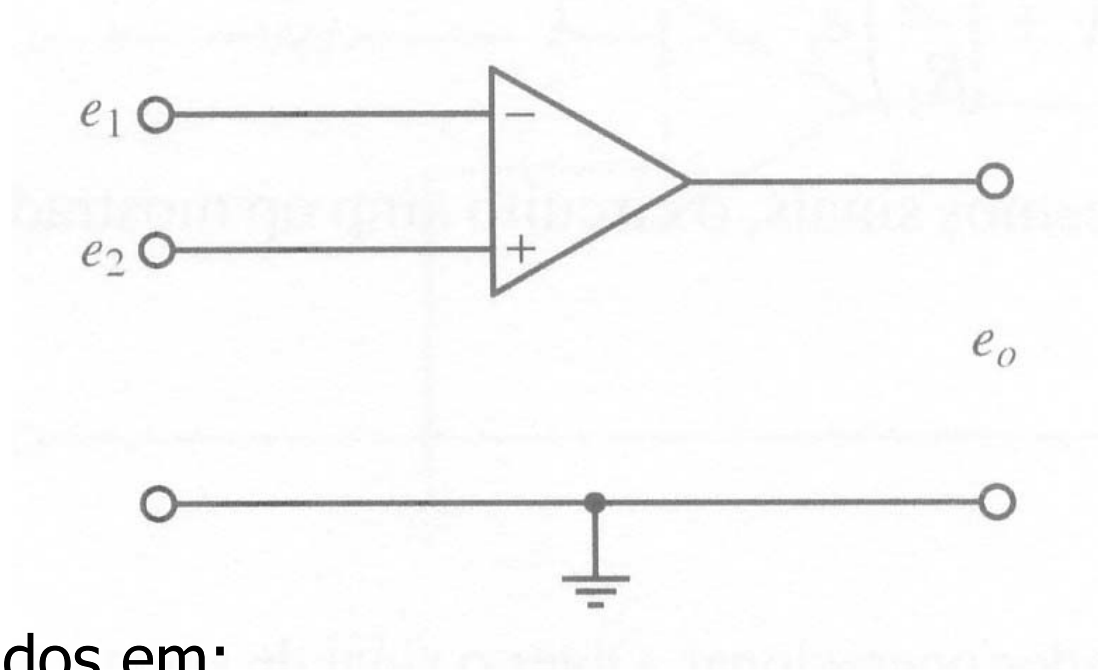
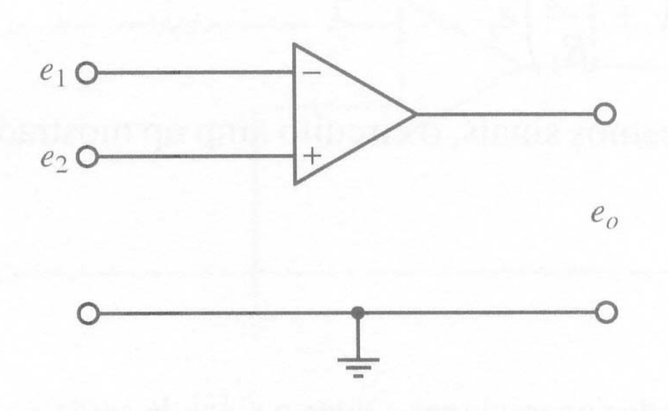
CONTROLADORES ELETRÔNICOS

Amplificadores Operacionais



Aplicados em:
- Amplificadores
- Filtros

É prática comum escolher o ponto de terra como sendo 0 Volt e medir as tensões de entrada e_1 e e_2 em relação a este ponto



- O sinal de entrada e_1 (terminal negativo) é invertido
- O sinal de entrada e_2 (terminal positivo) não é invertido

$$e_0 = K\left(e_2 - e_1\right) = -K\left(e_1 - e_2\right)$$

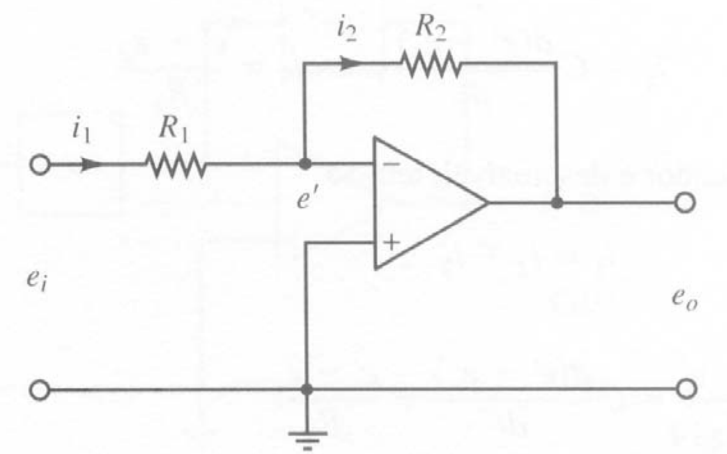
- e_1 e e_2 podem ser sinais CC ou CA
- K é o ganho do amplificador

- A magnitude de *K* é de aproximadamente $10^5 \sim 10^6$ para sinais CC e CA com freqüências menores que 10 Hz
- O ganho diferencial *K* diminui com a freqüência e torna-se próximo da unidade para freqüências de 1 MHz ~ 50 MHz
- Como *K* é muito alto, é necessário uma realimentação negativa da saída para a entrada a fim de tornar o amplificador estável

- Amplificador Operacional Ideal
  - Não flui corrente através dos terminais de entrada
    - Impedância de entrada é infinita
  - A tensão de saída não é afetada pela carga conectada ao terminal de saída
    - Impedância de saída é nula
- Amplificador Operacional Real
  - Uma corrente muito pequena (quase desprezível) flui para um terminal de entrada
  - A saída não pode ser carregada demasiadamente

Amplificador inversor

$$i_1 = \frac{e_i - e'}{R_1} \qquad i_2 = \frac{e' - e_o}{R_2}$$



$$i_1 \approx i_2$$

$$\frac{e_i - e'}{R_1} = \frac{e' - e_o}{R_2}$$

$$e' \cong 0$$

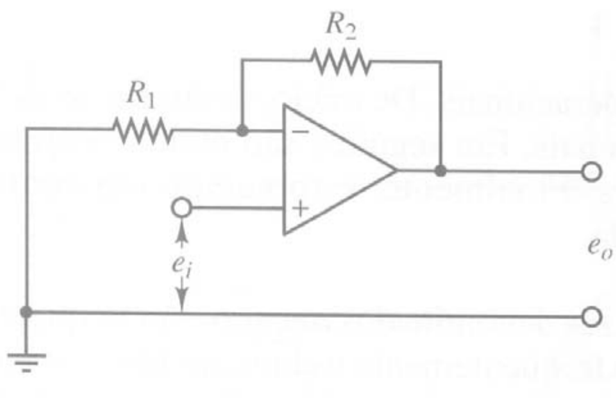
Não flui corrente através dos terminais de entrada

$$\frac{e_i}{R_1} = \frac{-e_o}{R_2}$$

$$e_o = -\frac{R_2}{R_1} e_i$$

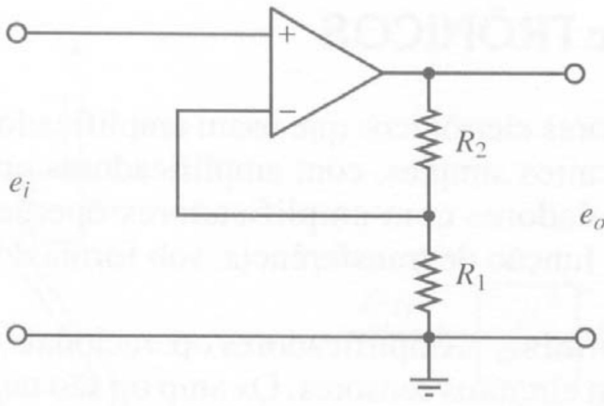
O circuito é um amplificador com inversão de sinal

Amplificador não-inversor



(a)

$$\equiv$$



(b)

$$e_o = i\left(R_1 + R_2\right)$$

$$e_1 = iR_1$$

$$e_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} e_o$$

$$e_o = K\left(e_i - e_1\right)$$

$$e_o = K\left(e_i - \frac{R_1}{R_1 + R_2} e_o\right)$$

$$e_o = K\left(e_i - \frac{R_1}{R_1 + R_2} e_o\right)$$

$$e_i = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} + \frac{1}{K}\right) e_o$$

Como $K >> 1$, e se $\dfrac{R_1}{R_1 + R_2} >> \dfrac{1}{K}$

$$e_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) e_i$$

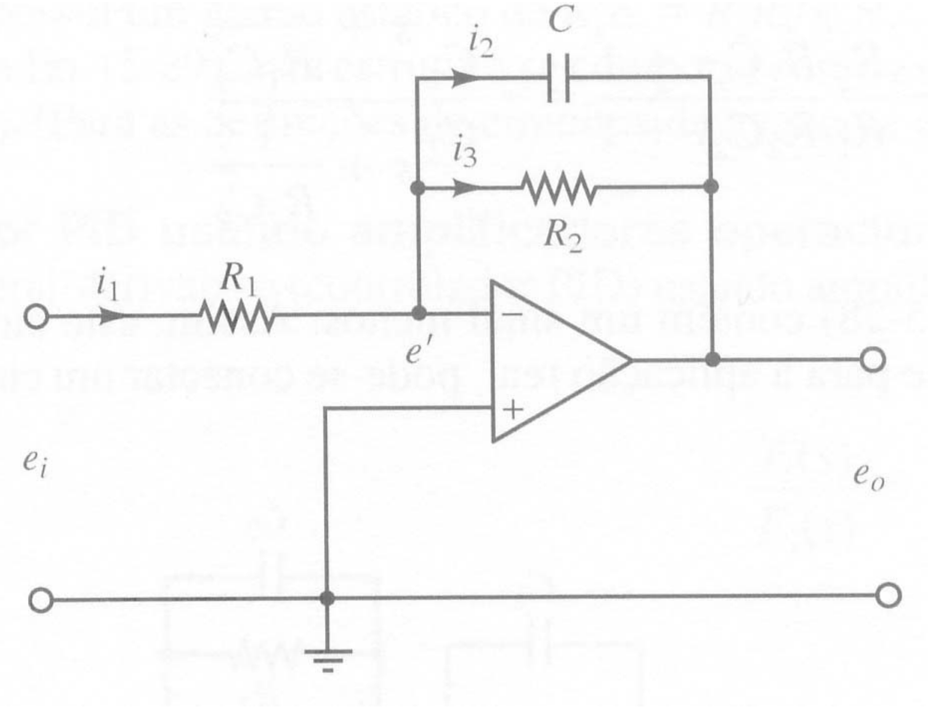
O circuito é um amplificador não inversor

Exemplo – obter a função de transferência

$$i_1 = \frac{e_i - e'}{R_1}$$

$$i_2 = C\frac{d(e' - e_o)}{dt}$$

$$i_3 = \frac{e' - e_o}{R_2}$$



Observando que a corrente que flui para o amplificador é desprezível

$$i_1 = i_2 + i_3$$

$$\frac{e_i - e^{'}}{R_1} = C\frac{d\left(e^{'} - e_o\right)}{dt} + \frac{e^{'} - e_o}{R_2}$$

Como $e^{'} \cong 0$

$$\frac{e_i}{R_1} = -C\frac{de_o}{dt} - \frac{e_o}{R_2}$$

Aplicando a transformada de Laplace

$$\frac{E_i(s)}{R_1} = -\frac{R_2Cs + 1}{R_2}E_o(s)$$

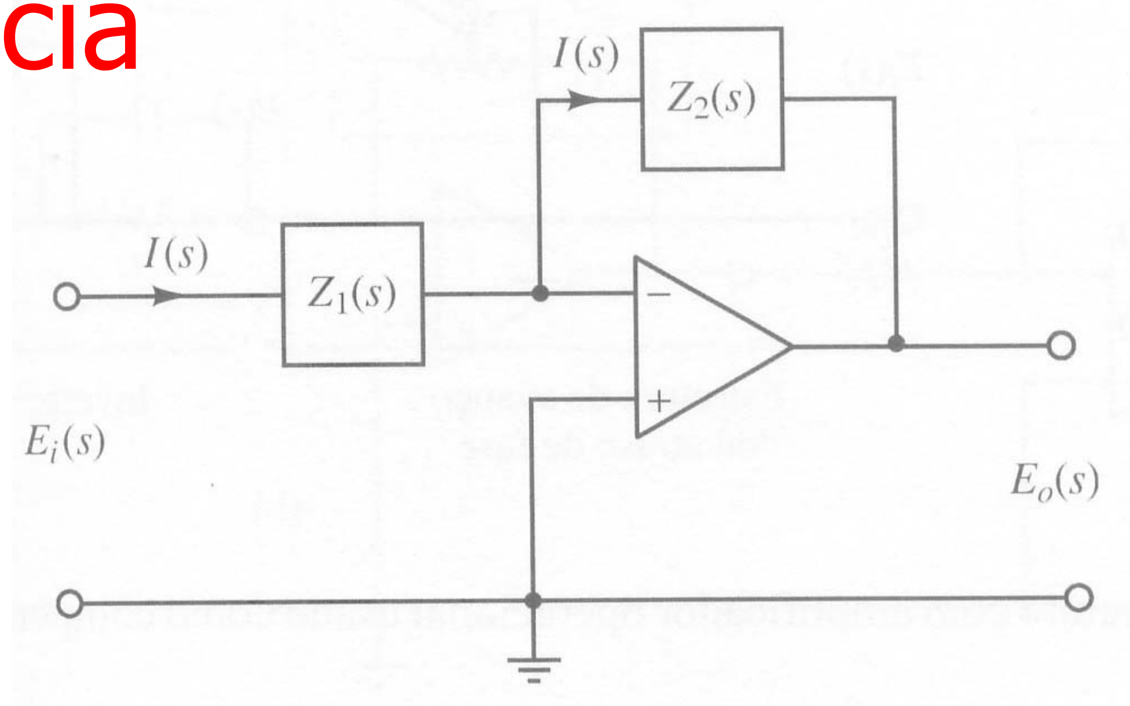
$$\frac{E_o(s)}{E_i(s)} = -\frac{R_2}{R_1}\frac{1}{R_2Cs + 1}$$

Método das impedâncias para obtenção das funções de transferência

$$E_i(s) = Z_1(s)I(s)$$

$$E_o(s) = -Z_2(s)I(s)$$

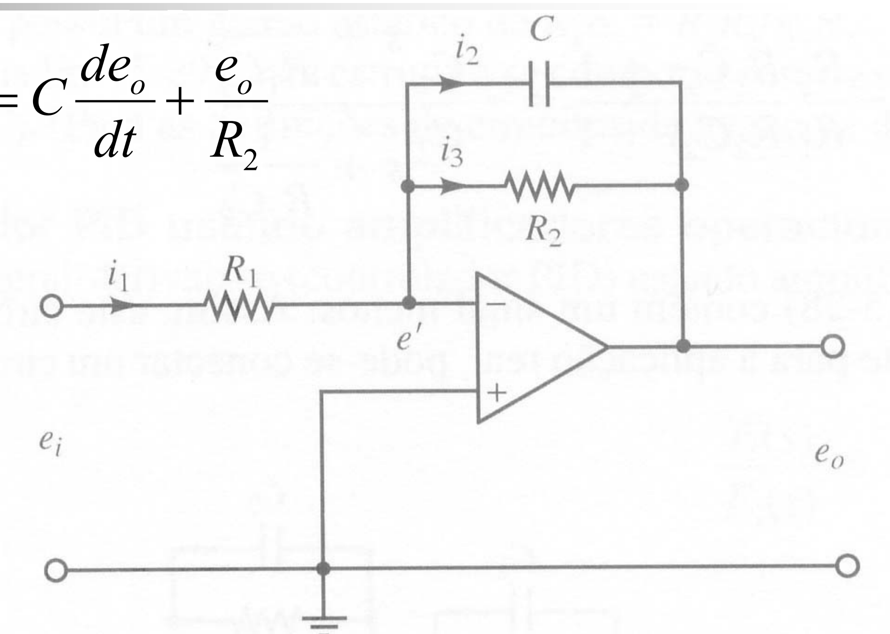
$$\frac{E_o(s)}{E_i(s)} = -\frac{Z_2(s)}{Z_1(s)}$$



Exemplo – obter a função de transferência

As impedâncias são:

$$\frac{e_o}{Z_2} = C\frac{de_o}{dt} + \frac{e_o}{R_2}$$



$$Z_1(s) = R_1$$

$$Z_2(s) = \frac{1}{Cs + \frac{1}{R_2}} = \frac{R_2}{R_2Cs+1}$$

Logo

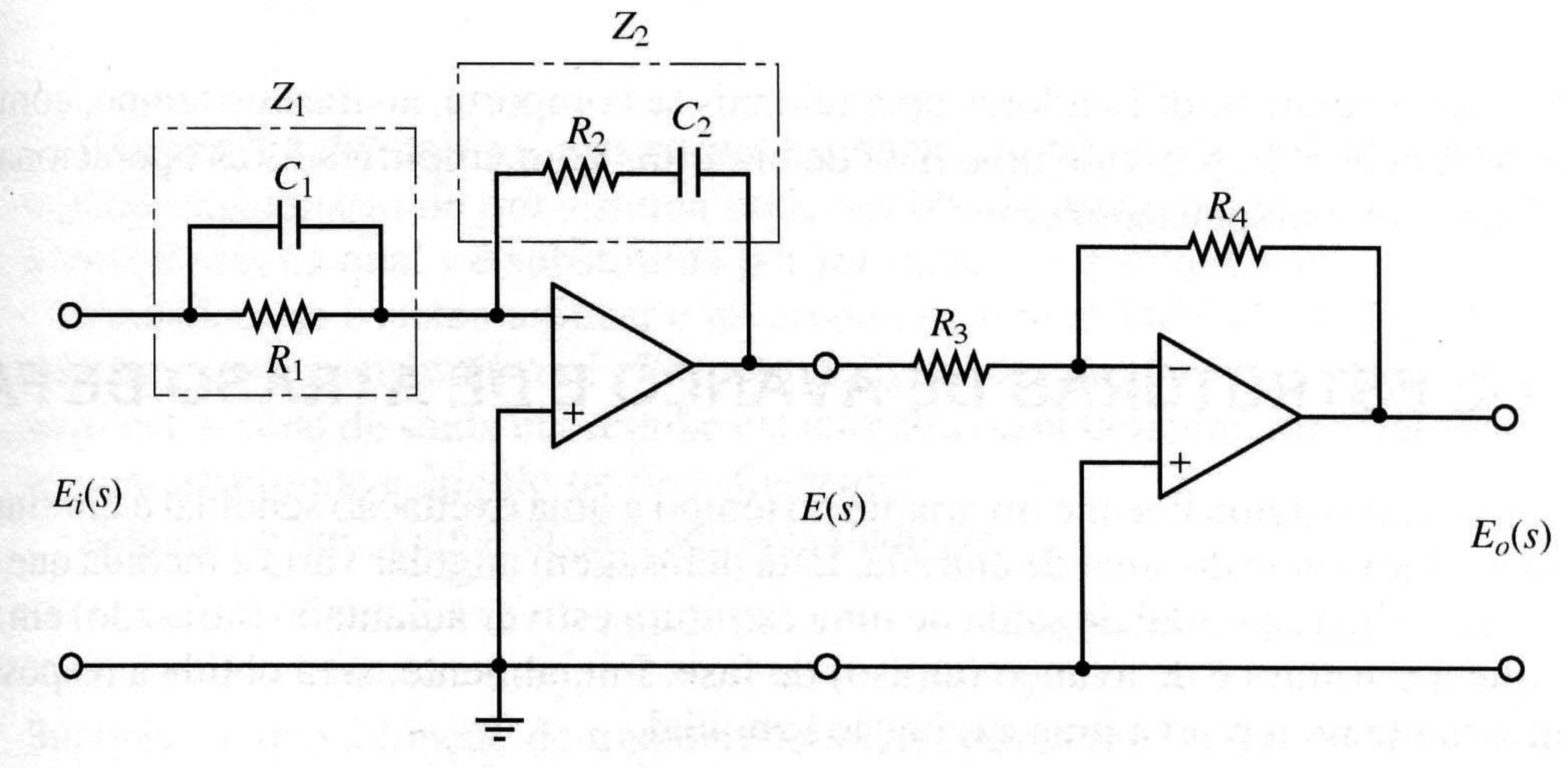
$$E_i(s) = R_1 I(s)$$

$$E_o(s) = -\frac{R_2}{R_2Cs+1}I(s)$$

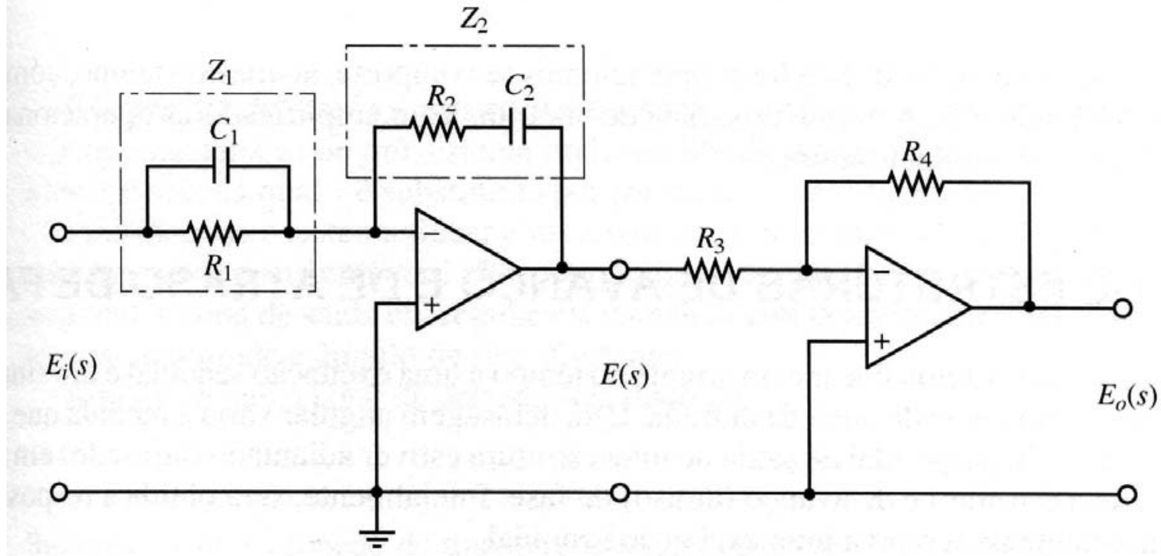
Função de transferência

$$\frac{E_o(s)}{E_i(s)} = -\frac{R_2}{R_1}\frac{1}{R_2Cs+1}$$

Controlador PID usando amplificadores operacionais



$$\frac{E(s)}{E_i(s)} = -\frac{Z_2}{Z_1}$$



Onde:

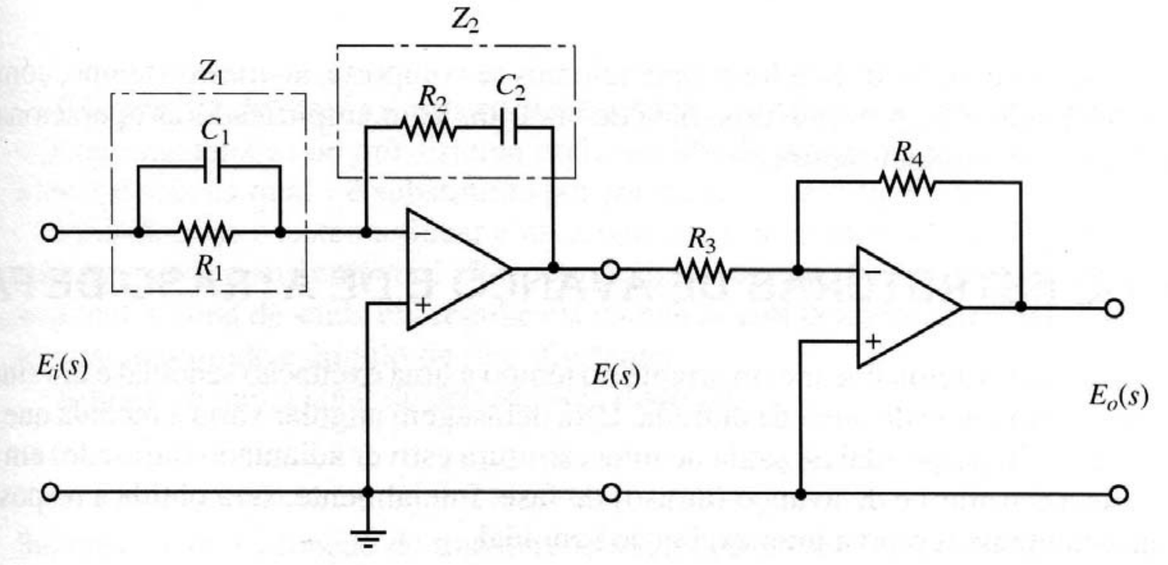
$$Z_1 = \frac{R_1}{R_1 C_1 s + 1} \qquad Z_2 = \frac{R_2 C_2 s + 1}{C_2 s}$$

Assim:

$$\frac{E(s)}{E_i(s)} = -\left(\frac{R_2 C_2 s + 1}{C_2 s}\right)\left(\frac{R_1 C_1 s + 1}{R_1}\right)$$

Levando em conta que:

$$\frac{E_o(s)}{E(s)} = -\frac{R_4}{R_3}$$



Tem-se:

$$\frac{E_o(s)}{E_i(s)} = \frac{E_o(s)}{E(s)}\frac{E(s)}{E_i(s)} = \frac{R_4R_2}{R_3R_1}\frac{(R_1C_1s+1)(R_2C_2s+1)}{R_2C_2s}$$

$$= \frac{R_4R_2}{R_3R_1}\left(\frac{R_1C_1+R_2C_2}{R_2C_2} + \frac{1}{R_2C_2s} + R_1C_1s\right)$$

$$= \frac{R_4(R_1C_1+R_2C_2)}{R_3R_1C_2}\left(1 + \frac{1}{(R_1C_1+R_2C_2)s} + \frac{R_1C_1R_2C_2}{R_1C_1+R_2C_2}s\right)$$

$$\frac{E_o(s)}{E_i(s)} = \frac{R_4\left(R_1C_1 + R_2C_2\right)}{R_3R_1C_2}\left(1 + \frac{1}{\left(R_1C_1 + R_2C_2\right)s} + \frac{R_1C_1R_2C_2}{R_1C_1 + R_2C_2}s\right)$$

Lembrando que:

$$u(t) = K_pe(t) + \frac{K_p}{T_i}\int_0^t e(t)dt + K_pT_d\frac{de(t)}{dt}$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p\left(1 + \frac{1}{T_is} + T_ds\right)$$

Temos:

$$K_p = \frac{R_4\left(R_1C_1 + R_2C_2\right)}{R_3R_1C_2}$$

$$T_i = R_1C_1 + R_2C_2$$

$$T_d = \frac{R_1C_1R_2C_2}{R_1C_1 + R_2C_2}$$

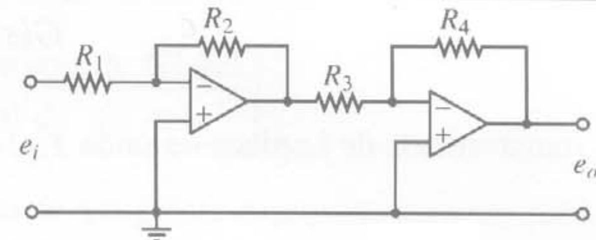
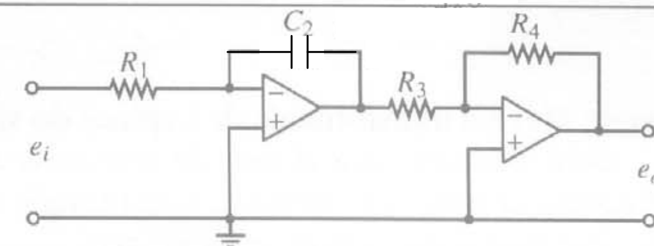
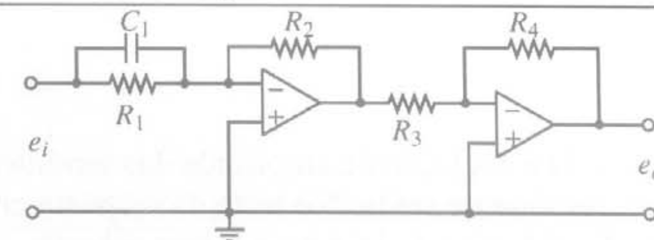
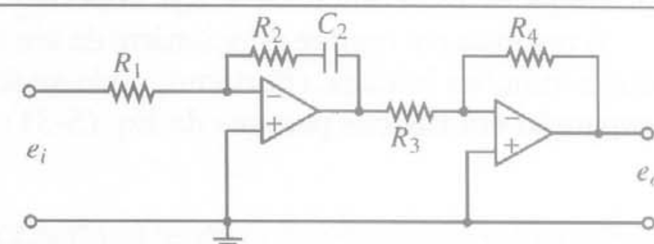
Em termos de ganho proporcional, ganho integral e ganho derivativo tem-se

$$K_p = \frac{R_4\left(R_1C_1 + R_2C_2\right)}{R_3R_1C_2}$$

$$K_i = \frac{R_4}{R_3R_1C_2}$$

$$K_d = \frac{R_4R_2C_1}{R_3}$$

Principais ações de controle com controladores eletrônicos empregando amplificadores operacionais

	Ação de controle	$G(s) = \dfrac{E_o(s)}{E_i(s)}$	Circuitos com amplificadores operacionais
1	P	$\dfrac{R_4}{R_3}\,\dfrac{R_2}{R_1}$	
2	I	$\dfrac{R_4}{R_3}\,\dfrac{1}{R_1C_2s}$	
3	PD	$\dfrac{R_4}{R_3}\,\dfrac{R_2}{R_1}\,(R_1C_1s+1)$	
4	PI	$\dfrac{R_4}{R_3}\,\dfrac{R_2}{R_1}\,\dfrac{R_2C_2s+1}{R_2C_2s}$	
5	PID	$\dfrac{R_4}{R_3}\,\dfrac{R_2}{R_1}\,\dfrac{(R_1C_1s+1)\,(R_2C_2s+1)}{R_2C_2s}$