

Azionamenti elettrici

Modulazione e modulatori

a cura di **Alberto Tonielli**
Professore Associato di
Tecnologie dei Sistemi di Controllo

DEIS Università di Bologna
Viale Risorgimento, 2
40136 Bologna
Tel. + Fax (051-6443024)



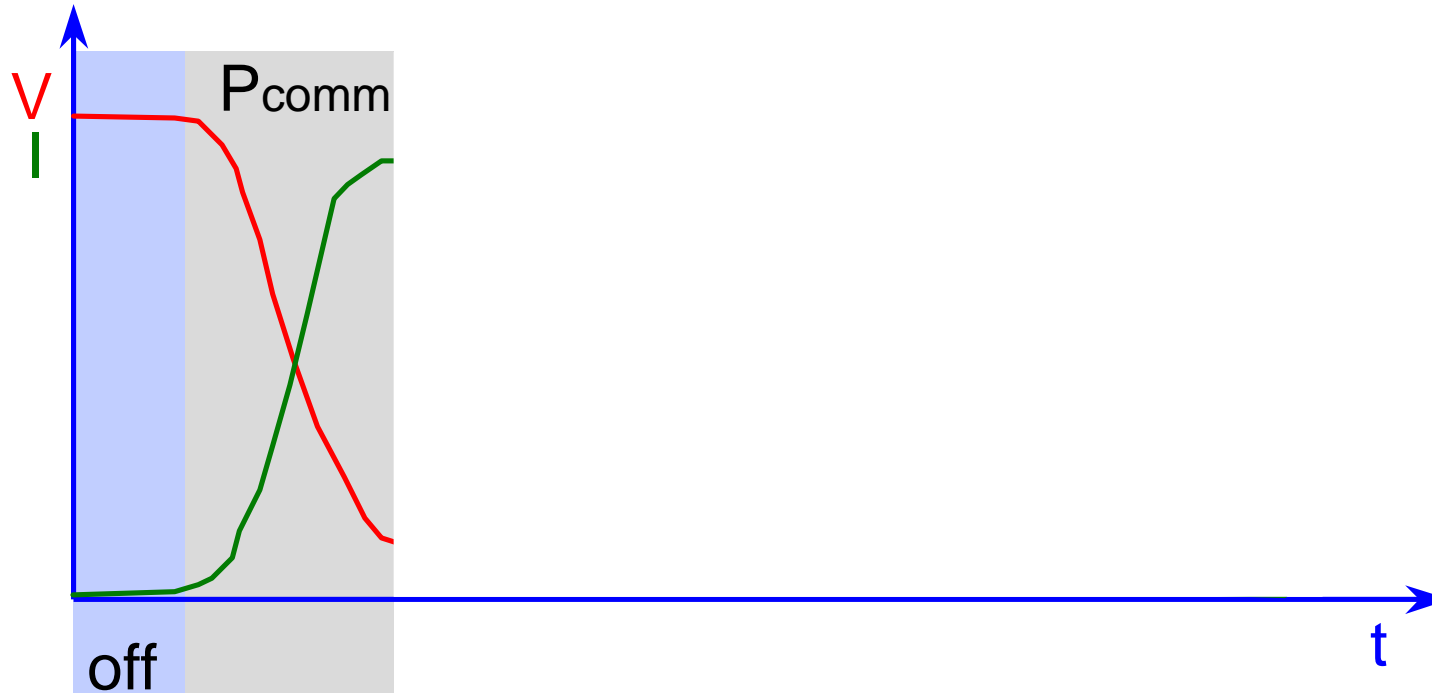
Amplificatori di potenza

- ❑ caratteristiche di commutazione dei transistori
- ❑ tipologie di transistori di potenza
- ❑ modulazione PWM simmetrica e non simmetrica
 - ⇒ realizzazione
- ❑ carichi tipici
 - ⇒ confronto tra le due modulazioni
- ❑ caratteristiche generali di un amplificatore di potenza

Amplificatore di potenza



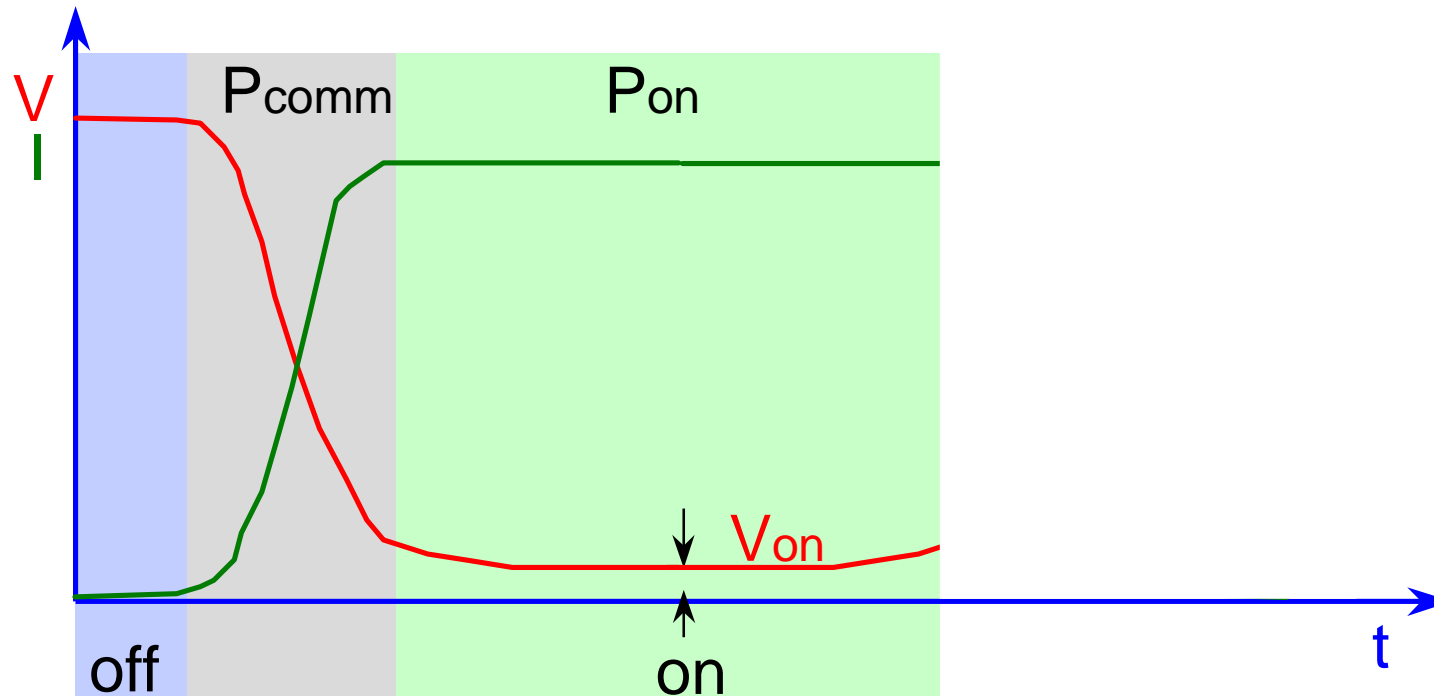
I Transistori sono interruttori non ideali



Amplificatore di potenza



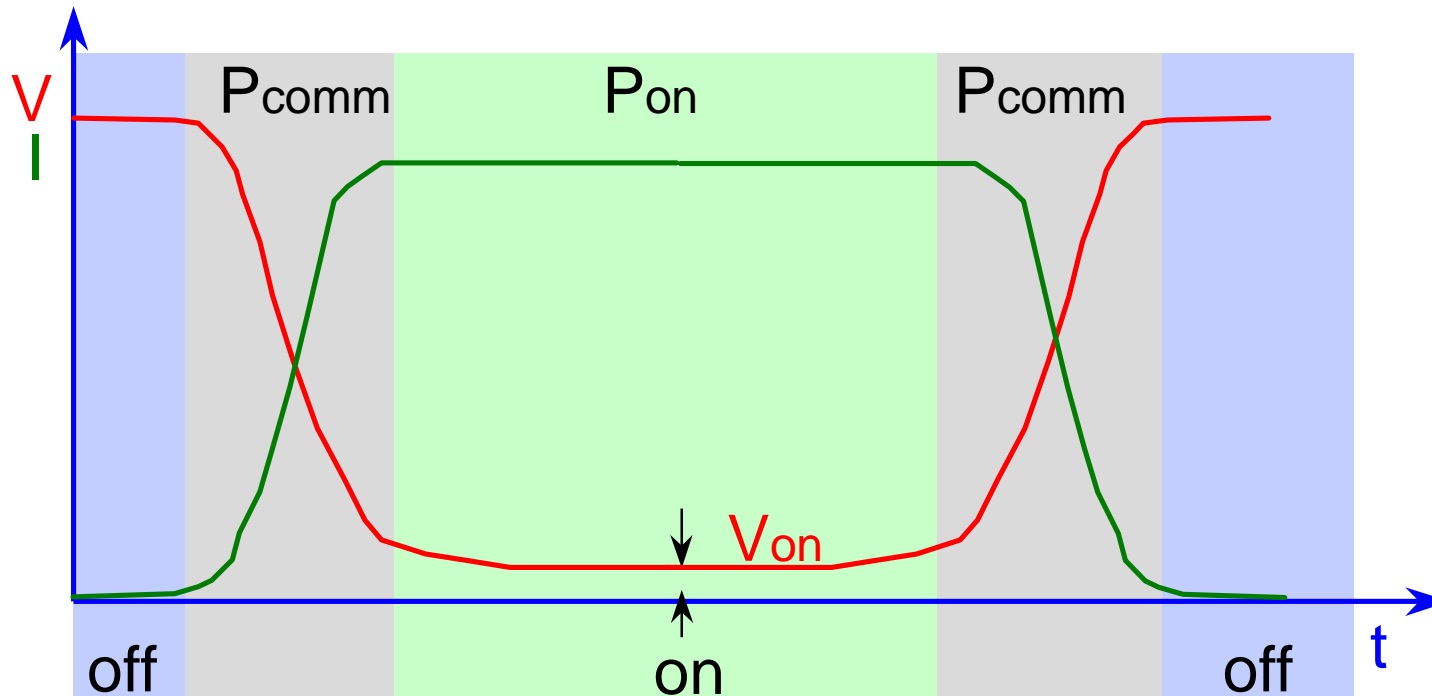
I Transistori sono interruttori non ideali



Amplificatore di potenza

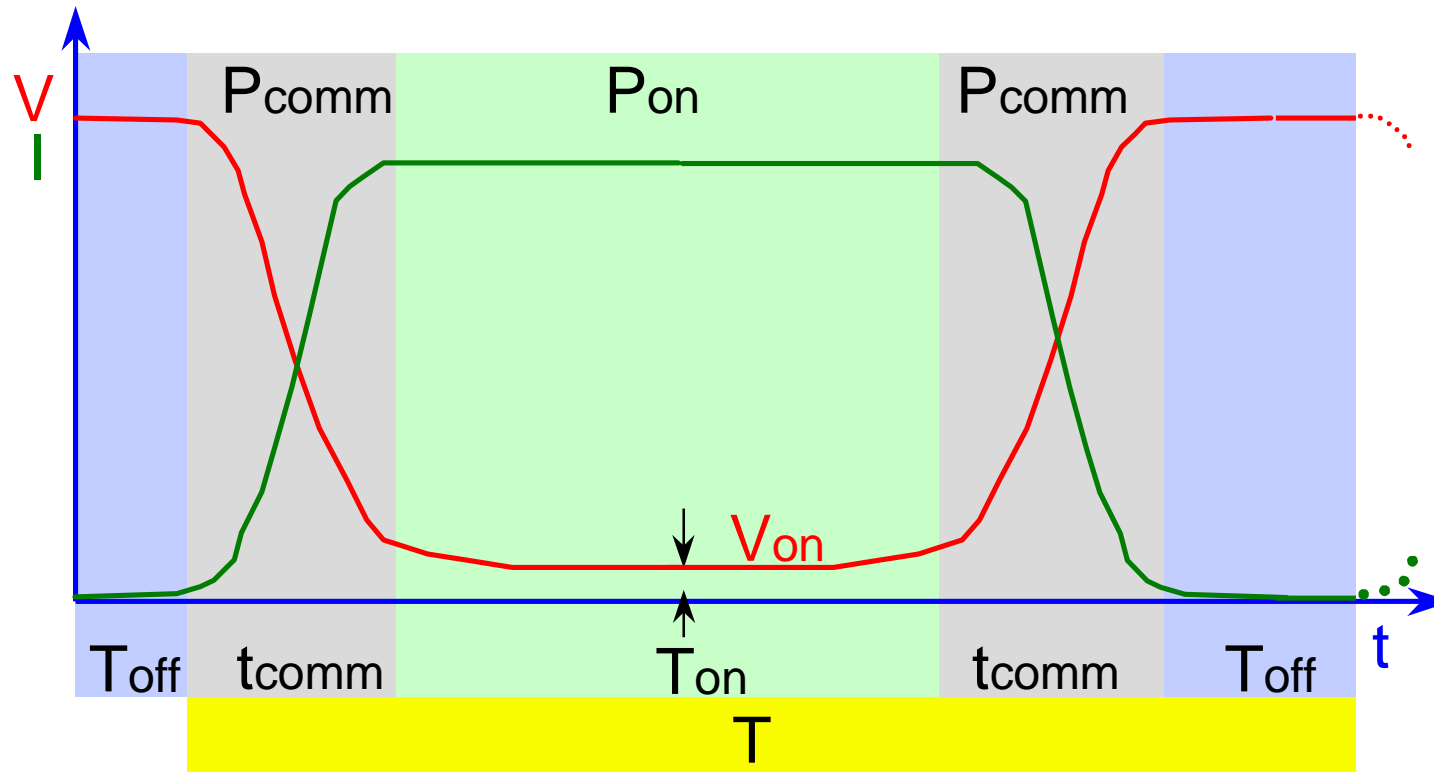


I Transistori sono interruttori non ideali



Amplificatore di potenza

I Transistori sono interruttori non ideali



$$P_d = P_{on} + 2P_{comm} = (V_{on} I_{max}) \frac{t_{on}}{T} + 2 \left(\frac{V_{max} I_{max}}{2 \cdot 2} \right) \frac{t_{comm}}{T}$$

Amplificatore di potenza



Principali semiconduttori di potenza

Tipo	Bipolare
Potenza	< 400KW
Frequenza	5-8KHz
Corrente	< 500A
Tensione	< 1400V

Amplificatore di potenza



Principali semiconduttori di potenza

Tipo	Bipolare	MOS-FET
Potenza	< 400KW	< 10KW
Frequenza	5-8KHz	20-30 KHz
Corrente	< 500A	< 50A
Tensione	< 1400V	< 800V

Amplificatore di potenza



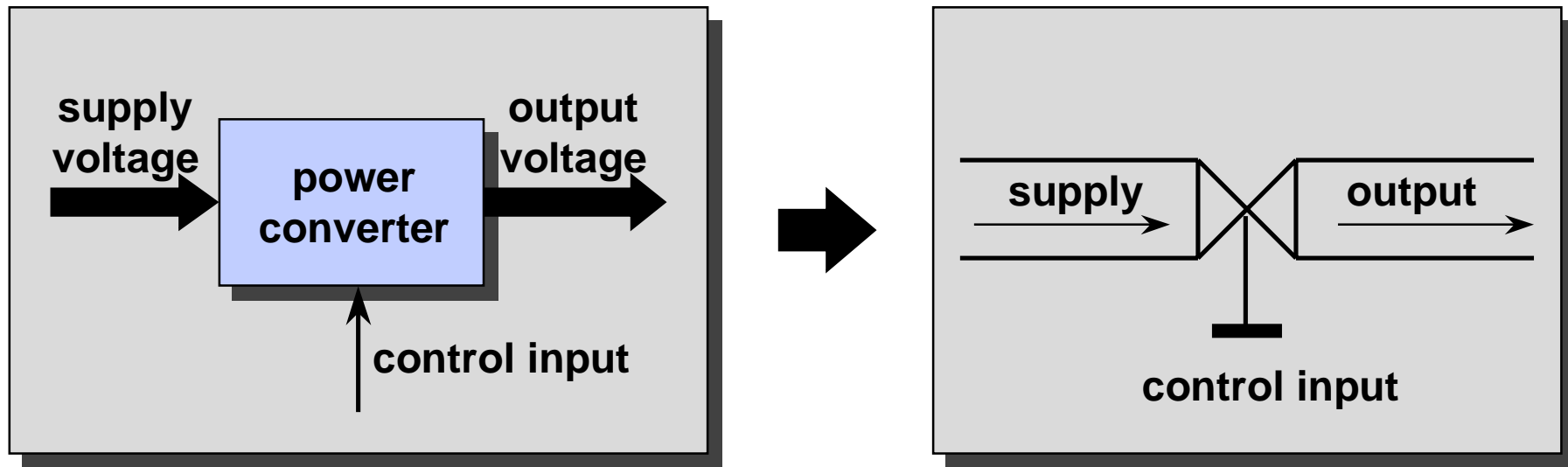
Principali semiconduttori di potenza

Tipo	Bipolare	MOS-FET	IGBT
Potenza	< 400KW	< 10KW	< 600 KW
Frequenza	5-8KHz	20-30 KHz	12-20KHz
Corrente	< 500A	< 50A	< 600A
Tensione	< 1400V	< 800V	< 1800V

Componenti di un Azionamento



Convertitore di potenza

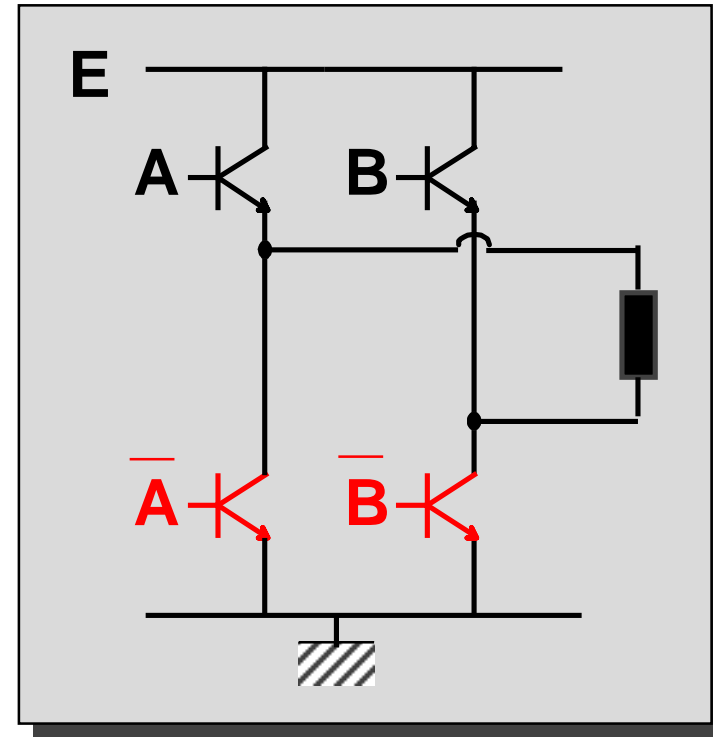
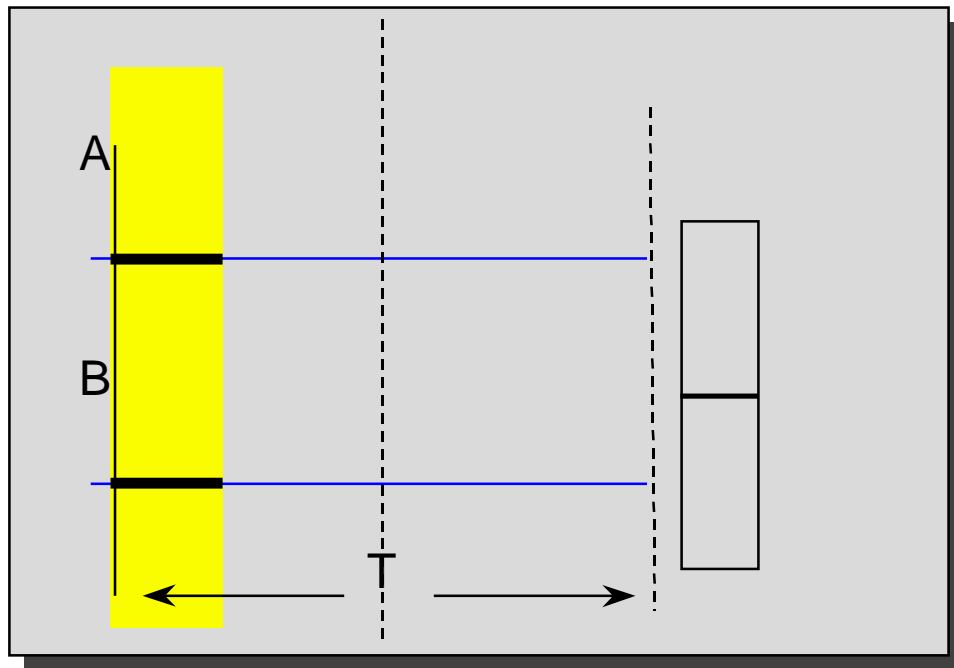


Non si riesce a costruire amplificatori di potenza a controllo continuo (lineari)

Componenti di un Azionamento



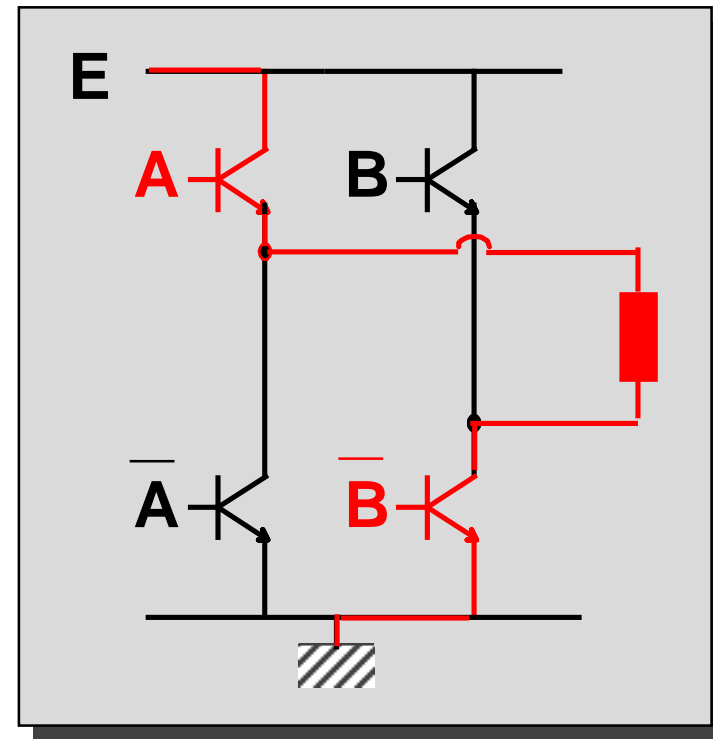
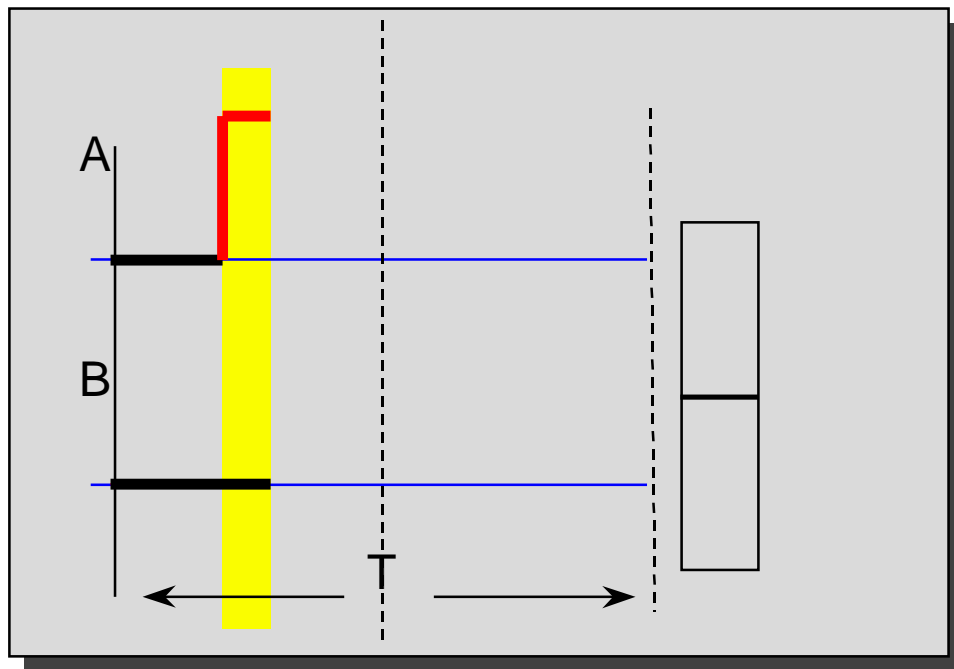
Modulazione a Larghezza di Impulso (PWM)



Componenti di un Azionamento



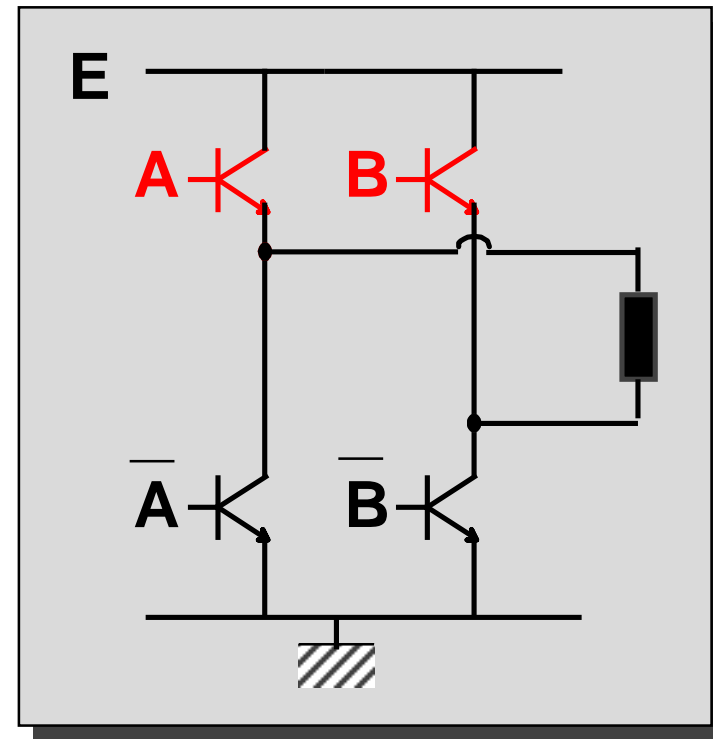
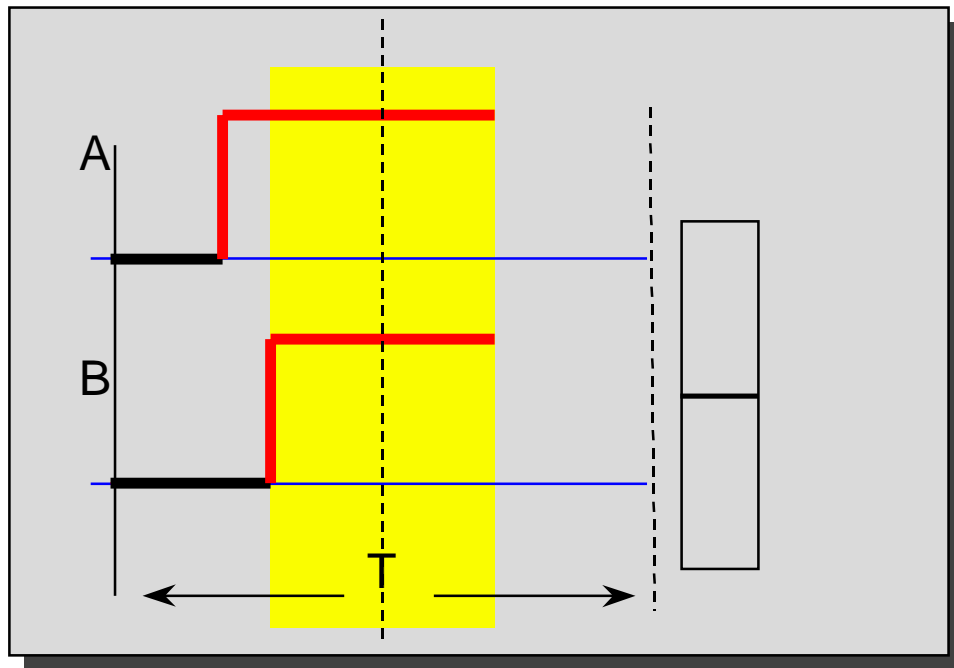
Modulazione a Larghezza di Impulso (PWM)



Componenti di un Azionamento



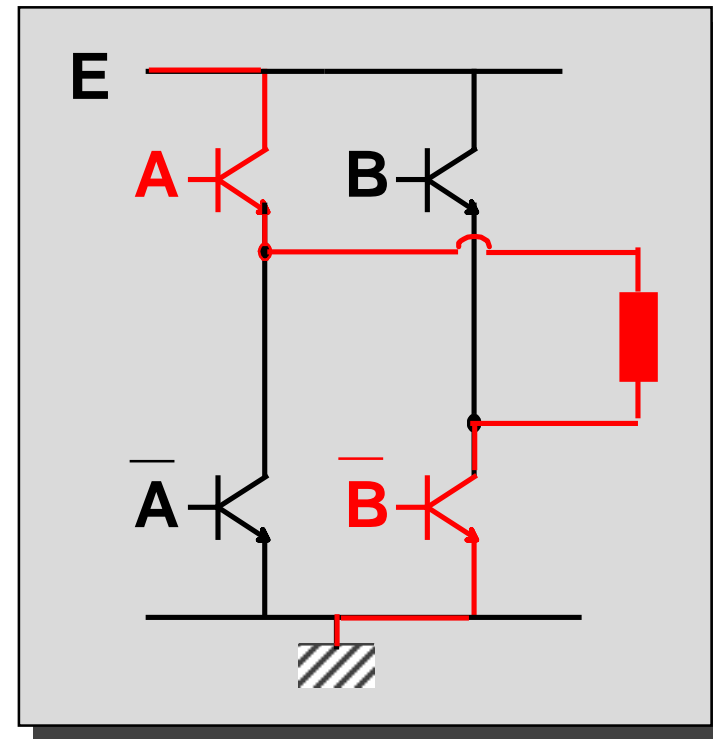
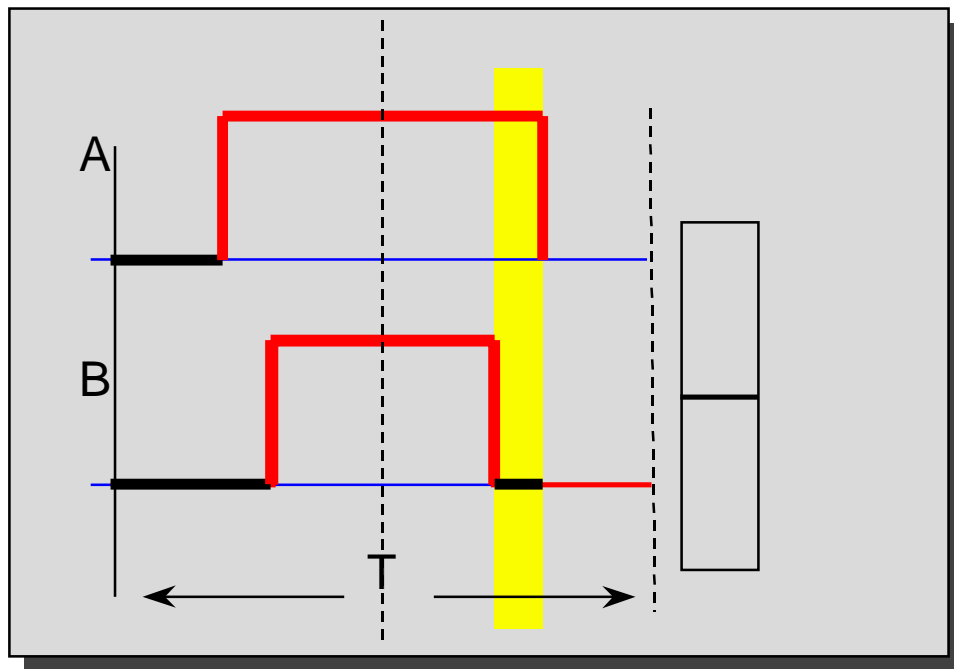
Modulazione a Larghezza di Impulso (PWM)



Componenti di un Azionamento

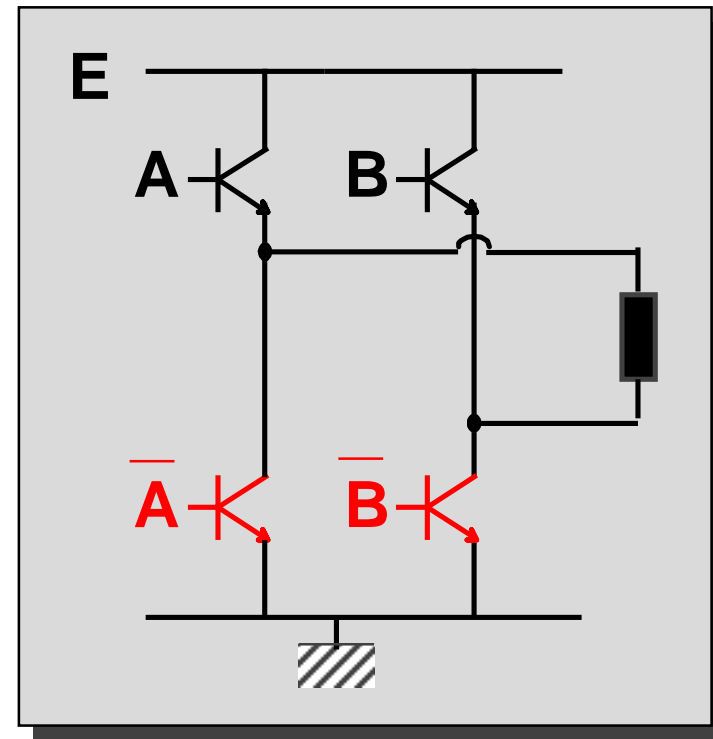
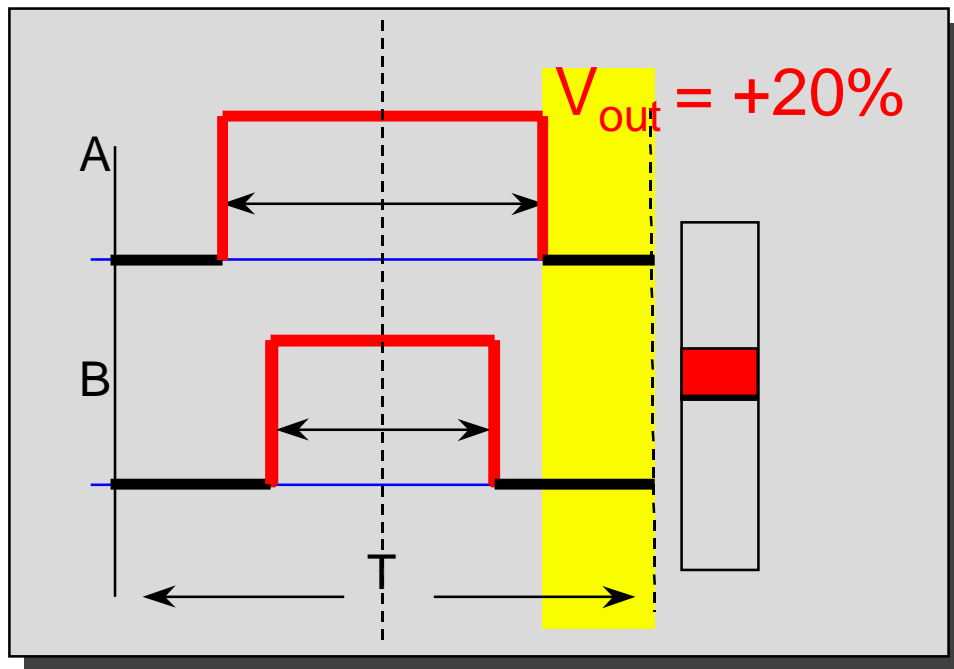


Modulazione a Larghezza di Impulso (PWM)



Componenti di un Azionamento

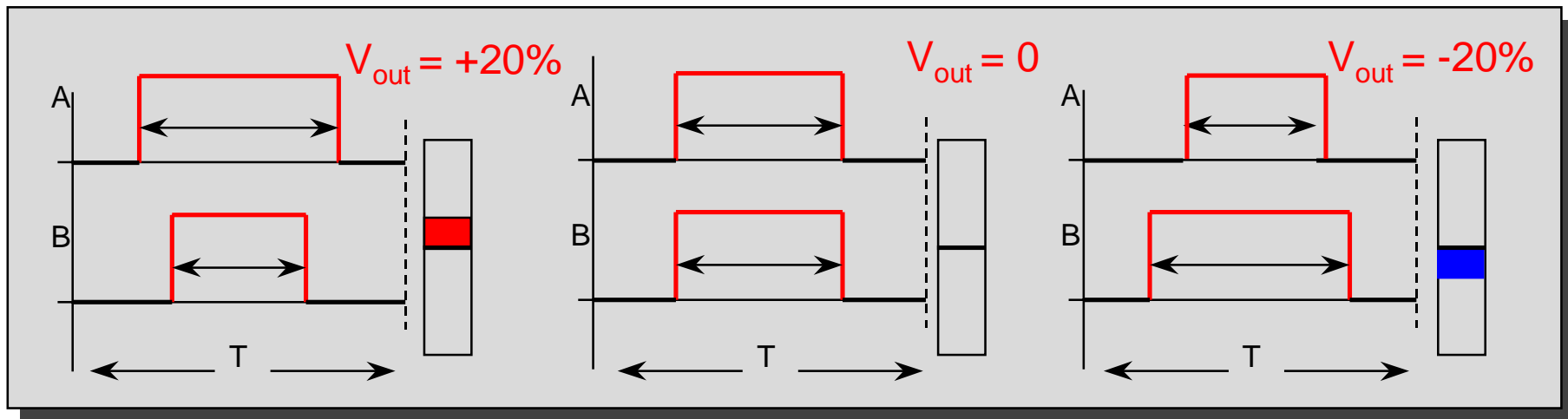
Modulazione a Larghezza di Impulso (PWM)



Componenti di un Azionamento



Modulazione a Larghezza di Impulso (PWM)



$$V_{out} > 0$$

$$V_{out} = 0$$

$$V_{out} < 0$$

Amplificatore di potenza



Problemi di controllo

- ❑ Controllo di tensione
 - ⇨ modulazione PWM
 - amplificatore lineare per frequenze $\ll f_{\text{mod}}$
- ❑ regolatori standard analogici o digitali

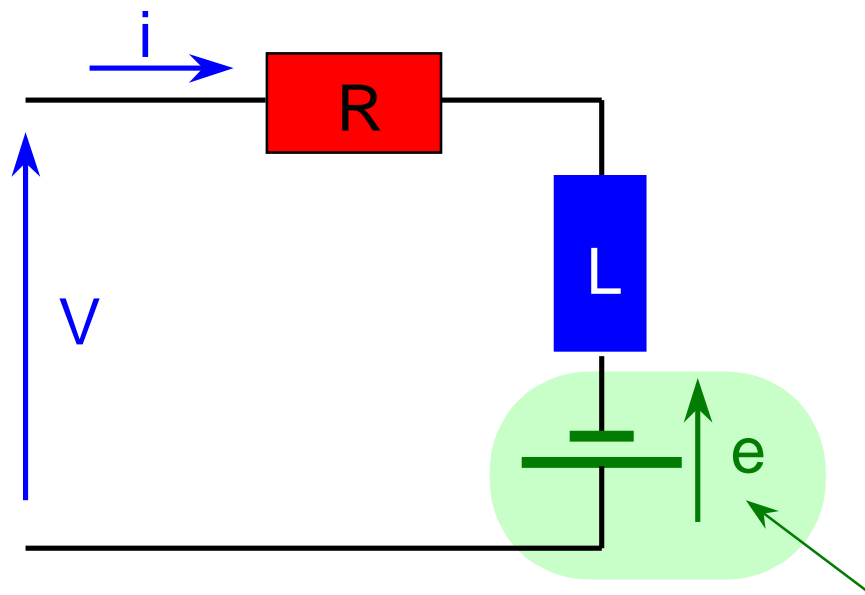
- ❑ Controllo di corrente
 - ⇨ modulazione ad isteresi
 - amplificatore ideale per frequenze prossime a f_{mod}
- ❑ regolatori a struttura variabile
 - ⇨ pilotaggio diretto dell'inverter

Amplificatore di potenza



Problemi di controllo

- Modello generale del carico
 - ↳ carico monofase



$$V = Ri + L \frac{di}{dt} + e$$

$$\frac{di}{dt} = -\frac{R}{L}i - \frac{1}{L}e + \frac{1}{L}V$$

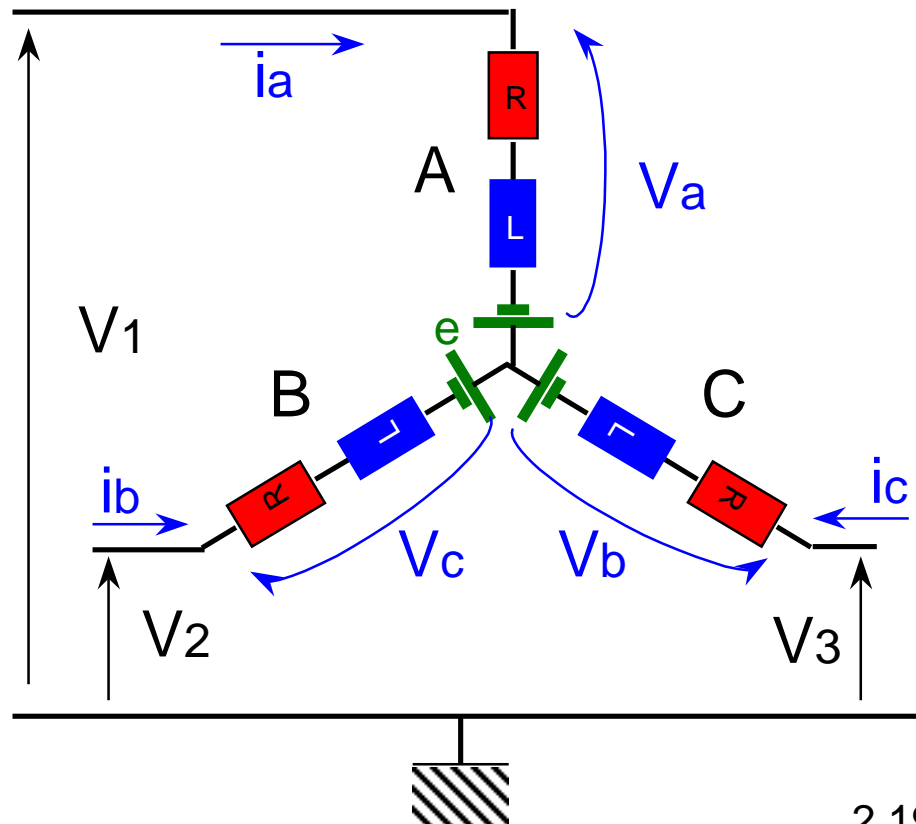
forza controelettrica

- è presente nei motori
- è funzione della velocità

Amplificatore di potenza

Problemi di controllo

- Modello generale del carico
 - ↳ carico trifase collegato a stella



$$\frac{di_a}{dt} = -\frac{R_a}{L_a} i_a - \frac{1}{L_a} e_a + \frac{1}{L_a} V_a$$

$$\frac{di_b}{dt} = -\frac{R_b}{L_b} i_b - \frac{1}{L_b} e_b + \frac{1}{L_b} V_b$$

$$\frac{di_c}{dt} = -\frac{R_c}{L_c} i_c - \frac{1}{L_c} e_c + \frac{1}{L_c} V_c$$

di solito

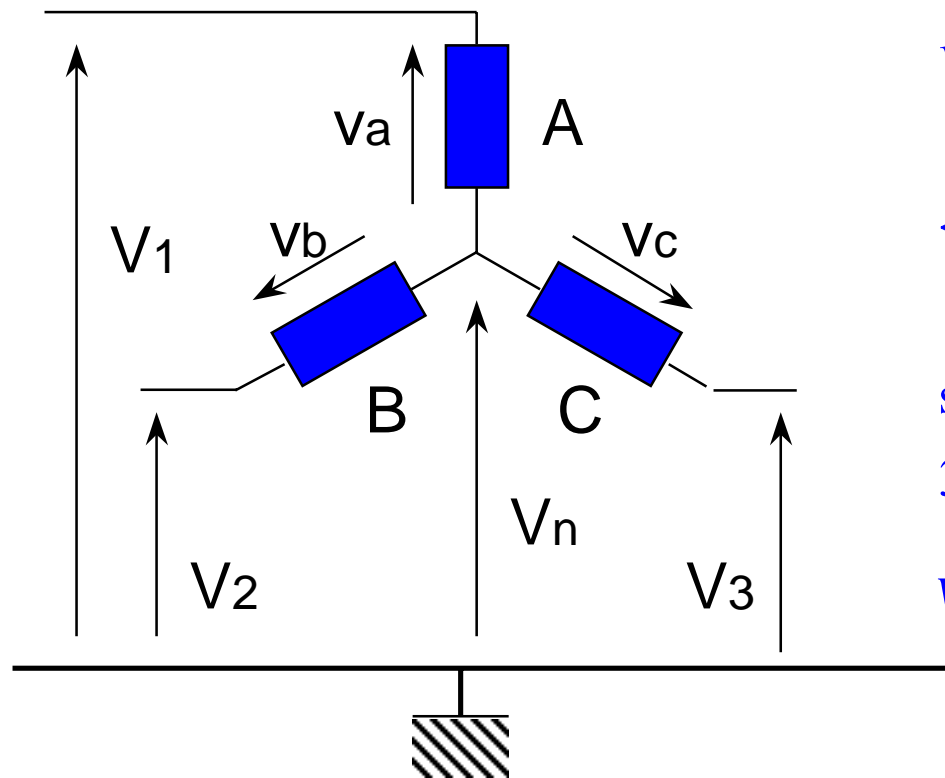
$$R_a = R_b = R_c$$

$$L_a = L_b = L_c$$

Amplificatore di potenza

Problemi di controllo

- Relazione tra tensioni di Inverter e di fase
 - ⇨ occorre introdurre la tensione di neutro



$$v_a + v_b + v_c = 0$$

$$\begin{cases} V_n = V_1 - v_a \\ V_n = V_2 - v_b \\ V_n = V_3 - v_c \end{cases}$$

sommando

$$3V_n = V_1 + V_2 + V_3 - (v_a + v_b + v_c)$$

$$V_n = \frac{1}{3}(V_1 + V_2 + V_3)$$

Amplificatore di potenza

Problemi di controllo

- Relazione tra tensioni di Inverter e di fase
 - ⇨ usando la tensione di neutro

$$\begin{cases} V_n = V_1 - v_a \\ V_n = V_2 - v_b \\ V_n = V_3 - v_c \end{cases} \quad \Rightarrow \quad \begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix} = E \begin{pmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ -1/3 & 2/3 & -1/3 \\ -1/3 & -1/3 & 2/3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \end{pmatrix}$$
$$V_n = \frac{1}{3} (V_1 + V_2 + V_3)$$

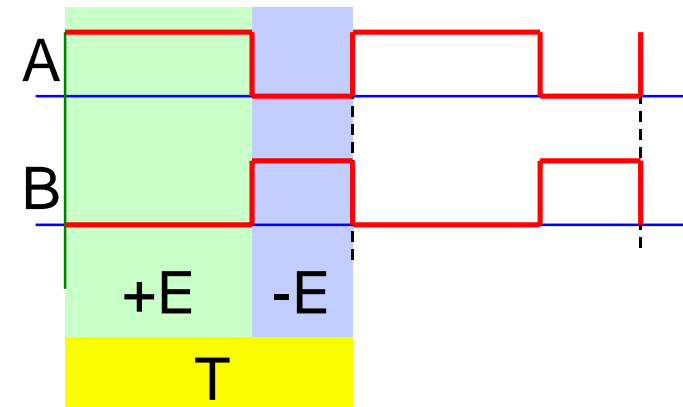
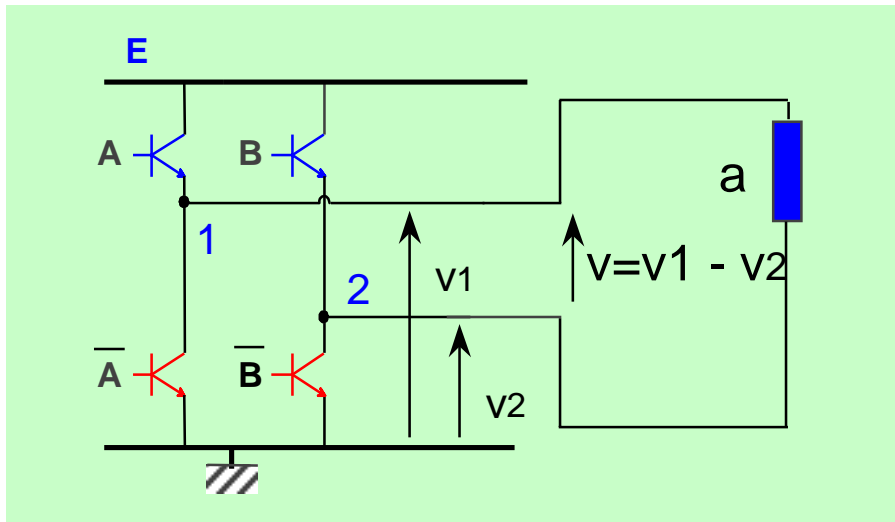
Segnali logici
di pilotaggio
dei rami A, B, C

Amplificatore di potenza

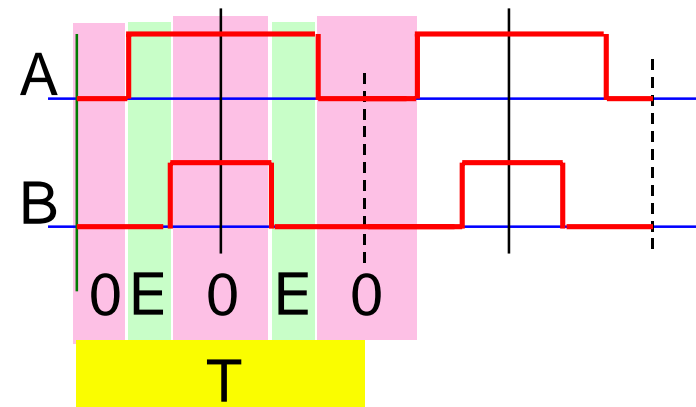
Controllo di tensione

□ modulazione PWM

⇨ caso monofase

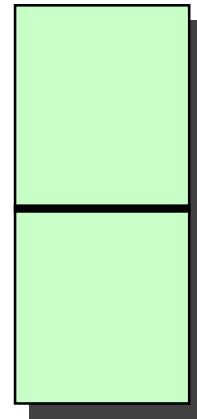
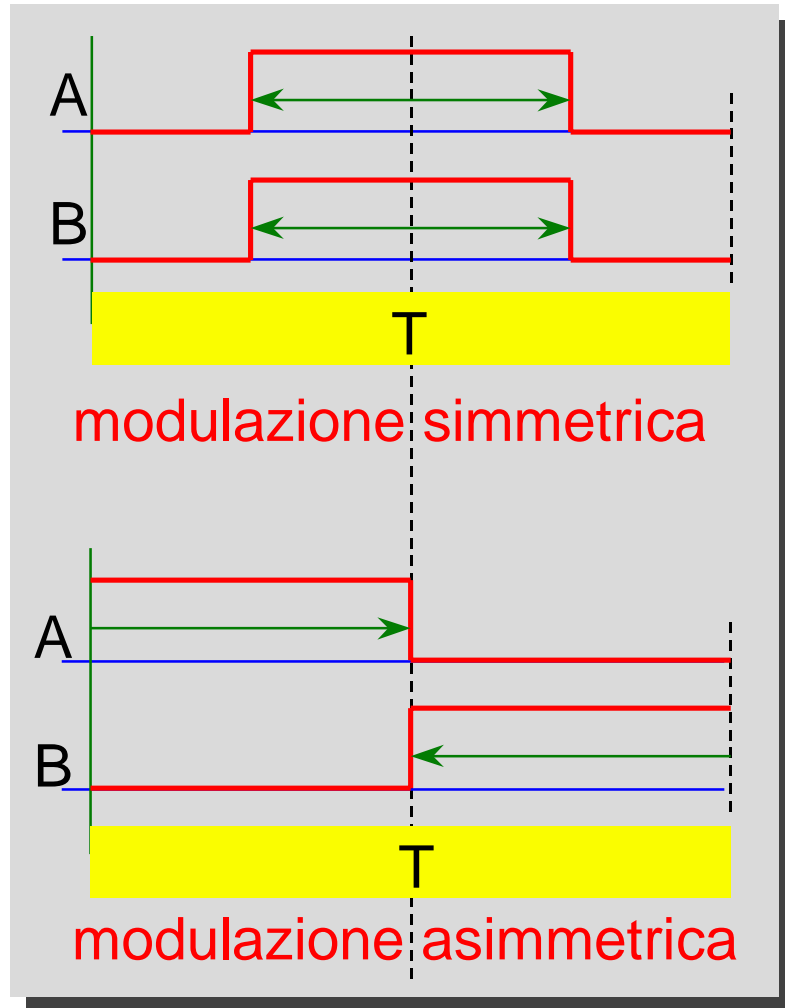


modulazione asimmetrica



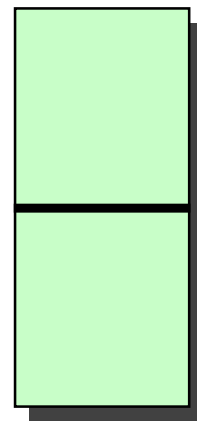
modulazione simmetrica

Amplificatore di potenza



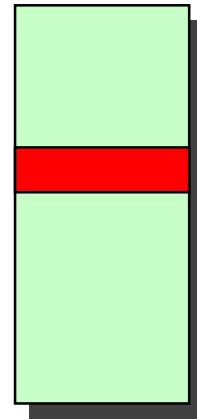
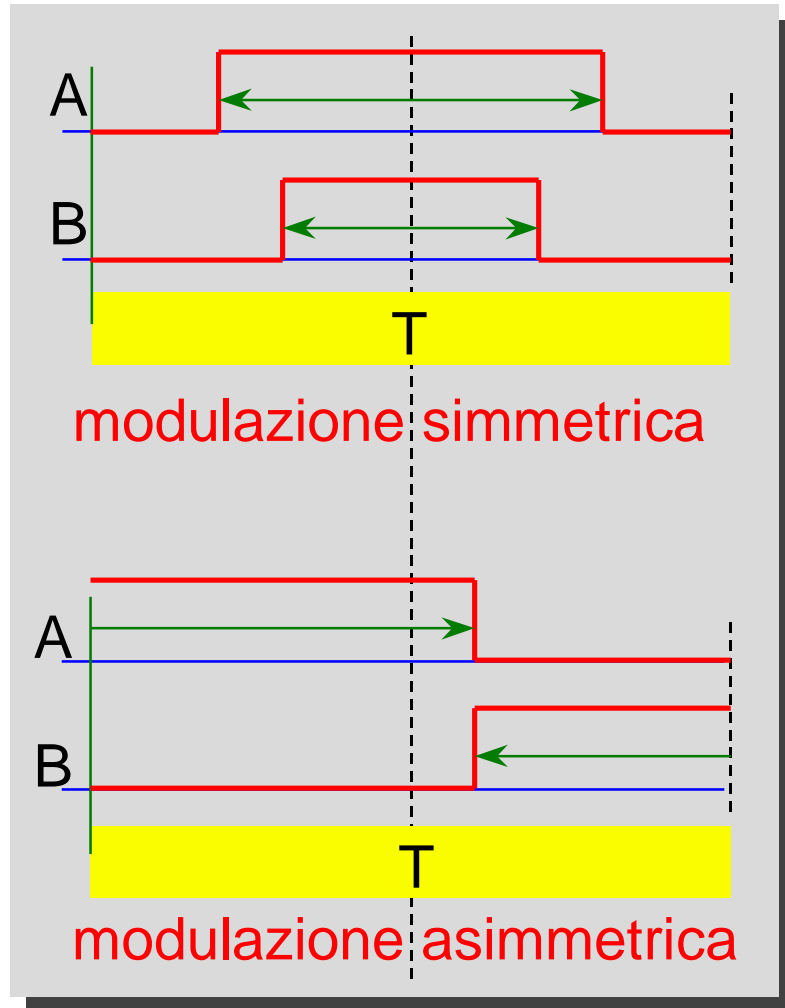
$V=0$

Confronto



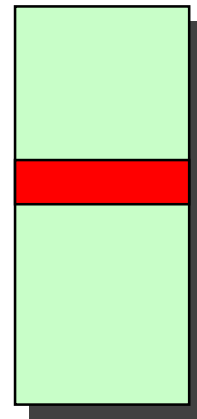
$V=0$

Amplificatore di potenza



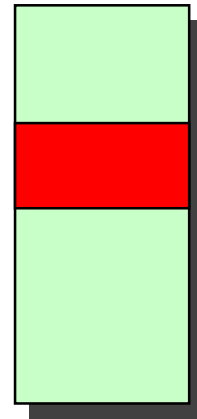
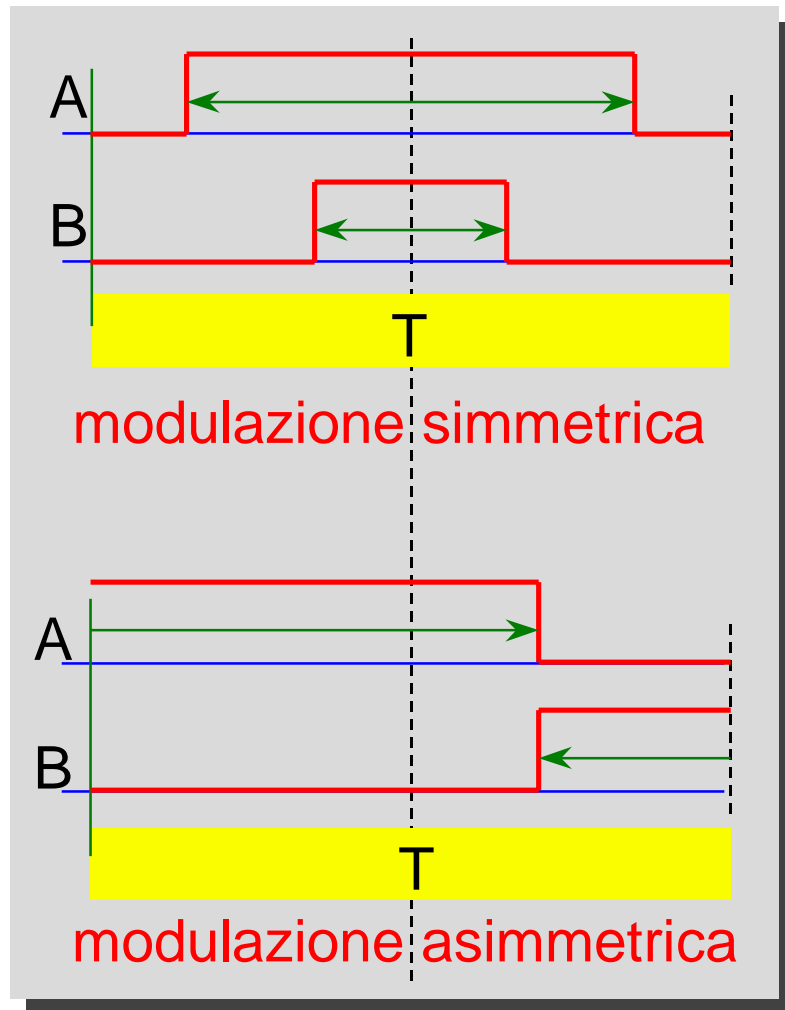
$V=+20\%$

Confronto



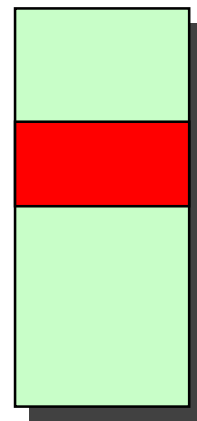
$V=+20\%$

Amplificatore di potenza



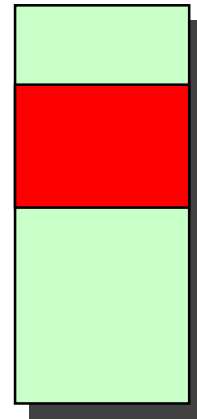
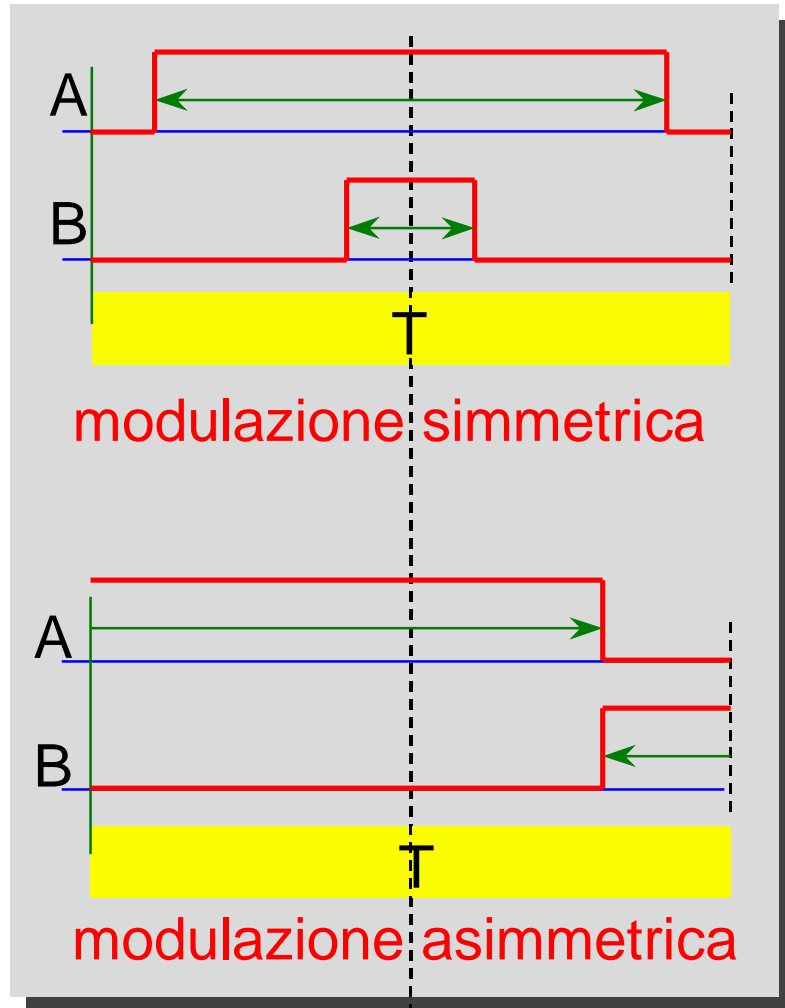
$V=+40\%$

Confronto



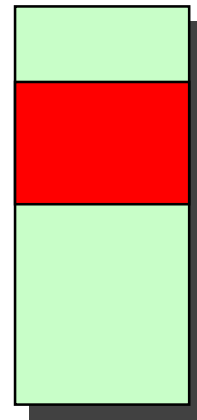
$V=+40\%$

Amplificatore di potenza



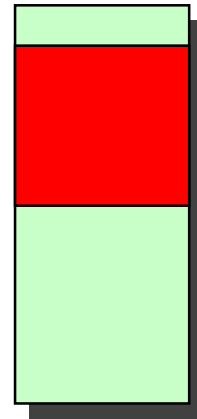
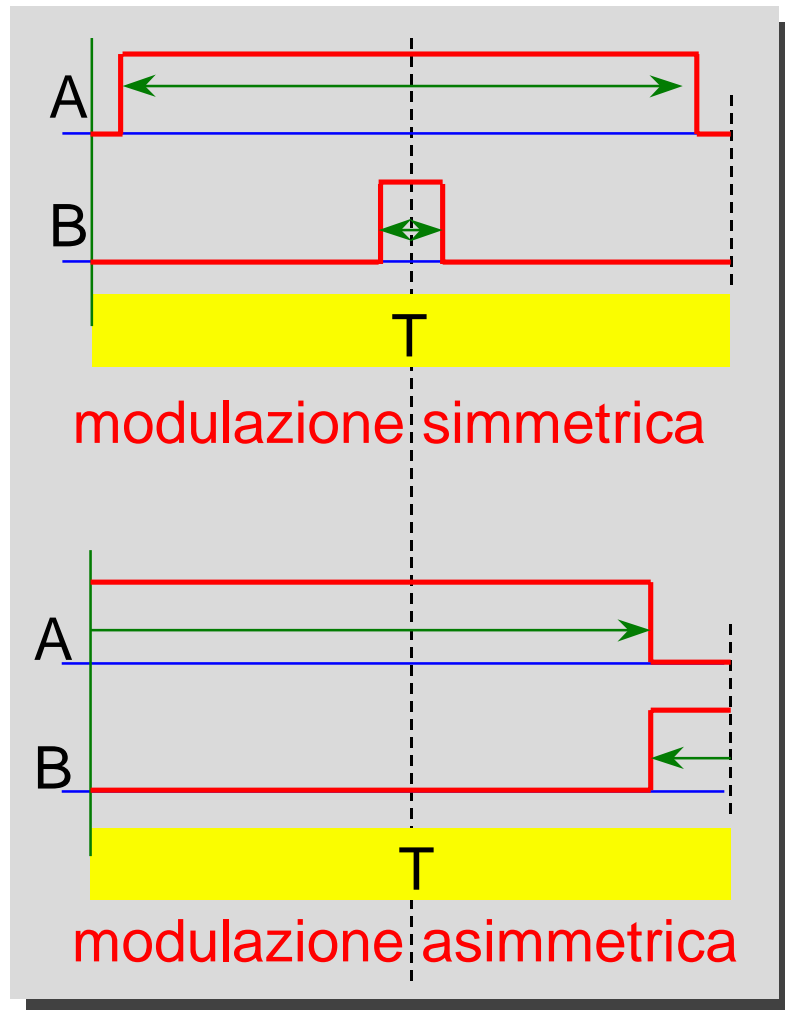
$V=+60\%$

Confronto



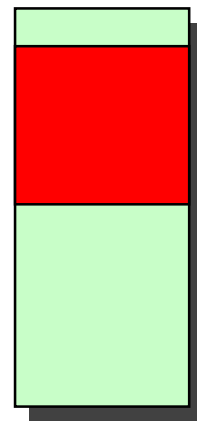
$V=+60\%$

Amplificatore di potenza



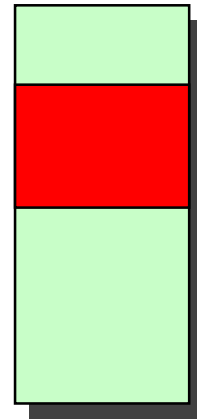
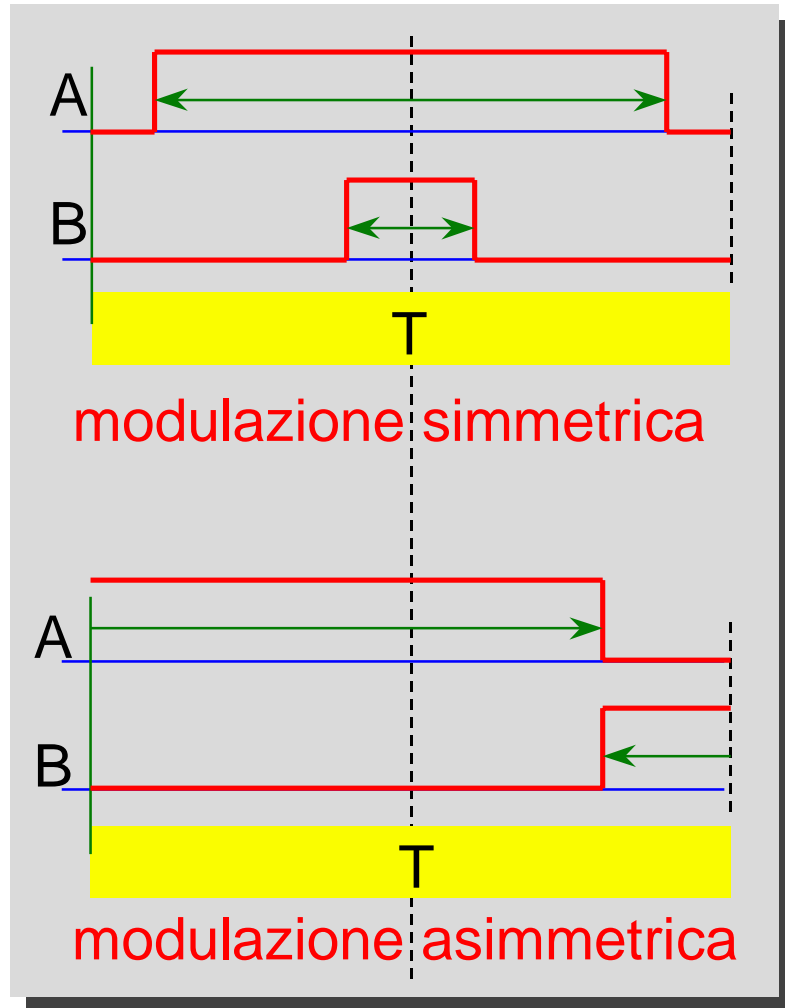
$V=+80\%$

Confronto



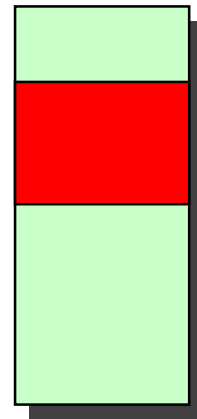
$V=+80\%$

Amplificatore di potenza



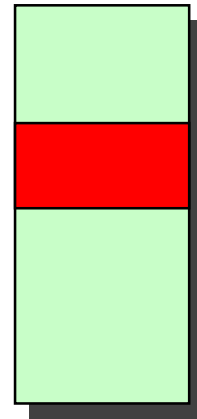
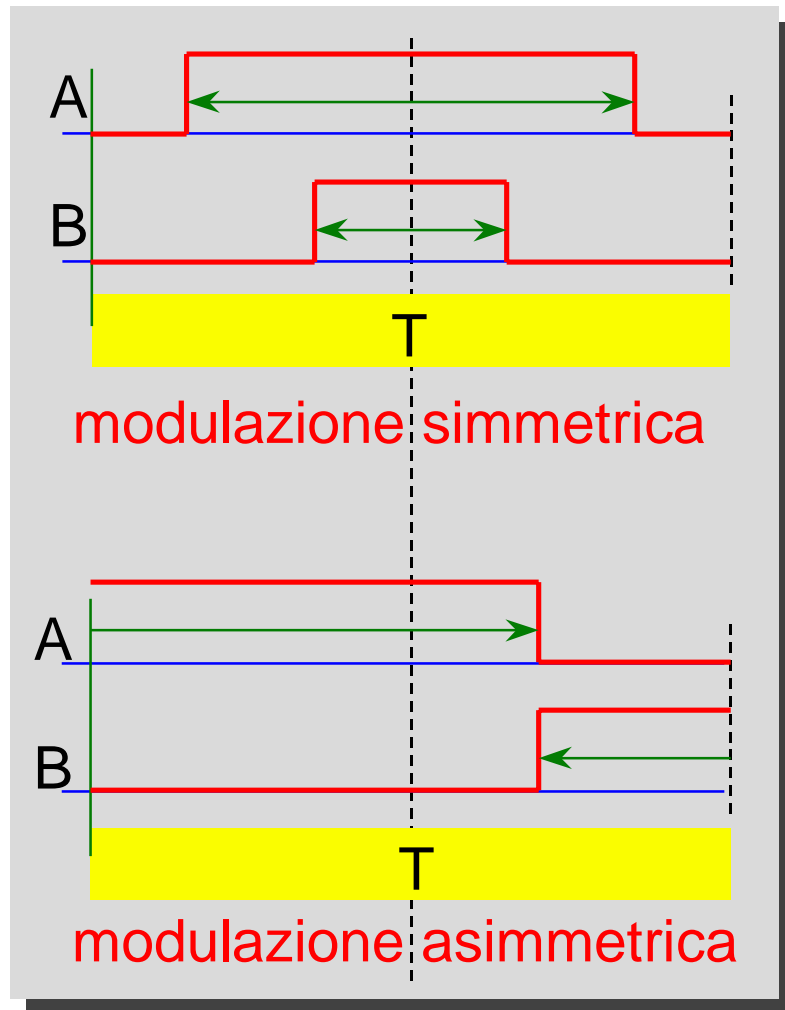
$V=+60\%$

Confronto



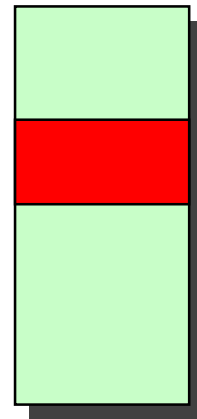
$V=+60\%$

Amplificatore di potenza



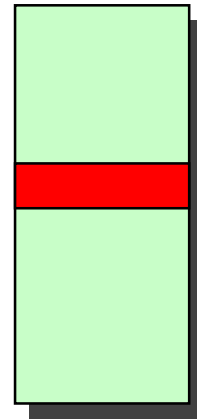
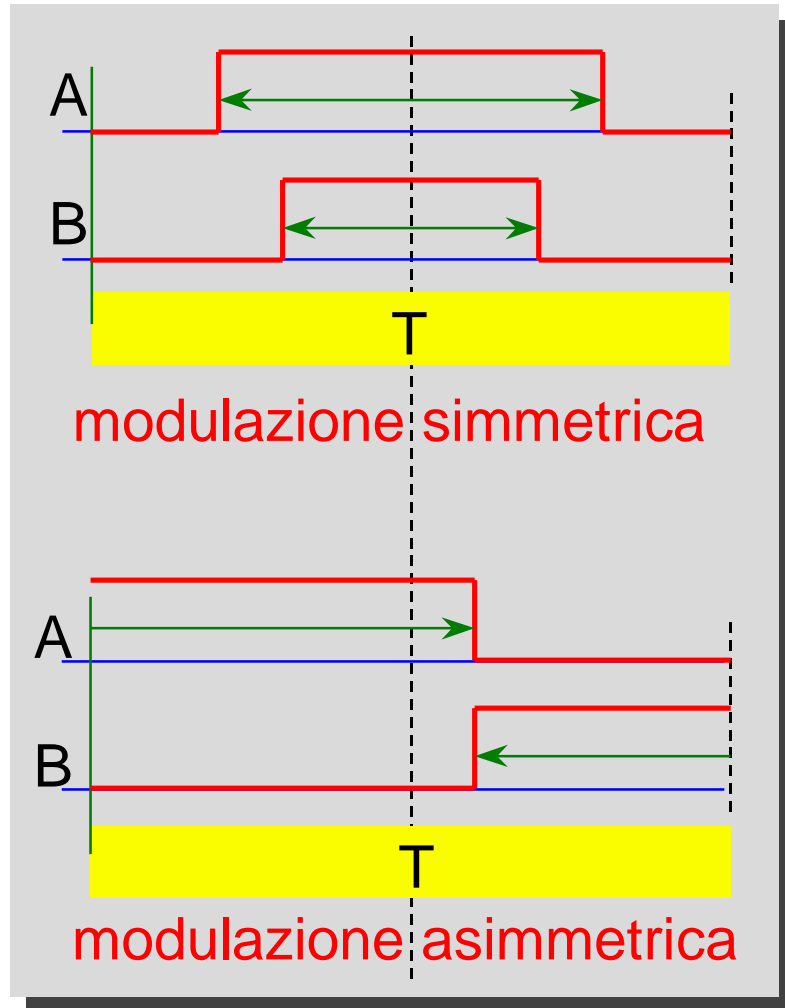
$V=+40\%$

Confronto



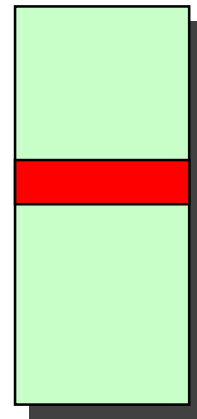
$V=+40\%$

Amplificatore di potenza



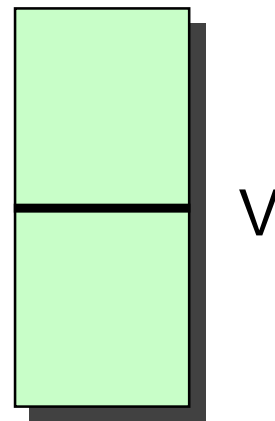
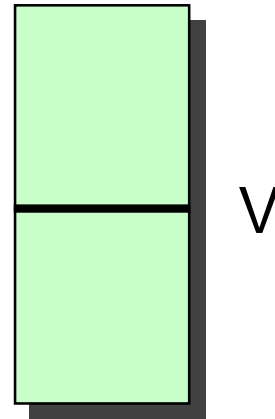
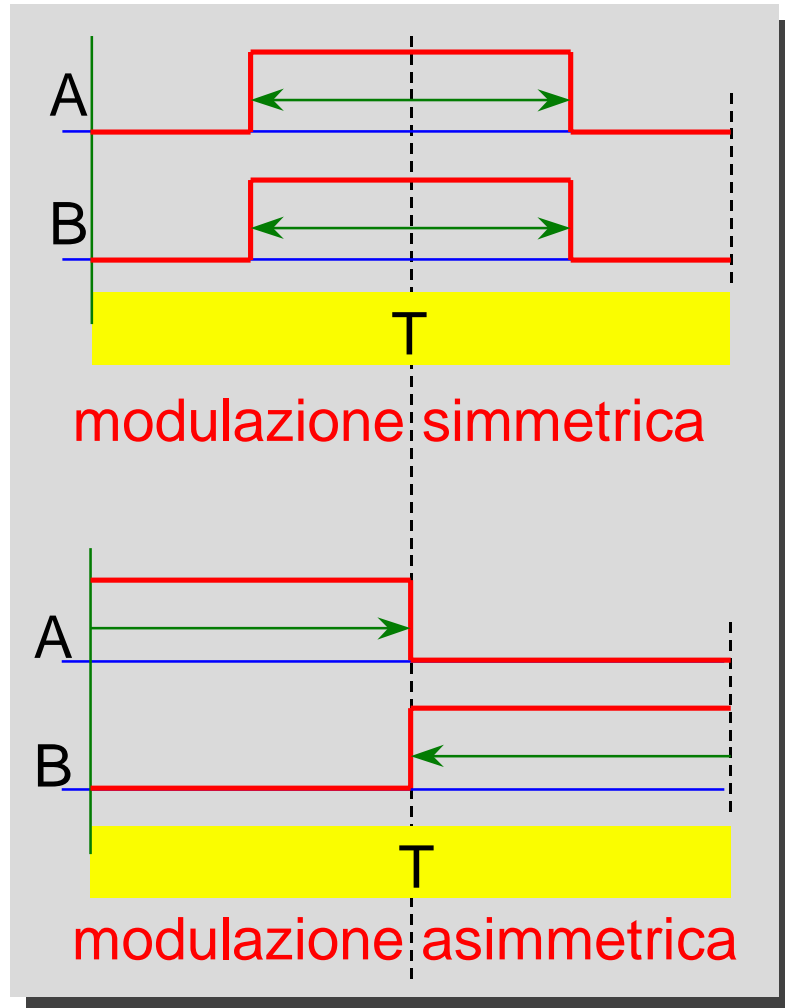
$V=+20\%$

Confronto



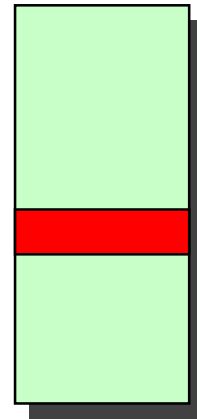
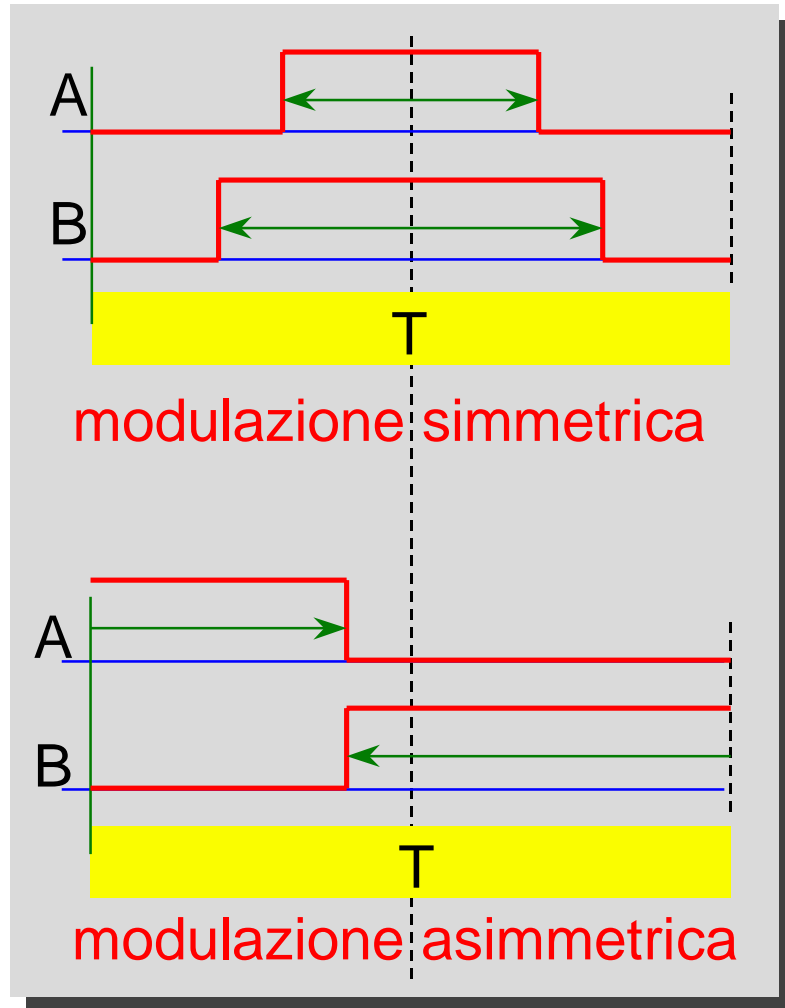
$V=+20\%$

Amplificatore di potenza



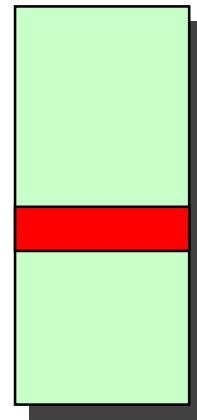
Confronto

Amplificatore di potenza



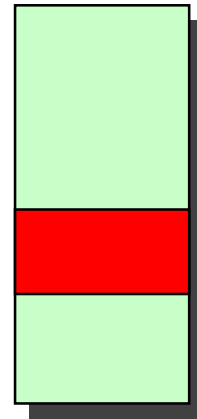
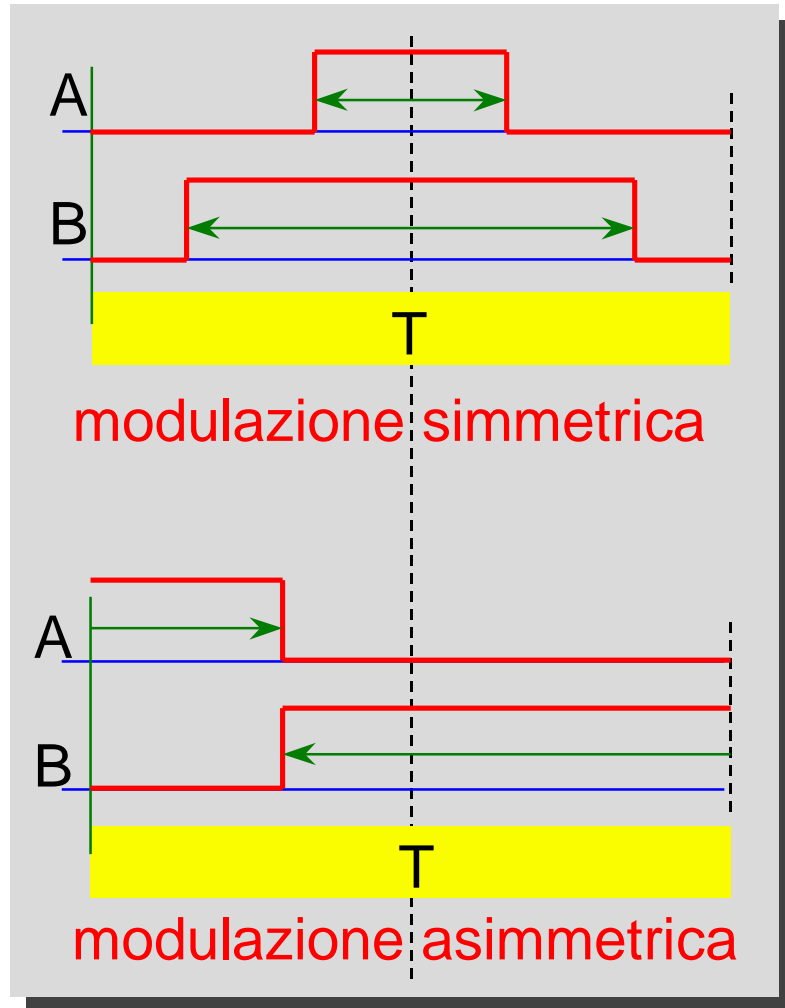
$V=-20\%$

Confronto



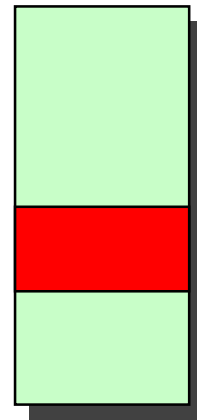
$V=-20\%$

Amplificatore di potenza



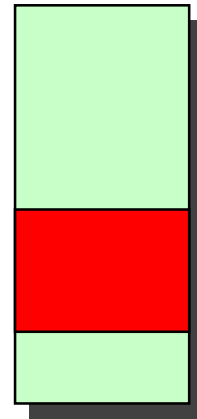
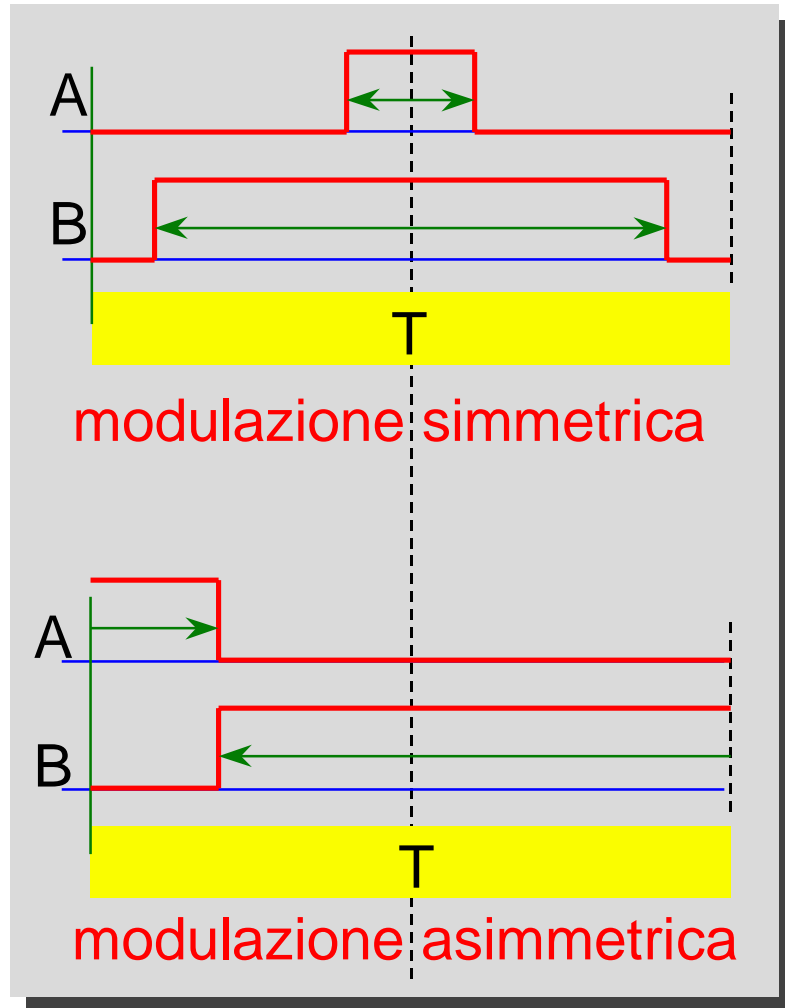
$V=-40\%$

Confronto



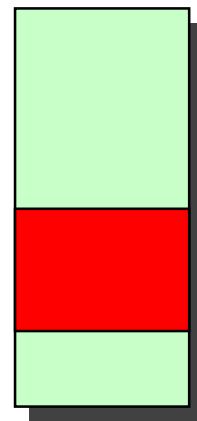
$V=-40\%$

Amplificatore di potenza



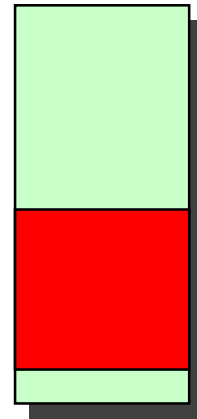
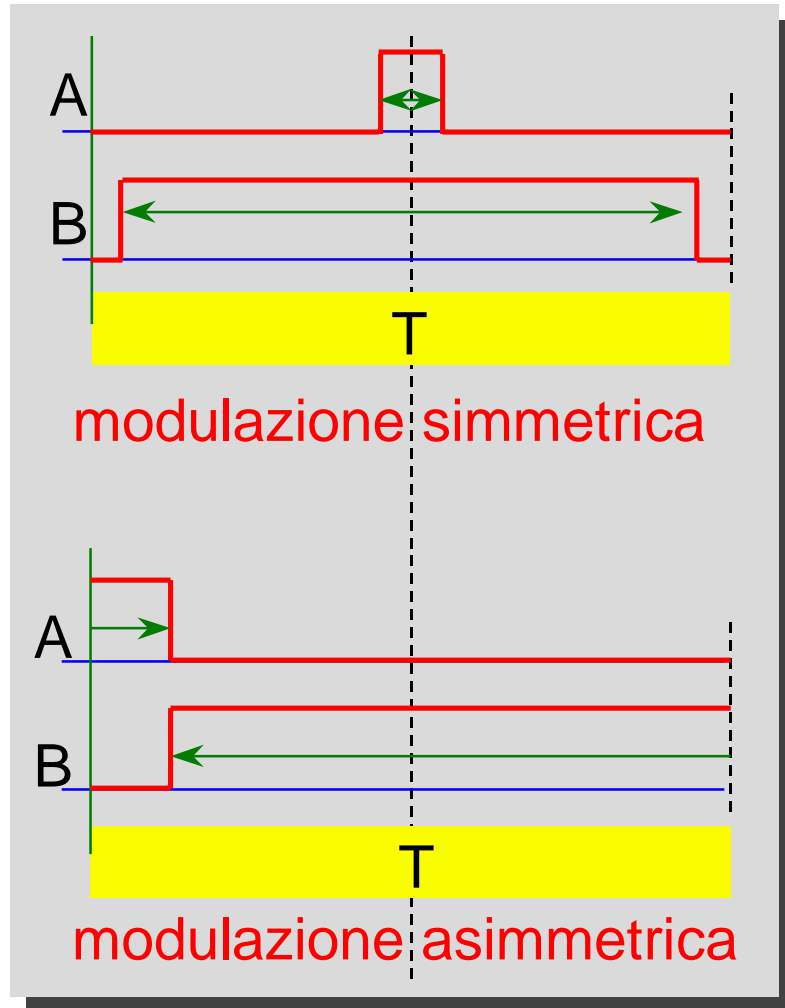
$V=-60\%$

Confronto



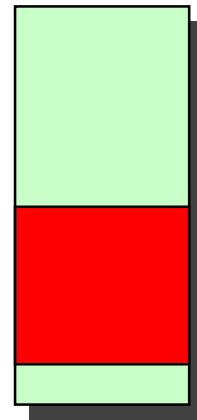
$V=-60\%$

Amplificatore di potenza



$V=-80\%$

Confronto



$V=-80\%$

Amplificatore di potenza

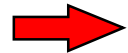


Confronto tra le modulazioni

Esempio:

$R = 1\Omega$, $L = 1\text{mH}$, $i = 10\text{A}$, $E = 100\text{V}$, $e = 50\text{V}$

$$\frac{di}{dt} = -\frac{R}{L}i - \frac{1}{L}e + \frac{V}{L} = \frac{1}{L}(-Ri - e + V)$$



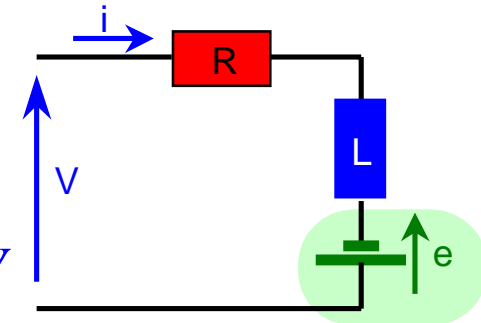
$$V = Ri + e = 1 * 10 + 50 = 60 \text{ V}$$

a regime



$$\rho = 0.6$$

$$\frac{di}{dt} = 10^3(-i - e + E)$$



Amplificatore di potenza



Confronto tra modulazioni

$$\frac{di}{dt} = 10^3 (-i - e + E)$$

	$\left(\frac{di}{dt}\right)_{on}$	$\left(\frac{di}{dt}\right)_{off}$
simmetrica	$-10-50+100 = 40\text{A/ms}$	$-10-50+0 = -60\text{A/ms}$

Amplificatore di potenza



Confronto tra modulazioni

$$\frac{di}{dt} = 10^3 (-i - e + E)$$

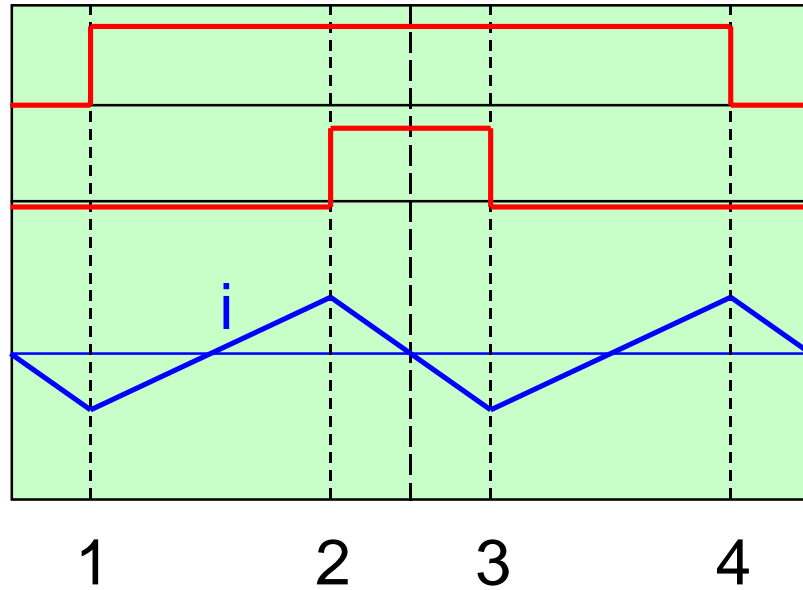
	$\left(\frac{di}{dt}\right)_{on}$	$\left(\frac{di}{dt}\right)_{off}$
simmetrica	$-10-50+100 = 40\text{A/ms}$	$-10-50+0 = -60\text{A/ms}$
non simm.	$-10-50+100 = 40\text{A/ms}$	$-10-50-100 = -160\text{A/ms}$

e ed E si sommano

Amplificatore di potenza



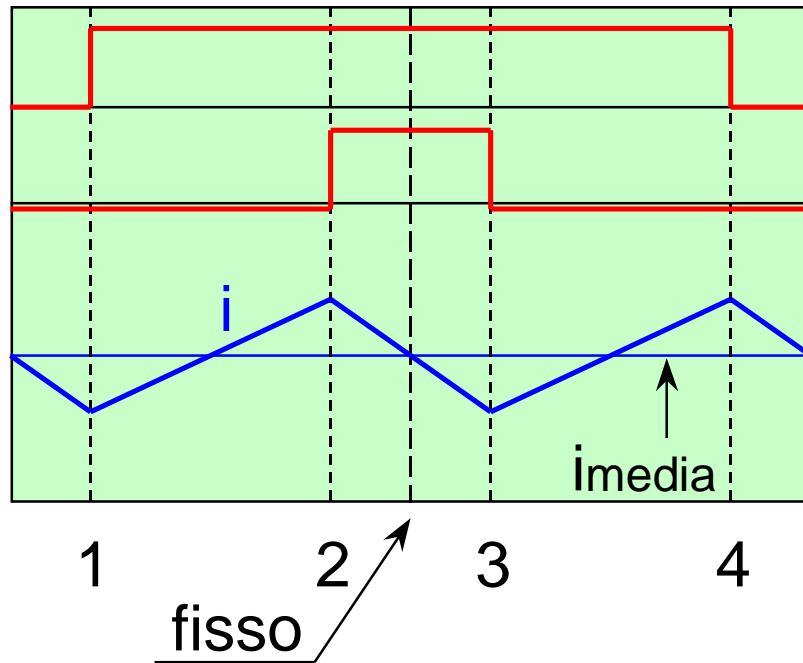
Confronto tra modulazioni



Amplificatore di potenza



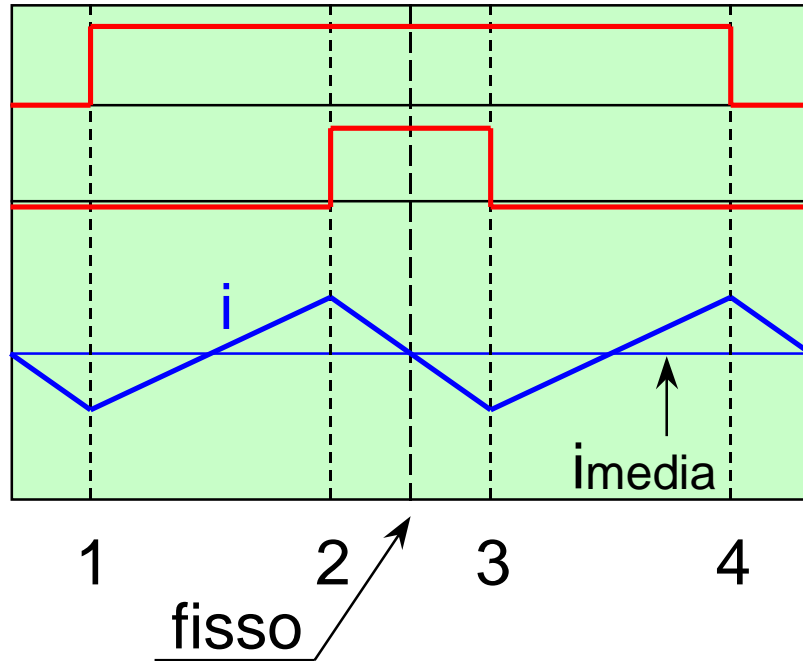
Confronto tra modulazioni



Amplificatore di potenza



Confronto tra modulazioni

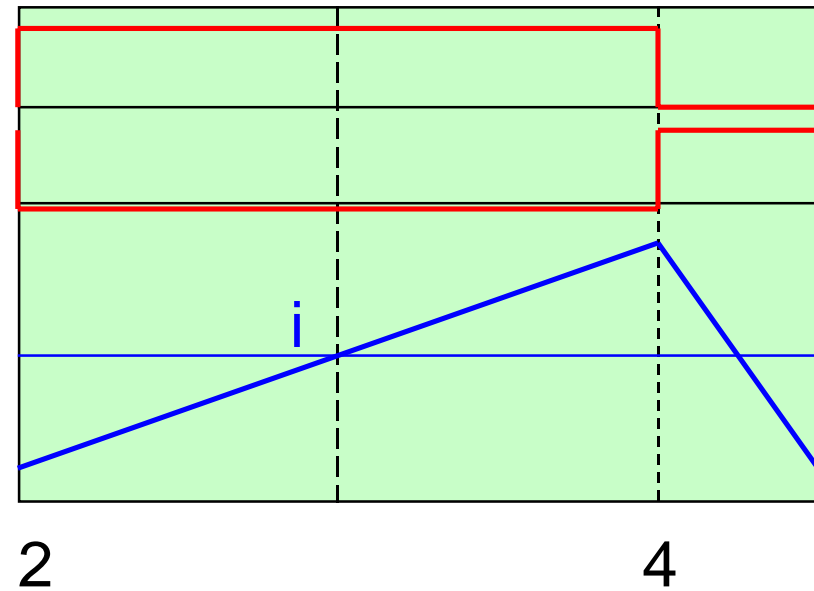
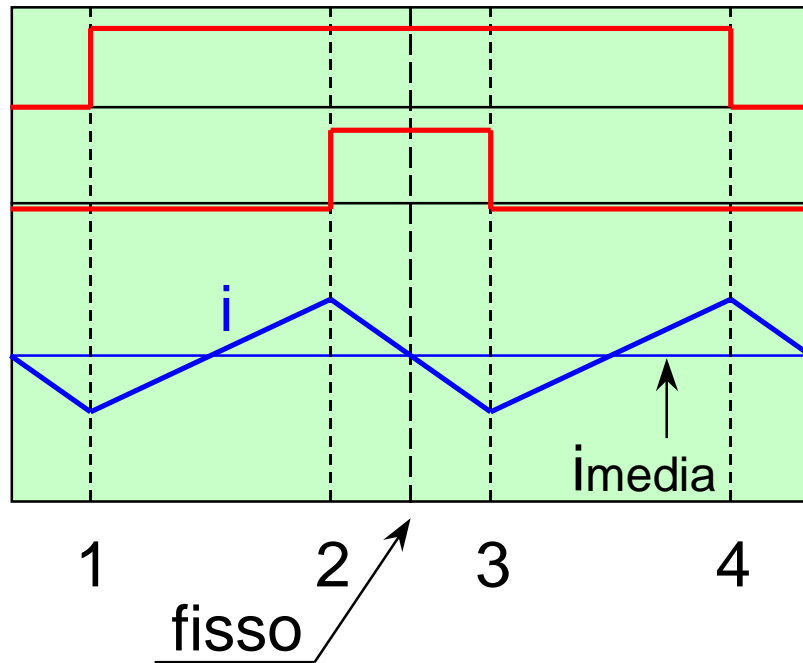


ripple dimezzato
punto di simmetria delle
correnti fisso
più complessa

Amplificatore di potenza



Confronto tra modulazioni

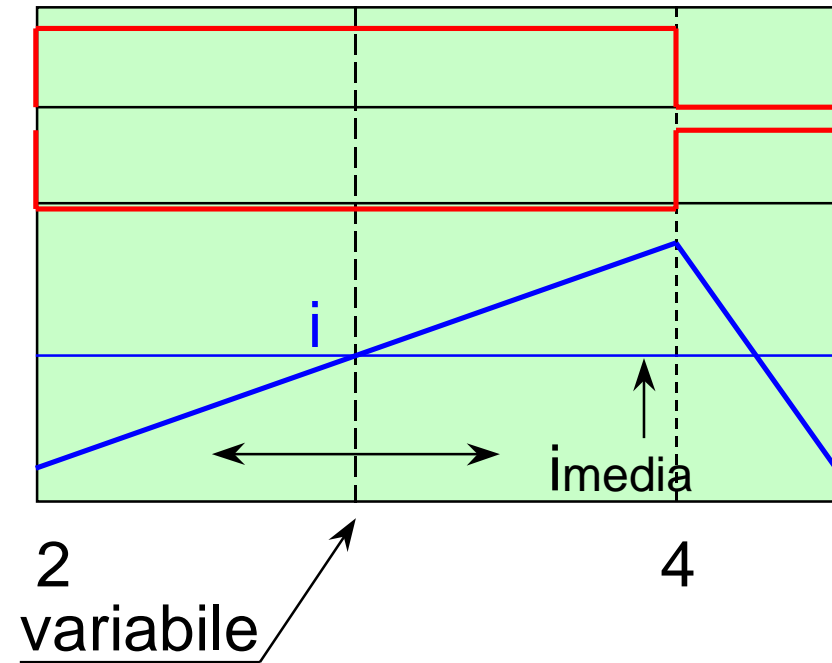
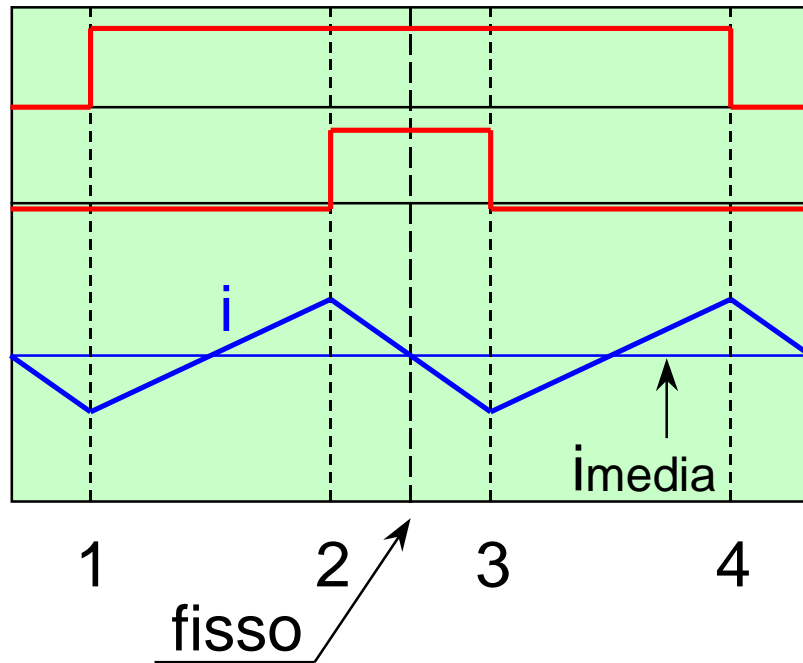


ripple dimezzato
punto di simmetria delle
correnti fisso
più complessa

Amplificatore di potenza



Confronto tra modulazioni

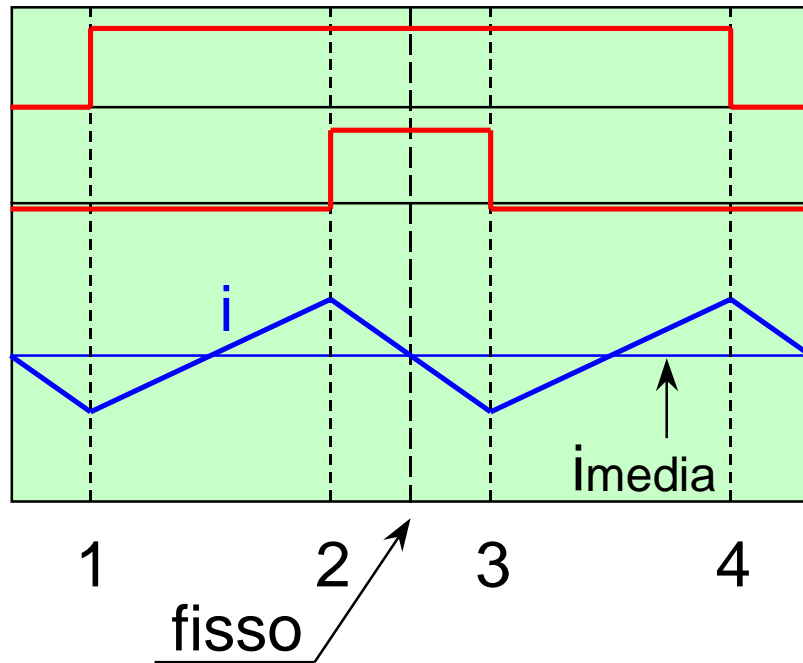


ripple dimezzato
punto di simmetria delle
correnti fisso
più complessa

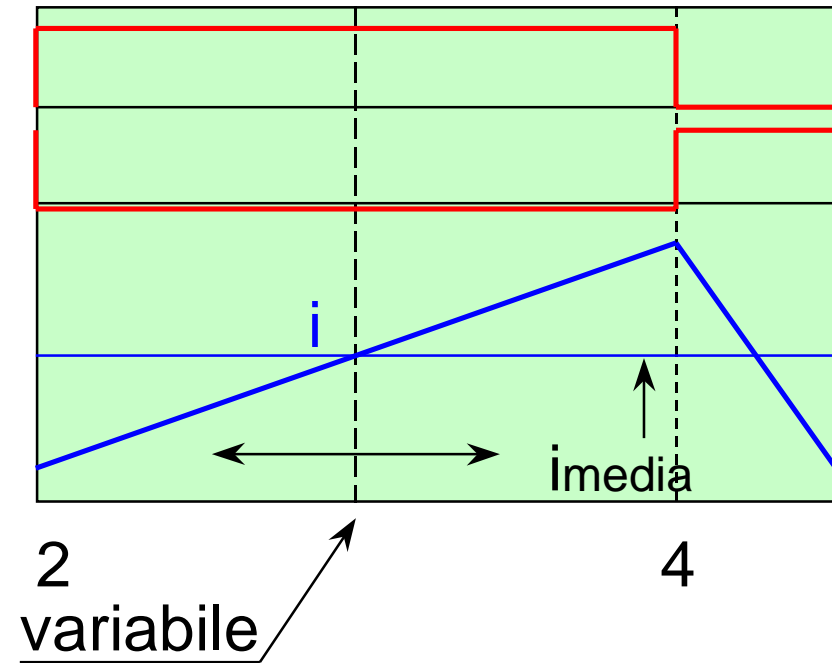
Amplificatore di potenza



Confronto tra modulazioni

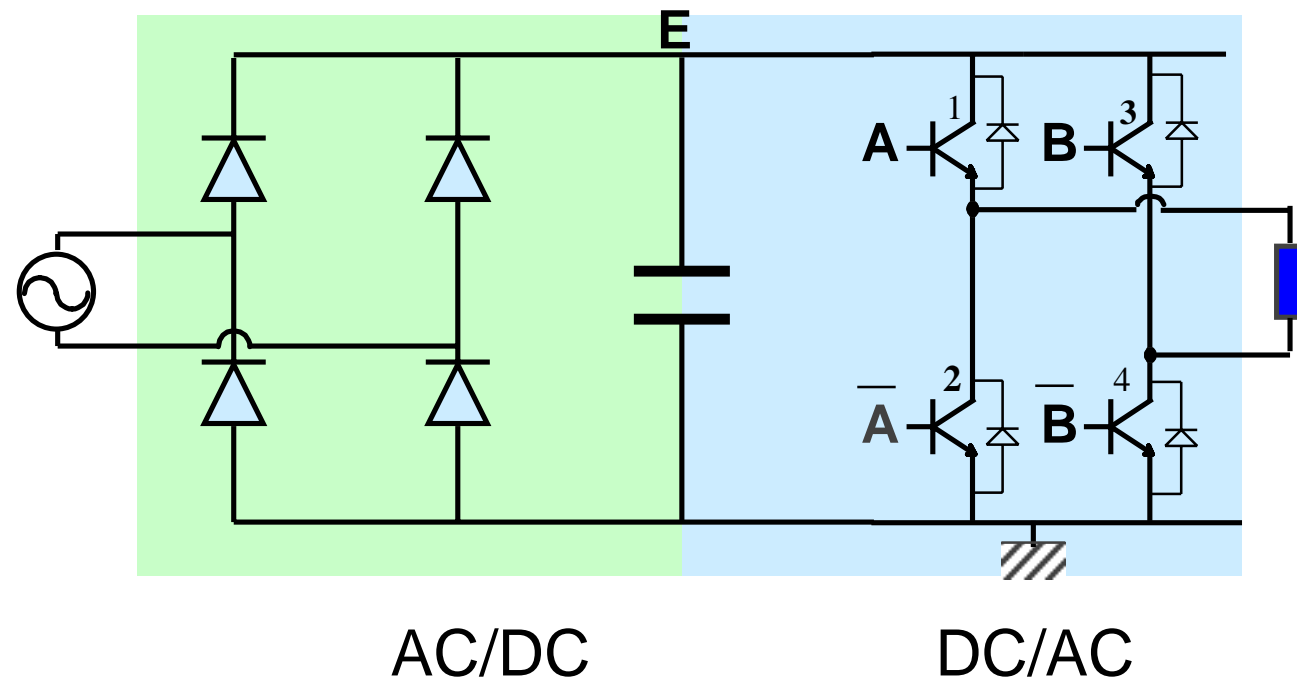


ripple dimezzato
punto di simmetria delle
correnti fisso
più complessa

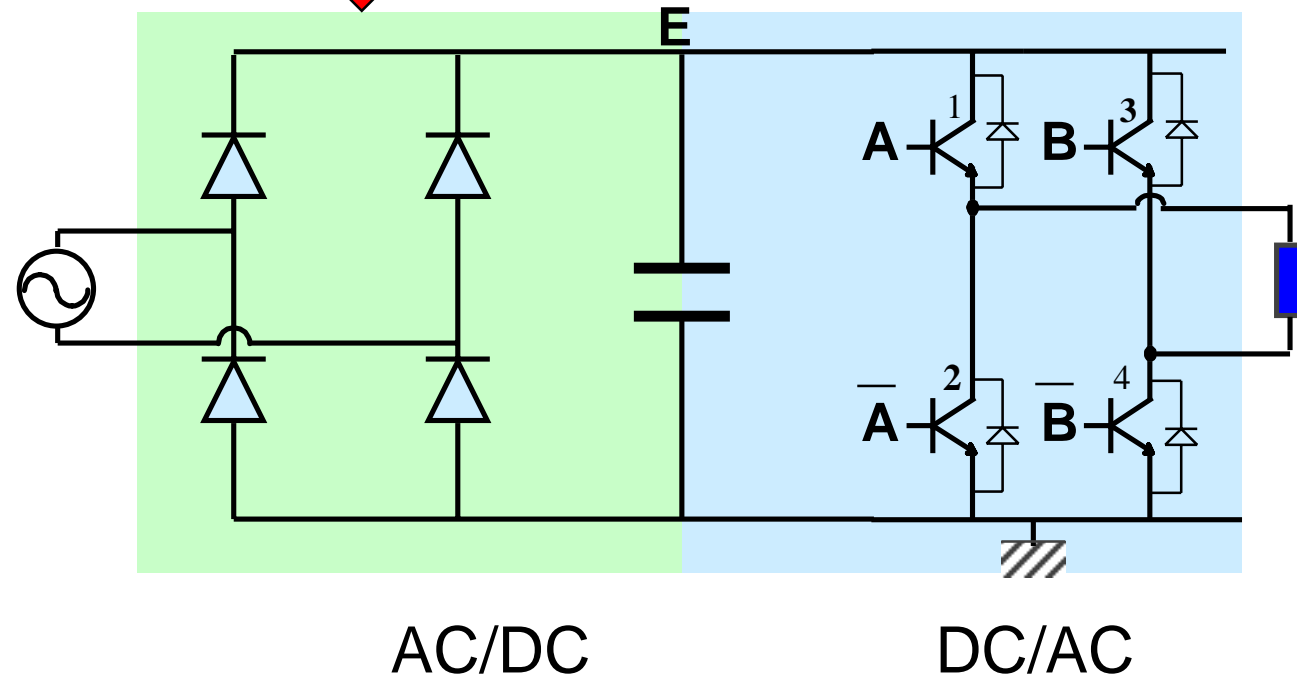
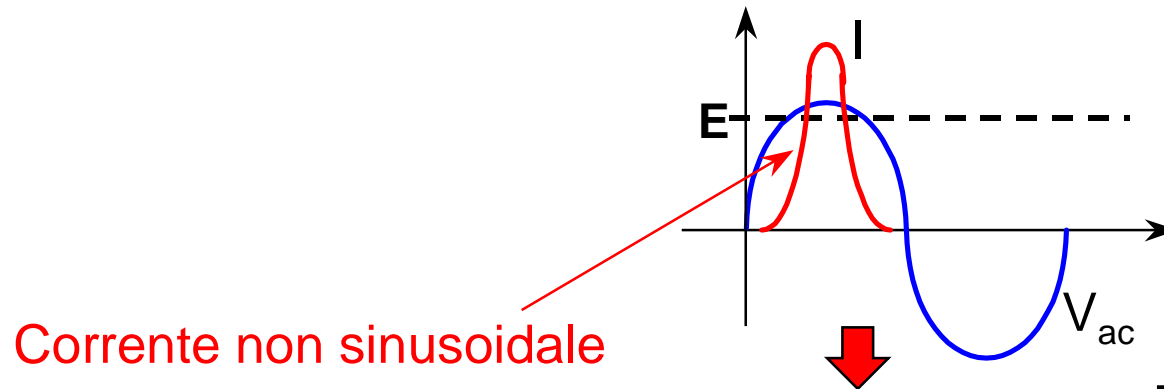


ripple doppio
punto di simmetria delle
correnti variabile
più semplice da realizzare

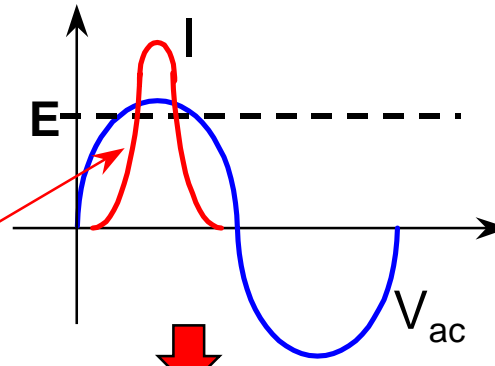
Struttura completa del Convertitore di Potenza



Struttura completa del Convertitore di Potenza



Struttura completa del Convertitore di Potenza



Corrente non sinusoidale

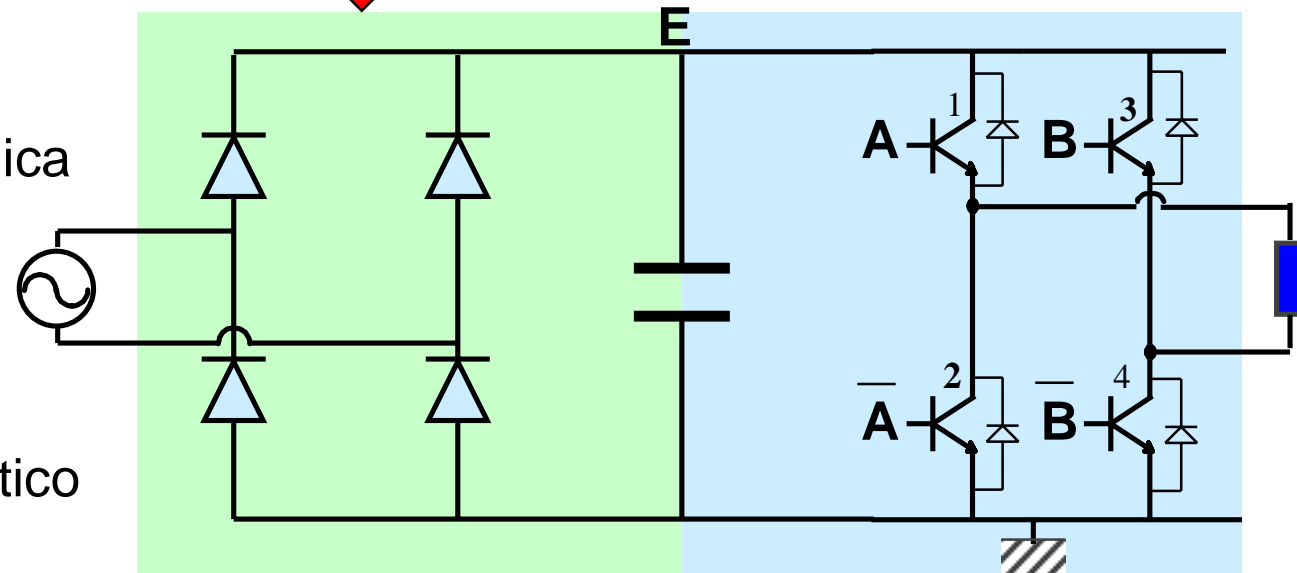


distorsione armonica
sulla rete



Problemi:

- rendimento energetico
- malfunzionamenti
- condensatori di rifasamento
- trasformatori media tensione



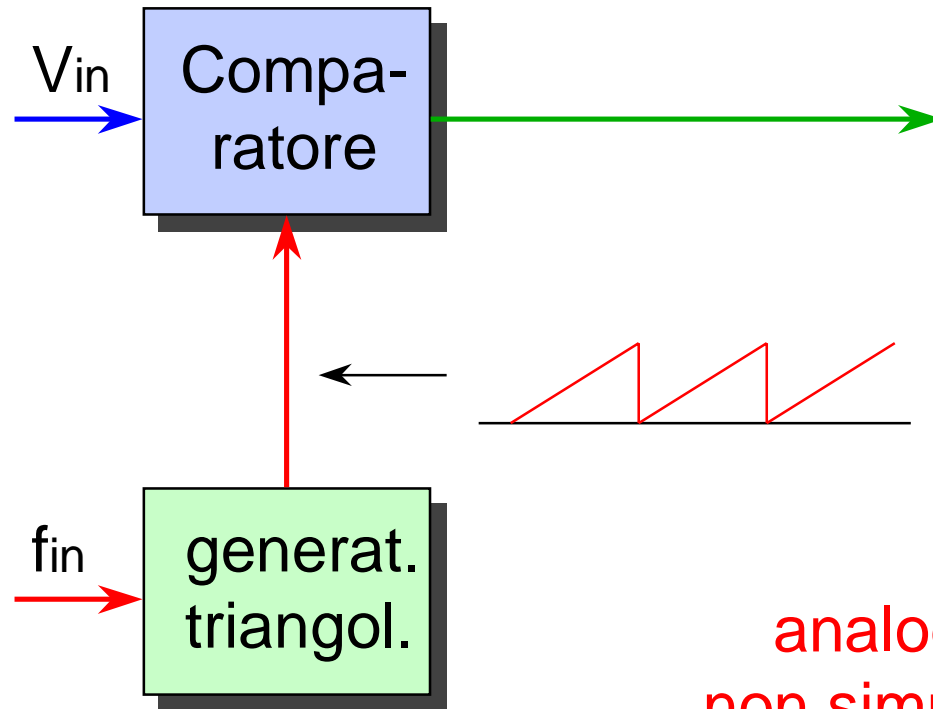
AC/DC

DC/AC

Amplificatore di potenza



Schemi concettuali di modulatori

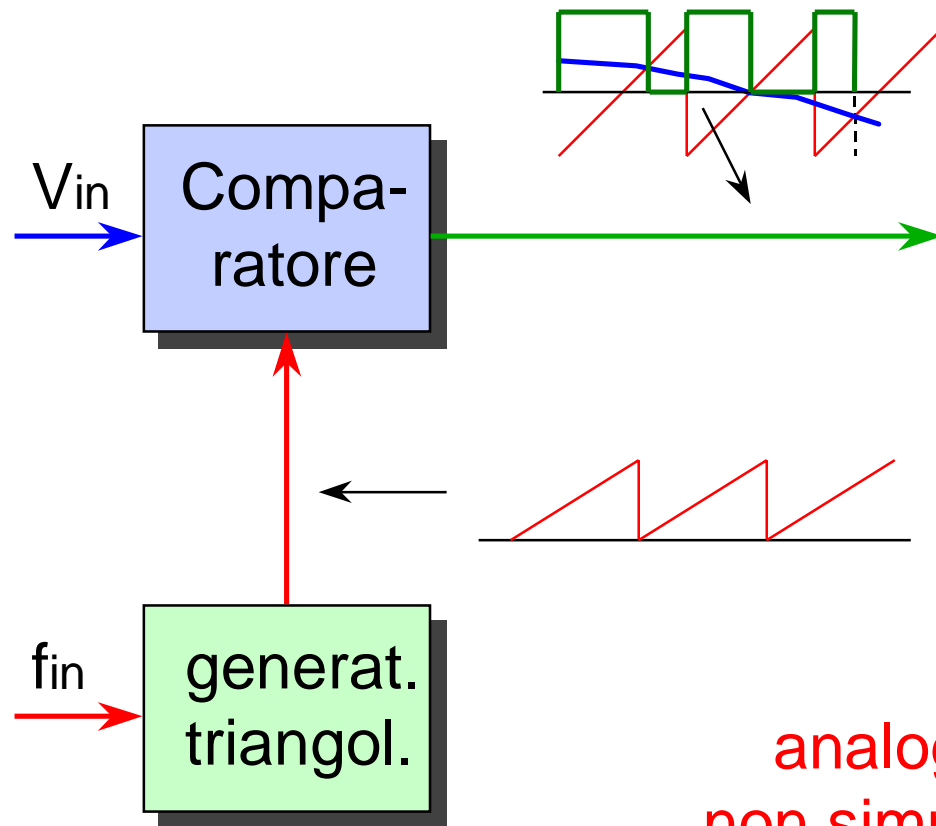


analogico
non simmetrico

Amplificatore di potenza



Schemi concettuali di modulatori

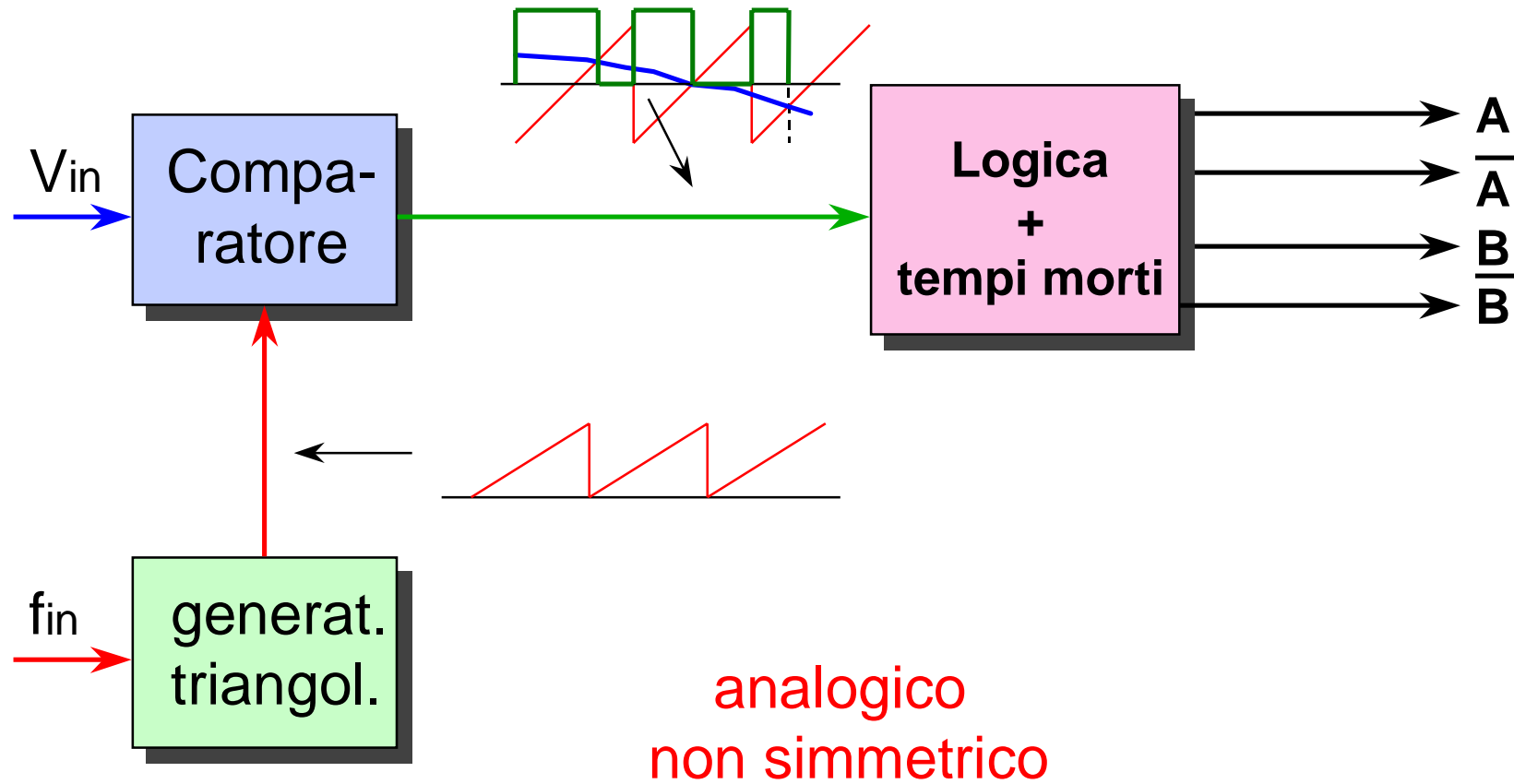


analogico
non simmetrico

Amplificatore di potenza



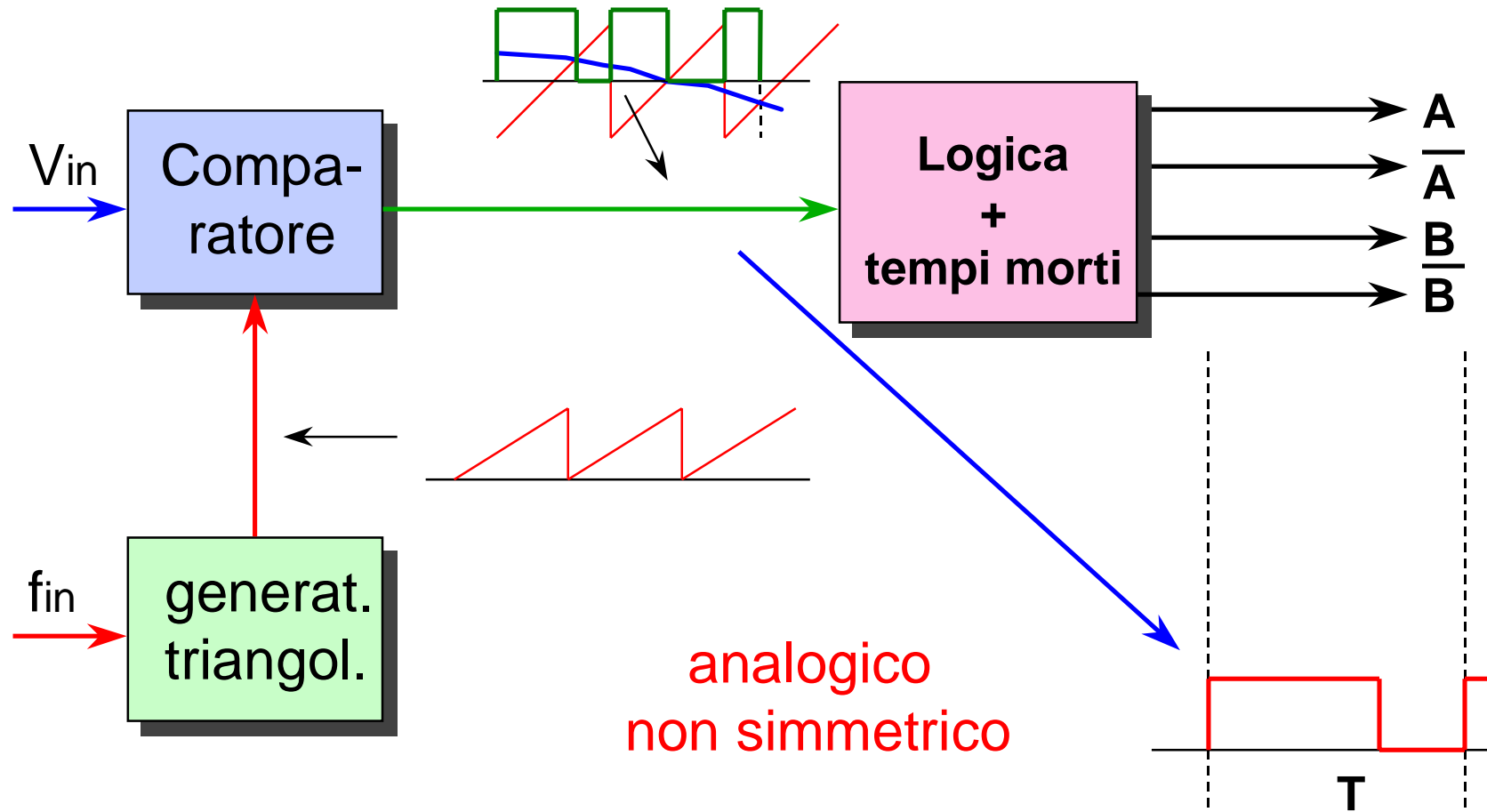
Schemi concettuali di modulatori



Amplificatore di potenza



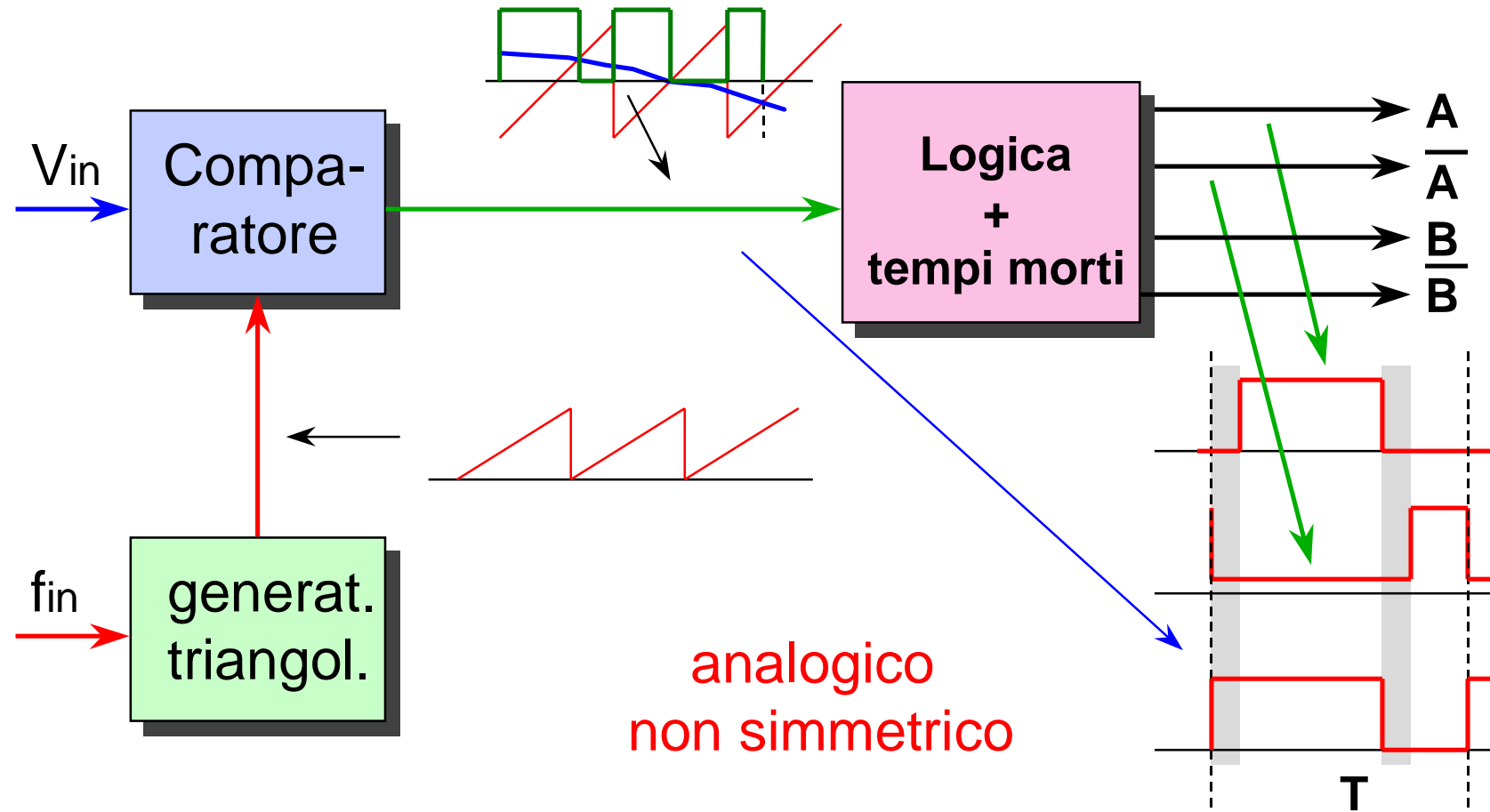
Schemi concettuali di modulatori



Amplificatore di potenza



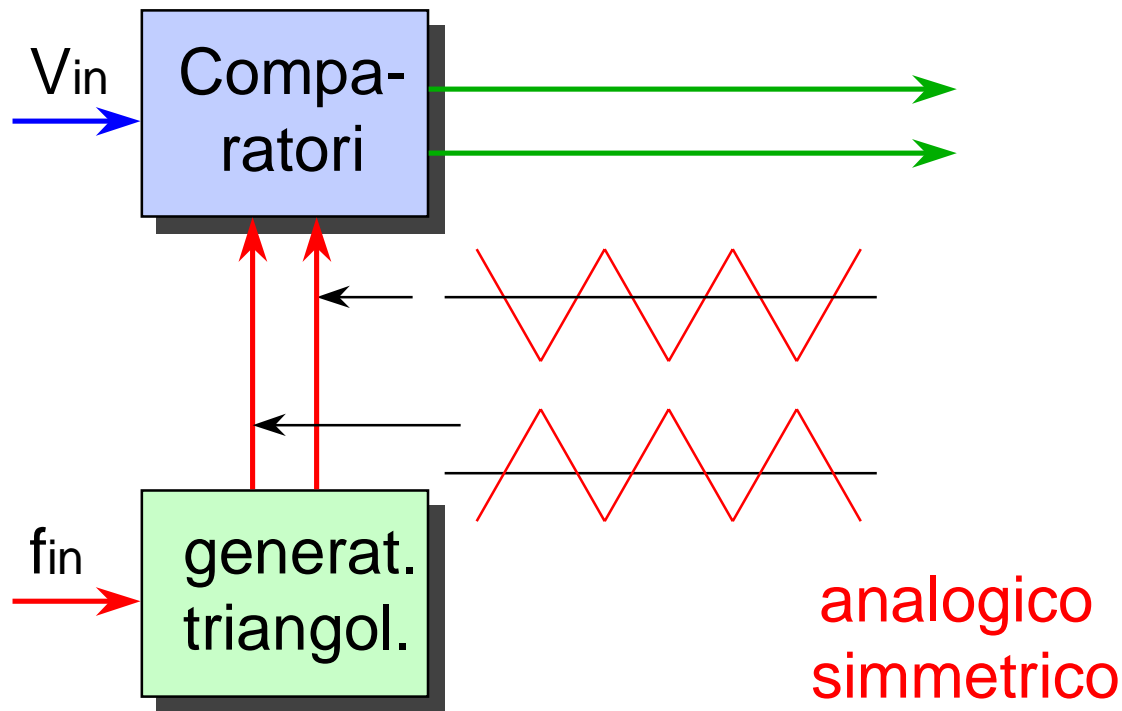
Schemi concettuali di modulatori



Amplificatore di potenza



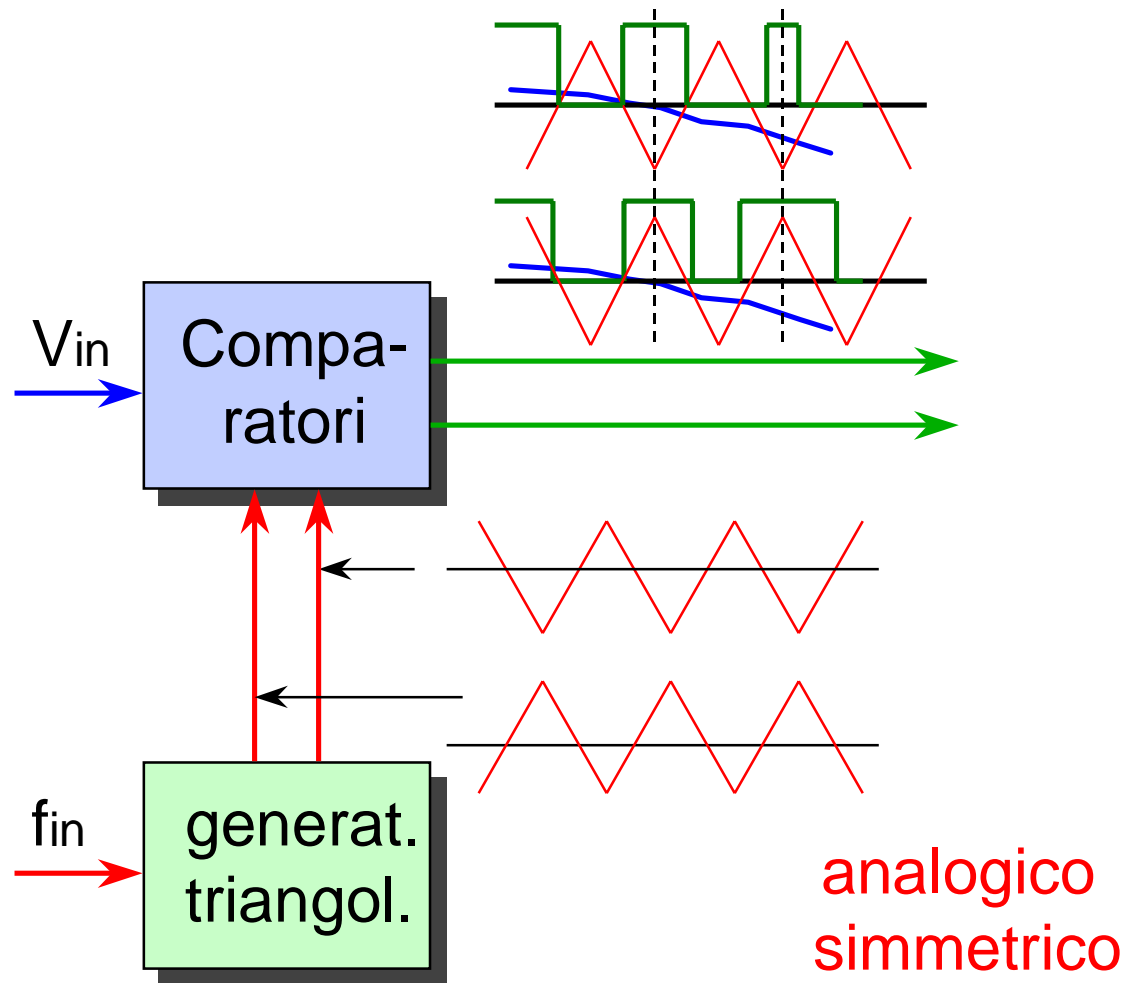
Schemi concettuali di modulatori



Amplificatore di potenza



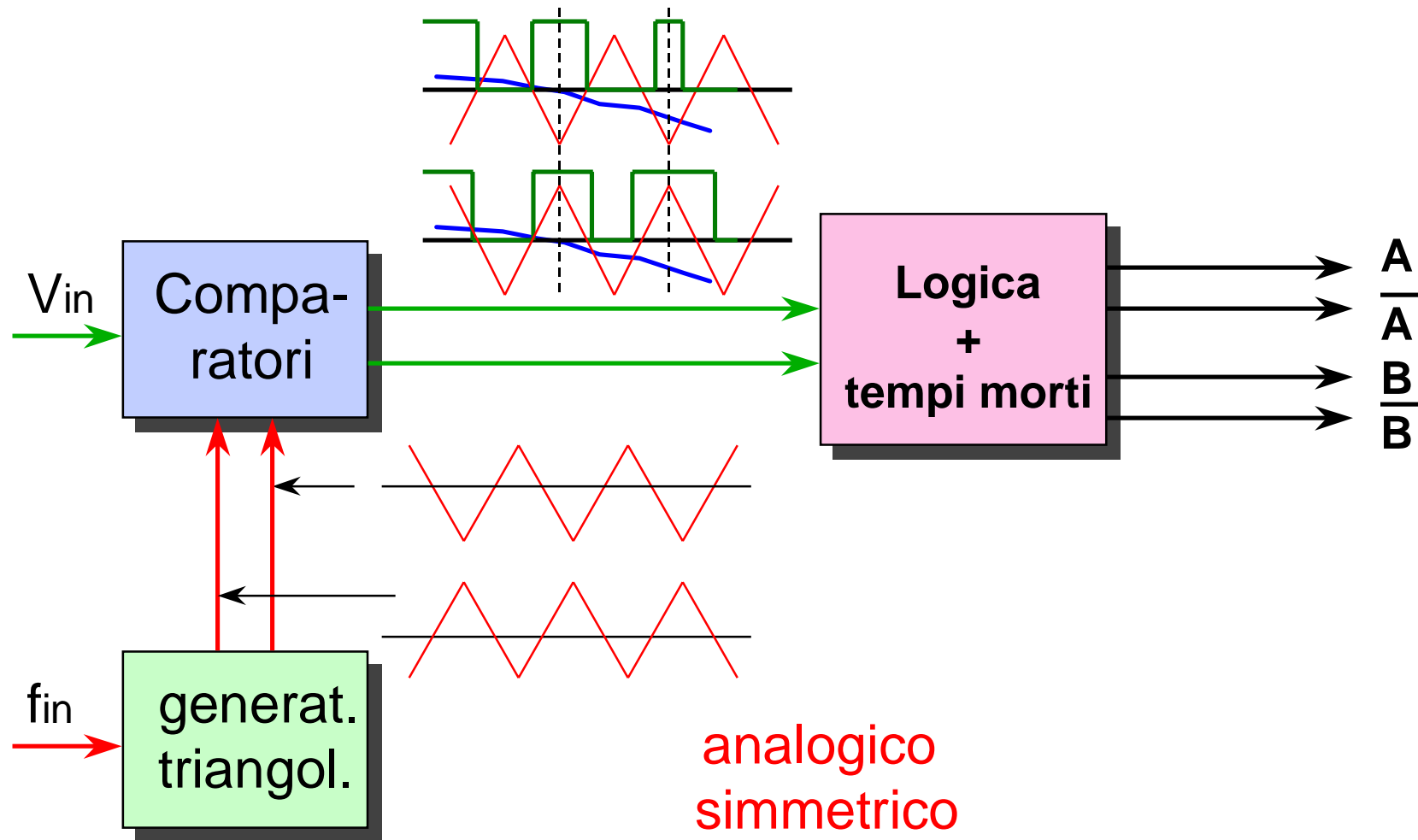
Schemi concettuali di modulatori



Amplificatore di potenza



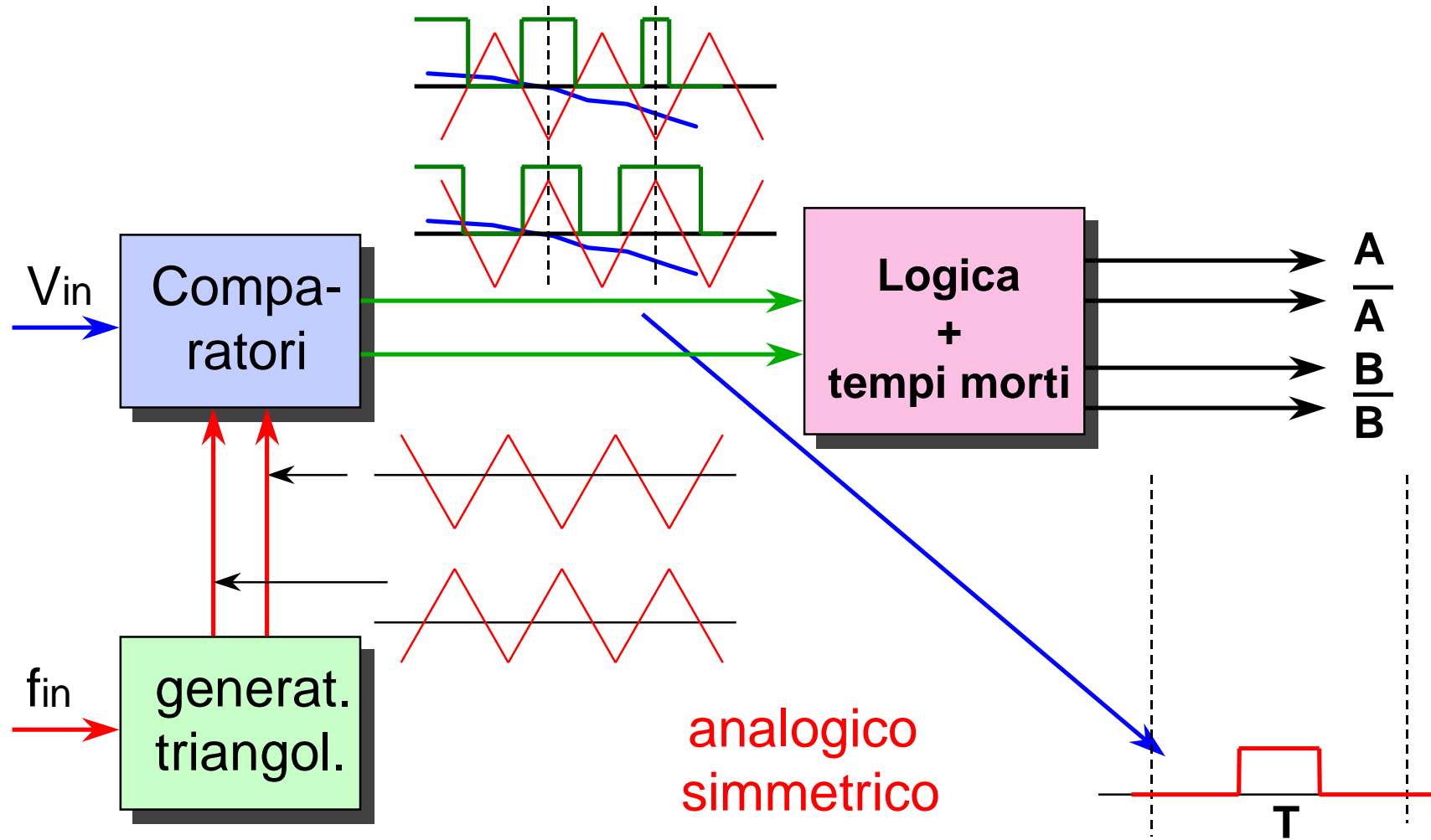
Schemi concettuali di modulatori



Amplificatore di potenza



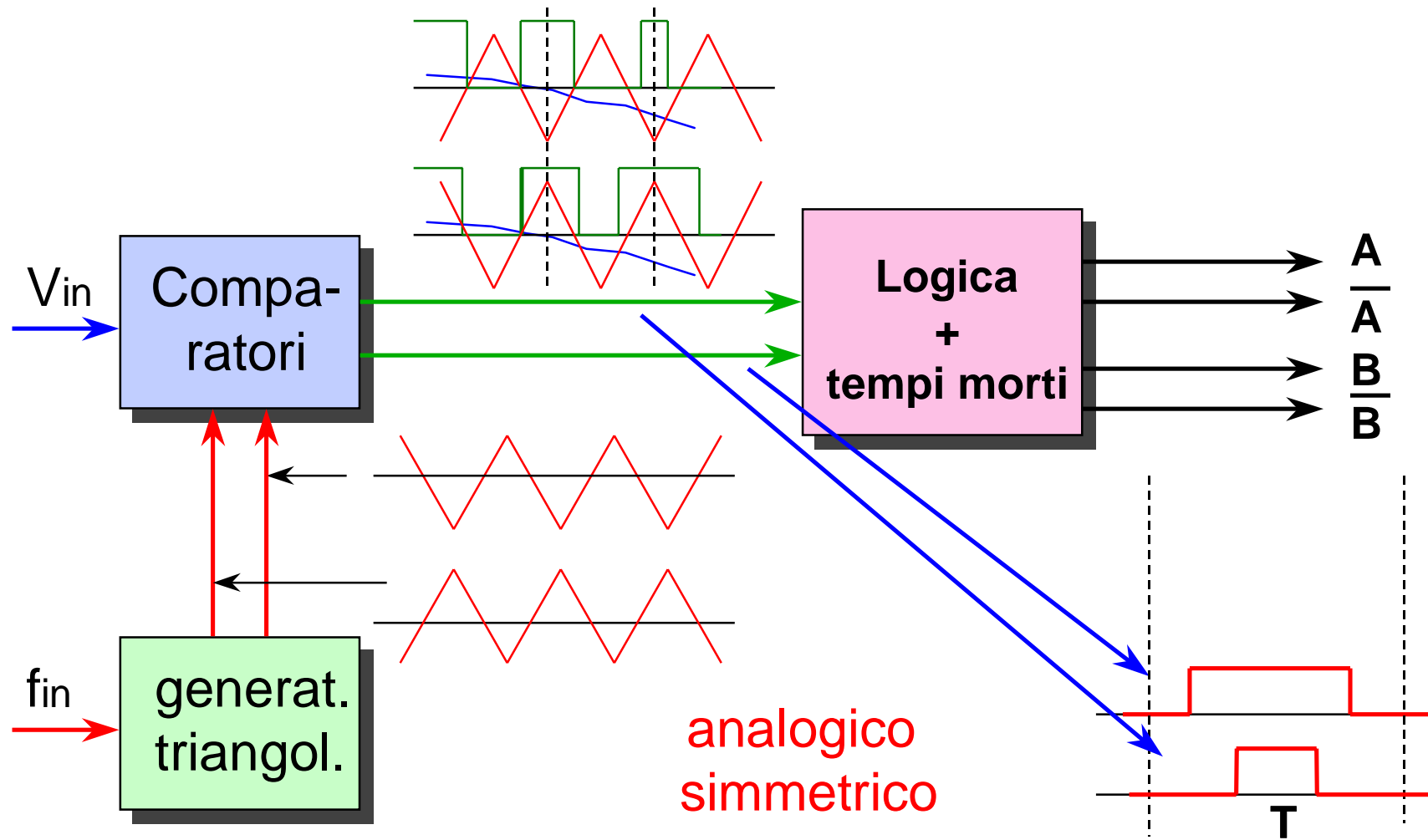
Schemi concettuali di modulatori



Amplificatore di potenza



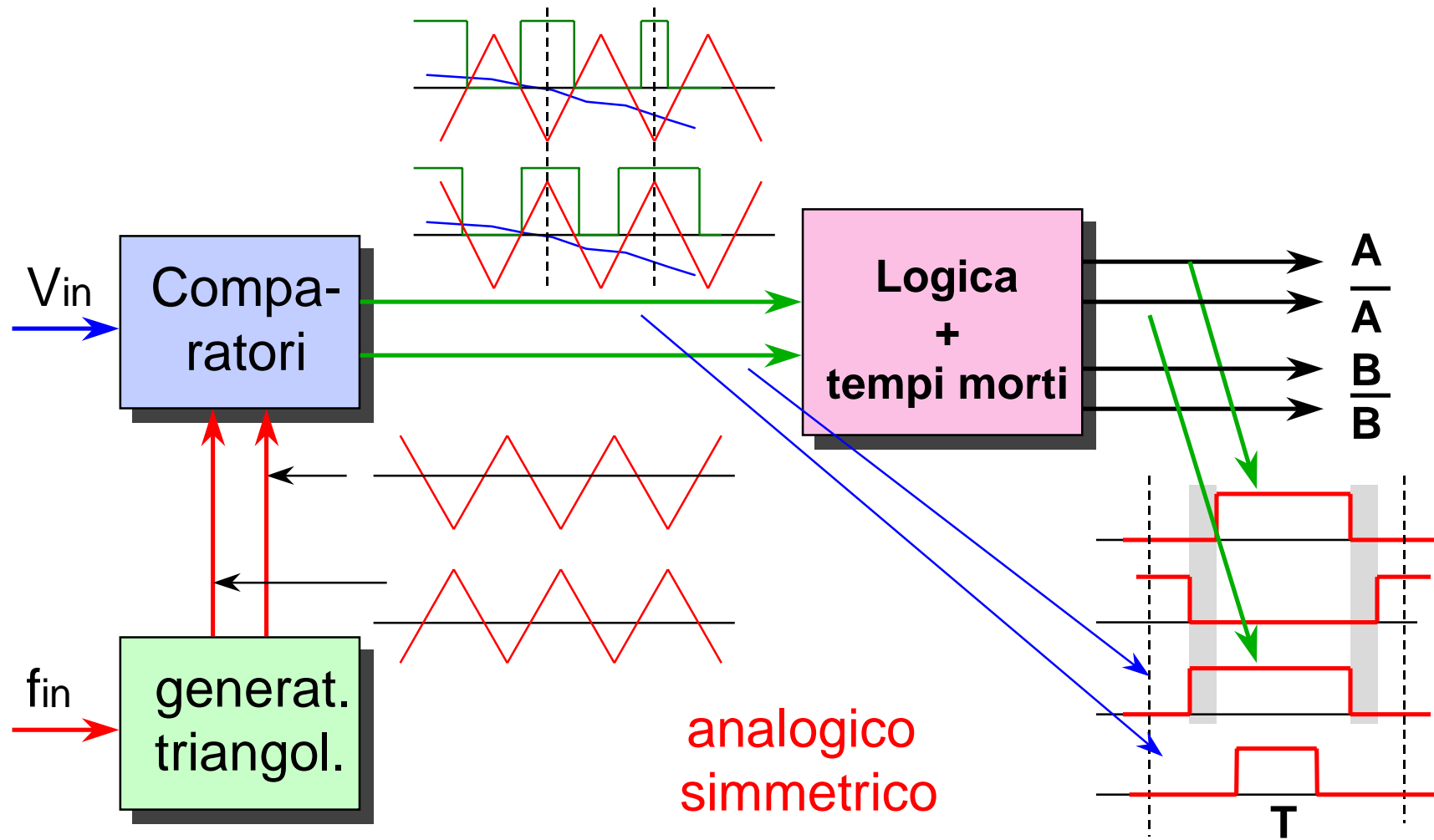
Schemi concettuali di modulatori



Amplificatore di potenza



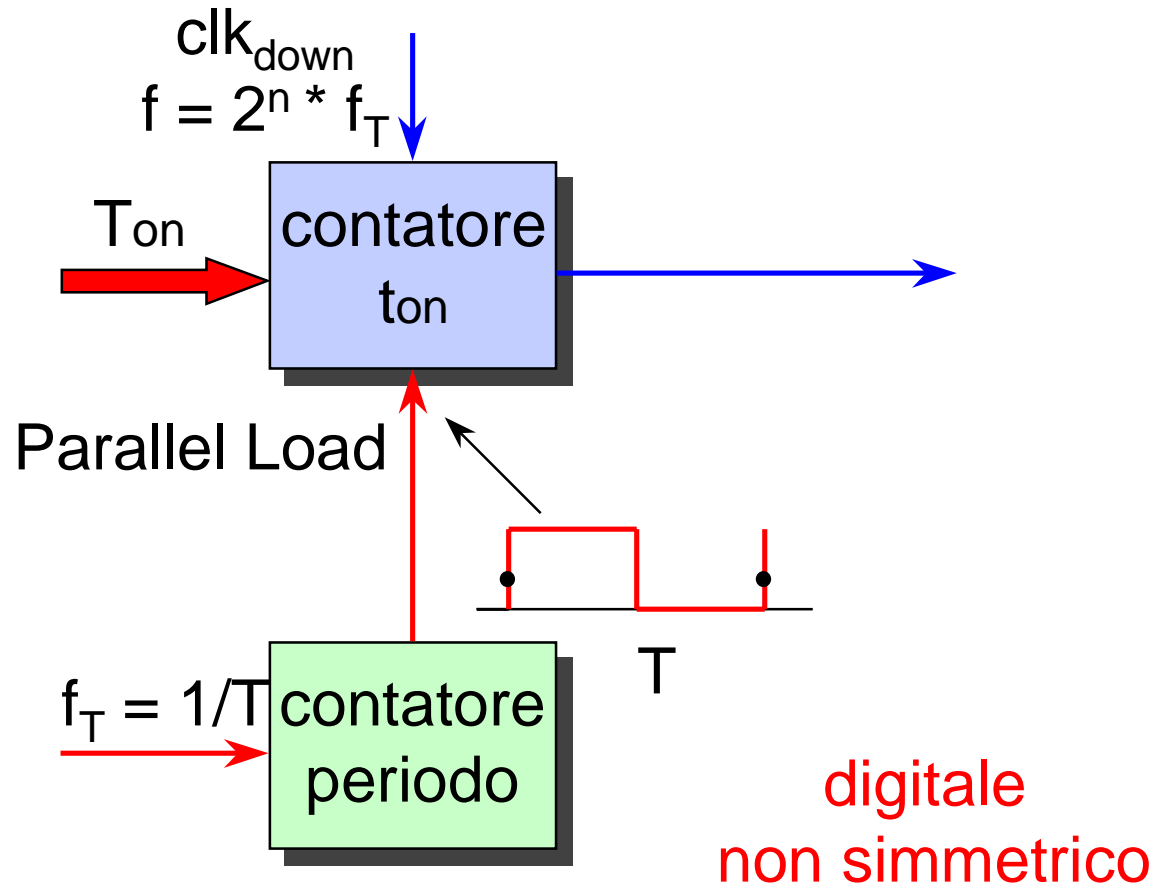
Schemi concettuali di modulatori



Amplificatore di potenza



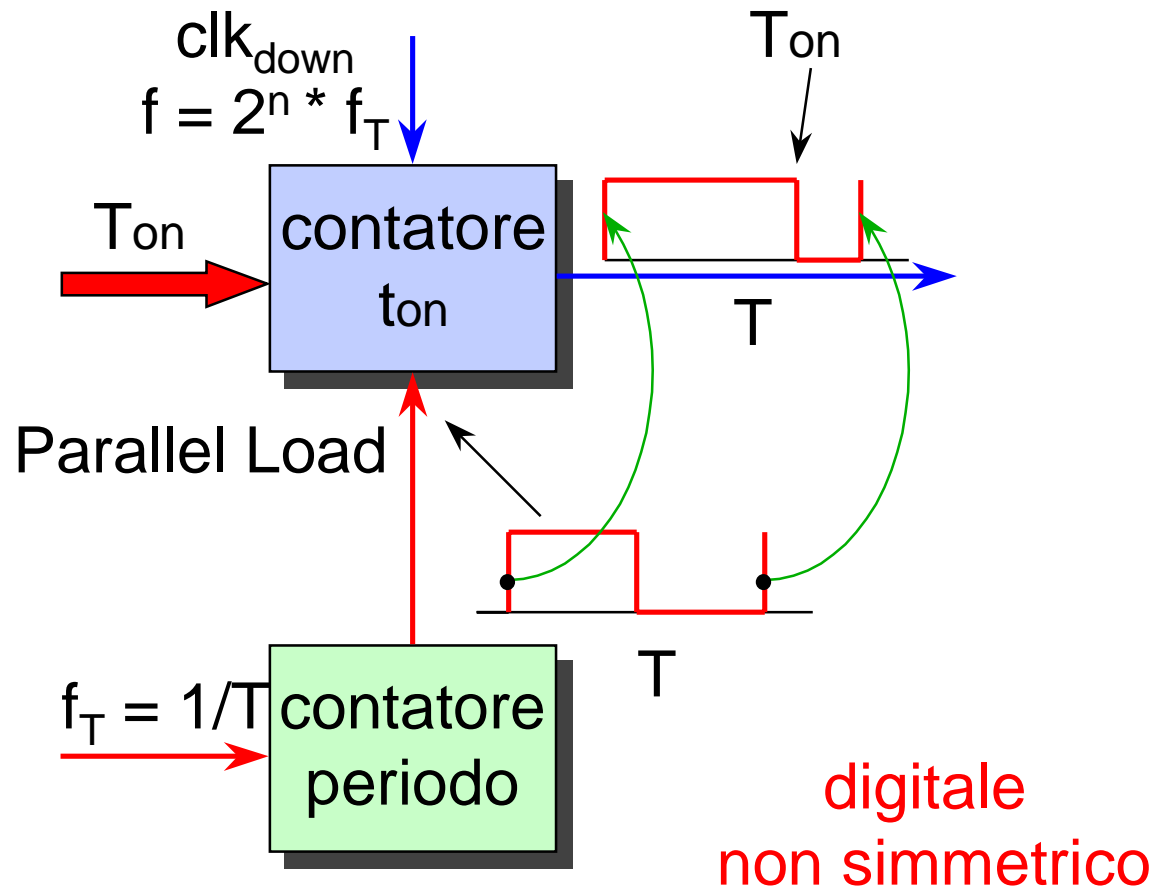
Schemi concettuali di modulatori



Amplificatore di potenza



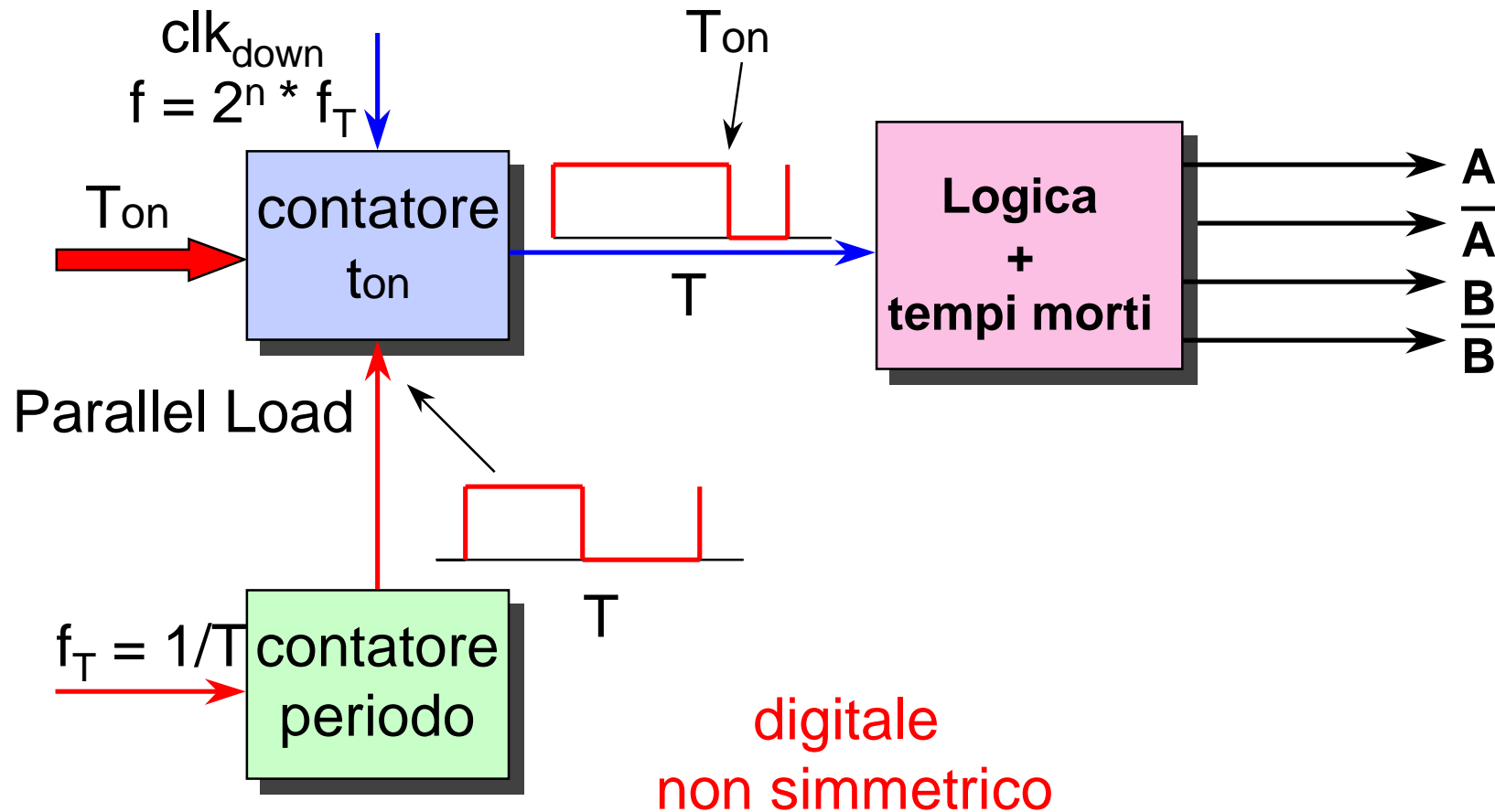
Schemi concettuali di modulatori



Amplificatore di potenza



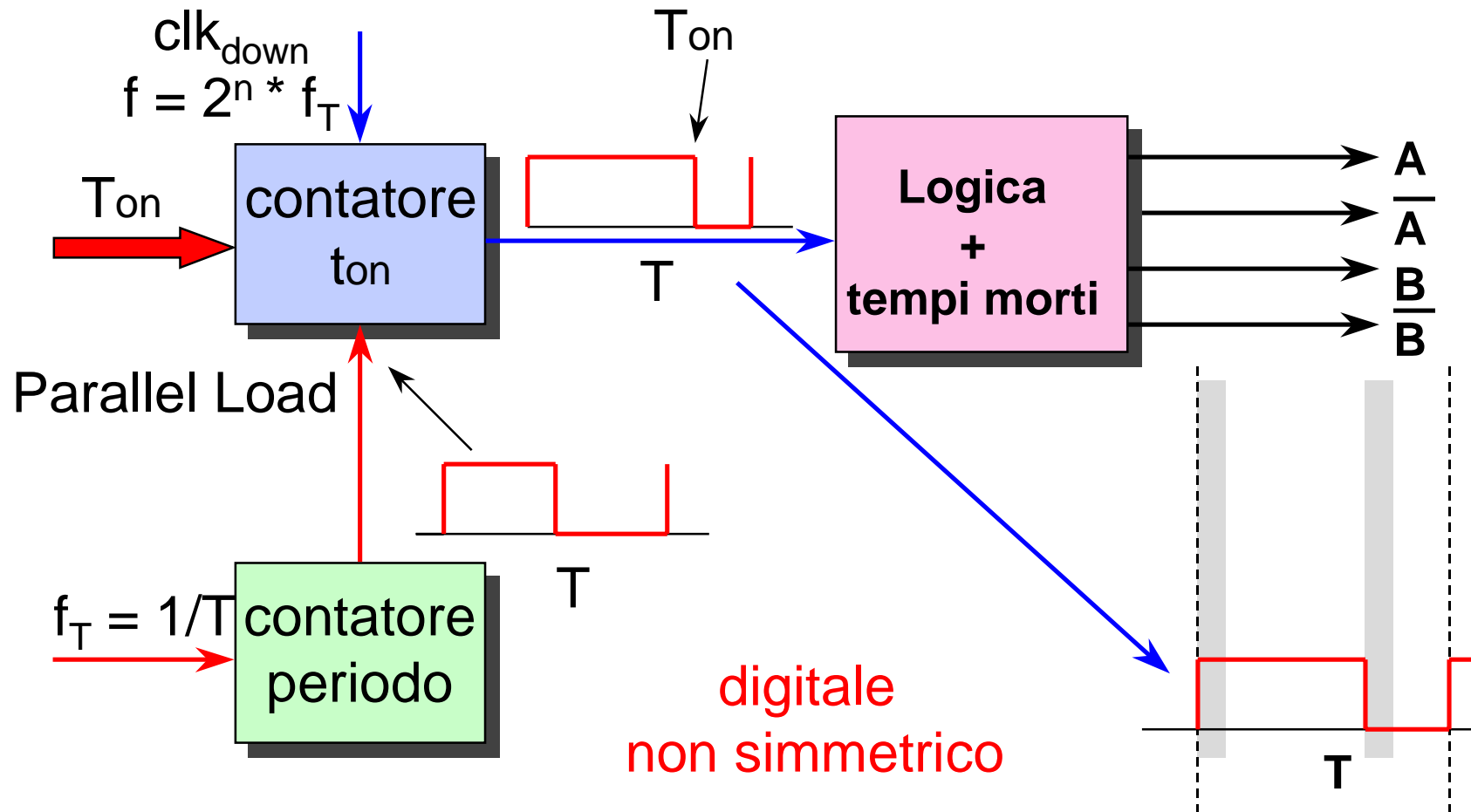
Schemi concettuali di modulatori



Amplificatore di potenza



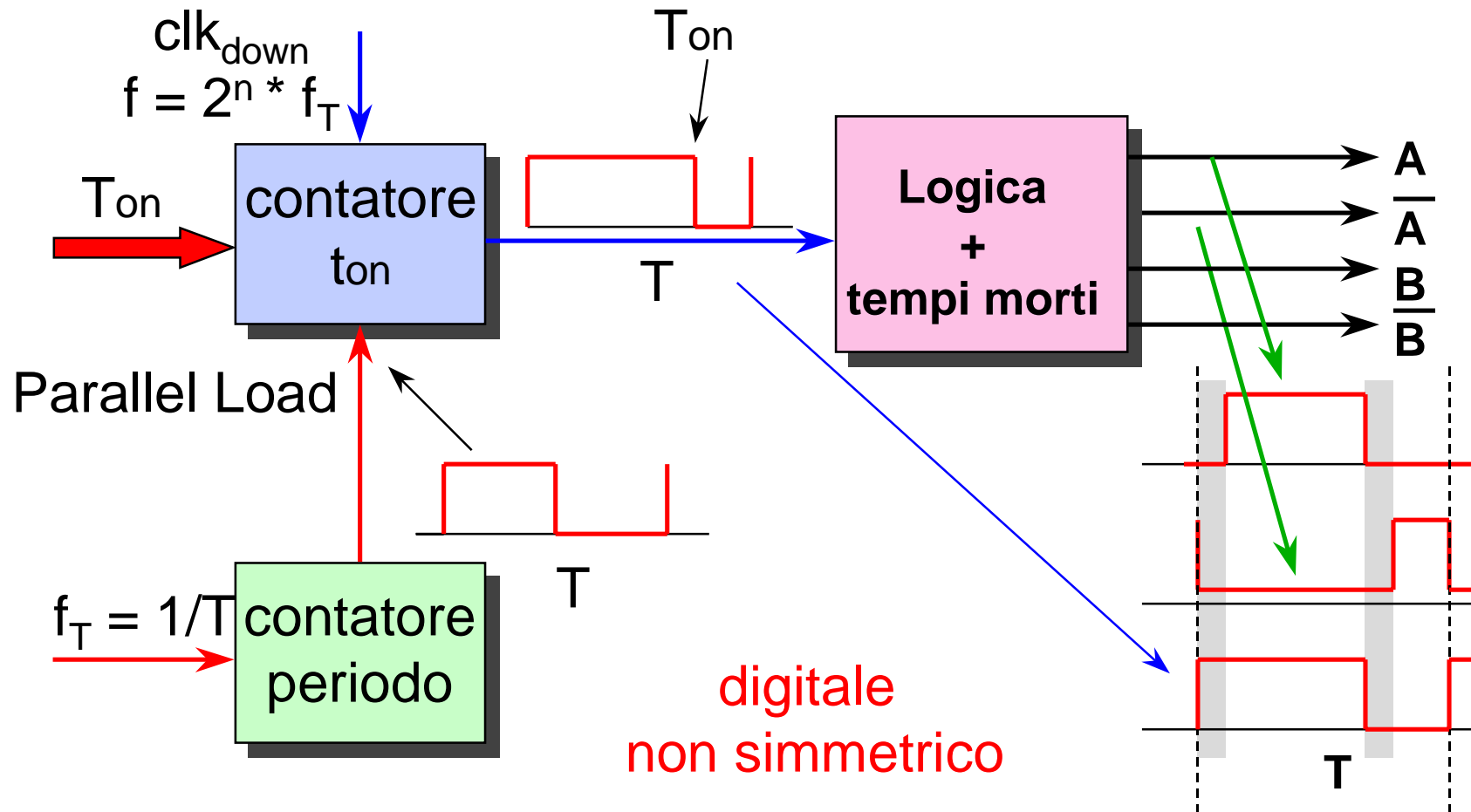
Schemi concettuali di modulatori



Amplificatore di potenza



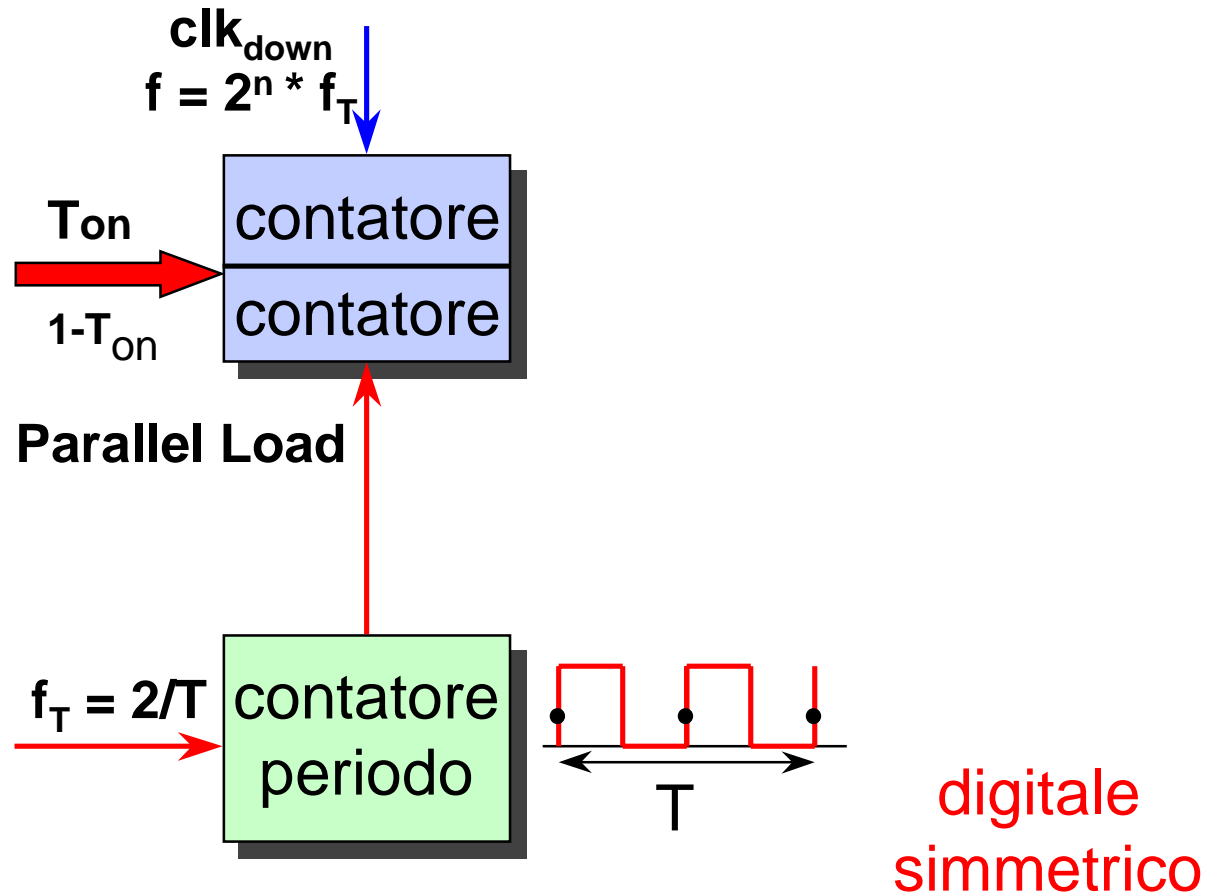
Schemi concettuali di modulatori



Amplificatore di potenza



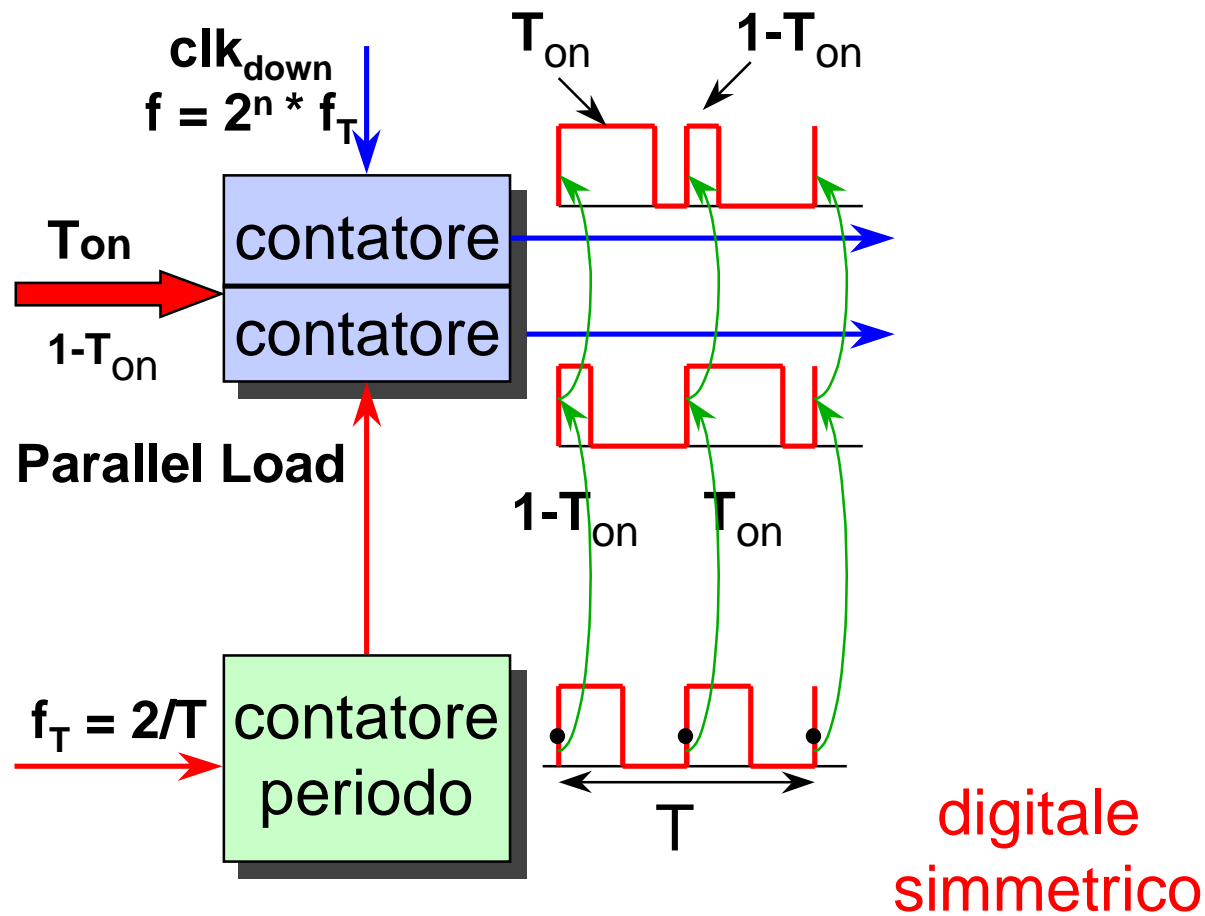
Schemi concettuali di modulatori



Amplificatore di potenza



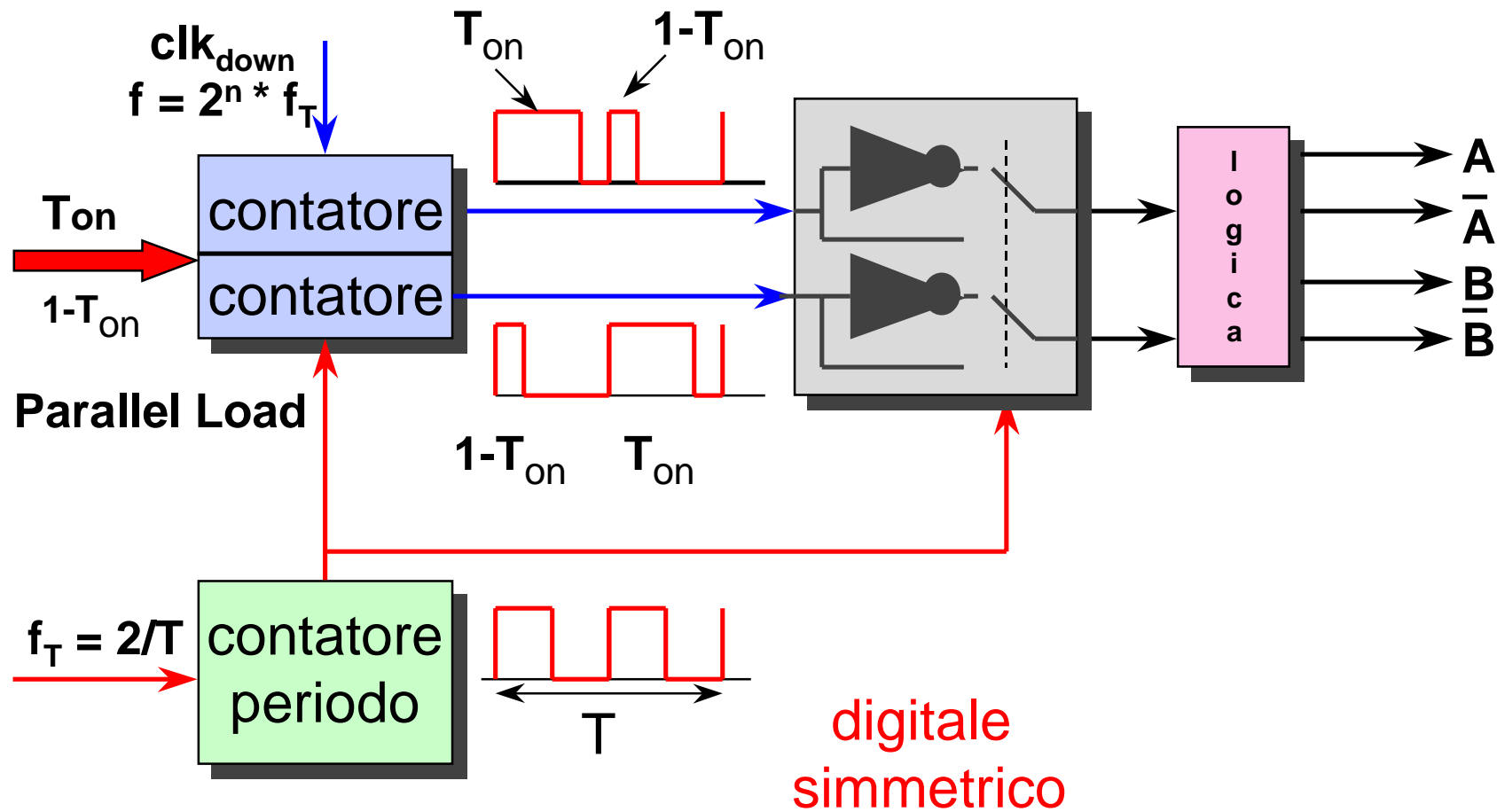
Schemi concettuali di modulatori



Amplificatore di potenza

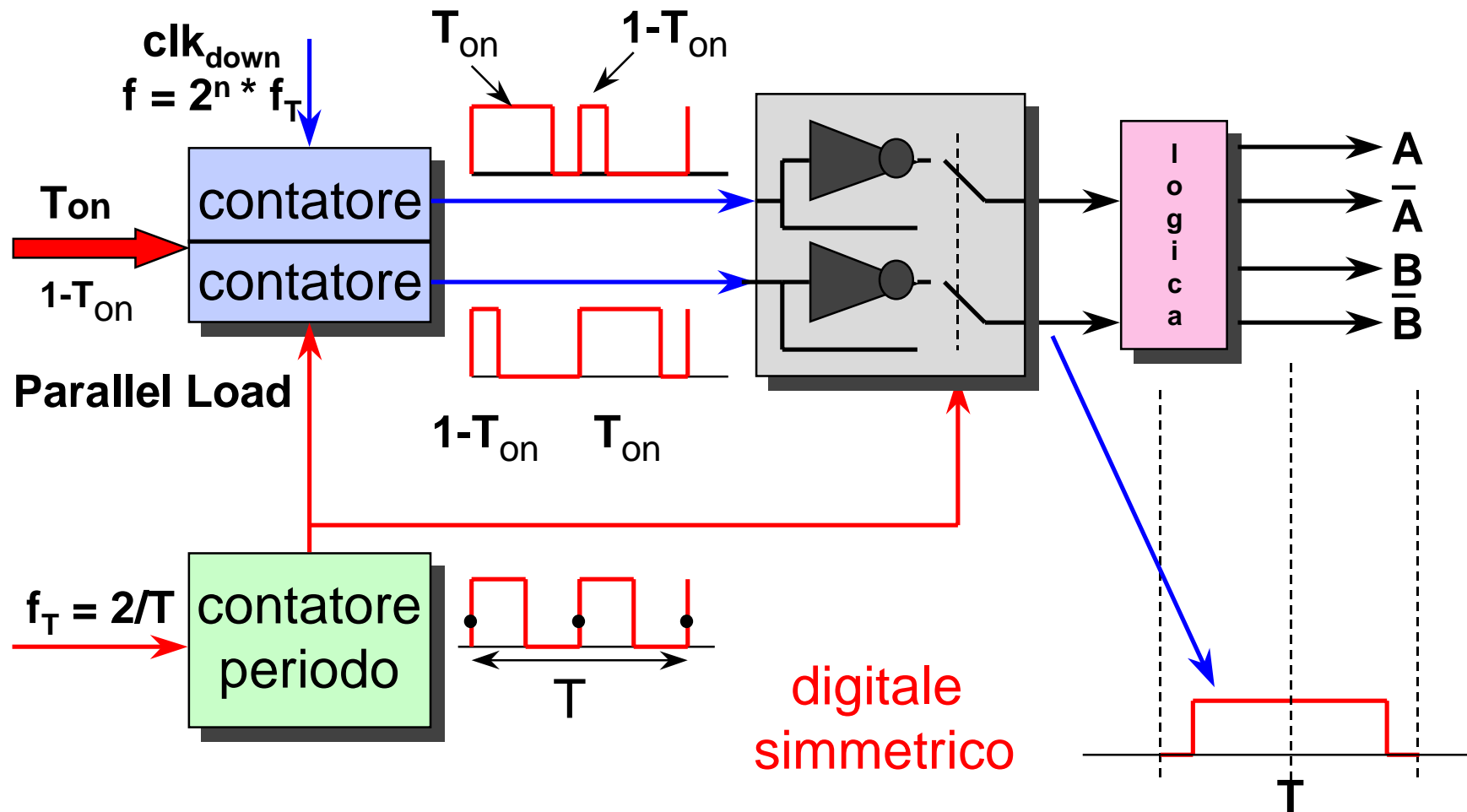


Schemi concettuali di modulatori



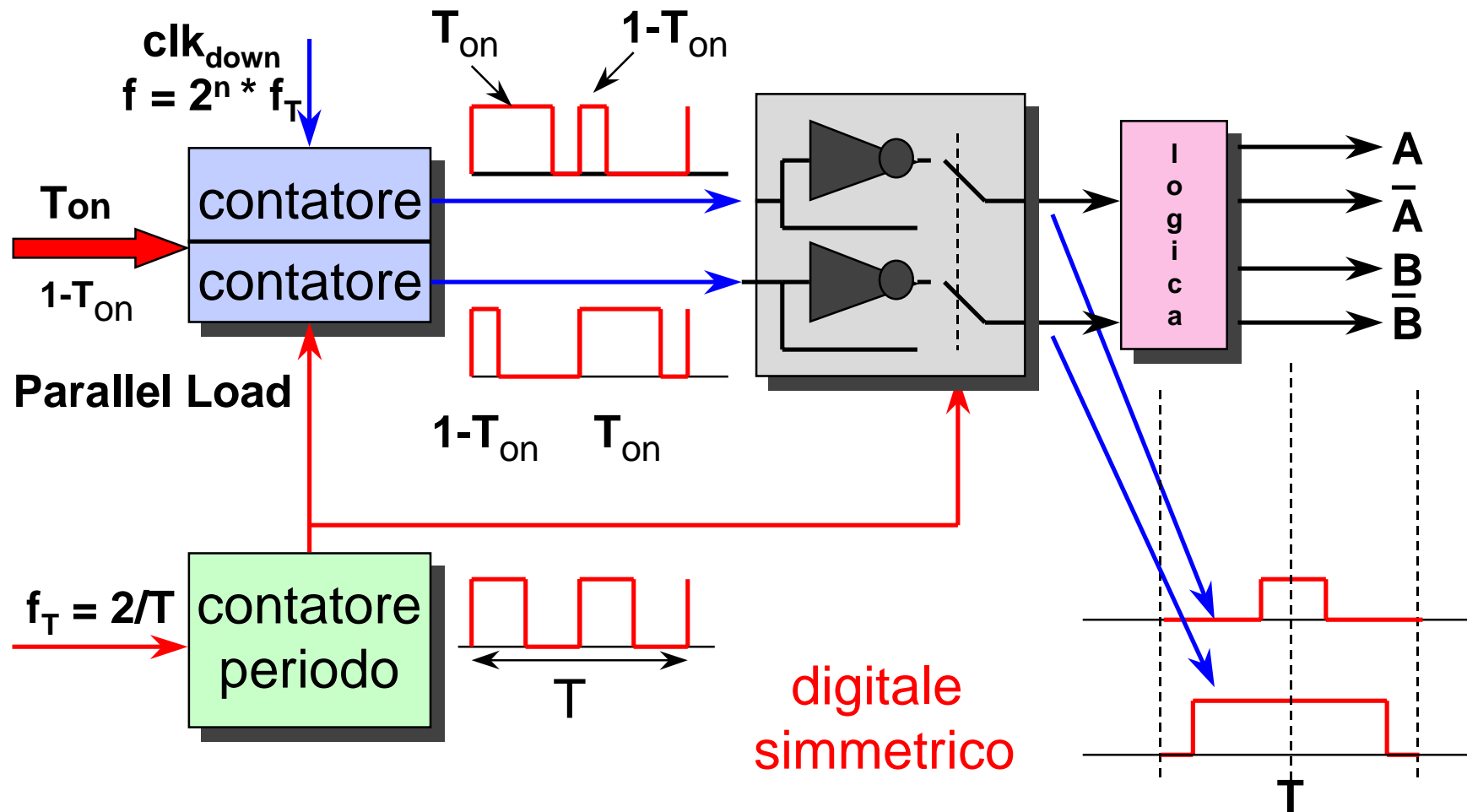
Amplificatore di potenza

Schemi concettuali di modulatori



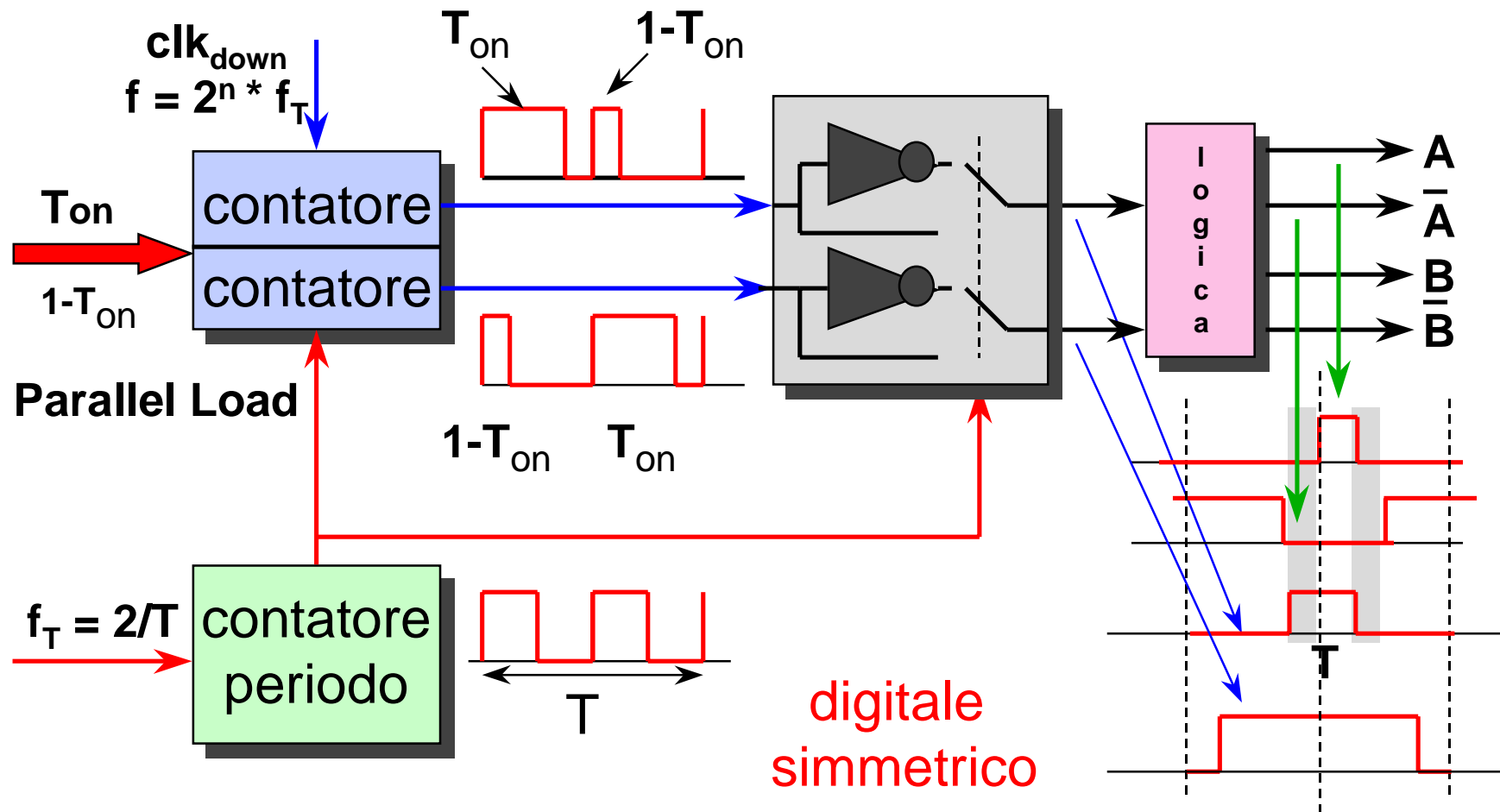
Amplificatore di potenza

Schemi concettuali di modulatori



Amplificatore di potenza

Schemi concettuali di modulatori



Amplificatore di potenza



dispositivo non ideale: impone limiti su

❑ massima corrente

⇒ ciclo continuo (I_{nom})

⇒ extracorrente per tempo limitato

1.5 - 2 I_{nom} per 1s - 30 s

⇒ comportamento dinamico dell'azionamento non ideale durante la fase di limitazione di corrente

❑ massima tensione

⇒ limitazione di coppia alle alte velocità

⇒ degrado delle prestazioni del sistema di controllo

Azionamenti elettrici

a cura di Alberto Tonielli
Professore Associato di
Tecnologie dei Sistemi di Controllo

DEIS Università di Bologna
Viale Risorgimento, 2
40136 Bologna
Tel. + Fax (051-6443024)