial inferior** (Q1, Q2) → Converte V_{RF} em corrente diferencial
- **Par diferencial superior cruzado** (Q3–Q6) → Comuta a corrente conforme V_{LO}
- **Cargas resistivas ou ativas** → Convertem corrente em tensão de saída
- **Fonte de corrente (cauda)** → Define linearidade e ganho



RF MIXER

Um **Mixer** é um circuito que multiplica dois sinais, gerando novos componentes de frequência.

$$V_{out} \propto V_{RF} \cdot V_{LO}$$

Onde:

- **RF** → sinal de interesse
- **LO (Local Oscillator)** → oscilador local

👉 Mixer não amplifica informação, ele muda a frequência onde a informação está.

O que acontece ao misturar dois sinais?

Quando multiplicamos dois sinais senoidais, obtemos duas novas frequências:

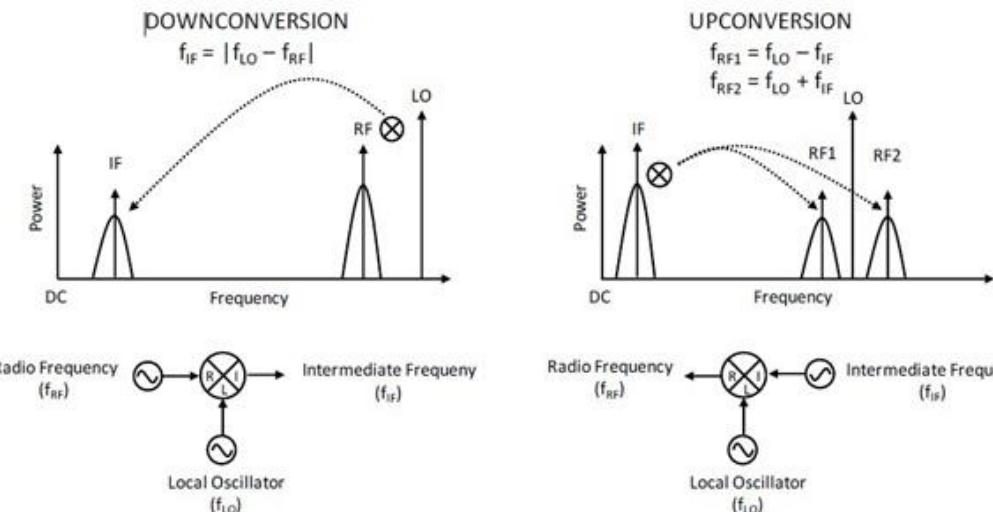
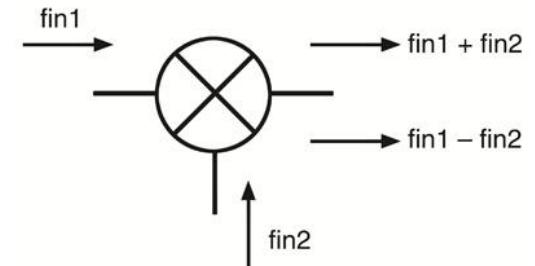
- $f_{out} = f_{RF} + f_{LO}$ (Produto Soma)
- $f_{out} = |f_{RF} - f_{LO}|$ (Produto Diferença)

E na maioria das vezes:

- **Produto soma:** Usada em Transmissores para aumentar a frequência (up-conversion)
- **Produto diferença:** Usados em Receptores para diminuir a frequência (down-conversion)

👉 O filtro na saída decide qual frequência será usada. (O mixer não decide nada, o engenheiro irá usar um filtro dependendo do que for o objetivo do projeto)

Os Mixers servem para aumentar a frequência de um sinal modulado, ou diminuir.



CHAVE MOSFET

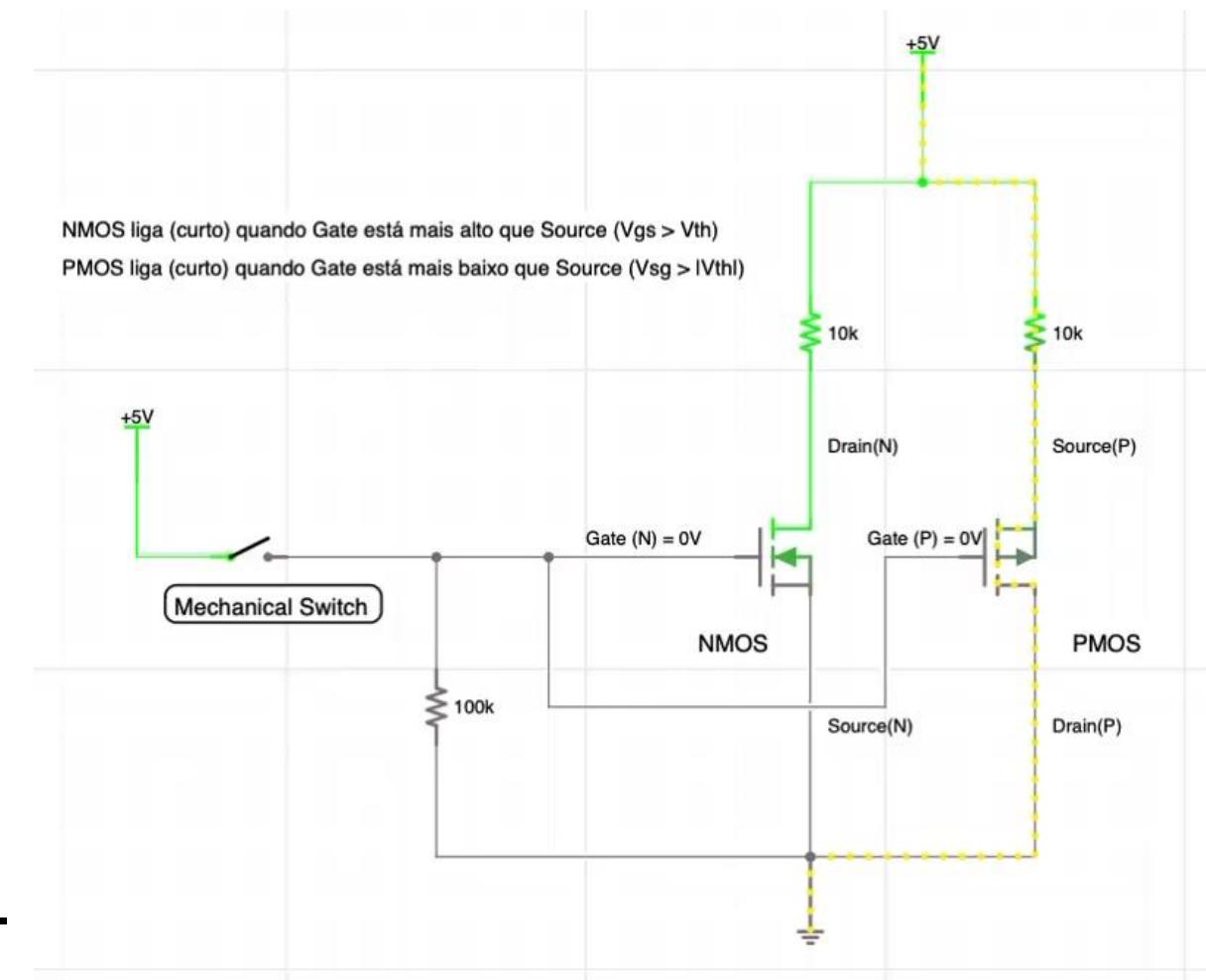
O caso de uso mais simples e na verdade mais usados do MOSFET é como chave. Agora Observe:

- NMOSFET liga quando o Gate fica mais alto que o Source, ao contrário ele fica desligado.
- PMOSFET liga quando o Gate está mais baixo que o source, fazendo parecer que nesse caso ele está normalmente ligado.
- **⚠️ O PMOS não é normalmente ligado; ele apenas conduz quando o Gate está em um potencial mais baixo que o Source.**

Um transistor só pode ser chamado de “normally-on” se:

- **Sem nenhuma tensão de controle aplicada, ele conduz.**
- ➡️ Exemplos:
 - JFET → normalmente ligado ($V_{gs} = 0 \rightarrow$ conduz)

NMOS liga (curto) quando Gate está mais alto que Source ($V_{gs} > V_{th}$)
PMOS liga (curto) quando Gate está mais baixo que Source ($V_{sg} > V_{thl}$)



PROTEÇÃO NO CHAVEAMENTO

Cargas reais **não são ideais**. Ao chavear cargas **indutivas** (motores, relés, solenoides, transformadores), surgem fenômenos perigosos:

- Picos de tensão (overshoot)
- Oscilações (ringing)
- Alto dv/dt (Variação rápida de tensão)
- EMI / ruído eletromagnético
- Queima de MOSFETs, BJTs e drivers

⚡ Regra de ouro:

- Sempre que houver **indutância + chave**, deve haver **proteção**.

Díodo Flywheel (Flyback)

O problema

- Um indutor **não permite variação instantânea de corrente**
- Ao desligar a chave, a corrente “procura um caminho”
- Sem proteção → **tensão sobe até destruir o transistor**

A solução: Díodo Flywheel

- Fornece um caminho seguro para a corrente
- Dissipa a energia armazenada no indutor
- Protege o transistor

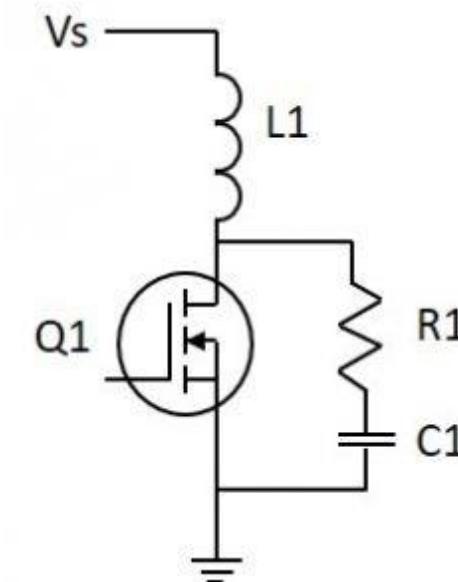
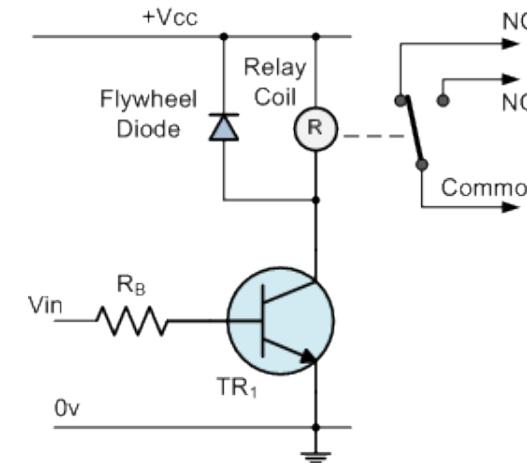
RC Snubber

O problema: Mesmo com flywheel, ainda podem ocorrer:

- Ringing (L + C parasita)
- Oscilações de alta frequência
- EMI

A solução: RC Snubber

- Um **resistor + capacitor em série**
- Dissipa energia / Amortece oscilações
- Reduz picos de tensão



As vezes também precisamos proteger o Gate contra tensões muito altas usando um Zener.



OPTO-ACOPLADORES

Um **optoacoplador** é um dispositivo que transmite um sinal usando **luz**, garantindo **isolação galvânica** entre entrada e saída.

- Entrada: **LED**
- Saída: **Fototransistor / Fotodiodo / Triac / Driver**
- Não existe conexão elétrica direta

🛡 O que ele protege?

- Optoacopladores **impedem que ruídos e falhas cheguem ao circuito sensível**.
- Protegem contra:
- Diferença de potencial entre terras
- Ruído de chaveamento (EMI)
- GND bounce
- Surtos e falhas catastróficas
- Loop de terra

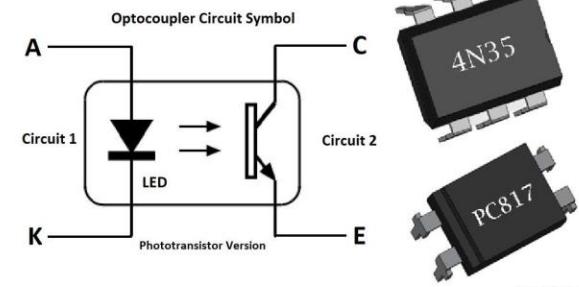
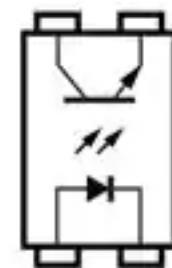
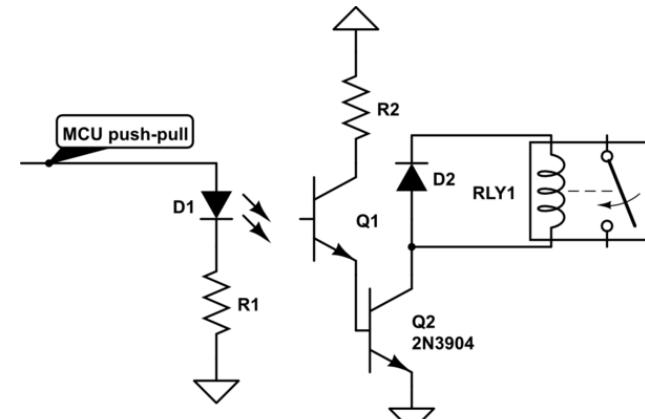
⚙️ Onde usar optoacopladores?

- Use opto-isolação quando existir:
- Alta tensão × baixa tensão
- Potência × lógica
- Ambientes ruidosos
- Cabos longos
- Sistemas industriais

📌 Exemplo clássico:

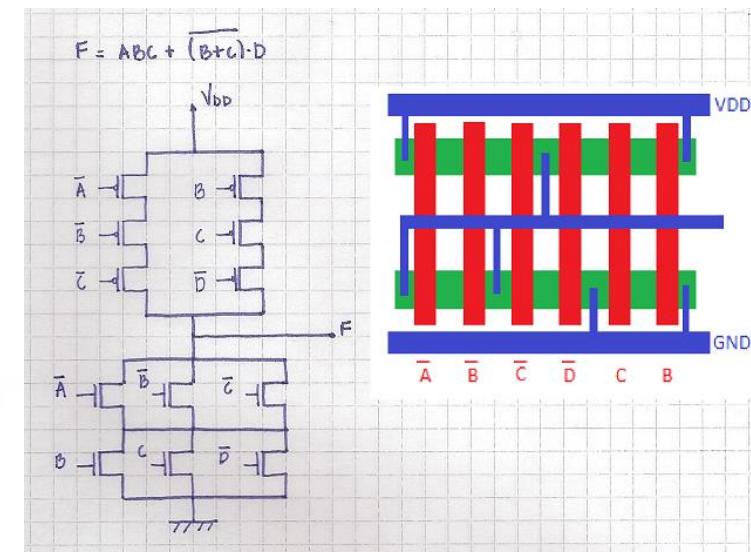
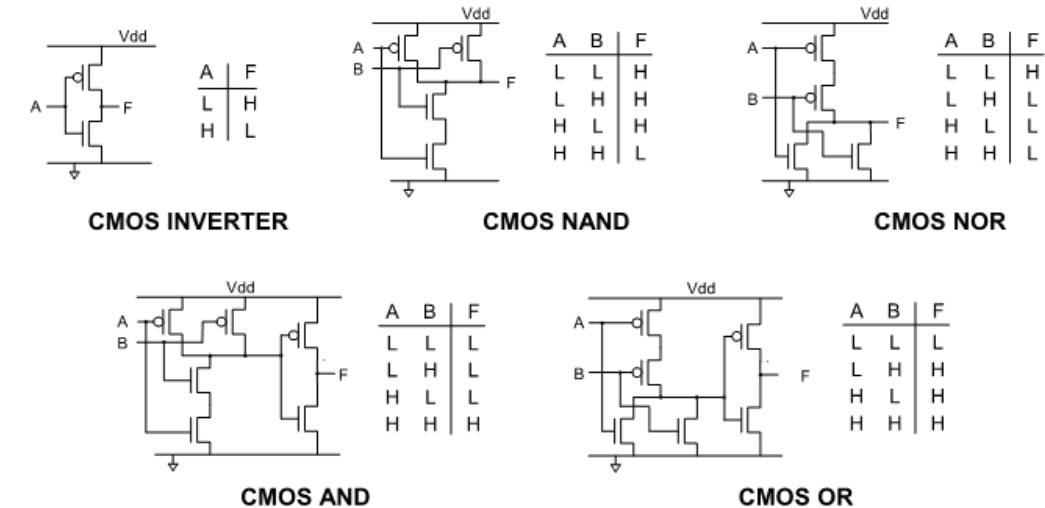
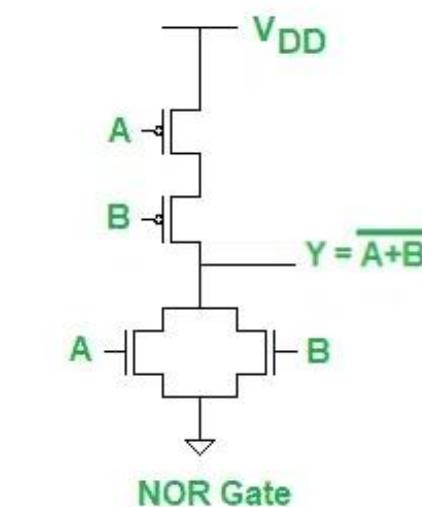
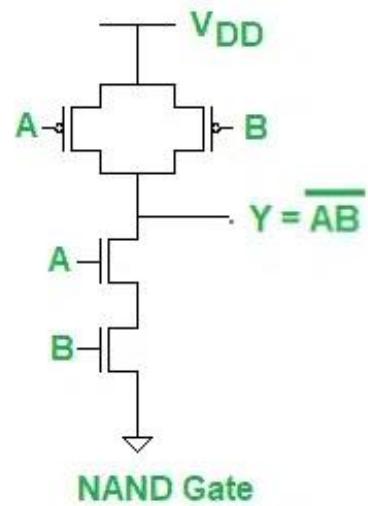
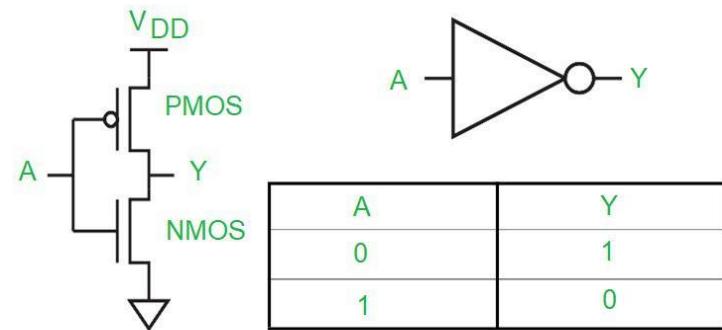
- Microcontrolador (3.3V / 5V)
- Controlando relé, motor, inversor ou fonte chaveada

Vale lembrar que eles não substituem o RC Snubber ou Flywheel Diode, mas vão separar/proteger partes críticas do circuito, por exemplo parte lógica com microcontroladores e a parte de potência, que vai precisar do RC snubber e Flywheel Diode.



PORTAS LÓGICAS

Se focarmos nos MOFETs CMOS (mais usados atualmente) podemos desenvolver facilmente as portas lógicas NOT, NAND, NOR. Podemos obter o AND/OR usando um inversor na saída.



CONFIGURAÇÕES RELACIONADAS AS PORTAS

Considere, como “comum” a entrada do transistor que esta ligada ao terra.

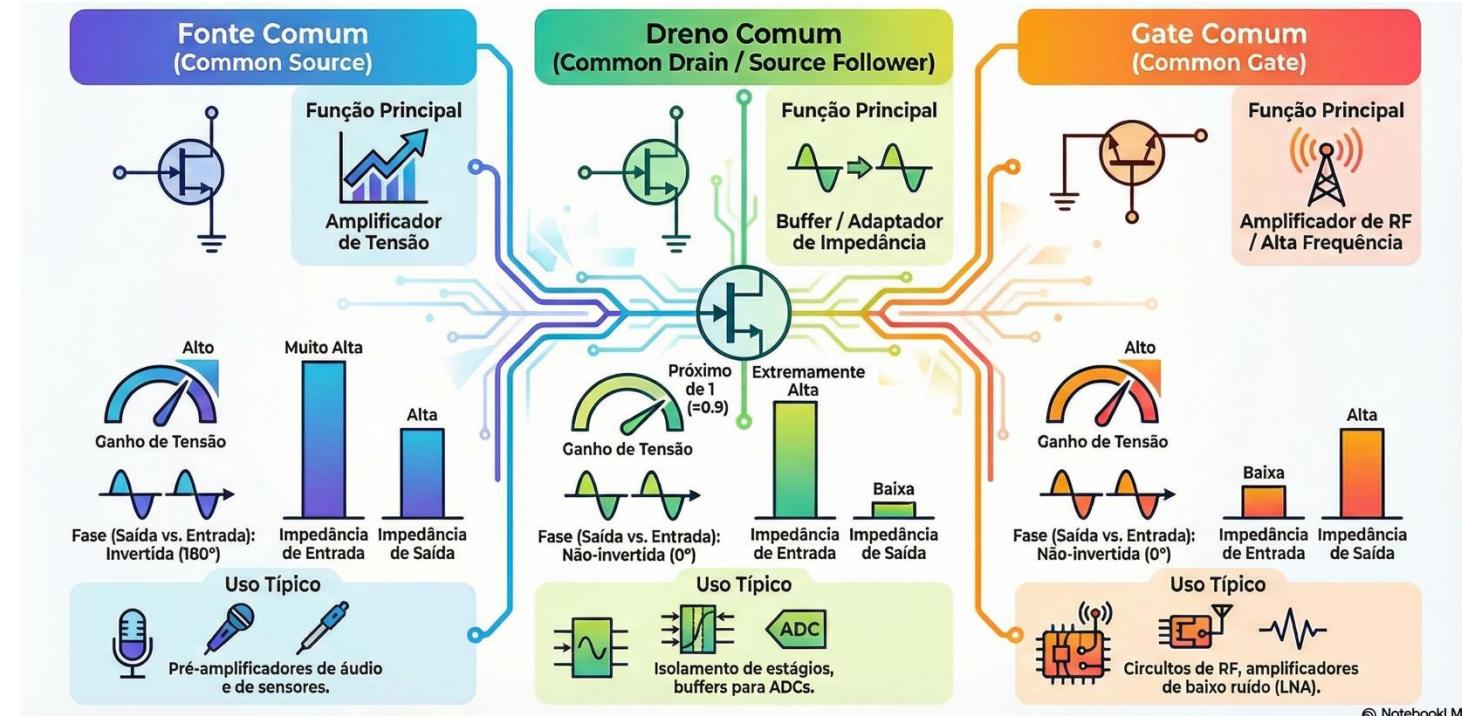
Cada configuração, tem casos típicos de uso entre amplificadores, osciladores, e isolamento de estágios (buffers).

- Source/Coletor comum: Usado em amplificadores, tem ganho alto, e alta impedância de entrada, também inverte a saída em relação a entrada.
- Dreno/Emissor comum: Usado no casamento de impedâncias nas etapas de saída, ganho quase unitário, sem inversão de fase
- Base/Gate comum : Alto ganho, sem inversão de fase, usado em amplificadores de RF

Essas características de configuração é valida para todos os tipos de transistores e não tem relação/dependência com a polarização.

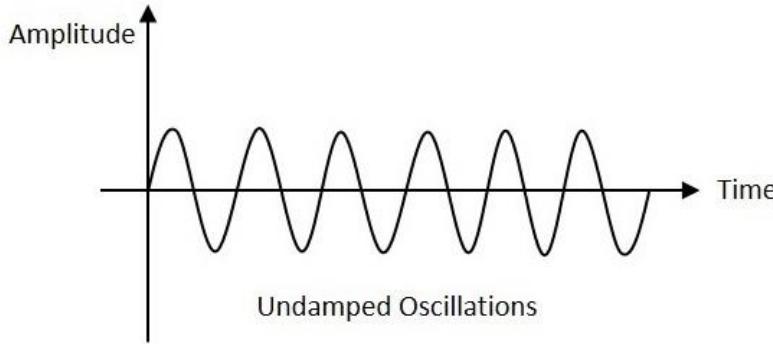
A configuração define o papel do transistor entre:

- Amplificador
- Oscilador
- Buffer



OSCILADORES

Nessa seção iremos aprender como criar circuitos osciladores senoidais, para uso em RF, e para gerar o Clock de circuitos digitais.



Guia Comparativo de Osciladores Eletrônicos

Apresentar uma comparação rápida entre os principais tipos de osciladores eletrônicos, destacando suas topologias, faixas de frequência e aplicações típicas para facilitar a escolha em projetos.

O Princípio da Oscilação

O que é um Oscilador?
Um circuito que gera uma forma de onda repetitiva (senoidal, quadrada, etc.) sem um sinal de entrada externo.

Critério de Barkhausen para Oscilação
Para oscilar, o ganho total do circuito ($A\beta$) deve ser ≥ 1 e o deslocamento de fase total deve ser 360° (ou 0°).

Comparativo de Tipos de Osciladores

Tipo de Oscilador	Características Principais	Aplicações Típicas
Hartley	Uso de um transformador para dividir a saída de volta ao circuito.	Transmissão de rádio (antenas).
Colpitts	Uso de divisores de tensão para fornecer feedback.	Transmissão de rádio (antenas).
Clapp	Início de oscilação mais baixo que os outros tipos.	Relógios de microcontroladores.
Pierce	Uso de um cristal para fornecer estabilidade.	Alta Frequência (HF/VHF), clocks.
Butler	Oscilador a cristal com um estágio amplificador mais robusto.	Relógios de microcontroladores, referências de frequência, rádios.
RC	Topologia Básica (Ressonador): Una "ponta" de componentes RC para o feedback positivo.	Rádios.
Barkhausen Diagram	Deslocamento de Fase Total = 360° (ou 0°)	Música.
Wien Bridge	Uma variação do circuito RC.	Amplificadores operacionais.

NotebookLM

TIPOS DE OSCILADORES

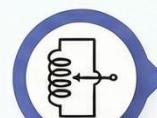
Os tipos de osciladores mais comuns:

- **Pierce**: Usa um XTAL que substitui o tanque LC
- **Colpitts**: Usa um divisor de tensão capacitivo (2 capacitores). Existe também colpitts com XTAL
- **Hartley**: Usa 2 indutores

Guia Visual para Identificar Osciladores

O que define um oscilador?

Osciladores convertem DC em AC de uma frequência específica. Para sustentar a oscilação, o circuito deve atender ao **Critério de Barkhausen**: ganho total do loop ≥ 1 e deslocamento de fase total de 360° (ou 0°). O tipo de oscilador é definido pela sua rede de realimentação.



Hartley

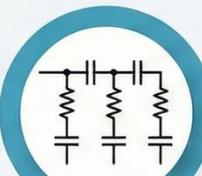
Componente Chave:
Indutor com derivação
(ou 2 indutores)

Como Identificar: Procure por um indutor com uma derivação central (ou dois indutores em série) no "tanque LC". A realimentação é retirada da conexão dos indutores.



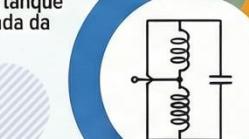
Colpitts

Componente Chave: Divisor de tensão capacitivo (2 capacitores)
Como Identificar: Procure por dois capacitores em série no "tanque LC". A realimentação é retirada da junção entre eles.



RC Phase-Shift

Componente Chave: Rede com 3 ou mais estágios RC
Como Identificar: Procure por uma cascata de pelo menos três seções Resistor-Capacitor (RC) que fornecem o deslocamento de fase de 180° .



Pierce

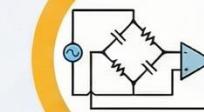
Componente Chave: Cristal de Quartzo (XTAL)

Como Identificar: O componente principal é um cristal de quartzo, quartzo, que substitui o tanque LC. Geralmente está conectado entre a saída e a entrada do amplificador (ex: Dreno e Gate de um JFET).

Clapp

Componente Chave:
Variação do Colpitts

Como Identificar: É um circuito Colpitts com um capacitor adicional em série com o indutor, usado para melhorar a estabilidade da frequência.



Wien Bridge

Componente Chave: Ponte RC (rede "Lead-Lag")

Como Identificar: Identifique uma estrutura de ponte composta por resistores e capacitores conectada à entrada de um amplificador não-inversor.



FILTROS

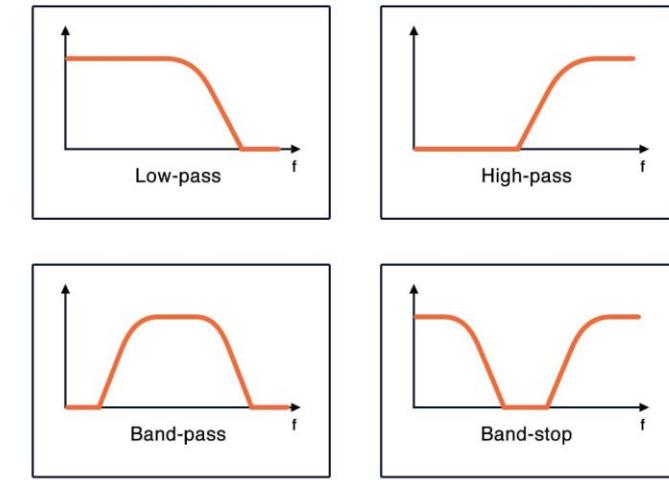
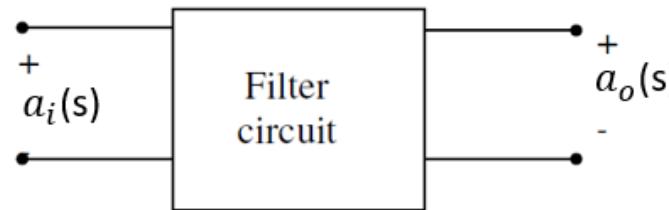
São circuitos que variam sua impedância dependendo da frequência de entrada, em eletrônica usamos os filtros para limpar/decompor os sinais e em osciladores, onde além da impedância estamos interessados em criar uma defasagem de fase de 180 graus.

Como um filtro funciona? Existe uma **fonte de sinal externa**

- O filtro é colocado **no caminho do sinal**
- A resposta depende:
- da topologia
- da impedância em função da frequência

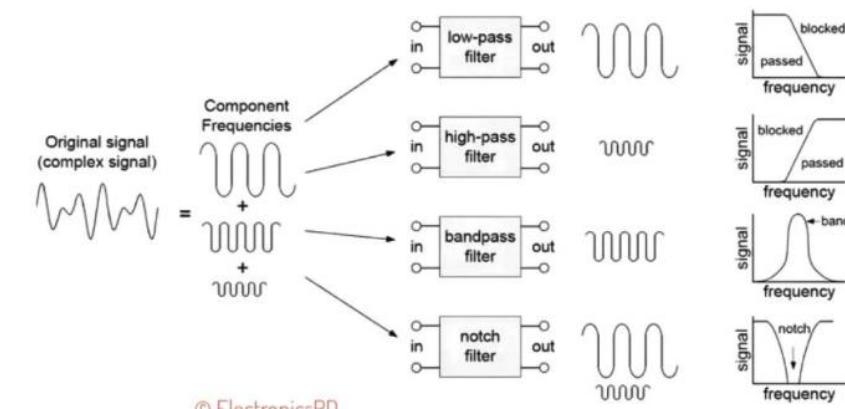
E nos osciladores? Nos **osciladores**, o contexto é completamente diferente:

- **✗ Não existe sinal de entrada**
- **✓ O sinal surge a partir de ruído interno**
- **✓ O Filtro precisa criar uma defasagem de 180 graus, com mais 180 graus do amplificador.**
- 👉 Por isso, em osciladores:
- **Não falamos em “filtro” no sentido clássico.**



Low-pass	High-pass	Band-pass	Band-stop
$\frac{L}{\omega_p}$	$\frac{1}{\omega_p L}$	$\frac{L}{\omega_0 \Delta} \frac{\Delta}{\omega_0 L}$	$\frac{1}{\omega_0 L \Delta} \frac{L \Delta}{\omega_0}$
$\frac{C}{\omega_p}$	$\frac{1}{\omega_p C}$	$\frac{C}{\omega_0 \Delta} \frac{\Delta}{\omega_0 C}$	$\frac{1}{\omega_0 C \Delta} \frac{C \Delta}{\omega_0}$

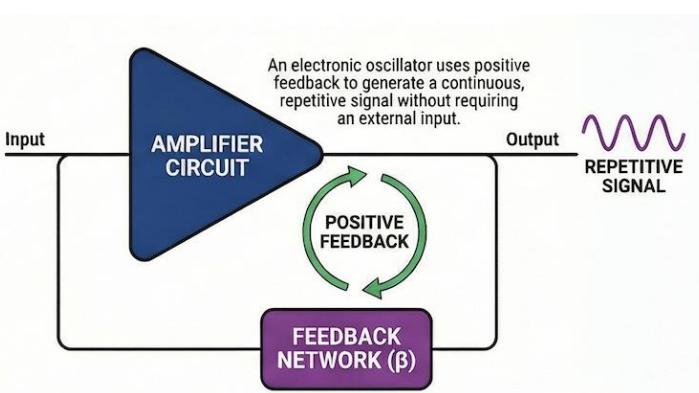
where: $\omega_p = 2\pi f_p$, $\Delta = \frac{\omega_{lp} - \omega_{lp}}{\omega_0}$, $\omega_0 = \sqrt{\omega_{lp}\omega_{lp}}$



CRITERIO DE BARKHAUSEN

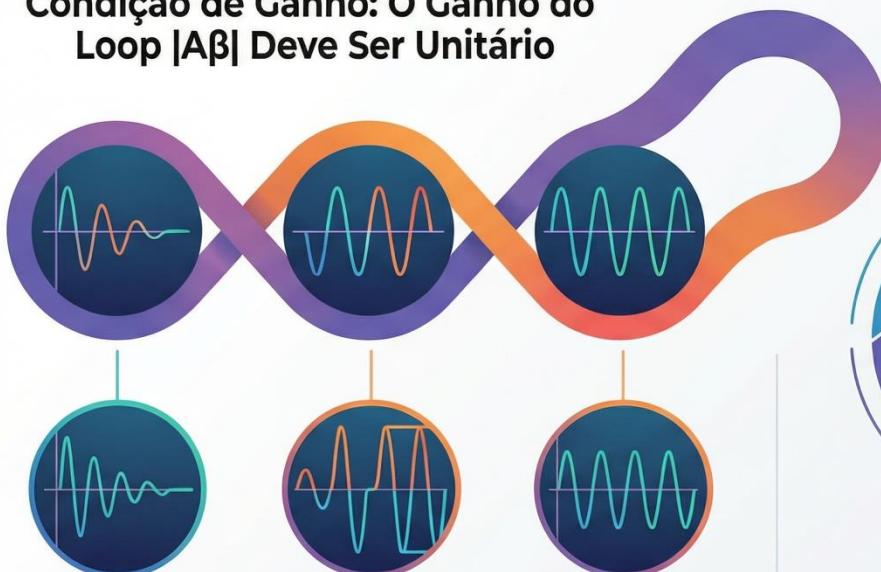
Para haver oscilação precisamos

- Feedback Positivo em fase (360 graus)
 - Ganho de pelo menos maior que 1
 - Amplificador + Filtro (LCC, LLC, RC, XTAL)



Critério de Barkhausen para Oscilação

Condição de Ganho: O Ganho do Loop $|A\beta|$ Deve Ser Unitário



Se $|A\beta| < 1$, a
Oscilação Amortece

O sinal diminui a cada ciclo no loop e eventualmente desaparece.

Se $|A\beta| > 1$, a Oscilação Cresce e Satura

O sinal aumenta até ser limitado pela fonte de alimentação, causando distorção (clipping).

Se $|A\beta| = 1$, a
Oscilação é Sustentada

A energia perdida é exatamente reposta a cada ciclo, mantendo uma senóide estável.

Condição de Fase: A Defasagem Total do Loop Deve Ser 360°

A defasagem total do loop precisa ser 0° ou 360°

O sinal realimentado deve retornar perfeitamente em fase com o sinal original para reforçá-lo.

Exemplo Comum: Amplificador Inversor (180°) + Rede de Realimentação (180°)



A soma das duas defasagens resulta nos 360° necessários para a oscilação.



Incorreto: "O oscilador precisa de 180° de inversão"
Correto: "O *loop completo* precisa somar 360°"

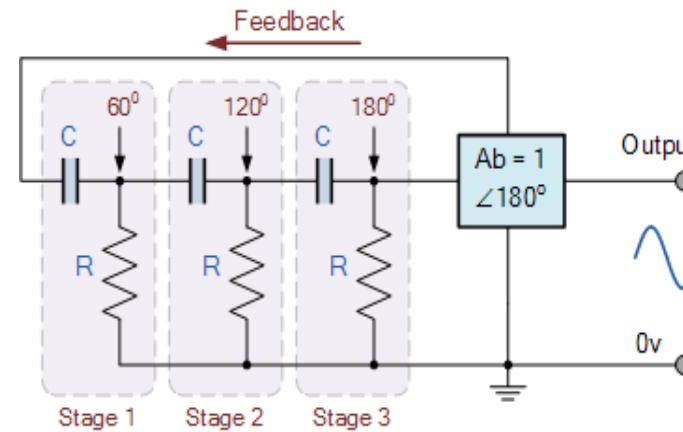
DEFASANDO O SINAL DINAMICAMENTE

Como vimos o um dos critérios para oscilação é termos uma defasagem do sinal realimentado ser de 360 (ou zero graus). Iremos aprender que existem duas formas de mudar a fase do sinal:

- Malhas RC ou RL
- Na saída de amplificadores ou em divisores de tensão reativos (indutores e capacitores).

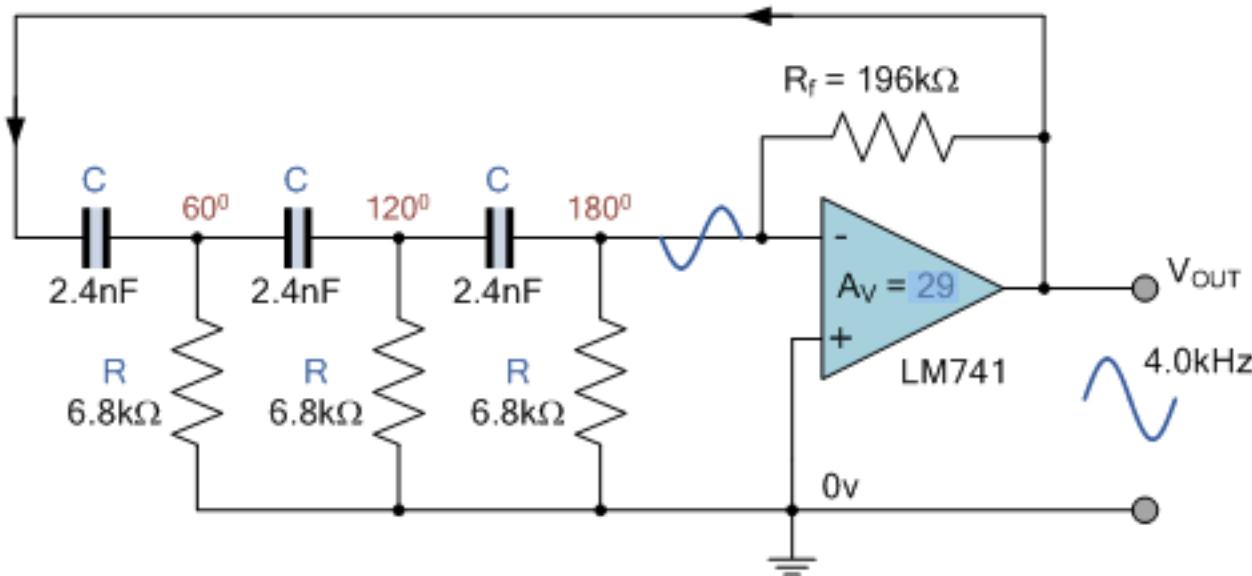
Vamos aprender agora como usar 3 malhas RC para fazer uma defasagem de 180 graus e também agir como filtro passa banda. Note que teoricamente poderíamos ter em cada capacitor 90 graus de defasagem.

O que definir	Fórmula / Regra	Observação prática
Frequência desejada	f_0	Ex.: 200 Hz
Escolher C	Valor padrão (10 nF a 1 μF)	Escolha C primeiro (mais fácil)
Calcular R	$R = \frac{1}{\pi f_0 C \sqrt{6}}$	Esse R vale para cada estágio
Arredondar R	Série E12 / E24	Use trimpot se quiser ajuste fino
Replicar a rede	3× RC idênticos	$R_1=R_2=R_3$ e $C_1=C_2=C_3$
Verificar atenuação	$b = \frac{1}{29}$	Característica fixa da rede



PASSOS PARA DESIGN DE OSCILADOR RC PHASE SHIFT COM AMPOP

■ SSS



O que fazer	Fórmula / Regra	Exemplo para 200 Hz
Definir a frequência alvo	f_0	$f_0 = 200\text{Hz}$
Escolher um valor prático de capacitor (padrão de mercado)	Escolha C (10nF a 1\mu F costuma ser comum em áudio)	$C=100\text{nF}$
Calcular o resistor de cada seção da malha (3 seções idênticas)	$R = \frac{1}{s\pi RC\sqrt{6}}$	$R=3.3\text{k}$
Montar a malha $3\times\text{RC}$ em cascata (realimentação)	Topologia clássica: $V_{\text{out}} \rightarrow (R_1 - C_1) \rightarrow (R_2 - C_2) \rightarrow (R_3 - C_3) \rightarrow V_{\text{in}}$	3 estágios com $\mathbf{R=3,3k\Omega}$ e $\mathbf{C=100nF}$
Garantir amplificador inversor (mais 180°)	Precisa inversão de 180° no amp	Use op-amp em configuração inversora
Garantir ganho de malha: $ \beta \geq 1$ (startup)	Para $3\times\text{RC}$ iguais: $ \beta \approx 1/29 \Rightarrow A \geq 29$	Ajuste ganho do op-amp para ≥ 29
Definir resistores do ganho do op-amp (inversor)	$ A = \frac{R_f}{R_{\text{in}}} \Omega$	Escolha: $R_{\text{in}}=10\text{k}\Omega$, $R_f=300\text{k}\Omega \Rightarrow A =30$
Adicionar controle de amplitude (para não saturar)	Diodos antiparalelo, lâmpada, JFET/AGC, ou limitação suave	Ex.: 2 diodos 1N4148 antiparalelo no caminho de realimentação (opcional)



DEFASAGEM DINÂMICA × INVERSÃO TOPOLOGICA

Por que os livros confundem os dois conceitos, existem dois tipos diferentes de “fase” em circuitos. Em eletrônica, a palavra defasagem é usada para fenômenos distintos, o que gera confusão — especialmente em osciladores.

👉 Nem todo “180°” significa atraso no tempo.

1 Defasagem dinâmica (fase dependente da frequência)

- Causada por armazenamento de energia no tempo
- Depende da frequência
- Vem de capacitores e indutores

Exemplos:

Filtros RC e RL

- RC phase-shift oscillator, Redes passa-fase
- 🔴 Um único estágio RC ou RL:
 - Máximo de 90°
 - Para 180° são necessários múltiplos estágios

2 Inversão topológica (mudança de polaridade)

- Não depende da frequência
- Não é atraso no tempo
- Surge da forma como o sinal é amostrado ou conectado

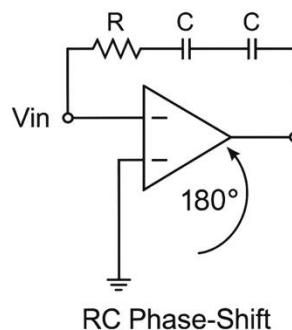
Exemplos:

- Amplificador inversor (emissor comum, source comum, NOT)
- Divisor capacitivo no Colpitts
- Tap indutivo no Hartley
- 🔴 O sinal é o mesmo no tempo, mas medido com polaridade oposta.

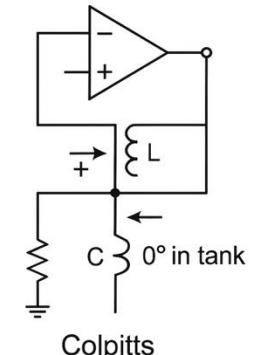
O erro comum nos livros Muitos textos dizem:

- “O tanque LC fornece a outra defasagem de 180°”
- 🔴 Isso é conceitualmente incorreto.
- O correto é:
 - O tanque LC seleciona a frequência
 - A fase vem da topologia e do amplificador
 - Em ressonância, o tanque LC tem fase 0°

Dynamic Phase Shift



Geometric Inversion



Oscilador	Tipo de “180°”
RC Phase-Shift	Defasagem dinâmica (RC)
Wien Bridge	Defasagem dinâmica (0° na ponte)
Colpitts	Inversão topológica + amplificador
Hartley	Inversão topológica + amplificador
Pierce	Amplificador inversor
NOT + XTAL	Amplificador inversor



TANQUE LC

O **tanque LC** é um circuito ressonante formado pela associação de um **indutor (L)** e um **capacitor (C)**. Ele é chamado de “tanque” porque **armazena e troca energia** continuamente entre dois campos físicos fundamentais:

- **campo elétrico** (no capacitor)
- **campo magnético** (no indutor)

Essa troca periódica de energia é a base do comportamento oscilatório em inúmeros circuitos eletrônicos, especialmente em **osciladores, sintonia de RF, filtros e sistemas de comunicação**.

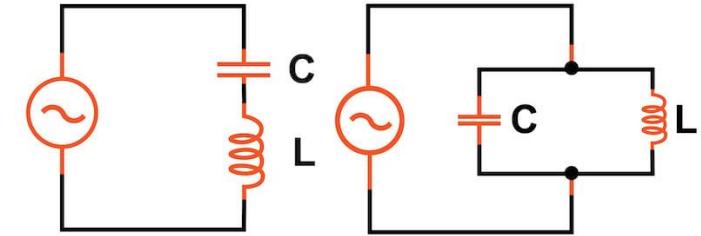
Frequência de ressonância

- O tanque LC possui uma **frequência natural de oscilação**, chamada **frequência de ressonância**
- $$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

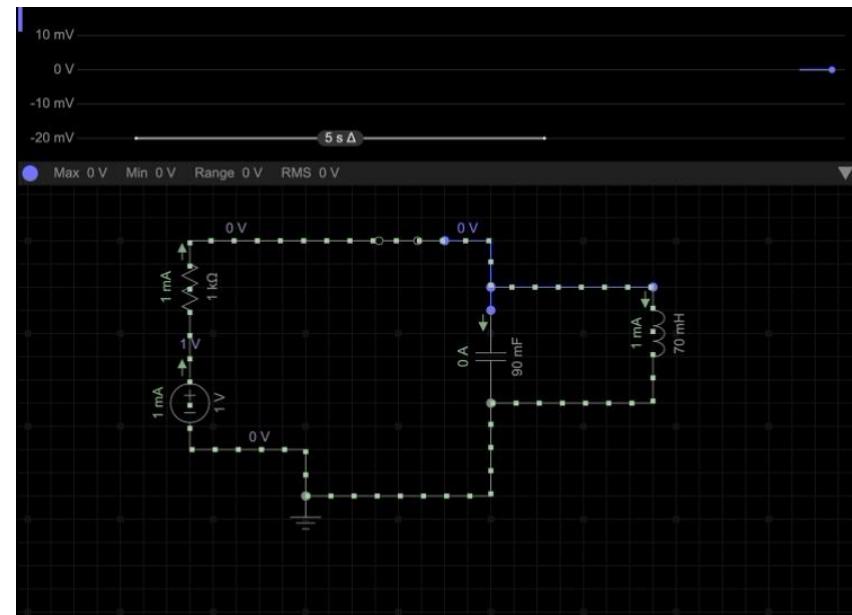
Tanque LC Serie: Impedância total mínima na frequência de ressonância.

Tanque LC Paralelo: Impedância total máxima na frequência de ressonância. Uso em circuitos como Hartley e Collpits que criam uma carga na frequência de ressonância aumentando o ganho naquela frequência específica.

O tanque LC não cria a oscilação — ele escolhe a frequência na qual a energia pode circular.



Tanque	Conexão	Comportamento
LC série	Série com sinal	Passa-banda
LC série	Shunt p/ GND	Notch
LC paralelo	Shunt p/ GND	Passa-banda
LC paralelo	Série com sinal	Notch



FATOR DE QUALIDADE

O fator de qualidade (Q) mede o quanto “puro” e seletivo é o tanque:

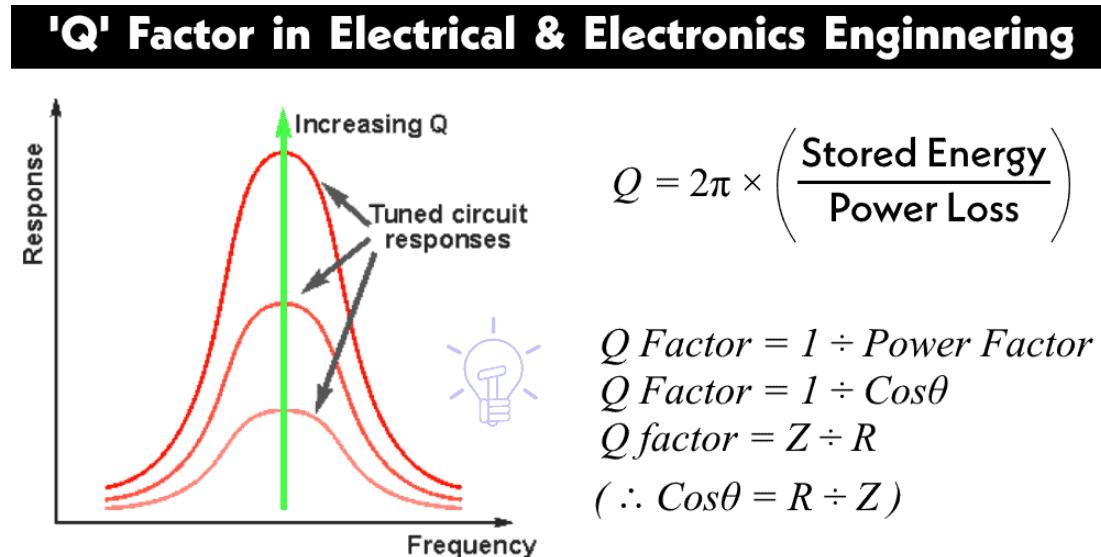
$$Q = \frac{\text{energia armazenada}}{\text{energia dissipada no ciclo}}$$

Q alto:

- banda estreita
- oscilação mais estável
- menor perda

Q baixo:

- banda larga
- maior amortecimento
- mais perdas



CRYSTAL(XTAL) DE QUARTZO

Um **cristal de quartzo (XTAL)** é um **ressonador mecânico** que, devido ao efeito piezoelettrico, pode ser modelado eletricamente como um **circuito RLC série de altíssimo Q**.

- Ele não gera energia
- Ele define a frequência com extrema precisão

Por isso é amplamente usado em:

- relógios (32.768 kHz)
- Microcontroladores e RF estável

Frequências importantes do cristal

- Ressonância série (f_s) → impedância mínima
- Ressonância paralela (f_p) → impedância máxima
- Em Pierce e Colpitts, o cristal é normalmente usado **próximo da ressonância paralela**, definida em conjunto com capacitores externos.

Parâmetro mais importante: Load Capacitance (CL)

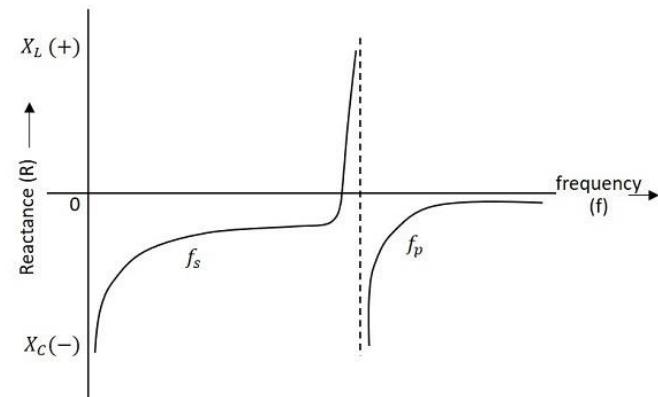
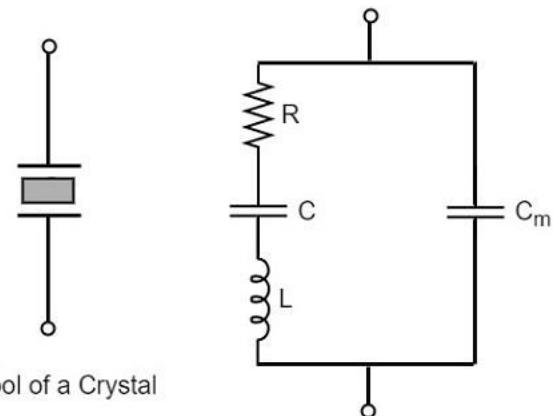
É a **capacitância externa** que o fabricante assume para que o cristal oscile na frequência nominal. Se usarmos um capacitor errado iremos oscilar na frequência errada. Nos osciladores Colpitts e Pierce os nossos capacitores tem que ser no total igual a CL

$$C_L \approx \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

O cristal não cria a oscilação ele impõe a frequência na qual o circuito pode oscilar. (Filtro)

Checklist prático de projeto (Pierce / Colpitts) com XTAL

- ✓ Saber o **CL nominal** do cristal
- ✓ Dimensionar corretamente **C1 e C2**
- ✓ Garantir **ganho de loop ≥ 1**
- ✓ Limitar o **drive level** (R_s)
- ✓ Evitar carregar o cristal (buffers!)
- ✓ Separar **DC de AC** na análise



OSCILADOR PIERCE

O Oscilador Pierce usa:

- um **inversor lógico** como amplificador: Alto ganho e inversao de fase
- um **cristal de quartzo** como elemento seletivo de frequênciā
- Um resistor para proteger o XTAL (150ohms)
- **realimentação positiva** para sustentar a oscilação
- Capacitores para ajustar a capacitancia necessaria para o funcionamento do XTAL

👉 É o oscilador **mais usado** em microcontroladores, FPGAs e SoCs.

Na pratica esse circuito vai ter alguma sensibilidade nos capacitores, porem vai funcionar.

🔑 Características do cristal que você DEVE conhecer:

- Frequencia Nominal
- Capacitância de carga (C_L), fora a frequencia do crystal essa é a mais importante, pois vai te ajudar a definir C_1 e C_2 ($C_1=C_2$)
- Modo de operação do Crystal: série ou paralelo, queremos o paralelo
- Maximum Drive Level: define o **nível máximo de potência** aplicada ao cristal → dimensiona R_s

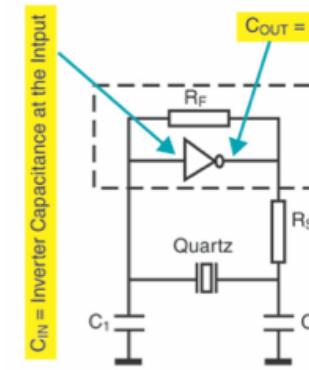
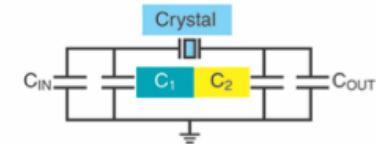
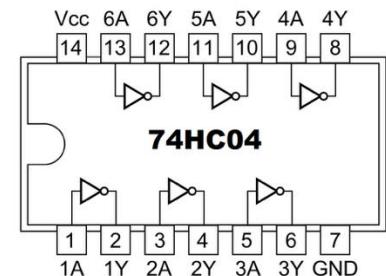


Fig. 1: The oscillator block and the key components that influence the overall performance of the timing loop.



$$C_L = \frac{(C_{IN} + C_1)(C_2 + C_{OUT})}{C_{IN} + C_1 + C_2 + C_{OUT}} + \text{Board Strays}$$



OSCILADOR COLPITTS

Esse circuito usa com tanque o indutor e o divisor capacitivo para o sinal C1/C2, mostramos também o caso que podemos substituir o Indutor pelo **Crystal**, porem o circuito continua sendo o Colpitts (não Pierce).

A parte amplificadora esta em Emissor comum (caso no BJT).

Poderíamos também usar um JFET (polarização mais robusta e fácil).

Perceba que no circuito do crystal estamos usando R_C invés de um RF CHOKE, porem para frequencias maiores seria melhor usar o RF CHOKE pois teríamos um ganho mais alto.

Aqui o sinal de realimentação vem do divisor C1/C2 que gera uma defasagem de 180 graus, junto com o amplificador emissor comum que gera mais 180 graus, se o ganho for maior que 1, teremos oscilação!

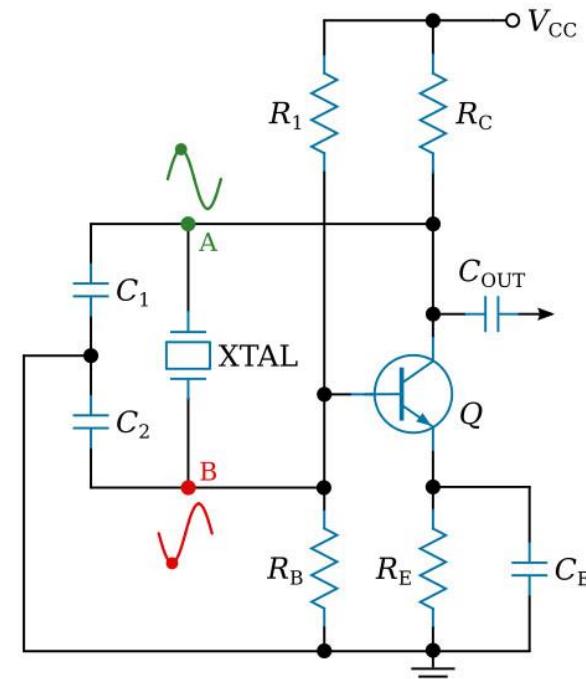
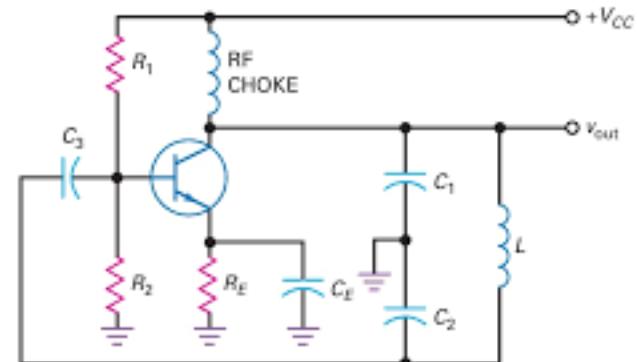
Um ponto de confusão é que na verdade o sinal de realimentação vai entrar no emissor e não na base.

As oscilações começam devido a ruídos térmicos ou variações elétricas no coletor que irão ser filtradas pelo tanque LC (ou com XTAL)

Pense assim:

- O coletor gera uma oscilação
- O divisor C1-C2 devolve uma fração
- Essa fração “**chacoalha**” o emissor
- Isso modula v_{be}
- O BJT amplifica novamente
- Loop fecha em fase
- **◆ O emissor não é terra em AC — ele se move.**

Figure 21-15 Colpitts oscillator.



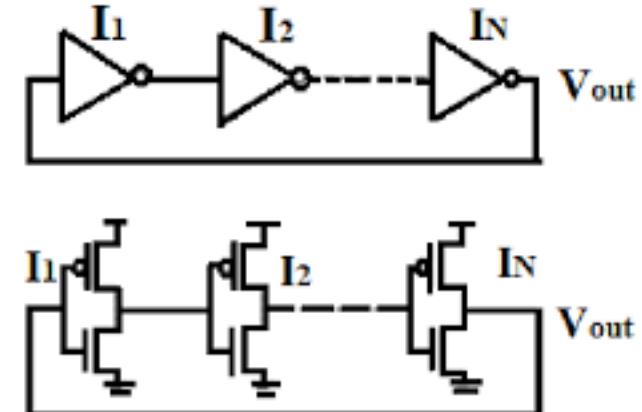
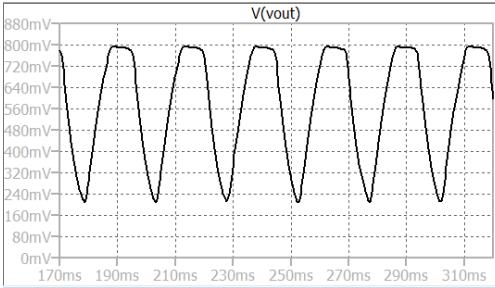
OSCILADOR RING (MAIS SIMPLES*)

Um **Ring Oscillator** é formado por um **número ímpar** de inversores conectados em laço fechado.

- Cada inversor → **inversão + atraso**
- Número ímpar → **condição de oscilação**
- O atraso total define o período
- **Não usa L, C nem cristal — apenas atraso.**

Por que ele oscila?

- Cada inversor inverte o sinal ($\approx 180^\circ$)
- Um número ímpar garante **realimentação positiva**
- O atraso acumulado fecha a condição de fase no tempo
- *Oscilação por atraso, não por ressonância.*

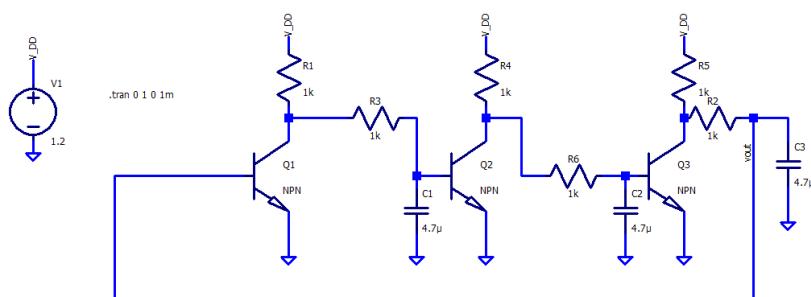


Como a frequência é definida: A frequência depende do tempo de propagação dos inversores:

- $f \approx \frac{1}{2 \cdot N \cdot t_{\text{delay}}}$
- Onde:
- **N** = número de estágios (inversores)
- **t_{delay}** = atraso de cada inversor
- Mais estágios ou mais atraso → **frequência menor**.

Importância no VLSI Ring Oscillators são fundamentais em circuitos integrados:

- Clocks internos on-chip
- Caracterização de processo (PVT)
- Base para **VCO Ring** (Com realimentação, um sinal de erro vai ser observado para controlar um sinal que controla a **frequência**)
- Geração de jitter e TRNG
- Testes de velocidade do silício
- Todo chip moderno tem vários ring oscillators internos.



No próximo slide veremos como controlar a frequencia do Oscilador RING



VCO RING (CONTROLANDO FREQUENCIA)

Um **VCO Ring Oscillator** é um **Ring Oscillator cuja frequência é controlada por uma tensão**. (VCO voltage controlled oscillation)

- A tensão de controle **não altera L ou C**,
- ela **altera o atraso** de cada estágio do anel. (Lembre-se que a frequência no oscilador ring depende do atraso).
- Um dos blocos principais do PLL (phase locked loop)

 **Como o controle funciona:** A tensão de controle ajusta a **corrente disponível nos inversores**

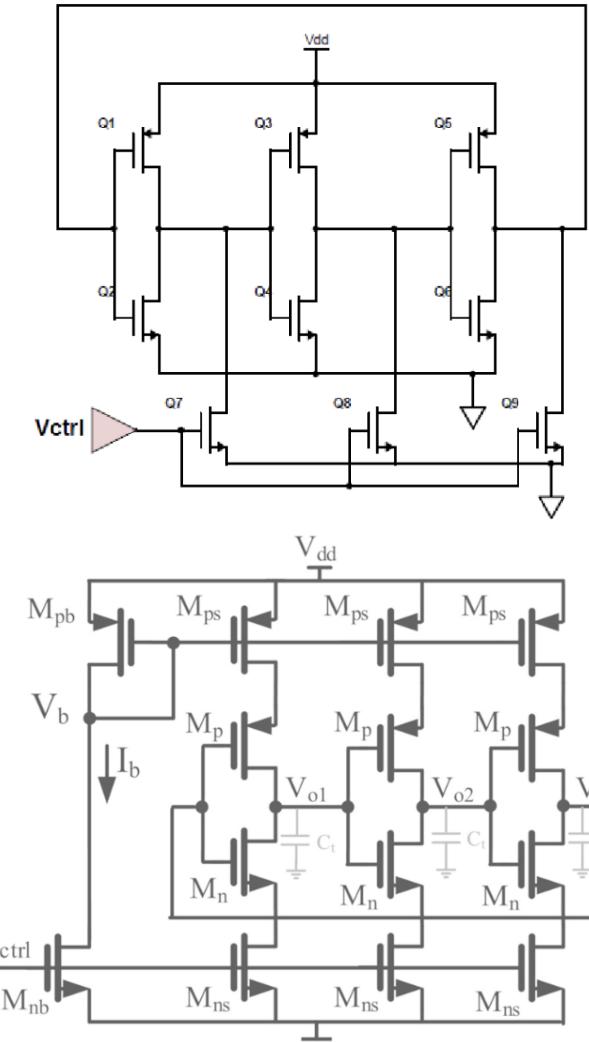
- Menor corrente → maior atraso (Efeito de diminuir a tensão)
 - Maior corrente → menor atraso (Efeito de aumentar a tensão)
-  A relação entre frequencia e tensao de controle **Vctrl** é **monótona**, mas **não linear**.

 **Importância no VLSI** VCO Ring é o **VCO mais usado em circuitos integrados**:

-  Núcleo de **PLLs on-chip**
 -  Geração de clocks internos
 -  Clock recovery
 -  Compensação de variações de processo
 -  Sistemas SoC, CPUs, FPGAs
-  **Em VLSI, PLL + VCO Ring é o padrão.**

Mesmo com tensão de controle fixa, o VCO Ring sofre variações de frequência devido a PVT, por isso necessita de controle por realimentação.

Um outro nome para esse oscilador é (**Current-Starved Ring Oscillator**)



PLL (PHASE LOCKED LOOP)

Um **PLL** (Phase Locked Loop) é um sistema de realimentação negativa em fase que força um oscilador controlável (VCO) a seguir a fase e frequência de uma referência estável.

- 💡 O PLL não cria precisão — ele herda precisão da referência.

🔧 Principais blocos do PLL

1 Referência (Crystal / XTAL)

- Fornece frequência extremamente estável
- Define a precisão absoluta do sistema

2 Detector de Fase (Phase Detector / PFD)

- Compara a fase do clock de referência com o do VCO
- Gera um sinal de erro de fase

3 Filtro de Loop (Loop Filter)

- Filtra o erro de fase e define estabilidade, largura de banda e resposta dinâmica
- Normalmente RC (passivo ou ativo)

4 VCO (geralmente VCO Ring em VLSI)

- Oscilador controlado por tensão
- Ajusta a frequência para reduzir o erro de fase

5 Divisor de Frequência (opcional) (circuito digital)

- Permite multiplicação ou divisão de frequência
- Permite gerar clocks altos e precisos a partir de um XTAL de baixa frequência (frequency synthesizer)

⚙️ Como o PLL funciona (intuição)

- Se o VCO está adiantado → o erro reduz a frequência
- Se o VCO está atrasado → o erro aumenta a frequência
- Quando o erro médio → 0 → **PLL travado (lock)**

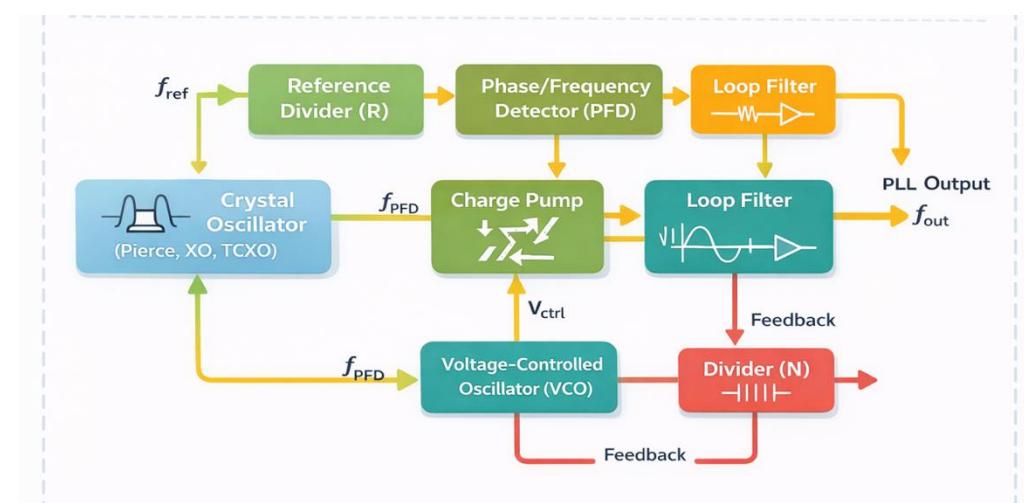
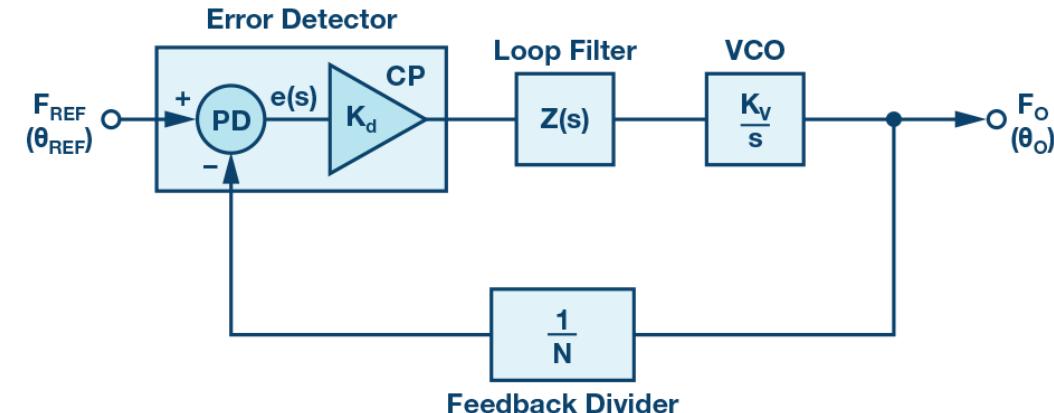
💡 O sistema entra em **equilíbrio dinâmico**, não em repouso.

⚖️ Onde entra o cristal (XTAL)

- O cristal NÃO oscila o chip inteiro
- Ele gera apenas uma referência limpa, através de um **Oscilador Pierce a Crystal**

O PLL usa essa referência para corrigir o VCO Ring. O PLL transforma um oscilador imperfeito em um clock confiável.

Estamos, portanto, começando a chegar no limite com engenharia de controle (PID) e eletrônica digital (divisor de frequência e contadores).



CD4096

Vamos considerar como projetos de bancada e circuitos didáticos o [CD4096](#), que é CI **PLL CMOS clássico**

- Integra:
- Detector de fase (XOR + Phase Comparator II)
- **VCO controlado por tensão**
- Amplamente usado para **ensino, prototipagem e experimentos RF**

Limites práticos do CD4046

- VCO interno típico: **kHz → alguns MHz**
- Em RF até **30 MHz**, ele atua como:
 - **✓ PLL / sintetizador**
 - **✓ Controle de VCO externo**
 - **✗ Não como oscilador RF direto em VHF**

O que conseguimos fazer com ele:

- Modulador / Demodulador FM
- Multiplicador de Frequências

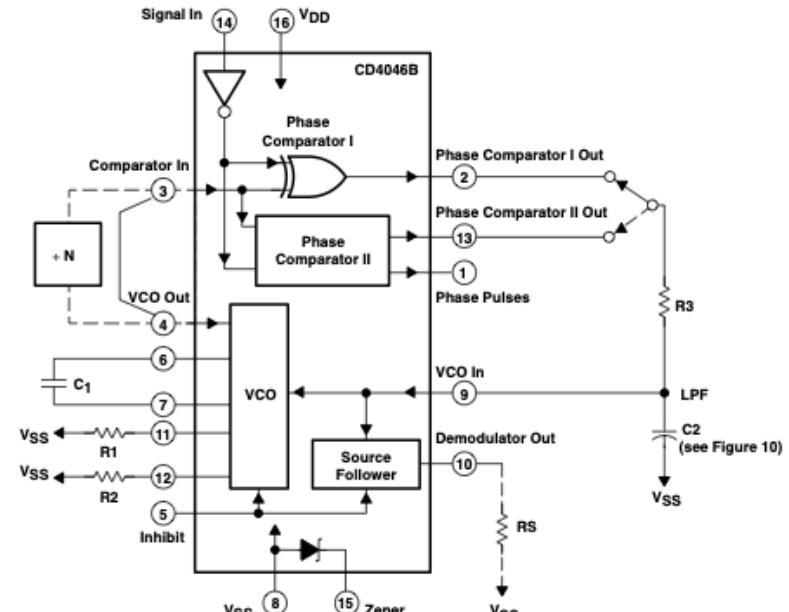


Figure 2. CD4046B Block Diagram

AMPLIFICADORES OPERACIONAIS (OP-AMP)

Um **amplificador operacional** é um bloco analógico projetado para **amplificar a diferença de tensão** entre duas entradas:

- Entrada não-inversora (+)
- Entrada inversora (-)
- $V_{OUT} = A \cdot (V_+ - V_-)$
- Onde **A** é o ganho de malha aberta (*open-loop*), idealmente infinito.

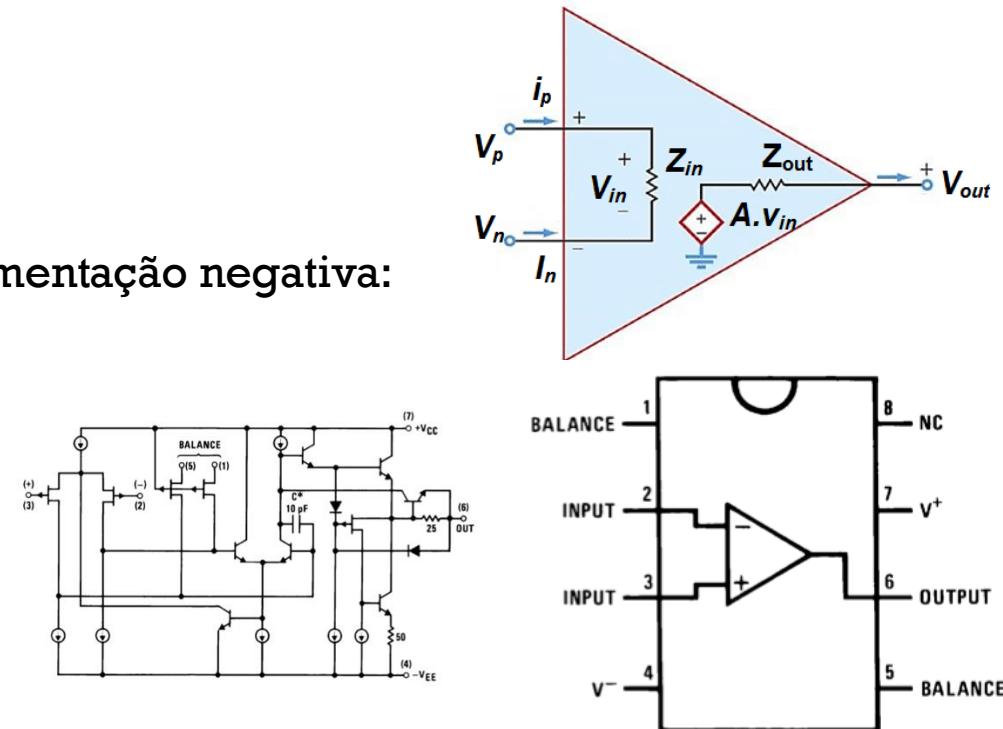
Idealmente um “OPAMP” tem as seguintes características com realimentação negativa:

- **O op-amp ideal é um modelo matemático**, não um circuito real:
 - ◆ Ganho de tensão $\rightarrow \infty$
 - ◆ Impedância de entrada ($Z_{in}=\infty$) e Impedância de saída ($Z_{out}=0$)
 - ◆ Banda passante $\rightarrow \infty$
 - ◆ Offset e Ruido $\rightarrow 0$

Casos de Uso (onde usamos)

- **Amplificadores de Ganhos Fixos**
- **Filtros Ativos** (evitar grandes indutores)
- **Osciladores de baixa frequência (100khz), Comparadores, Instrumentação medica**
- Controle Analógico (PID), computação analógica.
- Conversores A/D e D/A (Análgico / Digital)

Um **amplificador operacional real** é um circuito transistorizado projetado para se comportar o mais próximo possível do ideal quando realimentado.



ALGEBRA COM AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

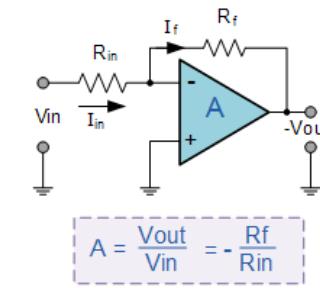
 **Ideia fundamental:** Um amplificador operacional pode ser usado para **realizar operações matemáticas analógicas** sobre sinais elétricos. **Antes do digital, essa era a base dos computadores analógicos.**

Aqui vemos como calcular

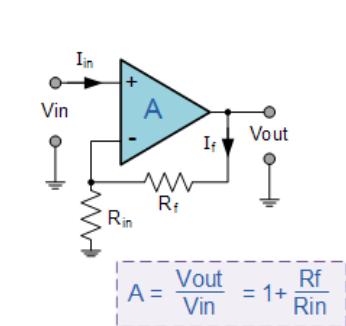
- Subtração / Soma
- Multiplicação por um Número (Amplificação)
- Log e Anti-log
- Multiplicacao de Sinais e (divisão)
 - $A \cdot B = \text{antilog}(\ln(A) + \ln(B))$
 - Podemos então multiplicar usando op-amp log/antilog e somador
 - Também seria um Mixer RF bem pobre devido a banda os op-amps

Amplificadores operacionais não apenas amplificam sinais eles calculam.

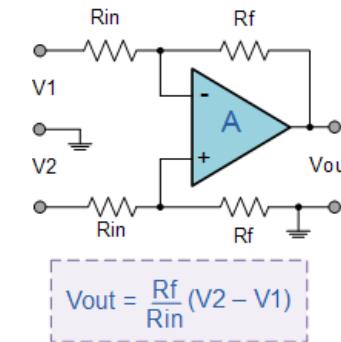
Inverting Op-amp



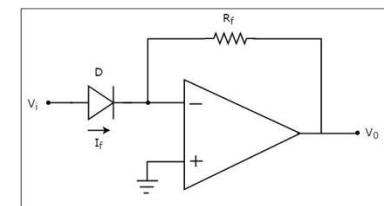
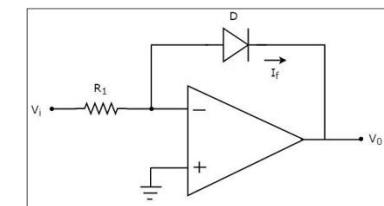
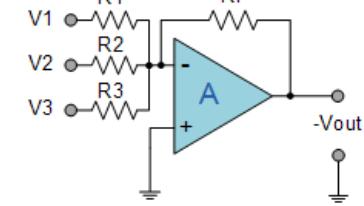
Non-inverting Op-amp



Differential Op-amp

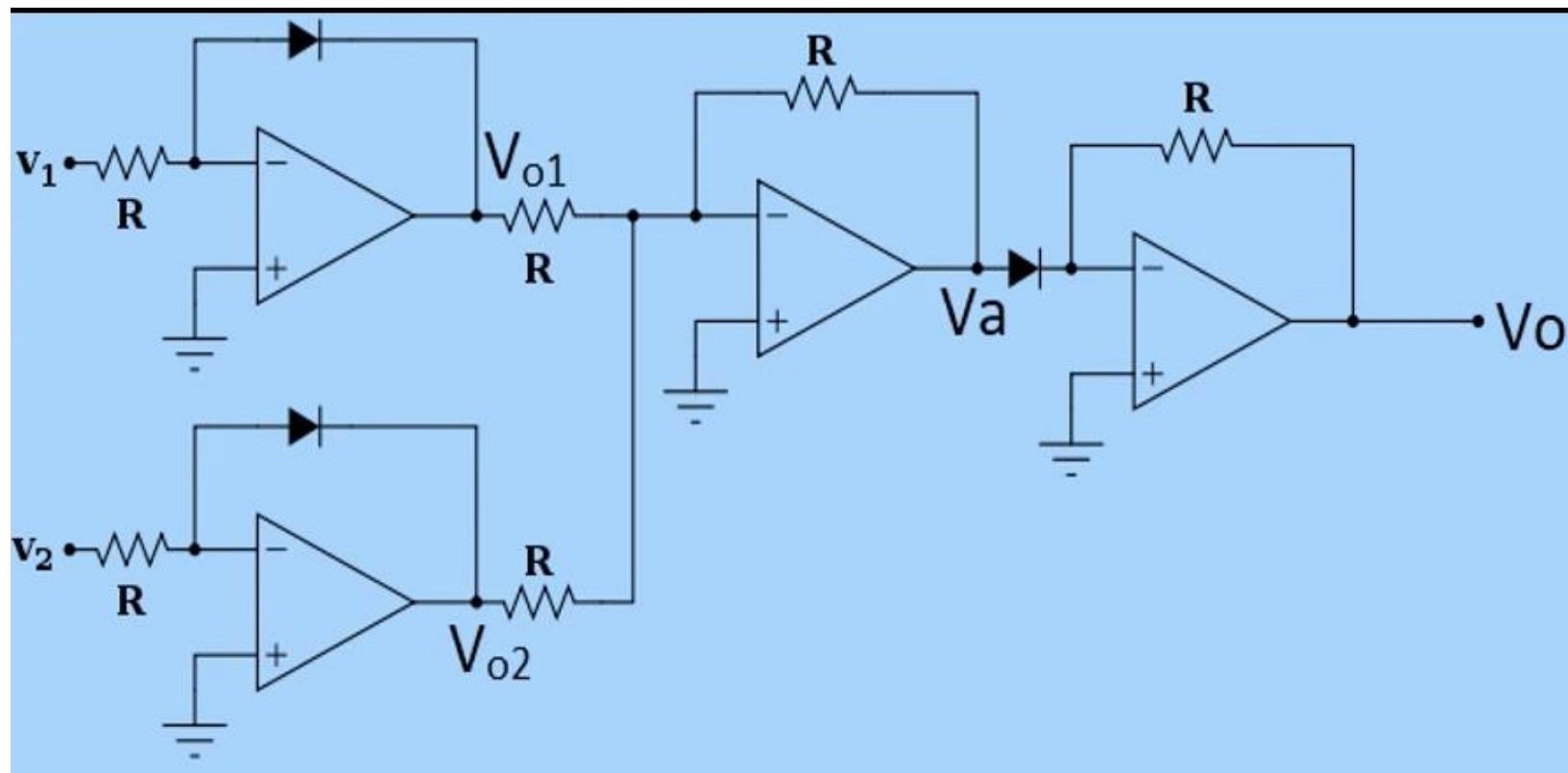


Summing Op-amp



MULTIPLICADOR (USANDO LOG-ANTILOG)

Basicamente queremos $V_1 \times V_2$



CALCULO COM AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

Antes de resolvermos equações diferenciais **no papel**, podemos **implementá-las fisicamente** usando circuitos com op-amps. Um circuito pode:

- **Derivar** um sinal
- **Integrar** um sinal
- Resolver dinâmica de sistemas reais

Isso é **computação analógica**.

Derivador com Op-Amp: O que faz?

- Realça variações rápidas
- Responde à inclinação do sinal

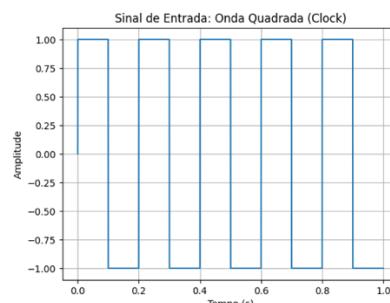
Integrador com Op-Amp: O que faz?

- Acumula o sinal ao longo do tempo
- Suaviza variações rápidas

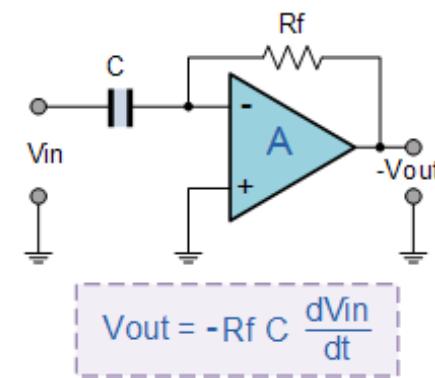
Para visualizar considere como entrada um sinal de onda quadrada:

- Passando pelo Derivador
- Passando pelo Integrador

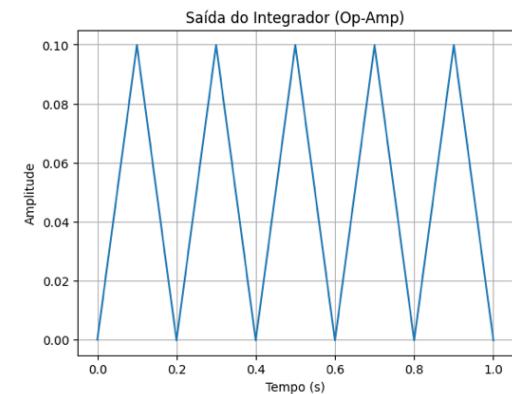
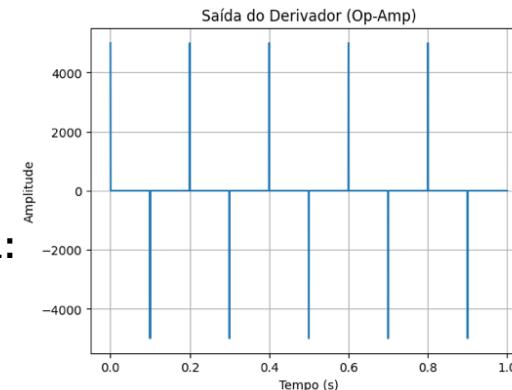
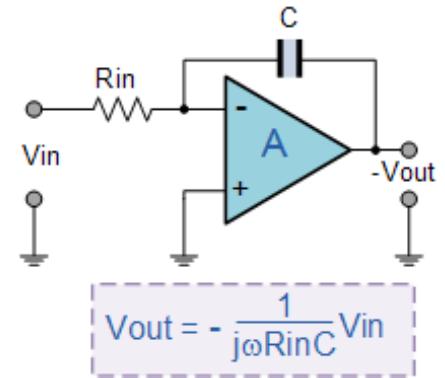
Dica: Se passarmos a onda triangular em um filtro de ordem alta passa baixa (sallen-key) iríamos obter quase uma senoide.



Differentiator Op-amp



Integrator Op-amp



COMPARAÇÕES (IF / SE) DA ELETRÔNICA ANALÓGICA

Antes de resolvermos **equações diferenciais**, precisamos entender **decisão analógica**.

💡 Na eletrônica analógica:

Comparar tensões é o equivalente físico de um **IF / ELSE**.

⚖️ **Comparador Analógico (Op-Amp):** Um comparador compara duas tensões:

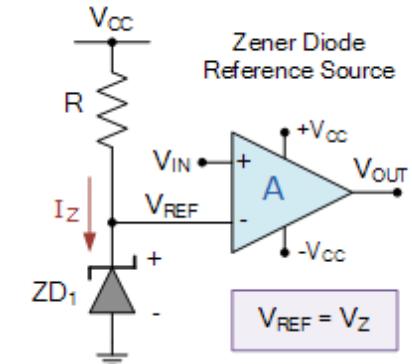
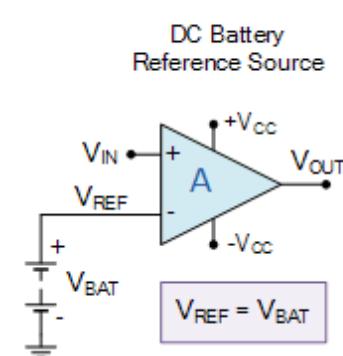
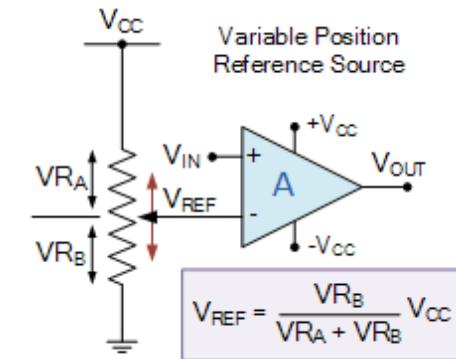
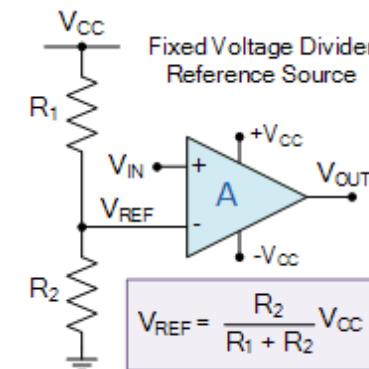
- Entrada: V_{IN}
- Referência: V_{REF}

Regra de decisão:

- Se $V_{IN} > V_{REF} \rightarrow$ saída = nível alto
- Se $V_{IN} < V_{REF} \rightarrow$ saída = nível baixo

🔧 **Como gerar a tensão de referência (V_{REF})**

- Divisor Resistivo (Potenciômetro)
- Baterias (**não ideais como referência de precisão**)
- Diodo Zener (melhor, gasta pouca corrente)



💡 **IF / ELSE físico**

text

```
IF (Vin > Vref)
    Vout = +Vcc
ELSE
    Vout = -Vcc (ou GND)
```

👉 Isso é lógica feita com física, não com código.



RESOLVENDO EQUAÇÕES DIFERENCIAIS

Agora que entendemos:

- soma e subtração,
- integração e derivação,
- decisão analógica (IF / ELSE)

Agora podemos **resolver equações diferenciais com op-amps.**

Lembre-se:

- **O resultado de uma equação diferencial não é um número é um sinal no tempo.**
- Amplificadores Operacionais tem largura de banda finita (menor que Ghz)

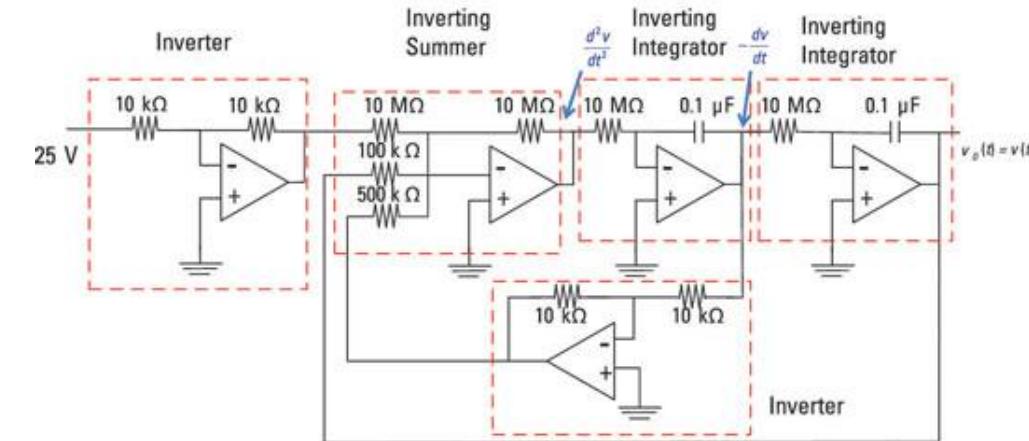
Na verdade isso é a base de **computadores analógicos**, que conseguem resolver problemas rapidamente porem tem zero programabilidade, esse método foi a base

- **Computadores analógicos**
- Simuladores de voo
- Controle industrial
- Sistemas militares antigos

🧠 Intuição importante

- **Não resolvemos a equação.**
- **Construímos a equação e deixamos o circuito evoluir no tempo.**
- **Equações diferenciais podem ser escritas no papel —**
- **ou construídas com hardware.**

$$\frac{d^2v}{dt^2} = -20 \frac{dv}{dt} - 100v + 25V$$



💡 Blocos fundamentais

- **Integradores**
→ Implementam integrais no tempo
- **Somadores inversores**
→ Implementam coeficientes e sinais
- **Realimentação**
→ Cria a dinâmica do sistema



FILTROS ATIVOS

Filtros ativos são circuitos que **selecionam frequências** usando:

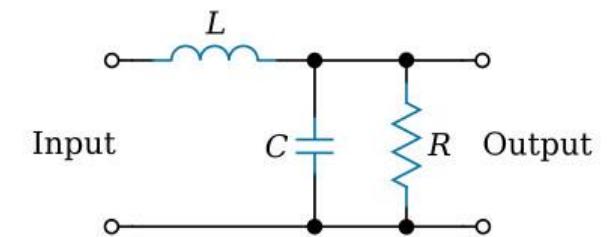
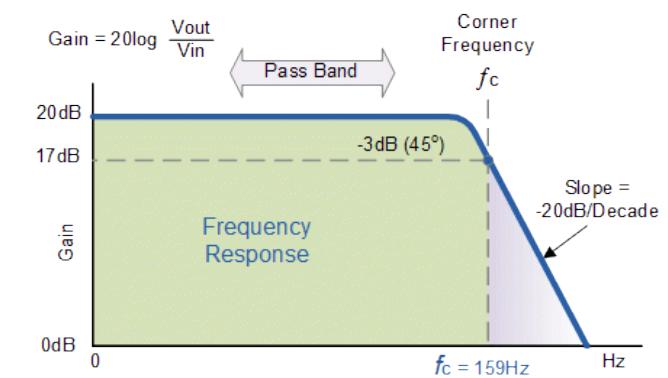
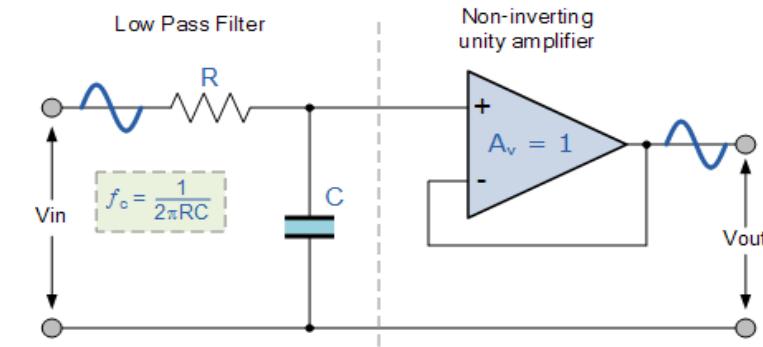
- **Resistores**
- **Capacitores**
- **Amplificadores operacionais (op-amps)**

💡 Diferente dos filtros passivos:

- ✗ Não usam indutores (Difícil para projetos VLSI)
- ✓ Podem amplificar
- ✓ Alta impedância de entrada e baixa impedância de saída
- ✓ Maior velocidade no corte (maior ordem Ordem)

Um filtro passivo seguido de um buffer com op-amp já seria um filtro ativo, porém veremos a seguir outras propriedades importantes nos filtros ativos:

- Ordem
- Q-Factor



ORDEM E Q-FACTOR

Vamos agora diferenciar e entender a Ordem e Q-Factor

💡 **Ordem do filtro (Order):** A **ordem** do filtro indica **quantos elementos de armazenamento de energia** existem no sistema:

- Capacitores
- Indutores

O que a ordem controla?

- Inclinação da atenuação (roll-off)
- Quantos dB por década o filtro atenua

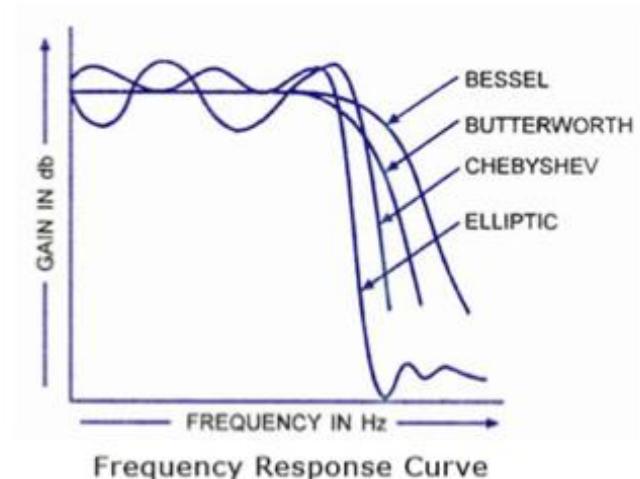
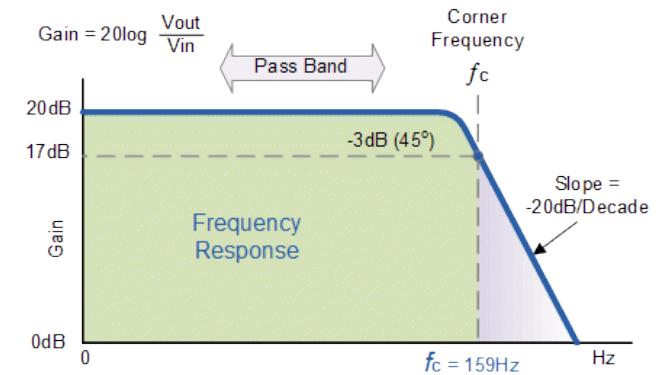
🎯 **Fator de Qualidade (Q):** O **Q-factor** descreve **como o filtro se comporta em torno da frequência de corte**. Ele mede:

- Amortecimento
- Ressonância
- Overshoot / Se o filtro tem “picos” ou não

O que o Q controla?

- Forma da resposta
- Pico de ganho
- Ringing no tempo / Estabilidade
- “**Não existe Q ‘perfeito’; o Q é um compromisso entre resposta em frequência e resposta no tempo.**

Na prática não podemos ter um filtro de ordem infinita, ou um Q-factor perfeito para resposta em frequência ou tempo.



SALLEN-KEY

O **Sallen-Key** é um **filtro ativo de 2^a ordem**, amplamente utilizado por sua simplicidade e estabilidade. Ele utiliza:

- 2 resistores
- 2 capacitores
- 1 amplificador operacional

📌 Normalmente implementado como:

- Passa-baixa (LPF)
- Passa-alta (HPF)

O op-amp opera como:

- **Buffer (ganho = 1)**
- ou **ganho leve ($K > 1$)** para ajuste do Q

⚠ Caso simétrico mais comum, Assumindo:

- $R_1 = R_2 = R$
- $C_1 = C_2 = C$

Frequência de corte:

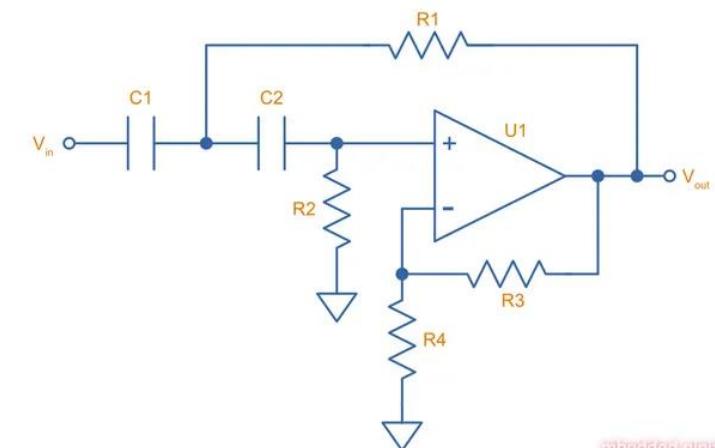
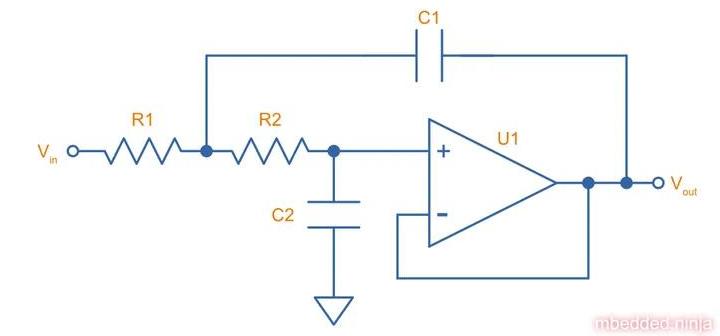
- $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$

Fator de qualidade:

- $Q = \frac{1}{3 - K}$ Onde:
- $K = \text{ganho do op-amp}$

📦 Como obter filtros de ordem maior?

- Filtros de ordem maior são obtidos pela cascata de estágios de 2^a ordem.



FILTRO MFB

O **Multiple Feedback (MFB)** é um **filtro ativo de 2^a ordem** que utiliza **realimentação múltipla** do op-amp para definir:

- Freqüência de corte (f_0)
- Fator de qualidade (Q)
- Ganho

Diferente do Sallen-Key:

- O op-amp **não está como buffer**
- Ele participa **ativamente** da dinâmica do filtro

 **Onde o MFB é mais usado?** Principalmente como:

- Passa-banda (BPF)
- Notch (rejeita-faixa)
- Passa-baixa / passa-alta quando **Q** é alto

 Muito comum em:

- Instrumentação
- Áudio
- Telecom
- Filtros seletivos

 **Vantagens do MFB**

- ✓ Muito estável para **Q** alto
- ✓ Ideal para **passa-banda e notch**
- ✓ Menor sensibilidade a variações de R e C
- ✓ Melhor controle de ressonância

 Preferido quando:

- Precisa seletividade
- Precisa pico controlado
- Sallen-Key começa a oscilar

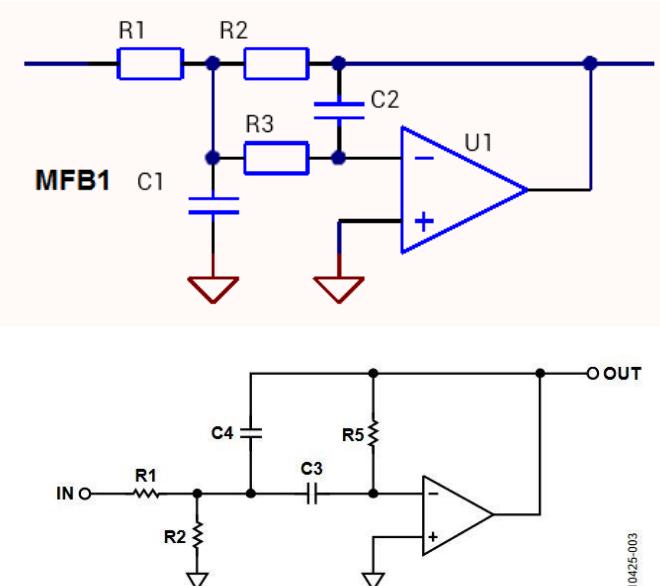
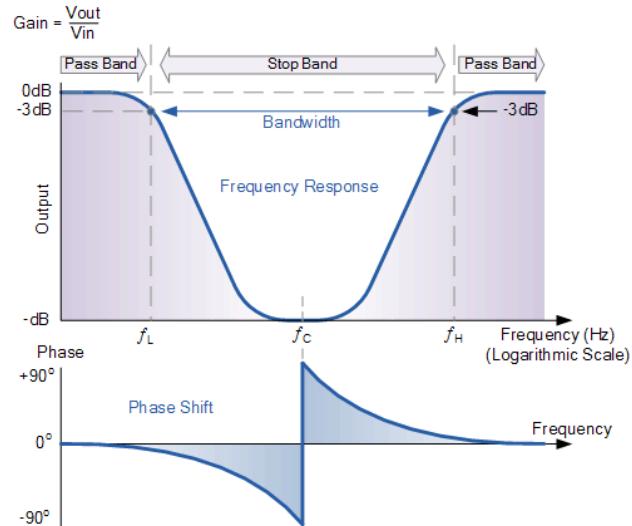


Figure 3. Multiple Feedback Band-Pass Filter

PROJETOS DE AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

Arquitetura básica de um amplificador operacional real Todo op-amp clássico (BJT, JFET ou MOSFET) segue a mesma ideia:

1. Estágio diferencial de entrada
2. Estágio de ganho de alta impedância
3. Estágio de saída de baixa impedância

1 Estágio diferencial de entrada

- **Função:** Amplificar apenas a **diferença** entre as entradas
- Atualmente (2020) se usam JFETs ou MOSFETs

2 Estágio de ganho (carga ativa)

- Usa **fontes de corrente / espelhos**, Minimiza uso de resistores
- Alto ganho porém alta impedância de saída
- $A_v \approx g_m \cdot Z_{out}$

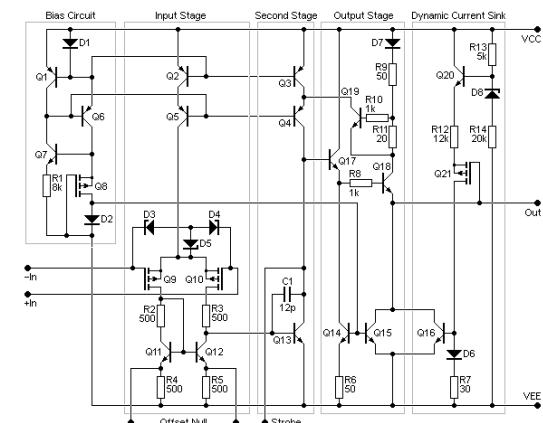
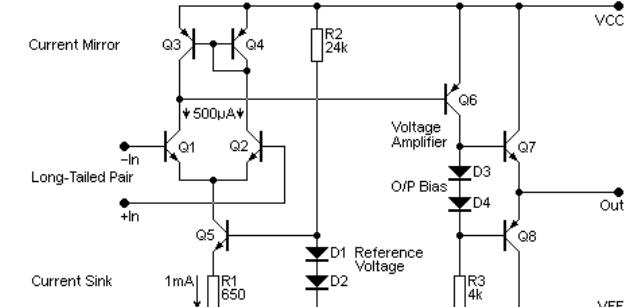
3 Estágio de saída

- Fornecer corrente à carga
- Reduzir a impedância de saída
- Usando BJT ou MOSFET, com amplificação push-pull (classe AB)
- **Aqui a Z_{out} física é reduzida. (Depende da realimentação negativa)**

Como estamos lidando com circuitos integrados iremos usar fontes/espelhos de corrente sempre que possível.

O op-amp ideal é um objetivo de projeto.

O op-amp real é um circuito transistorizado cujo desempenho é limitado principalmente pela frequência.



PULSE WIDTH MODULATION (PWM)

PWM é uma técnica de controle onde **não variamos a tensão**, mas sim **o tempo em que o sinal fica ligado e desligado**. Em vez de gerar uma tensão analógica contínua, usamos:

- um sinal digital (0 ou Vcc)
- com largura de pulso variável

Isso permite controlar:

- potência
- velocidade
- posição
- intensidade (luz, som, torque) com **alta eficiência**.

Conceito Fundamental: Um sinal PWM é definido por três parâmetros:

- **Amplitude** → geralmente fixa (0 a Vcc)
- **Frequência** → quantas vezes o ciclo se repete por segundo
- **Duty Cycle (D)** → porcentagem do tempo em nível alto:

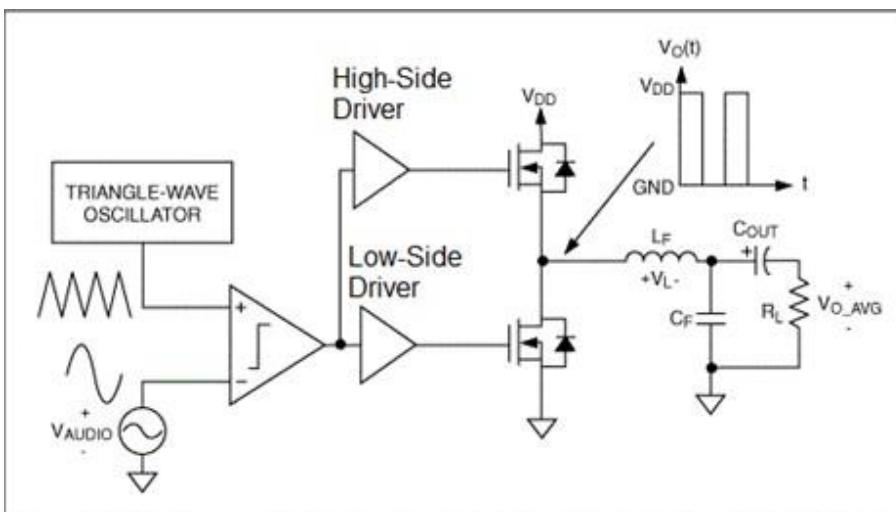
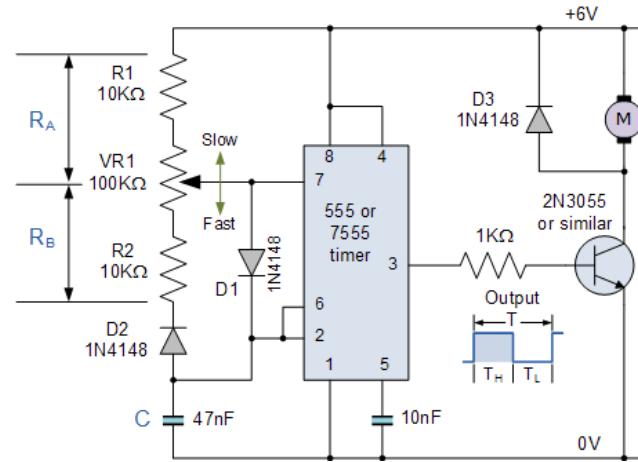
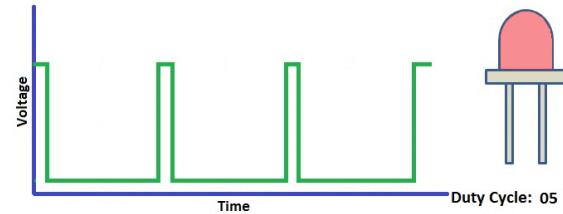
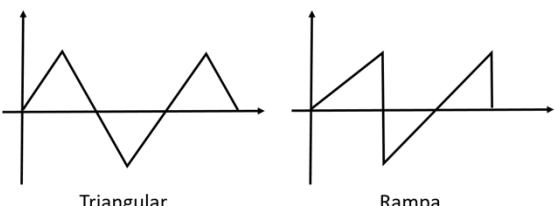
$$D = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \times 100\%$$

Como gerar PWM: A forma mais comum de gerar PWM é:

- 1 Gerar uma **onda de referência** (rampa ou triangular)
- 2 Comparar essa onda com uma tensão de controle
- 3 O comparador gera o PWM
 - Tensão de controle ↑ → Duty Cycle ↑
 - Tensão de controle ↓ → Duty Cycle ↓

Esse é o princípio por trás de:

- PWM analógico e digital
- **Amplificador Classe D**
- Controle de motores e Fontes chaveadas



DICAS PRATICAS DE DESIGN

Pré-amplificadores e osciladores discretos

- Use JFET com auto-polarização (R_s)
 - ✓ Alta impedância de entrada
 - ✓ Baixo ruído, Simplicidade, Excelente para pequenos sinais
 - ⚡ Opcional avançado → Use fonte de corrente quando quiser:
 - maior estabilidade de amplitude (osciladores)
 - menor dependência de Vcc
 - melhor isolamento do tanque

Controle de cargas e potência (chaves, PWM) (ou implementação de portas lógicas)

- Use MOSFETs
 - ✓ Controle por tensão
 - ✓ Alta eficiência
 - ✓ Escala de potência, ideal para chaveamento

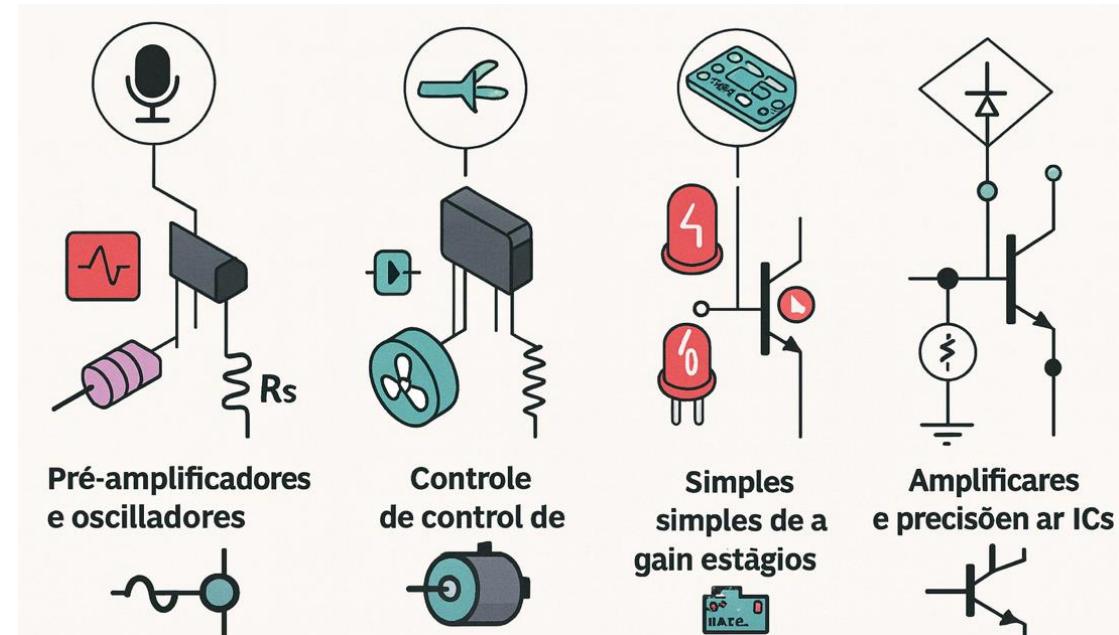
Circuitos simples, bancada e estágios de ganho

- Use BJT com divisor de tensão: ✓ Estável, Fácil de projetar e Barato
- ⚡ Para maior ganho e estabilidade:
 - → Substitua RC (carga resistiva) por fonte de corrente
 - → Use emissor bypassado se precisar de ganho AC

Amplificadores de precisão e CIs analógicos: Use fontes de corrente (espelhos)

⚡ Essencial em:

- amplificadores diferenciais
- op-amps
- RF integrada
- VCOs



ANALOG TO DIGITAL CONVERTER (ADC)

Um ADC é um sistema que transforma um sinal analógico contínuo em uma representação digital discreta **no tempo e na amplitude**.

O que entra no ADC: Tensão que Varia continuamente no tempo contendo:

- Informação útil
- Ruído e Interferência
- Offset

O que sai do ADC: Um número binário atualizado em instantes discretos, limitado por:

- Resolução (bits)
- Velocidade / Clock

Iremos ver duas implementações a seguir Flash ADC (teórico) e o SAR ADC (pratico)

Perguntas Importantes:

1. Com que a frequência devemos amostrar o nosso sinal?

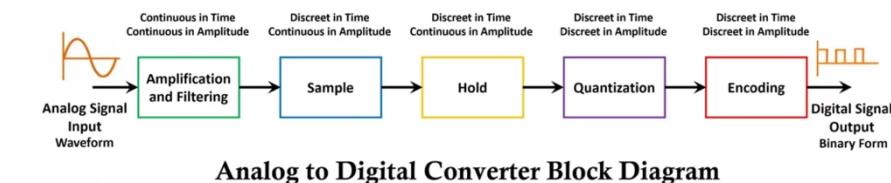
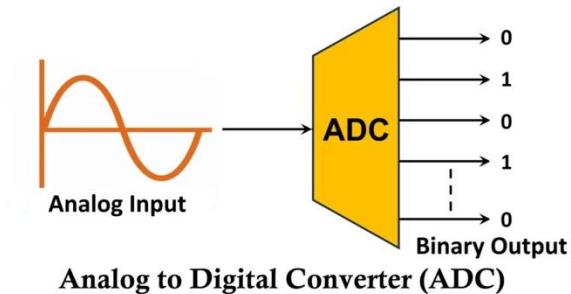
Resposta: Pelo menos 2x a frequência do componente mais rápido que queremos observar, o que se chama de critério de Nyquist, mas na prática a amostragem é mais que 2x para facilitar o projeto dos filtros, na frequência de Nyquist os filtros teriam que ser ideais.

2. O que acontece quando um sinal mais rápido que a amostragem é capturado pelo ADC

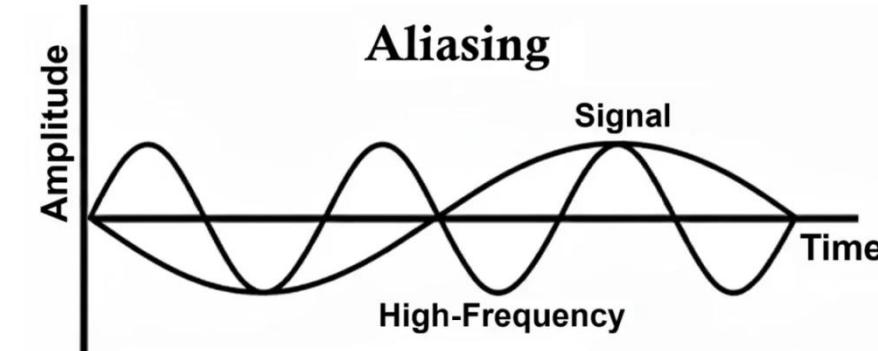
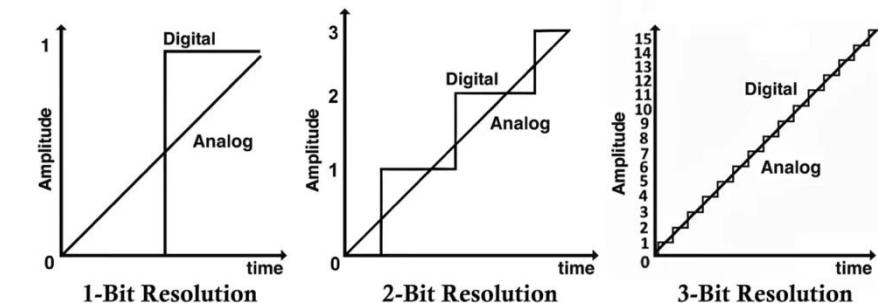
Resposta: Temos o efeito de Aliasing no qual o componente aparece como um sinal de baixa frequência (por isso precisamos filtrar a entrada do ADC)

3. No mundo do Audio (20khz) qual é a frequência padrão

1. 44Khz (CD), ou seja 2.2x
2. Na prática atualmente 256kHz para ter um filtro de anti-aliasing bem simples e todo o resto com filtros digitais.



Analog to Digital Converter Block Diagram



FLASH ADC

O **Flash ADC** é o tipo de ADC mais rápido existente. Ele converte um sinal analógico em digital **em um único passo**, usando **comparação paralela**.

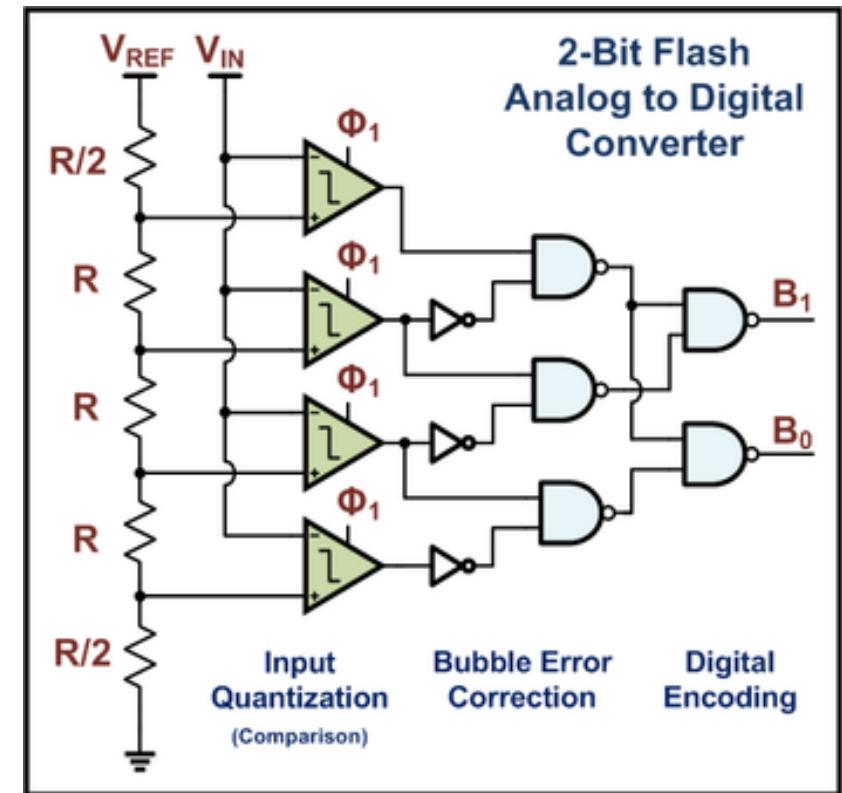
Bem rápido porém difícil na prática pois precisa de $2^n - 1$ comparadores, onde n é o número de bits, ou seja um ADC de 8 bits iria precisar de 256 comparadores, e um de 16 bits, 6534 comparadores.

⚙️ Como ele funciona (visão de sistema)

1. Um divisor resistivo cria vários níveis igualmente espaçados entre 0 e V_{ref}
2. Cada nível alimenta um **comparador**
3. Todos os comparadores comparam V_{in} ao **mesmo tempo**
4. As saídas geram um **código termômetro**
5. Um circuito lógico converte esse código em **binário**

✗ Desvantagens

- Consome muita área de silício
- Alto consumo de energia
- Sensível a:
 - offset de comparadores
 - mismatch de resistores
 - ruído



SAR ADC

O **SAR ADC** converte um sinal analógico em digital **por busca binária**, comparando a entrada com uma referência gerada por um **DAC interno**.

👉 Ele decide **bit a bit**, do MSB ao LSB.

Ideia central

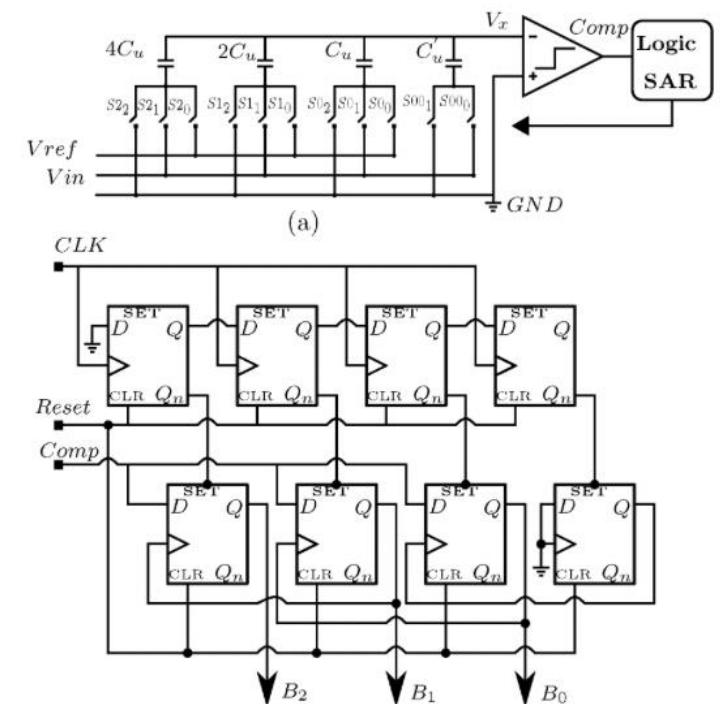
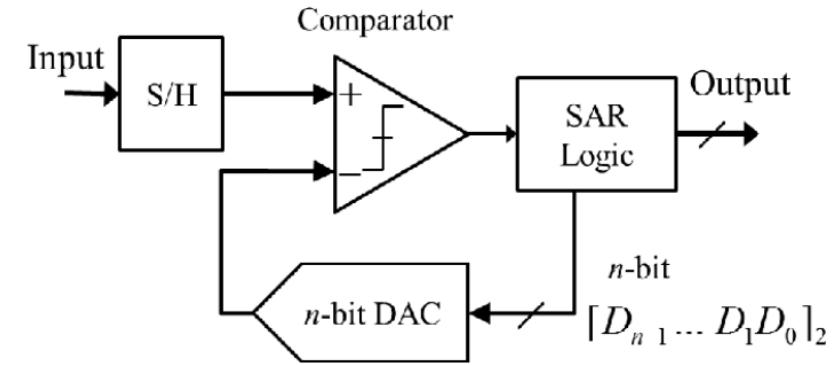
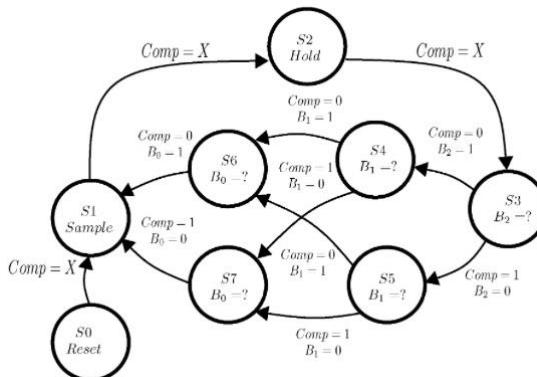
O SAR ADC funciona como um “**chute inteligente**”: “O valor está acima ou abaixo da metade da escala?”

- “E da metade restante?”
- “E da próxima metade?”
- Até encontrar o código final.

📌 É uma busca binária no domínio analógico.

🔄 Funcionamento passo a passo (exemplo 4 bits)

- 1 Amostra Vin
- 2 DAC gera $V_{ref}/2 \rightarrow$ decide MSB
- 3 DAC ajusta referência \rightarrow decide próximo bit
- 4 Repete até o LSB
- 5 Código final após N comparações



No Mundo VLSI ele é uma troca de velocidade por eficiência.

Internamente a logica no SAR, e composta por uma maquina de estados FSM, ou seja um circuito digital sequencial que precisa de clock.

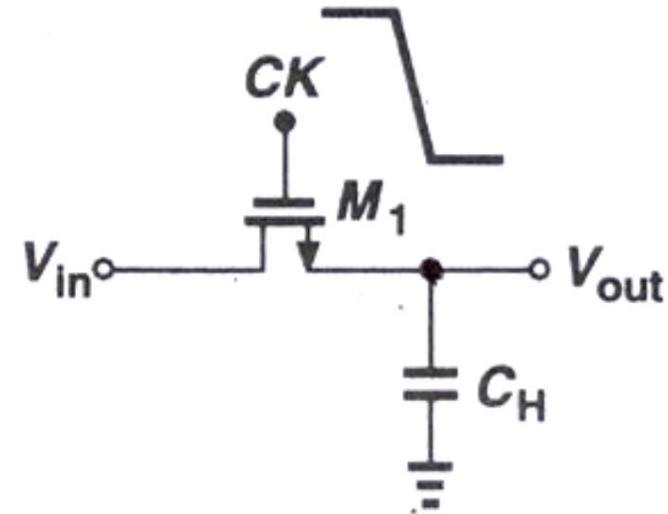


SAMPLE AND HOLD

- Sample & Hold (S/H) é o bloco responsável por:
 - capturar o valor instantâneo de um sinal analógico
 - e mantê-lo constante durante o tempo de conversão do AD

💡 Por que o Sample & Hold é necessário? Durante a conversão, o ADC leva tempo (Flash ≈ 1 ciclo, SAR $\approx N$ ciclos) Se o sinal continuar variando:

- cada bit seria decidido com um valor diferente
- o resultado seria **inválido**

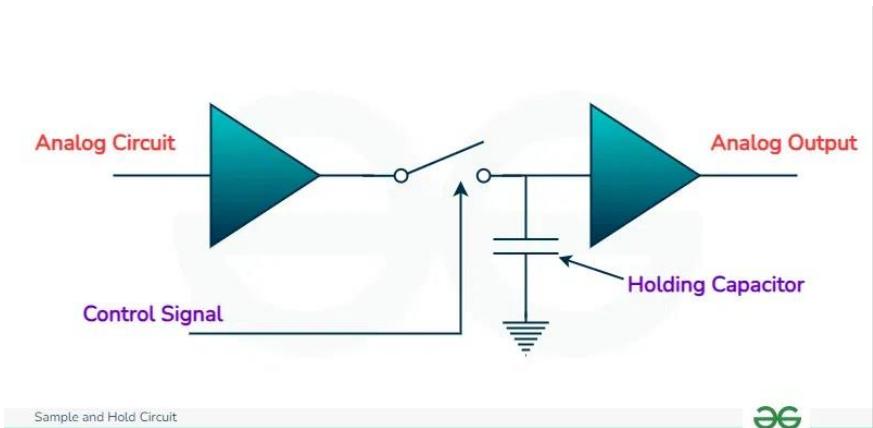


Precisamos no Sample and Hold

- Um Mosfet como chave
- Um capacitor
- Opcionalmente um Buffer

Modos de operação

- ◆ **Sample (Track)**
 - MOSFET ligado
 - Capacitor segue Vin
 - Vhold \approx Vin
- **Hold**
 - MOSFET desligado
 - Capacitor mantém a carga
 - Vhold \approx constante



26

As vezes precisamos do buffer antes do Vin para poder descarregar o capacitor rapidamente se necessário, para evitar que a tensão antiga influencie o valor novo caso a tensão for menor que o valor antigo.



DAC

Um **DAC** converte um número digital em uma **grandeza analógica proporcional** (tensão ou corrente).

- Enquanto o ADC responde “quanto vale?”,
o DAC responde “gere exatamente esse valor”.

O DAC é: um circuito **análogo controlado por lógica digital** extremamente sensível a:

- ruído
- Referência
- Diferenças de fabricação (mismatch)

Peso dos bits (conceito fundamental) Para um DAC de N bits:

- MSB (bit mais significativo) → maior peso ($\frac{1}{2}$ da escala)
- LSB (bit menos significativo) → menor passo
- $\text{LSB} = \frac{V_{\text{REF}}}{2^N}$

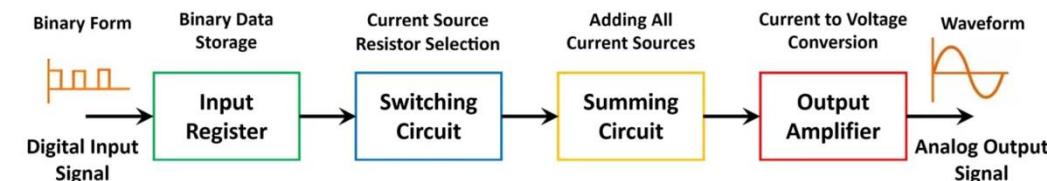
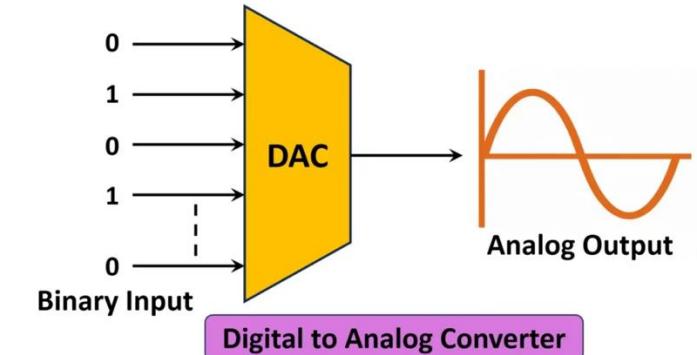
Tipos principais de DAC (visão conceitual)

◆ **DAC Resistivo (R-2R)**

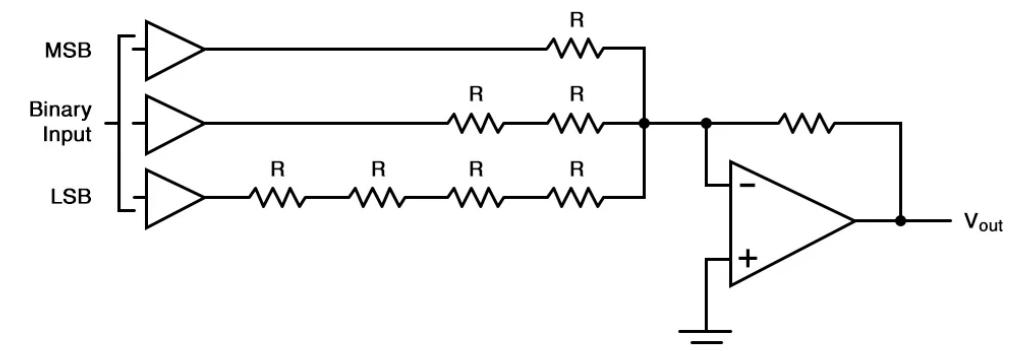
- Usa resistores ponderados
- Simples e didático

◆ **DAC Capacitivo**

- Usa capacitores ponderados
- Base do **SAR ADC**
- Excelente matching em VLSI **O DAC do SAR é capacitivo.**



Digital to Analog Converter Block Diagram



DAC CAPACITIVO

O **DAC capacitivo** converte um código digital em uma tensão analógica **redistribuindo carga elétrica entre capacitores**.

- Ele não usa resistores.
- Ele não “gera tensão”.
- Ele **redistribui carga**.

Ideia central

- No DAC capacitivo:
 - Todos os capacitores são carregados
 - Depois, **chaves digitais mudam as conexões**
- → a carga total se redistribui
- → a tensão resultante representa o código digital

Funcionamento em duas fases (SAR ADC)

1 Sample

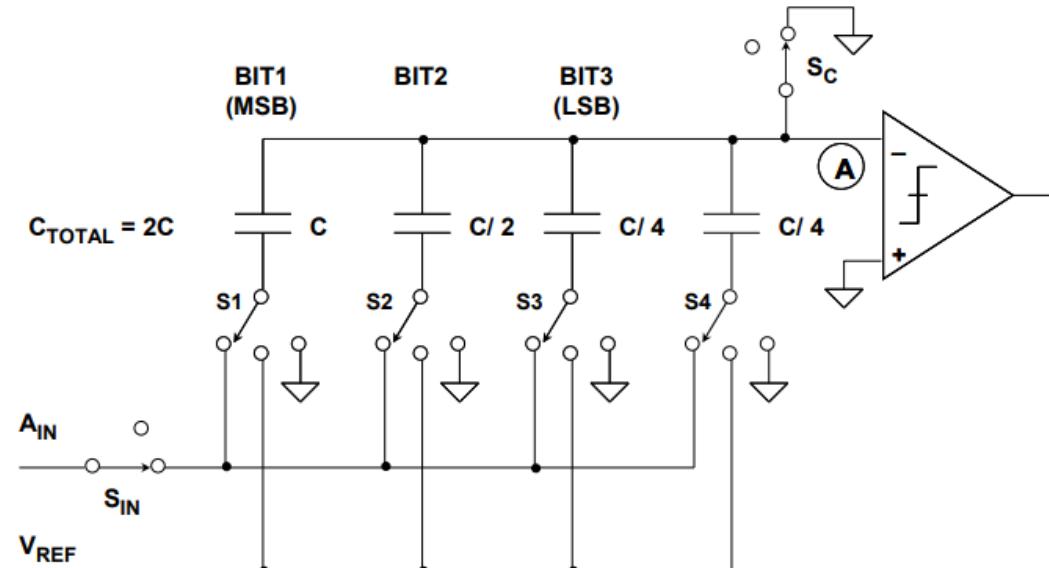
- Todos os capacitores conectados a **V_{in}**
- O array inteiro armazena carga proporcional a **V_{in}**

2 Redistribution (Conversão)

- Capacitores são comutados entre:
 - GND
 - V_{ref}
 - A tensão no nó comum muda
- Comparador decide cada bit

📌 **Não há descarga — apenas redistribuição.**

E mais fácil controlarmos/criarmos capacitores com cargas proporcionais **C, C/2, C/4** do que resistores



CONVERSORES DC-DC

Um **DC-DC Converter** é um circuito que converte uma **tensão contínua (DC)** em outra **tensão contínua**, com valor diferente, mantendo eficiência elevada por meio de **chaveamento**.

- Entrada: DC
- Saída: DC
- Conversão feita por **chaveamento + armazenamento de energia**

O transistor **não opera na região linear**: ele alterna entre **corte e saturação**, reduzindo perdas.

Por que DC-DC Converters são necessários?

- Ajustar níveis de tensão (ex.: 12 V → 5 V → 1.2 V)
- Alta eficiência (80–98%)
- Reduz dissipação térmica
- Permite múltiplas tensões a partir de uma única fonte

Princípio de Funcionamento

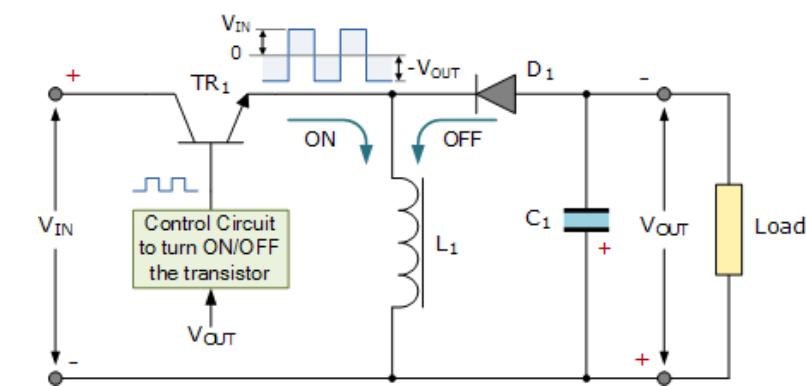
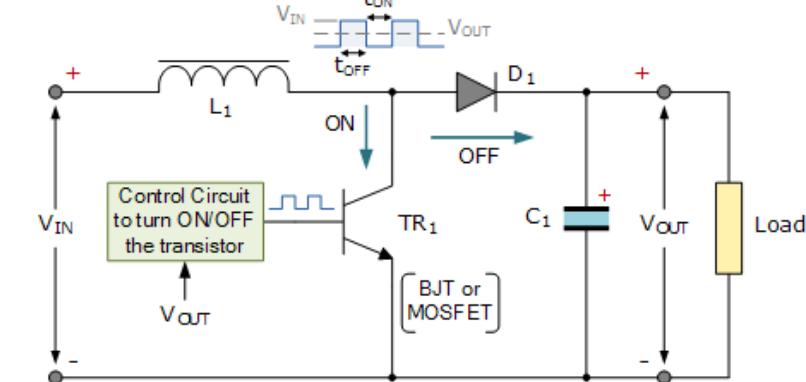
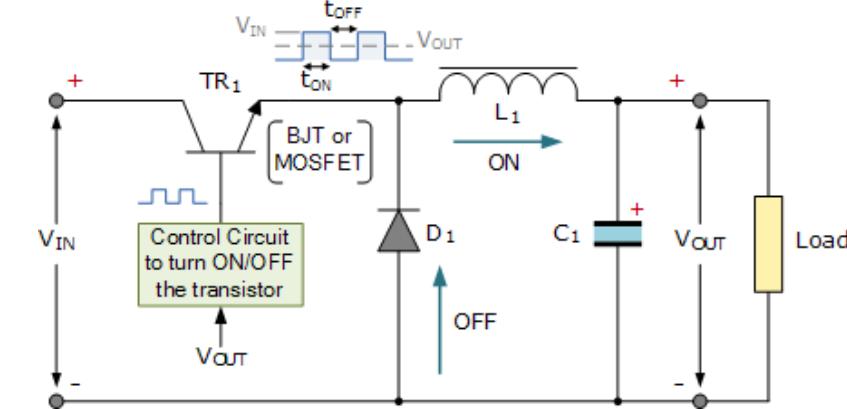
- 1 Um **transistor** (MOSFET/BJT) chaveia em alta frequência
- 2 Um **elemento de armazenamento de energia** acumula energia
- 3 A energia é transferida para a carga de forma controlada
- 4 Um **loop de realimentação** regula a tensão de saída

Elementos de armazenamento possíveis:

- Indutor / Transformador (campo magnético): Conseguimos mais corrente
- Capacitor (campo elétrico – baixa potência): Usados em VLSI, não como fonte principal

Topologias:

- Buck (Step-down): Reduz a tensão, usa indutor
- Boost (Step-up): Eleva a tensão
- Buck-Boost: Eleva/Reduz a tensão e pode inverter a polaridade



FONTES CHAVEADAS (SMPS) AC-DC

Uma **Fonte Chaveada** (**SMPS – Switched-Mode Power Supply**) converte energia elétrica usando **chaveamento em alta frequência**, ao invés de dissipar potência como calor (fontes lineares).

Por que usar Fontes Chaveadas?

- **Alta eficiência (80–95%) / Menor dissipação térmica**
- **Transformadores e indutores menores** (alta frequência)
- **Ampla faixa de entrada** (ex.: 90–264 VAC)

⚠ Trade-offs:

- Gera **ruído (EMI)**
- Projeto mais complexo que fontes lineares

Princípio de Funcionamento (Visão de Sistema)

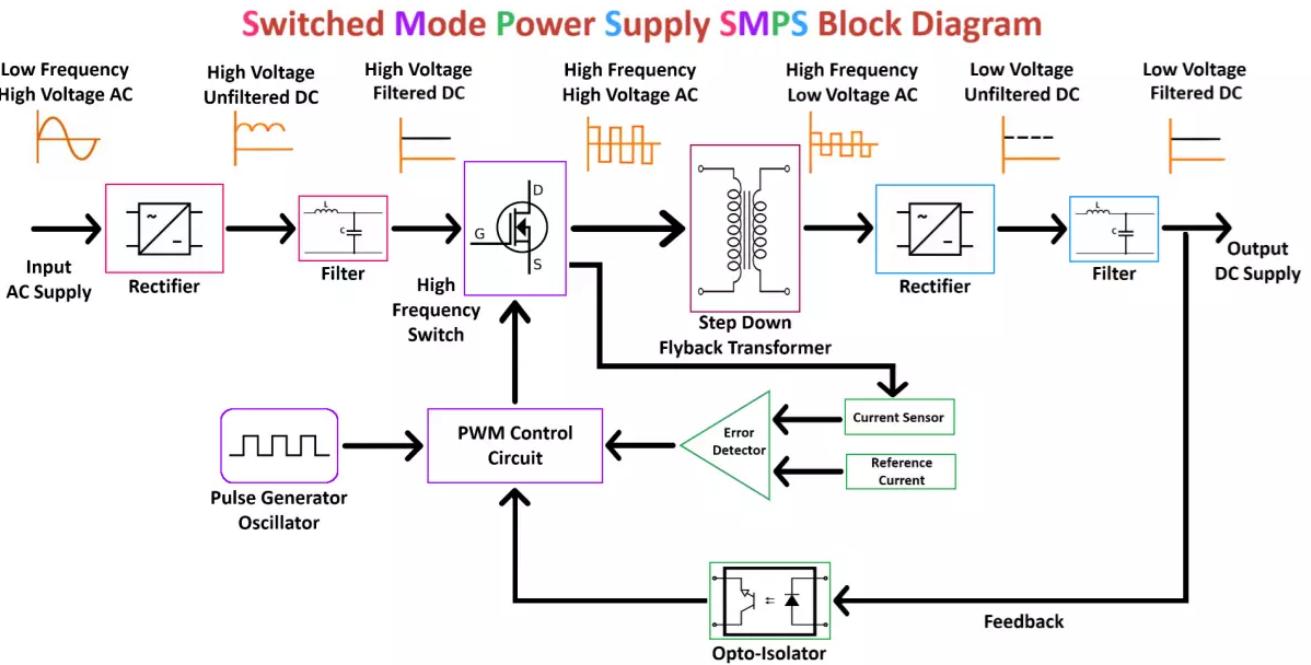
- **Chave (MOSFET)** comuta em alta frequência (PWM)
- **Elemento de armazenamento** (Indutor / Transformador)
- **Retificação rápida** (Diodo Schottky ou MOSFET síncrono)
- **Filtro LC** suaviza a tensão
- **Realimentação** ajusta o duty-cycle

💡 A tensão de saída é controlada pelo **duty-cycle** do PWM

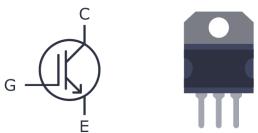
Topologias mais comuns:

- **Não Isoladas**
 - **Buck** → Reduz tensão
 - **Boost** → Eleva tensão
 - **Buck-Boost** → Inverte / ajusta
- **Isoladas**
 - **Flyback** (a mais comum até ~100W)
 - **Forward**
 - **Push-Pull**
 - **Half-Bridge / Full-Bridge**

Uma fonte chaveada tem um conversor DC-DC



IGBT

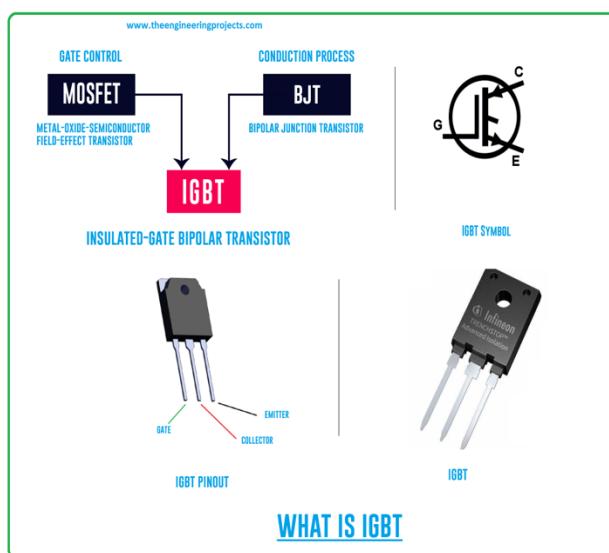


IGBT = Insulated Gate Bipolar Transistor

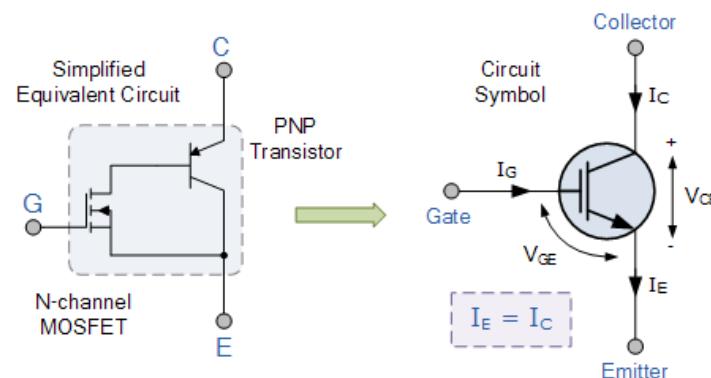
- **Gate isolado** → controle por **tensão** (como MOSFET)
- **Condução bipolar** → corrente alta e baixa perda (como BJT)
- Muito usado em **potência média/alta**

Ideia central (guarde isso)

- O IGBT combina o controle fácil do MOSFET com a robustez de corrente do BJT.
- Ele não substitui MOSFET nem BJT — ele **ocupa um intervalo específico de potência e tensão**.



Dispositivo	Controle	Frequência	Corrente / Tensão típica	Casos de uso
BJT	Corrente na base	Baixa a média (kHz – poucos MHz)	Corrente: média Tensão: baixa a média (até centenas de V)	Amplificadores analógicos, áudio, RF clássica, estágios lineares, drivers antigos
MOSFET	Tensão no gate (isolado)	Média a muito alta (kHz – MHz)	Corrente: alta Tensão: baixa a média (até ~600–900 V típicos)	DC-DC converters, SMPS, VRMs, lógica digital, eletrônica moderna
JFET	Tensão no gate (junção PN)	Média a alta (kHz – MHz)	Corrente: baixa Tensão: baixa	Pré-amplificadores, baixo ruído, entradas de alta impedância, instrumentação
IGBT	Tensão no gate (isolado)	Baixa a média (até ~20–50 kHz)	Corrente: muito alta Tensão: muito alta (600 V – kV)	Inversores de frequência, motores AC, VFDs, UPS industrial, tração elétrica, EVs



INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Um **Inversor de Frequência** é um conversor de potência que transforma **DC em AC**, permitindo **controle da frequência, tensão e forma de onda** da saída.

- → Entrada: **DC (barramento DC)**
- → Saída: **AC controlado (mono ou trifásico)**

Arquitetura típica (industrial, VFD, UPS, solar, veículos elétricos):

📌 O inversor **sempre trabalha a partir de DC**

Princípio de Funcionamento

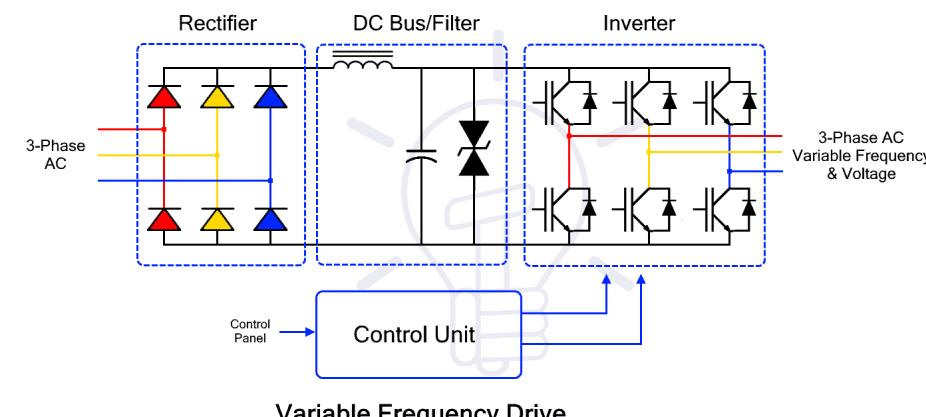
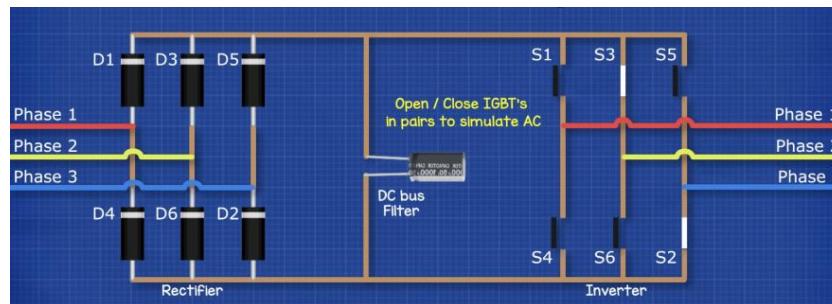
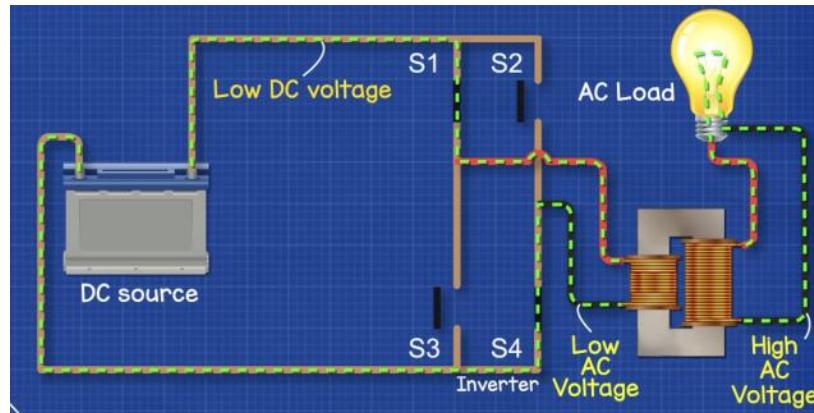
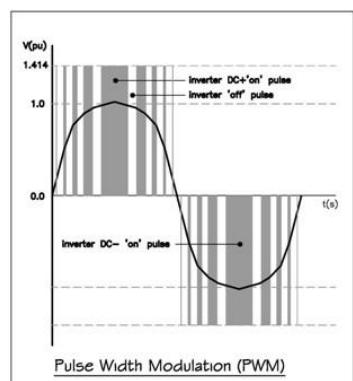
- 1 Chaves de potência (MOSFETs ou IGBTs) comutam em alta frequência
- 2 Um **PWM** reconstrói uma forma de onda AC
- 3 A carga “enxerga” o valor médio → senoidal

Topologia Básica – Inversor Monofásico (Ponte H)

- 4 chaves de potência
- Inversão de polaridade da carga
- Controle por PWM

Topologia Trifásica

- 6 chaves de potência
- Três fases defasadas de 120°
- Base de motores industriais



RUÍDO

Ruído eletrônico são **flutuações aleatórias** de tensão ou corrente presentes em qualquer circuito real, **mesmo sem sinal de entrada**.

- **Ruído não é erro, não é defeito, não é interferência externa**
- **Ele nasce da física dos dispositivos.**
- Sem eles não teríamos osciladores

Por que ruído é crítico?

- O ruído define:
- **Sensibilidade mínima** de um amplificador
- **SNR (Signal-to-Noise Ratio)**
- Qualidade de áudio
- Alcance de RF
- Precisão de sensores (ECG, IoT, instrumentação)
- Limite de desempenho em VLSI

Como Reduzir Ruído na Prática?

Técnicas de Circuito:

- **Aumentar g_m (mais corrente)**
- **Degeneração (RE / RS)**
- **Amplificador diferencial**
- **Casamento de transistores**
- **Limitar largura de banda (filtros)**

Técnicas de Arquitetura:

- **Amplificar cedo (low-noise front-end)**
- **Evitar ganho excessivo desnecessário**
- **Escolher tecnologia correta (BJT/JFET)**

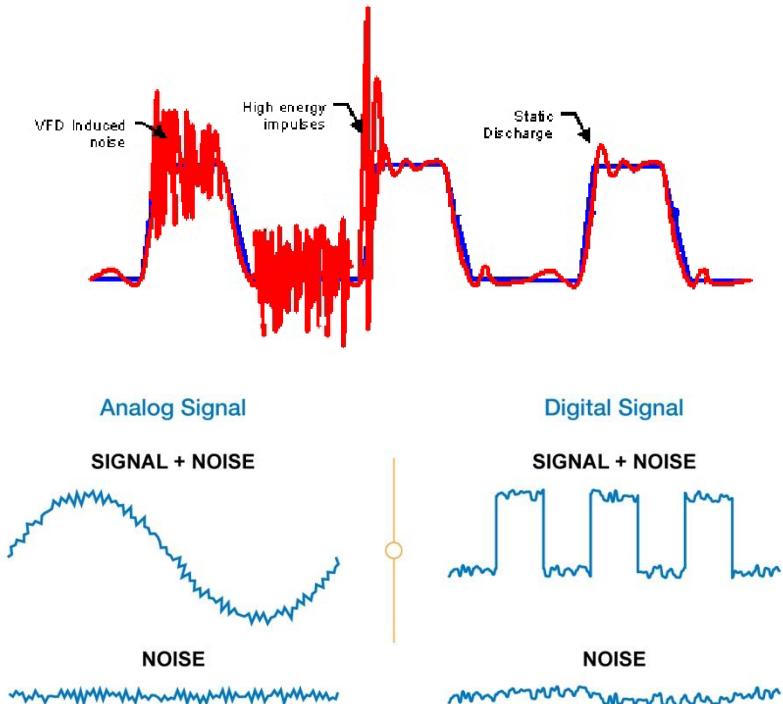
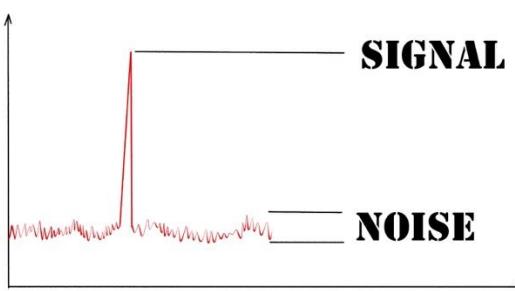


FIGURE 1. Noise in Analog and Digital Signals

NGSPICE E LINGUAGEM SPICE

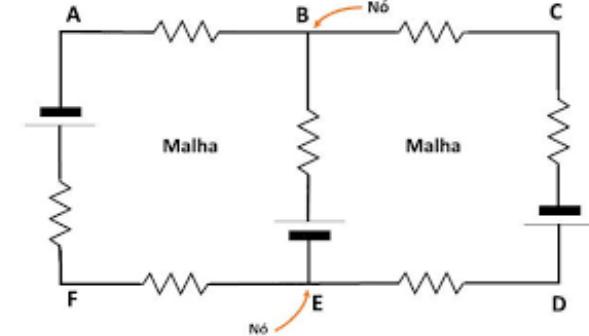
- **NGSpice** é um simulador **open-source** de circuitos elétricos que permite simular circuitos **análogicos, digitais e mistos**. Ele funciona resolvendo matematicamente o circuito usando a **Analise Nodal Modificada**.

Para descrição dos circuitos ele usa também a linguagem SPICE para descrever:

- Componentes
- Conexões
- Subcircuitos
- Tipos de simulação

⚡ **Ngspice não é um programa gráfico — é uma linguagem de descrição de circuitos, porém existem ferramentas CAD que permitem o desenho do esquemático do projeto que no final convertem em SPICE.**

O NGSpice é um simulador numérico, ou seja ele não consegue encontrar equações ou lidar com elementos sem valor, para usar simulação simbólica use o [Slicap](#).



```
* Circuito de 2 malhas (A-B-C / F-E-D) com 3 ramos verticais
* Nós externos: A B C D E F
* Nó de referência (GND): E
*****
* Componentes *
*****
* Resistores da parte de cima
RAB A B 1k
RBC B C 1k

* Resistores da parte de baixo
RFE F E 1k
RED E D 1k

* Ramo esquerdo (A -> fonte -> resistor -> F)
V1 A N1 DC 10
R1 N1 F 1k

* Ramo do meio (B -> resistor -> fonte -> E)
R2 B N2 1k
V2 N2 E DC 5

* Ramo direito (C -> resistor -> fonte -> D)
R3 C N3 1k
V3 N3 D DC 5
*****
* Simulação *
*****
.op
*.tran 0.1ms 10ms
.end
```

LINGUAGEM SPICE

```
* =====
* Circuito DC (conforme imagem)
* Objetivo: calcular tensões DC nos nós N1, N2, N3
*
* Nós:
*   0 = GND (terra)
*   N1 = nó superior esquerdo (topo da fonte e de R1, antes de R3)
*   N2 = nó entre R1 e R2 (divisor)
*   N3 = nó superior direito (entre R3 e R4)
* =====

* --- Fonte DC ---
* V1 força o nó N1 em +5V em relação ao terra (0)
V1 N1 0 DC 5

* --- Ramo do meio (divisor R1-R2) ---
R1 N1 N2 5k
R2 N2 0 1k

* --- Ramo da direita (R3 em série com R4 para o terra) ---
R3 N1 N3 200
R4 N3 0 800

* --- Análise DC (ponto de operação) ---
.op

* --- Mostra tensões dos nós no resultado ---
.print op V(N1) V(N2) V(N3)

.end
```

Estrutura básica de um arquivo SPICE

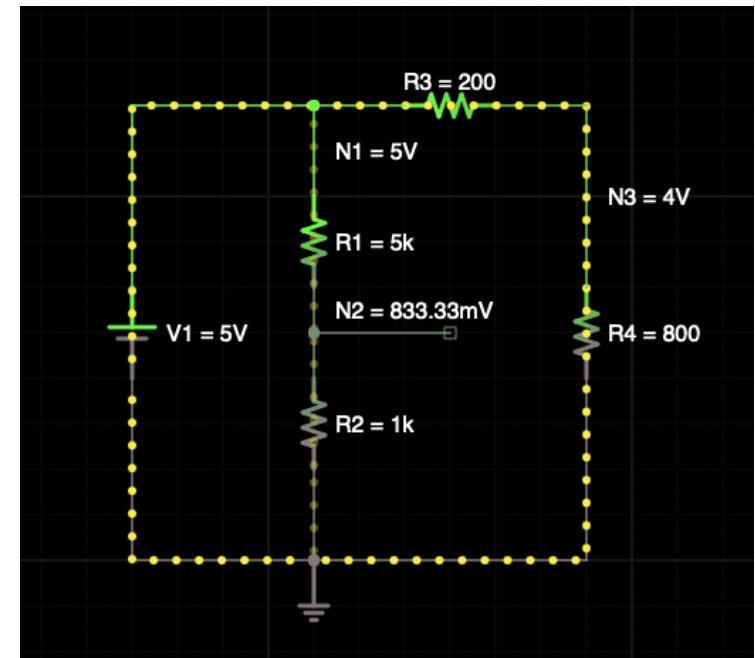
spice

* Comentário (linha iniciada por *)

<componentes>

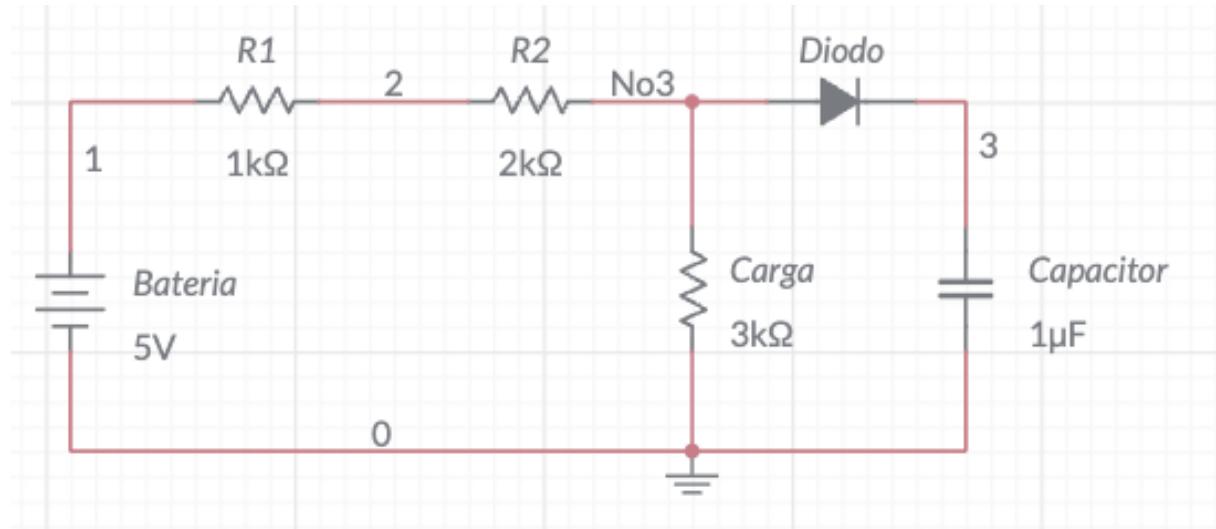
<comandos de simulação>

.end



MAIS EXEMPLOS DE SINTAXE

```
* --- Circuit Topology ---  
  
* Component: Bateria  
vBateria 1 0 dc 5 ac 0 0  
+ distof1 0 0  
+ distof2 0 0  
  
* Component: Capacitor  
cCapacitor 3 0 0.000001  
  
* Component: Carga  
rCarga No3 0 3000 VIRTUAL_RESISTANCE_Carga  
  
* Component: Diodo  
dDiodo No3 3 DIODE_Diodo AREA=1  
  
* Component: R1  
rR1 1 2 1000 VIRTUAL_RESISTANCE_R1  
  
* Component: R2  
rR2 2 No3 2000 VIRTUAL_RESISTANCE_R2  
  
* --- Circuit Models ---  
  
* Carga model  
.model VIRTUAL_RESISTANCE_Carga r( )  
  
* Diodo model  
.model DIODE_Diodo D( IS=1e-14 RS=0 N=1 BV=1e+30  
+ TT=0 CJO=0 VJ=1 M=0.5 EG=1.11 XTI=3 KF=0 AF=1 FC=0.5 IBV=1e-10  
+ IBVL=0 IKF=1e+30 ISR=0 NBV=1 NBVL=1 NR=2 TBV1=0 TBV2=0 TIKF=0  
+ TRS1=0 TRS2=0  
+ )  
  
* R1 model  
.model VIRTUAL_RESISTANCE_R1 r( )  
  
* R2 model  
.model VIRTUAL_RESISTANCE_R2 r( )
```



TABELAS SINTAXE SPICE PARTE 1

Componente	Sintaxe SPICE	Exemplo	Descrição
Resistor	R<nome> <nó1> <nó2> <valor>	R1 N1 N2 1k	Limita corrente e define quedas de tensão. Unidade: Ohm (Ω).
Fonte de Tensão	V<nome> <nó+> <nó-> DC <valor>	V1 N1 0 DC 5	Fonte ideal de tensão contínua. Força a diferença de potencial entre os nós.
Capacitor	C<nome> <nó1> <nó2> <valor>	C1 N1 N2 10u	Armazena energia em campo elétrico. Unidade: Farad (F).
Indutor	L<nome> <nó1> <nó2> <valor>	L1 N1 N2 1m	Armazena energia em campo magnético. Unidade: Henry (H).
Diodo	D<nome> <ânodo> <cátodo> <modelo>	D1 A K DIO	Conduz preferencialmente em um sentido. Requer .model.
Transistor BJT	Q<nome> <C> <E> <modelo>	Q1 C B E NPN	Amplificador ou chave controlado por corrente. Requer .model.

Regras de ouro da linguagem SPICE

- 🔥 Primeira letra define o tipo do elemento
- 🔥 Tudo vira nós e equações
- 🔥 SPICE é **numérico**, não simbólico
- 🔥 .plot ≠ .print
- 🔥 Nô 0 sempre existe

Comando	Sintaxe	Descrição
Modelo	.model <nome> <tipo> (parâmetros)	Define modelo de diodo, BJT, MOSFET
Subcircuito	.subckt <nome> <pinos>	Início de subcircuito
Fim do subcircuito	.ends <nome>	Final do subcircuito
Instância de subcircuito	X<nome> <nós> <subckt>	Usa o subcircuito
Parâmetro	.param nome=valor	Define parâmetro numérico

Sufixo	Valor
f	10^{-15}
p	10^{-12}
n	10^{-9}
u	10^{-6}
m	10^{-3}
k	10^3
Meg	10^6
G	10^9

```
.subckt filtro in out
R1 in out 1k
C1 out 0 100n
.ends filtro
```

```
X1 vin vout filtro
```



TABELAS SINTAXE SPICE PARTE 2

Análise	Sintaxe	Descrição
Ponto DC	.op	Calcula o ponto de operação DC
Transiente	.tran <passo> <tempo_final>	Simulação no tempo
AC	`.ac dec	lin
Sweep DC	.dc <fonte> ini fim passo	Varre fonte DC
Sweep param	.step param <p> ini fim passo	Varre parâmetros
Ruído	.noise V(out) V(in)	Análise de ruído
Sensibilidade	.sens	Sensibilidade de parâmetros
Temperatura	.temp valor	Define temperatura

Comando	Sintaxe	Descrição
Condição inicial	.ic V(n)=valor	Define tensão inicial
IC em capacitor	C1 n1 n2 1u IC=0.1	Inicializa capacitor
Opção	.options <opções>	Ajustes do solver
Controle	.controlendc	Bloco de comandos NGSpice

Comando	Sintaxe	Descrição
Rodar	run	Executa simulação
Plot	plot V(n1)	Plota tensão
Plot múltiplo	plot V(n1) V(n2)	Múltiplas curvas
Corrente	plot I(R1)	Corrente em componente
dB	plot db(V(out))	Magnitude em dB
Fase	plot phase(V(out))	Fase
Limpar	destroy all	Limpa resultados

Comando	Sintaxe	Descrição
Condição inicial	.ic V(n)=valor	Define tensão inicial
IC em capacitor	C1 n1 n2 1u IC=0.1	Inicializa capacitor
Opção	.options <opções>	Ajustes do solver
Controle	.controlendc	Bloco de comandos NGSpice



SPICE EXEMPLO DE FILTRO

```
* =====
* EXEMPLO: Seção .control com run, plot, print, Bode, sweep
*           e exportação CSV (wrdata)
* Circuito: Filtro RC passa-baixa
*
* Vin -> R -> Vout, e C de Vout para GND
* =====
*****
* Circuito   *
*****
.param R=1k
.param C=100n
V1 in 0 DC 1 AC 1
R1 in out {R}
C1 out 0 {C}
```



Esse exemplo é mais completo

- 🔥 Sweep, Graficos de fase
- 🔥 for-loop
- 🔥 Salvando dados
- 🔥 Bode plot

```
*****
* Controle   *
*****
.control
* ---- Ajustes úteis para exportação ----
set filetype=ascii
set wr_vecnames
set wr_singlescale

echo "==== (1) PONTO DE OPERACAO (.op) ===="
op
* print (console): tensões e corrente na fonte
print v(in) v(out) i(v1)

echo "==== (2) BODE PLOT (.ac) ===="
* varredura log: 100 pontos por década, 10 Hz a 1 MHz
ac dec 100 10 1Meg

* Gráficos "legais" típicos de Bode:
* magnitude em dB e fase em graus
plot db(v(out)) phase(v(out))

* Exporta CSV do Bode
* Colunas: freq, mag_db, fase_deg
wrdata bode.csv frequency db(v(out)) phase(v(out))

echo "==== (3) TRANSIENTE (.tran) - resposta ao degrau ===="
* Para um degrau: fonte DC já é 1V; vamos "subir" em t=0 com PULSE:
alter @v1[dc]=0
alter V1 PULSE(0 1 0 1u 1u 5m 10m)
tran 10u 20m

plot v(in) v(out)
wrdata tran.csv time v(in) v(out)

echo "==== (4) SWEEP DE PARAMETRO (R) com export por rodada ===="
* Volta a fonte para AC/DC simples antes do sweep AC
alter V1 DC 1 AC 1
reset

* Varre R em alguns valores e gera um CSV por valor
foreach rval 500 1k 2k 5k 10k
  alterparam R = $rval
  ac dec 100 10 1Meg
  plot db(v(out)) ; sobrepõe curvas no mesmo gráfico
  wrdata bode_R_$rval.csv frequency db(v(out)) phase(v(out))
end

echo "FIM: CSV gerados: bode.csv, tran.csv, bode_R_*.csv"
.endc

.end
```

SIMULAÇÕES DE OSCILADORES

⚠ Por que os osciladores falham na simulação? No PSPICE:

- O circuito pode iniciar em **equilíbrio perfeito**
- **Não existe ruído térmico real** (como no hardware)
- Modelos ideais podem **travar a oscilação**
- A análise DC pode “matar” o start-up

1 Sempre gere uma perturbação inicial

- Osciladores **não começam do zero**.
- **Técnicas recomendadas:**
- **Condição inicial em capacitor**

2 Cuidado com a alimentação (single-supply) Erro comum:

- Oscilador tentando oscilar em torno de **0 V**
 - Alimentação **0-Vcc**
 - Resultado: saída saturada no rail
- **Solução correta:**
- Criar **Vref = Vcc/2**
- Usar Vref como terra **AC**

3 Evite modelos ideais demais Problema:

- Op-amp ideal (ganho infinito)
- Sem slew-rate, polos ou saturação real. Pode travar ou explodir numericamente

Técnicas recomendadas:

- **Condição inicial em capacitor**

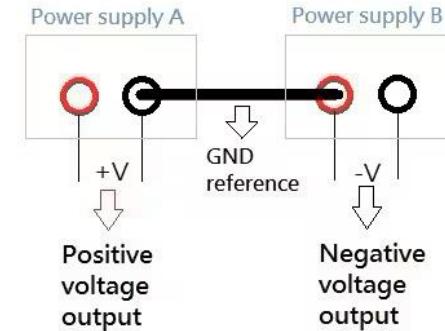
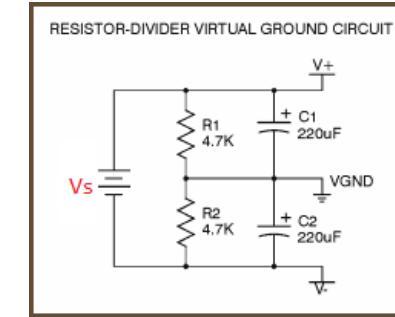
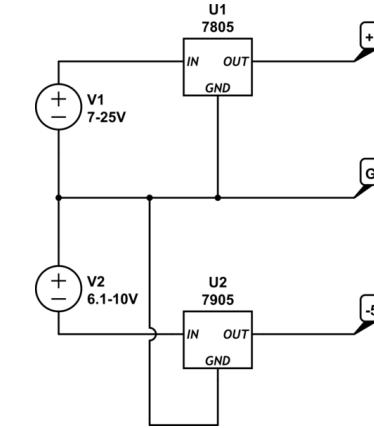
code

```
C1 n1 0 100n IC=1m
```

- **Análise transiente com UIC**

code

```
.TRAN 0 500m UIC
```



LIMITAÇÕES NO VLSI

Em projetos de **circuitos integrados (VLSI)**, várias soluções comuns em circuitos discretos **não são viáveis ou são extremamente custosas**. Algumas limitações:

- Indutores
- Resistores de alto Valor
- Capacitores de alto Valor
- Falta de ferramentas OpenSource para projetos analógicos
- Projetos analógicos, ainda e muito manual, não existe uma linguagem de síntese de projetos analógicos.

⚠ Consequências diretas no projeto

- **Fontes e espelhos de corrente** (em vez de resistores)
- **Degeneração ativa** (transistores) em vez de grandes resistores
- **Filtros ativos** (em vez de LC)
- **Cargas ativas** (em vez de resistores)

Fechando...

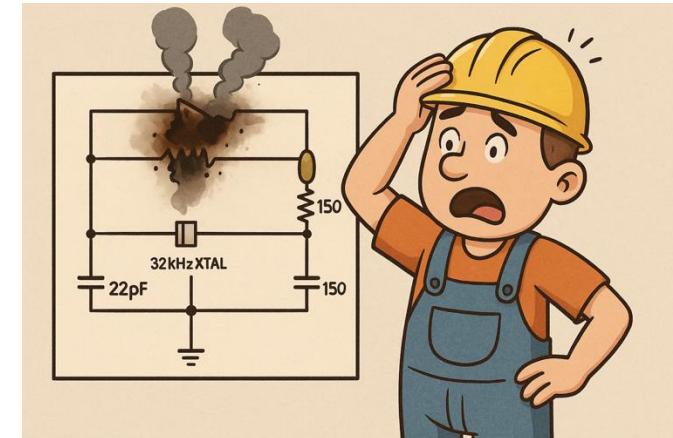
- 🔥 *Em VLSI analógico, projetamos mais com transistors e menos com componentes passivos.*
- 🔥 *O silício impõe as regras do projeto.*



ERROS EM ELETROÔNICA

Erros conceituais (os mais perigosos)

- ✗ Confundir configuração com polarização (Fonte comum ≠ ponto DC)
- ✗ Achar que ganho alto resolve tudo (ganho sem estabilidade não serve)
- ✗ Confundir inversão de fase com atraso de fase (erro comum em osciladores)
- ✗ Achar que LC ou RC “cria” oscilação (quem cria oscilação é o amplificador + realimentação + ruidos)



Erros de projeto de amplificadores

- ✗ Confiar em β (BJT) ou gm (FET) como valor fixo
- ✗ Não usar degeneração (R_E / R_S)
- ✗ Resistor na cauda achando que é fonte de corrente
- ✗ Ignorar CMRR em amplificadores diferenciais
- ✗ Projetar ganho final no primeiro estágio

Erros em osciladores (muito comuns)

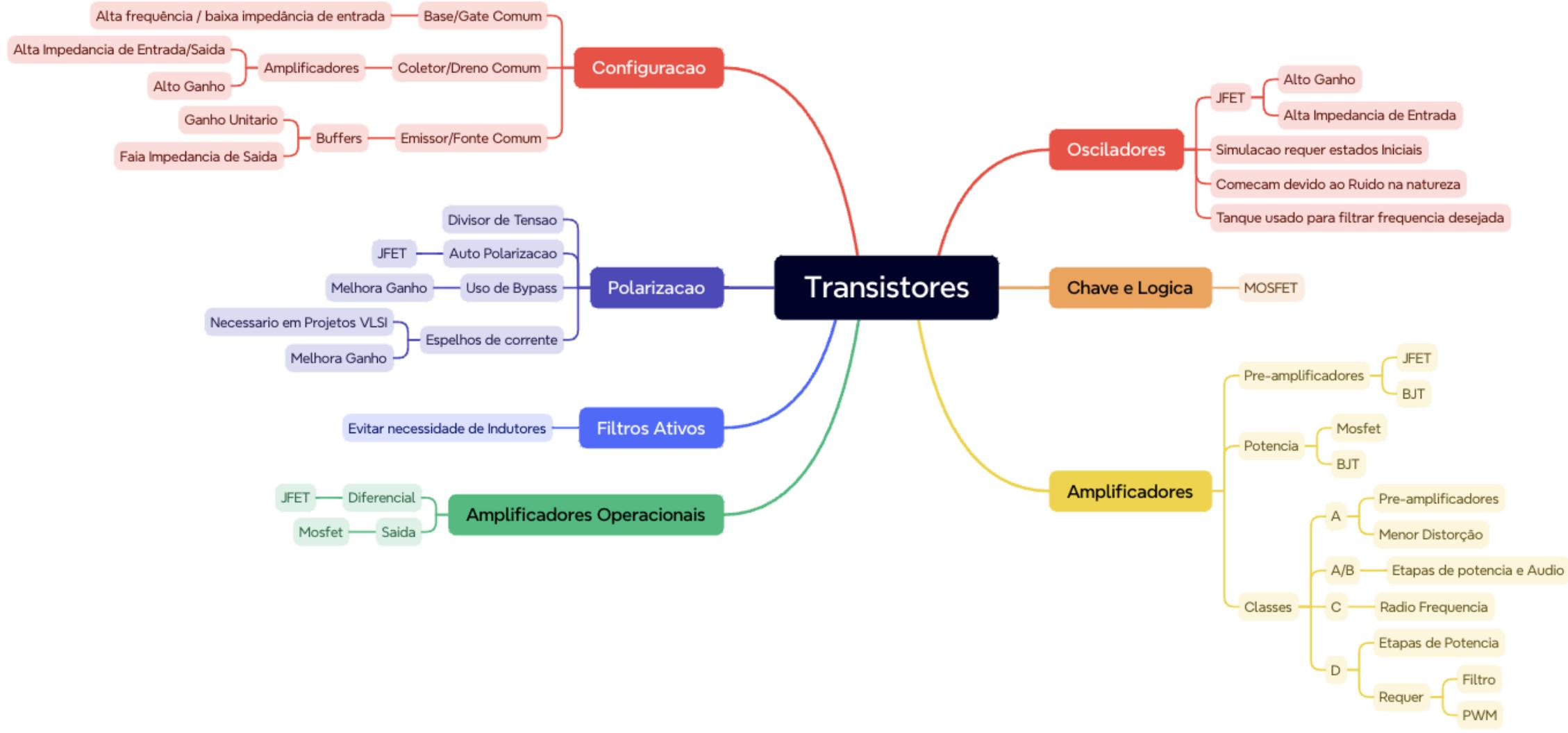
- ✗ Ignorar CL do cristal
- ✗ Não limitar o drive do cristal
- ✗ Achar que capacitores mudam muito a frequência do XTAL
- ✗ Não verificar ganho de malha (> 1)
- ✗ Oscilador que só funciona no simulador

Erros de simulação (SPICE): “Funciona na Simulação, logo esta ok, pode produzir ...”

- ✗ Confiar cegamente no SPICE
- ✗ Não definir condições iniciais em osciladores
- ✗ Modelos irreais ou genéricos
- ✗ Simular sem considerar tolerâncias
- ✗ “Funciona no SPICE” ≠ funciona no mundo real



MAPA MENTAL DE FECHAMENTO



REFERENCIAS

- [Porque os computadores usavam Valvulas, Válvula vs JFET \(FFT\)](#)
- [Diodes Explained, VBE Multiplier](#)
- [Transistor Explained, FUN with Transistors](#)
- [MOSFET Explained, Wikipedia, How JFET Works](#)
- [MOSFET as a Switch, Using Resistors, Gate Driver, \(Playlist\)](#)
- [MOSFET Source Follower, Common Gate Amplifier, Common Source Amplifier](#)
- [20 Principais Componentes](#)
- [Playlist Curso Eletronica Basica](#)
- [Simulacao COMSOL, Simulando com Kicad, ngspice, SliCAP, Introduction to Spice](#)
- [Melhores Simuladores 2025](#)
- [LC Tank, and Oscillations, RF Playlist, Gilbert Cell](#)
- [Crystal Video 1 e Video 2, Crystal e Ceramic](#)
- [Osciladores a Crystal, Ring Oscillator, outro.](#)
- Polarização com Fontes de [Corrente](#), [Indutores](#) e [espelhos de corrente](#), outro vídeo [sobre Current Mirrors](#), memoria [RAM](#)
- [Filtros Ativos, Filtros Analógicos e filtros digitais, Sallen Key Filters](#)
- [Amplificador Diferencial, Classes de Amplificadores](#), Amplificador Diferencial [Parte 1](#), e [Parte 2](#), [Apostila \(OP-AMP, Diferencial\)](#)
- [Historia dos Amplificadores Operacionais](#), [Amplificadores Operacionais e 555](#), [Terra Virtual \(ter fonte negativa\)](#)
- [Zero to Asic 2020, Opensource Analog VLSI design](#)
- [Designing Low Power SMPS with VIPerPlus Family of Products](#)

