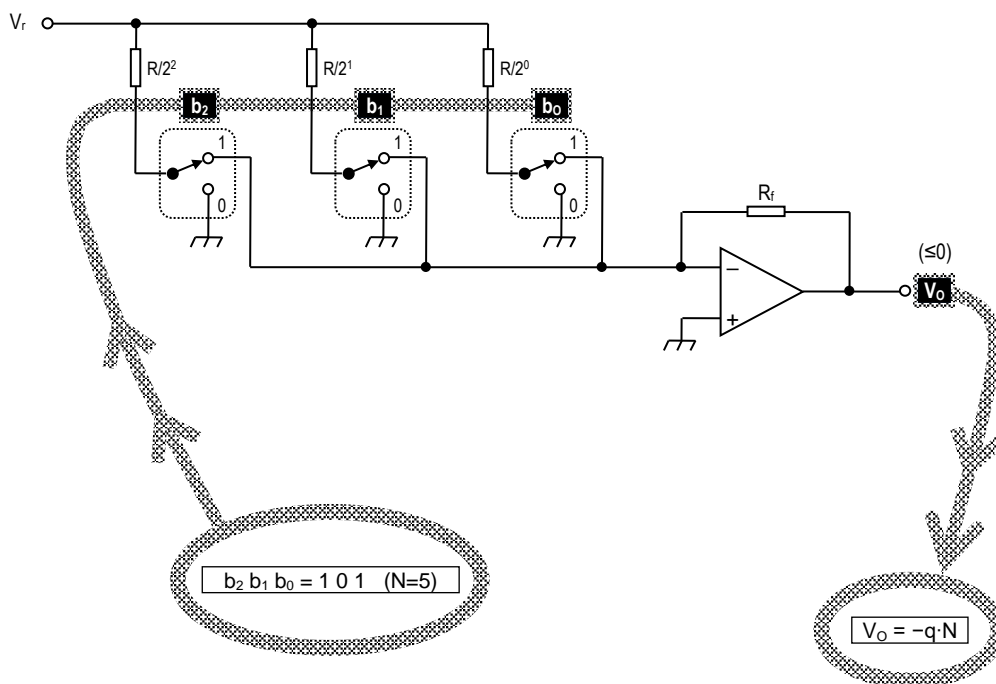


Elettronica analogica 5

Capitolo 6

I convertitori

DAC a resistori pesati (soluzione a 3 bit di ingresso)



Prof. Giuseppe Di Michele --- fascicolo di 47 pagine --- maggio 2022

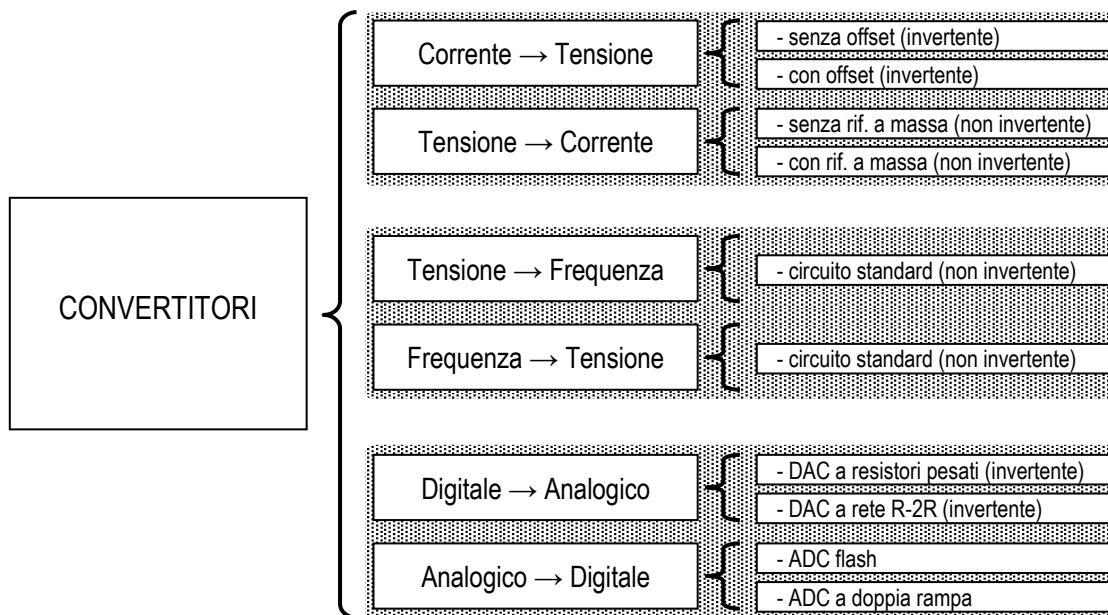
I convertitori

<u>Introduzione</u>	3
<u>6.1 -- Convertitore corrente→tensione</u>	4
> Senza offset (invertente)	
> Con offset (invertente)	
> Esercizi	
<u>6.2 -- Convertitore tensione→corrente</u>	10
> Senza riferimento a massa (non invertente)	
> Con riferimento a massa (non invertente)	
> Esercizi	
<u>6.3 -- Convertitore tensione→frequenza</u>	16
> Tipo standard (non invertente)	
> Esercizi	
<u>6.4 -- Convertitore frequenza→tensione</u>	20
> Tipo standard (non invertente)	
> Esercizi	
<u>6.5 -- Convertitore digitale→analogico</u>	24
> DAC a resistori pesati (invertente)	
> DAC a rete R-2R (invertente)	
> Esercizi	
<u>6.6 -- Convertitore analogico→digitale</u>	32
> ADC flash	
> ADC a doppia rampa	
> Esercizi	
<u>Quadro riassuntivo</u>	43

Introduzione

I convertitori sono circuiti che ricevono in ingresso una grandezza elettrica (ad esempio una corrente) e forniscono in uscita un'altra grandezza elettrica (ad esempio una tensione) di valore proporzionale alla grandezza elettrica ricevuta in ingresso.

Esistono molti tipi di convertitori. In questo capitolo ne analizzeremo i seguenti:



Nelle prossime pagine presenteremo in dettaglio tutti questi convertitori e proporremo per ciascuno di essi alcuni esercizi di analisi e progetto.

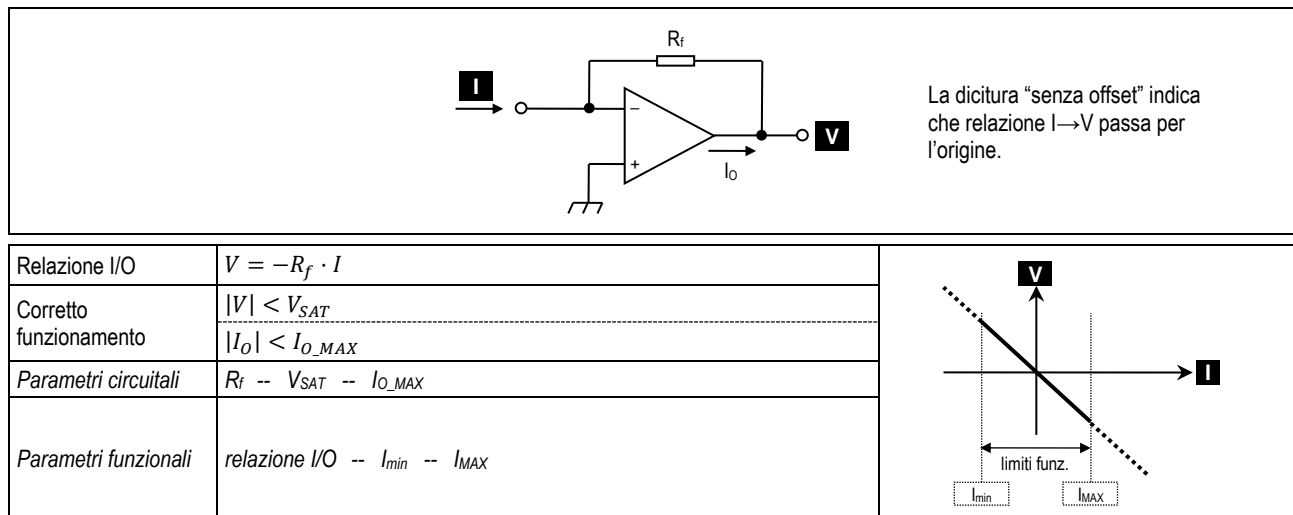
Conclude il capitolo un quadro sinottico nel quale sono riassunti tutti i convertitori presentati, ricordando per ciascuno di essi le formule di dimensionamento.

6.1 -- Convertitore corrente→tensione

Il convertitore $I \rightarrow V$ è un circuito che riceve in ingresso una corrente I e fornisce in uscita una tensione V_O proporzionale alla corrente d'ingresso I . Di questo circuito ne esistono due tipi: senza offset e con offset.

Convertitore $I \rightarrow V$ senza offset

Il convertitore $I \rightarrow V$ senza offset (invertente) è rappresentato nella figura seguente. Dopo il circuito sono riportate le sue formule di dimensionamento.



Analisi del circuito

- Dimostrazione della relazione I/O.

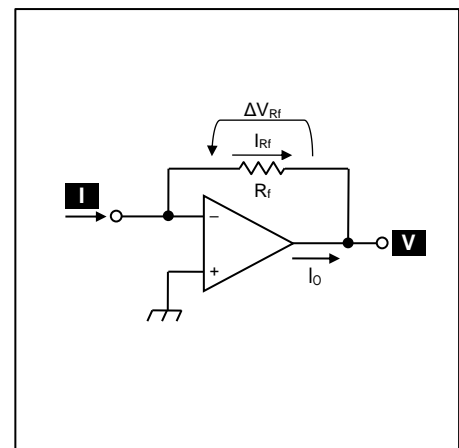
$$I \xrightarrow{A} I_{Rf} \xrightarrow{B} \Delta V_{Rf} \xrightarrow{C} V$$

- A) $I_{Rf} = I$
- B) $\Delta V_{Rf} = R_f \cdot I_{Rf}$ sostituendo $\Delta V_{Rf} = R_f \cdot I$
- C) $V = -\Delta V_{Rf}$ sostituendo $V = -R_f \cdot I$

- Corretto funzionamento.

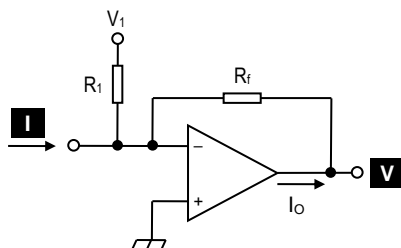
Nell'utilizzare questo circuito occorre rispettare i limiti di funzionamento dell'AO funzionante in regime lineare. Questi limiti sono:

$$|V| < V_{SAT} \quad - \quad |I_O| < I_{O_MAX} \quad .$$



Convertitore $I \rightarrow V$ con offset

Il convertitore $I \rightarrow V$ con offset (invertente) è rappresentato nella figura seguente. Dopo il circuito sono riportate le sue formule di dimensionamento.



La dicitura "con offset" indica che relazione $I \rightarrow V$ non passa per l'origine.

Relazione I/O	$V = -R_f \cdot I - \frac{R_f}{R_1} \cdot V_1$	
Tensione di offset	$V_{OS} = -\frac{R_f}{R_1} \cdot V_1$	
Corretto funzionamento	$ V < V_{SAT}$ $ I_O < I_{O_MAX}$	
Parametri circuitali	$R_1 \text{ -- } R_f \text{ -- } V_1 \text{ -- } V_{SAT} \text{ -- } I_{O_MAX}$	
Parametri funzionali	relazione I/O -- V_{OS} -- I_{min} -- I_{MAX}	

Analisi del circuito

- Dimostrazione della relazione I/O.

$$V_1 \xrightarrow{A} I_{R1} \xrightarrow{B} I_{Rf} \xrightarrow{C} \Delta V_{Rf} \xrightarrow{D} V$$

A) $I_{R1} = \frac{V_1}{R_1}$

B) $I_{Rf} = I + I_{R1}$ sostituendo $I_{Rf} = I + \frac{V_1}{R_1}$

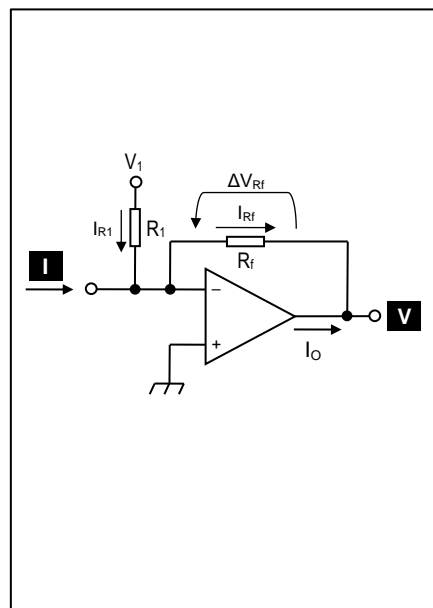
C) $\Delta V_{Rf} = R_f \cdot I_{Rf}$ sostituendo $\Delta V_{Rf} = R_f \cdot I + \frac{R_f}{R_1} \cdot V_1$

D) $V = -\Delta V_{Rf}$ sostituendo $V = -R_f \cdot I - \frac{R_f}{R_1} \cdot V_1$

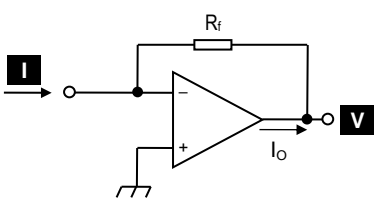
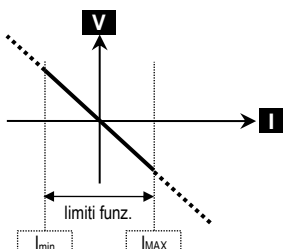
- Corretto funzionamento.

Nell'utilizzare questo circuito occorre rispettare i limiti di funzionamento dell'AO funzionante in regime lineare. Questi limiti sono:

$$|V| < V_{SAT} \quad - \quad |I_O| < I_{O_MAX}$$



Esercizi - Convertitore $I \rightarrow V$ senza offset (invertente)

RICHIAMI DI TEORIA		
		La dicitura "senza offset" indica che relazione $I \rightarrow V$ passa per l'origine.
Relazione I/O	$V = -R_f \cdot I$	
Corretto funzionamento	$ V < V_{SAT}$ $ I_O < I_{O_MAX}$	
Parametri circuitali	$R_f \text{ -- } V_{SAT} \text{ -- } I_{O_MAX}$	
Parametri funzionali	relazione I/O -- I_{min} -- I_{MAX}	

Problema di analisi

Analizzare il seguente convertitore $I \rightarrow V$ senza offset.	<u>Dati</u>	<u>Quesiti</u>
	$V_{CC} = \pm 15$ $V_{SAT} = 90\% \text{ di } V_{CC}$ $R_f = 58 \cdot 10^3$	1) Relazione ingresso-uscita 2) Corretto funzionamento 3) Rappresentazione grafica.

Quesito 1. Relazione ingresso-uscita.

$$1) \quad V = -R_f \cdot I \quad [R_f = 58 \cdot 10^3 \text{ dato}] \quad \Rightarrow \quad V = (-58 \cdot 10^3) \cdot I$$

Quesito 2. Corretto funzionamento.

Valutiamo il corretto funzionamento solo in relazione a V_{SAT} .

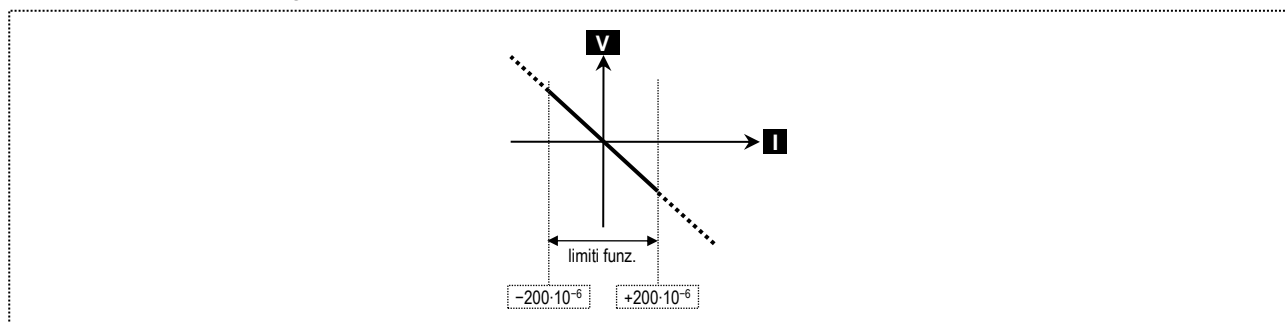
$$2) \quad V_{SAT} = V_{CC} \cdot \frac{90}{100} \quad [V_{CC} = 15 \text{ dato}] \quad \Rightarrow \quad V_{SAT} = 13,5$$

$$3) \quad |V| < V_{SAT} \quad \begin{cases} V = (-58 \cdot 10^3) \cdot I & \text{calcolo 1} \\ V_{SAT} = 13,5 & \text{calcolo 2} \end{cases} \quad \Rightarrow \quad |(-58 \cdot 10^3) \cdot I| < 13,5$$

questa disequazione si trasforma nel sistema:

$$\begin{cases} (-58 \cdot 10^3) \cdot I > -13,5 \\ (-58 \cdot 10^3) \cdot I < +13,5 \end{cases} \quad \text{risolvendo} \Rightarrow \quad \begin{cases} I > -233 \cdot 10^{-6} \\ I < +233 \cdot 10^{-6} \end{cases} \quad \text{da cui la scelta} \Rightarrow \quad \begin{cases} I_{min} = -200 \cdot 10^{-6} \\ I_{MAX} = +200 \cdot 10^{-6} \end{cases}$$

Quesito 3. Rappresentazione grafica.



Problema di progetto

Progettare un convertitore
I→V senza offset avente le
seguenti caratteristiche.

Dati dell'AQ

$V_{CC} = \pm 15$
 $V_{SAT} = 90\% \text{ di } V_{CC}$

Specifiche di progetto

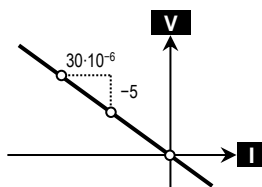
Relazione lineare in cui:
 $I=0 \rightarrow V_O=0$
 $\Delta I=30 \cdot 10^{-6} \rightarrow \Delta V_O=-5$

Quesiti

- 1) Dimensionamento del circuito
- 2) Corretto funzionamento
- 3) Rappresentazione grafica

Quesito1. Dimensionamento del circuito.

- 1) Relazione ingresso-uscita indicata dalle
specifiche di progetto:



da cui l'equazione $\rightarrow V = (-167 \cdot 10^3) \cdot I$

- 2) Relazione I/O offerta dal circuito: $V = -R_f \cdot I$

- 3) Uguagliando i coefficienti si ottiene: $-R_f = -167 \cdot 10^3$ risolvendo $\rightarrow R_f = 167 \cdot 10^3$

Quesito 2. Corretto funzionamento.

Valutiamo il corretto funzionamento solo in relazione a V_{SAT} .

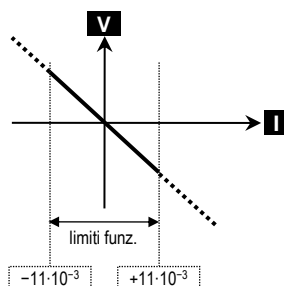
- 4) $V_{SAT} = V_{CC} \cdot \frac{90}{100}$ [$V_{CC} = 15$ dato] $\rightarrow V_{SAT} = 13,5$

- 5) $|V| < V_{SAT}$ $\left[\begin{array}{l} V = (-167 \cdot 10^3) \cdot I \text{ calcolo 1} \\ V_{SAT} = 13,5 \text{ calcolo 4} \end{array} \right.$ $\rightarrow |(-167 \cdot 10^3) \cdot I| < 13,5$

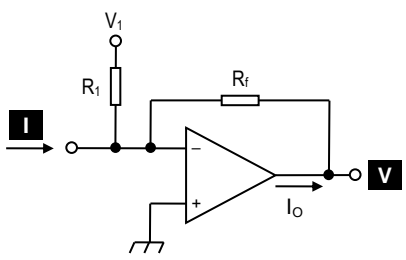
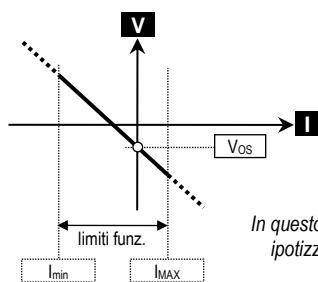
questa disequazione si trasforma nel sistema:

$$\begin{cases} (-167 \cdot 10^3) \cdot I > -13,5 \\ (-167 \cdot 10^3) \cdot I < +13,5 \end{cases} \quad \text{risolvendo} \rightarrow \begin{cases} I > -12,37 \cdot 10^{-3} \\ I < +12,37 \cdot 10^{-3} \end{cases} \quad \text{da cui la scelta} \rightarrow \begin{cases} I_{min} = -11 \cdot 10^{-3} \\ I_{MAX} = +11 \cdot 10^{-3} \end{cases}$$

Quesito 3. Rappresentazione grafica.



Esercizi - Convertitore I→V con offset (invertente)

RICHIAMI DI TEORIA		
		<p>La dicitura "con offset" indica che relazione $I \rightarrow V$ non passa per l'origine.</p>
Relazione I/O	$V = -R_f \cdot I - \frac{R_f}{R_1} \cdot V_1$	 <p>In questo schema si è ipotizzato $V_{os} < 0$.</p>
Tensione di offset	$V_{OS} = -\frac{R_f}{R_1} \cdot V_1$	
Corretto funzionamento	$ V < V_{SAT}$ $ I_O < I_{O_MAX}$	
Parametri circuitali	$R_1 \text{ -- } R_f \text{ -- } V_1 \text{ -- } V_{SAT} \text{ -- } I_{O_MAX}$	
Parametri funzionali	relazione I/O -- V_{OS} -- I_{min} -- I_{MAX}	

Problema di analisi

<p>Analizzare il seguente convertitore I→V con offset.</p>	<p>Dati</p> $V_{CC} = \pm 15$ $V_{SAT} = 90\% \text{ di } V_{CC}$ $R_f = 15 \cdot 10^3$ $R_1 = 10 \cdot 10^3$ $V_1 = 4$	<p>Quesiti</p> <p>1) Relazione ingresso-uscita 2) Corretto funzionamento 3) Rappresentazione grafica.</p>

Quesito 1. Relazione ingresso-uscita.

$$1) \quad V = -R_f \cdot I - \frac{R_f}{R_1} \cdot V_1 \quad \left[\begin{array}{l} R_f = 15 \cdot 10^3 \text{ dato} \\ V_1 = 4 \text{ dato} \\ R_1 = 10 \cdot 10^3 \text{ dato} \end{array} \right. \quad \rightarrow \quad V = (-15 \cdot 10^3) \cdot I - 6$$

Quesito 2. Corretto funzionamento.

Valutiamo il corretto funzionamento solo in relazione a V_{SAT} .

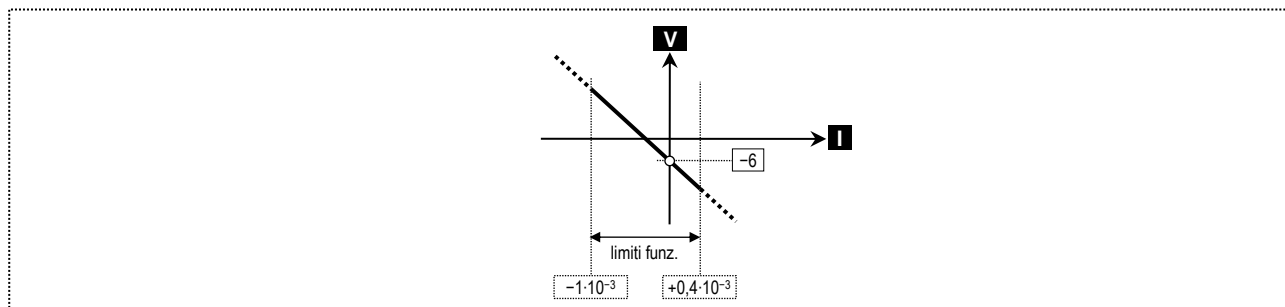
$$2) \quad V_{SAT} = V_{CC} \cdot \frac{90}{100} \quad [V_{CC} = 15 \text{ dato}] \quad \rightarrow \quad V_{SAT} = 13,5$$

$$3) \quad |V| < V_{SAT} \quad \left[\begin{array}{l} V = (-15 \cdot 10^3) \cdot I - 6 \text{ calcolo 1} \\ V_{SAT} = 13,5 \text{ calcolo 2} \end{array} \right. \quad \rightarrow \quad |(-15 \cdot 10^3) \cdot I - 6| < 13,5$$

questa disequazione si trasforma nel sistema:

$$\begin{cases} (-15 \cdot 10^3) \cdot I - 6 > -13,5 \\ (-15 \cdot 10^3) \cdot I - 6 < +13,5 \end{cases} \quad \text{risolvendo} \rightarrow \quad \begin{cases} I > -1,3 \cdot 10^{-3} \\ I < +0,5 \cdot 10^{-3} \end{cases} \quad \text{da cui la scelta} \rightarrow \quad \begin{cases} I_{min} = -1 \cdot 10^{-3} \\ I_{MAX} = +0,4 \cdot 10^{-3} \end{cases}$$

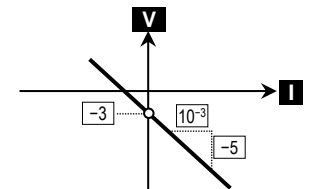
Quesito 3. Rappresentazione grafica.



Problema di progetto

Progettare un convertitore $I \rightarrow V$ con offset avente le seguenti caratteristiche.	Dati dell'AO $V_{CC} = \pm 15$ $V_{SAT} = 90\% \text{ di } V_{CC}$	Specifiche di progetto Relazione lineare in cui: $I=0 \rightarrow V_0=-3$ $\Delta I=10^{-3} \rightarrow \Delta V_0=-5$	Quesiti 1) Dimensionamento del circuito 2) Corretto funzionamento 3) Rappresentazione grafica
---	---	--	---

Quesito 1. Dimensionamento del circuito.

- 1) Relazione I/O indicata dalle specifiche di progetto:
- 
- da cui l'equazione $\rightarrow V = (-5 \cdot 10^3) \cdot I - 3$
- 2) Relazione I/O offerta dal circuito: $V = -R_f \cdot I - \frac{R_f}{R_1} \cdot V_1$
- 3) Uguagliando i coefficienti si ottiene:
- $$\begin{cases} -R_f = -5 \cdot 10^3 \\ -\frac{R_f}{R_1} \cdot V_1 = -3 \end{cases} \quad \text{risolvendo} \rightarrow \begin{cases} V_1 = 10 \text{ scelta} \\ R_1 = 16,67 \cdot 10^3 \\ R_f = 5 \cdot 10^3 \end{cases}$$

Quesito 2. Corretto funzionamento.

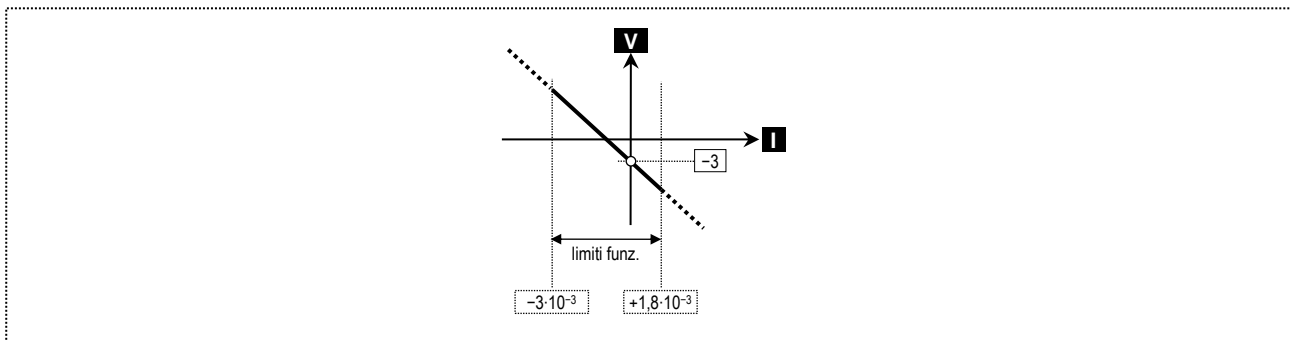
Valutiamo il corretto funzionamento solo in relazione a V_{SAT} .

- 4) $V_{SAT} = V_{CC} \cdot \frac{90}{100} \quad [V_{CC} = 15 \text{ dato}] \quad \rightarrow \quad V_{SAT} = 13,5$
- 5) $|V| < V_{SAT} \quad \begin{cases} V = (-5 \cdot 10^3) \cdot I - 3 \text{ calcolo 1} \\ V_{SAT} = 13,5 \text{ calcolo 4} \end{cases} \quad \rightarrow \quad |(-5 \cdot 10^3) \cdot I - 3| < 13,5$

questa disequazione si trasforma nel sistema:

$$\begin{cases} (-5 \cdot 10^3) \cdot I - 3 > -13,5 \\ (-5 \cdot 10^3) \cdot I - 3 < +13,5 \end{cases} \quad \text{risolvendo} \rightarrow \begin{cases} I > -3,3 \cdot 10^{-3} \\ I < +2,1 \cdot 10^{-3} \end{cases} \quad \text{da cui la scelta} \rightarrow \begin{cases} I_{min} = -3 \cdot 10^{-3} \\ I_{MAX} = +1,8 \cdot 10^{-3} \end{cases}$$

Quesito 3. Rappresentazione grafica.

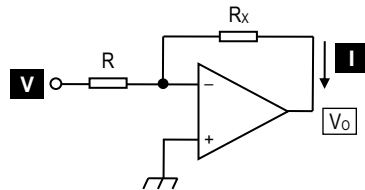


6.2 -- Convertitore tensione→corrente

Il convertitore $V \rightarrow I$ (non invertente) riceve in ingresso una tensione V e fornisce in uscita una corrente I proporzionale alla tensione di ingresso. Questo circuito è realizzato nei tipi: senza riferimento a massa e con riferimento a massa.

Convertitore $V \rightarrow I$ senza riferimento a massa

Il convertitore $V \rightarrow I$ senza riferimento a massa è rappresentato nella figura seguente. Dopo il circuito sono riportate le sue formule di dimensionamento.



La corrente di uscita I attraversa una resistenza R_X che non ha terminali a massa.

Relazione I/O	$I = \frac{1}{R} \cdot V$	
Corretto funzionamento	$ V_O < V_{SAT}$ dove $V_O = -\frac{R_X}{R} \cdot V$ $ I_O < I_{O_MAX}$	
Parametri circuitali	$R \text{ -- } R_X \text{ -- } V_{SAT} \text{ -- } I_{O_MAX}$	
Parametri funzionali	relazione I/O -- V_{min} -- V_{MAX}	

Analisi del circuito

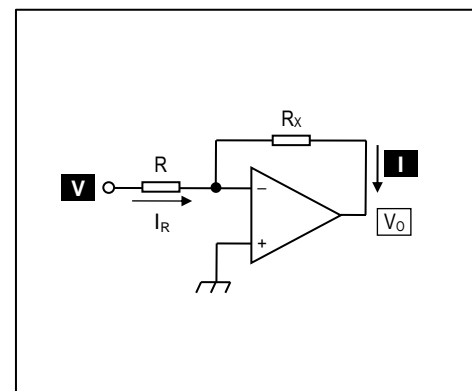
- Dimostrazione della relazione I/O.

$$V \xrightarrow{A} I_R \xrightarrow{B} I$$

A) $I_R = \frac{V}{R}$

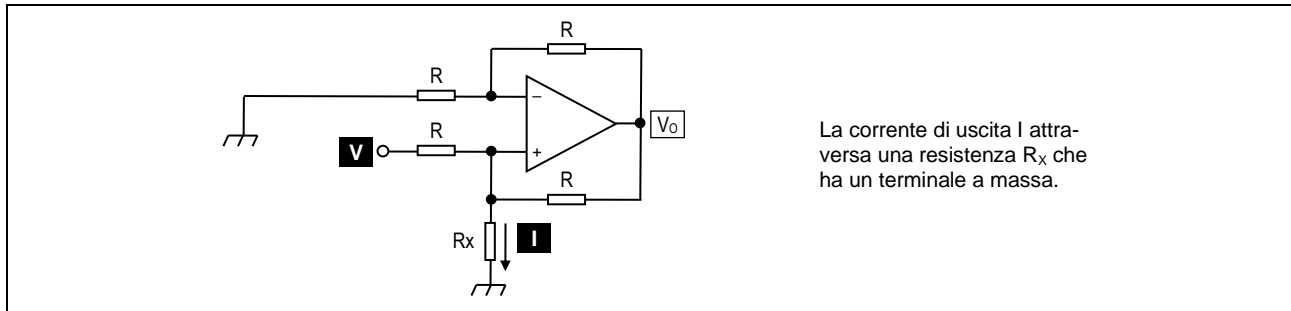
B) $I = I_R$ sostituendo $I = \frac{1}{R} \cdot V$

- Corretto funzionamento.
Nell'utilizzare questo circuito occorre rispettare i limiti di funzionamento dell'AO funzionante in regime lineare. Questi limiti sono:
 $|V_O| < V_{SAT} \quad - \quad |I_O| < I_{O_MAX}$



Convertitore $V \rightarrow I$ con riferimento a massa

Il convertitore $V \rightarrow I$ con riferimento a massa è rappresentato nella figura seguente. Dopo il circuito sono riportate le sue formule di dimensionamento.



La corrente di uscita I attraversa una resistenza R_X che ha un terminale a massa.

Relazione I/O	$I = \frac{1}{R} \cdot V$	
Corretto funzionamento	$ V_O < V_{SAT}$ dove $V_O = \frac{2 \cdot R_X}{R} \cdot V$ $ I_O < I_{O_MAX}$	
Parametri circuitali	$R \text{ -- } R_X \text{ -- } V_{SAT} \text{ -- } I_{O_MAX}$	
Parametri funzionali	relazione I/O -- V_{min} -- V_{MAX}	

Analisi del circuito

• Dimostrazione della relazione I/O.

La corrente I che costituisce la variabile di uscita del circuito vale:

$$I = I_1 + I_2$$

essendo $I_1 = \frac{V - V_+}{R}$ e $I_2 = \frac{V_O - V_+}{R}$ sostituendo si ottiene:

$$I = \frac{V - V_+}{R} + \frac{V_O - V_+}{R}$$

essendo infine $V_+ = V_- = \frac{V_O}{2}$ sostituendo si ottiene:

$$I = \frac{1}{R} \cdot V.$$

• Corretto funzionamento.

Nell'utilizzare questo circuito occorre rispettare i limiti di funzionamento dell'AO funzionante in regime lineare. Questi limiti sono:

$$|V_O| < V_{SAT} \quad \text{e} \quad |I_O| < I_{O_MAX}.$$

Calcoliamo il valore di V_O da inserire nel limite riguardante la V_{SAT} .

Dall'analisi del circuito riportata sopra si ha:

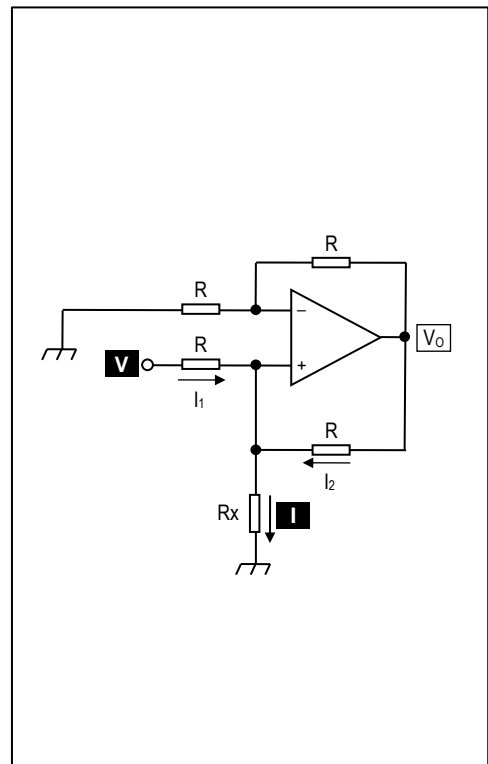
$$V_O = 2 \cdot V_+.$$

Poiché vale $V_+ = R_X \cdot I$ sostituendo si ottiene:

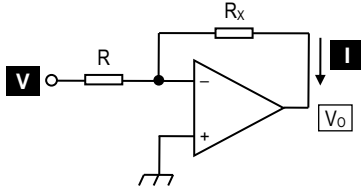
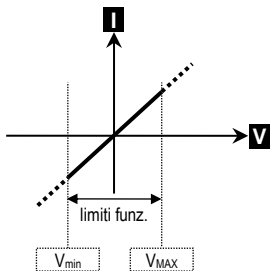
$$V_O = 2 \cdot R_X \cdot I.$$

Poiché vale $I = V/R$ (risultato finale della dimostrazione di sopra), sostituendo si ottiene:

$$V_O = \frac{2 \cdot R_X}{R} \cdot V.$$



Esercizi - Convertitore $V \rightarrow I$ senza riferimento a massa (non invertente)

RICHIAMI DI TEORIA		
		La corrente di uscita I attraversa una resistenza R_X che non ha terminali a massa.
Relazione I/O	$I = \frac{1}{R} \cdot V$	
Corretto funzionamento	$ V_O < V_{SAT}$ dove $V_O = -\frac{R_X}{R} \cdot V$ $ I_O < I_{O_MAX}$	
Parametri circuitali	$R \text{ -- } R_X \text{ -- } V_{SAT} \text{ -- } I_{O_MAX}$	
Parametri funzionali	relazione I/O -- V_{min} -- V_{MAX}	

Problema di analisi

Analizzare il seguente convertitore $V \rightarrow I$ senza riferimento a massa.	Dati $V_{CC} = \pm 15$ $V_{SAT} = 90\% \text{ di } V_{CC}$ $R = 50 \cdot 10^3$ $R_X = 10 \cdot 10^3$	Quesiti 1) Relazione ingresso-uscita 2) Corretto funzionamento 3) Rappresentazione grafica.

Quesito 1. Relazione ingresso-uscita.

$$1) \quad I = \frac{1}{R} \cdot V \quad [R = 50 \cdot 10^3 \text{ dato}] \quad \rightarrow \quad I = (20 \cdot 10^{-6}) \cdot V$$

Quesito 2. Corretto funzionamento.

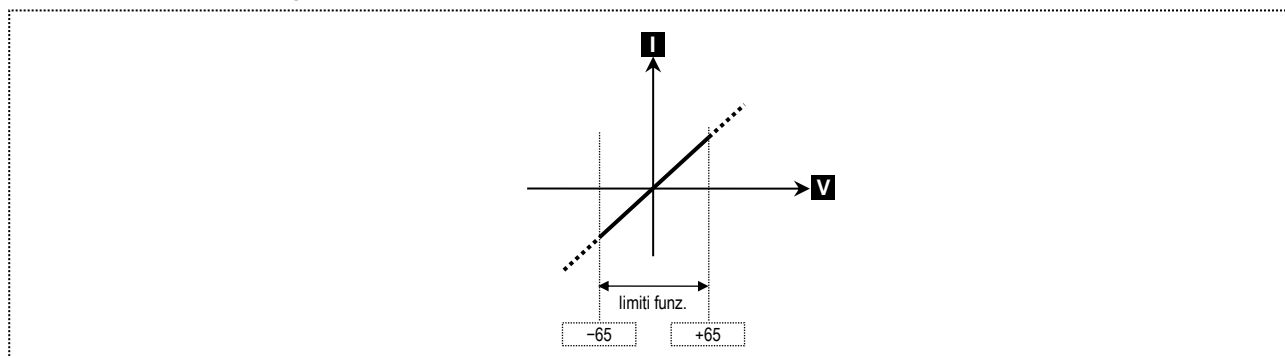
Valutiamo il corretto funzionamento solo in relazione a V_{SAT} .

$$\begin{aligned}
 2) \quad V_{SAT} &= V_{CC} \cdot \frac{90}{100} \quad [V_{CC} = 15 \text{ dato}] \quad \rightarrow \quad V_{SAT} = 13,5 \\
 3) \quad V_O &= -\frac{R_X}{R} \cdot V \quad \left[\begin{array}{l} R_X = 10 \cdot 10^3 \text{ dato} \\ R = 50 \cdot 10^3 \text{ dato} \end{array} \right] \quad \rightarrow \quad V_O = -0,2 \cdot V \\
 4) \quad |V_O| < V_{SAT} \quad \left[\begin{array}{l} V_O = -0,2 \cdot V \text{ calcolo 3} \\ V_{SAT} = 13,5 \text{ calcolo 2} \end{array} \right] \quad \rightarrow \quad |-0,2 \cdot V| < 13,5
 \end{aligned}$$

questa disequazione si trasforma nel sistema:

$$\begin{cases} -0,2 \cdot V > -13,5 \\ -0,2 \cdot V < +13,5 \end{cases} \quad \text{risolvendo} \rightarrow \quad \begin{cases} V > -67,5 \\ V < +67,5 \end{cases} \quad \text{da cui la scelta} \rightarrow \quad \begin{cases} V_{min} = -65 \\ V_{MAX} = +65 \end{cases}$$

Quesito 3. Rappresentazione grafica.

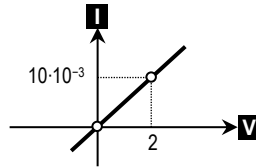


Problema di progetto

Analizzare il seguente convertitore $V \rightarrow I$ senza riferimento a massa.	Caratteristiche AO $V_{CC} = \pm 15$ $V_{SAT} = 90\% \text{ di } V_{CC}$	Specifiche di progetto Relazione lineare in cui: $V=0 \rightarrow I=0$ $V=2 \rightarrow I=10 \cdot 10^{-3}$ $R_X = 1 \cdot 10^3$	Quesiti 1) Dimensionamento del circuito 2) Corretto funzionamento 3) Rappresentazione grafica
--	---	---	---

Quesito 1. Dimensionamento del circuito.

- 1) Relazione ingresso-uscita indicata dalle specifiche di progetto:



da cui l'equazione $\rightarrow I = (5 \cdot 10^{-3}) \cdot V$

- 2) Relazione I/O offerta dal circuito: $I = \frac{1}{R} \cdot V$

- 3) Uguagliando i coefficienti si ottiene: $\frac{1}{R} = 5 \cdot 10^{-3}$ risolvendo $\rightarrow R = 0,2 \cdot 10^3$

Quesito 2. Corretto funzionamento.

Valutiamo il corretto funzionamento soltanto in relazione a V_{SAT} .

4) $V_{SAT} = V_{CC} \cdot \frac{90}{100}$ $[V_{CC} = 15 \text{ dato}] \rightarrow V_{SAT} = 13,5$

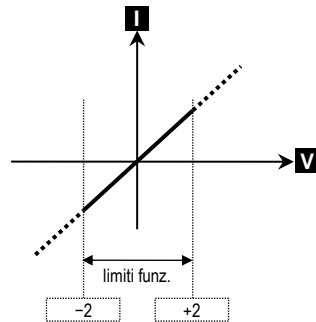
5) $V_O = -\frac{R_X}{R} \cdot V$ $\begin{cases} R_X = 1 \cdot 10^3 \text{ dato} \\ R = 0,2 \cdot 10^3 \text{ calcolo 3} \end{cases} \rightarrow V_O = -5 \cdot V$

6) $|V_O| < V_{SAT}$ $\begin{cases} V_O = -5 \cdot V \text{ calcolo 5} \\ V_{SAT} = 13,5 \text{ calcolo 4} \end{cases} \rightarrow |-5 \cdot V| < 13,5$

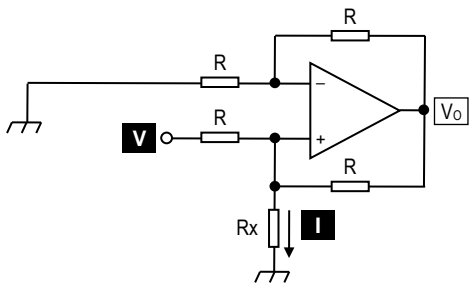
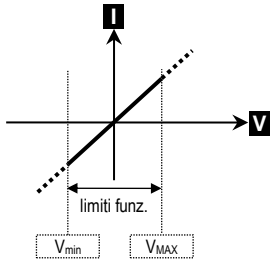
questa disequazione si trasforma nel sistema:

$\begin{cases} -5 \cdot V > -13,5 \\ -5 \cdot V < +13,5 \end{cases}$ risolvendo $\rightarrow \begin{cases} V > -2,7 \\ V < +2,7 \end{cases}$ da cui la scelta $\rightarrow \begin{cases} V_{min} = -2 \\ V_{MAX} = +2 \end{cases}$

Quesito 3. Rappresentazione grafica.



Esercizi - Convertitore $V \rightarrow I$ con riferimento a massa (non invertente)

RICHIAMI DI TEORIA		
		La corrente di uscita I attraversa una resistenza R_X che ha un terminale a massa.
Relazione I/O	$I = \frac{1}{R} \cdot V$	
Corretto funzionamento	$ V_O < V_{SAT}$ dove $V_O = \frac{2 \cdot R_X}{R} \cdot V$ $ I_O < I_{O_MAX}$	
Parametri circuitali	$R \text{ -- } R_X \text{ -- } V_{SAT} \text{ -- } I_{O_MAX}$	
Parametri funzionali	relazione I/O -- V_{min} -- V_{MAX}	

Problema di analisi

Analizzare il seguente convertitore $V \rightarrow I$ con riferimento a massa.	Dati	Quesiti
	$V_{CC} = \pm 15$ $V_{SAT} = 90\% \text{ di } V_{CC}$ $R = 50 \cdot 10^3$ $R_X = 25 \cdot 10^3$	1) Relazione ingresso-uscita 2) Corretto funzionamento 3) Rappresentazione grafica.

Quesito 1. Relazione ingresso-uscita.

$$1) \quad I = \frac{1}{R} \cdot V \quad [R = 50 \cdot 10^3 \text{ dato}] \quad \rightarrow \quad I = (20 \cdot 10^{-6}) \cdot V$$

Quesito 2. Corretto funzionamento.

Valutiamo il corretto funzionamento solo in relazione a V_{SAT} .

$$2) \quad V_{SAT} = V_{CC} \cdot \frac{90}{100} \quad [V_{CC} = 15 \text{ dato}] \quad \rightarrow \quad V_{SAT} = 13,5$$

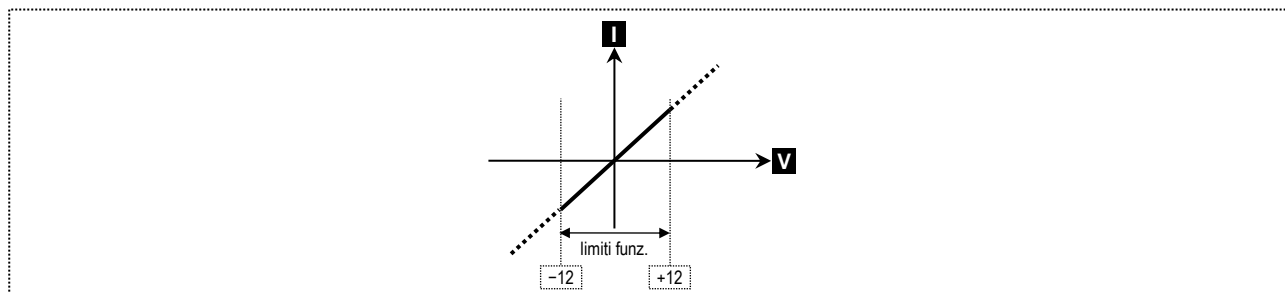
$$3) \quad V_O = \frac{2 \cdot R_X}{R} \cdot V \quad \left[\begin{array}{l} R_X = 25 \cdot 10^3 \text{ dato} \\ R = 50 \cdot 10^3 \text{ dato} \end{array} \right] \quad \rightarrow \quad V_O = V$$

$$4) \quad |V_O| < V_{SAT} \quad \left[\begin{array}{l} V_O = V \text{ calcolo 3} \\ V_{SAT} = 13,5 \text{ calcolo 2} \end{array} \right] \quad \rightarrow \quad |V| < 13,5$$

questa disequazione si trasforma nel sistema:

$$\begin{cases} V > -13,5 \\ V < +13,5 \end{cases} \quad \text{risolvendo} \rightarrow \quad \begin{cases} V > -13,5 \\ V < +13,5 \end{cases} \quad \text{da cui la scelta} \rightarrow \quad \begin{cases} V_{min} = -12 \\ V_{MAX} = +12 \end{cases}$$

Quesito 3. Rappresentazione grafica.



Problema di progetto

Progettare il seguente convertitore $V \rightarrow I$ con riferimento a massa.

Caratteristiche AO

$$V_{CC} = \pm 15$$

$$V_{SAT} = 90\% \text{ di } V_{CC}$$

Specifiche di progetto

Relazione lineare in cui:

$$V=0 \rightarrow I=0$$

$$V=2 \rightarrow I=10 \cdot 10^{-3}$$

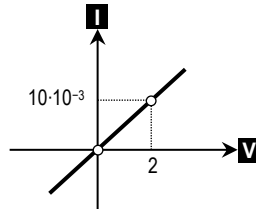
$$R_x = 1 \cdot 10^3$$

Quesiti

- 1) Dimensionamento del circuito
- 2) Corretto funzionamento
- 3) Rappresentazione grafica

Quesito 1. Dimensionamento del circuito.

- 1) Relazione ingresso-uscita indicata dalle specifiche di progetto:



da cui l'equazione \rightarrow

$$I = (5 \cdot 10^{-3}) \cdot V$$

- 2) Relazione I/O offerta dal circuito:

$$I = \frac{1}{R} \cdot V$$

- 3) Uguagliando i coefficienti si ottiene:

$$\frac{1}{R} = 5 \cdot 10^{-3}$$

risolvendo \rightarrow

$$R = 0,2 \cdot 10^3$$

Quesito 2. Corretto funzionamento.

Valutiamo il corretto funzionamento solo in relazione a V_{SAT} e con una resistenza di carico $R_x = 1 \cdot 10^3$.

$$4) V_{SAT} = V_{CC} \cdot \frac{90}{100}$$

$$[V_{CC} = 15 \text{ dato}]$$

\rightarrow

$$V_{SAT} = 13,5$$

$$5) V_O = \frac{2 \cdot R_x}{R} \cdot V$$

$$\left[\begin{array}{l} R_x = 1 \cdot 10^3 \text{ dato} \\ R = 0,2 \cdot 10^3 \text{ calcolo 3} \end{array} \right]$$

\rightarrow

$$V_O = 10 \cdot V$$

$$6) |V_O| < V_{SAT}$$

$$\left[\begin{array}{l} V_O = 10 \cdot V \text{ calcolo 5} \\ V_{SAT} = 13,5 \text{ calcolo 4} \end{array} \right]$$

\rightarrow

$$|10 \cdot V| < 13,5$$

questa disequazione si trasforma nel sistema:

$$\begin{cases} 10 \cdot V > -13,5 \\ 10 \cdot V < +13,5 \end{cases}$$

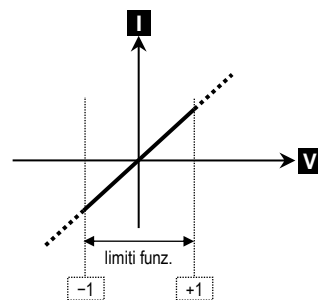
risolvendo \rightarrow

$$\begin{cases} V > -1,35 \\ V < +1,35 \end{cases}$$

da cui la scelta \rightarrow

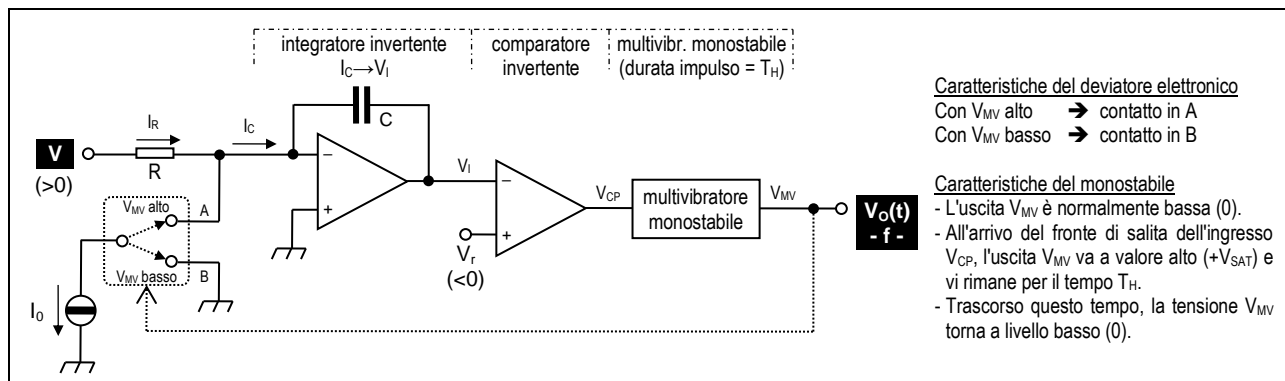
$$\begin{cases} V_{min} = -1 \\ V_{MAX} = +1 \end{cases}$$

Quesito 3. Rappresentazione grafica.



6.3 -- Convertitore tensione→frequenza

Il convertitore $V \rightarrow f$ riceve in ingresso una tensione positiva costante V e fornisce in uscita una tensione periodica $V_O(t)$ avente la forma di onda quadra con frequenza f proporzionale alla tensione di ingresso V . La figura seguente mostra il circuito che realizza questa funzionalità. Dopo il circuito sono riportate le sue formule di dimensionamento.



Relazione I/O	$f = \frac{1}{R \cdot I_0 \cdot T_H} \cdot V$	
Corretto funzionamento	Per entrambi gli AO occorre: $ V_O < V_{SAT} \quad - \quad I_O < I_{O_MAX}$	
	1) $ V_r < V_{SAT}$	
	2) $V_{MAX} < R \cdot I_0$	
	3) $f_{MAX} < \frac{1}{T_H}$	
Parametri circuitali	$R \quad I_0 \quad C \quad V_r \quad T_H \quad V_{SAT} \quad I_{O_MAX}$	
Parametri funzionali	relazione I/O $\quad V_{MAX} \quad f_{MAX}$	

Analisi del circuito

- Dimostrazione della relazione I/O e condizioni per il corretto funzionamento.

Tratto (0→1): Transitorio iniziale.

- > Ipotizziamo che il condensatore sia inizialmente scarico. Segue che: $V_I=0$, $V_{CP}=-V_{SAT}$, $V_{MV}=0$, il deviatore è nella posizione B.
- > A partire dall'istante 0 il condensatore si carica in maniera lineare alimentato dalla corrente I_C che vale:

$$I_C = I_R \quad (> 0).$$
- > Poichè la corrente I_C è positiva, la tensione V_I scende secondo la formula:

$$V_I = -\frac{I_C}{C} \cdot t = \text{(sostituendo } I_C) = -\frac{I_R}{C} \cdot t.$$

Tratto (1→2): Periodo, intervallo alto.

- > Appena V_{CV} scende sotto V_r , la tensione V_{CP} del comparatore commuta da $-V_{SAT}$ a $+V_{SAT}$. Ciò si verifica solo se è soddisfatta la condizione:
 $|V_r| < V_{SAT}$. (**corretto funzionamento, formula 1**).
- > Su questo fronte di salita di V_{CP} il multivibratore fa partire il suo impulso di uscita positivo della durata di T_H . Poichè V_{MV} va a valore alto, il deviatore si sposta in A.
- > Col deviatore posto in A la corrente I_C vale:

$$I_C = I_R - I_0 \quad (< 0).$$
 In questa equazione I_C deve essere negativa. Ciò si ottiene con la condizione:
 $I_{R_MAX} < I_0$, ossia $V_{MAX} < R \cdot I_0$. (**corretto funzionamento, formula 2**).
- > Poichè la corrente I_C è negativa, la tensione V_I sale secondo la formula:

$$V_I = -\frac{I_C}{C} \cdot t = \text{[sostituendo } I_C = I_R - I_0] = -\frac{I_R - I_0}{C} \cdot t.$$
 Notiamo che la tensione V_I , salendo, diventa subito maggiore di V_r , quindi V_{CP} torna subito a $-V_{SAT}$.
- > La salita di V_I va avanti per tutta la durata T_H dell'impulso di uscita V_{MV} del multivibratore, quindi in questo intervallo di tempo la tensione V_I sale di:

$$\Delta V_{I(1-2)} = -\frac{I_R - I_0}{C} \cdot T_H.$$

Tratto (2→3): Periodo, intervallo basso.

- > Terminato l'impulso di uscita del multivibratore, il deviatore torna alla sua posizione precedente B, e così l'integratore torna ad essere alimentato dalla sola corrente I_R , quindi:

$$I_C = I_R \quad (> 0) .$$

- > Poichè la corrente I_C è positiva, la tensione V_I scende secondo la formula:

$$V_I = -\frac{I_C}{C} \cdot t = \left[\text{sostituendo } I_C = I_R \right] = -\frac{I_R}{C} \cdot t .$$

- > La discesa di V_{CV} va avanti fino a che essa scende sotto V_r , istante nel quale il comparatore commuta da $-V_{SAT}$ a $+V_{SAT}$. In questo intervallo, in cui l'uscita $V_O(t)$ è bassa (durata T_L), la tensione V_I scende di:

$$\Delta V_{I(2-3)} = -\frac{I_R}{C} \cdot T_L .$$

Conclusione.

- > Poichè si deve avere necessariamente:

$$\Delta V_{I(1-2)} = -\Delta V_{I(2-3)}$$

sostituendo i rispettivi valori si ottiene:

$$-\frac{I_R - I_0}{C} \cdot T_H = \frac{I_R}{C} \cdot T_L .$$

- > Essendo $T_L = T - T_H$, sostituendo si ottiene:

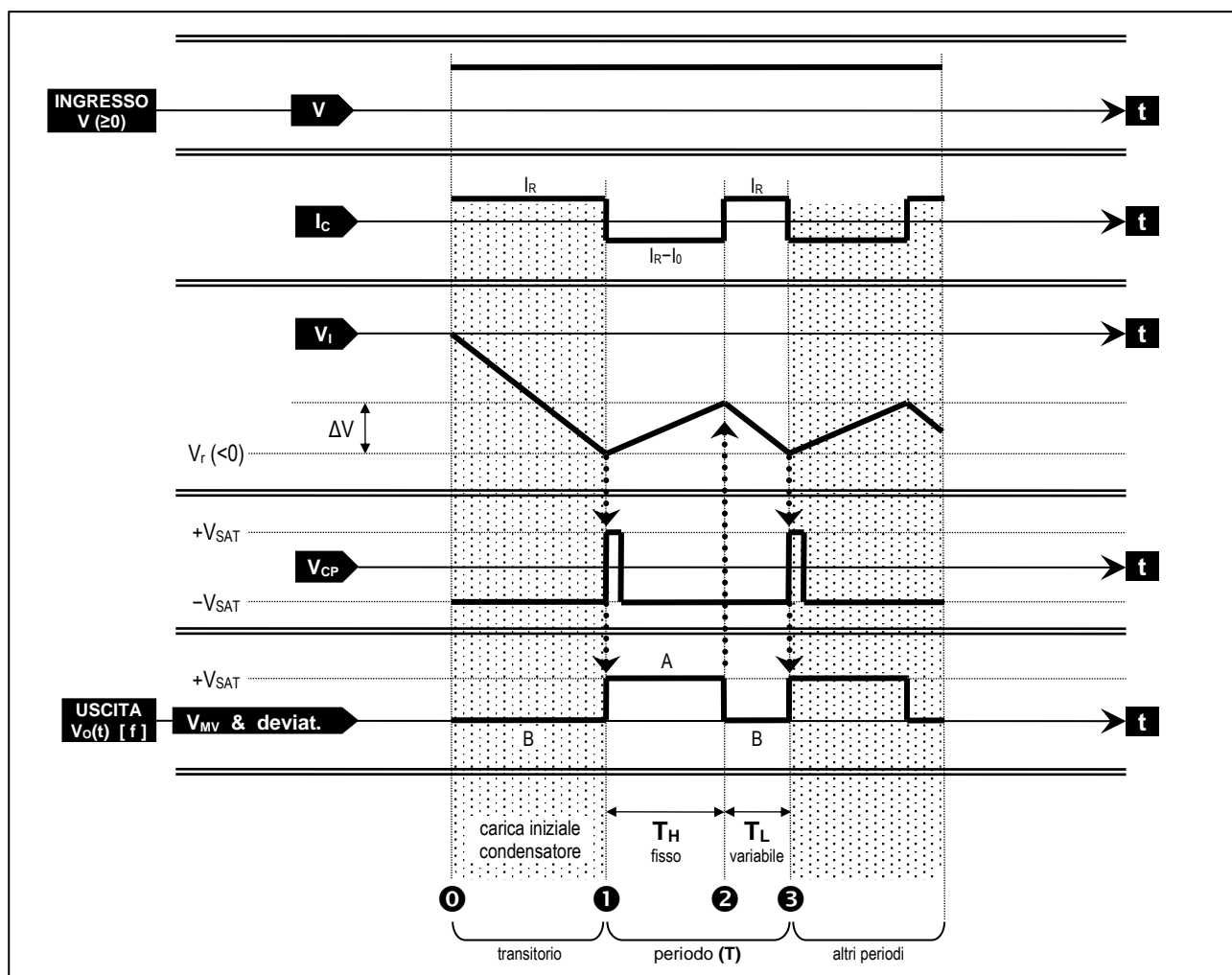
$$T = \frac{I_0 \cdot T_H}{I_R} .$$

Poichè deve essere $T > T_H$, segue che $T_{min} > T_H$, da cui:

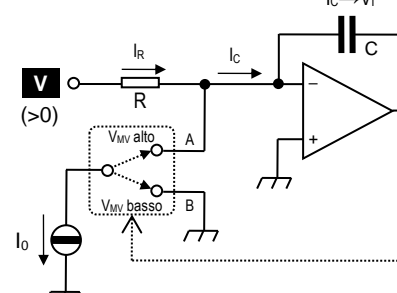
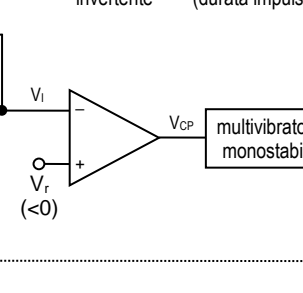
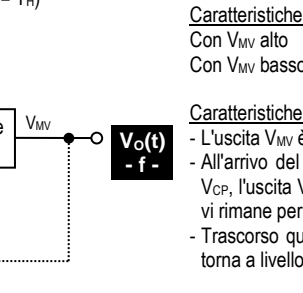
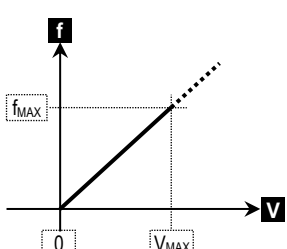
$$f_{MAX} < (1/T_H) \quad (\text{corretto funzionamento, formula 3}) .$$

- > Infine, ponendo $T = 1/f$ [f = frequenza dell'onda quadra di uscita] e ricordando $I_R = V/R$, questa formula diventa:

$$f = \frac{1}{R \cdot I_0 \cdot T_H} \cdot V \quad (\text{relazione I/O})$$



Esercizi - Convertitore $V \rightarrow f$

RICHIAMI DI TEORIA		
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;"> <p>integratore invertente $I_C \rightarrow V_I$</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>comparatore invertente</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>multivibr. monostabile (durata impulso = T_H)</p>  </div> </div> <div style="margin-top: 20px;"> <p>Caratteristiche del deviatore elettronico</p> <p>Con V_{MV} alto \rightarrow contatto in A</p> <p>Con V_{MV} basso \rightarrow contatto in B</p> <p>Caratteristiche del monostabile</p> <ul style="list-style-type: none"> - L'uscita V_{MV} è normalmente bassa (0). - All'arrivo del fronte di salita dell'ingresso V_{CP}, l'uscita V_{MV} va a valore alto ($+V_{SAT}$) e vi rimane per il tempo T_H. - Trascorso questo tempo, la tensione V_{MV} torna a livello basso (0). </div>		
Relazione I/O	$f = \frac{1}{R \cdot I_0 \cdot T_H} \cdot V$	
Corretto funzionamento	Per entrambi gli AO occorre: $ V_O < V_{SAT} \quad - \quad I_O < I_{O_MAX}$	
	1) $ V_r < V_{SAT}$	
	2) $V_{MAX} < R \cdot I_0$	
Parametri circuitali	$R \quad I_0 \quad C \quad V_r \quad T_H \quad V_{SAT} \quad I_{O_MAX}$	
Parametri funzionali	relazione I/O $\quad V_{MAX} \quad f_{MAX}$	

Problema di analisi

Analizzare il seguente convertitore $V \rightarrow f$.	<u>Dati</u>	<u>C</u>	<u>Quesiti</u>
	$V_{CC} = \pm 15$ $V_{SAT} = 13,5$ $R = 1 \cdot 10^3$	$C = 200 \cdot 10^{-9}$ $T_H = 1 \cdot 10^{-3}$ $I_0 = 50 \cdot 10^{-3}$ $V_r = -8$	1) Relazione ingresso-uscita 2) Corretto funzionamento 3) Rappresentazione grafica.

Quesito 1. Relazione ingresso-uscita.

$$1) \quad f = \frac{1}{R \cdot I_0 \cdot T_H} \cdot V \quad \begin{matrix} R = 1 \cdot 10^3 & \text{dato} \\ T_H = 1 \cdot 10^{-3} & \text{dato} \\ I_0 = 50 \cdot 10^{-3} & \text{dato} \end{matrix} \quad \rightarrow \quad f = 20 \cdot V$$

Quesito 2. Corretto funzionamento.

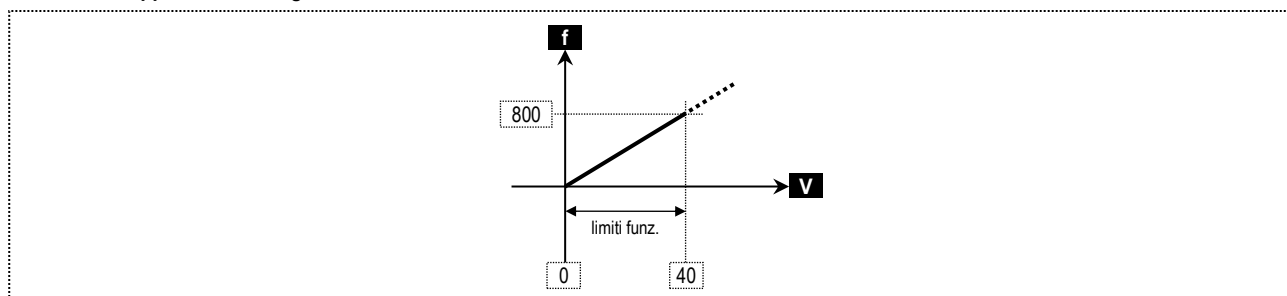
$$2) \quad V_{MAX} < R \cdot I_0 \quad \begin{matrix} R = 1 \cdot 10^3 & \text{dato} \\ I_0 = 50 \cdot 10^{-3} & \text{dato} \end{matrix} \quad \rightarrow \quad V_{MAX} < 50 \quad \text{scelta: } V_{MAX} = 40$$

$$3) \quad f_{MAX} = 20 \cdot V_{MAX} \quad [V_{MAX} = 40 \text{ calcolo 2}] \quad \rightarrow \quad f_{MAX} = 800$$

$$5) \quad f_{MAX} < \frac{1}{T_H} \quad \begin{matrix} f_{MAX} = 800 & \text{calcolo 3} \\ T_H = 10^{-3} & \text{dato} \end{matrix} \quad \rightarrow \quad 800 < 1000 \quad \text{controllo OK}$$

$$6) \quad |V_r| < V_{SAT} \quad \begin{matrix} V_{SAT} = 13,5 & \text{dato} \\ |V_r| = 8 & \text{dato} \end{matrix} \quad \rightarrow \quad 8 < 13,5 \quad \text{controllo OK}$$

Quesito 3. Rappresentazione grafica.

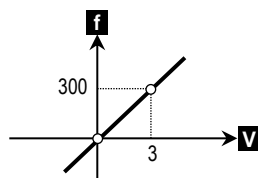


Problema di progetto

Progettare il seguente convertitore $V \rightarrow f$.	Caratteristiche AO $V_{CC} = \pm 15$ $V_{SAT} = 90\% \text{ di } V_{CC}$	Specifiche di progetto - Relazione lineare in cui: $V=0 \rightarrow f=0$ $V=3 \rightarrow f=300$ - Valore MAX di input: $V_{MAX}=4$	Quesiti 1) Dimensionamento del circuito 2) Corretto funzionamento 3) Rappresentazione grafica

Quesito 1. Dimensionamento del circuito.

- 1) Relazione ingresso-uscita indicata dalle specifiche di progetto:



da cui l'equazione $\rightarrow f = 100 \cdot V$

- 2) Relazione I/O offerta dal circuito: $f = \frac{1}{R \cdot I_0 \cdot T_H} \cdot V$

- 3) Uguagliando i coefficienti si ottiene: $\frac{1}{R \cdot I_0 \cdot T_H} = 100$

risolvendo \rightarrow

$$\begin{cases} I_0 = 5 \cdot 10^{-3} & \text{scelta} \\ T_H = 2 \cdot 10^{-3} & \text{scelta} \\ R = 1 \cdot 10^3 & \end{cases}$$

- 4) $V_{SAT} = V_{CC} \cdot \frac{90}{100}$ $[V_{CC} = 15 \text{ dato}] \rightarrow V_{SAT} = 13,5$

- 5) $|V_r| < |V_{SAT}|$ $[|V_{SAT}| = 13,5 \text{ calcolo 5}] \rightarrow |V_r| < 13,5 \rightarrow \text{scelta: } V_r = -8$

- 6) Il valore di C non è critico \rightarrow scelta: $C = 10 \cdot 10^{-6}$

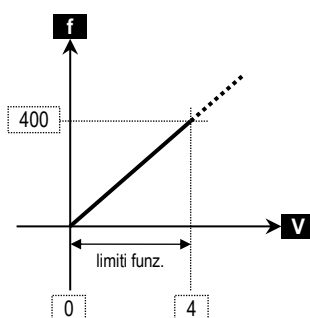
Quesito 2. Corretto funzionamento.

- 7) $V_{MAX} < R \cdot I_0$ $\begin{cases} V_{MAX} = 4 & \text{dato} \\ R = 1 \cdot 10^3 & \text{calcolo 1} \\ I_0 = 5 \cdot 10^{-3} & \text{scelta 1} \end{cases} \rightarrow 4 < 5 \text{ controllo OK}$

- 8) $f_{MAX} = 100 \cdot V_{MAX}$ (formula 1) $[V_{MAX} = 4 \text{ dato}] \rightarrow f_{MAX} = 400$

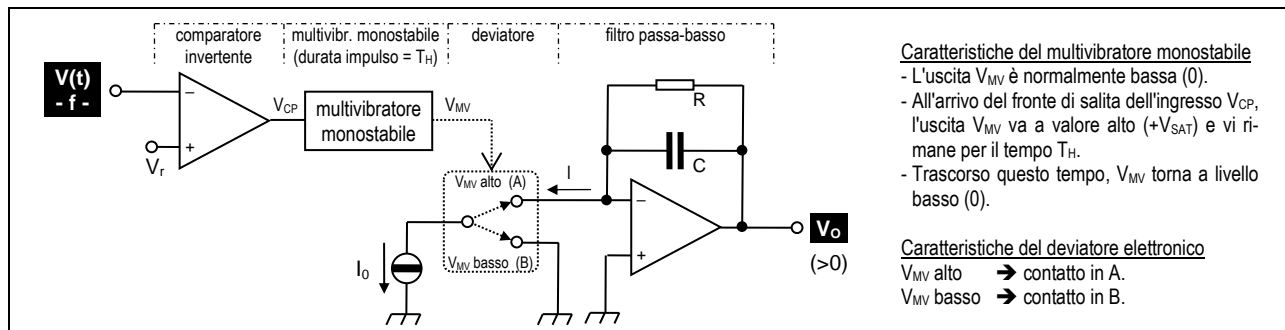
- 9) $T_H < \frac{1}{f_{MAX}}$ $\begin{cases} T_H = 2 \cdot 10^{-3} & \text{scelta 1} \\ f_{MAX} = 400 & \text{calcolo 8} \end{cases} \rightarrow 2 \cdot 10^{-3} < 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ controllo OK}$

Quesito 3. Rappresentazione grafica.



6.4 -- Convertitore frequenza→tensione

Il convertitore $f \rightarrow V_O$ (non invertente) riceve in ingresso una tensione periodica $V(t)$ avente frequenza f , e fornisce in uscita una tensione V_O proporzionale alla frequenza f della tensione di ingresso. La figura seguente mostra il circuito che realizza questa funzionalità. Dopo il circuito sono riportate le sue formule di dimensionamento.



Relazione I/O	$V_O = (R \cdot I_0 \cdot T_H) \cdot f$	
Corretto funzionamento	Per gli AO occorre: $ V_O < V_{SAT} \quad - \quad I_O < I_{O_MAX}$	
	1) $ V_r < V_{MAX}$	
	2) $T_H < \frac{1}{f_{MAX}}$	
	3) $f_{min} > 10 \cdot \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C}$	
Parametri circuitali	$R \quad I_0 \quad C \quad V_r \quad T_H \quad V_{SAT} \quad I_{O_MAX} \quad V_{MAX}$	
Parametri funzionali	relazione I/O $-- f_{min} \quad -- f_{MAX} \quad -- V_{O_min} \quad -- V_{O_MAX}$	

Analisi del circuito

- Dimostrazione della relazione I/O e corretto funzionamento.

Comparatore invertente.

- > Il comparatore confronta la forma d'onda periodica del segnale di ingresso $V(t)$ con la tensione costante V_r . Da questo confronto scaturisce l'onda quadra V_{CP} avente la stessa frequenza del segnale d'ingresso $V(t)$.
- > Il valore della tensione V_r può essere indifferentemente positivo o negativo, ma il suo modulo deve essere inferiore al massimo valore assunto da $V(t)$. Occorre, pertanto, che sia verificata la seguente relazione:

$$|V_r| < V_{MAX} \quad (\text{corretto funzionamento, formula 1}).$$

Multivibratore monostabile.

- > Ad ogni fronte di salita di V_{CP} il multivibratore, avente uscita normalmente bassa (valore 0), fa partire un impulso di uscita alto (valore $+V_{SAT}$) per il tempo T_H .
- > La durata T_H dell'impulso in uscita dal multivibratore deve essere minore del periodo T del segnale di ingresso. Se ciò non accadesse, il multivibratore sarebbe ancora alto all'arrivo del successivo fronte di salita dell'ingresso, e quindi non funzionerebbe in maniera corretta. Occorre, pertanto, che sia verificata la seguente relazione:

$$T_H < T_{min} \Rightarrow T_H < \frac{1}{f_{MAX}} \quad (\text{corretto funzionamento, formula 2}).$$

Deviatore elettronico.

- > Il deviatore elettronico è comandato dalla tensione V_{MV} in uscita dal multivibratore monostabile, e gestisce l'alimentazione del filtro passa-basso a cui è collegato. La logica di funzionamento è la seguente:
 - se V_{MV} alto \rightarrow contatto in A \rightarrow corrente: $I=I_0$;
 - se V_{MV} basso \rightarrow contatto in B \rightarrow corrente: $I=0$.

In pratica, gli impulsi di tensione in uscita dal multivibratore vengono trasformati in impulsi di corrente prelevati dall'ingresso del filtro passa-basso.

Filtro passa-basso.

- > Il filtro passa-basso riceve in ingresso una sequenza di impulsi di corrente, e fornisce in uscita una tensione positiva proporzionale alla frequenza di ripetizione di tali impulsi. La formula approssimata che esprime tale relazione è la seguente (formula non dimostrata):

$$V_O \cong (R \cdot I_0 \cdot T_H) \cdot f \quad (\text{relazione I/O}).$$

- > La formula di sopra è valida se la pulsazione con cui si ripetono gli impulsi di corrente soddisfa la condizione:

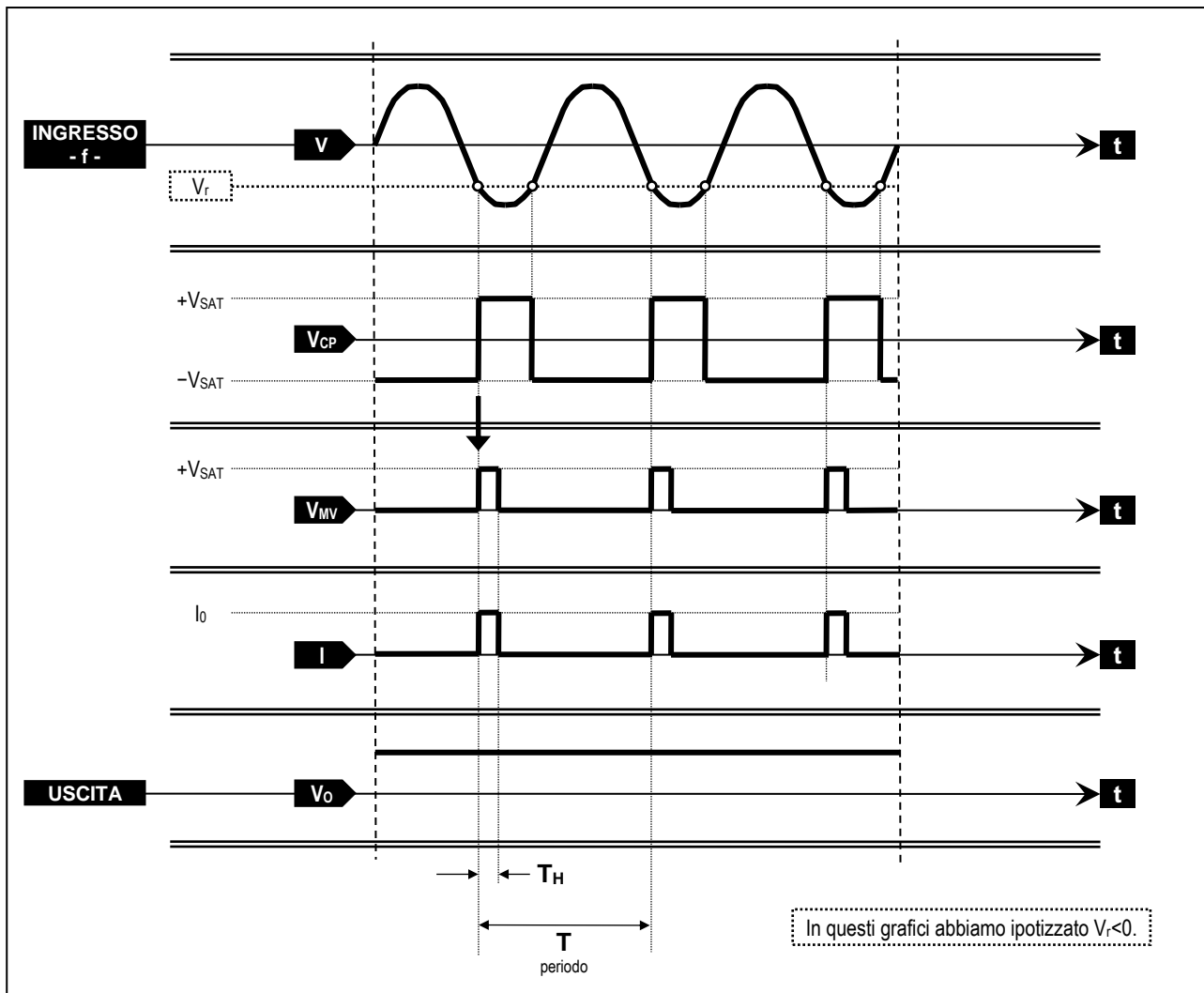
$$\omega \gg \frac{1}{R \cdot C}.$$

Questa condizione è verificata quando:

$$\omega_{min} > 10 \cdot \frac{1}{R \cdot C} \Rightarrow f_{min} > 10 \cdot \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C} \quad (\text{corretto funzionamento, formula 3}).$$

- > Per il corretto funzionamento del filtro passa-basso, occorre che la tensione V_O in uscita da tale componente non superi mai la tensione di saturazione dell'AO con cui esso è realizzato. Ciò si scrive con la formula:

$$|V_O| < V_{SAT} \quad (\text{corretto funzionamento, formula 4}).$$



Esercizi - Convertitore $f \rightarrow V_O$

RICHIAMI DI TEORIA		
<p>Caratteristiche del multivibratore monostabile</p> <ul style="list-style-type: none"> - L'uscita V_{MV} è normalmente bassa (0). - All'arrivo del fronte di salita dell'ingresso V_{CP}, l'uscita V_{MV} va a valore alto ($+V_{SAT}$) e vi rimane per il tempo T_H. - Trascorso questo tempo, V_{MV} torna a livello basso (0). <p>Caratteristiche del deviatore elettronico</p> <p>Con V_{MV} alto \rightarrow contatto in A. Con V_{MV} basso \rightarrow contatto in B.</p>		
Relazione I/O	$V_O = (R \cdot I_0 \cdot T_H) \cdot f$	
Corretto funzionamento	Per gli AO occorre: $ V_O < V_{SAT}$ — $ I_O < I_{O_MAX}$	
	1) $ V_r < V_{MAX}$	
	2) $T_H < \frac{1}{f_{MAX}}$	
	3) $f_{min} > 10 \cdot \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C}$	
Parametri circuitali	R — I_0 — C — V_r — T_H — V_{SAT} — I_{O_MAX} — V_{MAX}	
Parametri funzionali	relazione I/O — f_{min} — f_{MAX} — V_{O_min} — V_{O_MAX}	

Problema di analisi

Analizzare il seguente convertitore $f \rightarrow V_O$.	Dati	C	Quesiti
	$V_{CC} = \pm 15$ $V_{SAT} = 90\% \text{ di } V_{CC}$ $V_{MAX} = 2$ $R = 2 \cdot 10^3$	$C = 200 \cdot 10^{-9}$ $T_H = 1 \cdot 10^{-3}$ $I_0 = 10 \cdot 10^{-3}$ $V_r = -1$	1) Relazione ingresso-uscita 2) Corretto funzionamento 3) Rappresentazione grafica.

Quesito 1. Relazione ingresso-uscita.

$$1) \quad V_O = (R \cdot I_0 \cdot T_H) \cdot f \quad \left[\begin{array}{l} R = 2 \cdot 10^3 \text{ dato} \\ I_0 = 10 \cdot 10^{-3} \text{ dato} \\ T_H = 1 \cdot 10^{-3} \text{ dato} \end{array} \right. \quad \rightarrow \quad V_O = (20 \cdot 10^{-3}) \cdot f$$

Quesito 2. Corretto funzionamento.

$$2) \quad V_{SAT} = V_{CC} \cdot \frac{90}{100} \quad [V_{CC} = 15 \text{ dato}] \quad \rightarrow \quad V_{SAT} = 13,5$$

$$3) \quad (R \cdot I_0 \cdot T_H) \cdot f_{MAX} < V_{SAT} \quad \left[\begin{array}{l} R = 2 \cdot 10^3 \text{ dato} \\ I_0 = 10 \cdot 10^{-3} \text{ dato} \\ T_H = 1 \cdot 10^{-3} \text{ dato} \\ V_{SAT} = 13,5 \text{ calcolo 2} \end{array} \right. \quad \rightarrow \quad f_{MAX} < 675 \quad \text{scelta: } f_{MAX} = 500$$

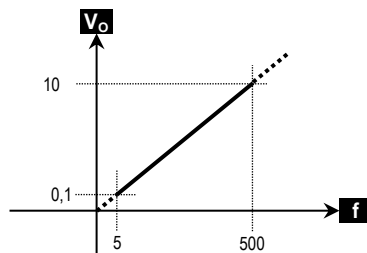
$$4) \quad T_H < \frac{1}{f_{MAX}} \quad \left[\begin{array}{l} T_H = 1 \cdot 10^{-3} \text{ dato} \\ f_{MAX} = 500 \text{ scelta 3} \end{array} \right. \quad \rightarrow \quad 1 \cdot 10^{-3} < 2 \cdot 10^{-3} \quad \text{controllo OK}$$

$$5) \quad f_{min} > 10 \cdot \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C} \quad \left[\begin{array}{l} R = 2 \cdot 10^3 \text{ dato} \\ C = 200 \cdot 10^{-9} \text{ dato} \end{array} \right. \quad \rightarrow \quad f_{min} > 2,5 \quad \text{scelta: } f_{min} = 5$$

$$6) \quad V_O = 20 \cdot 10^{-3} \cdot f \quad \left[\begin{array}{l} f_{MAX} = 500 \text{ calcolo 3} \\ f_{min} = 5 \text{ calcolo 5} \end{array} \right. \quad \rightarrow \quad \begin{cases} V_{O_MAX} = 10 \\ V_{O_min} = 0,1 \end{cases}$$

$$7) \quad |V_r| < |V_{MAX}| \quad \left[\begin{array}{l} V_r = -1 \text{ dato} \\ V_{MAX} = 2 \text{ dato} \end{array} \right. \quad \rightarrow \quad 1 < 2 \quad \text{controllo OK}$$

Quesito 3. Rappresentazione grafica.



Problema di progetto

Progettare il seguente convertitore f (di V) $\rightarrow V_O$.

Caratteristiche AO

$V_{CC} = \pm 15$
 $V_{SAT} = 90\% \text{ di } V_{CC}$

Specifiche di progetto

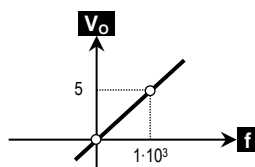
- Relazione I/O lineare in cui:
 $f=0 \rightarrow V_O=0$
 $f=1 \cdot 10^3 \rightarrow V_O=5$
- Valori min e MAX di input:
 $f_{min}=20$ $f_{MAX}=2 \cdot 10^3$
- Caratteristiche segnale input:
 $|V_{MAX}|=2$

Quesiti

- 1) Dimensionamento del circuito
- 2) Corretto funzionamento
- 3) Rappresentazione grafica

Quesiti 1-2. Dimensionamento del circuito e corretto funzionamento.

- 1) Relazione ingresso-uscita indicata dalle specifiche di progetto:



da cui l'equazione \rightarrow

$$V_O = (5 \cdot 10^{-3}) \cdot f$$

- 2) Relazione I/O offerta dal circuito:

$$V_O = (R \cdot I_0 \cdot T_H) \cdot f$$

- 3) Uguagliando i coefficienti corrispondenti si ottiene la seguente equazione risolvibile:

$$R \cdot I_0 \cdot T_H = 5 \cdot 10^{-3}$$

risolvendo \rightarrow

$$\begin{cases} I_0 = 1 \cdot 10^{-3} & \text{scelta} \\ T_H = 0,1 \cdot 10^{-3} & \text{scelta} \\ R = 50 \cdot 10^3 \end{cases}$$

4) $f_{min} > 10 \cdot \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C}$

$f_{min} = 20$ dato
 $R = 50 \cdot 10^3$ calcolo 3

$\rightarrow C > 1,6 \cdot 10^{-6}$ scelta: $C = 10 \cdot 10^{-3}$

5) $|V_r| < |V(t)|$

$|V_{MAX}| = 2$ dato

$\rightarrow |V_r| < 2$ scelta: $V_r = -1$

6) $T_H < \frac{1}{f_{MAX}}$

$T_H = 0,1 \cdot 10^{-3}$ scelta 1
 $f_{MAX} = 2 \cdot 10^3$ dato

$\rightarrow 0,1 \cdot 10^{-3} < 0,5 \cdot 10^{-3}$ controllo OK

7) $V_{SAT} = 90\% \text{ di } V_{CC}$

$V_{CC} = 15$ dato

$\rightarrow V_{SAT} = 13,5$

8) $f_{MAX} < \frac{V_{SAT}}{R \cdot I_0 \cdot T_0}$

$V_{SAT} = 13,5$ calcolo 5
 $f_{MAX} = 2 \cdot 10^3$ dato
 $T_H = 0,1 \cdot 10^{-3}$ calcolo 2
 $I_0 = 1 \cdot 10^{-3}$ scelta 1

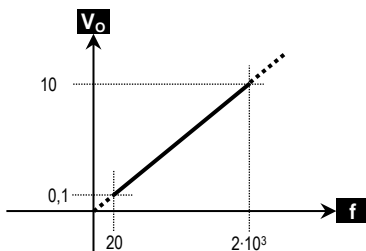
$10 < 13,5$ controllo OK

9) $V_O = 5 \cdot 10^{-3} \cdot f$
 (formula 1)

$f_{MAX} = 2 \cdot 10^3$ dato
 $f_{min} = 20$ dato

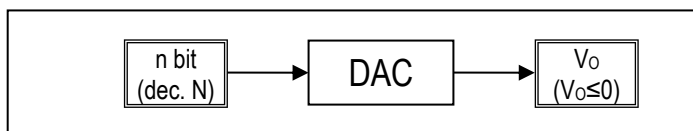
$\rightarrow \begin{cases} V_{O_MAX} = 10 \\ V_{O_min} = 0,1 \end{cases}$

Quesito 3. Rappresentazione grafica.



6.5 -- Convertitore digitale→analogico

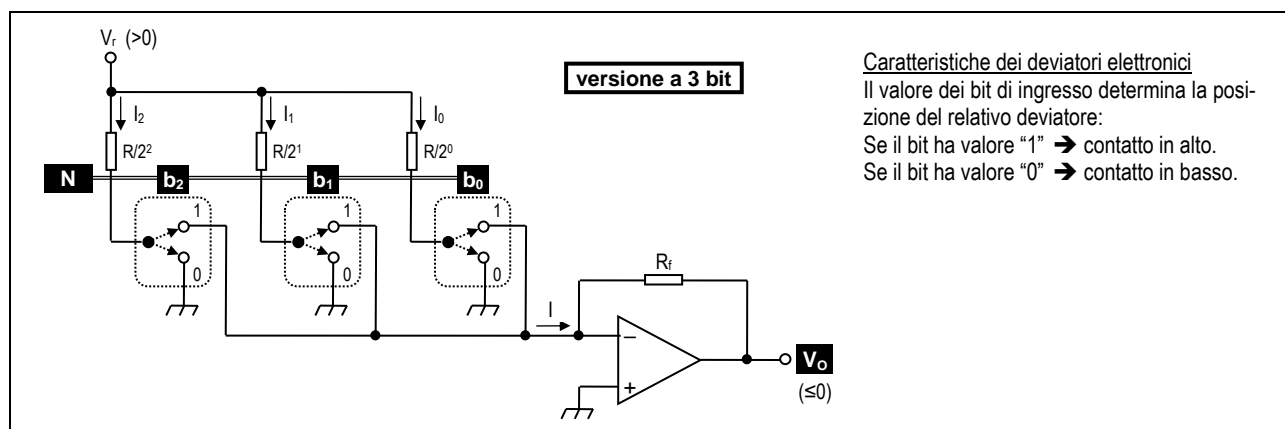
Il convertitore digitale→analogico (DAC, ossia Digital Analogic Converter) è un circuito che riceve in ingresso un insieme di n bit, e fornisce in uscita una tensione V_O ($V_O \leq 0$) il cui valore è proporzionale al valore decimale N dei bit di ingresso.



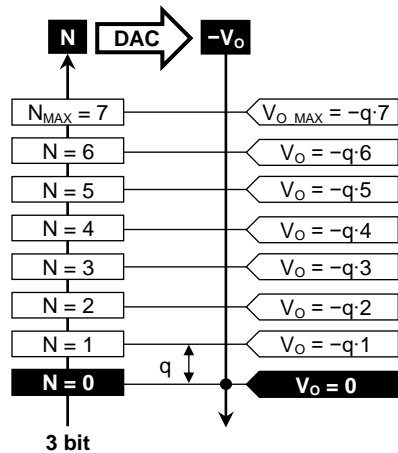
Nel seguito tratteremo due circuiti di questo tipo: *DAC a resistori pesati* e *DAC a rete R-2R*.

DAC a resistori pesati

Il DAC a resistori pesati, nella sua versione a 3 bit di ingresso, è rappresentato nella figura seguente. I bit di ingresso sono rappresentati dalla posizione dei deviatori b_2 - b_1 - b_0 che danno il numero decimale N ; la tensione di uscita è indicata con V_O ($V_O \leq 0$) il cui valore è proporzionale al numero N presente in ingresso. Dopo il circuito sono riportate le sue formule di dimensionamento.



Relazione I/O	$V_O = -q \cdot N$ <i>dove:</i>	$N = b_2 \cdot 2^2 + b_1 \cdot 2^1 + b_0 \cdot 2^0$ N° decimale d'ingresso $q = V_r \cdot \frac{R_f}{R}$ ($V_r > 0$) quanto di conversione
Estremi di conversione	ingresso [$b_2 b_1 b_0$ (N)]	uscita [V_O]
MAX →	111 ($N_{MAX}=2^3-1 = 7$)	$V_{O_MAX} = -q \cdot 7$
min →	000 ($N=0$)	$V_O = -q \cdot N = 0$
Corretto funzionamento	$ V_O < V_{SAT}$ <i>dove:</i> $V_{O_MAX} = -q \cdot 7$ $ I_O < I_{O_MAX}$	



Analisi del circuito

- *Dimostrazione della relazione ingresso-uscita.*

La tensione V_r (>0) provoca le seguenti correnti, indipendenti dalla posizione dei deviatori:

$$I_2 = \frac{V_r}{R/2^2} \quad I_1 = \frac{V_r}{R/2^1} \quad I_0 = \frac{V_r}{R/2^0}$$

Queste correnti raggiungono l'AO solo se il relativo deviatore è posto nella posizione "1", pertanto la corrente totale I che raggiunge l'AO è la seguente:

$$I = I_2 + I_1 + I_0 = b_2 \cdot \frac{V_r}{R/2^2} + b_1 \cdot \frac{V_r}{R/2^1} + b_0 \cdot \frac{V_r}{R/2^0} = \frac{V_r}{R} \cdot (b_2 \cdot 2^2 + b_1 \cdot 2^1 + b_0 \cdot 2^0) = \frac{V_r}{R} \cdot N$$

Questa corrente attraversa la resistenza R_f e così provoca la tensione di uscita V_O :

$$V_O = -R_f \cdot I = -V_r \cdot \frac{R_f}{R} \cdot N \text{ che rappresenta la relazione ingresso} \rightarrow \text{uscita del circuito.}$$

♦ *Quanto di conversione.*

La relazione ingresso-uscita appena scritta può essere messa nella forma:

$$V_O = -q \cdot N \quad \text{dove} \quad q = V_r \cdot \frac{R_f}{R} \quad \text{è detto "quanto di conversione"}.$$

Il quanto di conversione q , rappresentando il fattore di proporzionalità tra N e V_O , può essere interpretato come l'ampiezza dell'intervallo tra due livelli di tensione contigui, ossia tra i livelli di tensione relativi alla conversione di due numeri binari consecutivi.

♦ *Estremi di conversione.*

L'ingresso 000 ($N=0$) produce in uscita il seguente valore di $V_O \Rightarrow V_O = -q \cdot N = 0$

L'ingresso 111 ($N_{MAX}=2^3-1$) produce in uscita il seguente valore di $V_O \Rightarrow V_{O_MAX} = -q \cdot N_{MAX} = -q \cdot (2^3 - 1)$

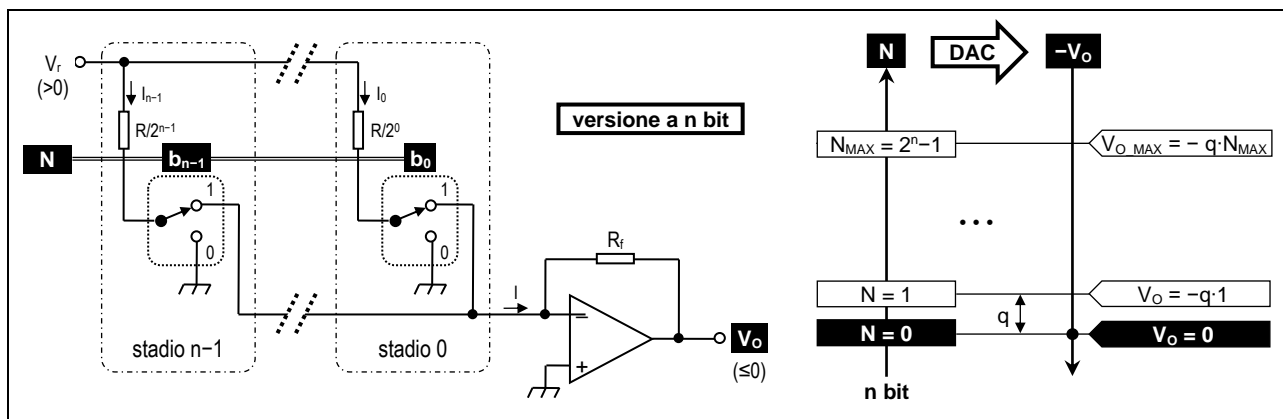
♦ *Condizione di corretto funzionamento.*

Affinchè il circuito funzioni correttamente occorre che l'AO non vada mai in saturazione. Ciò accade se la tensione di uscita V_O rimane sempre inferiore alla tensione di saturazione V_{SAT} , in formule:

$$|V_{O_MAX}| < V_{SAT}.$$

Generalizzazione ad n (qualunque) bit di ingresso

I risultati appena ottenuti per $n=3$ possono essere generalizzati al caso di n qualunque, come è mostrato nella figura che segue. Ciò che cambia, rispetto al caso di $n=3$, è soltanto il numero degli stadi (in totale n) che compongono la corrente totale I , convertita poi nella tensione V_O .



		3 bit di ingresso		n bit di ingresso	
Relazione I/O	$V_O = -q \cdot N$	$N = b_2 \cdot 2^2 + b_1 \cdot 2^1 + b_0 \cdot 2^0$ N° decimale di ingresso	$V_O = -q \cdot N$	$N = b_{n-1} \cdot 2^{n-1} + \dots + b_0 \cdot 2^0$ N° decimale di ingresso	
		$q = V_r \cdot \frac{R_f}{R} \quad (V_r > 0)$ quanto di conversione		$q = V_r \cdot \frac{R_f}{R} \quad (V_r > 0)$ quanto di conversione	
Estremi di conversione	MAX →	ingresso [$b_2 \ b_1 \ b_0$ (N)]	uscita [V_O]	ingresso [$b_{n-1} \dots b_0$ (N)]	uscita [V_O]
		111 (N _{MAX} =2 ³ -1)	$V_{O_MAX} = -q \cdot N_{MAX}$	tutti 1 (N _{MAX} =2 ⁿ -1)	$V_{O_MAX} = -q \cdot N_{MAX}$
	min →	000 (N=0)	$V_O = -q \cdot N = 0$	tutti 0 (N=0)	$V_O = -q \cdot N = 0$
Corretto funzionamento	$ V_O < V_{SAT}$ <i>dove:</i> $V_{O_MAX} = -q \cdot 7$	$ V_O < V_{SAT}$ <i>dove:</i> $V_{O_MAX} = -q \cdot N_{MAX}$			
	$ I_O < I_{O_MAX}$	$ I_O < I_{O_MAX}$			
Parametri circuitali		$V_r \ \text{--} \ R \ \text{--} \ R_f \ \text{--} \ n \ \text{--} \ V_{SAT}$			
Parametri funzionali		relazione I/O -- NI -- q			

Esercizio 1 - Convertitore DAC a resistori pesati (invertente)

RICHIAMI DI TEORIA			
		<p><u>Caratteristiche dei deviatori elettronici</u> Il valore dei bit di ingresso determina la posizione del relativo deviatore: Se il bit ha valore "1" → contatto in alto. Se il bit ha valore "0" → contatto in basso.</p>	
Relazione I/O	$V_O = -q \cdot N$	$N = b_{n-1} \cdot 2^{n-1} + \dots + b_0 \cdot 2^0$ N° decimale di ingresso $q = V_r \cdot \frac{R_f}{R} \quad (V_r > 0)$ quanto di conversione	
Estremi di conversione	MAX → tutti 1 ($N_{MAX} = 2^n - 1$) min → tutti 0 ($N = 0$)	uscita $[V_O \leq 0]$ $V_{O_MAX} = -q \cdot N_{MAX}$ $V_O = -q \cdot N = 0$	
Corretto funzionamento	$ V_{O_MAX} < V_{SAT}$		
Parametri circuitali	$V_r \text{ -- } R \text{ -- } R_f \text{ -- } n \text{ -- } V_{SAT}$		
Parametri funzionali	relazione I/O -- N -- q		

Problema di analisi

Analizzare il seguente convertitore DAC a resistori pesati.	Dati $V_{CC} = \pm 15$ $V_{SAT} = 13,5$ $V_r = 1$	$R = 2 \cdot 10^3$ $R_f = 3 \cdot 10^3$ $n = 3$	Quesiti 1) Relazione ingresso-uscita 2) Corretto funzionamento 3) Rappresentazione grafica.

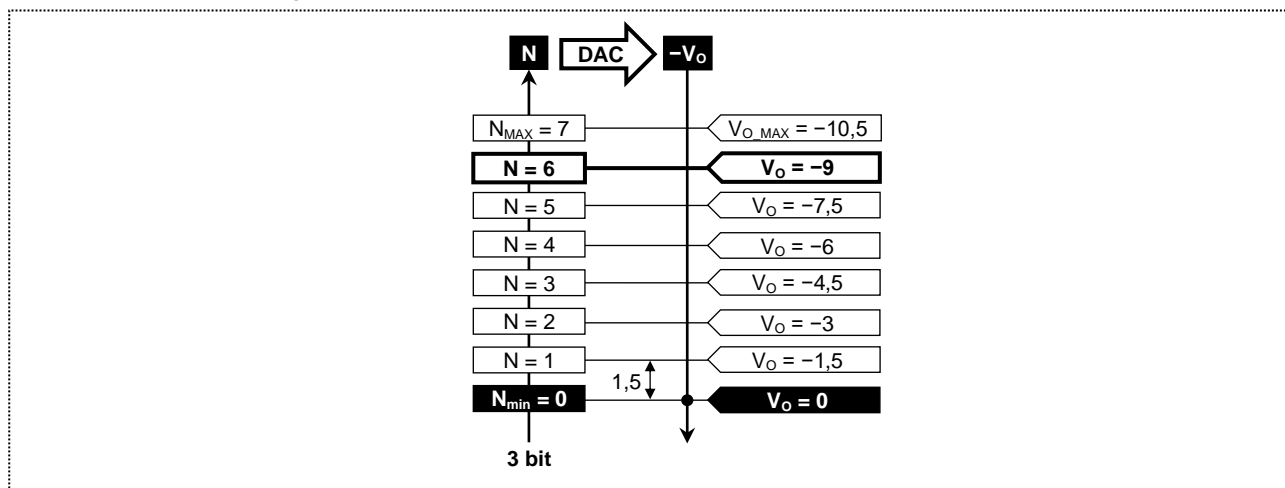
Quesito 1. Relazione ingresso-uscita.

- | | | |
|--|--|------------------------|
| 1) $V_O = \left(-V_r \cdot \frac{R_f}{R}\right) \cdot N$ | $V_r = 1 \text{ dato}$
$R_f = 3 \cdot 10^3 \text{ dato}$
$R = 2 \cdot 10^3 \text{ dato}$ | → $V_O = -1,5 \cdot N$ |
| 2) $q = V_r \cdot \frac{R_f}{R}$ | [dati tutti disponibili] | → $q = 1,5$ |
| 3) $N_{MAX} = 2^n - 1$ | [$n = 3$ dato] | → $N_{MAX} = 7$ |
| 4) $V_{O_MAX} = -q \cdot N_{MAX}$ | [$N_{MAX} = 7$ calcolo 3] | → $V_{O_MAX} = -10,5$ |

Quesito 2. Corretto funzionamento.

- | | | |
|-----------------------------|---|--------------------------------------|
| 5) $ V_{O_MAX} < V_{SAT}$ | $V_{O_MAX} = -10,5 \text{ calcolo 4}$
$V_{SAT} = 13,5 \text{ dato}$ | → $10,5 < 13,5 \text{ controllo OK}$ |
|-----------------------------|---|--------------------------------------|

Quesito 3. Rappresentazione grafica.



Problema di progetto

Progettare un DAC a resistori pesati a 3 bit avente le seguenti caratteristiche:

Caratteristiche AO

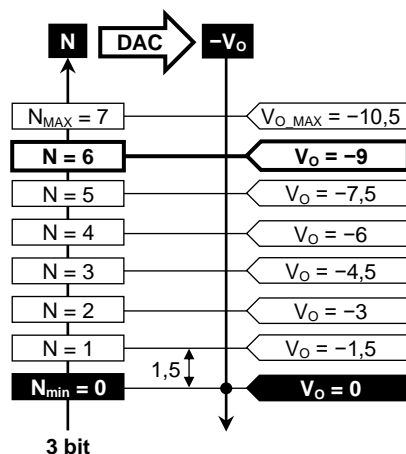
$V_{CC} = \pm 15$
 $V_{SAT} = 13,5$

Specifiche di progetto

$(b_2 b_1 b_0) = (1 1 0) \rightarrow V_o = -9$

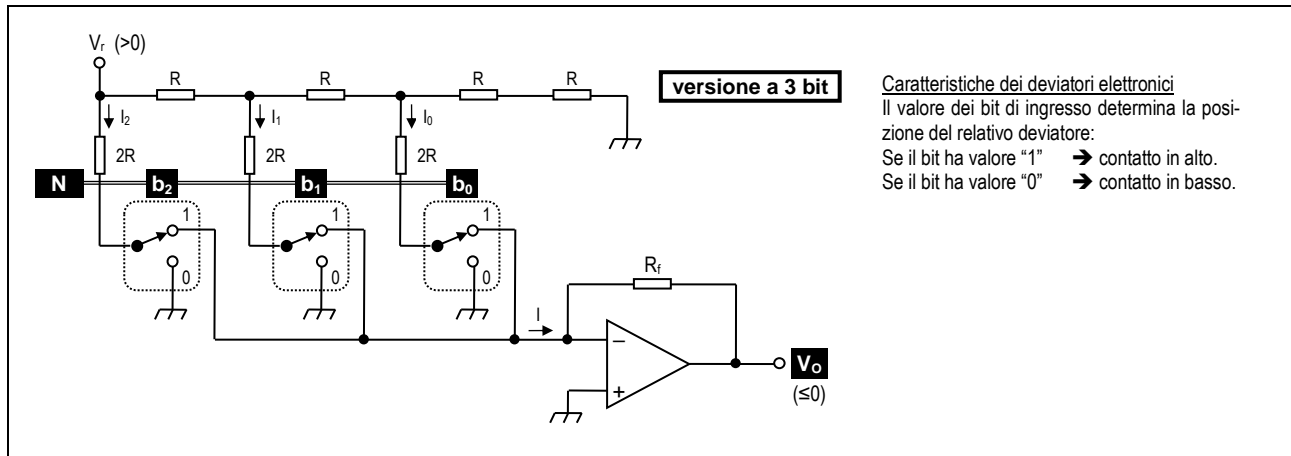
- Equazione fornita dalle specifiche di progetto: $[N = 6 \rightarrow V_o = -9 \text{ dato}] \rightarrow V_o = -1,5 \cdot N$
- Equazione offerta dal circuito: $\rightarrow V_o = \left(-V_r \cdot \frac{R_f}{R}\right) \cdot N$
- Uguagliando i coefficienti si ottiene: $-V_r \cdot \frac{R_f}{R} = -1,5 \rightarrow \begin{cases} V_r = 1 \text{ scelta} \\ R = 2 \cdot 10^3 \text{ scelta} \\ R_f = 3 \cdot 10^3 \end{cases}$
- $N_{MAX} = 2^n - 1 \rightarrow [n = 3 \text{ dato}] \rightarrow N_{MAX} = 7$
- $q = V_r \cdot \frac{R_f}{R} \rightarrow \begin{cases} V_r = 1 \text{ scelta 1} \\ R = 2 \cdot 10^3 \text{ scelta 1} \\ R_f = 3 \cdot 10^3 \text{ calcolo 1} \end{cases} \rightarrow q = 1,5$
- $V_{O_MAX} = -q \cdot N_{MAX} \rightarrow [q = 1,5 \text{ calcolo 5}] \rightarrow V_{O_MAX} = -10,5$
 $[N_{MAX} = 7 \text{ calcolo 2}]$
- $|V_{O_MAX}| < V_{SAT} \rightarrow [V_{O_MAX} = -10,5 \text{ calcolo 1}] \rightarrow 10,5 < 13,5 \text{ controllo OK}$
 $[V_{SAT} = 13,5 \text{ dato}]$

rappresentazione grafica \rightarrow



DAC a rete R-2R

Il DAC a rete R-2R, nella sua versione a 3 bit di ingresso, è rappresentato nella figura seguente. I bit di ingresso sono rappresentati dalla posizione dei deviatori b_2 - b_1 - b_0 che danno il numero decimale N ; la tensione di uscita è indicata con V_O il cui valore (negativo o nullo) è proporzionale al numero N presente in ingresso. Dopo il circuito sono riportate le sue formule di dimensionamento.



Relazione I/O	$V_O = -q \cdot N$	$N = b_2 \cdot 2^2 + b_1 \cdot 2^1 + b_0 \cdot 2^0$ N° decimale di ingresso $q = V_r \cdot \frac{R_f}{2^3 \cdot R} \quad (V_r > 0)$ quanto di conversione
Estremi di conversione	MAX → 111 ($N_{MAX}=2^3-1$) min → 000 ($N=0$)	uscita [V_O] $V_{O_MAX} = -q \cdot N_{MAX}$ $V_{O_min} = -q \cdot N = 0$
Corretto funzionamento	$ V_O < V_{SAT}$ dove: $V_{O_MAX} = -q \cdot 7$ $ I_O < I_{O_MAX}$	

Analisi del circuito

• Dimostrazione della relazione I/O.

La tensione $V_r (>0)$ provoca le seguenti correnti:

$$I_2 = \frac{V_r}{2 \cdot R} \quad I_1 = \frac{V_r}{4 \cdot R} \quad I_0 = \frac{V_r}{8 \cdot R}$$

Queste correnti raggiungono l'AO solo se il relativo deviatore è posto nella posizione "1", pertanto la corrente totale I che raggiunge l'AO è la seguente:

$$I = I_2 + I_1 + I_0 = b_2 \cdot \frac{V_r}{2 \cdot R} + b_1 \cdot \frac{V_r}{4 \cdot R} + b_0 \cdot \frac{V_r}{8 \cdot R} = \frac{V_r}{2^3 \cdot R} \cdot (b_2 \cdot 2^2 + b_1 \cdot 2^1 + b_0 \cdot 2^0) = \frac{V_r}{2^3 \cdot R} \cdot N$$

Questa corrente attraversa la resistenza R_f e così provoca la tensione di uscita V_O :

$$V_O = -R_f \cdot I = -V_r \cdot \frac{R_f}{2^3 \cdot R} \cdot N \quad \text{che rappresenta la relazione ingresso} \rightarrow \text{uscita del circuito.}$$

• Quanto di conversione.

La relazione ingresso-uscita appena scritta può anche essere messa nella forma:

$$V_O = -q \cdot N \quad \text{dove} \quad q = V_r \cdot \frac{R_f}{2^3 \cdot R} \quad \text{è detto "quanto di conversione".}$$

Il quanto di conversione q , rappresentando il fattore di proporzionalità tra N e V_O , può essere interpretato anche come l'ampiezza dell'intervallo tra due livelli di tensione contigui, ossia tra i livelli di tensione relativi alla conversione di due numeri binari consecutivi.

♦ *Estremi di conversione.*

L'ingresso 000 ($N=0$) produce in uscita il seguente valore di $V_O \Rightarrow V_O = -q \cdot N = 0$

L'ingresso 111 ($N_{MAX}=2^3-1$) produce in uscita il seguente valore di $V_O \Rightarrow V_{O_MAX} = -q \cdot N_{MAX} = -q \cdot (2^3 - 1)$

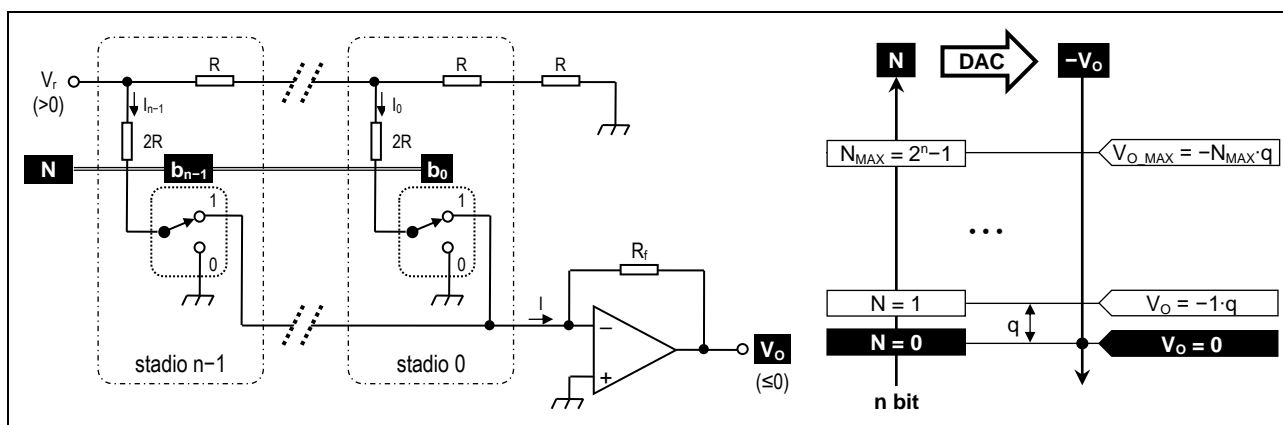
♦ *Condizione di corretto funzionamento.*

Affinchè il circuito funzioni correttamente occorre che l'AO non vada mai in saturazione. Ciò accade se la tensione di uscita V_O rimane sempre inferiore alla tensione di saturazione V_{SAT} , in formule:

$$|V_{O_MAX}| < V_{SAT} \cdot$$

Generalizzazione ad n (qualunque) bit di ingresso

I risultati appena ottenuti per $n=3$ possono essere generalizzati al caso di n qualunque, come è mostrato nella figura che segue. Ciò che cambia, rispetto al caso di $n=3$, è soltanto il numero degli stadi (in totale n) che compongono la corrente totale I, convertita poi nella tensione V_O .



	3 bit di ingresso		n bit di ingresso		
Relazione I/O	$V_O = -q \cdot N$	$N = b_2 \cdot 2^2 + b_1 \cdot 2^1 + b_0 \cdot 2^0$	$V_O = -q \cdot N$	$N = b_{n-1} \cdot 2^{n-1} + \dots + b_0 \cdot 2^0$	
		$q = V_r \cdot \frac{R_f}{2^3 \cdot R} \quad (V_r > 0)$		$q = V_r \cdot \frac{R_f}{2^n \cdot R} \quad (V_r > 0)$	
Estremi di conversione	MAX → min →	ingresso [b ₂ b ₁ b ₀ (N)]	uscita [V _O]	ingresso [b _{n-1} ...b ₀ (N)]	uscita [V _O]
		111 (N _{MAX} =2 ³ -1 = 7)	V _{O_MAX} = -q · N _{MAX}	tutti 1 (N _{MAX} =2 ⁿ -1)	V _{O_MAX} = -q · N _{MAX}
		000 (N=0)	V _O = -q · N = 0	tutti 0 (N=0)	V _O = -q · N = 0
Corretto funzionamento	$ V_O < V_{SAT}$ dove: $V_{O_MAX} = -q \cdot 7$		$ V_O < V_{SAT}$ dove: $V_{O_MAX} = -q \cdot N_{MAX}$		
	$ I_O < I_{O_MAX}$		$ I_O < I_{O_MAX}$		
Parametri circuitali			$V_r \text{ -- } R \text{ -- } R_f \text{ -- } n \text{ -- } V_{SAT} \text{ -- } I_{O_MAX}$		
Parametri funzionali			relazione I/O -- NI -- q		

Esercizi - Convertitore D→A DAC a rete R-2R (invertente)

RICHIAMI DI TEORIA											
<p><u>Caratteristiche dei deviatori elettronici</u> Il valore dei bit di ingresso determina la posizione del relativo deviatore: Se il bit ha valore "1" → contatto in alto. Se il bit ha valore "0" → contatto in basso.</p>											
Relazione I/O	$V_o = -q \cdot N$ $N = b_{n-1} \cdot 2^{n-1} + \dots + b_0 \cdot 2^0$ numero decimale di ingresso $q = V_r \cdot \frac{R_f}{2^n \cdot R}$ ($V_r > 0$) quanto di conversione										
Estremi di conversione	<table><tr><th></th><th>ingresso [$b_{n-1} \dots b_0$ (N)]</th><th>uscita [V_o (≤0)]</th></tr><tr><td>MAX →</td><td>tutti 1 ($N_{MAX} = 2^n - 1$)</td><td>$V_{o_MAX} = -q \cdot N_{MAX}$</td></tr><tr><td>min →</td><td>tutti 0 ($N = 0$)</td><td>$V_o = -q \cdot N = 0$</td></tr></table>		ingresso [$b_{n-1} \dots b_0$ (N)]	uscita [V_o (≤0)]	MAX →	tutti 1 ($N_{MAX} = 2^n - 1$)	$V_{o_MAX} = -q \cdot N_{MAX}$	min →	tutti 0 ($N = 0$)	$V_o = -q \cdot N = 0$	
	ingresso [$b_{n-1} \dots b_0$ (N)]	uscita [V_o (≤0)]									
MAX →	tutti 1 ($N_{MAX} = 2^n - 1$)	$V_{o_MAX} = -q \cdot N_{MAX}$									
min →	tutti 0 ($N = 0$)	$V_o = -q \cdot N = 0$									
Corretto funzionamento	$ V_{o_MAX} < V_{SAT}$										
Parametri circuitali	$V_r \text{ -- } R \text{ -- } R_f \text{ -- } n \text{ -- } V_{SAT} \text{ -- } I_{o_MAX}$										
Parametri funzionali	relazione I/O -- NI -- q										

Problema di analisi

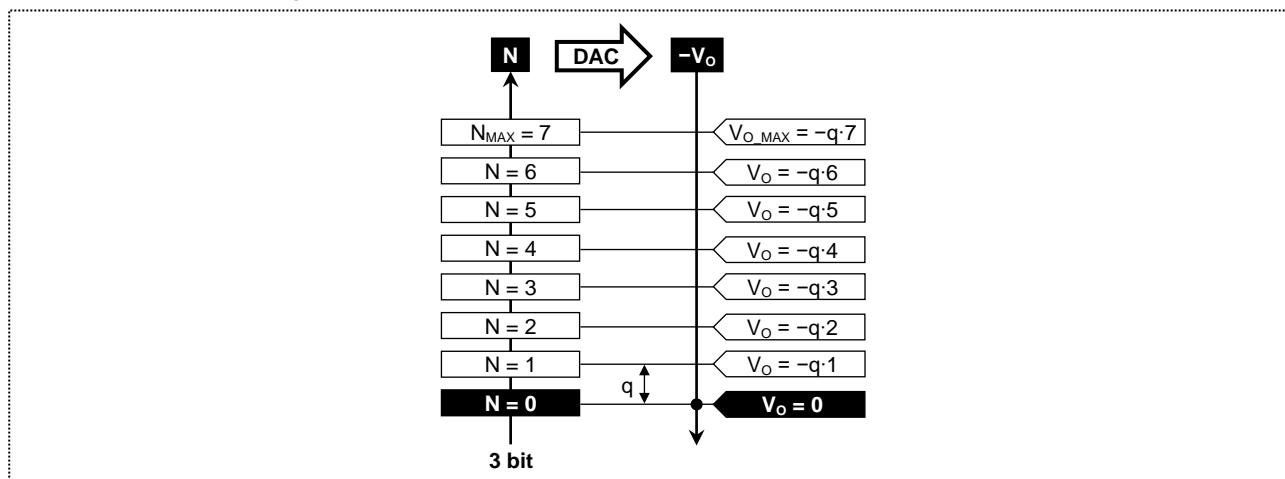
Analizzare il seguente convertitore DAC a resistori pesati.	<u>Dati</u>	$R = 2 \cdot 10^3$	<u>Quesiti</u>
	$V_{CC} = \pm 15$ $V_{SAT} = 13,5$ $V_r = 1$	$R_f = 3 \cdot 10^3$ $n = 3$	

- | | | |
|------------------------------------|--|-------------------------|
| 1) $q = V_r \cdot \frac{R_f}{R}$ | $V_r = 1$ dato
$R_f = 3 \cdot 10^3$ dato
$R = 2 \cdot 10^3$ dato | → $q = 0,19$ |
| 2) $V_o = -q \cdot N$ | $[q = 0,19 \text{ calcolo 1}]$ | → $V_o = -0,19 \cdot N$ |
| 3) $N_{MAX} = 2^n - 1$ | $[n = 3 \text{ dato}]$ | → $N_{MAX} = 7$ |
| 4) $V_{o_MAX} = -q \cdot N_{MAX}$ | $[q = 0,19 \text{ calcolo 1}]$
$[N_{MAX} = 7 \text{ calcolo 3}]$ | → $V_{o_MAX} = -1,3$ |

Quesito 2. Corretto funzionamento.

- | | | |
|-----------------------------|---|-------------------------------------|
| 5) $ V_{o_MAX} < V_{SAT}$ | $[V_{MAX} = -1,3 \text{ calcolo 4}]$
$[V_{SAT} = 13,5 \text{ dato}]$ | → $1,3 < 13,5 \text{ controllo OK}$ |
|-----------------------------|---|-------------------------------------|

Quesito 3. Rappresentazione grafica.



Problema di progetto

Progettare un DAC a rete R-2R a 3 bit avente le seguenti caratteristiche:

Caratteristiche AO

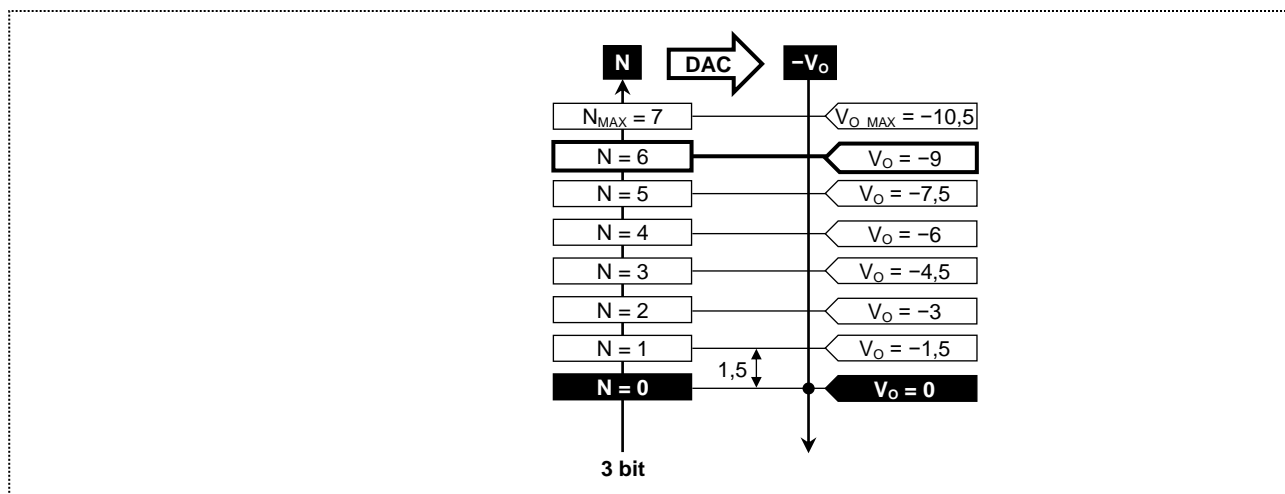
$$V_{CC} = \pm 15$$

$$V_{SAT} = 13,3$$

Specifiche di progetto

$$(b_2 b_1 b_0) = (1 \ 1 \ 0) \rightarrow V_o = -9$$

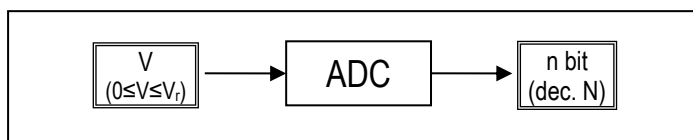
- Equazione fornita dalle specifiche di progetto: $[N = 6 \rightarrow V = -9 \text{ dato}] \rightarrow V_o = -1,5 \cdot N$
- Equazione offerta dal circuito: $\rightarrow V_o = \left(-V_r \cdot \frac{R_f}{2^3 \cdot R}\right) \cdot N$
- Uguagliando i coefficienti si ottiene: $V_r \cdot \frac{R_f}{2^3 \cdot R} = 1,5 \rightarrow \begin{cases} V_r = 1 \text{ scelta} \\ R = 2 \cdot 10^3 \text{ scelta} \\ R_f = 24 \cdot 10^3 \end{cases}$
- $N_{MAX} = 2^n - 1$ $[n = 3 \text{ dato}] \rightarrow N_{MAX} = 7$
- $q = V_r \cdot \frac{R_f}{2^3 \cdot R}$ $\begin{cases} V_r = 1 \text{ scelta 1} \\ R = 2 \cdot 10^3 \text{ scelta 1} \\ R_f = 24 \cdot 10^3 \text{ calcolo 1} \end{cases} \rightarrow q = 1,5$
- $V_{O_MAX} = -q \cdot N_{MAX}$ $[q = 1,5 \text{ calcolo 1}] \rightarrow V_{O_MAX} = -10,5$
 $[N_{MAX} = 7 \text{ si calcola}]$
- $|V_{O_MAX}| < V_{SAT}$ $[V_{O_MAX} = -10,5 \text{ calcolo 1}] \rightarrow 10,5 < 13,5 \text{ controllo OK}$
 $[V_{SAT} = 13,5 \text{ dato}]$



6.6 -- Convertitori analogico→digitale

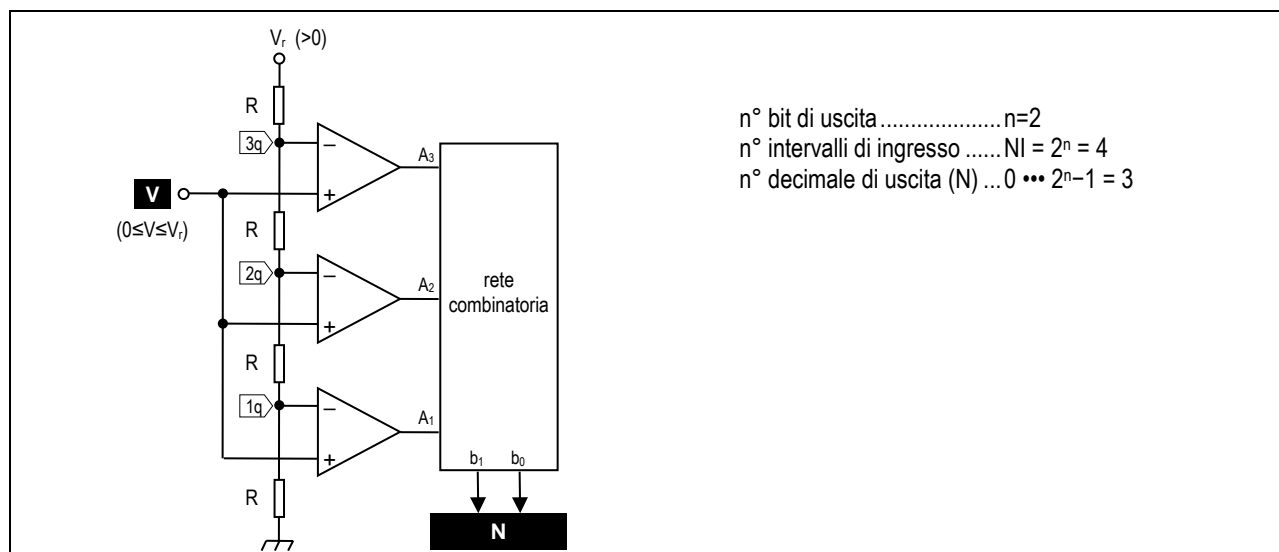
Il convertitore analogico→digitale (ADC, ossia Analogic Digital Converter) è un circuito che riceve in ingresso una tensione V ($0 \leq V \leq V_r$), e fornisce in uscita n bit il cui valore decimale N è proporzionale alla tensione ricevuta in ingresso.

Nel seguito presenteremo due circuiti di questo tipo: *ADC Flash* e *ADC a doppia rampa*.

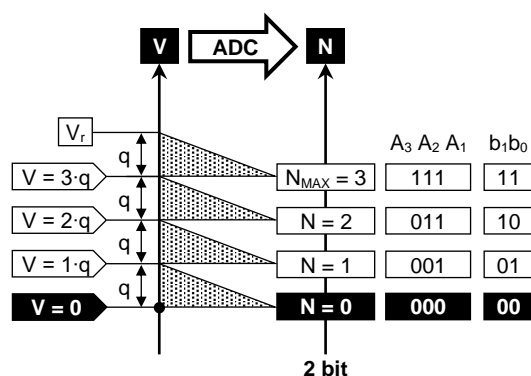


ADC flash

Il convertitore ADC flash, nella sua versione a 2 bit di uscita, è rappresentato nella figura seguente. La tensione di ingresso è indicata con V ($0 \leq V \leq V_r$), i bit di uscita sono indicati con le sigle b_1 - b_0 che danno il numero decimale N . Dopo il circuito sono riportate le sue formule di dimensionamento.



Escursione dell'ingresso V	0 < V < V _r	
N° intervalli di ingresso	NI = 2 ² (=4)	
Quanto di conversione	q = V _r / 2 ²	
Errore max di quantizzazione	E _{MAX} = q / 2	
Relazione I/O	N = Trunc(V / q)	
Estremi di conversione	ingresso [V]	uscita [b₁ b₀ (N)]
	MAX → V _r -q < V < V _r	tutti 1 (N _{MAX} =2 ² -1=3)
	min → 0 < V < q	tutti 0 (N=0)
Dimensionamento rete combinatoria	n° bit di ingresso = 2 ² -1 n° bit di uscita = 2	
N° AO presenti nel circuito	n° AO = 2 ² -1	
Dimensionamento resistenza R	R = valore non critico	
Tempo di conversione quando l'uscita è N=N _{MAX}	tempo di commutazione degli AO	
Tempo di conversione quando l'uscita è N<N _{MAX}	tempo di commutazione degli AO	



Analisi del circuito

♦ Relazione ingresso-uscita.

Il partitore di tensione presente nel circuito suddivide la tensione V_r (positiva) in 4 parti uguali chiamati quanti di conversione $q = V_r / 4$ (o risoluzione).

Ciò rende disponibili le tre tensioni intermedie $V_3 = 3q$, $V_2 = 2q$, $V_1 = 1q$. Queste tensioni sono collegate all'ingresso invertente dei tre AO indicati con le sigle A_3 , A_2 , A_1 , mentre l'ingresso non invertente è collegato alla tensione di ingresso V il cui valore può variare tra 0 e V_r .

Gli AO lavorano tutti in saturazione, quindi danno in uscita un valore che può essere basso ($-V_{SAT} \rightarrow 0_{\text{logico}}$) o alto ($+V_{SAT} \rightarrow 1_{\text{logico}}$).

A seconda del valore assunto da V si possono presentare i casi seguenti:

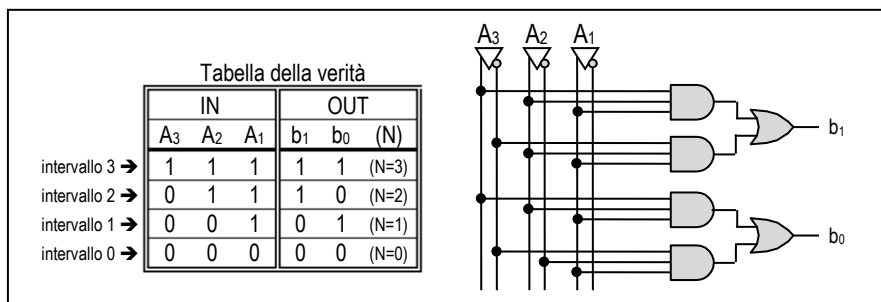
- Se V cade nell'intervallo 3 \rightarrow segue che l'uscita degli AO è: $(A_3-A_2-A_1)=(111)$, quindi la rete combinatoria fornisce in uscita i bit $(b_1-b_0)=(11)$, ossia il numero decimale $N=3$.
- Se V cade nell'intervallo 2 \rightarrow segue che l'uscita degli AO è: $(A_3-A_2-A_1)=(011)$, quindi la rete combinatoria fornisce in uscita i bit $(b_1-b_0)=(10)$, ossia il numero decimale $N=2$.
- Se V cade nell'intervallo 1 \rightarrow segue che l'uscita degli AO è: $(A_3-A_2-A_1)=(001)$, quindi la rete combinatoria fornisce in uscita i bit $(b_1-b_0)=(01)$, ossia il numero decimale $N=1$.
- Se V cade nell'intervallo 0 \rightarrow segue che l'uscita degli AO è: $(A_3-A_2-A_1)=(000)$, quindi la rete combinatoria fornisce in uscita i bit $(b_1-b_0)=(00)$, ossia il numero decimale $N=0$.

Il valore decimale (N) dell'uscita è calcolabile con la formula:

$$N = \text{Trunc}(V/q).$$

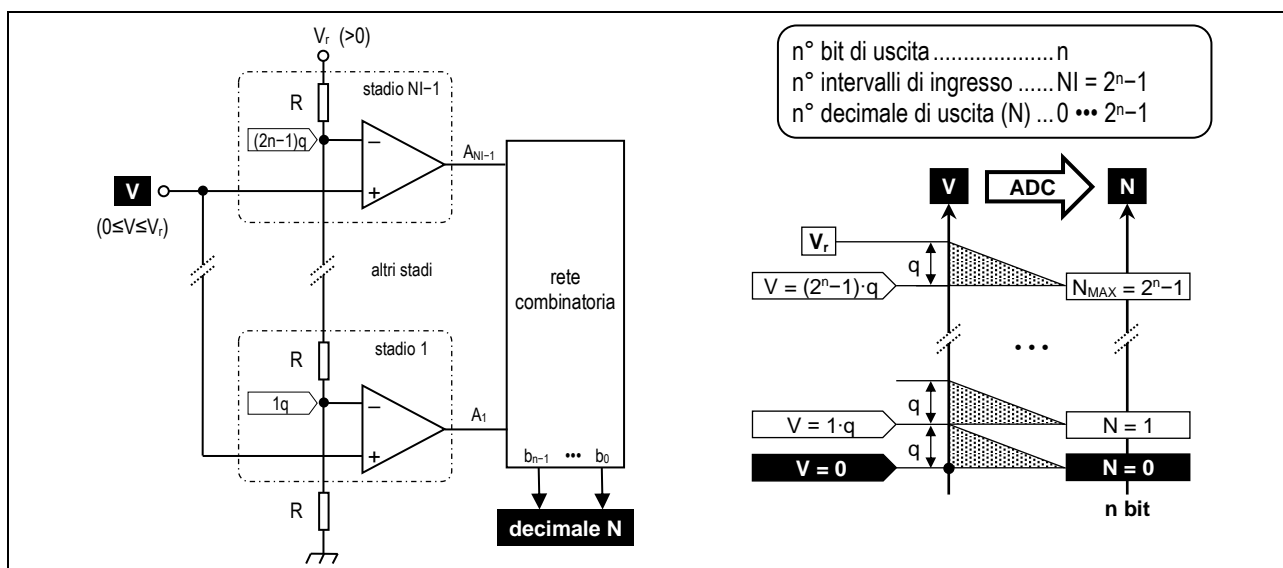
♦ Rete combinatoria.

I valori binari in uscita dagli AO sono convertiti in codice binario naturale tramite una rete combinatoria. Lo schema a lato mostra il progetto di tale rete.



Generalizzazione ad n (qualunque) bit di uscita

I risultati appena ottenuti per $n=2$ bit di uscita possono essere estesi al caso generale di un numero n qualunque di bit di uscita, come è mostrato nella figura che segue. Ciò che cambia è il numero degli stadi (in totale 2^n-1) che inviano il loro segnale digitale alla rete combinatoria e, ovviamente, la rete combinatoria stessa.



	2 bit di uscita		n bit di uscita	
Escursione dell'ingresso V	$0 < V < V_r$		$0 < V < V_r$	
N° intervalli di ingresso	$NI = 2^2 (=4)$		$NI = 2^n$	
Quanto di conversione	$q = V_r / 2^2$		$q = V_r / 2^n$	
Errore massimo di quantizzazione	$E_{MAX} = q / 2$		$E_{MAX} = q / 2$	
Relazione I/O	$N = \text{Trunc}(V / q)$		$N = \text{Trunc}(V / q)$	
Estremi di conversione	MAX \rightarrow	ingresso [V] $V_r - q < V < V_r$	uscita [b ₁ b ₀ (N)]	tutti 1 ($N_{MAX}=2^2-1=3$)
	min \rightarrow	$0 < V < q$	tutti 0 ($N=0$)	
Dimensionamento rete combinatoria	n° bit di ingresso = 2^2-1 n° bit di uscita = 2		n° bit di ingresso = 2^n-1 n° bit di uscita = n	
N° AO presenti nel circuito	n° AO = 2^2-1		n° AO = 2^n-1	
Dimensionamento resistenza R	R = valore non critico		R = valore non critico	
Tempo di conv. quando $N=N_{MAX}$	tempo di commutazione degli AO		tempo di commutazione degli AO	
Tempo di conv. quando $N < N_{MAX}$	tempo di commutazione degli AO		tempo di commutazione degli AO	

Esercizi - Convertitore A→D (ADC) flash

RICHIAMI DI TEORIA		
Escursione dell'ingresso V	$0 < V < V_r$	
N° intervalli di ingresso	$NI = 2^n$	
Quanto di conversione	$q = V_r / 2^n$	
Errore massimo di quantizzazione	$E_{MAX} = q / 2$	
Relazione I/O	$N = \text{Trunc}(V / q)$	
Estremi di conversione	MAX →	ingresso [V] $V_r - q < V < V_r$ uscita $[b_{n-1} \dots b_0 (N)]$ tutti 1 ($N_{MAX} = 2^n - 1$)
	min →	ingresso [V] $0 < V < q$ uscita $[b_{n-1} \dots b_0 (N)]$ tutti 0 ($N = 0$)
Dimensionamento rete combinatoria	n° bit di ingresso = $2^n - 1$ n° bit di uscita = n	
N°AO presenti nel circuito	n°AO = $2^n - 1$	
Dimensionamento resistenza R	R = valore non critico	
Tempo di conv. quando l'uscita è $N = N_{MAX}$	tempo di commutazione degli AO	
Tempo di conv. quando l'uscita è $N < N_{MAX}$	tempo di commutazione degli AO	
parametri circuitali	$V_r \text{ -- } R \text{ -- } n$	
parametri funzionali	relazione I/O -- NI -- q	

n° bit di uscita n
 n° intervalli di ingresso NI = $2^n - 1$
 n° decimale di uscita (N) 0 ... $2^n - 1$

Problema di analisi

Analizzare il seguente ADC flash.	Dati $V_{CC} = \pm 15$ $V_{SAT} = 90\% \text{ di } V_{CC}$ $V_r = 5$ $R = 2 \cdot 10^3$ $n = 2$	Quesiti 1) Relazione ingresso-uscita 2) Corretto funzionamento 3) Valutare la risposta del circuito al segnale di ingresso $V_0 = 2,4$ 4) Rappresentazione grafica.

1) $q = \frac{V_r}{2^n}$ $\left[\begin{array}{l} V_r = 5 \text{ dato} \\ n = 2 \text{ dato} \end{array} \right. \Rightarrow q = 1,25$

Per quanto riguarda la risposta alla tensione di ingresso $V_0 = 2,4$ si ha:

2) $N = \text{Trunc}\left(\frac{V_0}{q}\right)$ $\left[\begin{array}{l} V_0 = 2,4 \text{ dato} \\ q = 1,25 \text{ calcolo 1} \end{array} \right. \Rightarrow N = 1$

Problema di progetto

Progettare un ADC flash avente le seguenti caratteristiche.

Caratteristiche AO

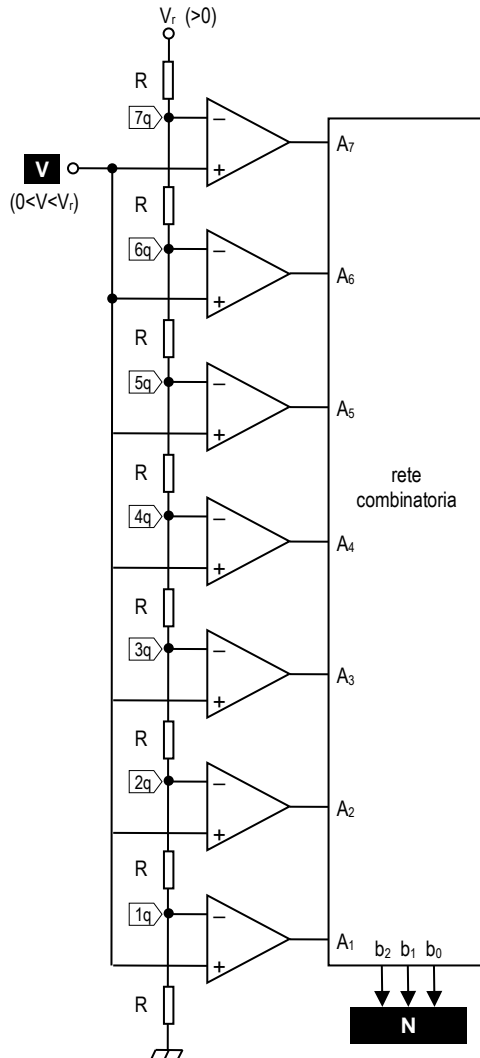
$V_{CC} = \pm 15$
 $V_{SAT} = 90\% \text{ di } V_{CC}$

Specifiche di progetto

$V_{MAX} = 4$
 $n = 3$

Quesiti

- 1) Dimensionamento del circuito
- 2) Corretto funzionamento
- 3) Rappresentazione grafica



$$\begin{aligned} V_r &= V_{MAX} = 4 \\ R &= 1000 \text{ (scelta)} \\ q &= V_r / 2^n = 0,5 \\ n^{\circ}AO &= 2^n - 1 = 7 \end{aligned}$$

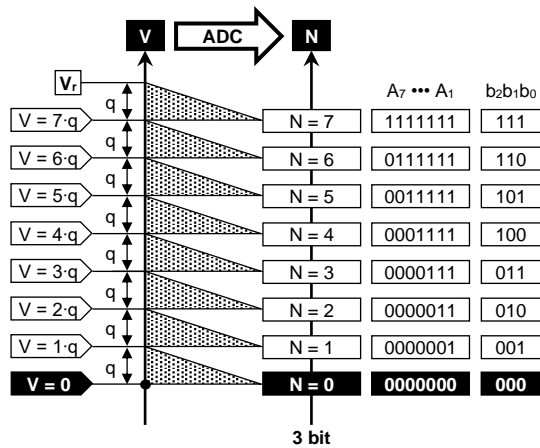
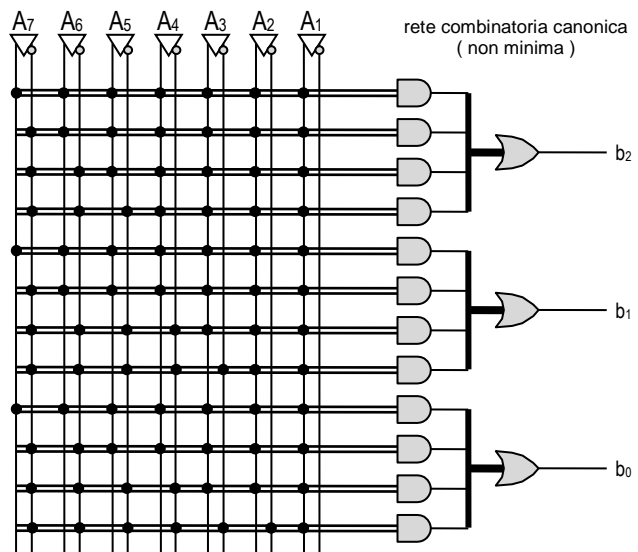


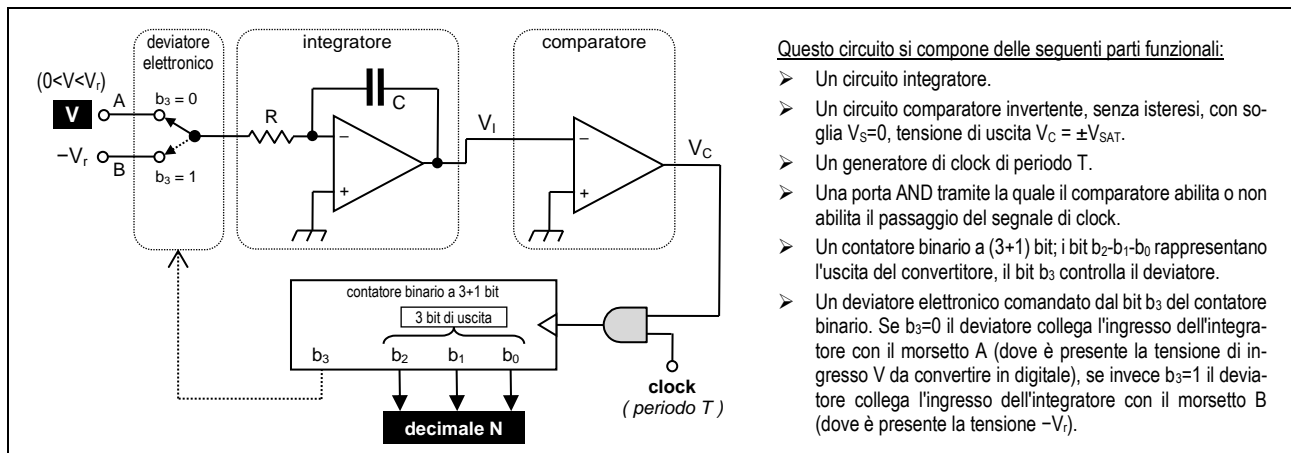
Tabella della verità

	IN							OUT		
	A_7	A_6	A_5	A_4	A_3	A_2	A_1	b_2	b_1	b_0
$N = 7 \rightarrow$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$N = 6 \rightarrow$	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0
$N = 5 \rightarrow$	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1
$N = 4 \rightarrow$	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0
$N = 3 \rightarrow$	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1
$N = 2 \rightarrow$	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0
$N = 1 \rightarrow$	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
$N = 0 \rightarrow$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

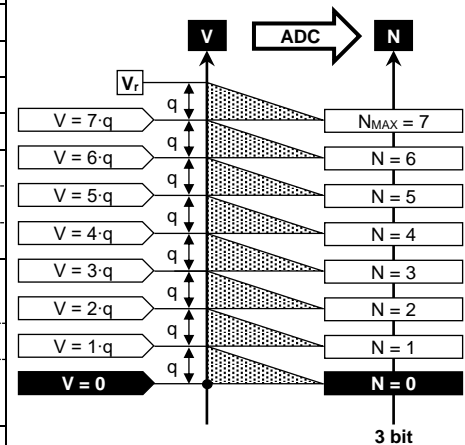


ADC a doppia rampa

Il convertitore ADC a doppia rampa, nella sua versione a 3 bit di uscita, è rappresentato nella figura seguente. La tensione di ingresso è indicata con V ($0 \leq V \leq V_r$), i bit di uscita sono indicati con le sigle b_2 - b_1 - b_0 che danno il numero decimale N , il quarto bit (b_3) è un bit di servizio necessario al funzionamento del circuito. Dopo il circuito sono riportate le sue formule di dimensionamento.



Escursione della tensione di ingresso V	$0 < V < V_r$	
N° intervalli di ingresso	$N_I = 2^3 (=8)$	
Quanto di conversione	$q = V_r / 2^3$	
Errore massimo di quantizzazione	$E_{MAX} = q / 2$	
Relazione I/O	$N = \text{Trunc}(V / q)$	
Estremi di conversione	MAX →	$V_r - q < V < V_r$ 111 ($N_{MAX}=2^3-1$)
	min →	$0 < V < q$ 000 ($N=0$)
Dimensionamento contatore	il conteggio del contatore avviene con 3+1 bit (3 bit per l'uscita + 1 bit per il deviatore)	
N° AO presenti nel circuito	$n^{\circ} \text{AO} = 2$	
Vincolo per il corretto funzionamento dell'integratore	$\frac{V_r \cdot 2^3 \cdot T}{R \cdot C} < V_{SAT}$	
Tempo di conv. quando $N=N_{MAX}$	$TC_{MAX} = 2^{3+1} \cdot T$	
Tempo di conv. quando $N < N_{MAX}$	$TC = 2^3 \cdot T + N \cdot T$	



Analisi del circuito

♦ Relazione ingresso-uscita.

Descriviamo il funzionamento del circuito nel caso in cui l'uscita decimale del convertitore sia $N=5$.

Istante ① (situazione iniziale).

- > Ipotizziamo che il condensatore sia scarico, quindi la tensione V_I è zero.
- > Ipotizziamo, inoltre, che il contatore abbia tutti i suoi bit di uscita uguali a 0. Ciò ha due conseguenze:
 - 1) poichè $(b_2-b_1-b_0)=(000)$, segue che il contatore fornisce in uscita $N=0$;
 - 2) poichè $b_3=0$, segue che il deviatore elettronico si trova sulla posizione A.

Intervallo ① → ② (deviatore su A - integratore alimentato da V - rampa negativa di V_I).

- > A partire dall'istante ① l'integratore è alimentato dalla tensione di ingresso V , e quindi produce una rampa negativa di equazione:

$$V_I(t) = -\frac{V}{R \cdot C} \cdot t.$$

- > Poichè la tensione V_I è negativa, il comparatore è in saturazione positiva ($V_C=+V_{SAT}$). Questa tensione abilita la porta AND, e così il segnale di clock entra nel contatore che inizia a contare.
- > La situazione appena descritta ha la durata di 2^3 impulsi di clock, pari al tempo $T_A=2^3 \cdot T$. Per tutto questo tempo il bit b_3 rimane a 0, quindi il deviatore rimane sul morsetto A consentendo così alla tensione di ingresso V di alimentare il circuito integratore. Al termine di tale intervallo la tensione V_I raggiunge un valore negativo di modulo:

$$|V_I(T_A)| = \frac{V}{R \cdot C} \cdot (2^3 \cdot T).$$

Istante ① (commutazione del deviatore A→B).

> In questo istante scade il tempo T_A . Ciò ha due conseguenze:

- 1) i bit $b_2-b_1-b_0$ vanno a 0, quindi il loro conteggio ricomincia dal valore decimale $N=0$;
- 2) il bit b_3 va a 1, quindi il deviatore commuta sul morsetto B, e quindi fa in modo che l'integratore sia alimentato dalla tensione negativa $-V_r$.

Intervallo ①→② (deviatore su B - integratore alimentato da $-V_r$ - rampa positiva di V_I).

> L'integratore è ora alimentato dalla tensione negativa $-V_r$, quindi produce una rampa positiva di equazione:

$$V_I(t) = -\frac{V_r}{R \cdot C} \cdot t.$$

- > Poiché in tutto questo intervallo la tensione V_I è negativa, il comparatore fornisce in uscita $V_C=V_{SAT}$, la porta AND continua ad abilitare il contatore il quale prosegue il suo conteggio. Tale conteggio ha la seguente caratteristica:
- il bit b_3 vale 1;
 - i bit $b_2-b_1-b_0$ nell'istante ① valgono tutti 0, e da questo valore proseguono il conteggio fino a che la tensione V_I raggiunge lo zero, il che si verifica nell'istante ②.

Istante ② (blocco del contatore).

> Appena V_I supera lo 0, accade che il comparatore va in saturazione negativa ($V_C=-V_{SAT}$). Ciò accade quando si verifica la condizione:

(discesa di V_I durante T_A) = (salita di V_I durante T_B).

Considerando che:

$$\text{discesa di } V_I \text{ durante } T_A: |V_I(T_A)| = \frac{V}{R \cdot C} \cdot (2^3 \cdot T)$$

$$\text{salita di } V_I \text{ durante } T_B: |V_I(T_B)| = \frac{V_r}{R \cdot C} \cdot T_B$$

l'equazione scritta sopra diventa:

$$\frac{V}{R \cdot C} \cdot (2^3 \cdot T) = \frac{V_r}{R \cdot C} \cdot (T_B) \quad \text{da cui si ricava} \rightarrow T_B = \frac{V}{V_r} \cdot (2^3 \cdot T).$$

- > Nell'istante ② la porta AND blocca il segnale di clock e il contatore si ferma. Indichiamo con N il numero decimale corrispondente al valore binario indicato in questo istante dai bit $b_2-b_1-b_0$ (nell'esempio che stiamo illustrando abbiamo $N=5$). Il valore di N si può calcolare con la formula:

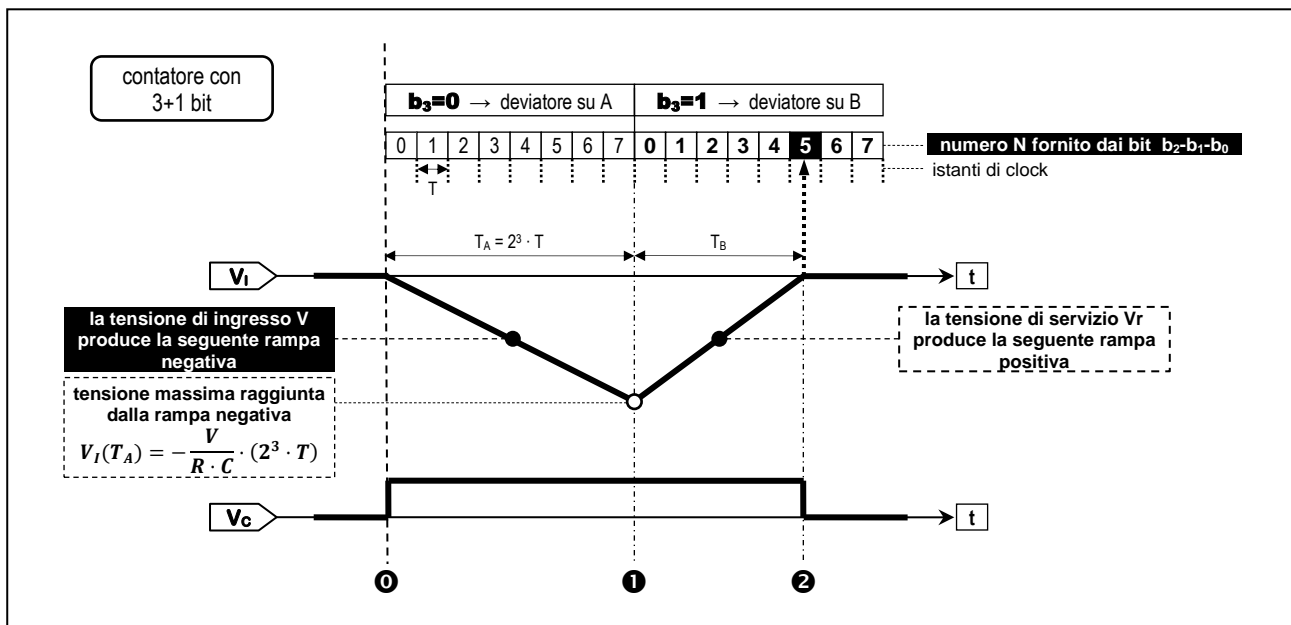
$$N = \text{Trunc} \left(\frac{T_B}{T} \right).$$

Sostituendo a T_B il valore trovato sopra, questa formula diventa:

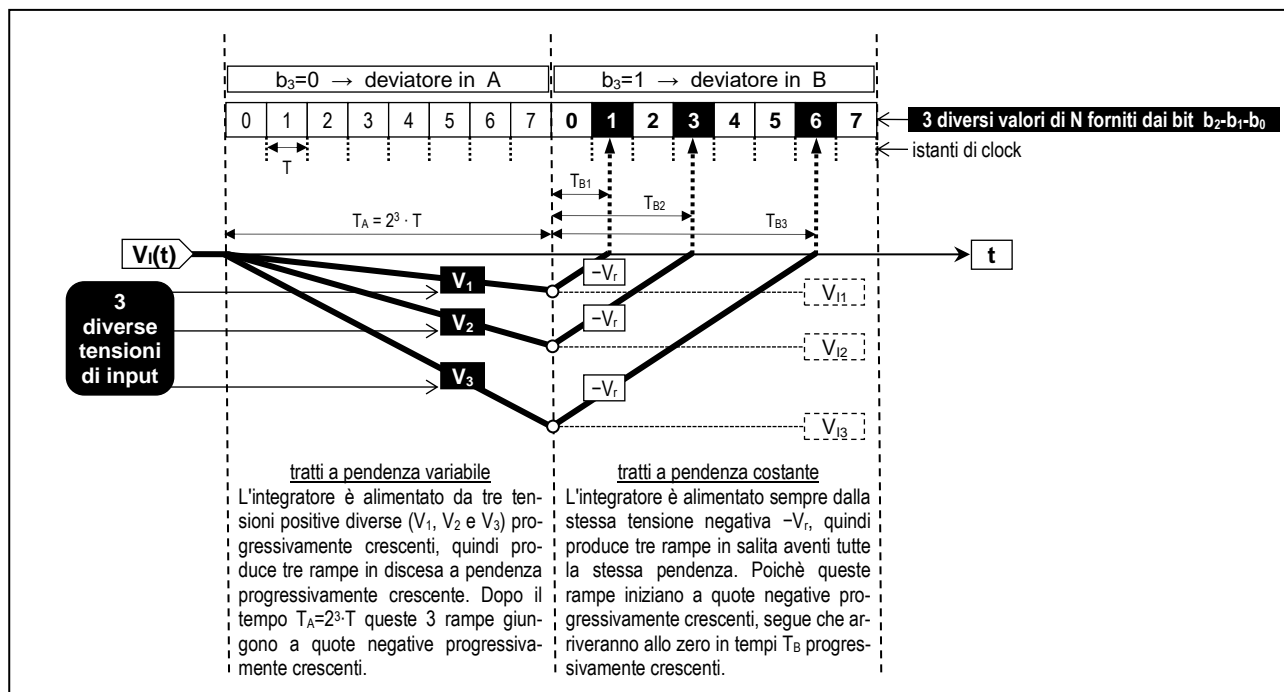
$$N = \text{Trunc} \left(\frac{V \cdot 2^3}{V_r} \right).$$

Posto $q=(V_r/2^3)$ [q: quanto di conversione] si ottiene infine:

$$N = \text{Trunc} \left(\frac{V}{q} \right).$$



Nota. Variazione del funzionamento del circuito al variare della tensione di ingresso V. La figura seguente mostra l'andamento di V_I per 3 diversi valori della tensione di ingresso V [V_1, V_2 e V_3 , con $V_1 < V_2 < V_3$].



Come si osserva nella figura di sopra, al variare della tensione di ingresso V varia anche la pendenza del tratto in discesa di V_I che, al tempo T_A , raggiunge tre diversi valori di tensione negativa [V_{I1}, V_{I2} e V_{I3}]. I tre tratti in salita, invece, essendo ora l'integratore alimentato sempre dalla stessa tensione $-V_r$, ha pendenza positiva costante. Componendo ciascun tratto in discesa col corrispondente tratto in salita, si ottengono i diversi valori di T_B (ossia T_{B1}, T_{B2} e T_{B3}) che individuano i diversi valori di N (ossia 1, 3, e 6).

Considerazioni finali

➤ **Massima escursione della tensione di ingresso V.** La tensione di ingresso V può variare da un minimo di 0 ad un massimo di $|V_r|$ (tensione che alimenta, in negativo, il morsetto B del deviatore).

➤ **Il tempo di conversione (TC).** Osservando il grafico $t \rightarrow V_I(t)$, si verifica che vale l'equazione:

$$TC = T_A + T_B = 2^3 \cdot T + N \cdot T.$$

Il massimo valore di questo tempo si ha in corrispondenza del massimo valore di V che, come abbiamo appena visto, è V_r . Si ha quindi:

$$TC_{MAX} = 2^3 \cdot T + 2^3 \cdot T = 2 \cdot (2^3 \cdot T) = 2^{3+1} \cdot T.$$

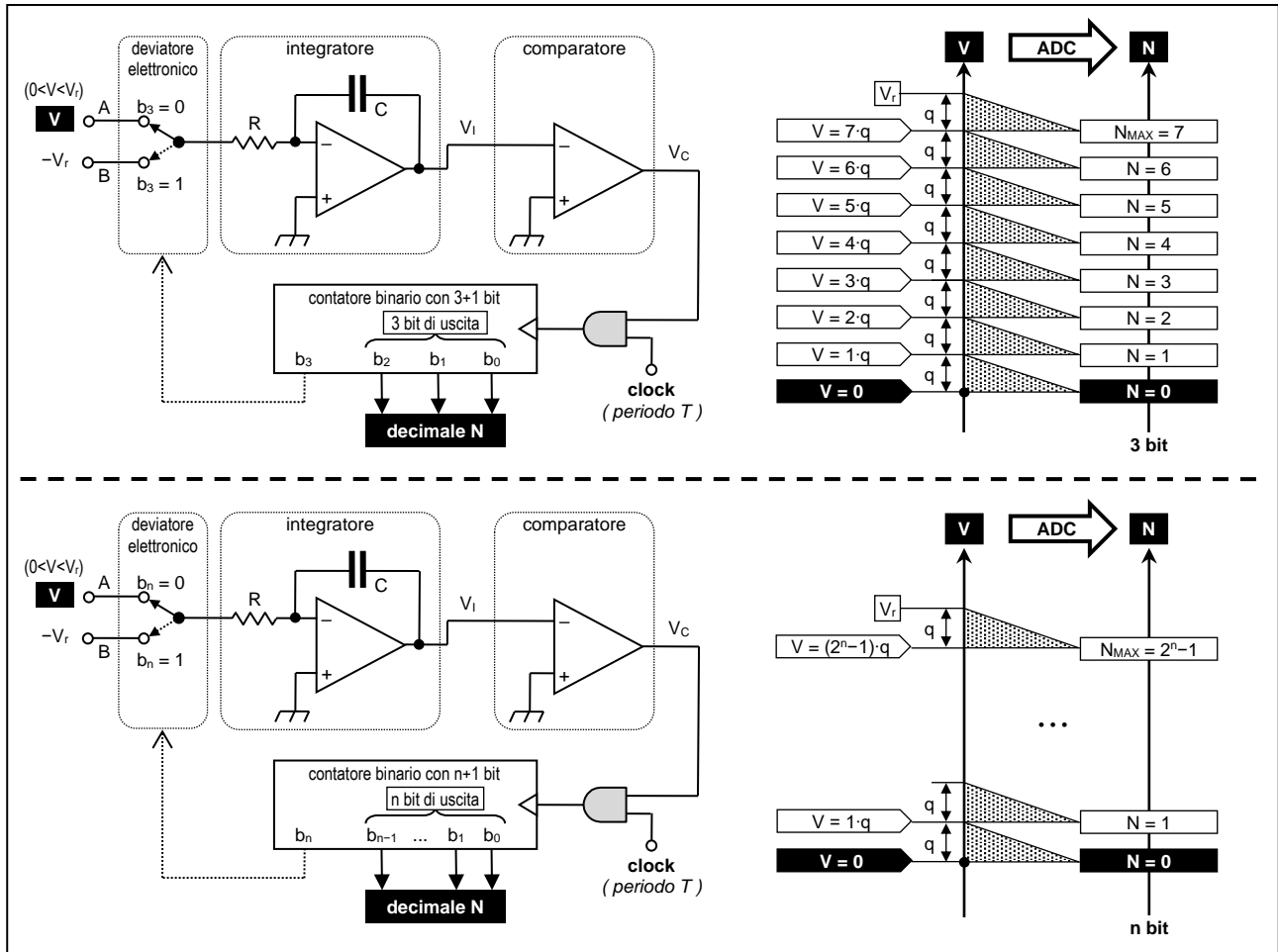
➤ **Dimensionamento del circuito integratore.** Osservando il grafico $t \rightarrow V_I$, si verifica che vale l'equazione:

$$V_I = \frac{V \cdot (2^3 \cdot T)}{R \cdot C} \Rightarrow |V_{I_MAX}| = \frac{V_{MAX} \cdot (2^3 \cdot T)}{R \cdot C} < V_{sat} \xrightarrow{V_{MAX}=V_r} \frac{V_r \cdot 2^3 \cdot T}{R \cdot C} < V_{SAT}.$$

➤ **Necessità di bloccare l'integratore a fine conteggio.** Dopo che il contatore ha raggiunto la fine del conteggio (istante 2), occorre togliere la tensione d'ingresso all'integratore. Infatti se l'integratore continuasse a essere alimentato dalla tensione $-V_r$, continuerebbe a integrare tale tensione producendo in uscita una tensione V_I crescente teoricamente all'infinito, ma praticamente limitata alla tensione di saturazione dell'AO.

Generalizzazione ad n (qualunque) bit di uscita

I risultati appena ottenuti per $n=3$ possono essere estesi al caso generale di n qualunque. A tal proposito abbiamo ridisegnato il circuito valido per $n=3$ mettendolo poi a confronto con quello relativo al caso generale di n qualunque. Ciò che cambia è soltanto il numero dei bit di uscita del contatore.

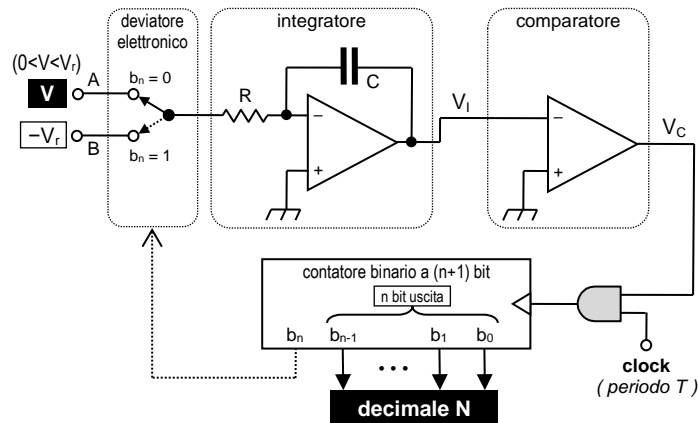


Osservando questi due circuiti si ricavano le seguenti formule generali:

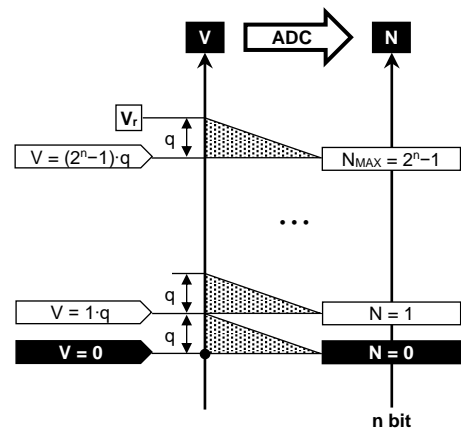
	contatore con 3+1 bit		contatore con n+1 bit		
Escursione della tensione di ingresso V	$0 < \mathbf{V} < V_r$		$0 < \mathbf{V} < V_r$		
N° intervalli di ingresso	$NI = 2^3 \quad (=8)$		$NI = 2^n$		
Quanto di conversione	$q = V_r / 2^3$		$q = V_r / 2^n$		
Errore massimo di quantizzazione	$E_{MAX} = q / 2$		$E_{MAX} = q / 2$		
Relazione I/O	$N = \text{Trunc} (\mathbf{V} / q)$		$N = \text{Trunc} (\mathbf{V} / q)$		
Estremi di conversione	MAX → min →	ingresso [V]	uscita [b₂ b₁ b₀ (N)]	ingresso [V]	uscita [b_{n-1} ... b₀ (N)]
		$V_r - q < \mathbf{V} < V_r$	111 (N _{MAX} =2 ³ -1)	$V_r - q < \mathbf{V} < V_r$	tutti 1 (N _{MAX} =2 ⁿ -1)
		$0 < \mathbf{V} < q$	000 (N=0)	$0 < \mathbf{V} < q$	tutti 0 (N=0)
Dimensionamento contatore	il conteggio del contatore avviene con 3+1 bit (3 bit per l'uscita + 1 bit per il deviatore)		il conteggio del contatore avviene con n+1 bit (n bit per l'uscita + 1 bit per il deviatore)		
N° AO presenti nel circuito	n°AO =: 2		n°AO = 2		
Vincolo per il corretto funzionamento dell'integratore	$\frac{V_r \cdot 2^3 \cdot T}{R \cdot C} < V_{SAT}$		$\frac{V_r \cdot 2^n \cdot T}{R \cdot C} < V_{SAT}$		
Tempo di conv. quando l'uscita è N=N _{MAX}	$TC_{MAX} = 2^{3+1} \cdot T$		$TC_{MAX} = 2^{n+1} \cdot T$		
Tempo di conv. quando l'uscita è N<N _{MAX}	$TC = 2^3 \cdot T + N \cdot T$		$TC = 2^n \cdot T + N \cdot T$		

Esercizi - Convertitore ADC a doppia rampa

RICHIAMI DI TEORIA



Escursione dell'ingresso V	$0 < \mathbf{V} < V_r$	
N° intervalli di ingresso	$N_I = 2^n$	
Quanto di conversione	$q = V_r / 2^n$	
Errore massimo di quantizzazione	$E_{MAX} = q / 2$	
Relazione I/O	$N = \text{Trunc}(\mathbf{V} / q)$	
Estremi di conversione	ingresso [V]	uscita [b_{n-1} ... b₀ (N)]
	MAX → $V_r - q < \mathbf{V} < V_r$	tutti 1 ($N_{MAX} = 2^{n-1}$)
	min → $0 < \mathbf{V} < q$	tutti 0 (N=0)
Dimensionamento del contatore	n+1 bit: (n bit per l'uscita + 1 bit per il deviatore)	
N°AO presenti nel circuito	$n^\circ \text{AO} = 2$	
Vincolo per il corretto funzionamento dell'integratore	$\frac{V_r \cdot 2^n \cdot T}{R \cdot C} < V_{SAT}$	
Tempo di conv. quando l'uscita è $N = N_{MAX}$	$TC_{MAX} = 2^{n+1} \cdot T$	
Tempo di conv. quando l'uscita è $N < N_{MAX}$	$TC = 2^n \cdot T + N \cdot T$	
Parametri circuitali	$V_r \text{ -- } R \text{ -- } C \text{ -- } n \text{ -- } T \text{ -- } V_{SAT}$	
Parametri funzionali	rel. $V \rightarrow N \text{ -- } N_I \text{ -- } q \text{ -- } TC \text{ -- } TC_{MAX}$	



Problema di analisi

Analizzare il seguente ADC a doppia rampa.	Dati	Quesiti
	$V_{CC} = \pm 15$ $V_{SAT} = 90\% \text{ di } V_{CC}$ $V_r = 10$ $R = 2 \cdot 10^3$ $C = 4 \cdot 10^{-6}$ $T = 1 \cdot 10^{-3}$ n° bit uscita del contatore = 16	1) Quanto di conversione 2) Relazione I/O 3) TC_{MAX} 4) Valutare la risposta del circuito al segnale di ingresso $V_I = 2,4$.

- | | | |
|---|---|-------------------------------------|
| 1) $n = n^{\circ} \text{ uscite} - 1$ | [$n^{\circ} \text{ uscite} = 16$ dato] | → $n = 15$ |
| 2) $q = \frac{V_r}{2^n}$ | [$V_r = 10$ dato
$n = 15$ calcolo 1] | → $q = 30,52 \cdot 10^{-3}$ |
| 3) $N = \text{Trunc}\left(\frac{V}{q}\right)$ | [$q = 30,52 \cdot 10^{-3}$ calcolo 2] | → $N = \text{Trunc}(32,76 \cdot V)$ |
| 4) $TC_{MAX} = 2^{n+1} \cdot T$ | [$T = 1 \cdot 10^{-3}$ dato
$n = 15$ calcolo 1] | → $TC_{MAX} = 65,536$ |
| 5) $V_{SAT} = 90\% \text{ di } V_{CC}$ | [$V_{CC} = 15$ dato] | → $V_{SAT} = 13,5$ |

$$6) \frac{V_r \cdot 2^n \cdot T}{R \cdot C} < V_{SAT} \quad \left[\begin{array}{l} V_r = 10 \text{ dato} \\ R = 20 \cdot 10^3 \text{ dato} \\ C = 4 \cdot 10^{-3} \text{ dato} \\ n = 15 \text{ calcolo 1} \\ T = 1 \cdot 10^{-3} \text{ dato} \\ V_{SAT} = 13,5 \text{ calcolo 5} \end{array} \right. \rightarrow 4,1 < 13,5 \text{ controllo OK}$$

$$7) N = \text{Trunc}\left(\frac{V_1}{q}\right) \quad \left[\begin{array}{l} V_1 = 2,4 \text{ dato} \\ q = 30,52 \cdot 10^{-3} \text{ calcolo 2} \end{array} \right. \rightarrow N = 78$$

Problema di progetto

Progettare un ADC a doppia rampa avente le seguenti caratteristiche.	<u>Caratteristiche AO</u>	<u>Specifiche di progetto</u>	<u>Quesiti</u>
	$V_{CC} = \pm 15$ $V_{SAT} = 90\% \text{ di } V_{CC}$	$V_{MAX} = 5$ $n = 15$ $TC_{MAX} = 0,1$	1) Dimensionamento del circuito 2) Valutare la risposta del circuito al segnale di ingresso $V_1=3,2$. 3) Corretto funzionamento 4) Rappresentazione grafica

$$1) n = n^{\circ}uscite - 1 \quad [n = 15 \text{ dato}] \rightarrow n^{\circ}uscite = 16$$

$$2) V_r = V_{MAX} \quad [V_{MAX} = 5 \text{ dato}] \rightarrow V_r = 5$$

$$3) q = \frac{V_r}{2^n} \quad \left[\begin{array}{l} V_r = 5 \text{ calcolo 2} \\ n = 15 \text{ dato} \end{array} \right. \rightarrow q = 15,26 \cdot 10^{-3}$$

$$4) V_{SAT} = 90\% \text{ di } V_{CC} \quad [V_{CC} = 15 \text{ dato}] \rightarrow V_{SAT} = 13,5$$

$$5) TC_{MAX} = 2^{n+1} \cdot T \quad \left[\begin{array}{l} n = 15 \text{ dato} \\ TC_{MAX} = 0,1 \text{ dato} \end{array} \right. \rightarrow T < 15,26 \cdot 10^{-6} \rightarrow \text{scelta } T = 10 \cdot 10^{-6}$$

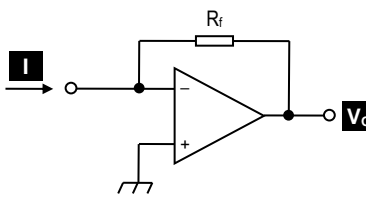
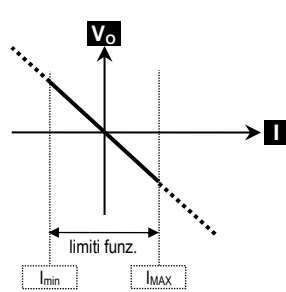
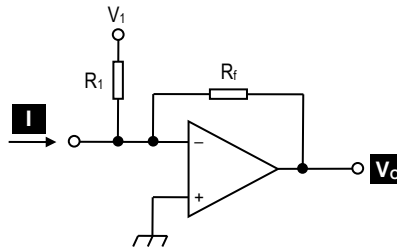
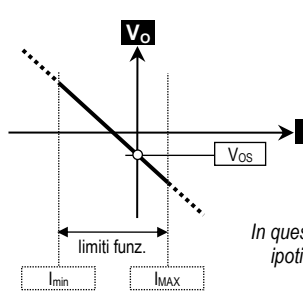
$$6) f = \frac{1}{T} \quad [T = 10 \cdot 10^{-6} \text{ calcolo 5}] \rightarrow f = 100 \cdot 10^3$$

$$7) \frac{V_r \cdot 2^n \cdot T}{R \cdot C} < V_{SAT} \quad \left[\begin{array}{l} V_r = 5 \text{ calcolo 2} \\ n = 15 \text{ dato} \\ T = 10 \cdot 10^{-6} \text{ calcolo 5} \\ V_{SAT} = 13,5 \text{ calcolo 4} \end{array} \right. \rightarrow \begin{cases} C = 1 \cdot 10^{-3} \text{ scelta} \\ R > 121,36 \cdot 10^3 \rightarrow \text{scelta } R = 140 \cdot 10^3 \end{cases}$$

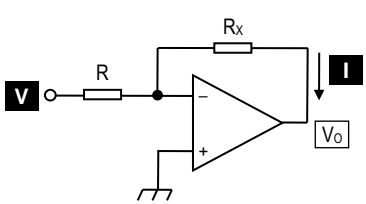
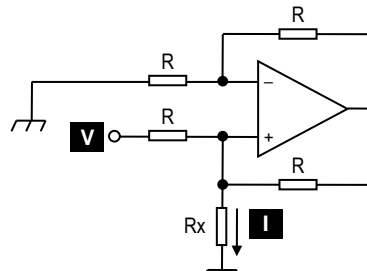
$$8) N = \text{Trunc}\left(\frac{V_1}{q}\right) \quad \left[\begin{array}{l} V_1 = 3,2 \text{ dato} \\ q = 15,26 \cdot 10^{-3} \text{ calcolo 3} \end{array} \right. \rightarrow N = 209$$

QUADRI RIASSUNTIVI

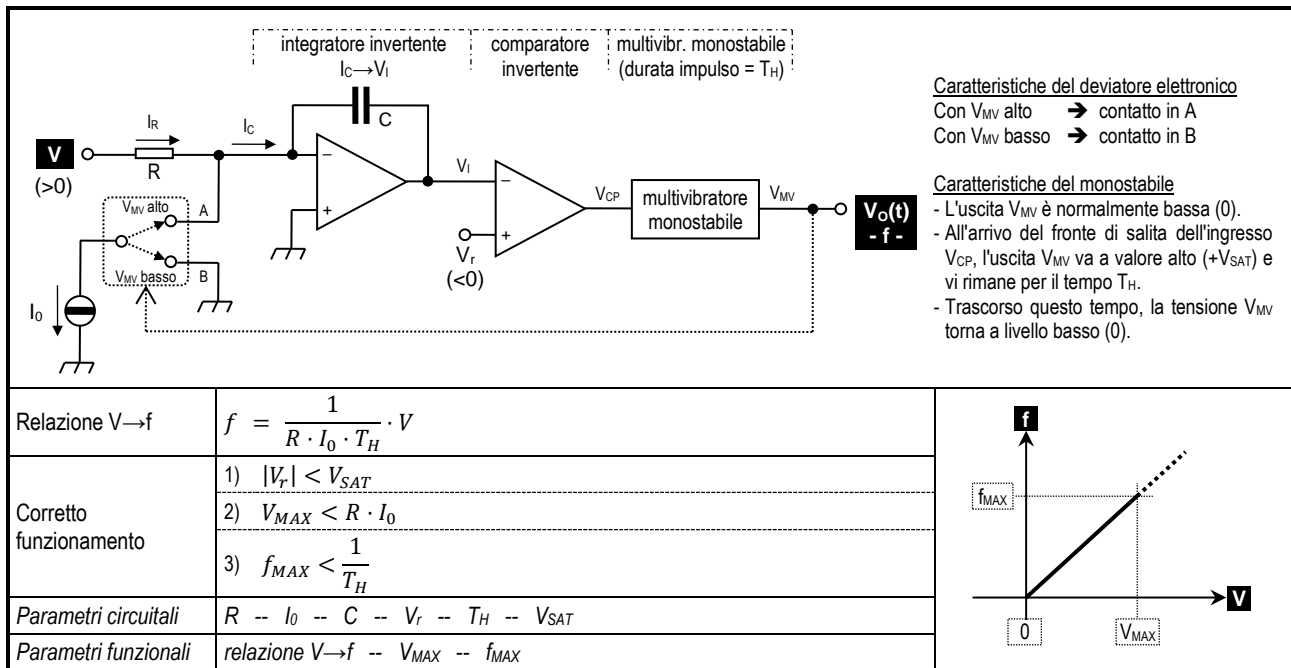
Convertitori corrente→tensione

Convertitore I→V senza offset (invertente)		Convertitore I→V senza offset (invertente)	
 		  <p><i>In questo schema si è ipotizzato $V_{OS} < 0$.</i></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	$R_f \sim V_{SAT}$	Parametri circuitali	$R_1 \sim R_f \sim V_1 \sim V_{SAT}$
Parametri funzionali	relazione: $I \rightarrow V_O \sim I_{min} \sim I_{MAX}$	Parametri funzionali	relazione: $I \rightarrow V_O \sim V_{OS} \sim I_{min} \sim I_{MAX}$

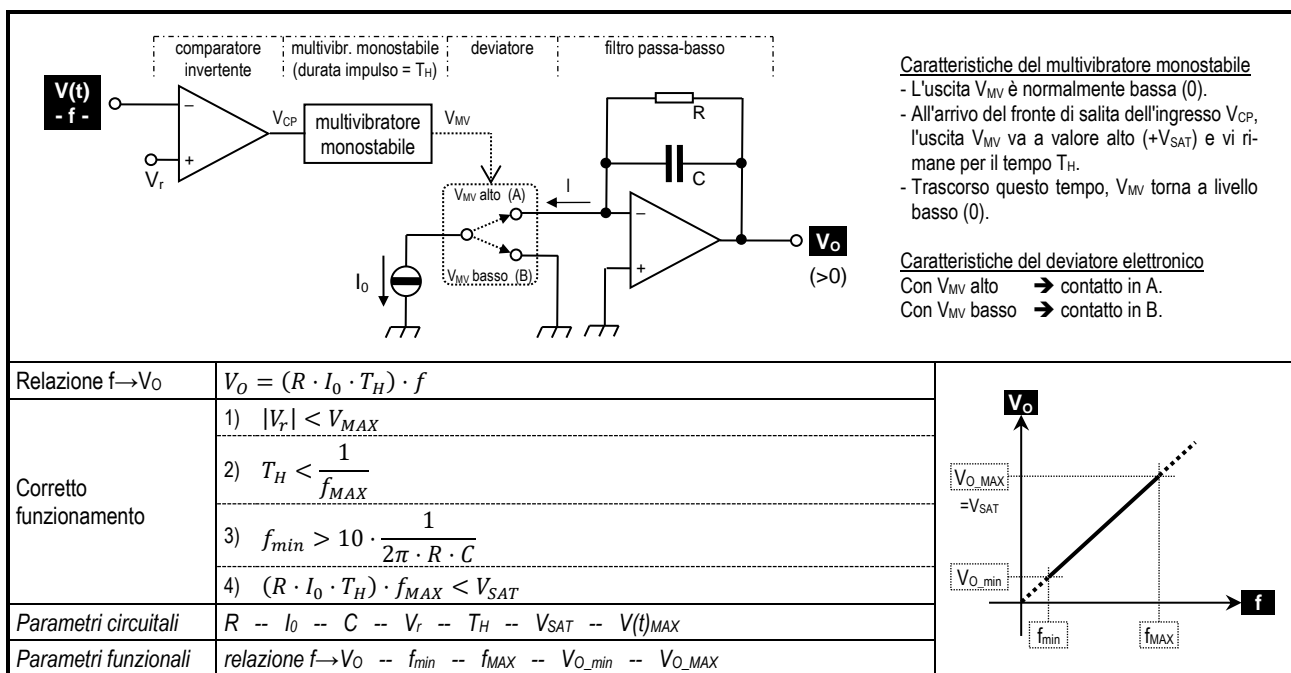
Convertitori tensione→corrente

Convertitore V→I senza riferimento a massa		Convertitore V→I con riferimento a massa	
 <p>La corrente di uscita I attraversa una resistenza R_X che non ha terminali a massa.</p>		 <p>La corrente di uscita I attraversa una resistenza R_X 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	$R \sim R_X \sim V_{SAT}$	Parametri circuitali	$R \sim R_X \sim V_{SAT}$
Parametri funzionali	relazione: $V \rightarrow I \sim V_{min} \sim V_{MAX}$	Parametri funzionali	relazione: $V \rightarrow I \sim V_{min} \sim V_{MAX}$

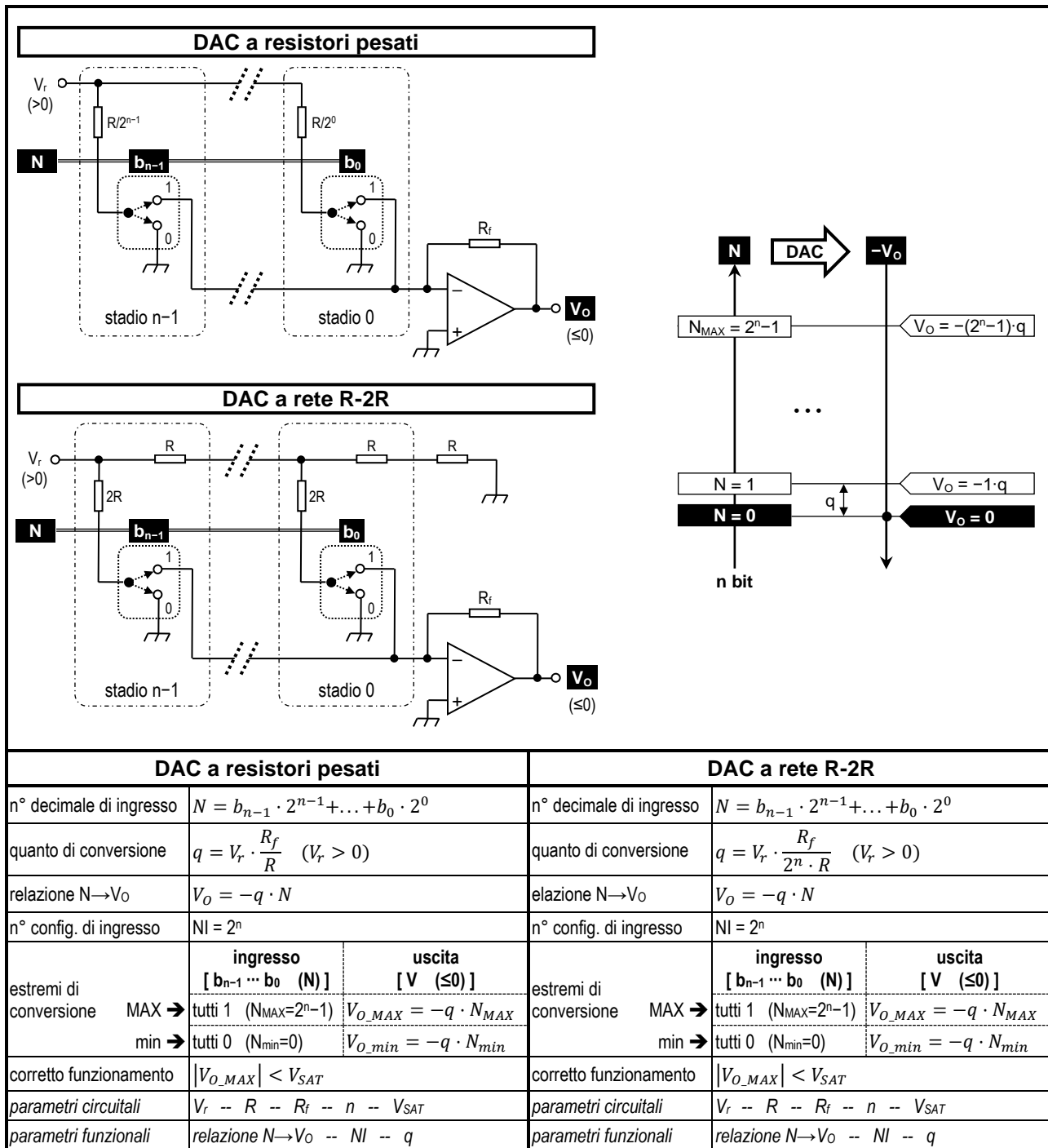
Convertitori tensione→frequenza



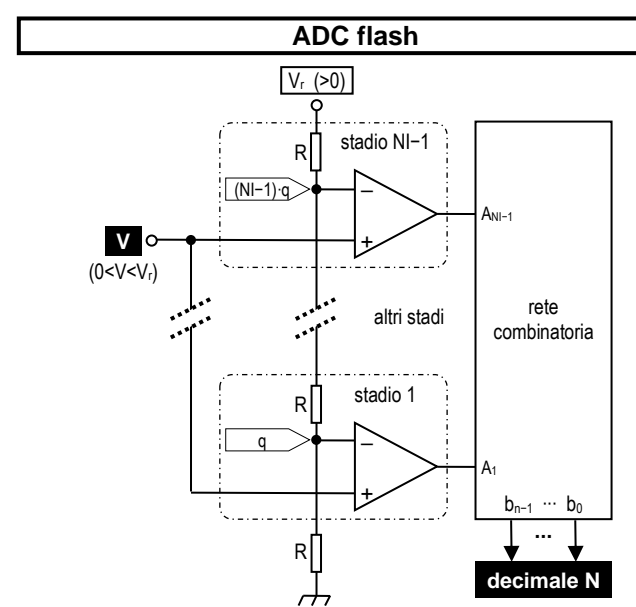
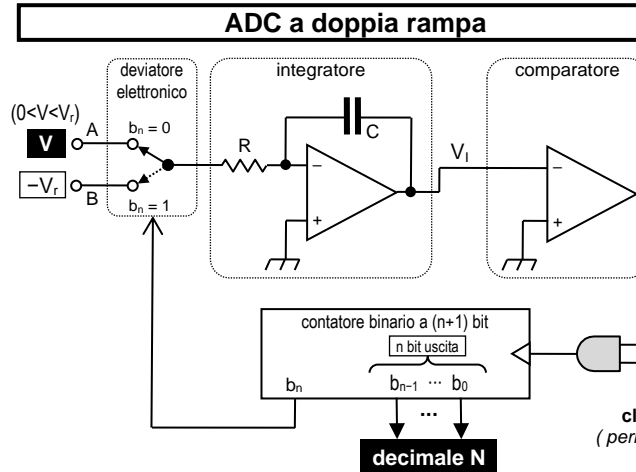
Convertitori frequenza→tensione



Convertitori digitale→analogico



Convertitori analogico→digitale

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	$NI = 2^n$	n° intervalli di ingresso	$NI = 2^n$
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	ingresso [V]	uscita [b_{n-1} ... b_0 (N)]	
	MAX → $V_r - q < V < V_r$	tutti 1 (N_{MAX}=2^n-1)	
	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 -- NI -- q	parametri funzionali	relazione V→N -- NI -- q -- TC_{MAX}