Teoria dos Circuitos e Fundamentos de Electrónica

Análise de Circuitos com Amplificadores Operacionais

Teresa Mendes de Almeida
TeresaMAlmeida@ist.utl.pt

INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

DEEC
Área Científica de Electrónica

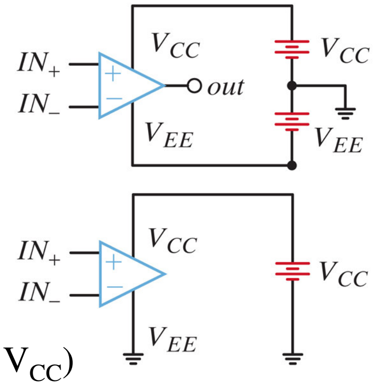
Abril de 2008

Matéria

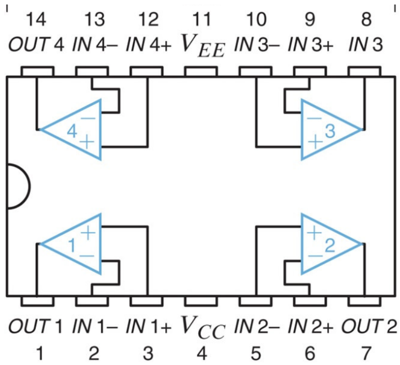
- Amplificador Operacional (Ampop)
  - ampop real
  - características
    - resistência de entrada
    - resistência de saída
    - ganho de tensão
  - modelo interno do ampop
  - característica de transferência
  - zonas de funcionamento
    - linear e de saturação
- Circuito seguidor de tensão
  - análise com modelo interno do ampop
- Ampop ideal
- Circuito seguidor de tensão
  - análise com ampop ideal
- Análise de circuitos com ampops
- Circuitos base com ampops
  - Circuito inversor
  - Circuito não-inversor
- Circuito somador
- Circuito subtractor
- Como analisar outros circuitos com ampops?
- Exemplos de aplicação

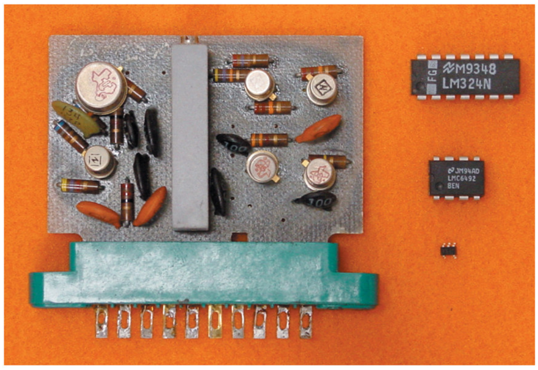
Amplificador Operacional

- **Componente activo**
  - precisa de tensões de alimentação para funcionar
  - 2 terminais de alimentação (V_{CC} e V_{EE})
  - 2 terminais de entrada (v_{IN+} e v_{IN-})
  - 1 terminal de saída (v_{OUT})



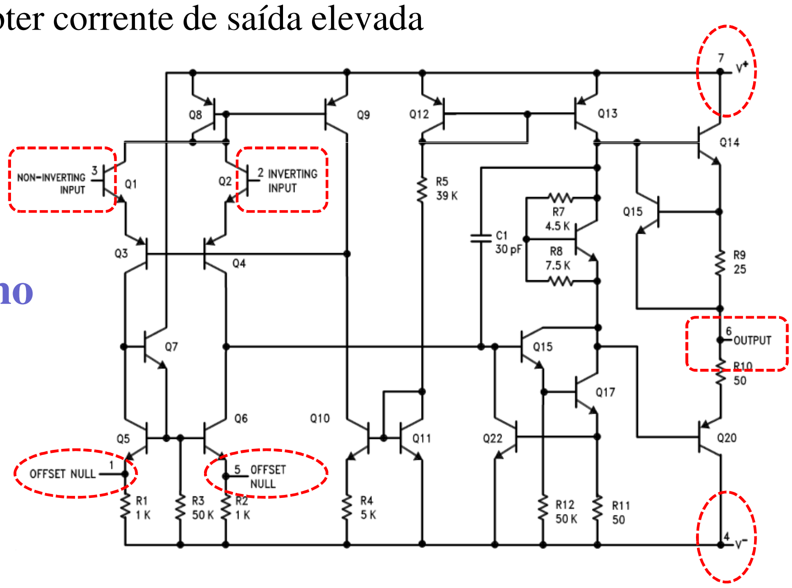
- **Tensão de saída**
  - limitada pelas tensões de alimentação ($V_{EE} < v_{OUT} < V_{CC}$)
- **Permite realizar operações aritméticas**
  - soma
  - subtracção
  - integração
  - logaritmo
  - …





Amplificador Operacional

- **Tipicamente constituído por vários blocos**
  - par diferencial – andar de entrada do amplificador operacional
  - blocos amplificadores – aumentar o ganho de tensão ou corrente
  - blocos compensação – compensar características não-ideais dos transístores
  - andar de saída – para obter corrente de saída elevada
- **Realização**
  - circuito integrado
  - 20-30 transístores
- **Funcionamento interno**
  - análise do circuito é complicada
- **Análise simplificada**
  - modelo interno simples
  - circuito resistivo linear

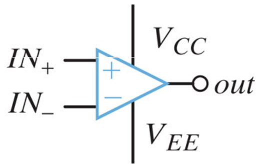


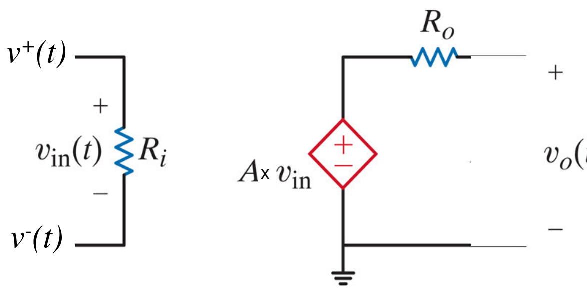
Características do Amplificador Operacional

- **Amplifica a diferença de tensão nas entradas**
  - A – ganho de tensão do amplificador operacional (ampop)
  - valor muito elevado (tipicamente 10^5-10^7)
- **Tem resistência de entrada muito elevada**
  - R_i – resistência de entrada
  - valor elevado (geralmente superior a 1MΩ)
- **Tem resistência de saída muito baixa**
  - R_o – resistência de saída
  - valor baixo (geralmente inferior a 100 Ω)
- **Modelo interno do ampop**
  - modelo simplificado
  - permite analisar circuitos com ampops
  - substitui-se ampop pelo modelo

$$v_O = A\left(v_{IN}^{+} - v_{IN}^{-}\right)$$

$$v_O = A \times v_{IN}$$

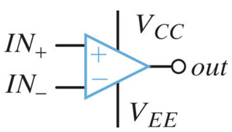


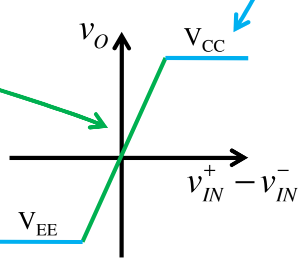


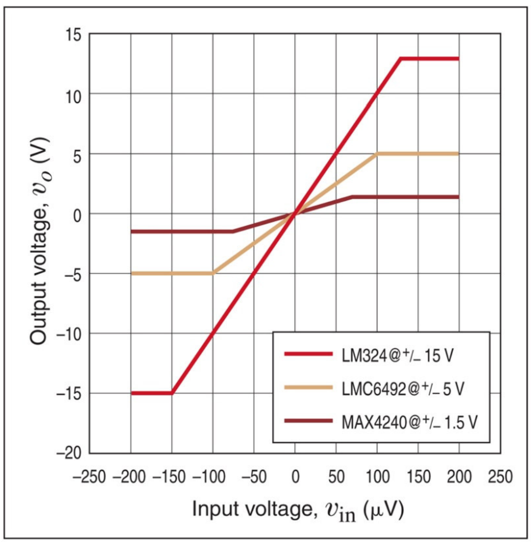
Característica de Transferência

- **Ampop – amplifica a diferença de tensão nas entradas**
- **Tensão de saída limitada pelas tensões de alimentação**
- **Dois modos de funcionamento**
  - zona linear – funcionamento como amplificador
  - zonas de saturação
    - saída limitada pelas tensões de alimentação (+/–)
    - zona de saturação positiva
    - zona de saturação negativa

$$\boxed{v_O = A\left(v_{IN}^{+} - v_{IN}^{-}\right)}$$

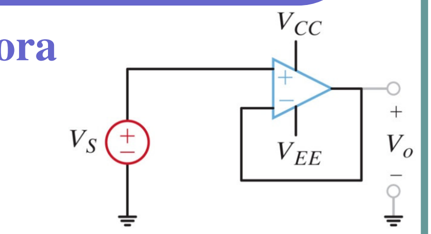




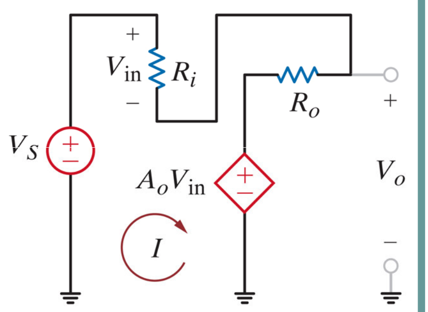


Circuito Seguidor de Tensão

- **Ampop com saída ligada à entrada inversora**
  - realimentação negativa
    - saída ligada à entrada inversora do ampop



- **Qual a relação entre Vo e Vs?**
  - substitui-se ampop pelo modelo interno
  - analisa-se o circuito
  - KVL $\quad R_i >> R_o \quad\quad A >> 1$



$$-V_S + R_i I + R_o I + AV_{in} = 0$$

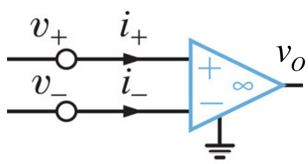
$$V_O = R_o I + AV_{in}$$

$$\begin{matrix} R_i >> R_o \\ R_o \ pequena \end{matrix} \rightarrow V_O \approx AV_{in} \rightarrow -V_S + \underbrace{R_i I}_{V_{in}=\frac{V_O}{A}} + V_O = 0 \rightarrow$$

$$-V_S + \frac{V_O}{A} + V_O = 0 \rightarrow V_O = \frac{A}{1+A} V_S \qquad A >> 1 \rightarrow V_O = V_S$$

Amplificador Operacional Ideal

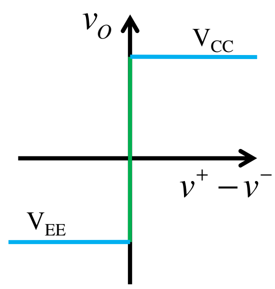
- **Resistência de entrada infinita** $\quad R_i = +\infty \Rightarrow i_+ = i_- = 0$
  - correntes de entrada são nulas
- **Resistência de saída é nula** $\quad R_o = 0$
  - tensão de saída não depende da carga (R_L) ligada na saída
- **Ganho de tensão é infinito** $\quad A = +\infty$



- **Se ampop está na zona linear ($V_{EE} < v_O < V_{CC}$)**

$$v_O = A(v_+ - v_-) \rightarrow v_+ - v_- = \frac{v_O}{A} \qquad \begin{cases} A \rightarrow +\infty \\ v_O \ finito \end{cases} \Rightarrow v_+ = v_-$$

  - curto-circuito virtual nas entradas do ampop ($v_+ = v_-$)



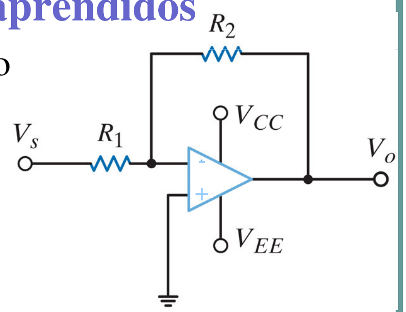
- **Se ampop estiver saturado ($v_+ \neq v_-$)**
  - saturação positiva $\quad v_+ > v_- \rightarrow v_O = V_{SAT+} = V_{CC}$
  - saturação negativa $\quad v_+ < v_- \rightarrow v_O = V_{SAT-} = V_{EE}$

Análise de circuitos com Ampops

- **Considera-se ampop ideal e admite-se que não está saturado**

$$\begin{aligned} R_i &= +\infty \\ R_o &= 0 \\ A &= +\infty \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} i^+ &= i^- = 0 \\ v^+ &= v^- \end{aligned}$$

- **Faz-se análise do circuito usando métodos aprendidos**
  - de acordo com os restantes componentes do circuito
    - circuitos resistivos lineares
    - circuitos reactivos
    - circuitos em regime forçado sinusoidal
    - …

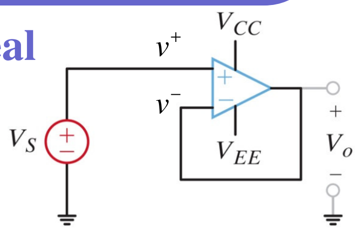


- **Método que geralmente se pode considerar na análise**
  - escrever equações KCL para os nós de entrada do ampop e para outros nós do circuito. Não escrever KCL para nó de saída do ampop (não se sabe I_o!)!

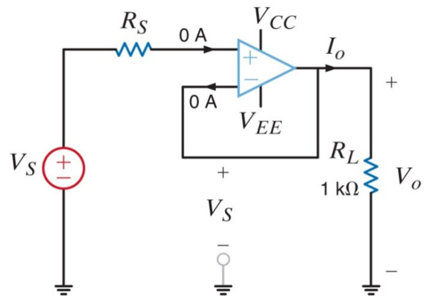
Circuito Seguidor de Tensão

- **Análise do circuito considerando ampop ideal**
- **Ampop ideal**

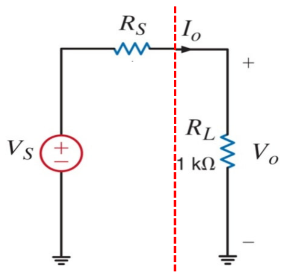
$$i^+ = i^- = 0 \qquad v_+ = V_S$$
$$v^+ = v^- \qquad V_O = v_-$$
$$\boxed{V_O = V_S}$$



- **Aplicação do seguidor de tensão**
  - circuito isolador (buffer)
  - $V_O = V_S$
    - qualquer que seja a carga R_L
    - qualquer que seja R_S



- **Se não se usasse o isolador…**
  - $V_O << V_S$
  - tensão de saída seria sempre menor do que a de entrada (divisor de tensão)

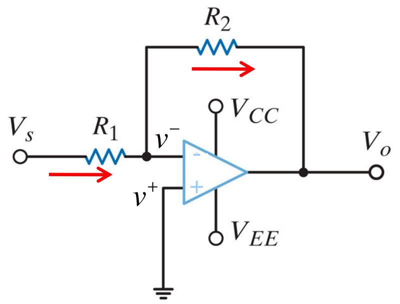


$$V_O = \frac{R_L}{R_L + R_S} V_S$$

Circuito Inversor

- **Analisar o circuito considerando ampop ideal (não saturado!)**
- **Ampop ideal** $i^+ = i^- = 0$

  $v^+ = v^-$



- **Resulta então**

$v_+ = 0V \quad \rightarrow \quad v_+ = v_- = 0V$

$i_+ = i_- = 0 \quad \rightarrow \quad i_1 = i_2$

$$i_1 = \frac{V_S - 0}{R_1} \qquad i_2 = \frac{0 - V_O}{R_2} \quad \rightarrow \quad \frac{V_S}{R_1} = \frac{-V_O}{R_2} \quad \rightarrow \quad \frac{V_O}{V_S} = -\frac{R_2}{R_1}$$

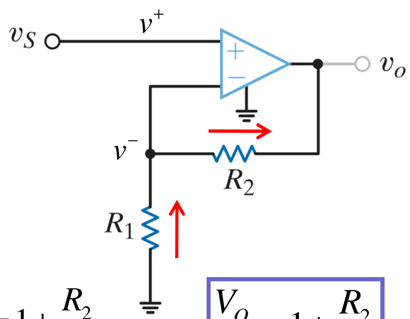
$$\boxed{\frac{V_O}{V_S} = -\frac{R_2}{R_1}}$$

- **Porque se chama inversor?**
  - graficamente, a forma de onda da tensão de saída aparece invertida relativamente à forma de onda da tensão de entrada
- **Exemplo** $R_2 = 2R_1 \qquad v_S(t) = 1 - 0{,}5\cos(\omega t)\, V \qquad v_O(t) = -2 + \cos(\omega t)\, V$
  - Como seria $v_o(t)$ se $R_2=4R_1$ e $V_{CC}=-V_{EE}=5V$?
  - O ampop ficaria sempre na zona linear, ou saturava durante parte do tempo?

Circuito Não-Inversor

- **Analisar o circuito considerando ampop ideal (não saturado!)**
- **Ampop ideal** $i^+ = i^- = 0$

  $v^+ = v^-$



- **Resulta então**

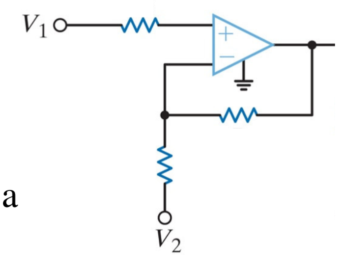
$v_+ = V_S \quad \rightarrow \quad v_- = v_+ = V_S$

$i_+ = i_- = 0 \quad \rightarrow \quad i_1 = i_2$

$$i_1 = \frac{0 - V_S}{R_1} \qquad i_2 = \frac{V_S - V_O}{R_2} \quad \rightarrow \quad -\frac{V_S}{R_1} = \frac{V_S - V_O}{R_2} \quad \rightarrow \quad \frac{V_O}{V_S} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

$$\boxed{\frac{V_O}{V_S} = 1 + \frac{R_2}{R_1}}$$

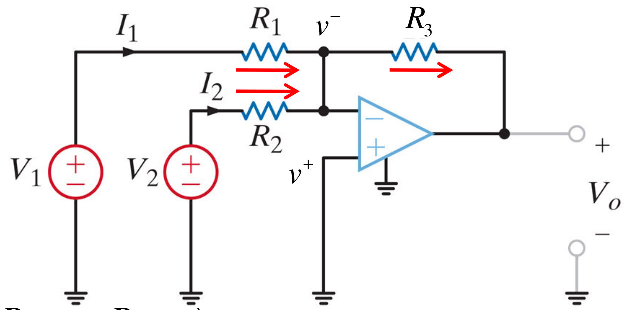
- **Comparação com circuito inversor**
  - agora tem-se sempre $|V_O/V_S| \geq 1$
  - no circuito inversor pode ter-se
    - $|V_O/V_S|<1$, $|V_O/V_S|=1$, ou $|V_O/V_S|>1$
  - embora pareça diferente, o circuito é o mesmo
    - apenas se trocou a entrada onde se aplica o sinal e a entrada que está ligada à massa



Circuito Somador

- **Analisar o circuito considerando ampop ideal (não saturado!)**
- **Ampop ideal** $i^+ = i^- = 0$

  $v^+ = v^-$



- **Resulta então**

$$v_+ = 0V \quad \rightarrow \quad v_+ = v_- = 0V$$

$$i_+ = i_- = 0 \quad \rightarrow \quad i_1 + i_2 = i_3$$

$$\frac{V_1 - 0}{R_1} + \frac{V_2 - 0}{R_2} = \frac{0 - V_O}{R_3} \quad \rightarrow \quad V_O = -\left(\frac{R_3}{R_1}V_1 + \frac{R_3}{R_2}V_2\right)$$

$$R_1 = R_2 = R_3 \quad \rightarrow \quad V_O = -(V_1 + V_2)$$

- **Escolhendo relações entre as Rs pode obter-se: - ($\alpha V_1 + \beta V_2$)**
- **Análise usando o teorema da sobreposição**
  - 2 sub-circuitos: analisar 2 circuitos inversores (que já são conhecidos…)

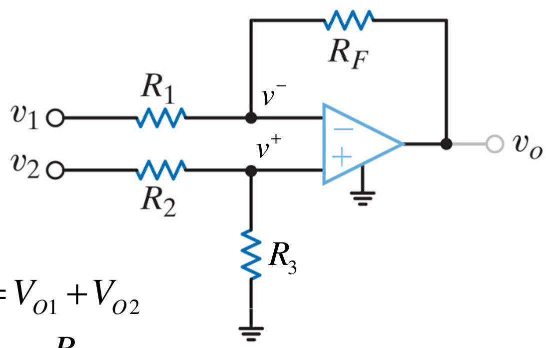
$$V_O = V_{O1} + V_{O2} = \left(-\frac{R_3}{R_1}V_1\right) + \left(-\frac{R_3}{R_2}V_2\right) = -\left(\frac{R_3}{R_1}V_1 + \frac{R_3}{R_2}V_2\right)$$

Circuito Subtractor

- **Analisar o circuito considerando ampop ideal (não saturado!)**
- **Ampop ideal**

  $i^+ = i^- = 0$

  $v^+ = v^-$



- **Usar o teorema da sobreposição**
  - 2 sub-circuitos
    - circuito inversor
      - $\rightarrow V_{O1}$
    - circuito não inversor
      - $\rightarrow V_{O2}$

$$V_O = V_{O1} + V_{O2}$$

$$V_{O1} = -\frac{R_F}{R_1}V_1$$

$$V_{O2} = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right)v_+ = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right)\left(\frac{R_3}{R_2 + R_3}V_2\right)$$

- **Escolhendo relações entre Rs pode obter-se:**

  $(1+\alpha)\beta V_2 - \alpha V_1$

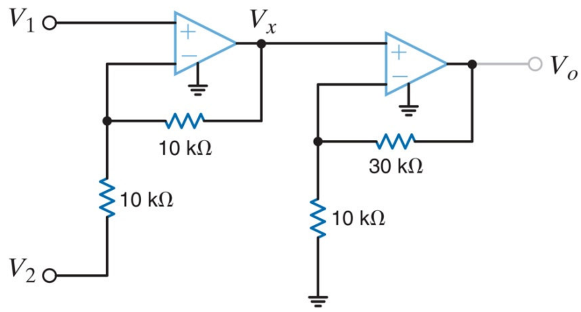
$$V_O = -\frac{R_F}{R_1}V_1 + \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right)\frac{R_3}{R_2 + R_3}V_2$$

$$R_F = R_1 \quad R_2 = R_3 \quad \rightarrow \quad V_O = V_2 - V_1$$

Como analisar outros circuitos?

- **Analisar o circuito considerando ampop ideal (não saturado!)**
- **Ampop ideal** $i^+ = i^- = 0$

  $v^+ = v^-$
- **Sempre que possível identificar os 2 dois circuitos básicos e usar as relações já conhecidas**
  - circuito inversor e circuito não-inversor
- **Exemplo**



$$V_O = \left(1 + \frac{30k}{10k}\right) V_x = 4V_x$$

$$V_x = V_{x1} + V_{x2}$$

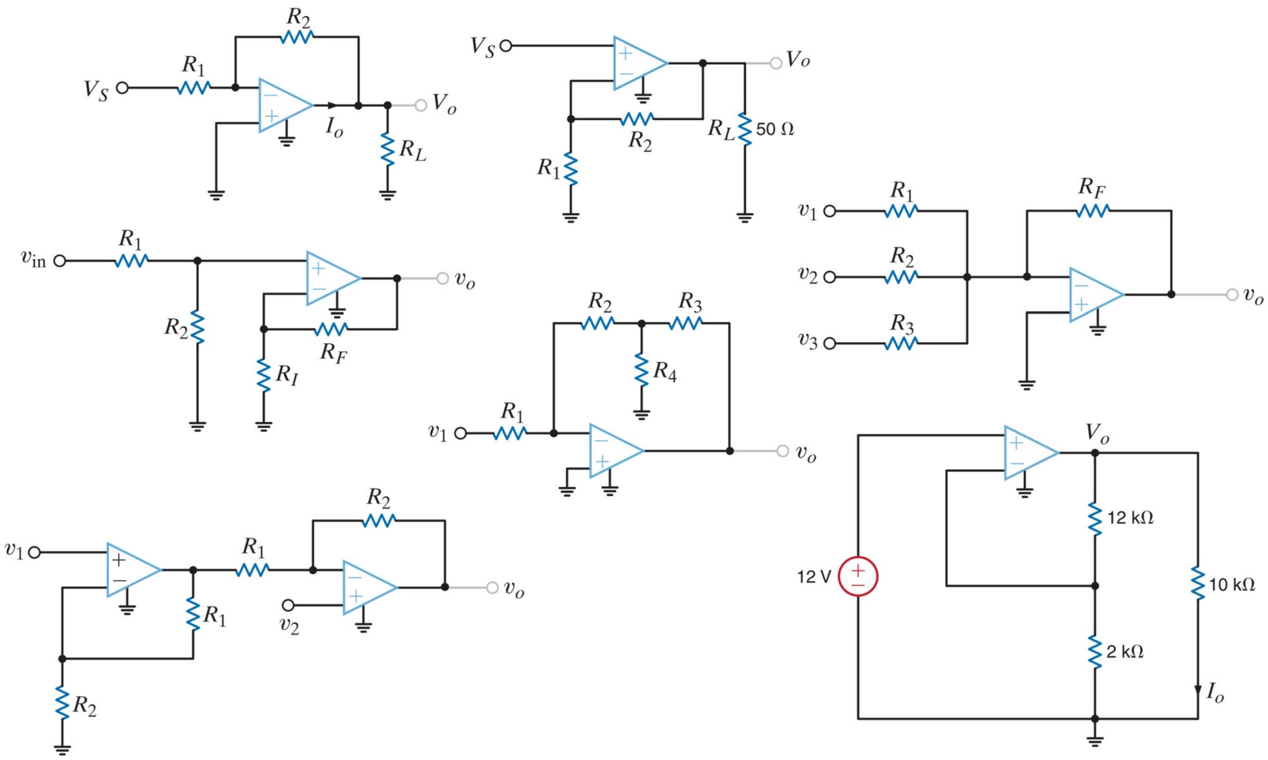
$$V_{x1} = \left(1 + \frac{10k}{10k}\right) V_1 = 2V_1$$

$$V_{x2} = -\frac{10k}{10k} V_2 = -V_2$$

$$V_O = 4\left(V_{x1} + V_{x2}\right) = 8V_1 - 4V_2$$

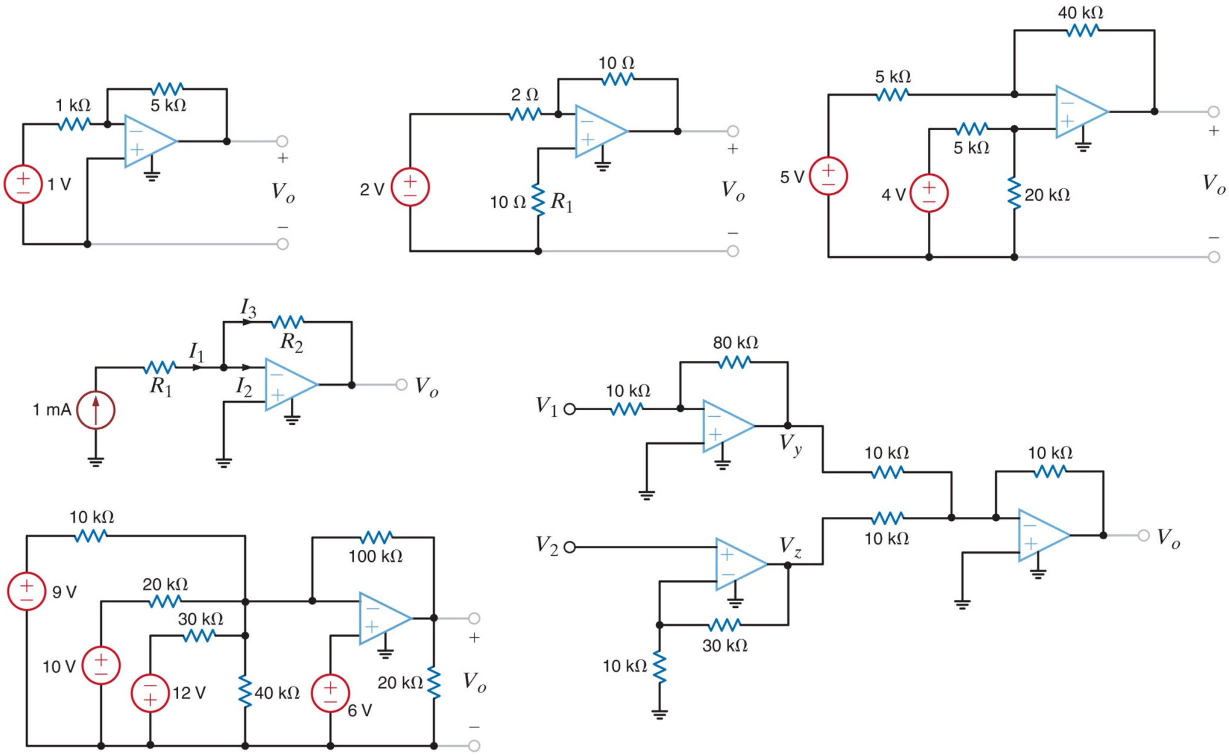
Exemplos de aplicação

- **Determinar Vo em função das entradas**



Exemplos de aplicação

- **Calcular Vo**



Exemplos de aplicação

- **E se o circuito tiver condensadores e/ou bobines e o sinal de entrada for sinusoidal?**
  - fazer cálculos com amplitudes complexas e impedâncias
- **Determinar Vo/Vs**