

# Elettronica analogica 5

## Quadro riassuntivo dei circuiti

### 1. Amplificatore operazionale ideale

- > Simbolo e nomenclatura
- > Proprietà elettriche
  - Caratteristica di trasferimento
  - Resistenza di ingresso infinita
  - Resistenza di uscita zero
  - Banda passante infinita
- > Limiti di funzionamento
  - Limite sulla tensione di uscita
  - Limite sulla corrente di uscita

### 2. Le applicazioni lineari dell'A.O.

- > Amplificatore
  - Invertente
  - Non invertente
- > Amplificatore differenziale
  - Standard
  - Per strumentazione
- > Traslatore di tensione
  - Diretto
  - Inverso
- > Sommatore
  - Invertente
  - Non invertente
- > Derivatore
  - Standard
  - Limitato
- > Integratore
  - Standard
  - Limitato

### 3. Comparatori

- > Comparatori senza isteresi
  - Non invertente
  - Invertente
- > Comparatori con isteresi
  - Non invertente
  - Invertente
- > Circuiti di controllo della tensione di uscita
  - Diodo Raddrizzatore
  - Diodo Zener
  - Due diodi Zener
  - Traslatore di tensione in modalità diretta
  - Traslatore di tensione in modalità inversa

### 4. Generatori di forme d'onda

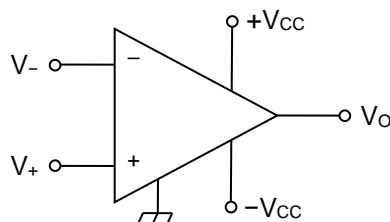
- > Generatori di onda quadra (MV astabili)
  - Realizzazione con AO – circuito base  
( $T$  fisso,  $dc$  fisso = 0,5)
  - Realizzazione con AO – variante 1  
( $T$  fisso,  $dc$  fisso qualsiasi)
  - Realizzazione con AO – variante 2  
( $T$  regolabile,  $dc$  regolabile)
  - Realizzazione con NE555 – circuito base  
( $T$  fisso,  $dc$  fisso > 0,5)
  - Realizzazione con NE555 – variante 1  
( $T$  fisso,  $dc$  qualsiasi)
- > Generatori di impulso (MV monostabili)
  - Realizzazione con AO – circuito base  
( $T_0$  fisso)
  - Realizzazione con AO – variante 1  
( $T_0$  regolabile)
  - Realizzazione con NE555 – circuito base  
( $T_0$  fisso)
  - Realizzazione con NE555 – variante 1  
( $T_0$  regolabile)
- > Generatori di onda triangolare
  - Realizzazione con AO – versione base  
( $T$  fisso,  $dc$  fisso = 0,5)
  - Realizzazione con AO – variante 1  
( $T$  fisso,  $dc$  fisso qualsiasi)
  - Realizzazione con AO – variante 2  
( $T$  regolabile,  $dc$  regolabile)
- > Generatori di onda sinusoidale (oscillatori)
  - Rete di sfasamento
  - Ponte di Wien

### 5. Convertitori

- > Convertitori corrente→tensione
  - Senza offset (invertente)
  - Con offset (invertente)
- > Convertitori tensione→corrente
  - Senza riferimento a massa (non invertente)
  - Con riferimento a massa (non invertente)
- > Convertitori tensione→frequenza
- > Convertitori frequenza →tensione
- > Convertitori digitale→analogico (DAC)
  - Resistori pesati (inv. e non inv.)
  - Rete R-2R (inv. e non inv.)
- > Convertitori analogico→digitale (ADC)
  - Flash
  - Doppia rampa

# • 1 • Amplificatore operazionale ideale

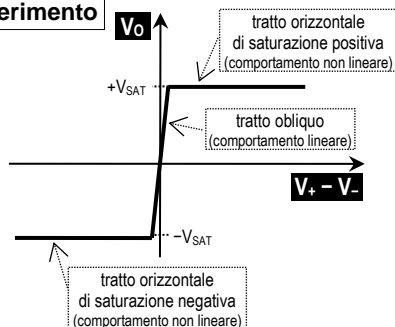
## Simbolo e nomenclatura



$V_-$  ..... Tensione applicata all'ingresso invertente  
 $V_+$  ..... Tensione applicata all'ingresso non invertente  
 $V_O$  ..... Tensione fornita dall'uscita  
 $+V_{CC}$  ..... Alimentazione positiva  
 $-V_{CC}$  ..... Alimentazione negativa

## Proprietà elettriche

### Caratteristica di trasferimento



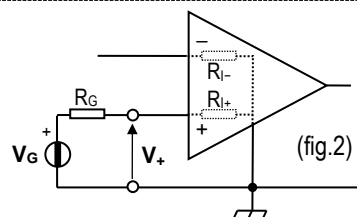
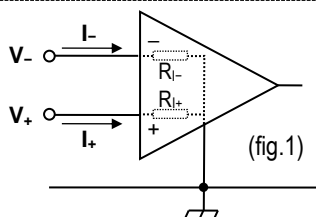
- Nel tratto obliquo (comportamento lineare)  
 $V_O = A \cdot (V_+ - V_-)$  con  $A \rightarrow \infty$   
 Da ciò segue che:  
 nel funzionamento lineare si ha  $V_- = V_+$  (massa virtuale)
- Nei due tratti orizzontali (comportamento non lineare)  
 $|V_O| = \pm V_{SAT}$  con  $V_{SAT} = 80\div 90\%$  di  $V_{CC}$  (indicato sui data-sheet)

### Resistenza di ingresso infinita

Si ha:  $R_{i-} \rightarrow \infty$  e  $R_{i+} \rightarrow \infty$ .

Da ciò segue che:

- $I_- = 0$ ,  $I_+ = 0$  indipendentemente da  $V_+$  e  $V_-$  (fig.1)
- $V_- = V_+$  indipendentemente da  $V_G$  (fig.2)  
 (lo stesso accade per  $V_-$ )

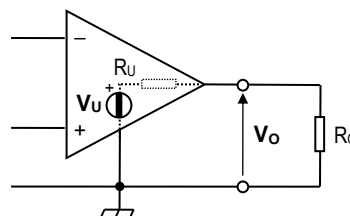


### Resistenza di uscita zero

Si ha:  $R_U = 0$ .

Da ciò segue che:

- $V_O = V_U$  indipendentemente da  $R_C$



### Banda passante infinita

Si ha: banda passante dell'AO  $\rightarrow \infty$ .

Da ciò segue che:

- La risposta ai segnali sinusoidali è priva di effetti reattivi, quindi è sempre la stessa indipendentemente dalla frequenza.

## Limiti di funzionamento

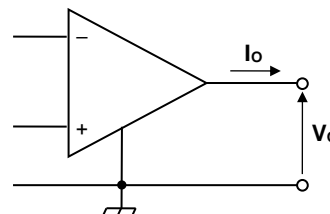
### Limite sulla tensione di uscita

- Nel tratto obliquo (comportamento lineare)  
 $|V_O| < V_{SAT}$
- Nei due tratti orizzontali (comportamento non lineare)  
 $|V_O| = V_{SAT}$

### Limite sulla corrente di uscita

La corrente di uscita  $I_O$  di un AO può essere sia positiva che negativa. Il suo modulo deve essere sempre minore di un valore massimo indicato nei data-sheet. In formule:

$$|I_O| < I_{O\_MAX} \quad (\text{dove } I_{O\_MAX} \text{ è indicato nei data-sheet}).$$



## • 2 • Le applicazioni lineari dell'AO

### Amplificatore

Invertente	Non invertente
<p>Relazione ingresso-uscita</p> $V_o = -\frac{R_f}{R} \cdot V$ <p>Corretto funzionamento</p> $ V_o  < V_{SAT} \quad  I_o  < I_{O\_MAX}$	<p>Relazione ingresso-uscita</p> $V_o = \left(1 + \frac{R_f}{R}\right) \cdot V$ <p>Corretto funzionamento</p> $ V_o  < V_{SAT} \quad  I_o  < I_{O\_MAX}$

### Amplificatore differenziale

Standard	Per strumentazione
<p>Relazione ingresso-uscita</p> $V_o = \frac{R_2}{R_1} \cdot (V_1 - V_2)$ <p>Corretto funzionamento</p> $ V_o  < V_{SAT} \quad  I_o  < I_{O\_MAX}$	<p>Relazione ingresso-uscita</p> $V_o = \frac{R_2}{R_1} \cdot \left(1 + \frac{2R}{R_x}\right) \cdot (V_1 - V_2)$ <p>Corretto funzionamento</p> $ V_o  < V_{SAT} \quad  I_o  < I_{O\_MAX}$

### Traslatore di tensione

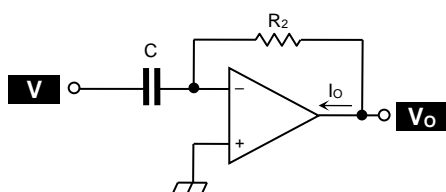
Diretto	Inverso
<p>Relazione ingresso-uscita</p> $V_o = \frac{R_2}{R_1} \cdot V - \frac{R_2}{R_1} \cdot E$ <p>Corretto funzionamento</p> $ V_o  < V_{SAT} \quad  I_o  < I_{O\_MAX}$	<p>Relazione ingresso-uscita</p> $V_o = -\frac{R_2}{R_1} \cdot V + \frac{R_2}{R_1} \cdot E$ <p>Corretto funzionamento</p> $ V_o  < V_{SAT} \quad  I_o  < I_{O\_MAX}$

### Sommatore

Invertente	Non invertente
<p>Relazione ingresso-uscita</p> $V_o = -\frac{R_f}{R_1} \cdot V_1 \dots - \frac{R_f}{R_n} \cdot V_n$ <p>Corretto funzionamento</p> $ V_o  < V_{SAT} \quad  I_o  < I_{O\_MAX}$	<p>Relazione ingresso-uscita</p> $V_o = \frac{1}{n} \cdot \left(1 + \frac{R_f}{R}\right) \cdot (V_1 + \dots + V_n)$ <p>Corretto funzionamento</p> $ V_o  < V_{SAT} \quad  I_o  < I_{O\_MAX}$

## Derivatore

### Derivatore standard

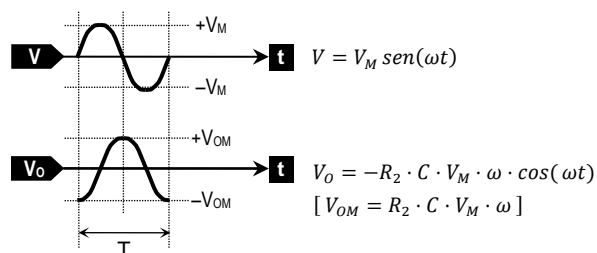


Vincoli:  $|V_O| < V_{SAT}$  ;  $|I_O| < I_{O\_MAX}$

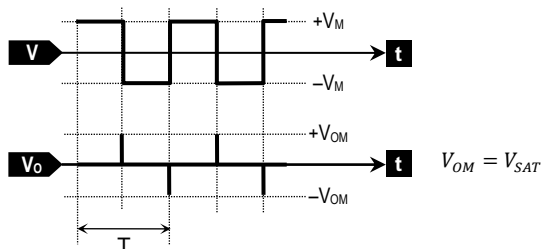
#### Studio nel dominio del tempo

Relazione ingresso→uscita:  $V_O = -R_2 \cdot C \cdot \frac{dV}{dt}$

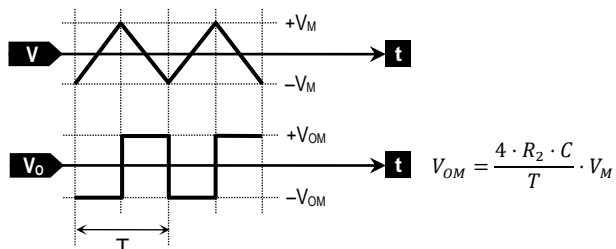
Risposta a onda sinusoidale



Risposta a onda quadra simmetrica con dc=0,5



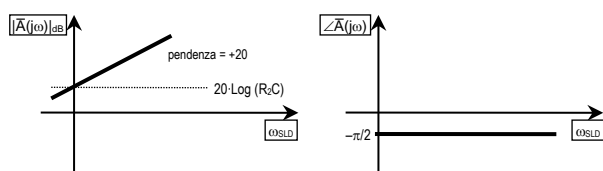
Risposta a onda triangolare simmetrica con dc=0,5



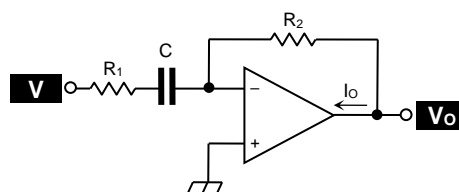
#### Studio nel dominio della frequenza

Relazione ingresso→uscita:  $\bar{V}_O = (-j\omega \cdot R_2 \cdot C) \cdot \bar{V}$

Funzione di trasferimento:  $\bar{A}(j\omega) = -j\omega \cdot R_2 \cdot C$



### Derivatore limitato



Vincoli:  $|V_O| < V_{SAT}$  ;  $|I_O| < I_{O\_MAX}$

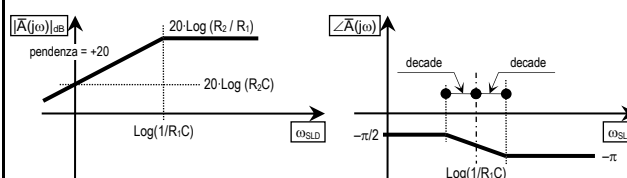
#### Studio nel dominio del tempo

Studio non effettuato

#### Studio nel dominio della frequenza

Relazione ingresso→uscita:  $\bar{V}_O = -\frac{j\omega \cdot R_2 C}{1 + j\omega \cdot R_1 C} \cdot \bar{V}$

Funzione di trasferimento:  $\bar{A}(j\omega) = -\frac{j\omega \cdot R_2 C}{1 + j\omega \cdot R_1 C}$

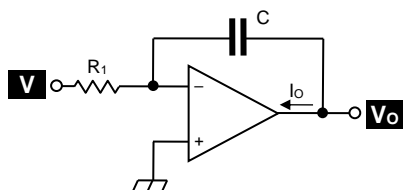


#### Note

- > Il derivatore limitato si comporta come un filtro passa-alto.
- > Alle pulsazioni che soddisfano la condizione  $\omega < (\omega_t / 10)$  il derivatore limitato si comporta come un derivatore standard

## Integratore

### Integratore standard

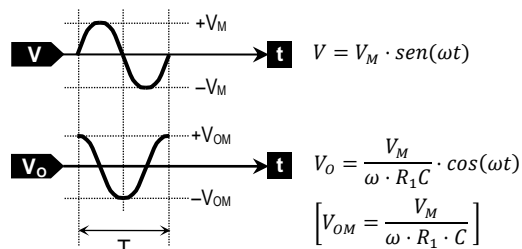


Vincoli:  $|V_o| < V_{SAT}$  ;  $|I_o| < I_{O\_MAX}$

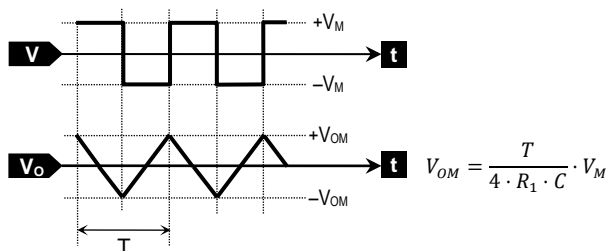
#### Studio nel dominio del tempo

Relazione ingresso→uscita:  $V_o = -\frac{1}{R_1 \cdot C} \cdot \int_0^t V \cdot dt + V_o(0)$

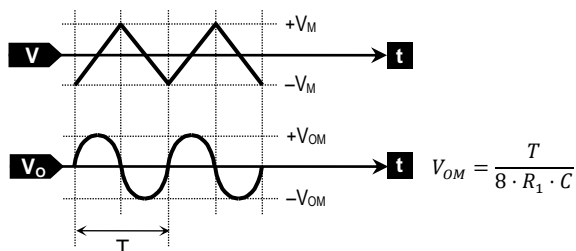
Risposta a onda sinusoidale



Risposta a onda quadra simmetrica con dc=0,5



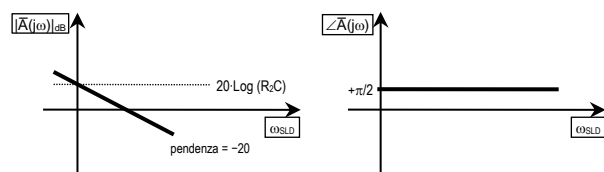
Risposta a onda triangolare simmetrica con dc=0,5



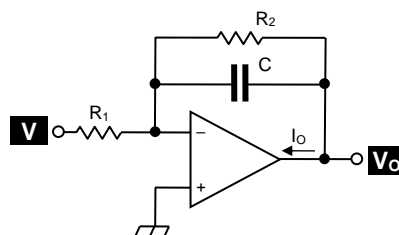
#### Studio nel dominio della frequenza

Relazione ingresso→uscita:  $\bar{V}_o = -\frac{1}{j\omega \cdot R_1 \cdot C} \cdot \bar{V}$

Funzione di trasferimento:  $\bar{A}(j\omega) = -\frac{1}{j\omega \cdot R_1 \cdot C}$



### Integratore limitato



Vincoli:  $|V_o| < V_{SAT}$  ;  $|I_o| < I_{O\_MAX}$

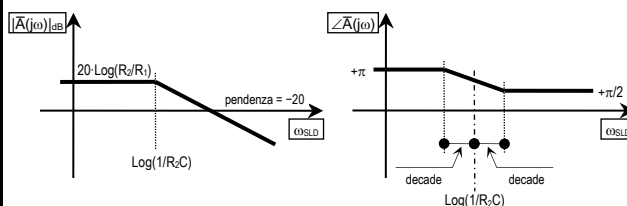
#### Studio nel dominio del tempo

Studio non effettuato

#### Studio nel dominio della frequenza

Relazione ingresso→uscita:  $\bar{V}_o = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{1 + j\omega \cdot R_2 \cdot C} \cdot \bar{V}$

Funzione di trasferimento:  $\bar{A}(j\omega) = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{1 + j\omega \cdot R_2 \cdot C}$

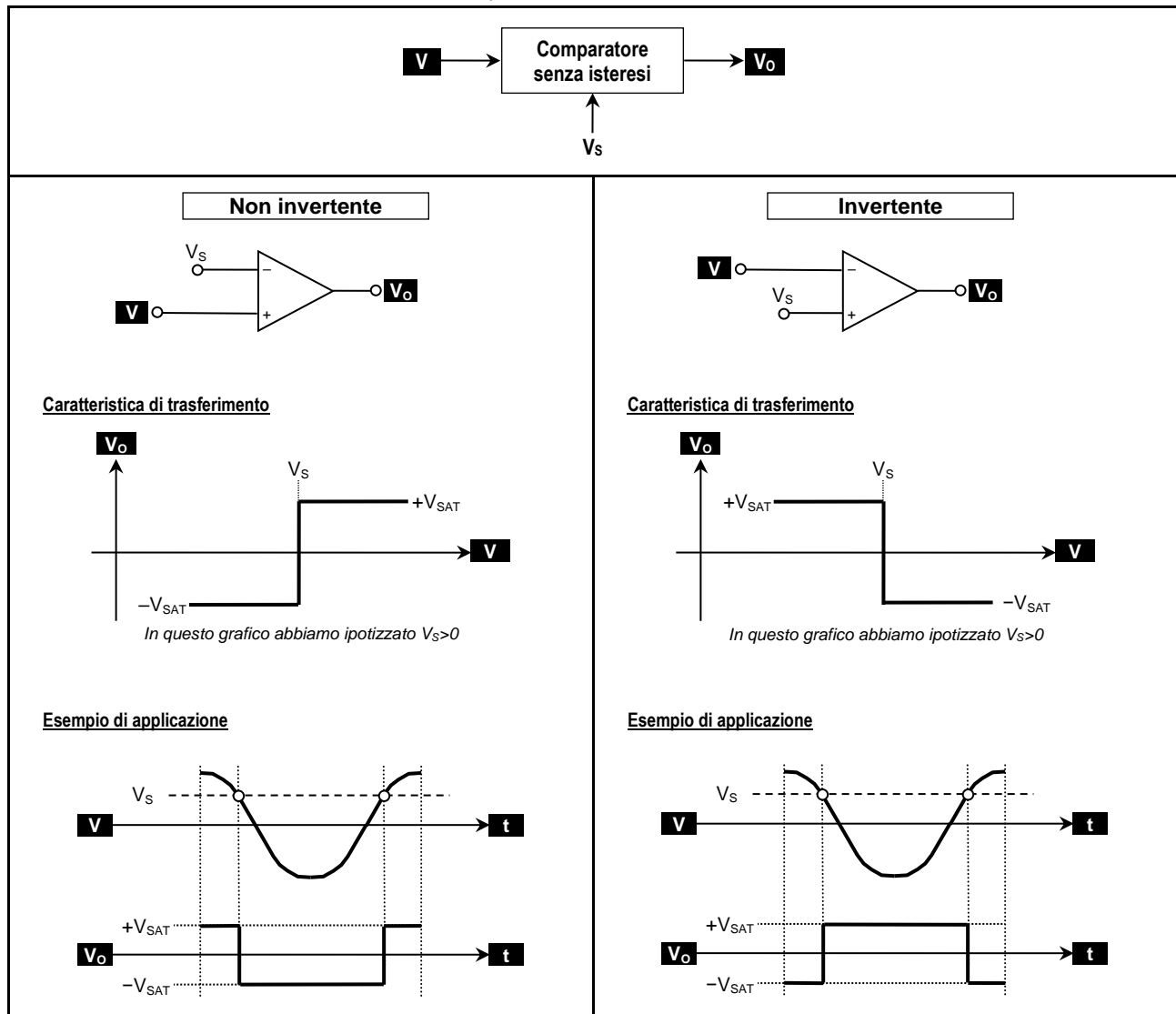


#### Note

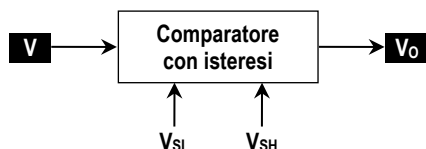
- L'integratore limitato si comporta come un filtro passa-basso.
- Alle pulsazioni che soddisfano la condizione  $\omega > (\omega_t \cdot 10)$  l'integratore limitato si comporta come un integratore standard.

## • 3 • Comparatori

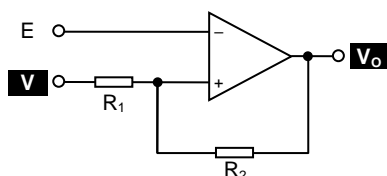
### Comparatori senza isteresi



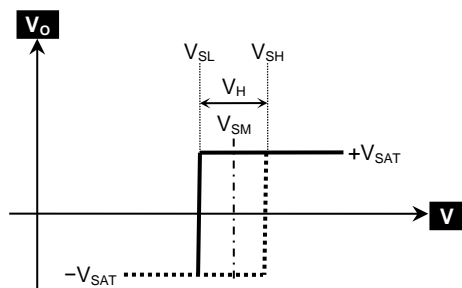
## Comparatori con isteresi



### Non invertente



#### Caratteristica di trasferimento



In questo grafico abbiamo ipotizzato  $V_{SL} > 0$  e  $V_{SH} > 0$

Le formule fondamentali sono:

$$V_{SL} = E \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2} - V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

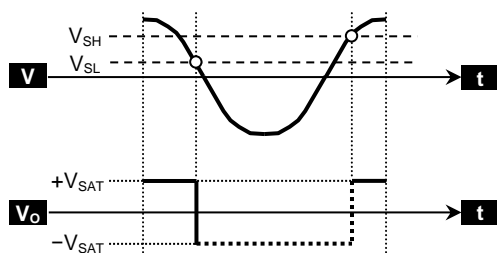
$$V_{SH} = E \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2} + V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

Da cui si ricavano:

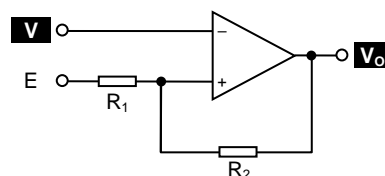
$$V_{SM} = E \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

$$V_H = 2 \cdot V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

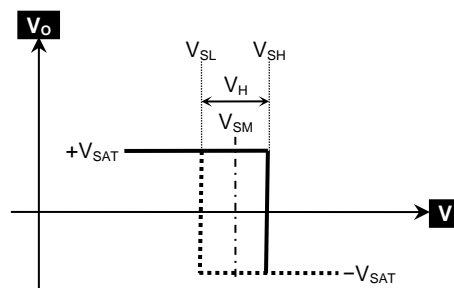
#### Esempio di applicazione



### Invertente



#### Caratteristica di trasferimento



In questo grafico abbiamo ipotizzato  $V_{SL} > 0$  e  $V_{SH} > 0$

Le formule fondamentali sono:

$$V_{SL} = E \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} - V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

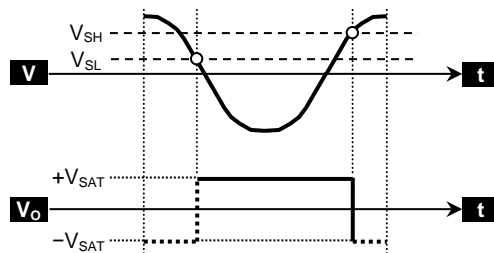
$$V_{SH} = E \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Da cui si ricavano:

$$V_{SM} = E \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$V_H = 2 \cdot V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

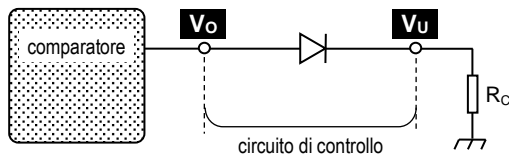
#### Esempio di applicazione



## Circuiti di controllo della tensione di uscita

In questa sezione presentiamo soltanto alcuni esempi di circuiti di controllo della tensione di uscita.

### Circuito di controllo con diodo Raddrizzatore



Relazione ingresso→uscita

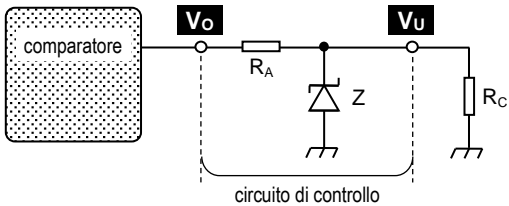
$$V_{OH} = +V_{SAT} \rightarrow V_{UH} = V_{SAT} - V_Y$$

$$V_{OL} = -V_{SAT} \rightarrow V_{UL} = 0$$

Vincoli

$$|V_{BD}| > |V_{SAT}|$$

### Circuito di controllo con diodo Zener



Relazione ingresso→uscita

$$V_{OH} = +V_{SAT} \rightarrow V_{UH} = V_Z$$

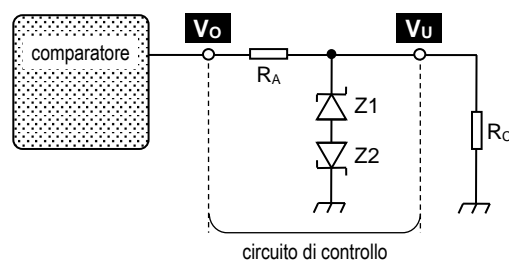
$$V_{OL} = -V_{SAT} \rightarrow V_{UL} = -V_Y$$

Vincoli

$$R_A < \frac{R_C \cdot (V_{SAT} - V_Z)}{V_{Z1}}$$

$$V_Z < V_{SAT}$$

### Circuito di controllo con due diodi Zener



Relazione ingresso→uscita

$$V_{OH} = +V_{SAT} \rightarrow V_{UH} = V_{Z1} + V_Y$$

$$V_{OL} = -V_{SAT} \rightarrow V_{UL} = -(V_{Z2} + V_Y)$$

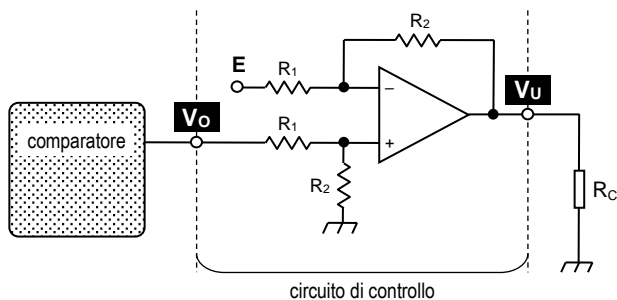
Vincoli

$$R_A < \frac{R_C \cdot (V_{SAT} - V_{Z\_MAX})}{V_{Z\_MAX}}$$

$$V_{Z\_MAX} < V_{SAT}$$

$$\text{dove } V_{Z\_MAX} = \text{MAX}[V_{Z1} + V_Y ; V_{Z2} + V_Y]$$

### Circuito di controllo con traslatore di tensione di tipo diretta



Relazione ingresso→uscita

$$V_{OH} = +V_{SAT} \rightarrow V_{UH} = \frac{R_2}{R_1} \cdot V_{OH} - \frac{R_2}{R_1} \cdot E$$

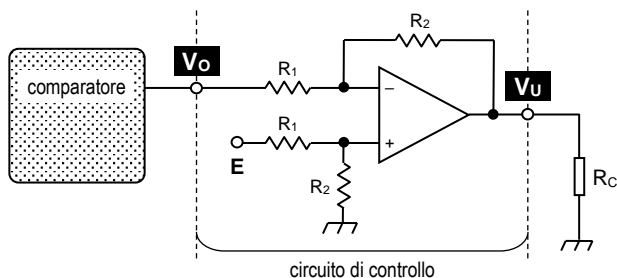
$$V_{OL} = -V_{SAT} \rightarrow V_{UL} = \frac{R_2}{R_1} \cdot V_{OL} - \frac{R_2}{R_1} \cdot E$$

Vincoli

$$|V_{UH}| < V_{SAT}$$

$$|V_{UL}| < V_{SAT}$$

### Circuito di controllo con traslatore di tensione in modalità inversa



Relazione ingresso→uscita

$$V_{OH} = +V_{SAT} \rightarrow V_{UH} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot V_{OH} + \frac{R_2}{R_1} \cdot E$$

$$V_{OL} = -V_{SAT} \rightarrow V_{UL} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot V_{OL} + \frac{R_2}{R_1} \cdot E$$

Vincoli

$$|V_{UH}| < V_{SAT}$$

$$|V_{UL}| < V_{SAT}$$

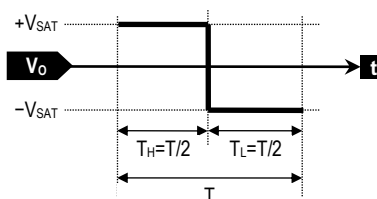
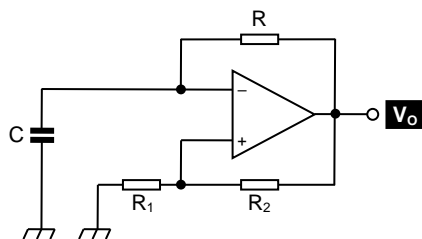




## • 4 • Generatori di forme d'onda

### Generatori di onda quadra (MV astabili) -- realizzazione co AO

**Circuito base** (onda quadra simmetrica con: T fisso, dc fisso di valore 0,5)



$$T_H = T_L = R \cdot C \cdot \ln \left( 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 1 \right)$$

$$T = T_H + T_L = 2 \cdot R \cdot C \cdot \ln \left( 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 1 \right)$$

$$dc = \frac{T_H}{T} = 0,5$$

**Variante 1** (onda quadra simmetrica con: T fisso, dc fisso di valore qualsiasi)

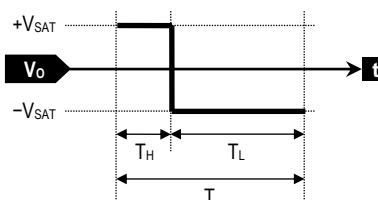
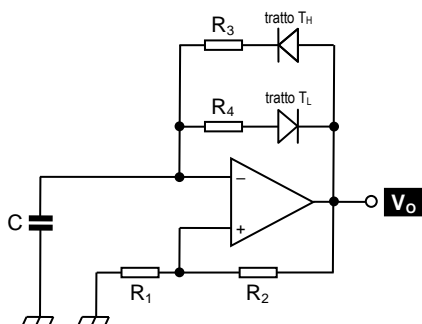


Grafico relativo al caso  $dc < 0,5$ .

$$T_H = [R_3] \cdot [C] \cdot \ln \left( 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 1 \right)$$

$$T_L = [R_4] \cdot [C] \cdot \ln \left( 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 1 \right)$$

$$T = T_H + T_L = [R_3 + R_4] \cdot [C] \cdot \ln \left( 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 1 \right)$$

$$dc = \frac{T_H}{T} = \frac{R_3}{R_3 + R_4}$$

**Variante 2** (onda quadra simmetrica con: T regolabile, dc regolabile)

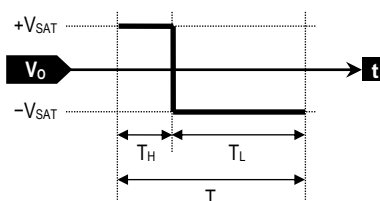
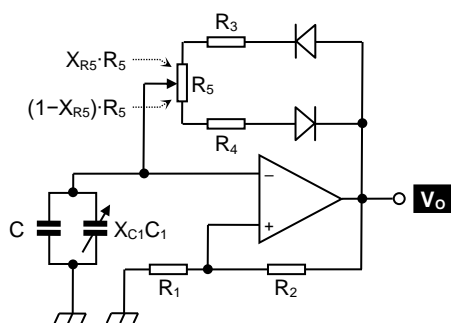


Grafico relativo al caso  $dc < 0,5$

$$T_H = [R_3 + X_{R5} \cdot R_5] \cdot [C + X_{C1} \cdot C_1] \cdot \ln \left( 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 1 \right)$$

$$T_L = [R_4 + (1 - X_{R5}) \cdot R_5] \cdot [C + X_{C1} \cdot C_1] \cdot \ln \left( 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 1 \right)$$

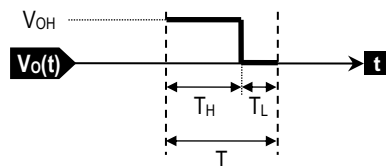
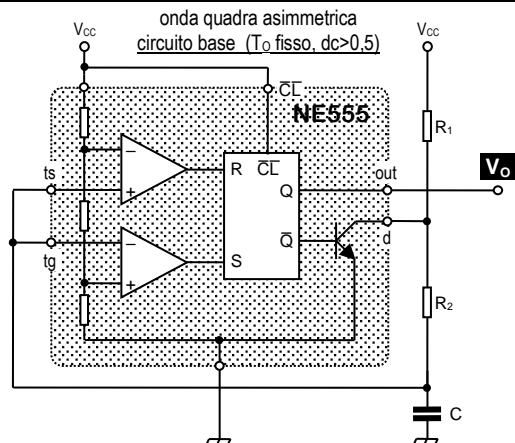
$$T = T_H + T_L = [R_3 + R_4 + R_5] \cdot [C + X_{C1} \cdot C_1] \cdot \ln \left( 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 1 \right)$$

Variando il parametro  $X_{C1}$  si varia il periodo T dell'onda.

$$dc = \frac{T_H}{T} = \frac{R_3 + X_{R5} \cdot R_5}{R_3 + R_4 + R_5}$$

Variando il parametro  $X_{R5}$  si varia il duty-cycle dc dell'onda.

## Generatori di onda quadra (MV astabili) -- realizzazione con NE555



$V_{OH}, V_{OL} = \text{vedi data - sheet}$

$$T_H = (R_1 + R_2) \cdot C \cdot \ln(2)$$

$$T_L = R_2 \cdot C \cdot \ln(2)$$

$$T = T_H + T_L = (R_1 + 2 \cdot R_2) \cdot C \cdot \ln(2)$$

$$dc = \frac{T_H}{T} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + 2 \cdot R_2}$$

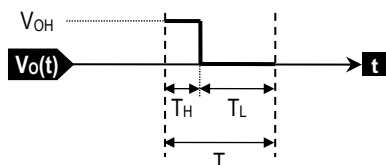
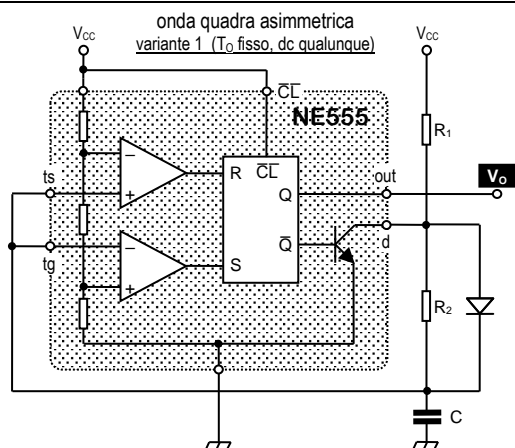


Grafico relativo  
al caso  $dc < 0,5$ .

$V_{OH}, V_{OL} = \text{vedi data - sheet}$

$$T_H = R_1 \cdot C \cdot \ln(2)$$

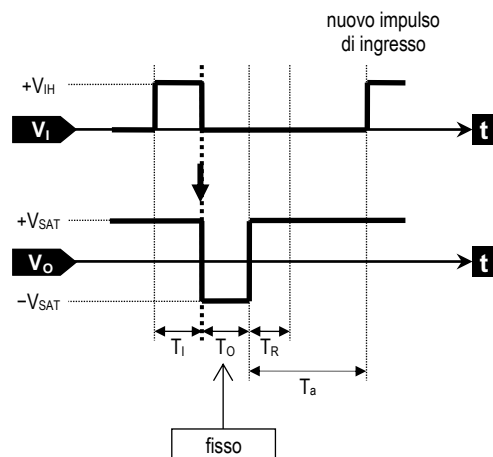
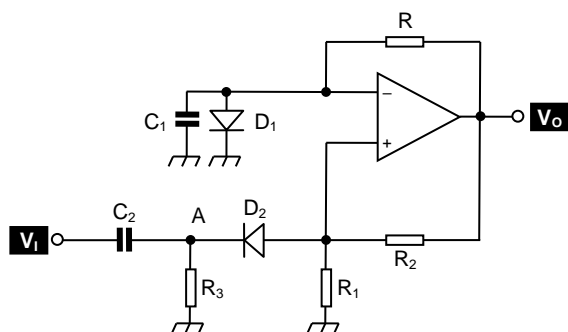
$$T_L = R_2 \cdot C \cdot \ln(2)$$

$$T = T_H + T_L = [R_1 + R_2] \cdot C \cdot \ln(2)$$

$$dc = \frac{T_H}{T} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

## Generatori di impulso (MV monostabili) -- realizzazione con AO

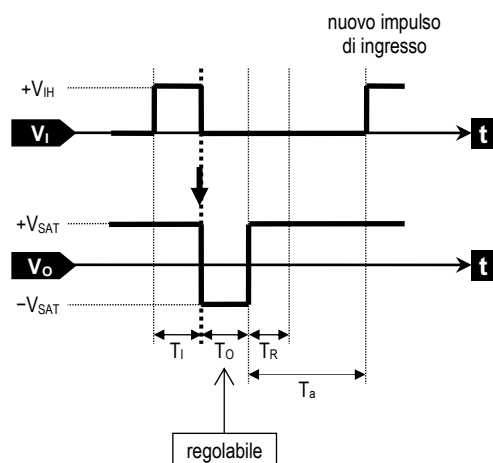
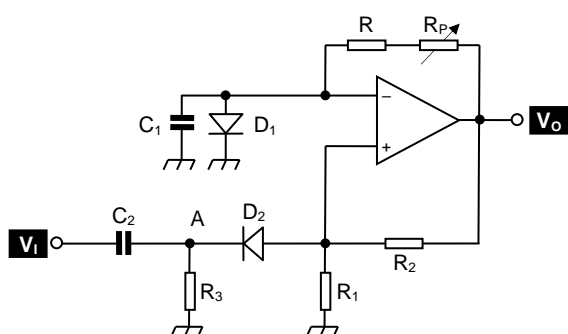
### Circuito base ( $T_O$ fisso)



$V_{IH} > V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} - V_T$ $T_I > 5 \cdot R_3 \cdot C_2$	} condizioni relative all'impulso di ingresso
$T_O = R \cdot C_1 \cdot \ln\left(\frac{R_1}{R_2} + 1\right)$ $T_O > 5 \cdot R_3 \cdot C_2$	

$R_3 \geq 10 \cdot R_1$	} corretto funzionamento del circuito
$T_{R(V-)} = R \cdot C_1 \cdot \ln\left(\frac{2R_1 + R_2}{R_1 + R_2}\right)$ $T_{R(V+)} = 5 \cdot R_3 \cdot C_2$ $T_R = \text{MAX}[T_{R(V-)} ; T_{R(V+)}]$	
$T_a > T_R$	} condizione relativa al tempo di attesa

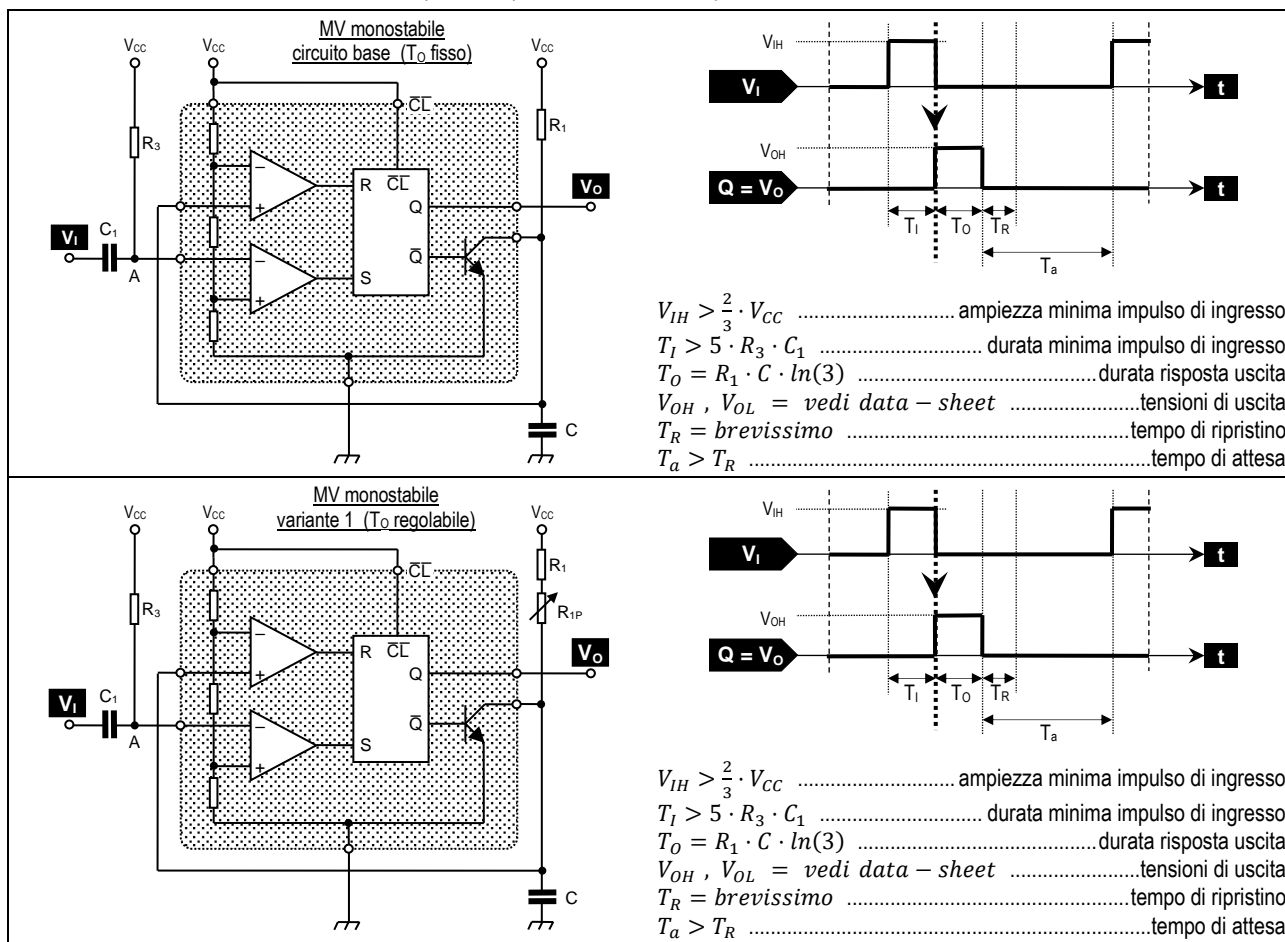
### Variante 1 ( $T_O$ regolabile)



$V_{IH} > V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} - V_T$ $T_I > 5 \cdot R_3 \cdot C_2$	} condizioni relative all'impulso di ingresso
$T_O = [R + X_{RP} \cdot R_P] \cdot [C_1] \cdot \ln\left(\frac{R_1}{R_2} + 1\right)$ $T_{O\_MAX} > 5 \cdot R_3 \cdot C_2$	

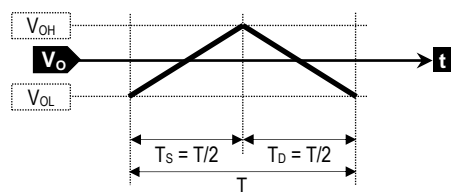
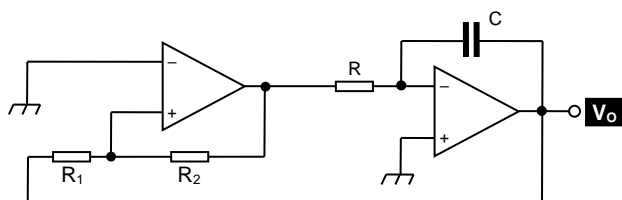
$R_3 \geq 10 \cdot R_1$	} corretto funzionamento del circuito
$T_{R(V-)} = [R + X_{RP} \cdot R_P] \cdot [C_1] \cdot \ln\left(\frac{2R_1 + R_2}{R_1 + R_2}\right)$ $T_{R(V+)} = 5 \cdot R_3 \cdot C_2$ $T_R = \text{MAX}[T_{R(V-)} ; T_{R(V+)}]$	
$T_a > T_R$	} condizione relativa al tempo di attesa

## Generatori di impulso (MV monostabili) -- realizzazione con NE555



## Generatori di onda triangolare -- realizzazione con AO

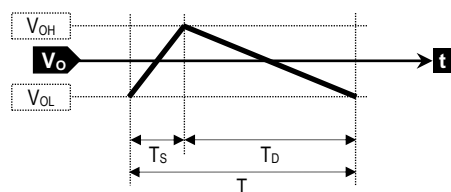
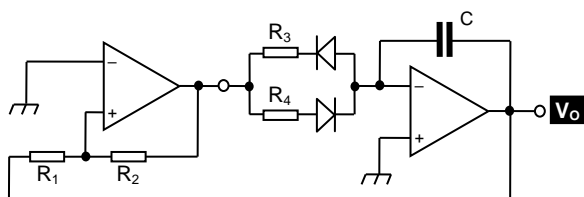
**Circuito base** (onda triangolare simmetrica con: T fisso, dc fisso di valore 0,5)



$$\begin{aligned} V_{OH} &= +V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_2} \\ V_{OL} &= -V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_S &= 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot RC \\ T_D &= 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot RC \\ R_1 &< R_2 \quad (\text{corretto funzionamento}) \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} T &= T_S + T_D = 4 \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot RC \\ dc &= \frac{T_S}{T} = 0,5 \end{aligned}$$

**Variante 1** (onda triangolare simmetrica con: T fisso, dc fisso di valore qualsiasi)

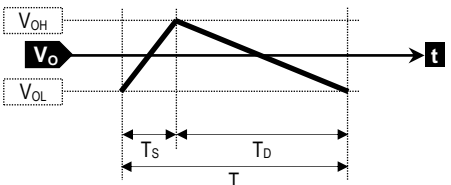
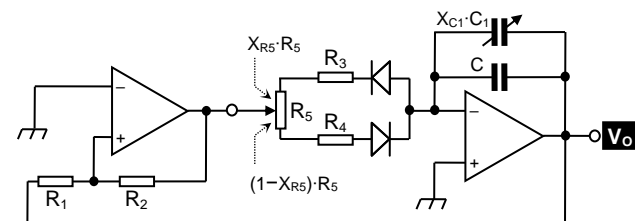


In questa forma d'onda si è ipotizzato  $dc < 0,5$ .

$$\begin{aligned} V_{OH} &= +V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_2} \\ V_{OL} &= -V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_S &= 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot R_3 C \\ T_D &= 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot R_4 C \\ R_1 &< R_2 \quad (\text{corretto funzionamento}) \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} T &= T_S + T_D = 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot (R_3 + R_4) \cdot C \\ dc &= \frac{T_S}{T} = \frac{R_3}{R_3 + R_4} \end{aligned}$$

**Variante 2** (onda triangolare simmetrica con: T regolabile, dc regolabile)



In questa forma d'onda si è ipotizzato  $dc < 0,5$ .

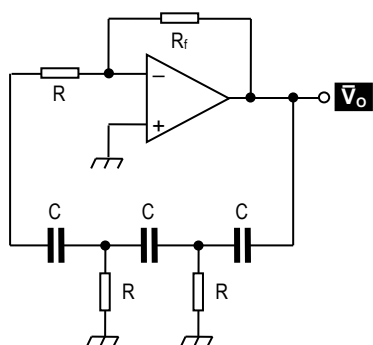
$$\begin{aligned} V_{OH} &= +V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_2} \\ V_{OL} &= -V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_S &= 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot [X_{R5} \cdot R_5 + R_3] \cdot [C + X_{C1} \cdot C_1] \\ T_D &= 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot [(1 - X_{R5}) \cdot R_5 + R_4] \cdot [C + X_{C1} \cdot C_1] \\ R_1 &< R_2 \quad (\text{corretto funzionamento}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T &= T_S + T_D = 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot [R_3 + R_4 + R_5] \cdot [C + X_{C1} \cdot C_1] \\ \text{Variando il parametro } X_{C1} \text{ si varia il periodo dell'onda.} \\ dc &= \frac{T_S}{T} = \frac{R_3 + X_{R5} \cdot R_5}{R_3 + R_4 + R_5} \\ \text{Variando il parametro } X_{R5} \text{ si varia il duty-cycle dell'onda.} \end{aligned}$$

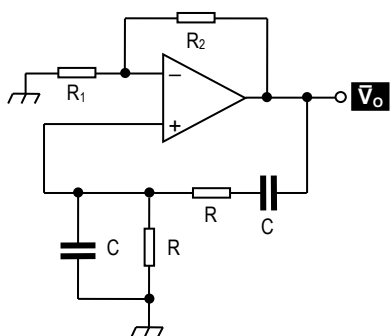
## Generatori di onda sinusoidale (oscillatori)

Oscillatore a rete di sfasamento



$\omega = \frac{1}{R \cdot C \cdot \sqrt{6}}$	Calcolo della pulsazione dell'oscillazione di uscita. (criterio di Barkhausen per la fase)
$V_{OM} = V_{SAT}$	Calcolo dell'ampiezza dell'oscillazione di uscita.
$\frac{R_f}{R} = 29$	Corretto funzionamento del circuito. (criterio di Barkhausen per il modulo)

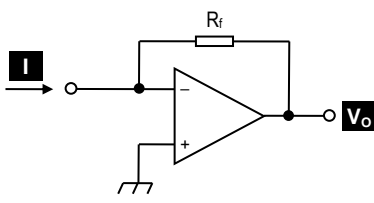
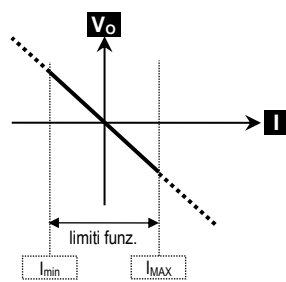
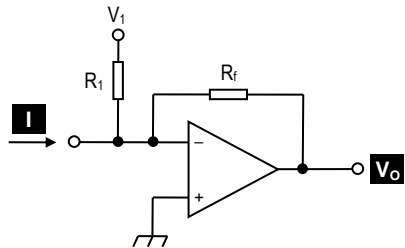
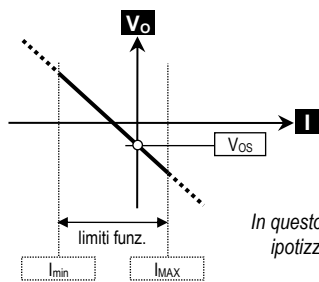
Oscillatore a ponte di Wien



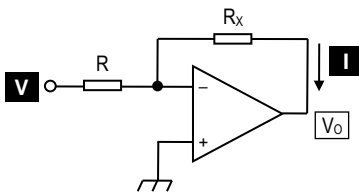
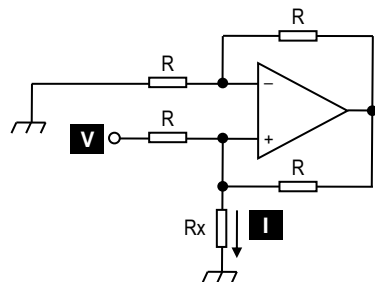
$\omega = \frac{1}{R \cdot C}$	Calcolo della pulsazione dell'oscillazione di uscita. (criterio di Barkhausen per la fase)
$V_{OM} = V_{SAT}$	Calcolo dell'ampiezza dell'oscillazione di uscita.
$\frac{R_2}{R_1} = 2$	Corretto funzionamento del circuito. (criterio di Barkhausen per il modulo)

## • 5 • Convertitori

### Convertitori corrente→tensione

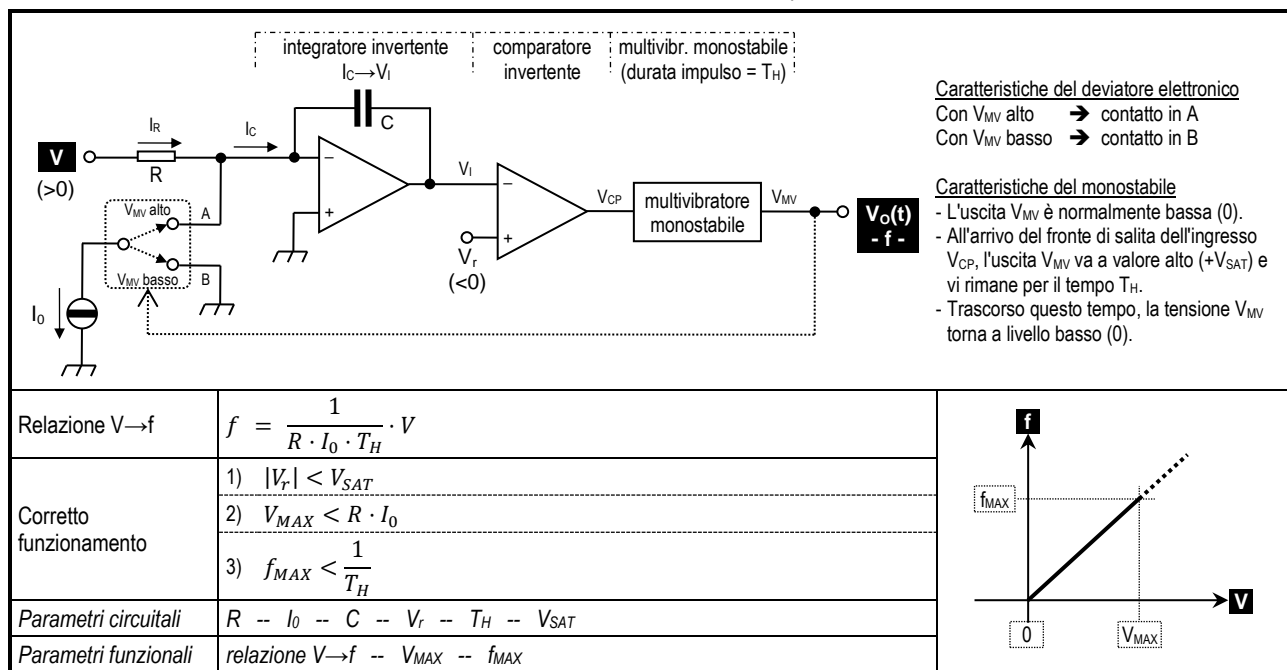
Convertitore I→V senza offset (invertente)		Convertitore I→V senza offset (invertente)	
 		  <p>In questo schema si è ipotizzato <math>V_{OS} &lt; 0</math>.</p>	
Relazione: $I \rightarrow V_O$	$V_O = -R_f \cdot I$	Relazione: $I \rightarrow V_O$	$V_O = -R_f \cdot I - \frac{R_f}{R_1} \cdot V_1$
		Tensione di offset	$V_{OS} = -\frac{R_f}{R_1} \cdot V_1$
Corretto funzionamento	$ V_O  < V_{SAT}$ dove $V_O = -R_f \cdot I$ $ I_O  < I_{O\_MAX}$	Corretto funzionamento	$ V_O  < V_{SAT}$ dove $V_O = -R_f \cdot I - \frac{R_f}{R_1} \cdot V_1$ $ I_O  < I_{O\_MAX}$
Parametri circuitali	$R_f \text{ -- } V_{SAT}$	Parametri circuitali	$R_1 \text{ -- } R_f \text{ -- } V_1 \text{ -- } V_{SAT}$
Parametri funzionali	relazione: $I \rightarrow V_O \text{ -- } I_{min} \text{ -- } I_{MAX}$	Parametri funzionali	relazione: $I \rightarrow V_O \text{ -- } V_{OS} \text{ -- } I_{min} \text{ -- } I_{MAX}$

### Convertitori tensione→corrente

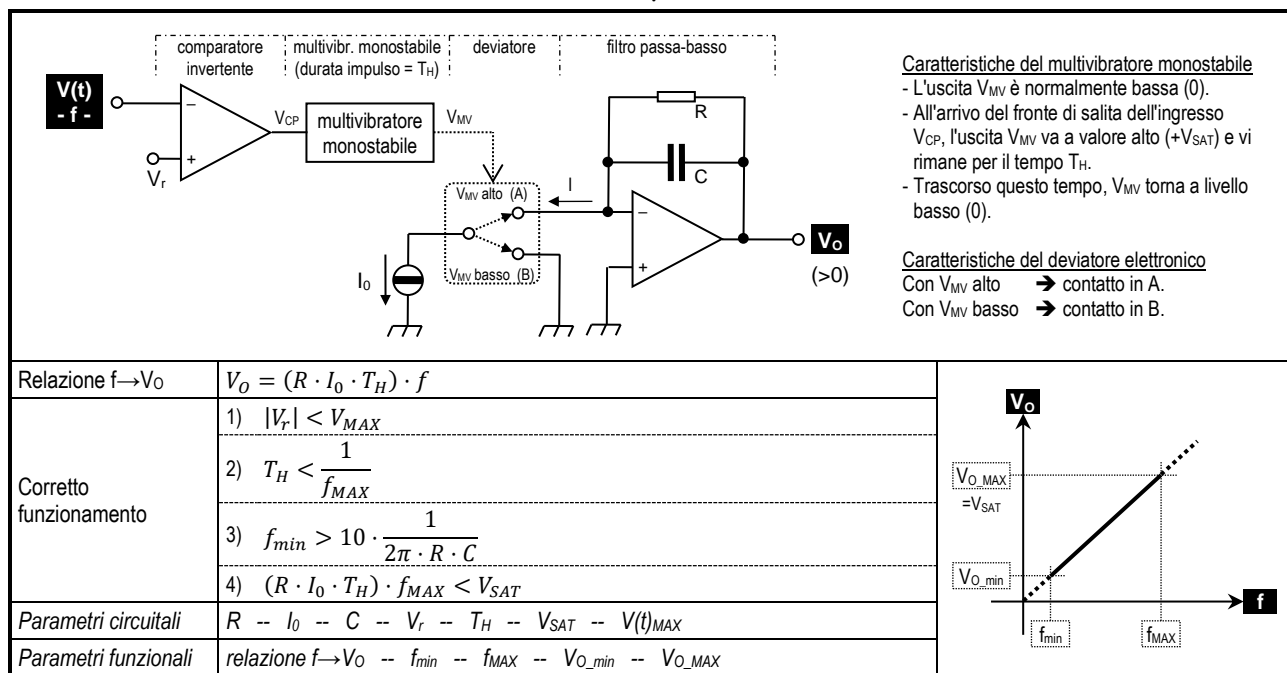
Convertitore V→I senza riferimento a massa		Convertitore V→I con riferimento a massa	
 <p>La corrente di uscita I attraversa una resistenza <math>R_X</math> che non ha terminali a massa.</p>		 <p>La corrente di uscita I attraversa una resistenza <math>R_X</math> che ha un terminale a massa.</p>	
Relazione: $V \rightarrow I$	$I = \frac{1}{R} \cdot V$	Relazione: $V \rightarrow I$	$I = \frac{1}{R} \cdot V$
Corretto funzionamento	$ V_O  < V_{SAT}$ dove $V_O = -\frac{R_X}{R} \cdot V$ $ I_O  < I_{O\_MAX}$	Corretto funzionamento	$ V_O  < V_{SAT}$ dove $V_O = \frac{2 \cdot R_X}{R} \cdot V$ $ I_O  < I_{O\_MAX}$
Parametri circuitali	$R \text{ -- } R_X \text{ -- } V_{SAT}$	Parametri circuitali	$R \text{ -- } R_X \text{ -- } V_{SAT}$
Parametri funzionali	relazione: $V \rightarrow I \text{ -- } V_{min} \text{ -- } V_{MAX}$	Parametri funzionali	relazione: $V \rightarrow I \text{ -- } V_{min} \text{ -- } V_{MAX}$



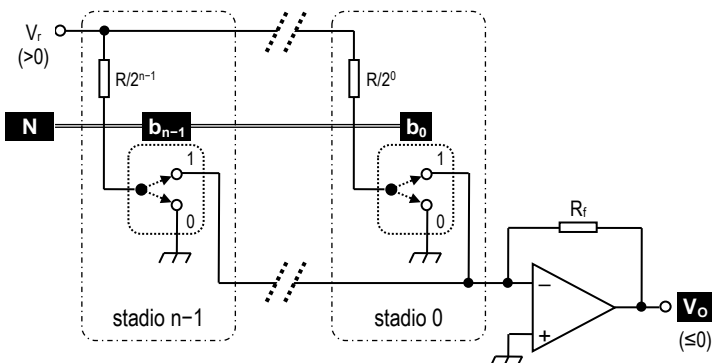
## Convertitori tensione→frequenza



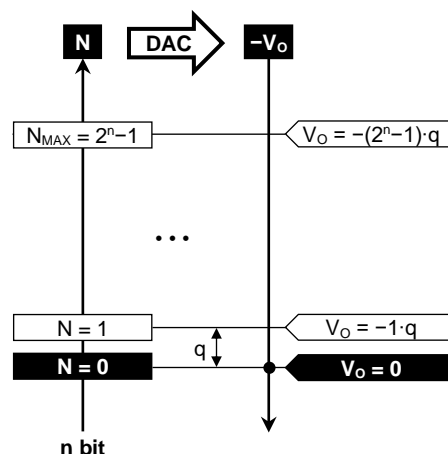
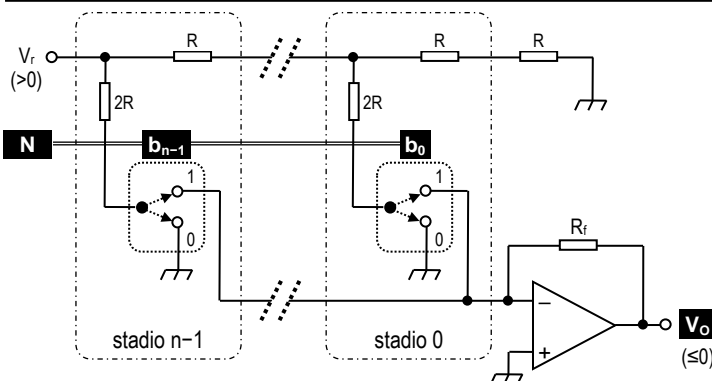
## Convertitori frequenza→tensione



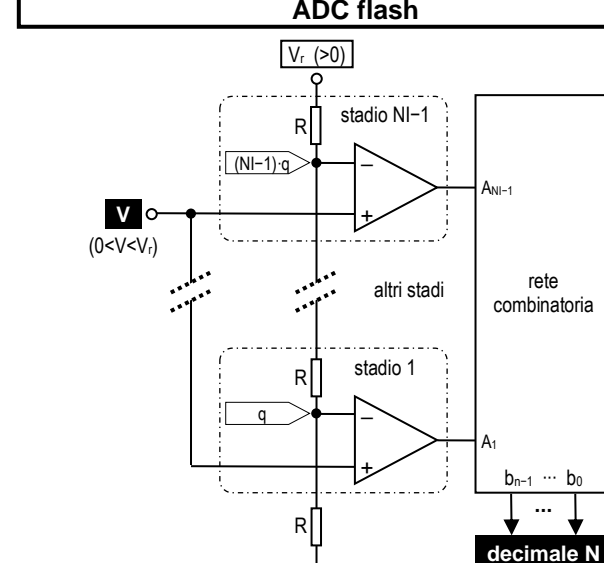
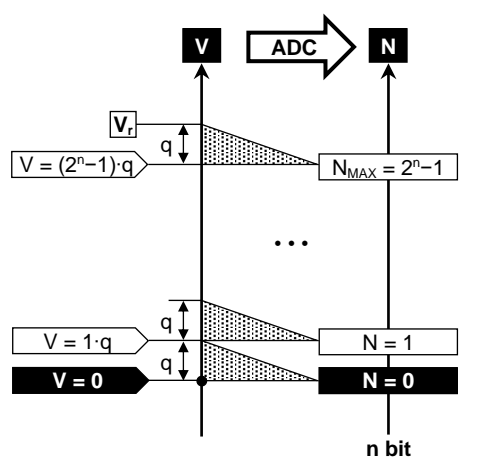
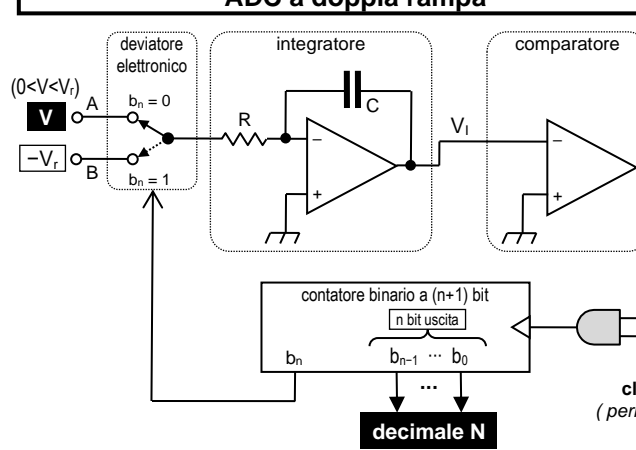
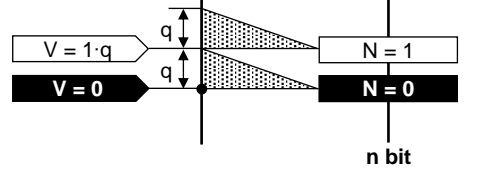
### DAC a resistori pesati



### DAC a rete R-2R



DAC a resistori pesati			DAC a rete R-2R		
n° decimale di ingresso	$N = b_{n-1} \cdot 2^{n-1} + \dots + b_0 \cdot 2^0$		n° decimale di ingresso	$N = b_{n-1} \cdot 2^{n-1} + \dots + b_0 \cdot 2^0$	
quanto di conversione	$q = V_r \cdot \frac{R_f}{R} \quad (V_r > 0)$		quanto di conversione	$q = V_r \cdot \frac{R_f}{2^n \cdot R} \quad (V_r > 0)$	
relazione $N \rightarrow V_O$	$V_O = -q \cdot N$		elazione $N \rightarrow V_O$	$V_O = -q \cdot N$	
n° config. di ingresso	$N_I = 2^n$		n° config. di ingresso	$N_I = 2^n$	
estremi di conversione	ingresso [ $b_{n-1} \dots b_0$ (N) ]	uscita [ V (≤ 0) ]	estremi di conversione	ingresso [ $b_{n-1} \dots b_0$ (N) ]	uscita [ V (≤ 0) ]
	MAX → tutti 1 ( $N_{MAX} = 2^n - 1$ )	$V_{O\_MAX} = -q \cdot N_{MAX}$		MAX → tutti 1 ( $N_{MAX} = 2^n - 1$ )	$V_{O\_MAX} = -q \cdot N_{MAX}$
	min → tutti 0 ( $N_{min} = 0$ )	$V_{O\_min} = -q \cdot N_{min}$		min → tutti 0 ( $N_{min} = 0$ )	$V_{O\_min} = -q \cdot N_{min}$
corretto funzionamento	$ V_{O\_MAX}  < V_{SAT}$		corretto funzionamento	$ V_{O\_MAX}  < V_{SAT}$	
parametri circuitali	$V_r \text{ -- } R \text{ -- } R_f \text{ -- } n \text{ -- } V_{SAT}$		parametri circuitali	$V_r \text{ -- } R \text{ -- } R_f \text{ -- } n \text{ -- } V_{SAT}$	
parametri funzionali	relazione $N \rightarrow V_O \text{ -- } N_I \text{ -- } q$		parametri funzionali	relazione $N \rightarrow V_O \text{ -- } N_I \text{ -- } q$	

ADC flash				ADC a doppia rampa			
							
							
ADC flash				ADC a doppia rampa			
escursione dell'ingresso V	$0 < V < V_r$			escursione dell'ingresso V	$0 < V < V_r$		
n° intervalli di ingresso	$N_I = 2^n$			n° intervalli di ingresso	$N_I = 2^n$		
quanto di conversione	$q = V_r / 2^n$			quanto di conversione	$q = V_r / 2^n$		
errore massimo di quantizzazione	$E_{MAX} = q / 2$			errore massimo di quantizzazione	$E_{MAX} = q / 2$		
relazione V→N	$N = \text{Trunc}(V / q)$			relazione V→N	$N = \text{Trunc}(V / q)$		
estremi di conversione	MAX →	ingresso [V]	uscita [b_{n-1} ... b_0 (N)]	estremi di conversione	MAX →	ingresso [V]	uscita [b_{n-1} ... b_0 (N)]
		$V_r - q < V < V_r$	tutti 1 ( $N_{MAX} = 2^n - 1$ )			$V_r - q < V < V_r$	tutti 1 ( $N_{MAX} = 2^n - 1$ )
	min →	$0 < V < q$	tutti 0 (N=0)		min →	$0 < V < q$	tutti 0 (N=0)
dimensionamento rete combinatoria	n° bit di ingresso = $2^n - 1$ n° bit di uscita = n			dimensionamento contatore	n° bit totali = n+1 di cui: n° bit per il conteggio = n n° bit per il deviatore = 1		
n° AO presenti nel circuito	n° AO = $2^n - 1$			n° AO presenti nel circuito	n° AO = 2		
dimensionamento componenti	R = valore non critico			dimensionamento componenti	$\frac{V_r \cdot 2^n \cdot T}{R \cdot C} < V_{SAT}$		
tempo di conv. con N=N_MAX	tempo di commutazione degli AO			tempo di conv. con N=N_MAX	$TC_{MAX} = 2^{n+1} \cdot T$		
tempo di conv. con N<N_MAX	tempo di commutazione degli AO			tempo di conv. con N<N_MAX	$TC = 2^n \cdot T + N \cdot T$		
parametri circuitali	$V_r$ -- R -- n			parametri circuitali	$V_r$ -- R -- C -- n -- T -- $V_{SAT}$		
parametri funzionali	relazione V→N -- $N_I$ -- q			parametri funzionali	relazione V→N -- $N_I$ -- q -- $TC_{MAX}$		