

# 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)



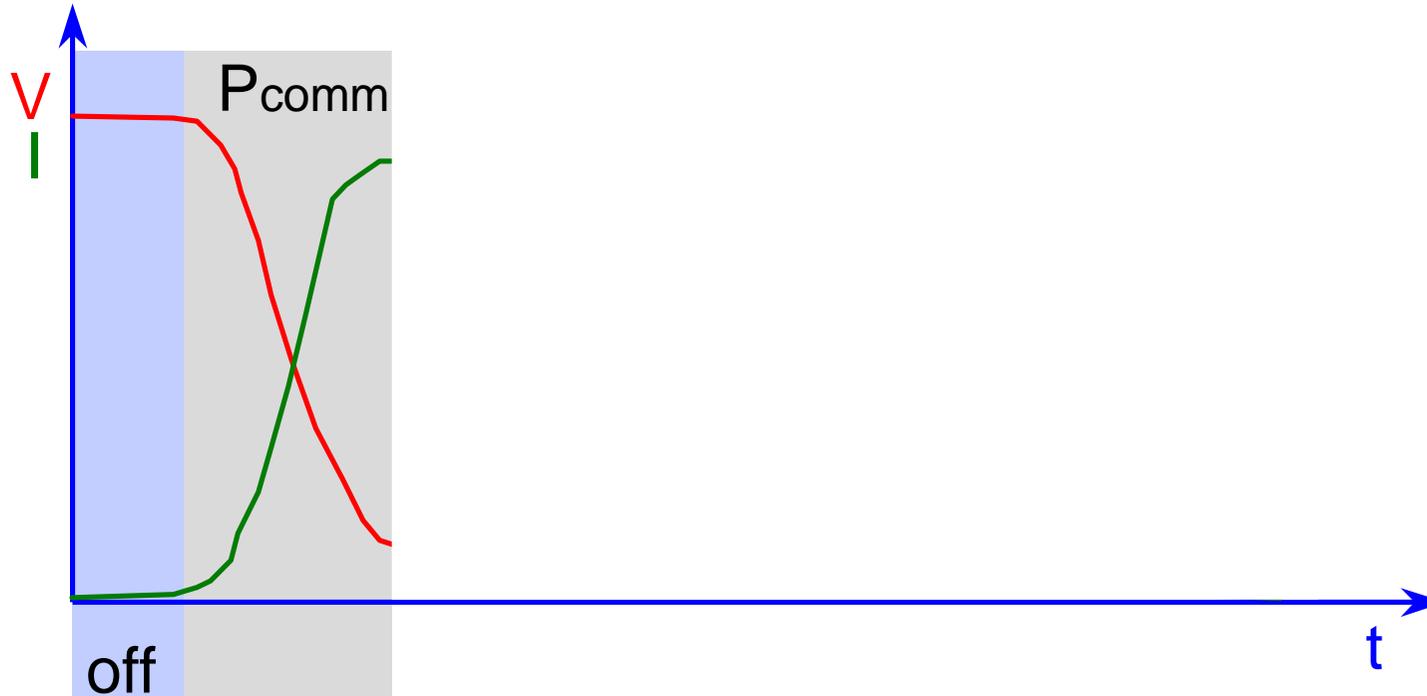
## Amplificatori di potenza

- ❑ 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



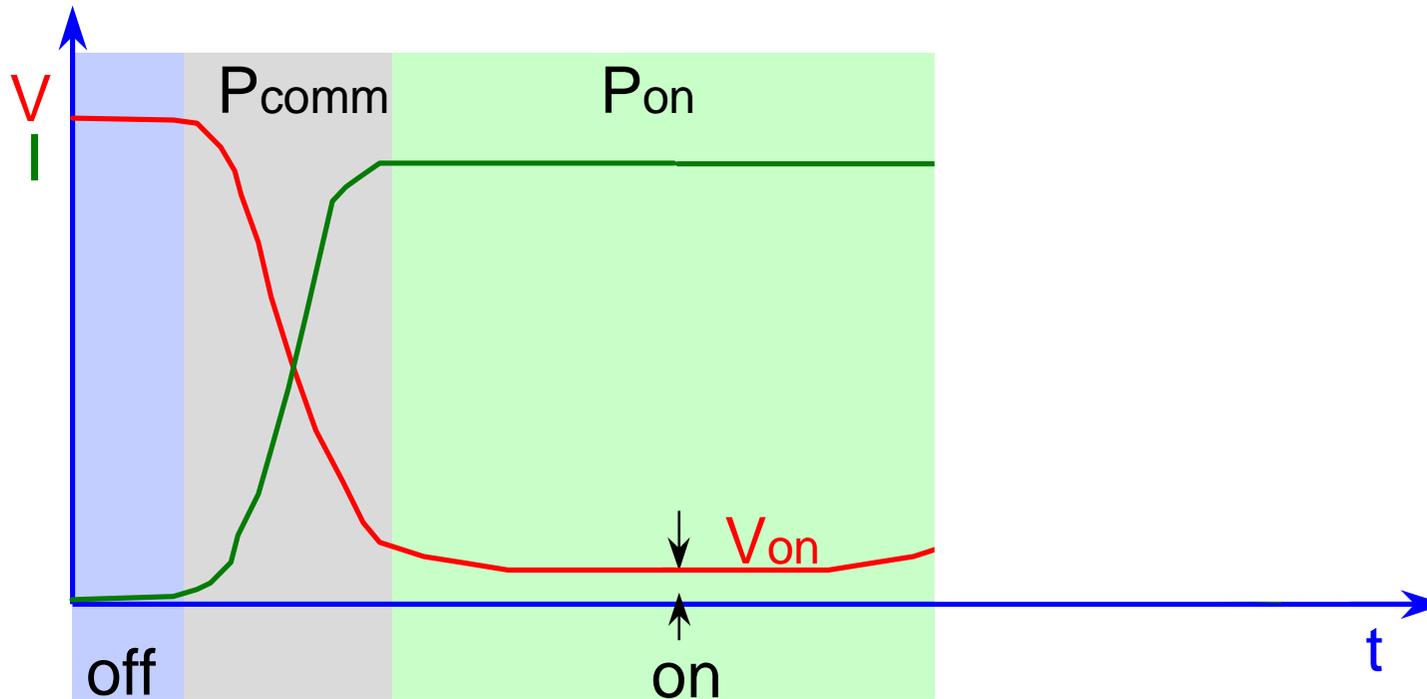
I Transistori sono interruttori non ideali



# Amplificatore di potenza



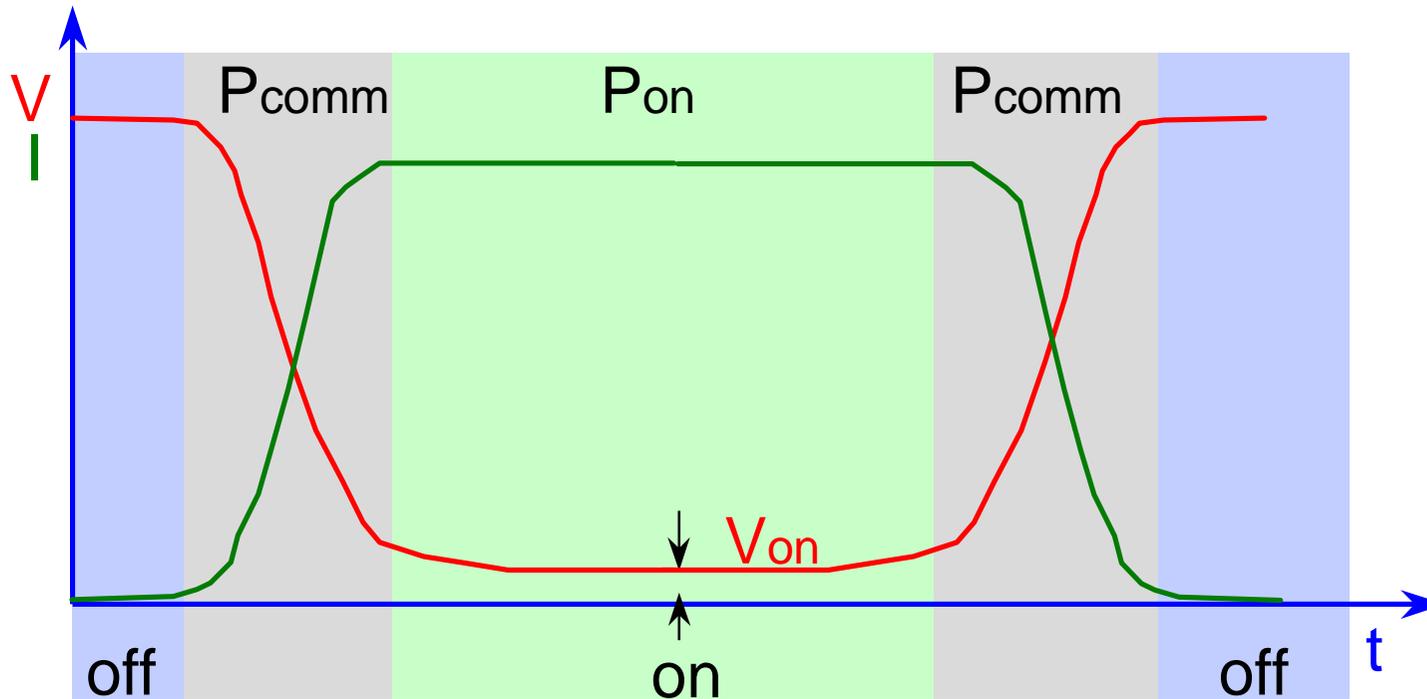
I Transistori sono interruttori non ideali



# Amplificatore di potenza

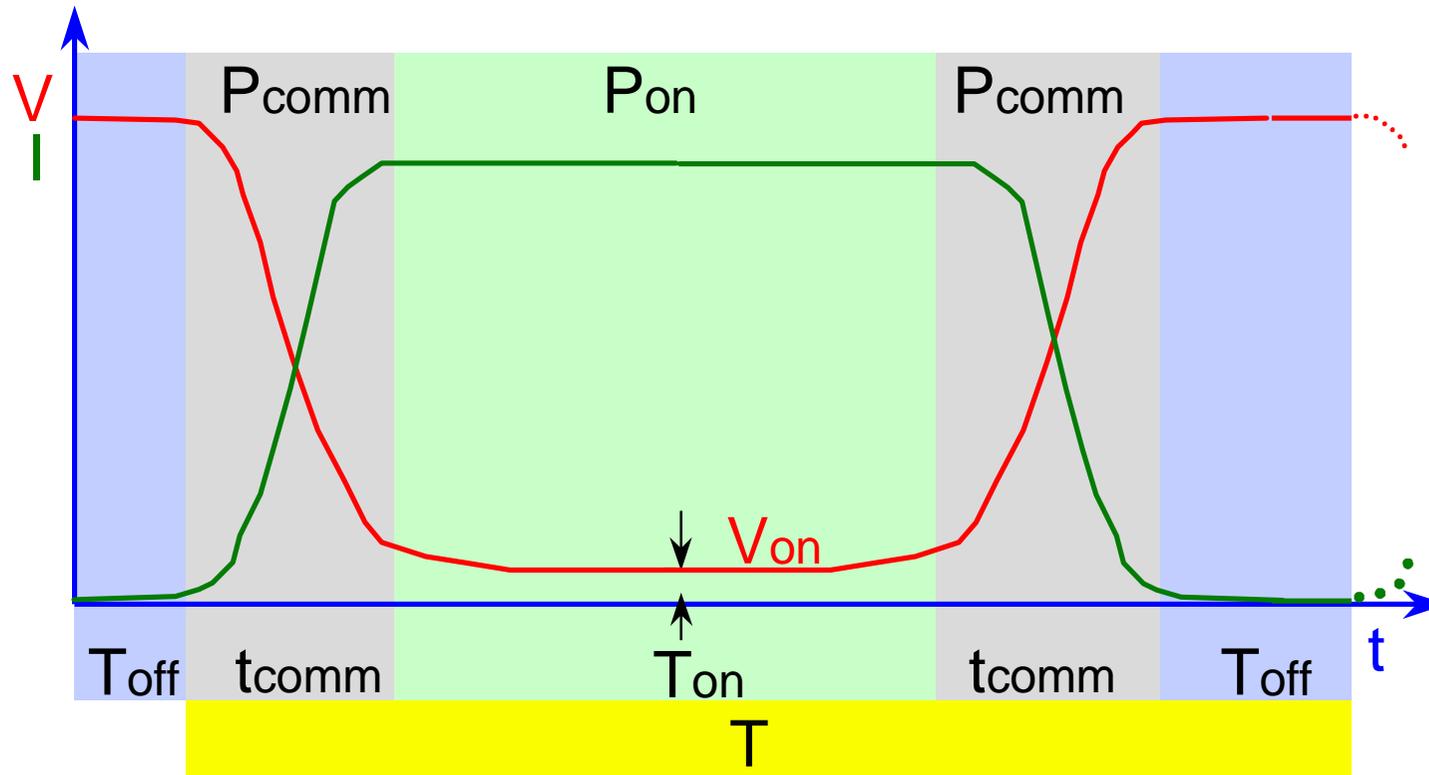


I Transistori sono interruttori non ideali



# 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



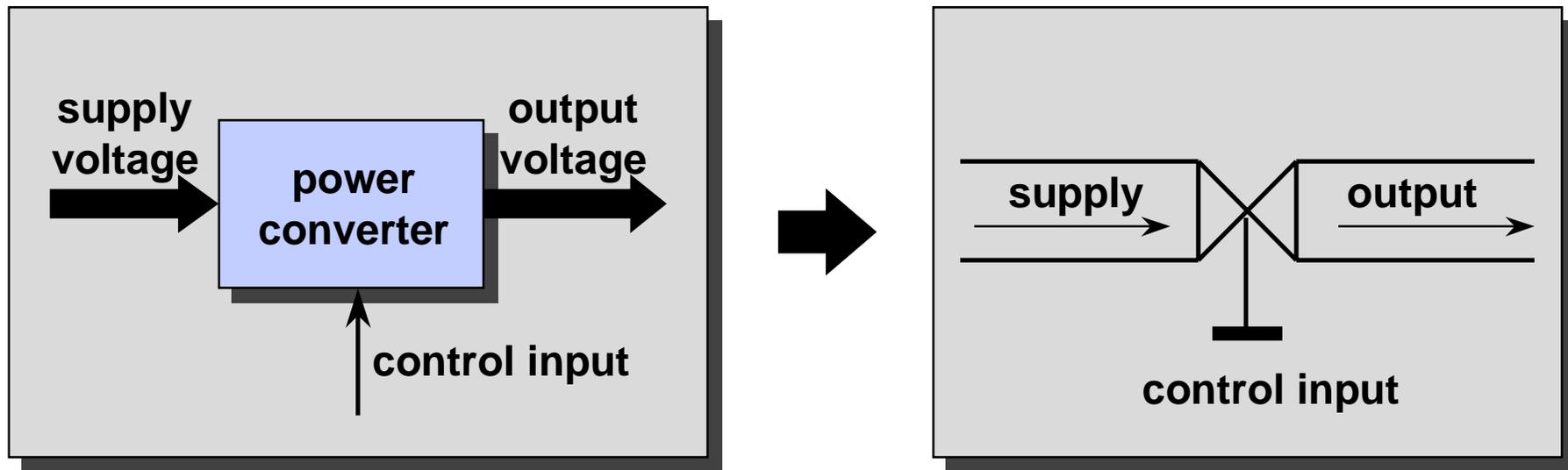
## Principali semiconduttori di potenza

| 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

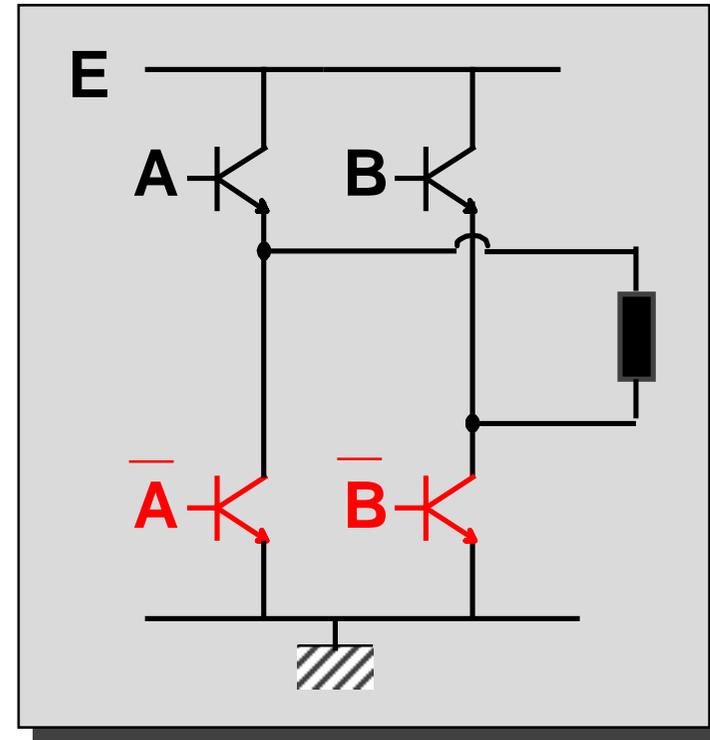
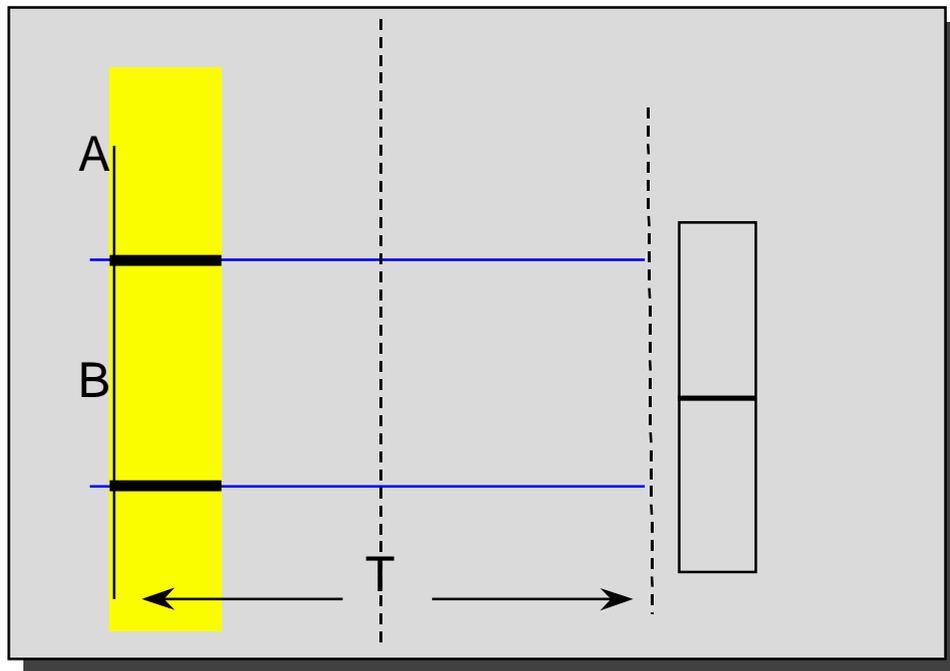


Non si riesce a costruire amplificatori di potenza a controllo continuo (lineari)

# Componenti di un Azionamento

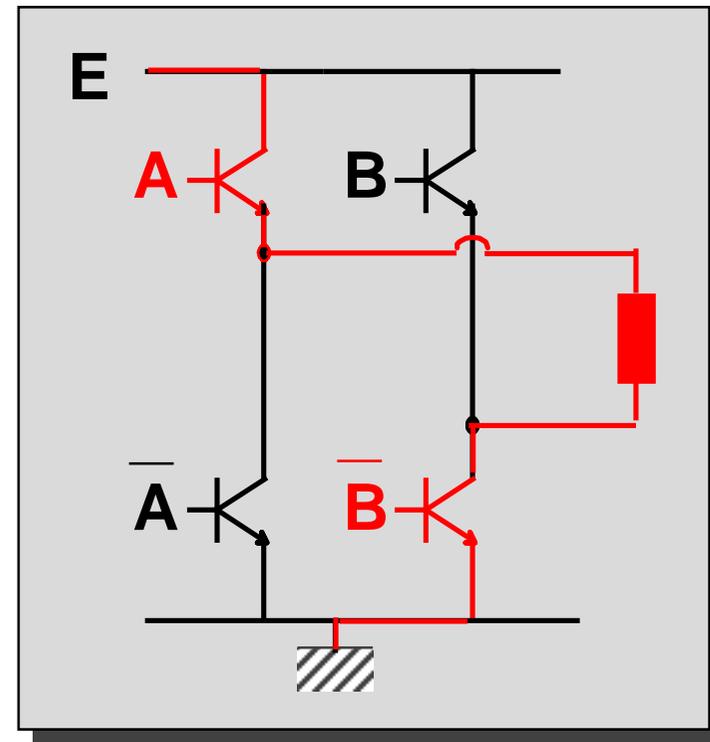
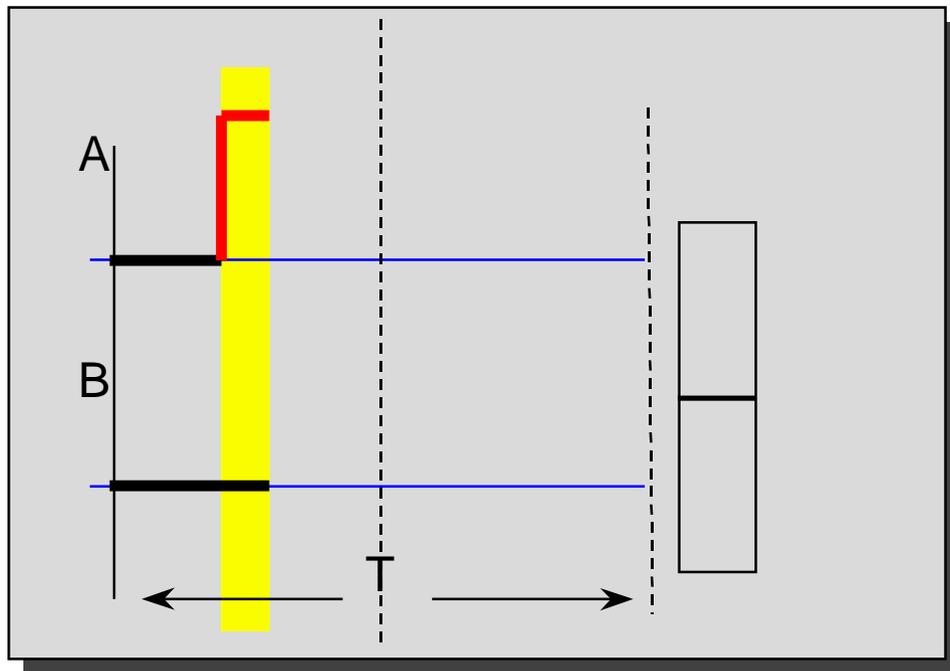


## Modulazione a Larghezza di Impulso (PWM)



# Componenti di un Azionamento

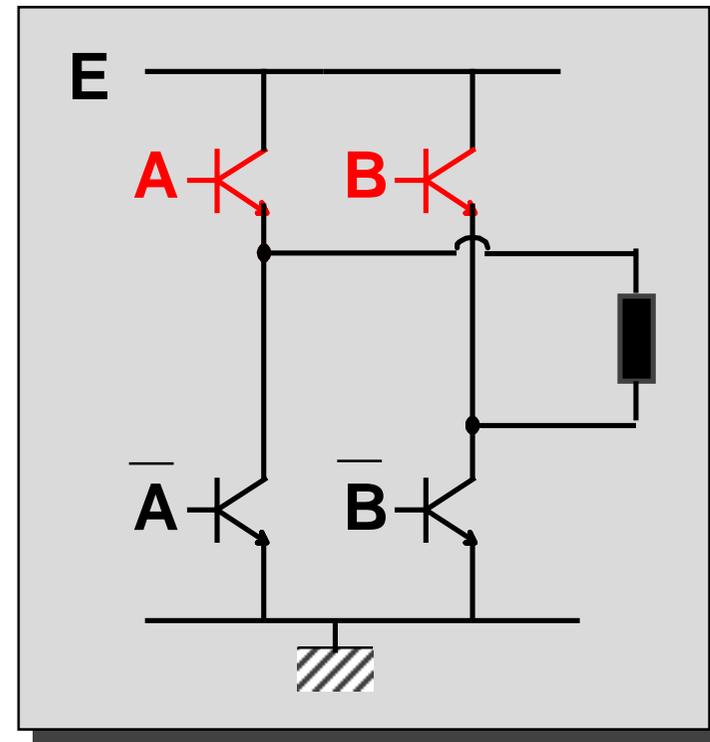
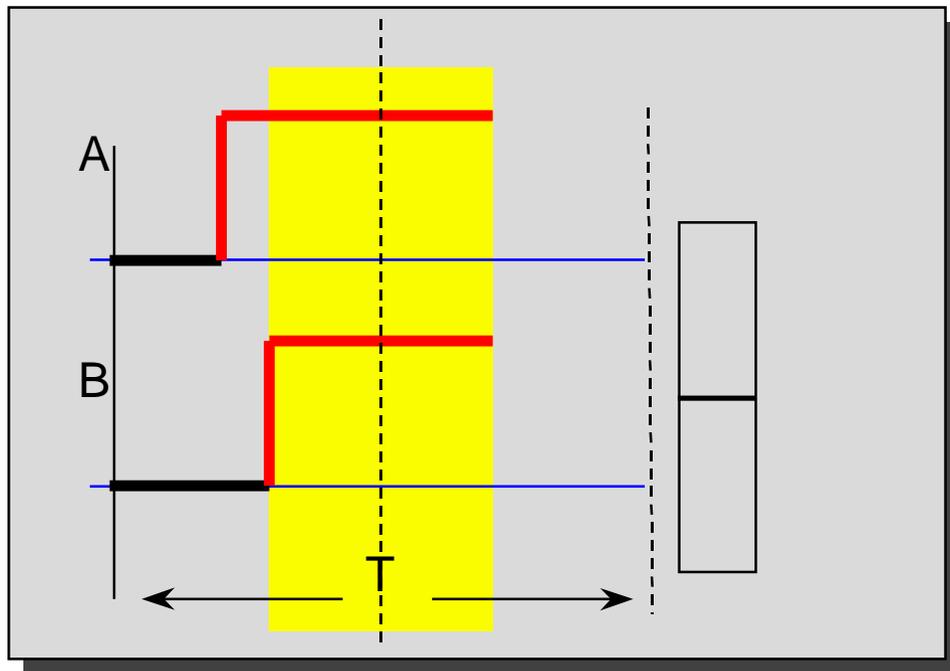
## Modulazione a Larghezza di Impulso (PWM)



# Componenti di un Azionamento



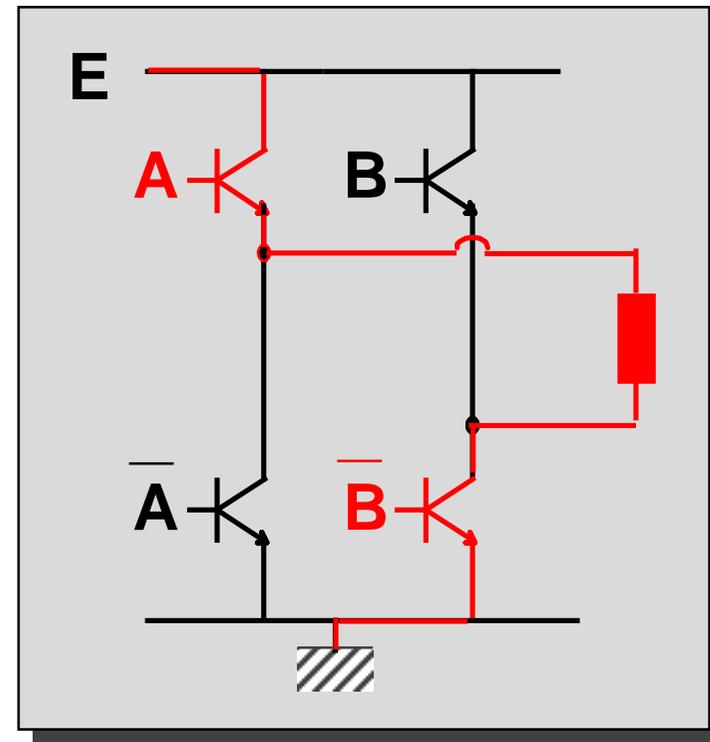
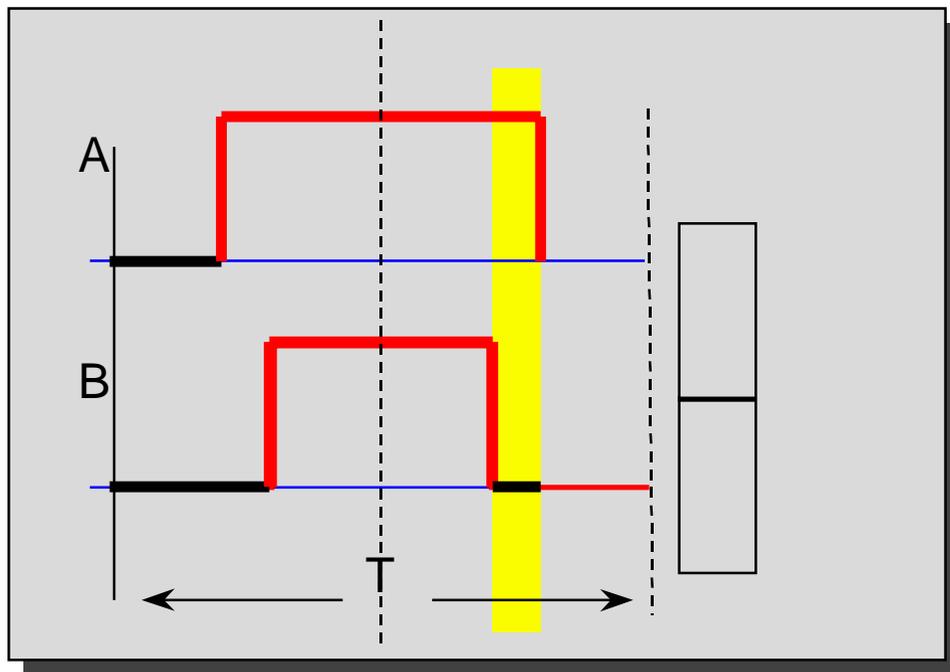
## Modulazione a Larghezza di Impulso (PWM)



# Componenti di un Azionamento

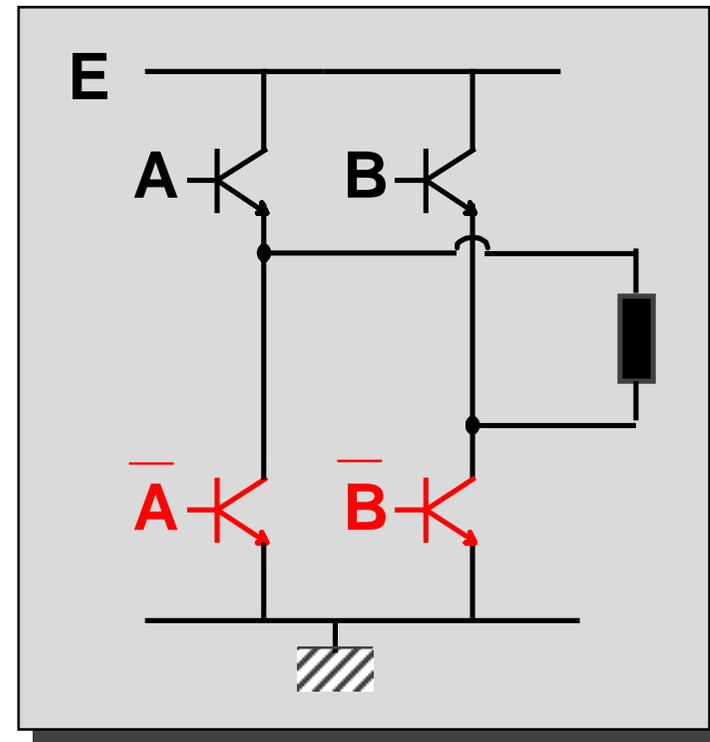
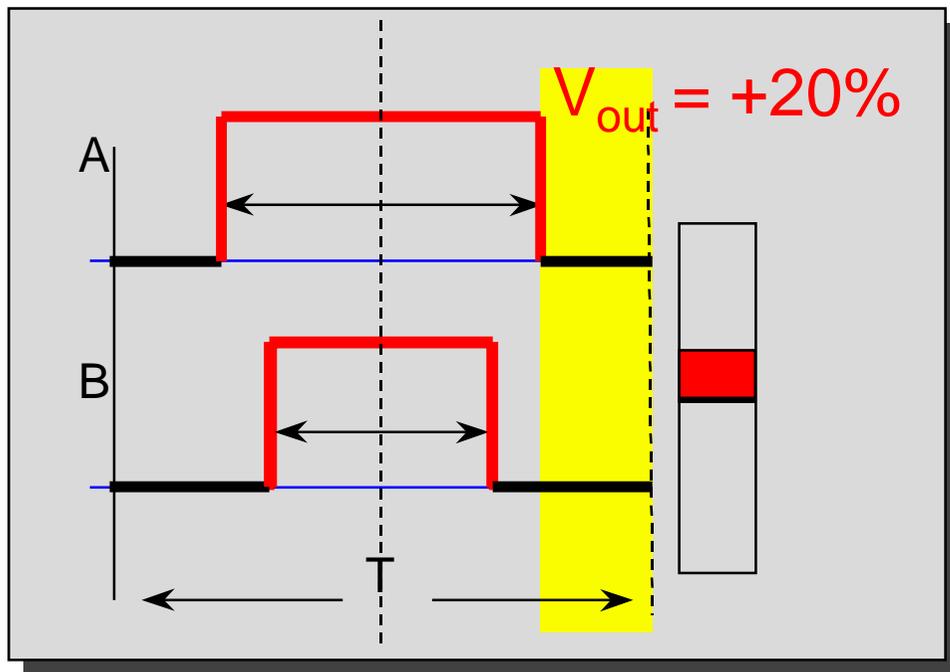


## Modulazione a Larghezza di Impulso (PWM)



# Componenti di un Azionamento

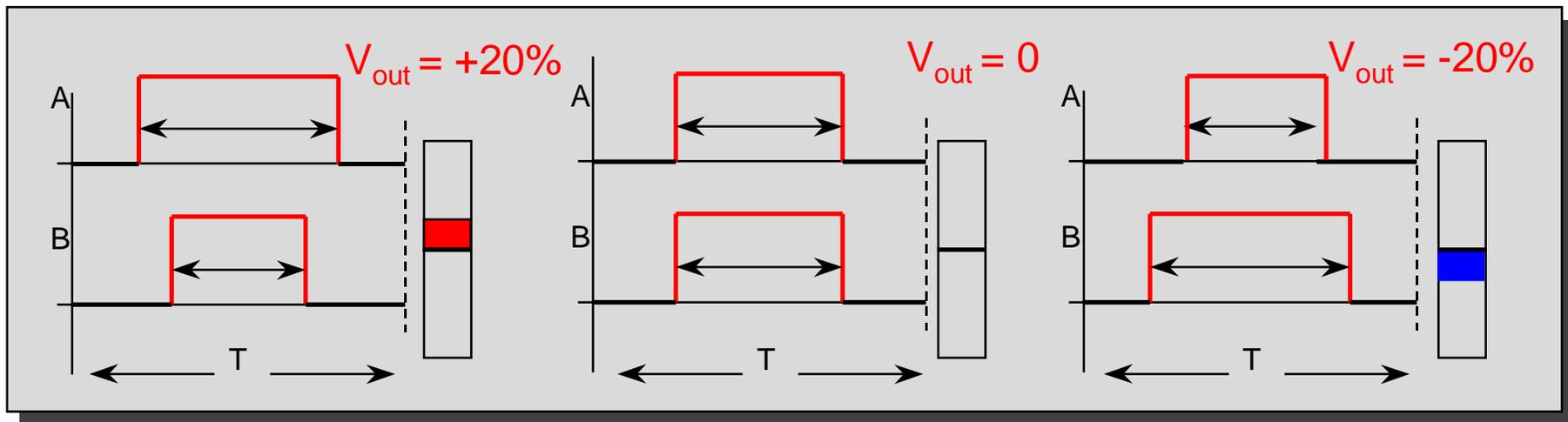
## Modulazione a Larghezza di Impulso (PWM)



# 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

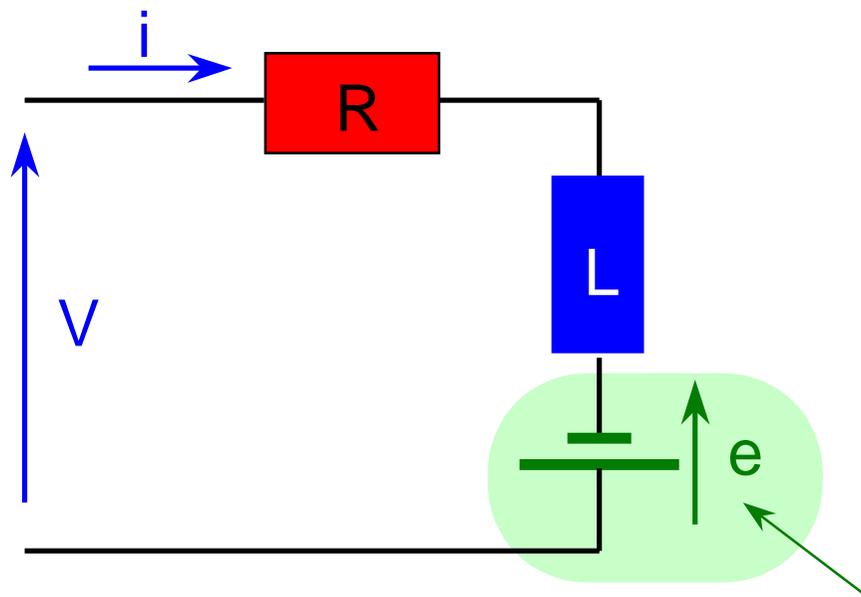
- ❑ Controllo di tensione
  - ⇨ modulazione PWM
    - amplificatore lineare per frequenze  $\ll f_{\text{mod}}$
- ❑ regolatori standard analogici o digitali
  
- ❑ Controllo di corrente
  - ⇨ modulazione ad isteresi
    - amplificatore ideale per frequenze prossime a  $f_{\text{mod}}$
- ❑ regolatori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

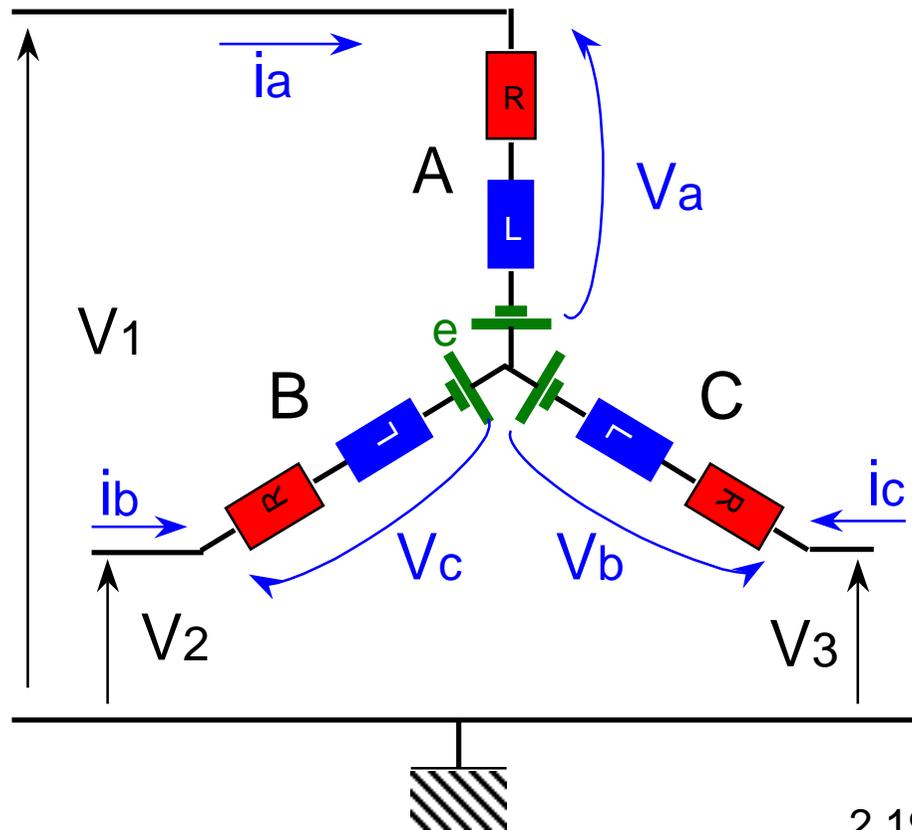
- è presente nei motori
- è funzione della velocità

# 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

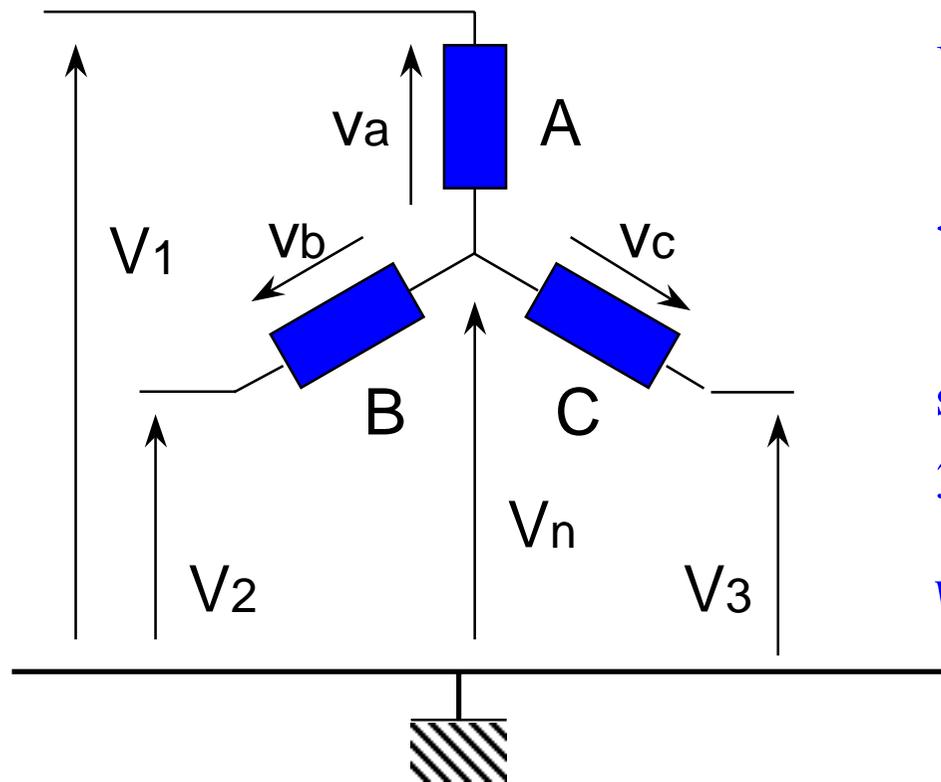
$$R_a = R_b = R_c$$

$$L_a = L_b = L_c$$

# 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

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

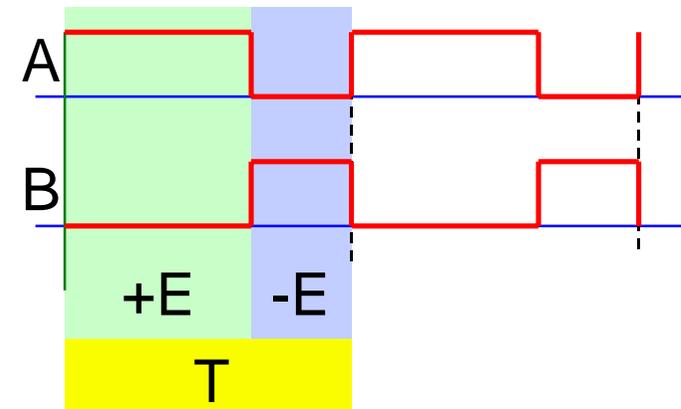
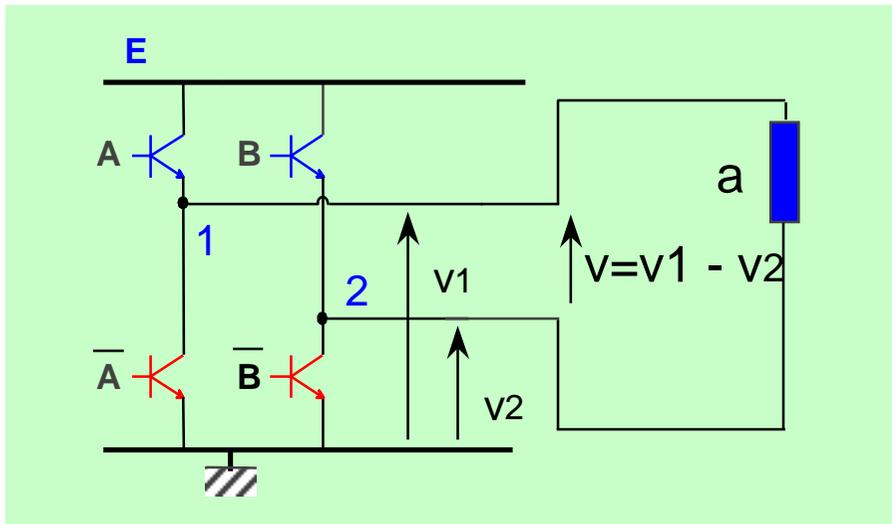
Segnali logici  
di pilotaggio  
dei rami A, B, C

# Amplificatore di potenza

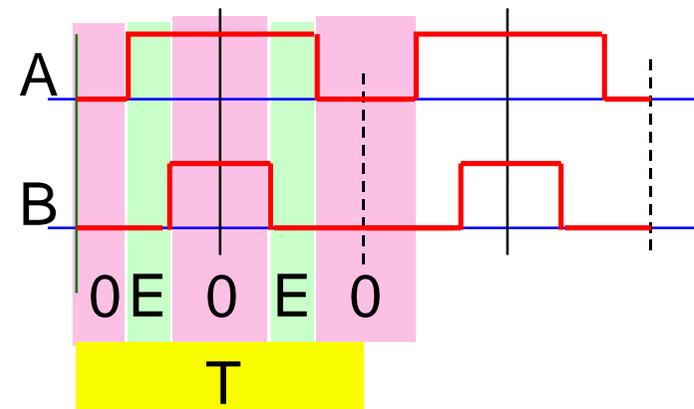
## Controllo di tensione

□ modulazione PWM

⇨ caso monofase

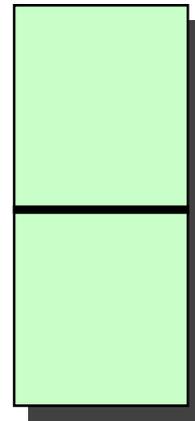
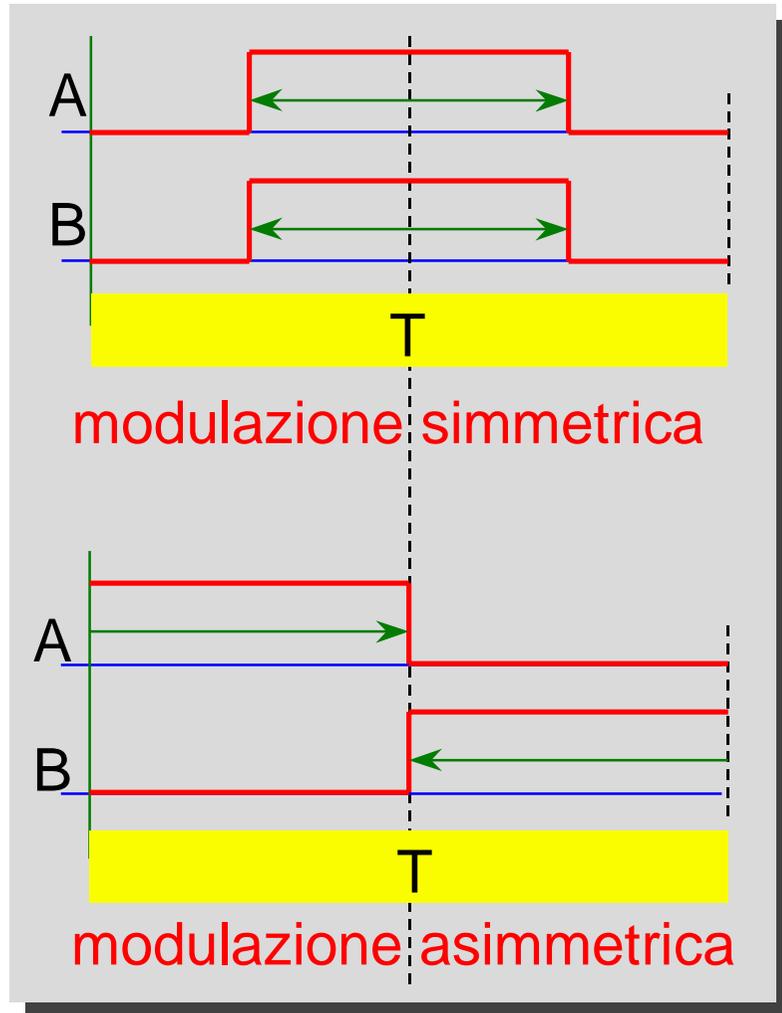


modulazione asimmetrica



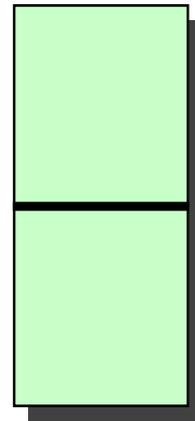
modulazione simmetrica

# Amplificatore di potenza



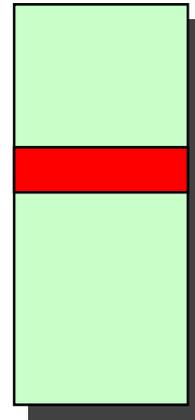
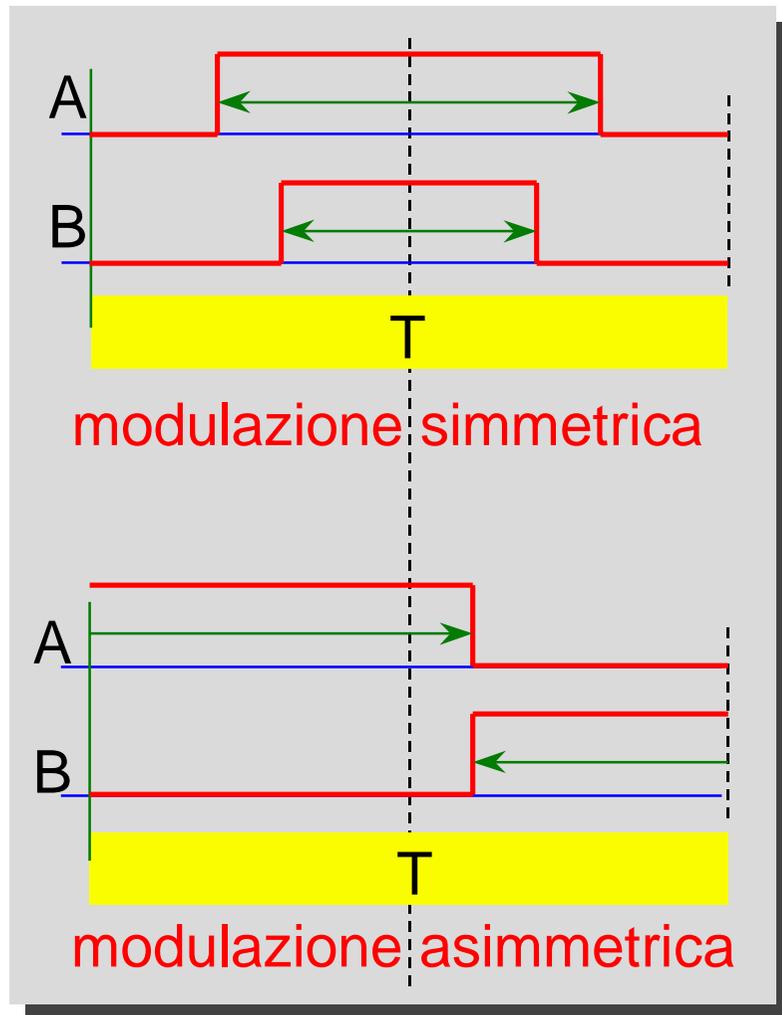
$V=0$

Confronto



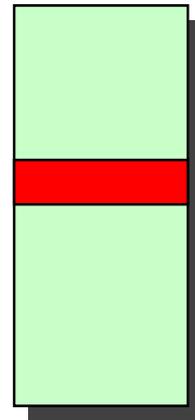
$V=0$

# Amplificatore di potenza



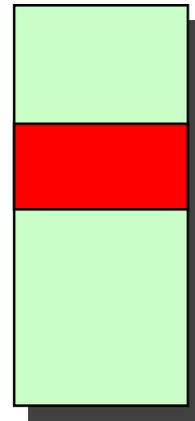
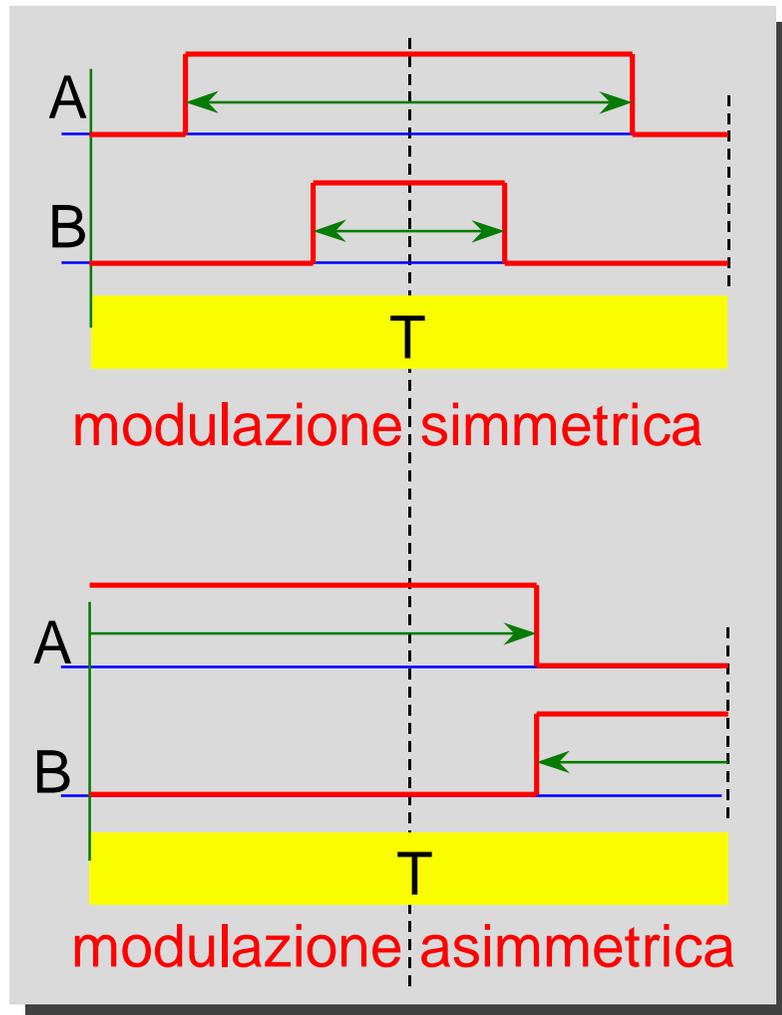
$V=+20\%$

Confronto



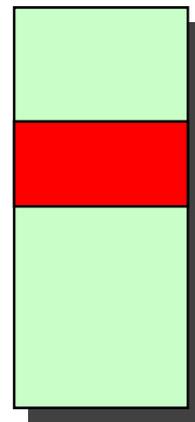
$V=+20\%$

# Amplificatore di potenza



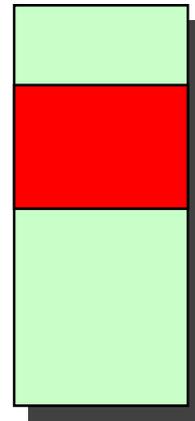
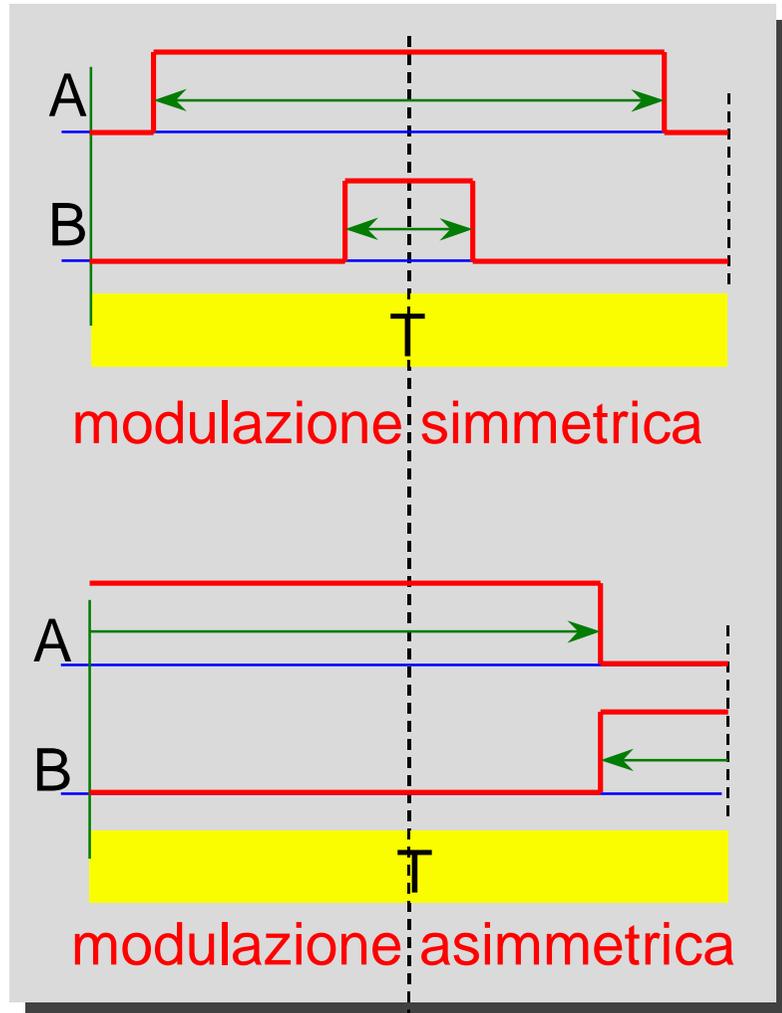
$V=+40\%$

Confronto



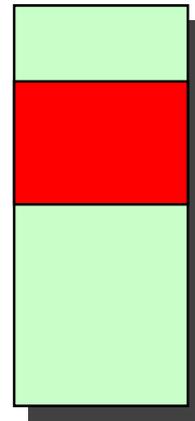
$V=+40\%$

# Amplificatore di potenza



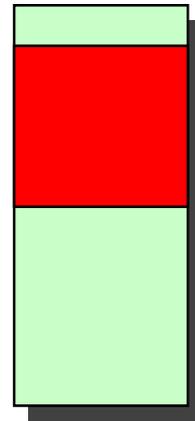
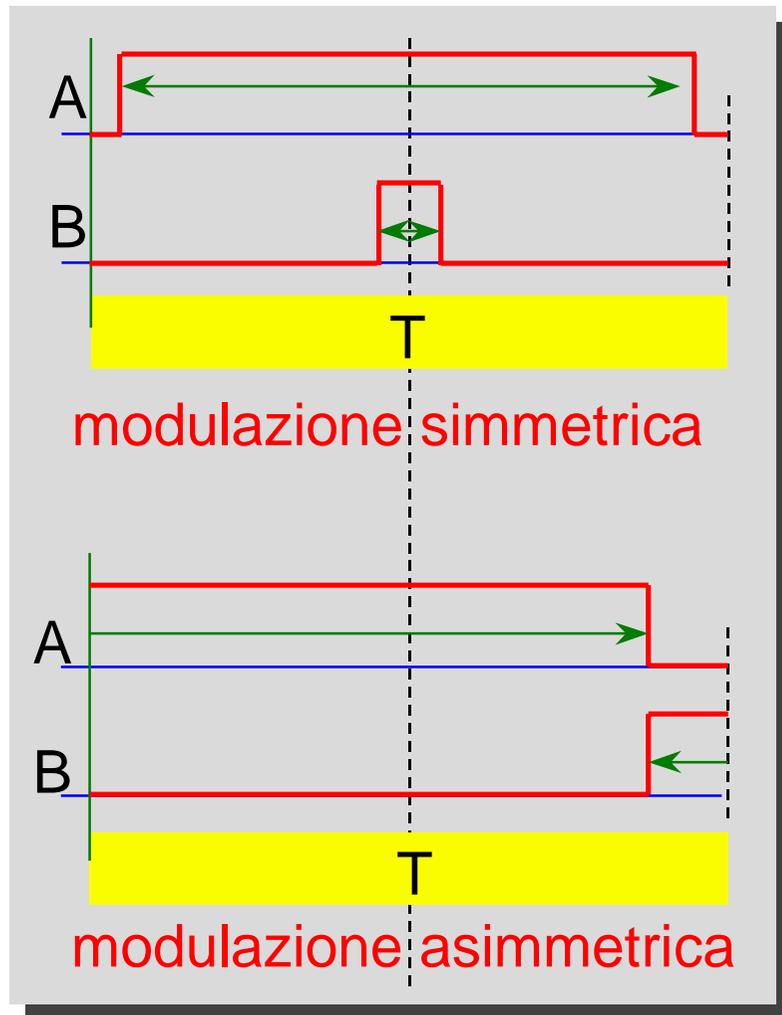
$V=+60\%$

Confronto



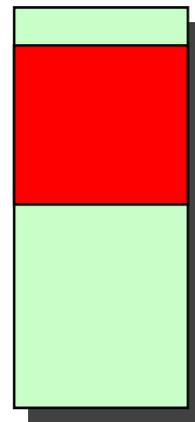
$V=+60\%$

# Amplificatore di potenza



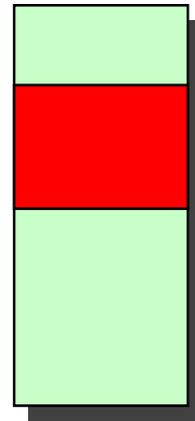
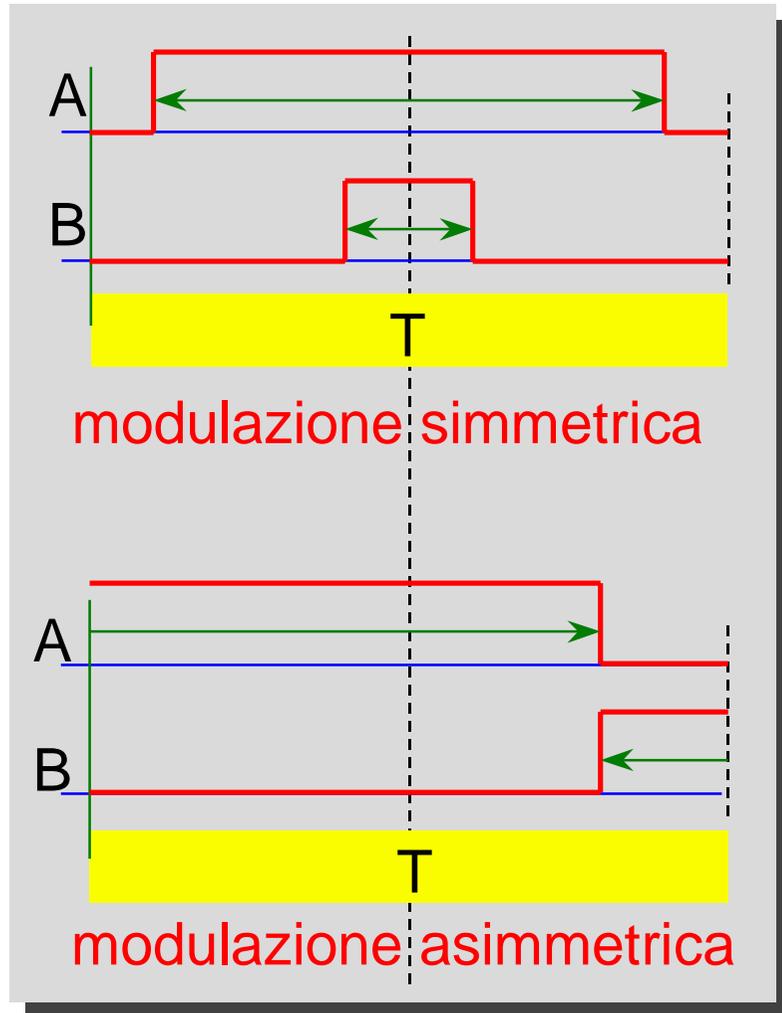
$V=+80\%$

Confronto



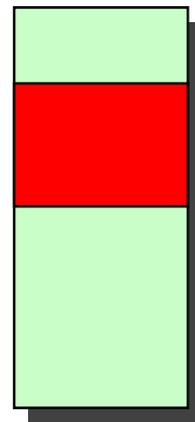
$V=+80\%$

# Amplificatore di potenza



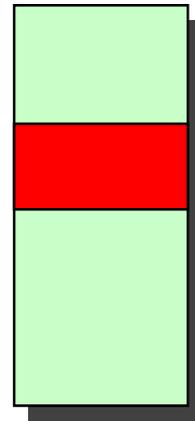
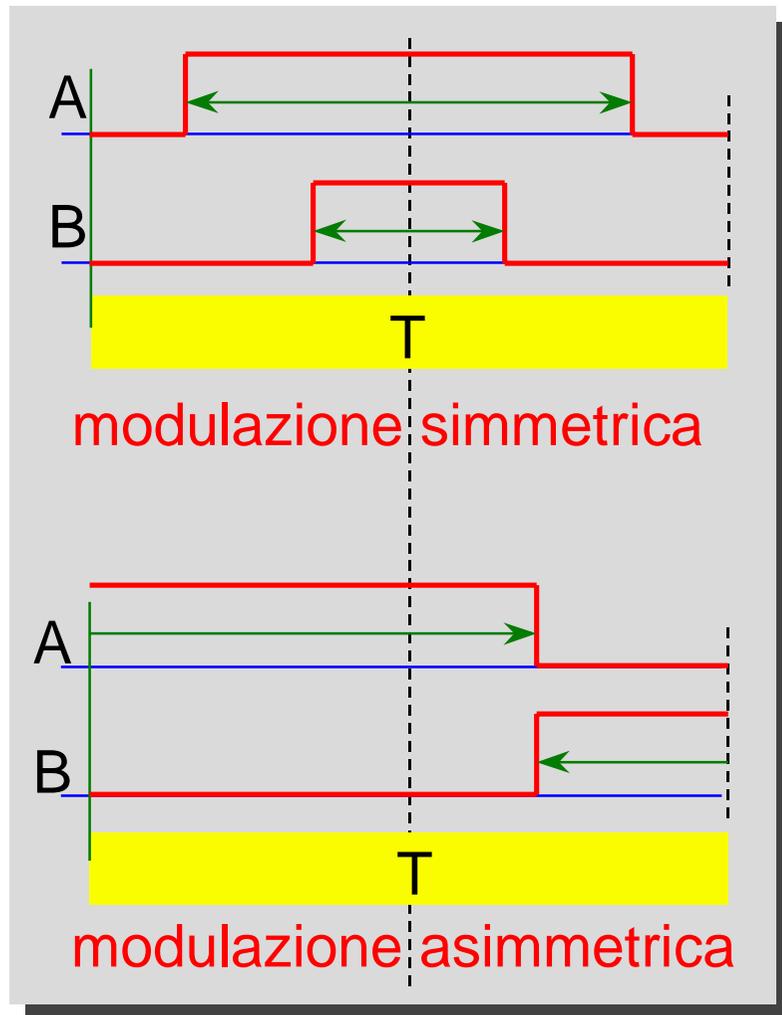
$V=+60\%$

Confronto



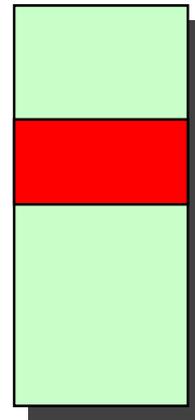
$V=+60\%$

# Amplificatore di potenza



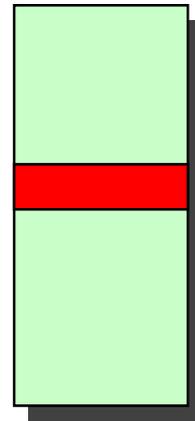
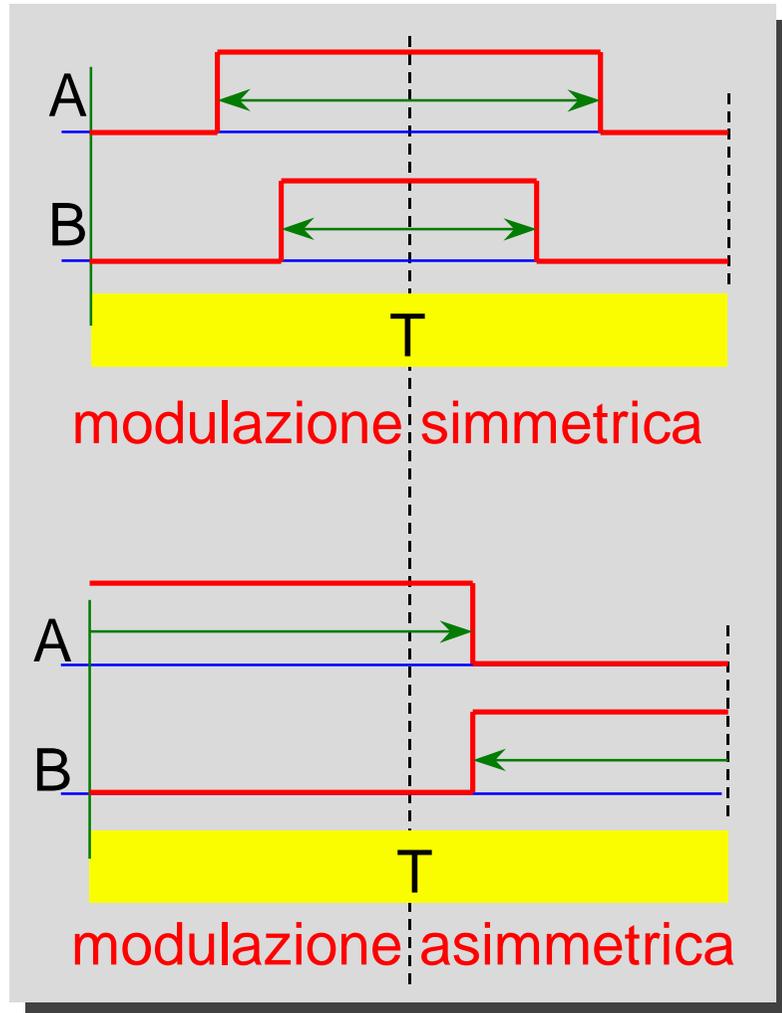
$V=+40\%$

Confronto



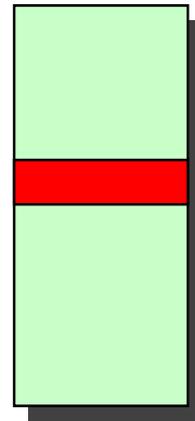
$V=+40\%$

# Amplificatore di potenza



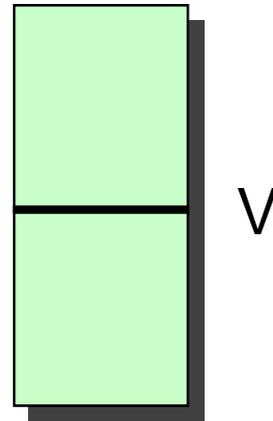
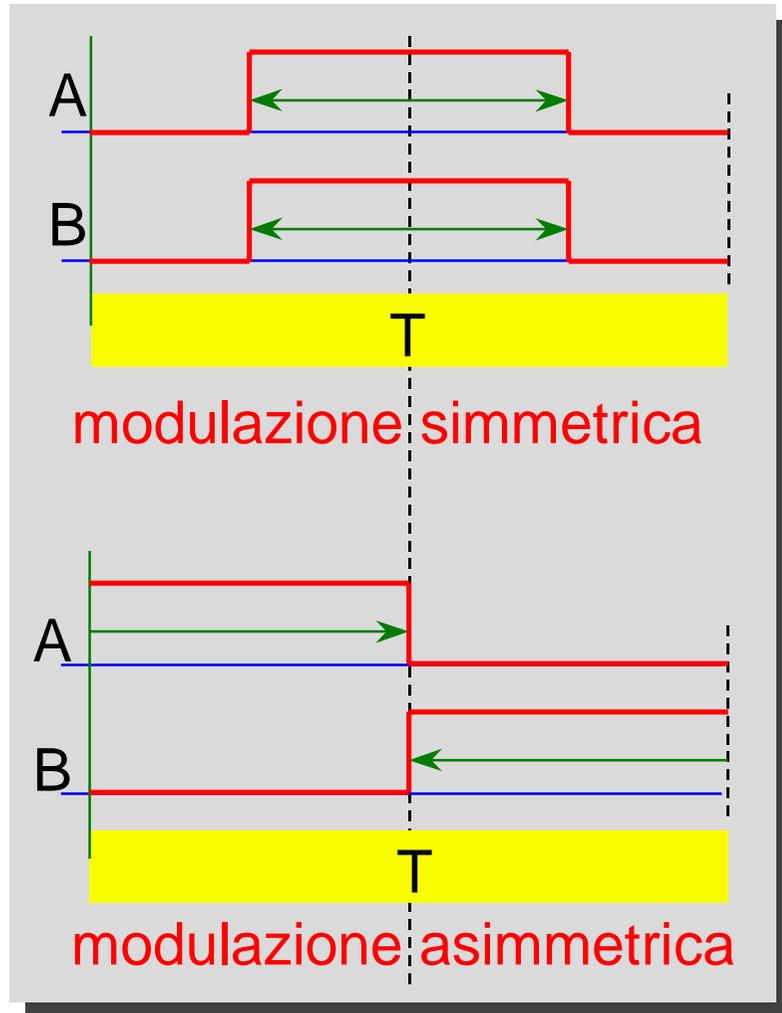
$V=+20\%$

Confronto



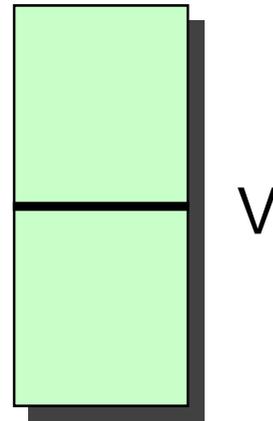
$V=+20\%$

# Amplificatore di potenza



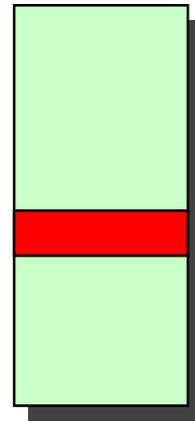
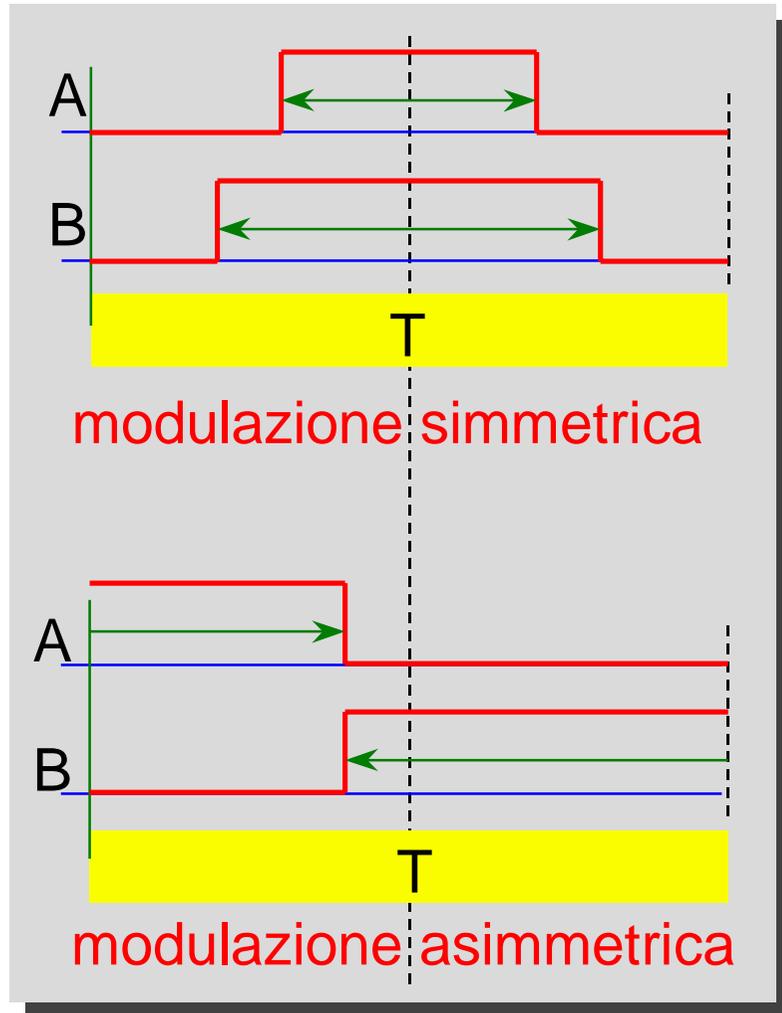
V

Confronto



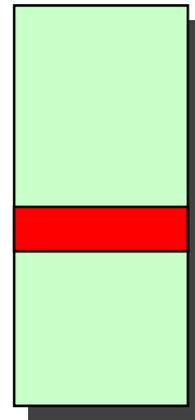
V

# Amplificatore di potenza



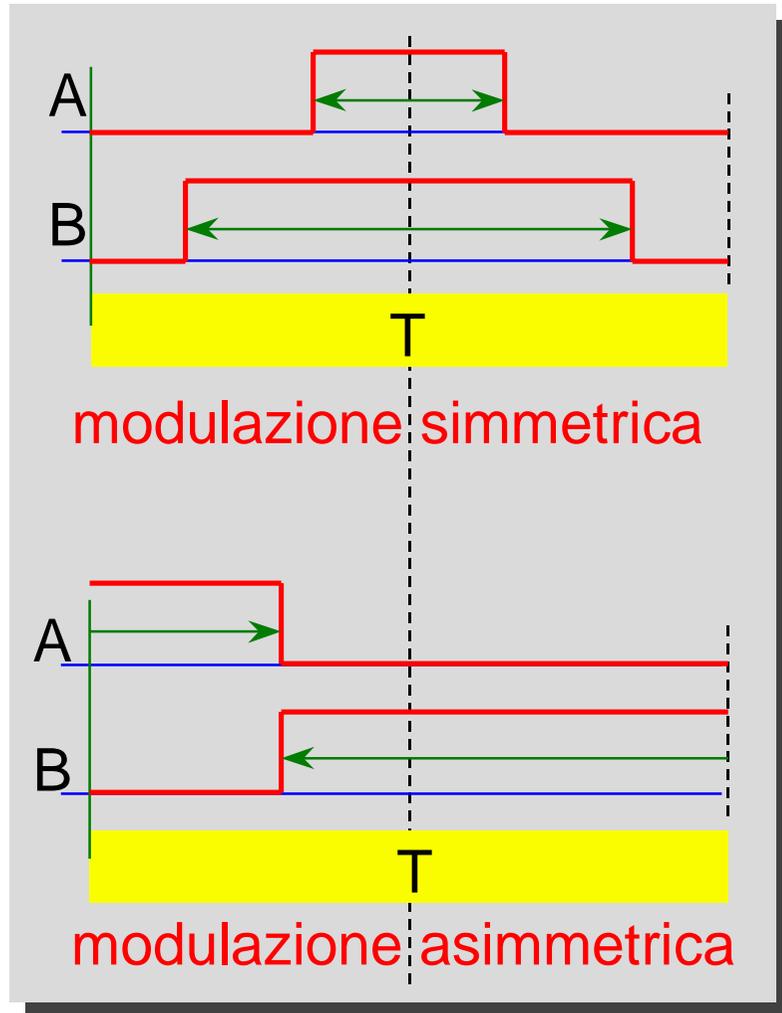
$V=-20\%$

Confronto



$V=-20\%$

# Amplificatore di potenza



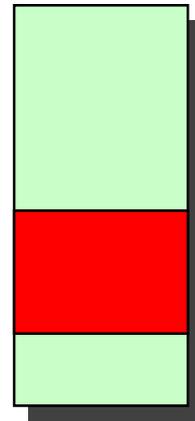
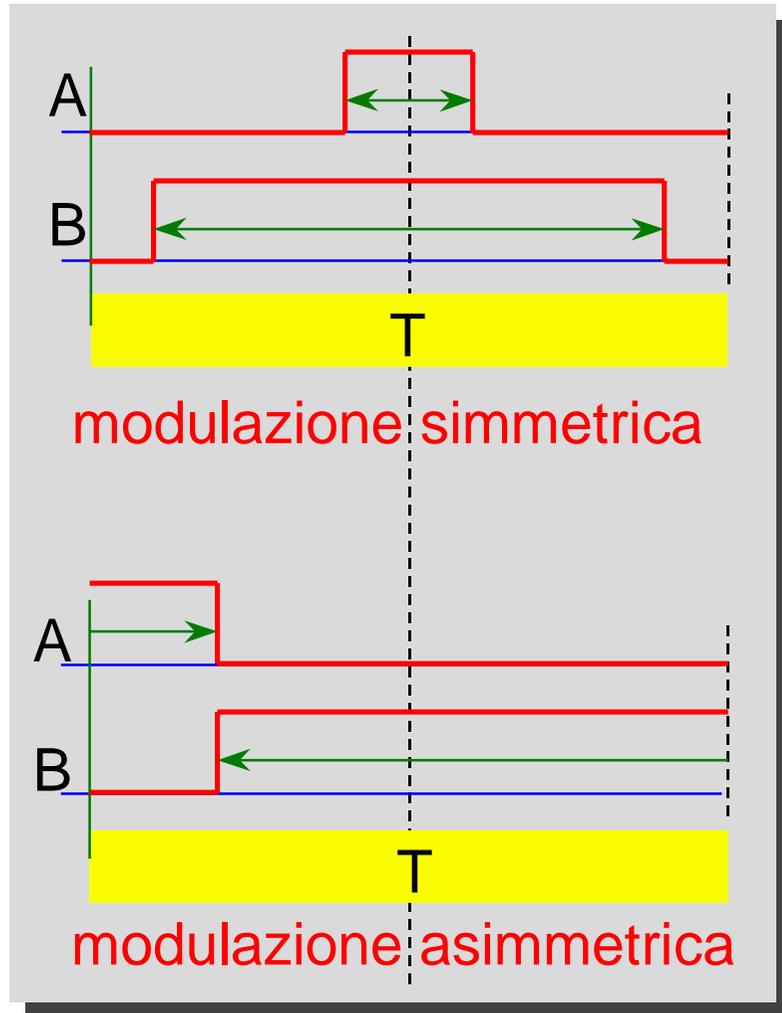
$V=-40\%$

Confronto



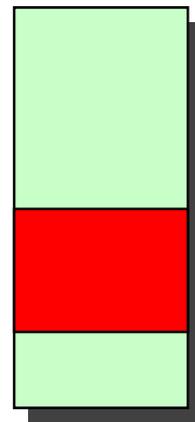
$V=-40\%$

# Amplificatore di potenza



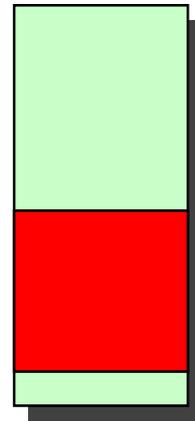
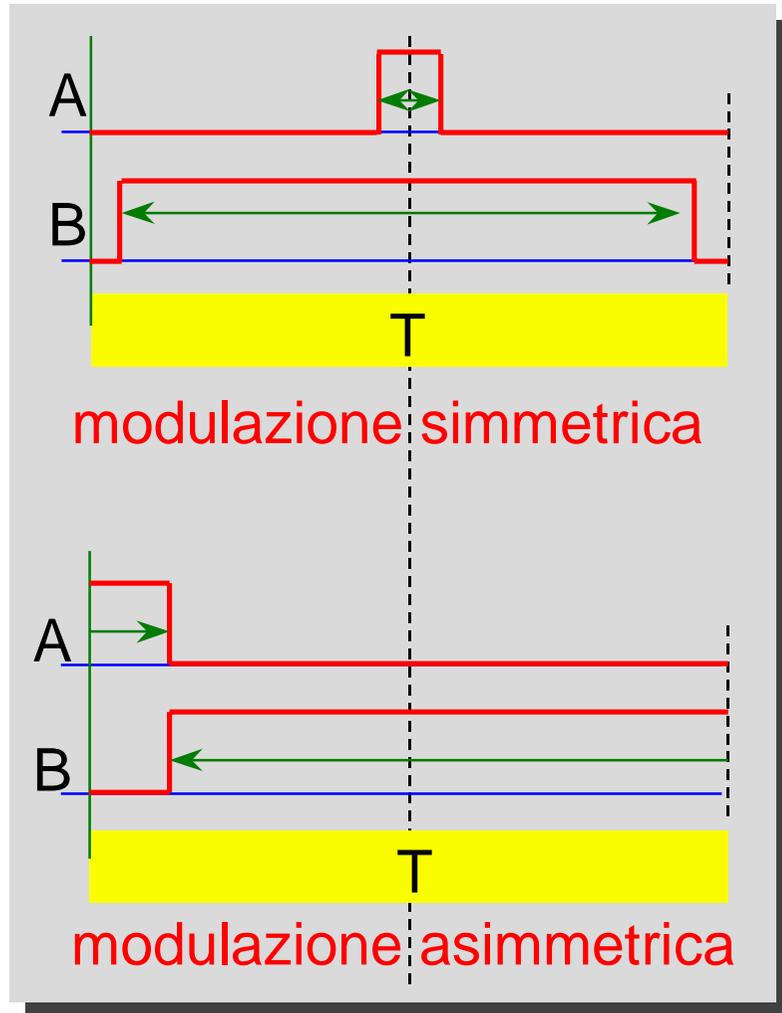
$V=-60\%$

Confronto



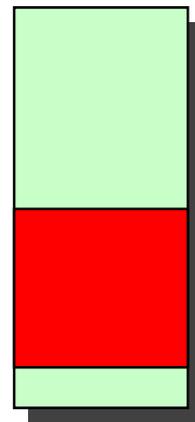
$V=-60\%$

# Amplificatore di potenza



$V=-80\%$

Confronto



$V=-80\%$

# Amplificatore di potenza

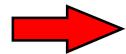


## Confronto tra le modulazioni

Esempio:

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

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



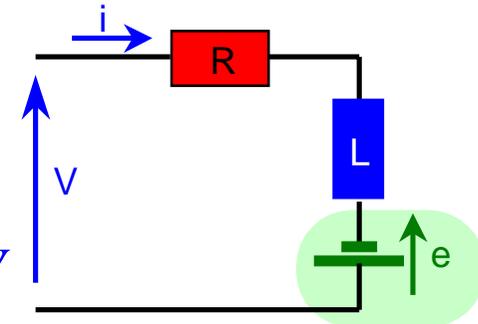
$$V = Ri + e = 1 * 10 + 50 = 60 \text{ V}$$

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

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

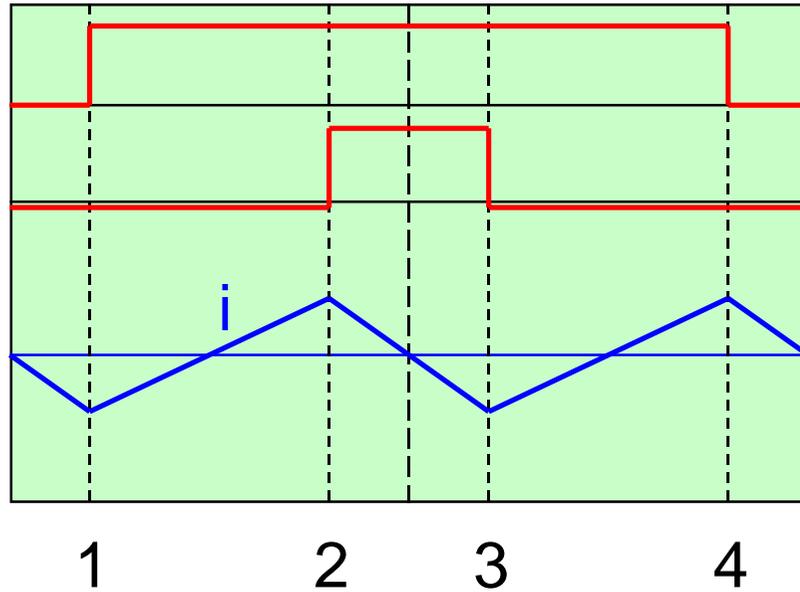
|            | $\left(\frac{di}{dt}\right)_{on}$ | $\left(\frac{di}{dt}\right)_{off}$ |
|------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| simmetrica | $-10-50+100 = 40\text{A/ms}$      | $-10-50+0 = -60\text{A/ms}$        |
| non simm.  | $-10-50+100 = 40\text{A/ms}$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

e ed E si sommano

# Amplificatore di potenza



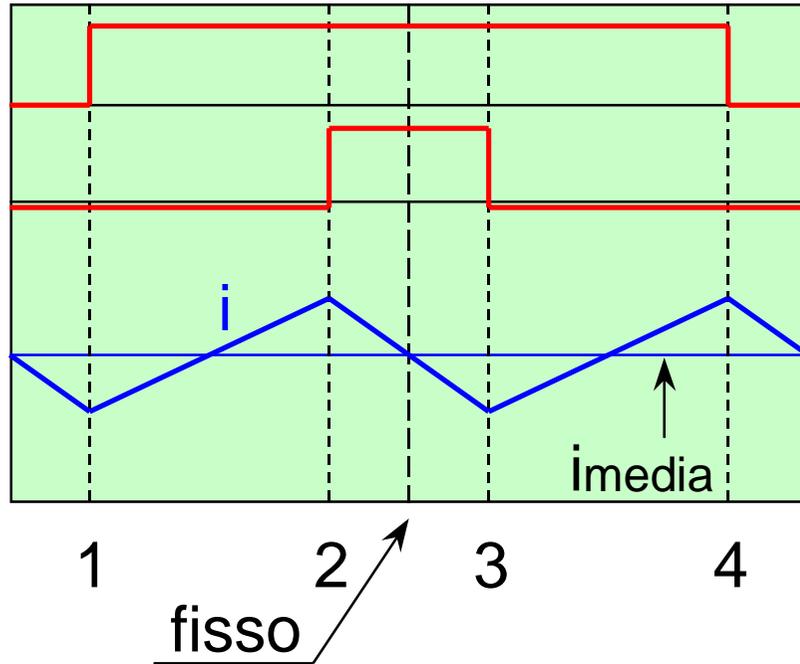
## Confronto tra modulazioni



# Amplificatore di potenza



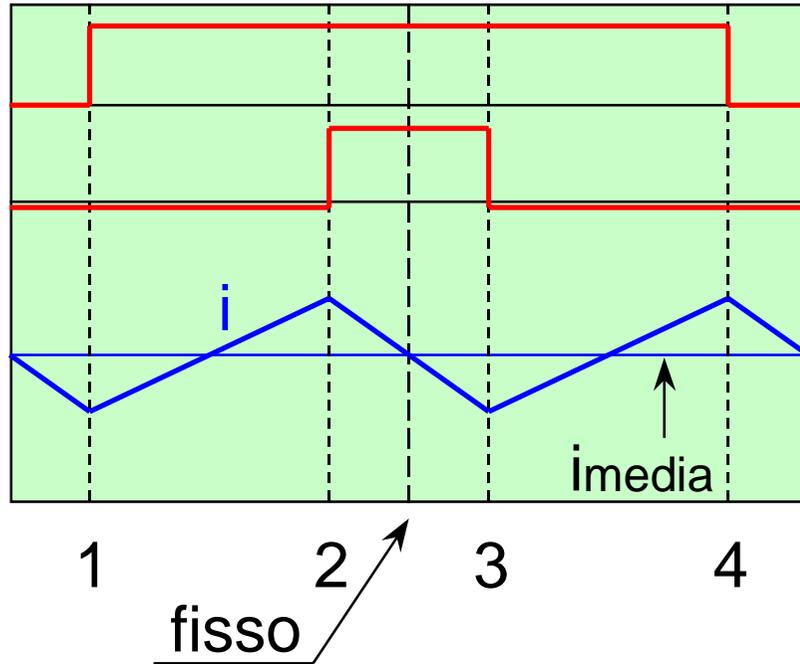
## Confronto tra modulazioni



# Amplificatore di potenza



## Confronto tra modulazioni

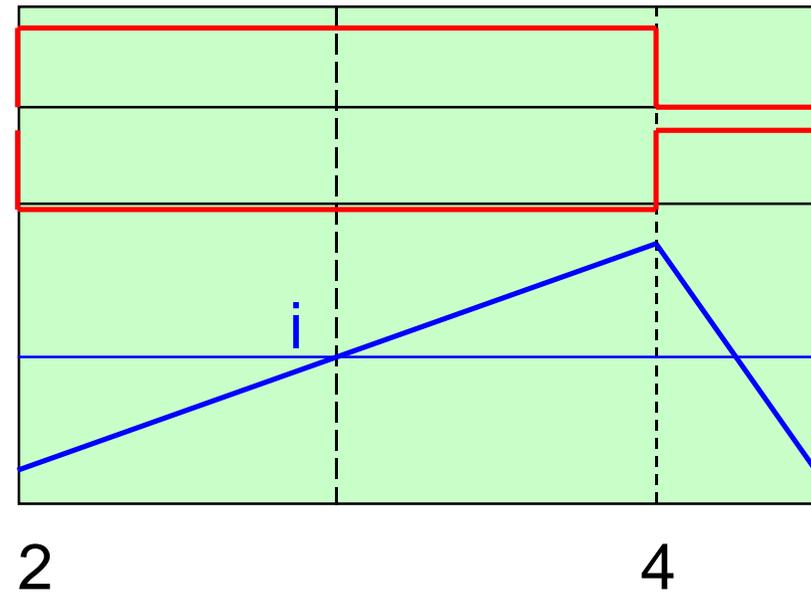
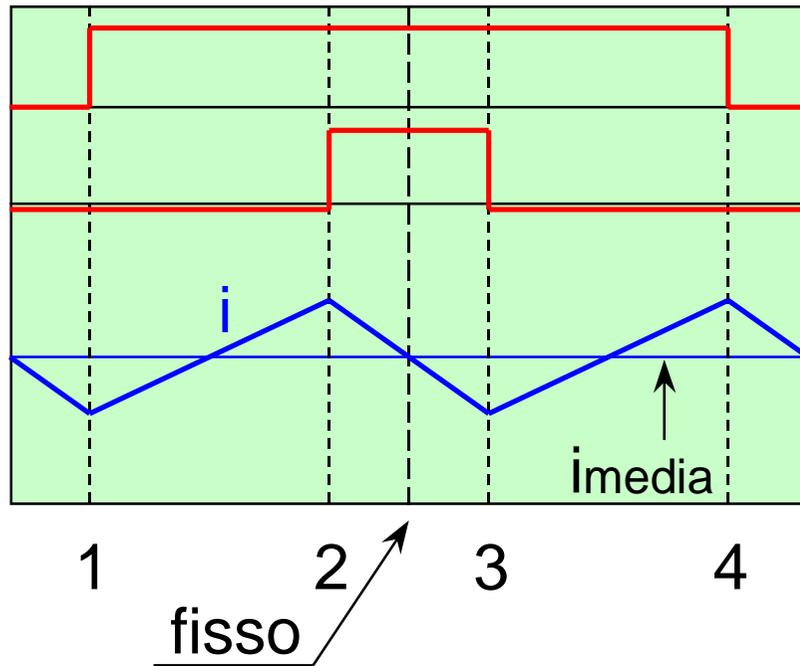


ripple dimezzato  
punto di simmetria delle  
correnti fisso  
più complessa

# Amplificatore di potenza



## Confronto tra modulazioni

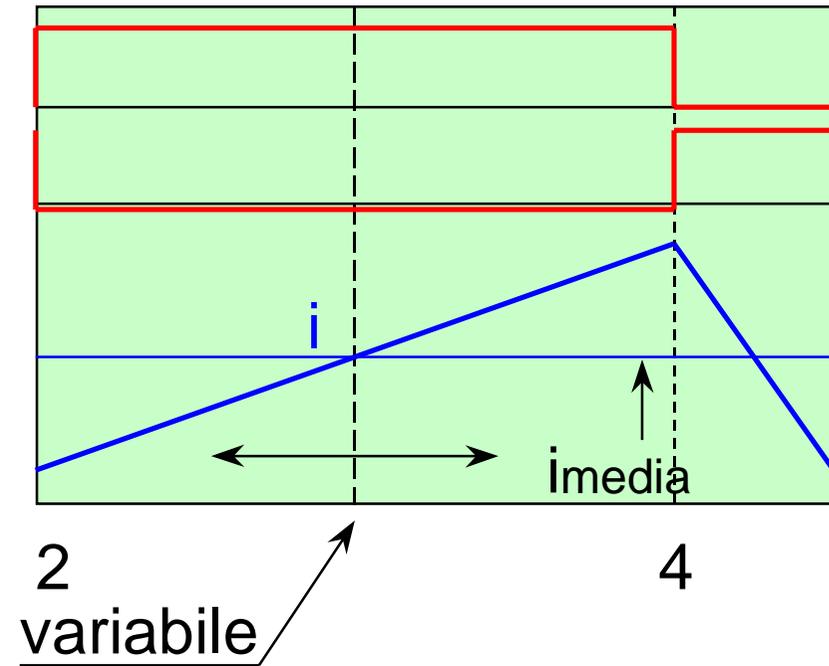
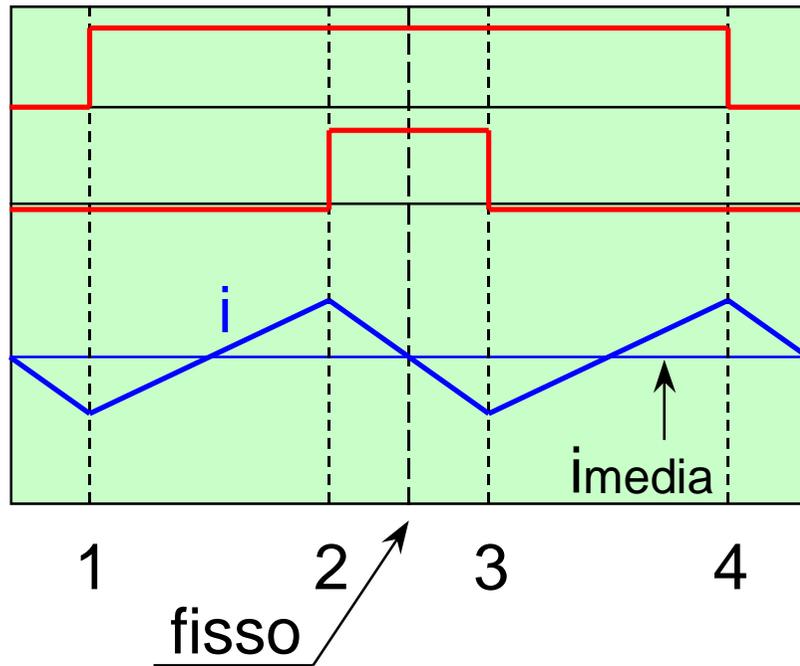


ripple dimezzato  
punto di simmetria delle  
correnti fisso  
più complessa

# Amplificatore di potenza



## Confronto tra modulazioni

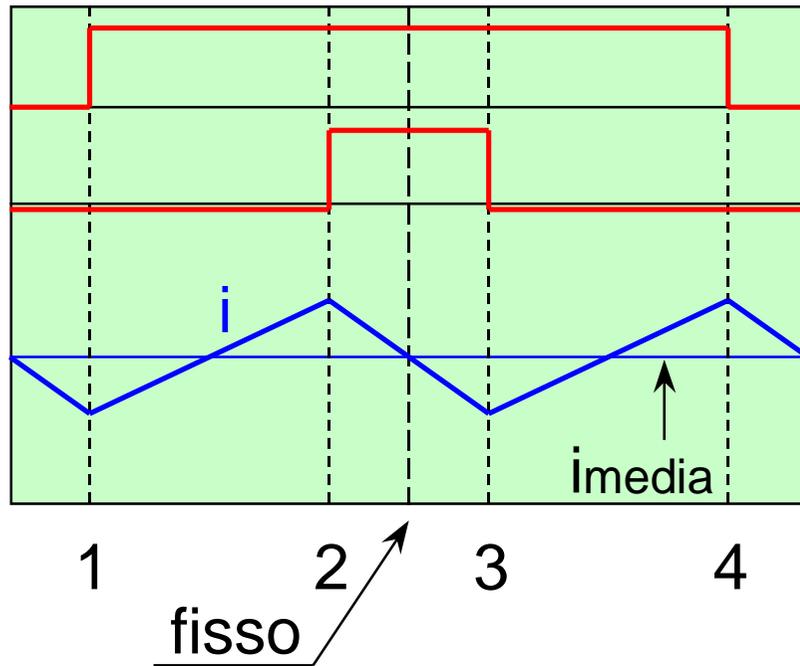


ripple dimezzato  
punto di simmetria delle  
correnti fisso  
più complessa

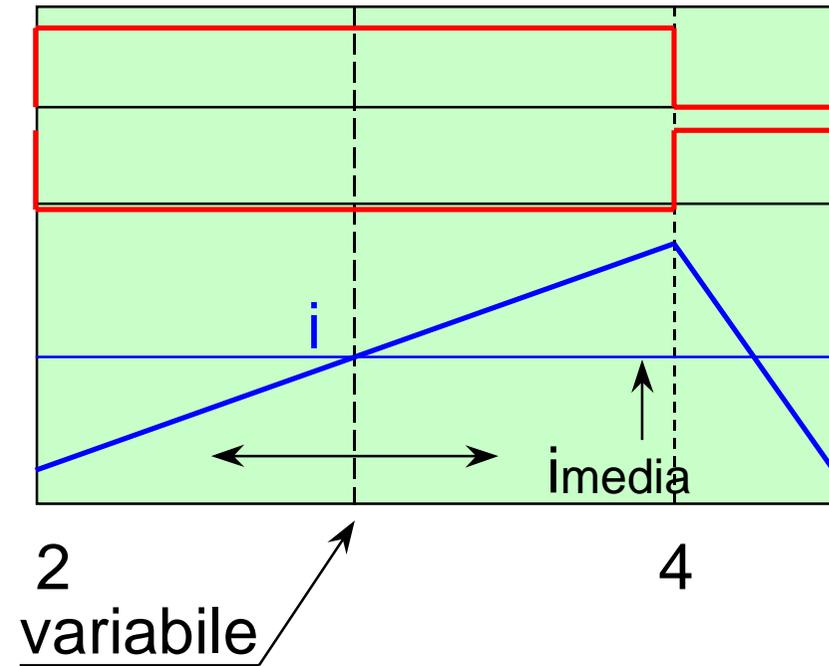
# Amplificatore di potenza



## Confronto tra modulazioni

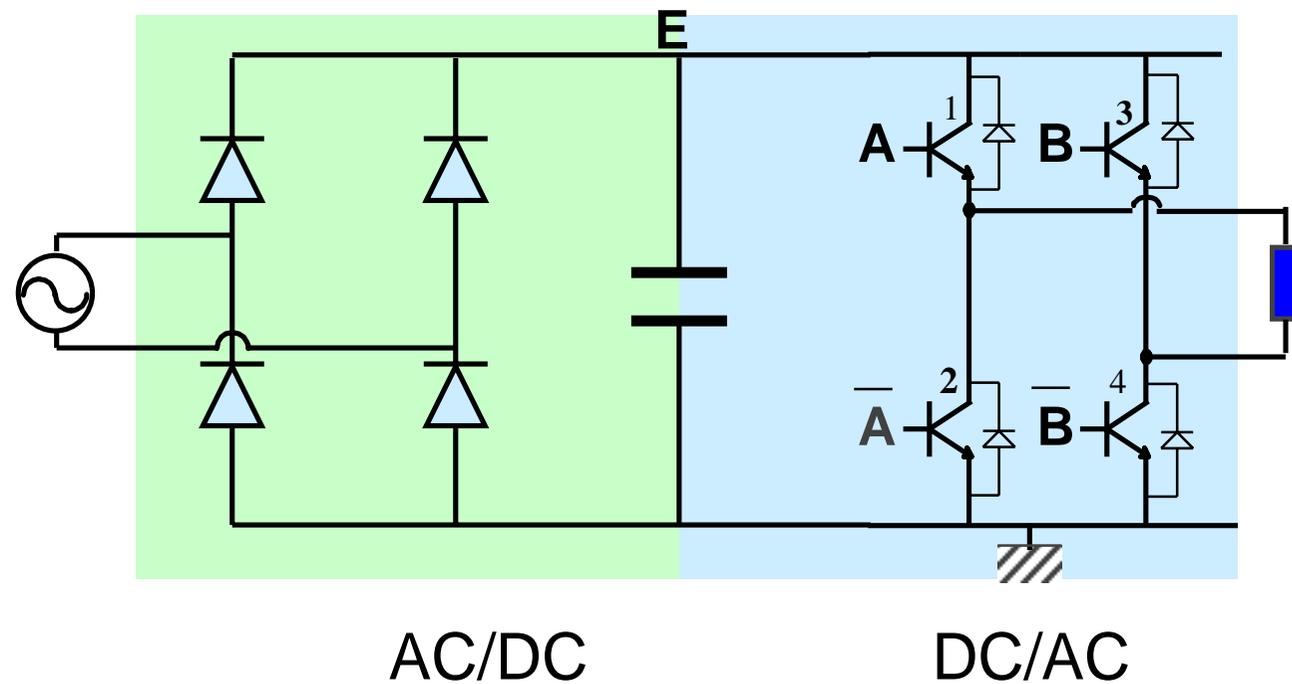


ripple dimezzato  
punto di simmetria delle  
correnti fisso  
più complessa

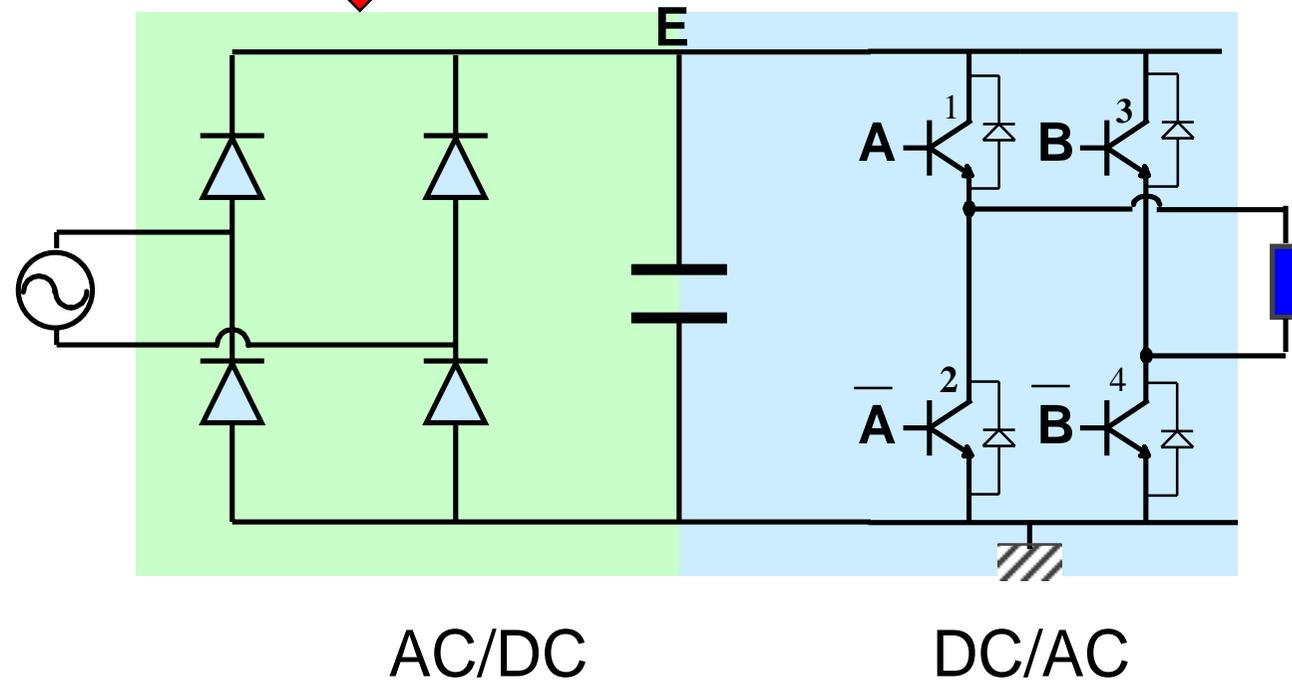
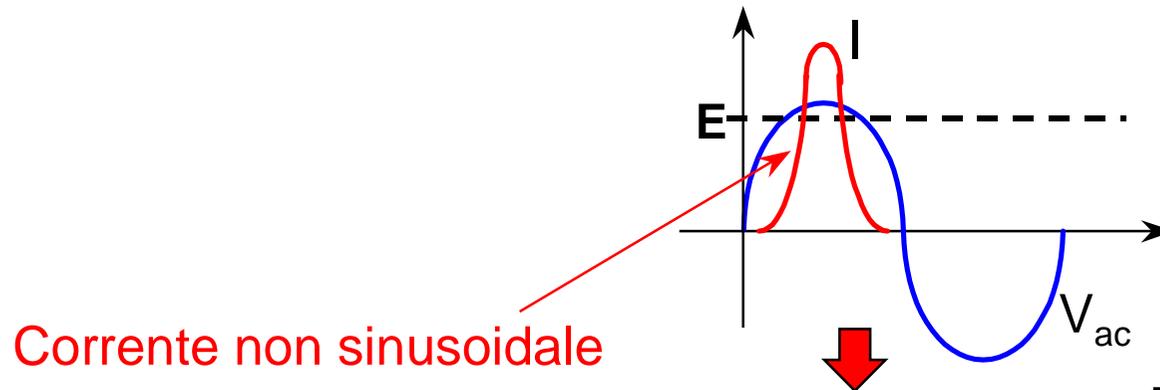


ripple doppio  
punto di simmetria delle  
correnti variabile  
più semplice da realizzare

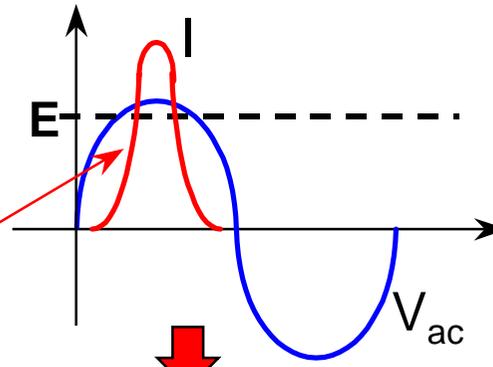
# Struttura completa del Convertitore di Potenza



# Struttura completa del Convertitore di Potenza



# Struttura completa del Convertitore di Potenza



Corrente non sinusoidale

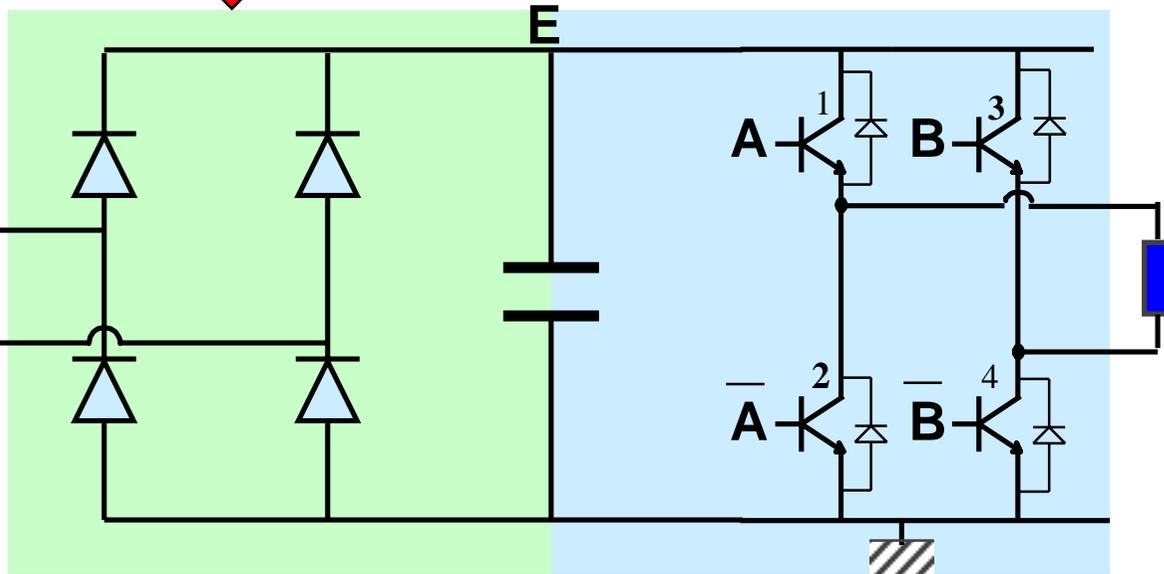


distorsione armonica  
sulla rete



Problemi:

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



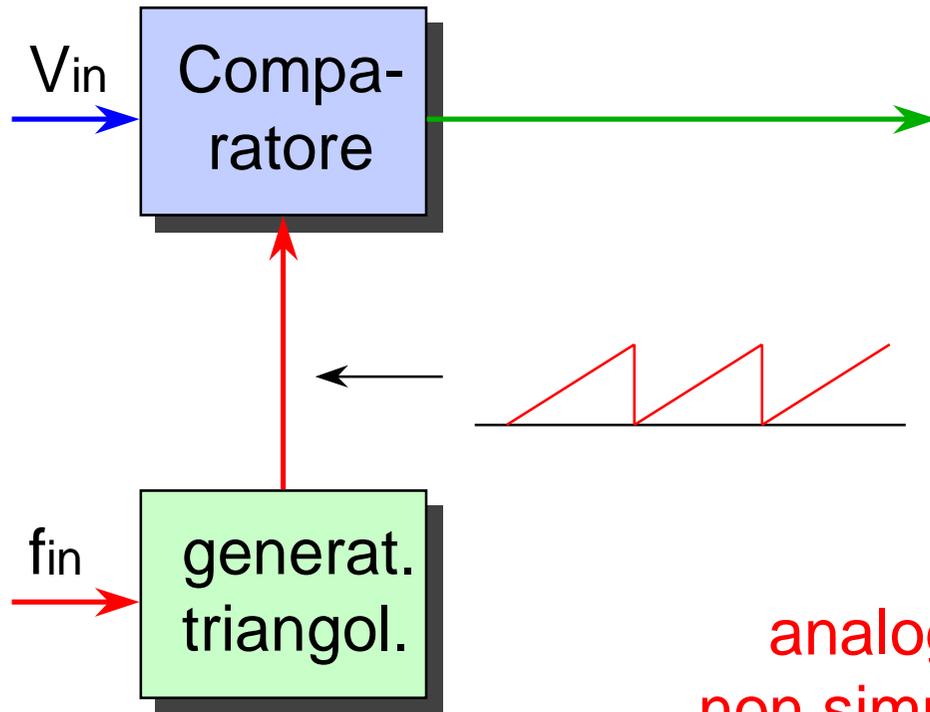
AC/DC

DC/AC

# Amplificatore di potenza



## Schemi concettuali di modulatori

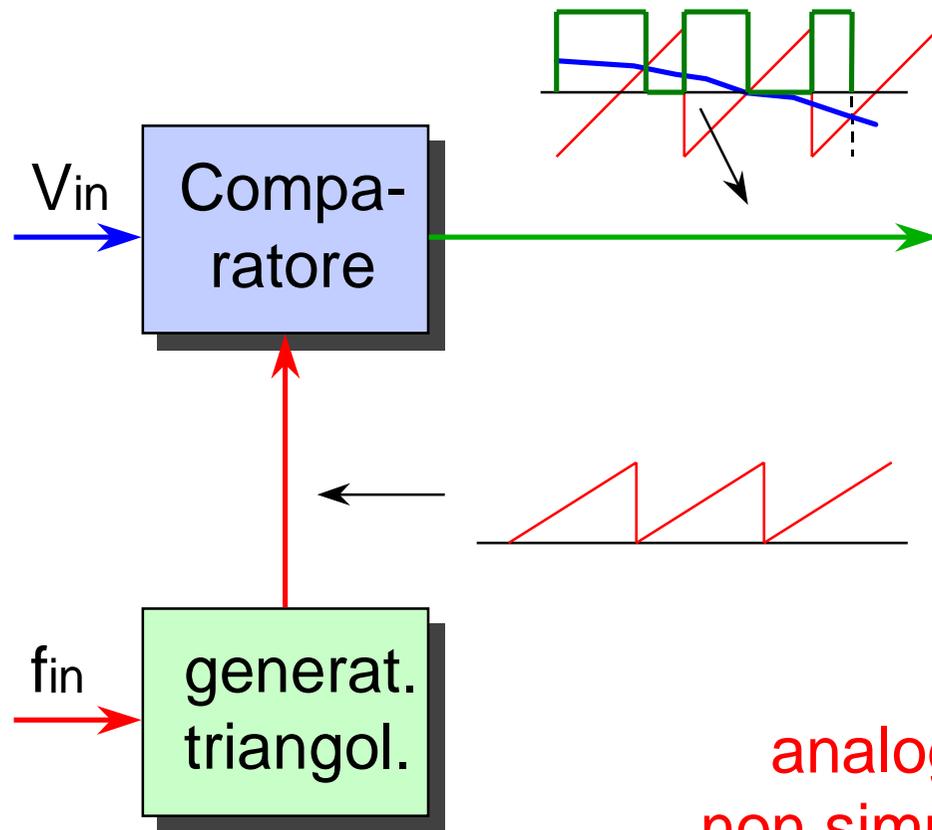


analogico  
non simmetrico

# Amplificatore di potenza



## Schemi concettuali di modulatori

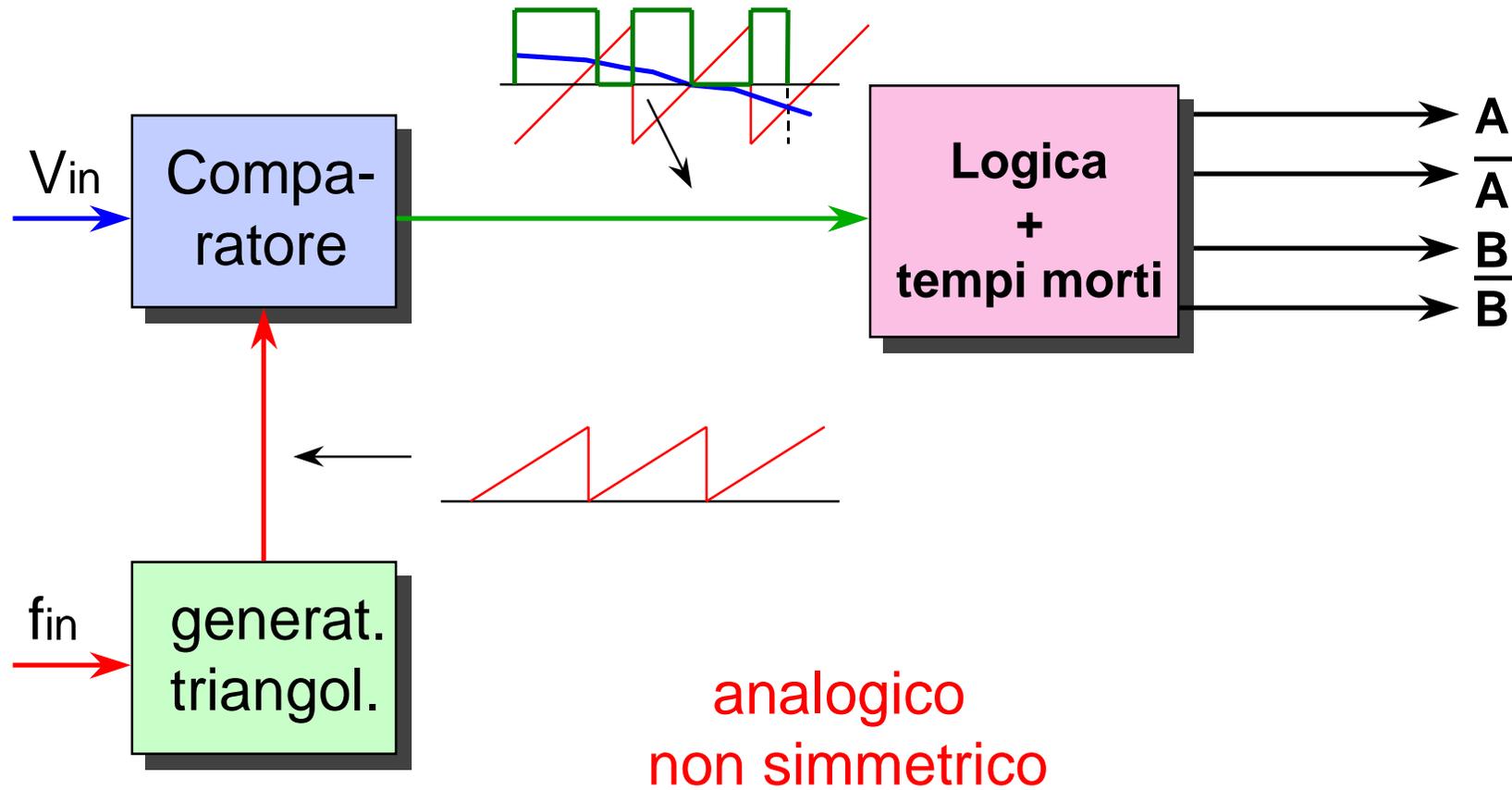


analogico  
non simmetrico

# Amplificatore di potenza



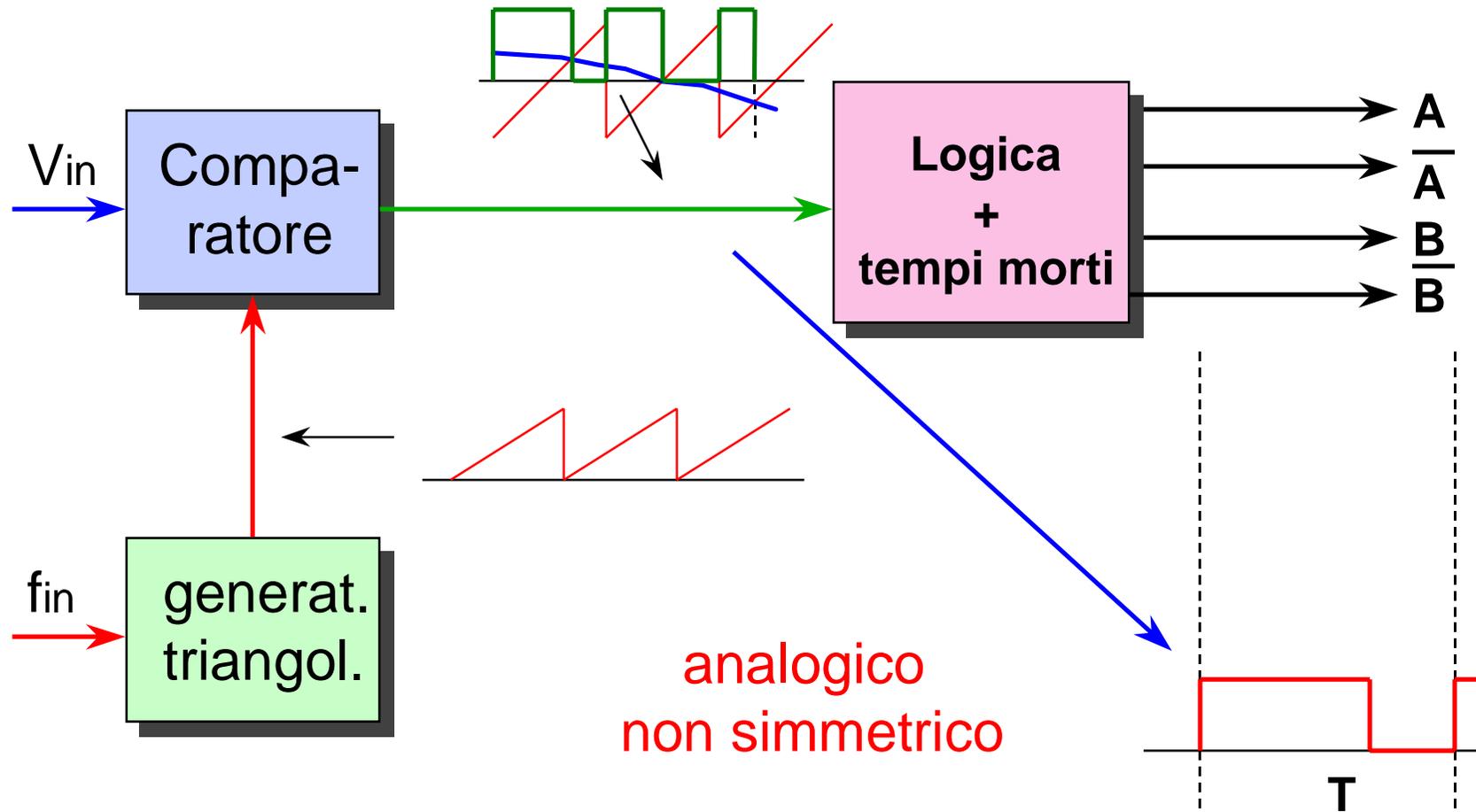
## Schemi concettuali di modulatori



# Amplificatore di potenza



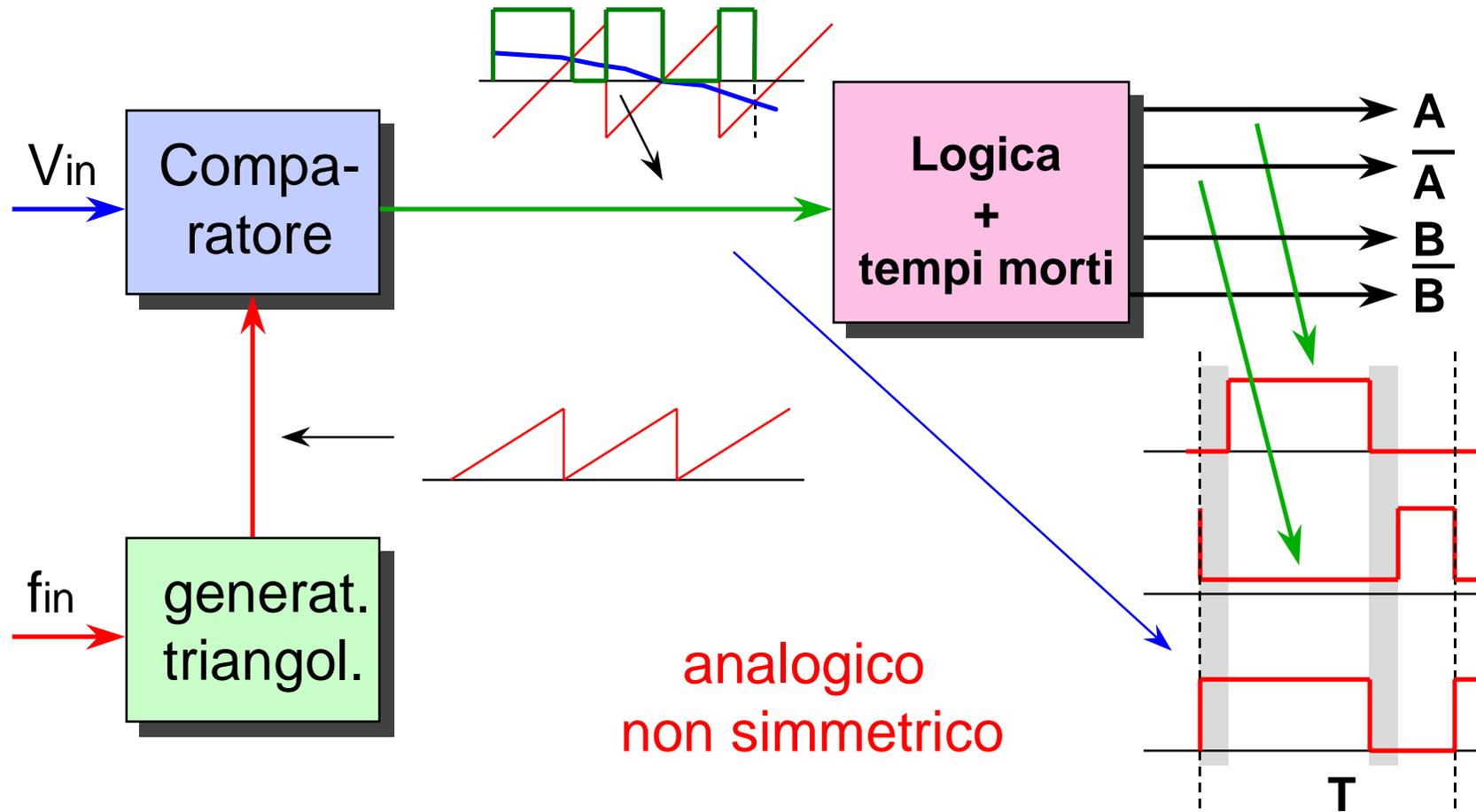
## Schemi concettuali di modulatori



# Amplificatore di potenza



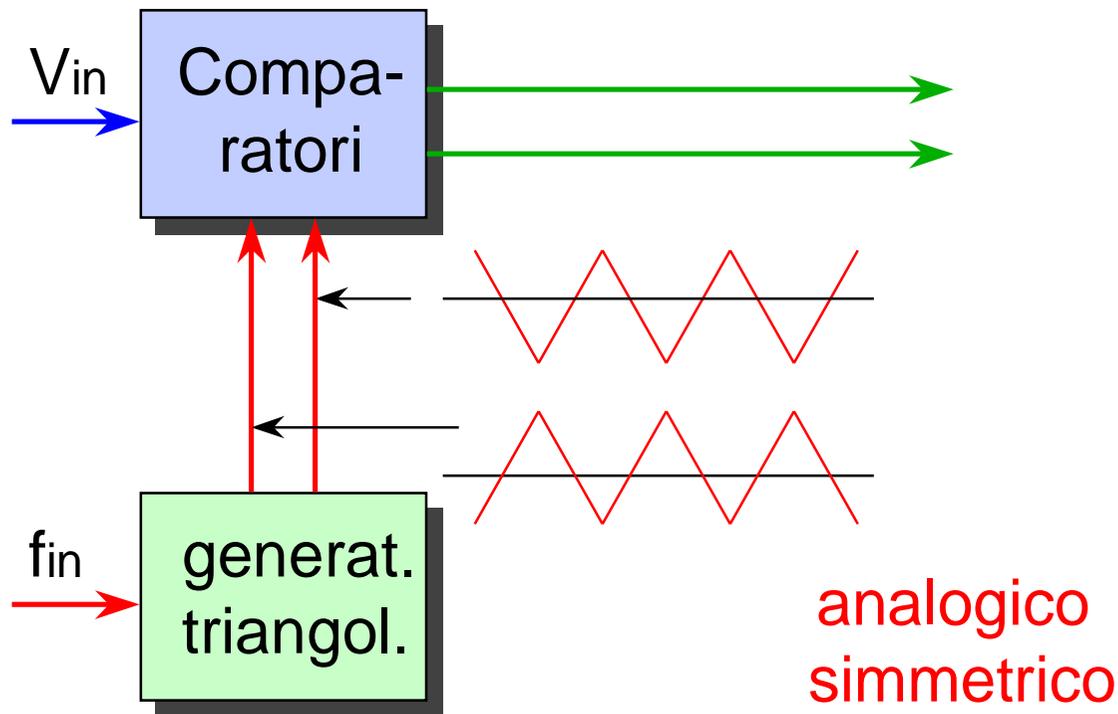
## Schemi concettuali di modulatori



# Amplificatore di potenza



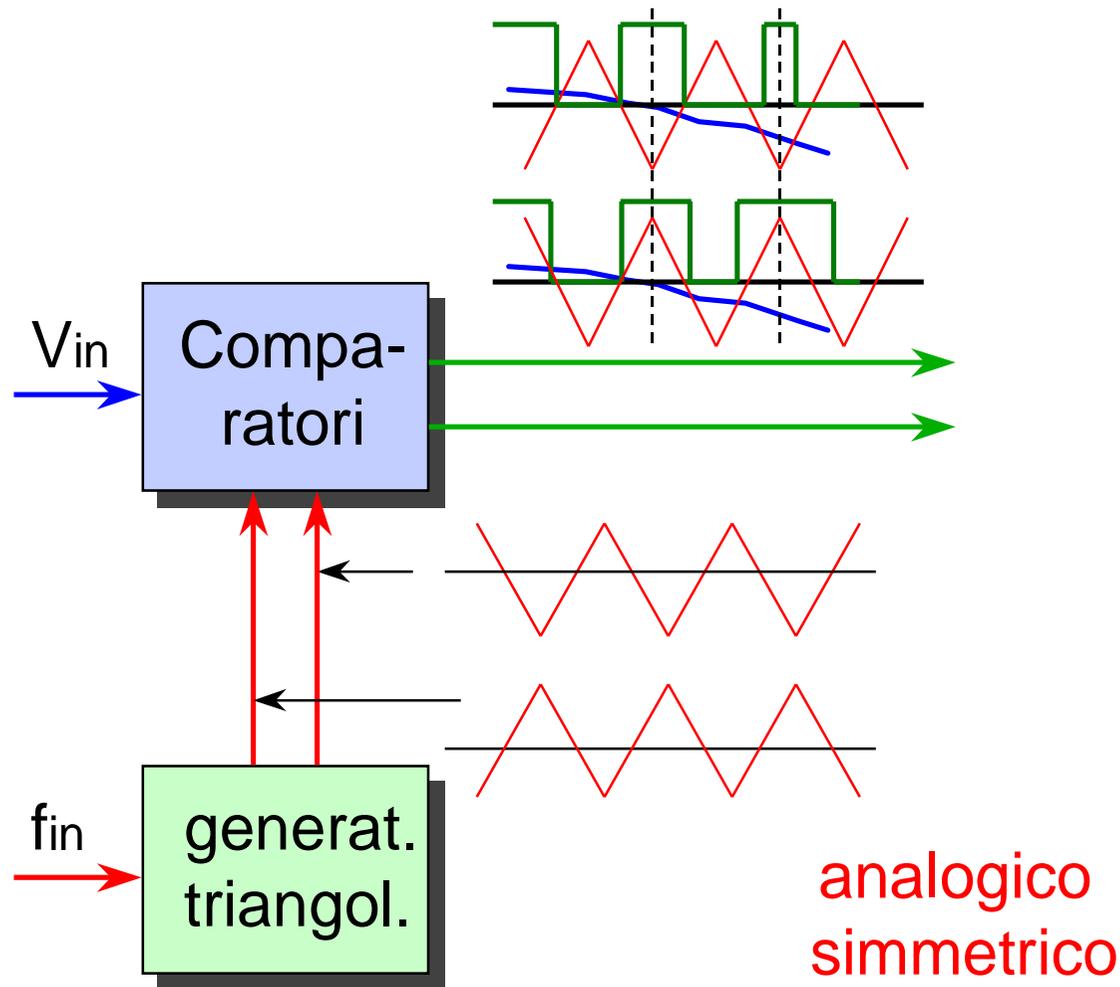
## Schemi concettuali di modulatori



# Amplificatore di potenza



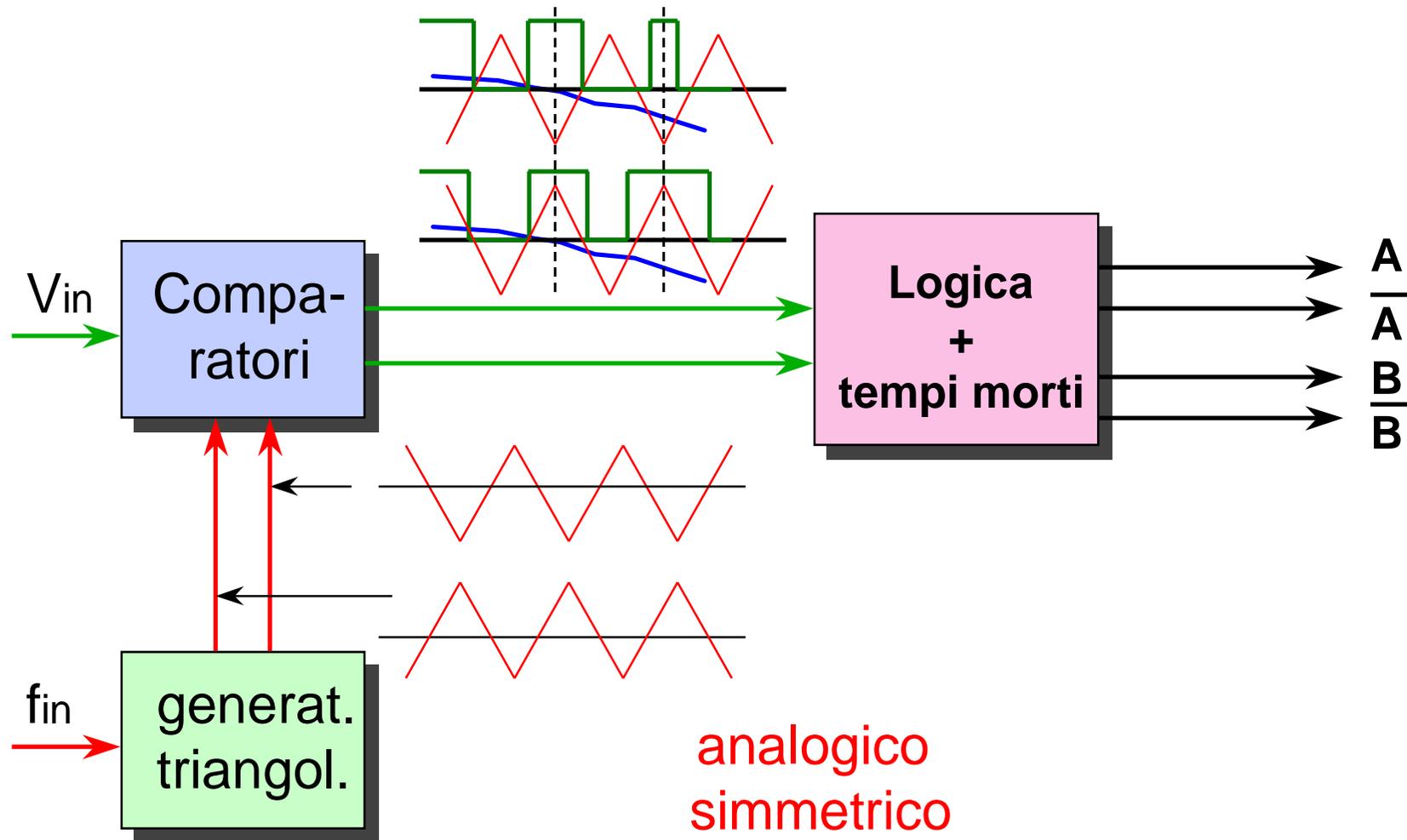
## Schemi concettuali di modulatori



# Amplificatore di potenza



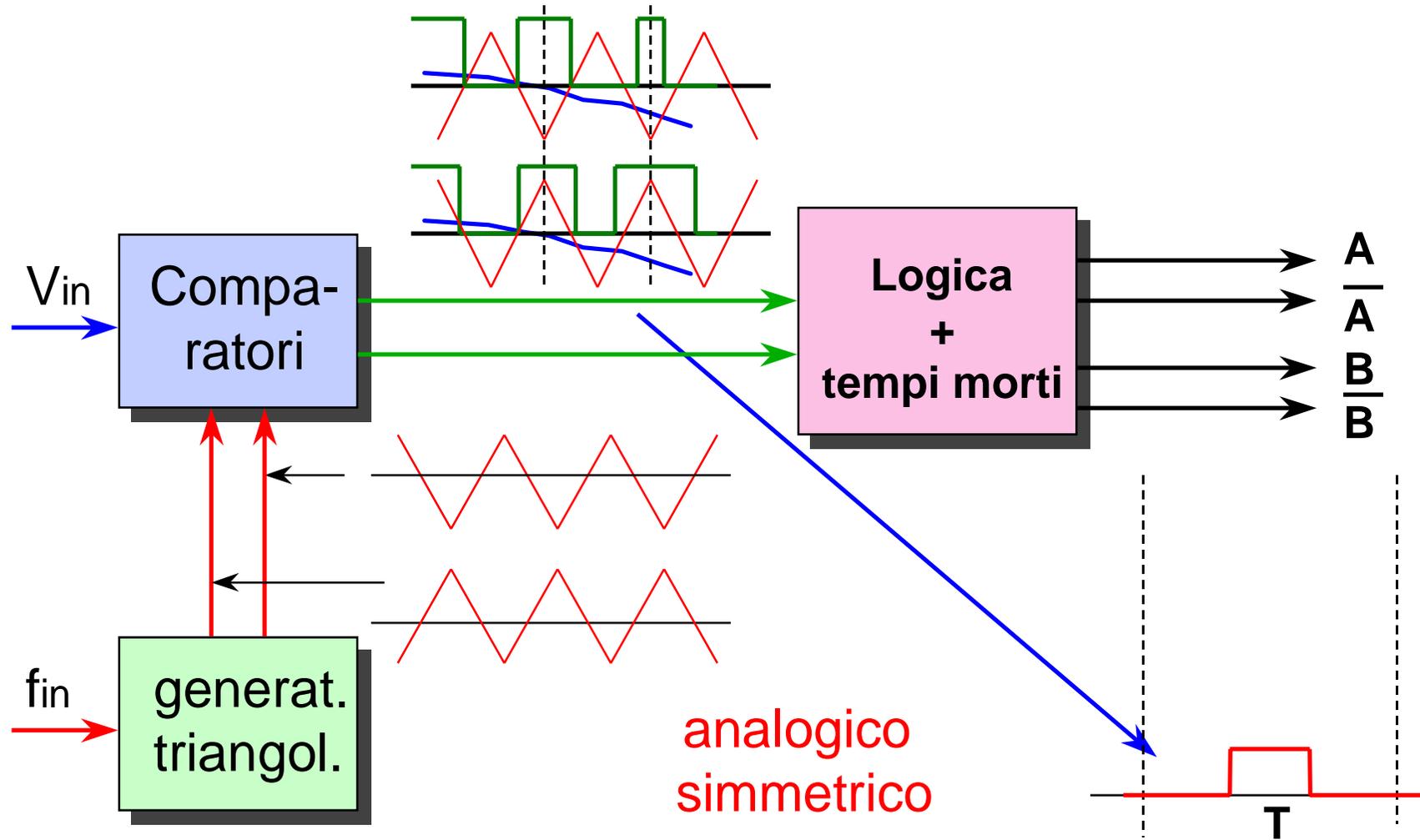
## Schemi concettuali di modulatori



# Amplificatore di potenza



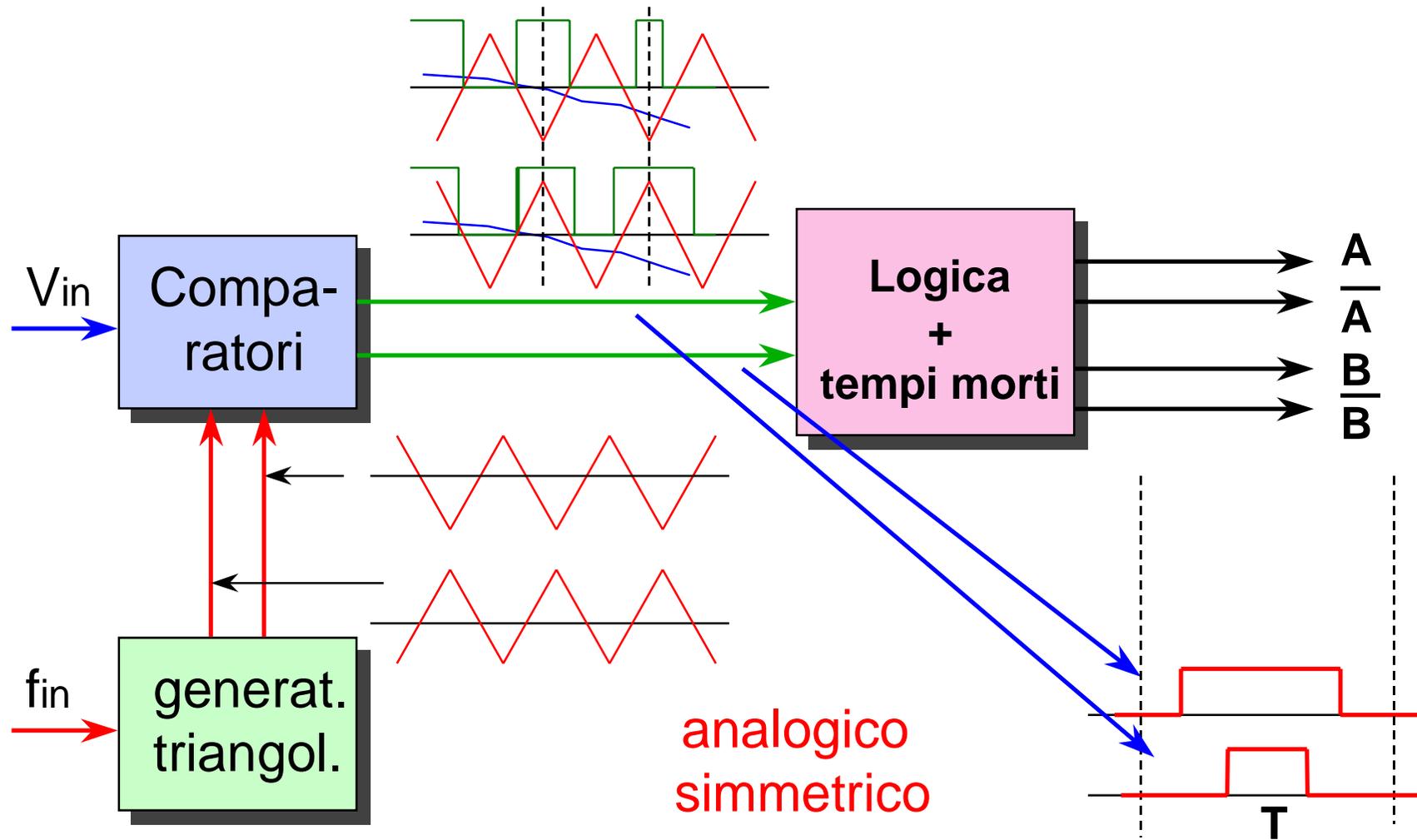
## Schemi concettuali di modulatori



# Amplificatore di potenza



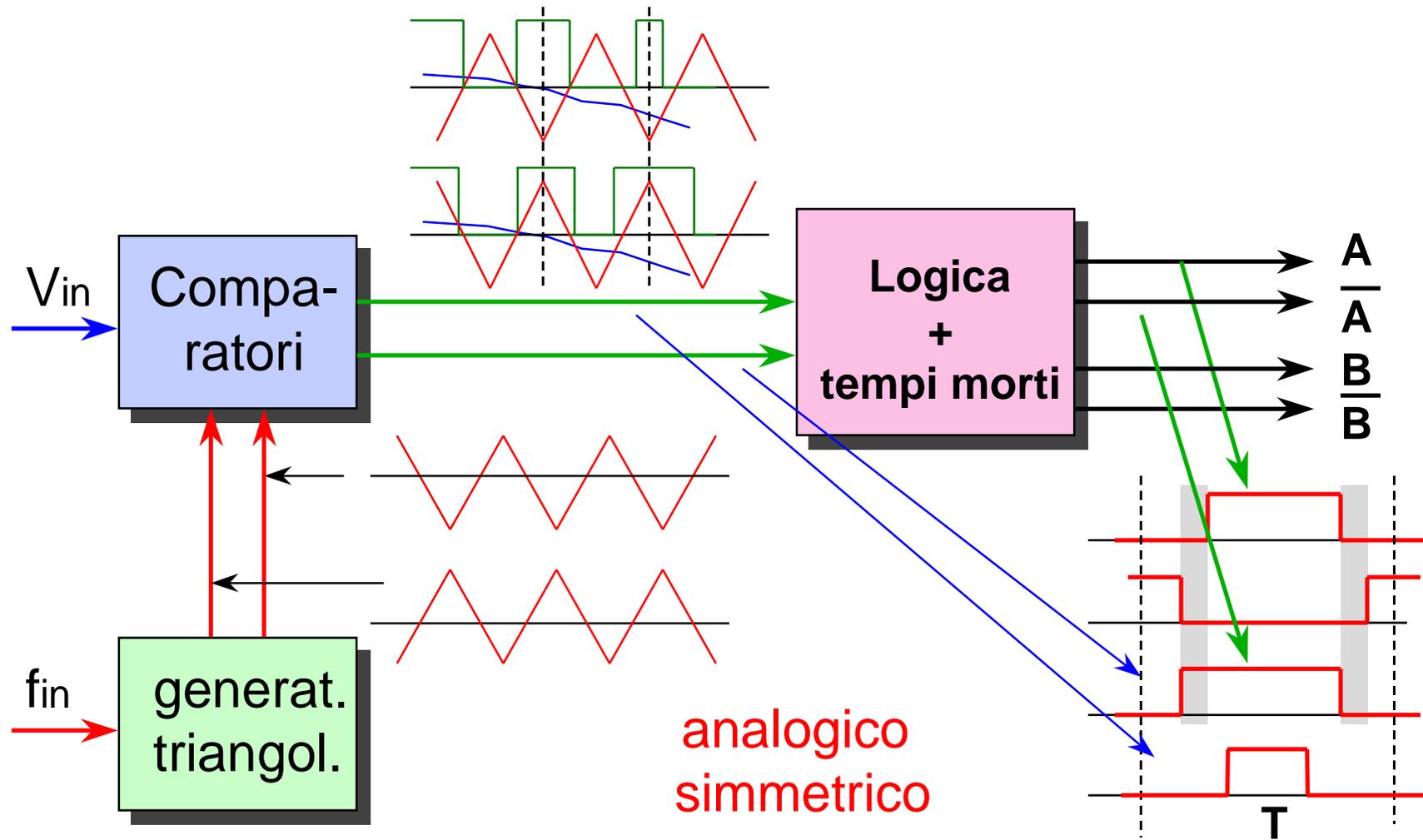
## Schemi concettuali di modulatori



# Amplificatore di potenza



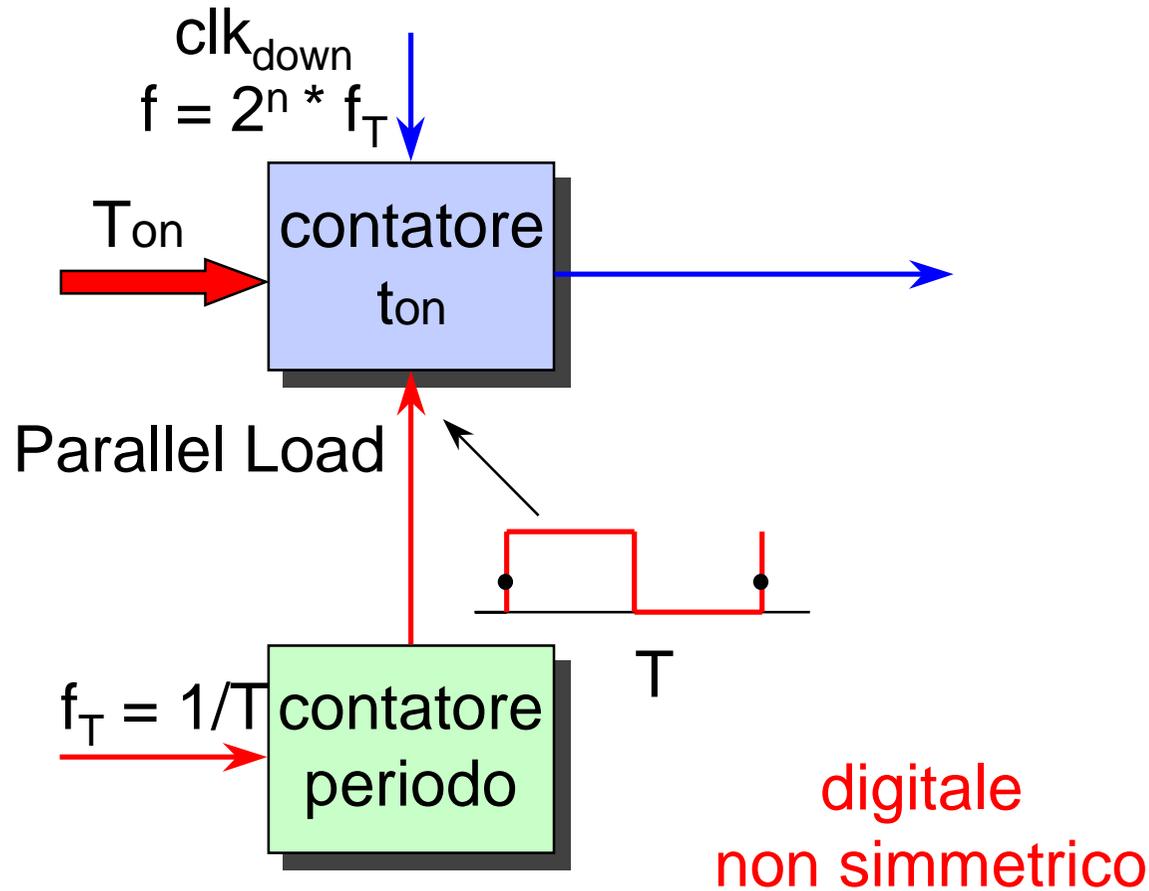
## Schemi concettuali di modulatori



# Amplificatore di potenza



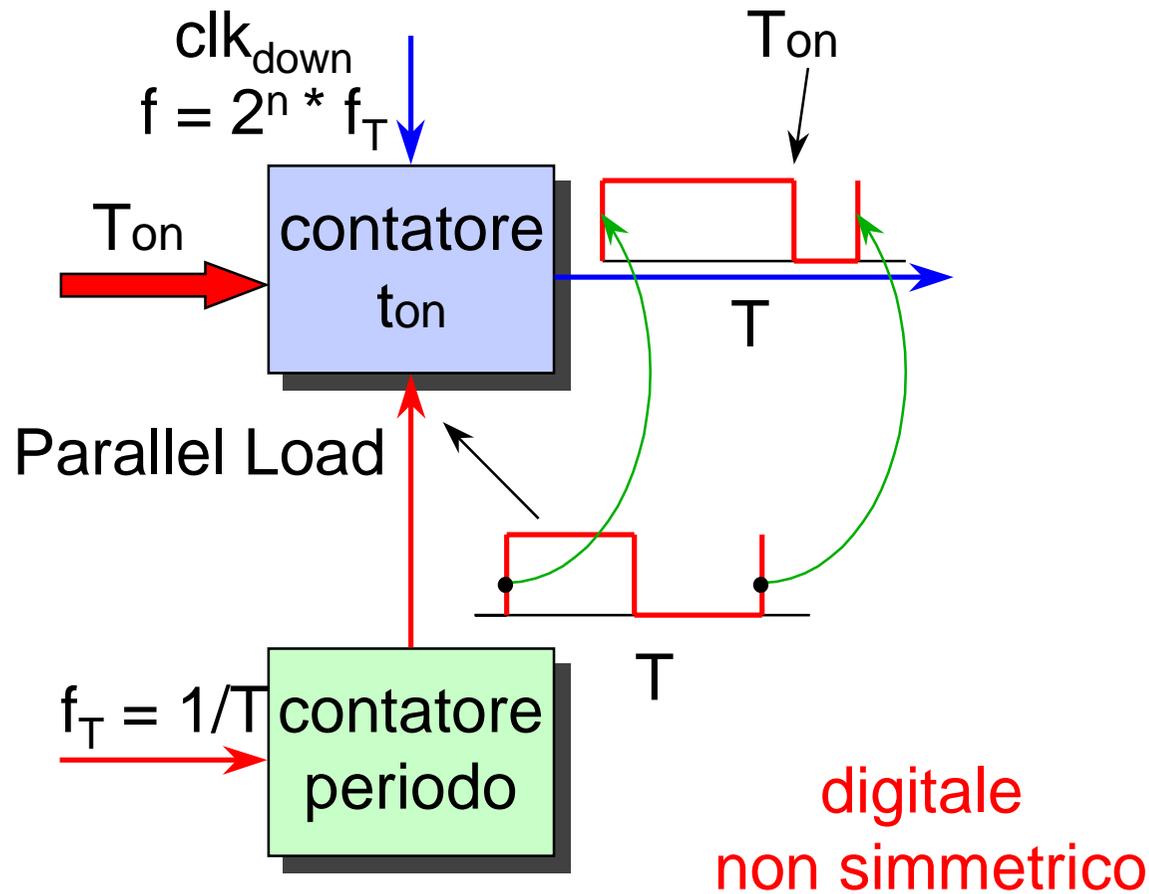
## Schemi concettuali di modulatori



# Amplificatore di potenza



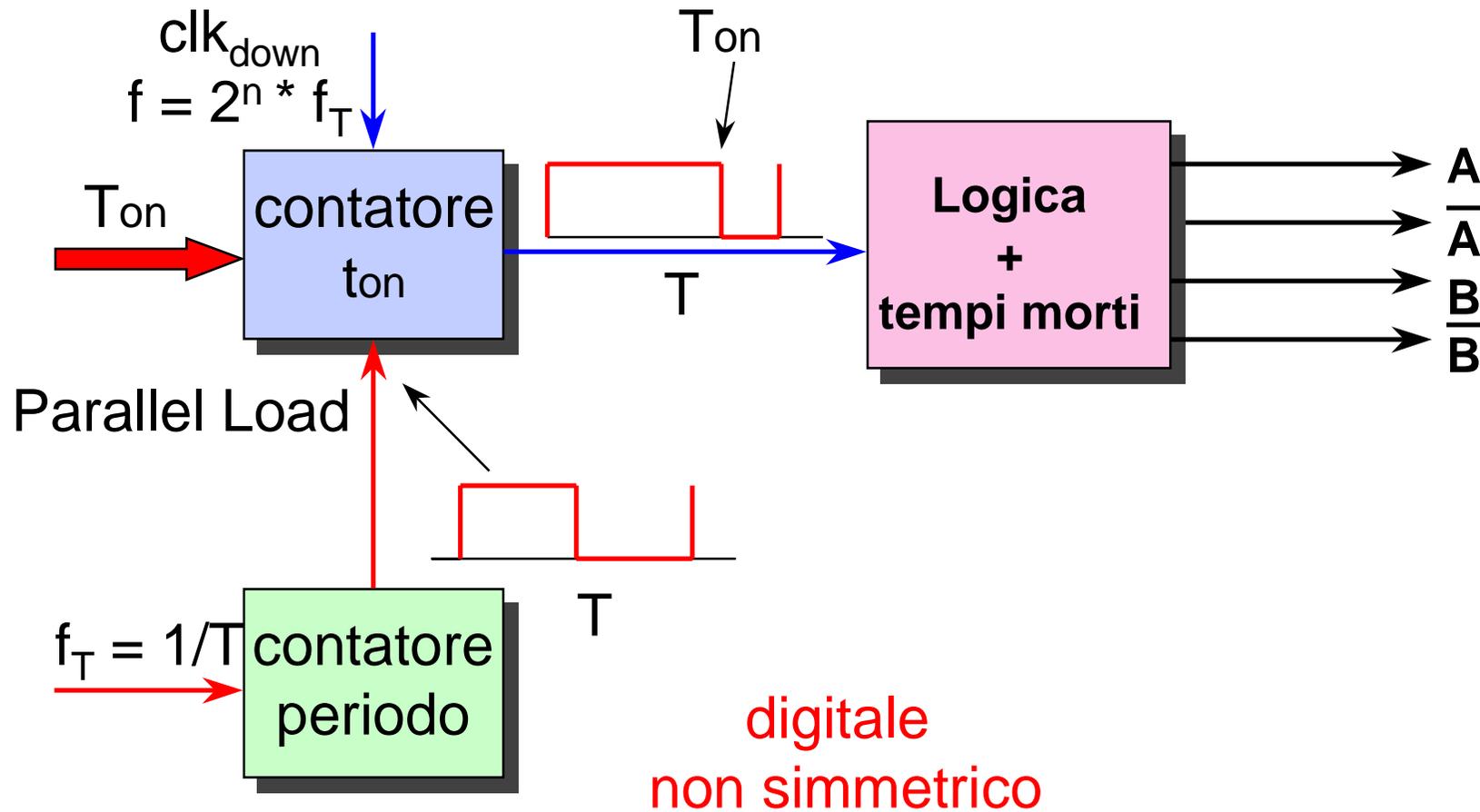
## Schemi concettuali di modulatori



# Amplificatore di potenza

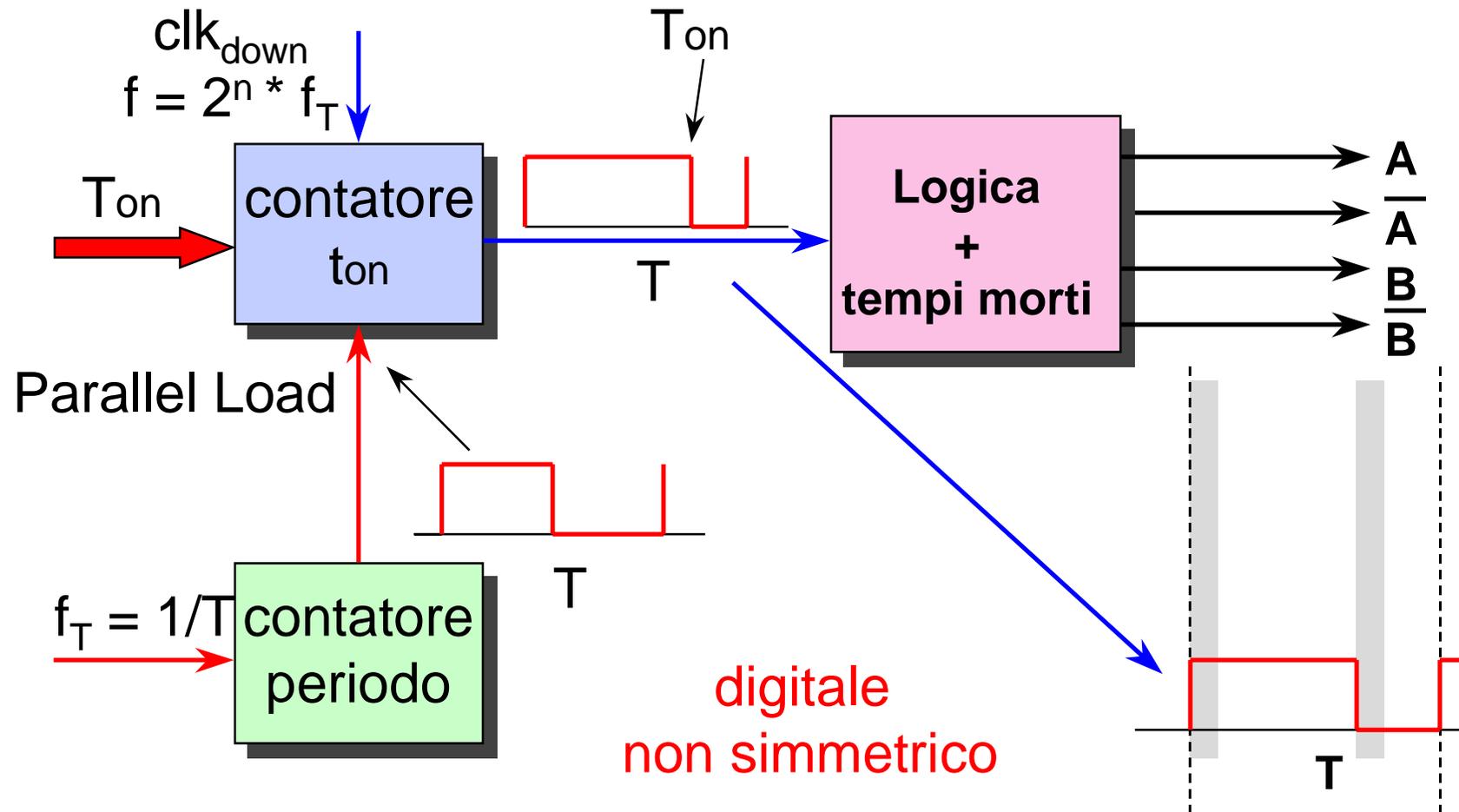


## Schemi concettuali di modulatori



# Amplificatore di potenza

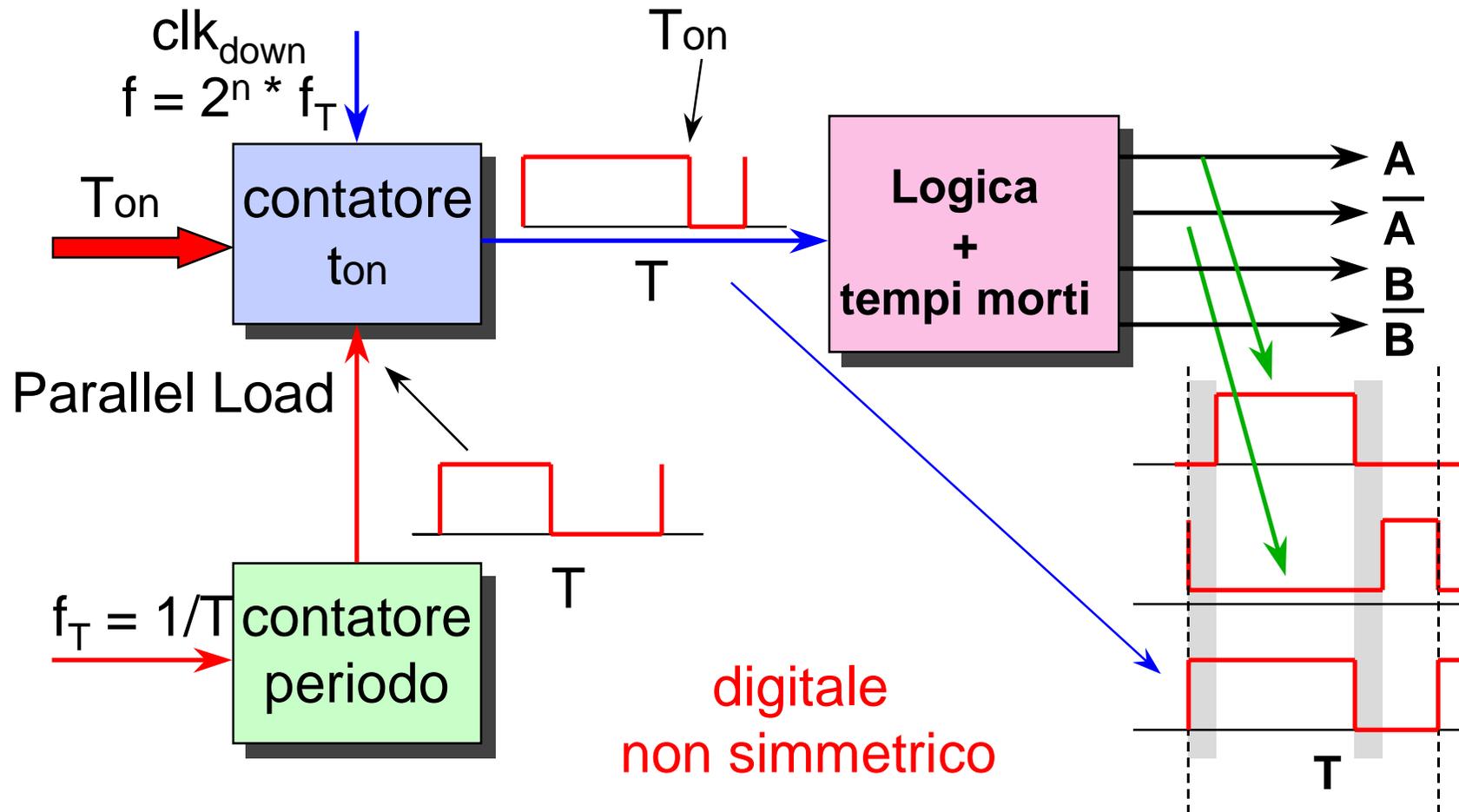
## Schemi concettuali di modulatori



# Amplificatore di potenza



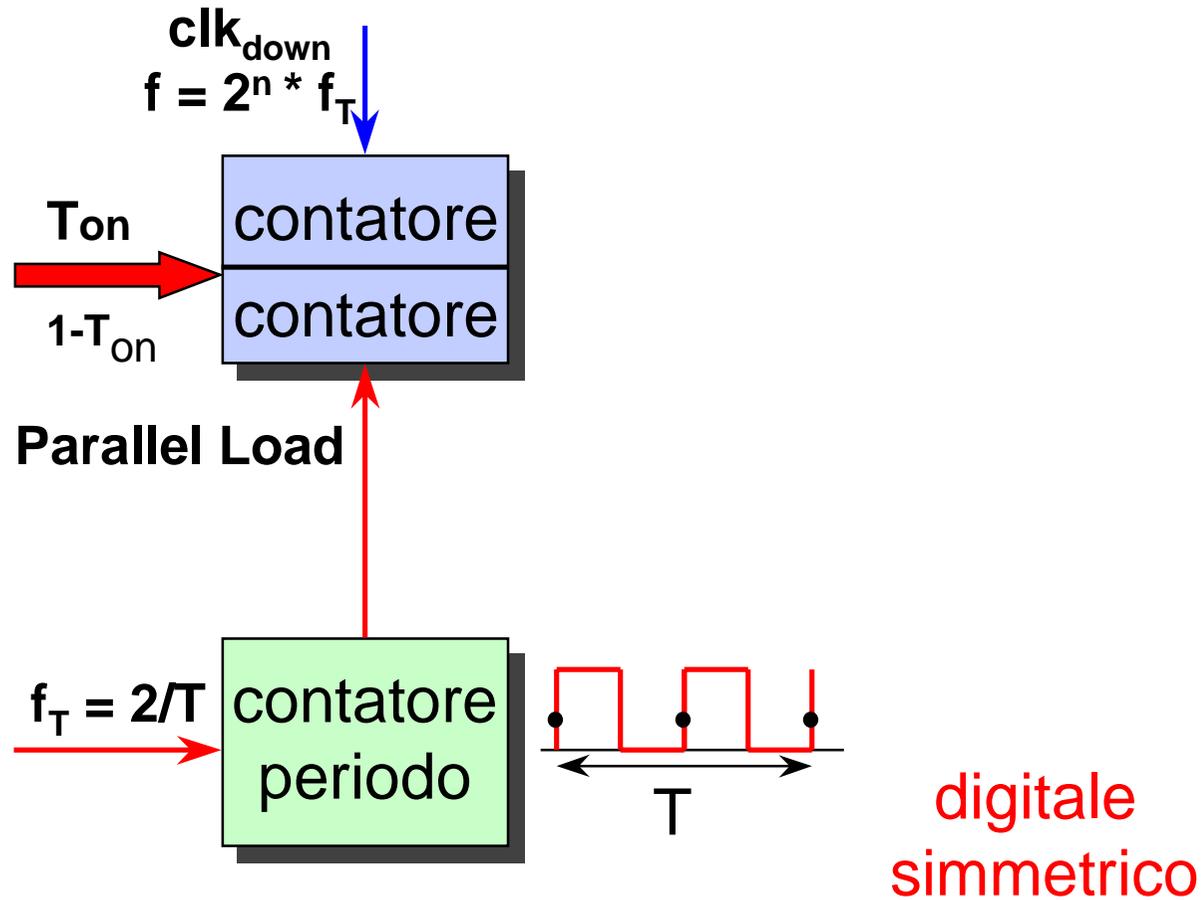
## Schemi concettuali di modulatori



# Amplificatore di potenza



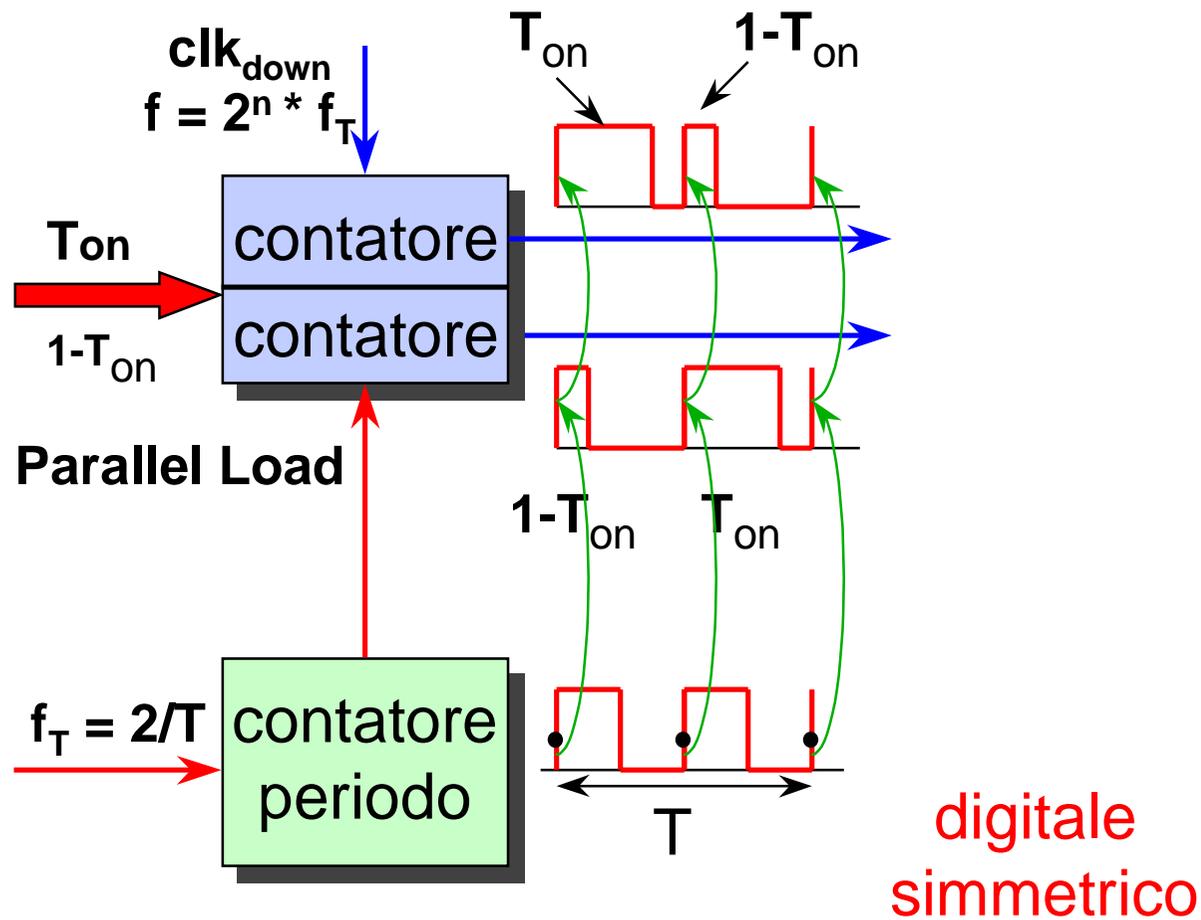
## Schemi concettuali di modulatori



# Amplificatore di potenza



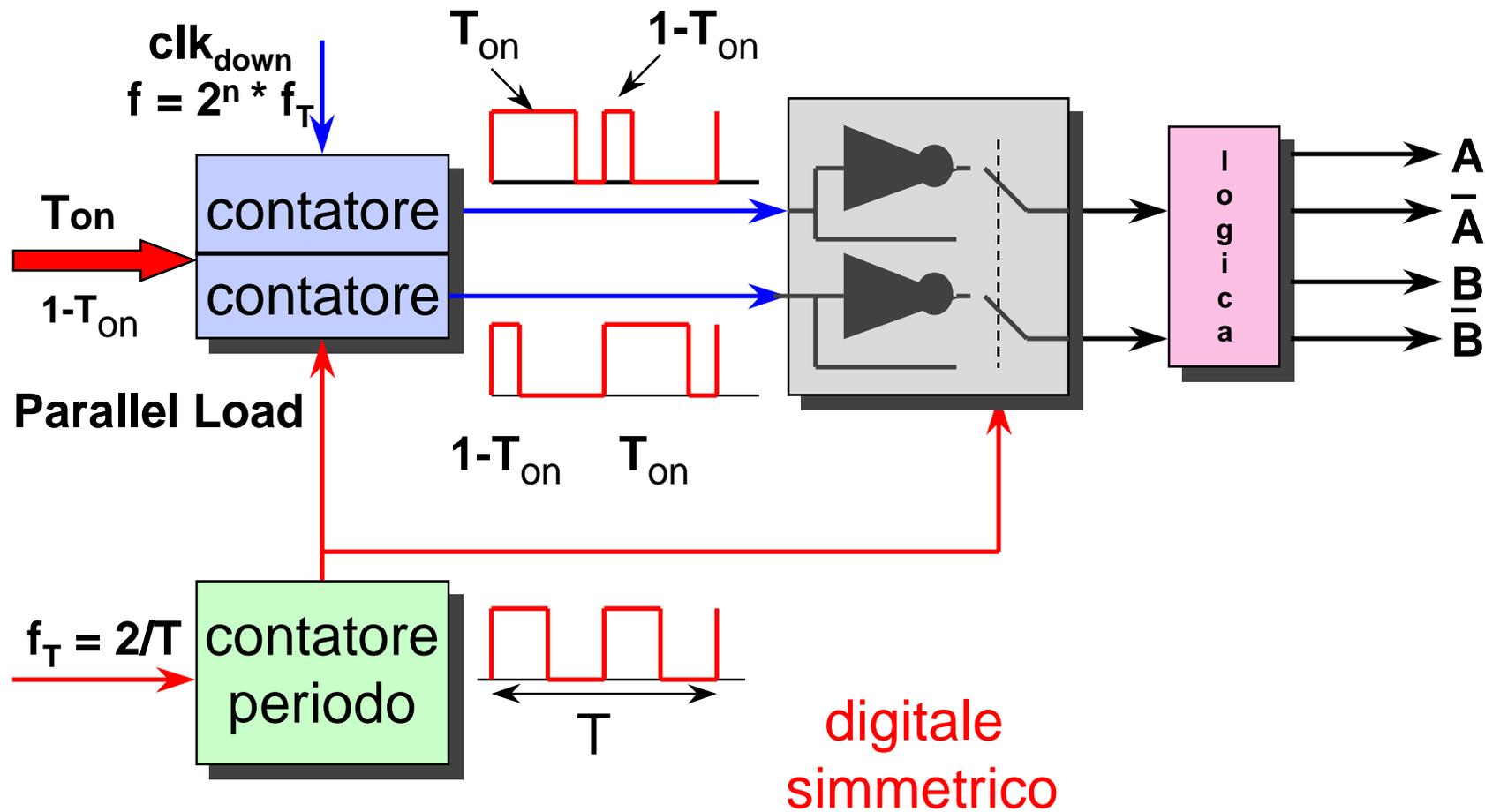
## Schemi concettuali di modulatori



# Amplificatore di potenza

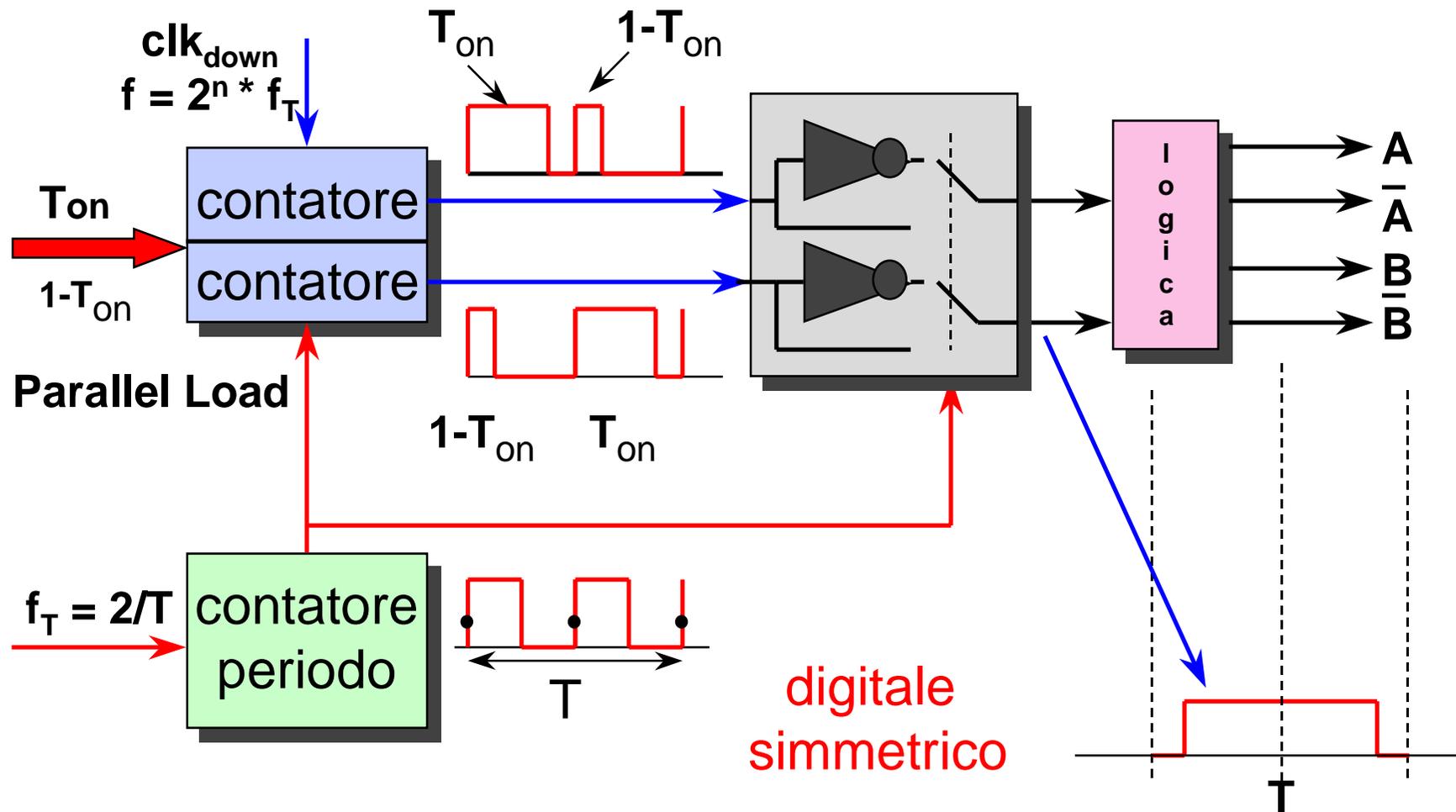


## Schemi concettuali di modulatori



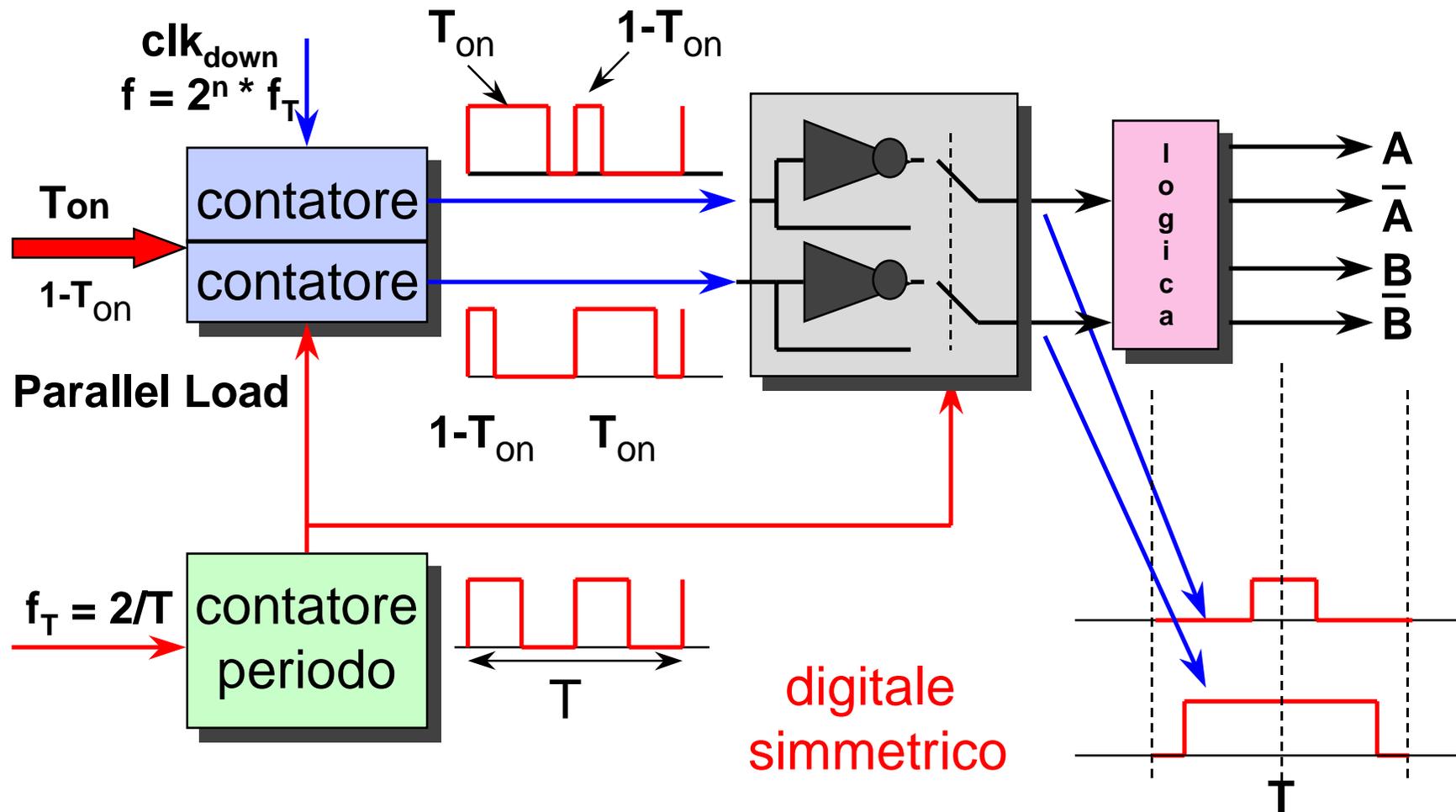
# Amplificatore di potenza

## Schemi concettuali di modulatori



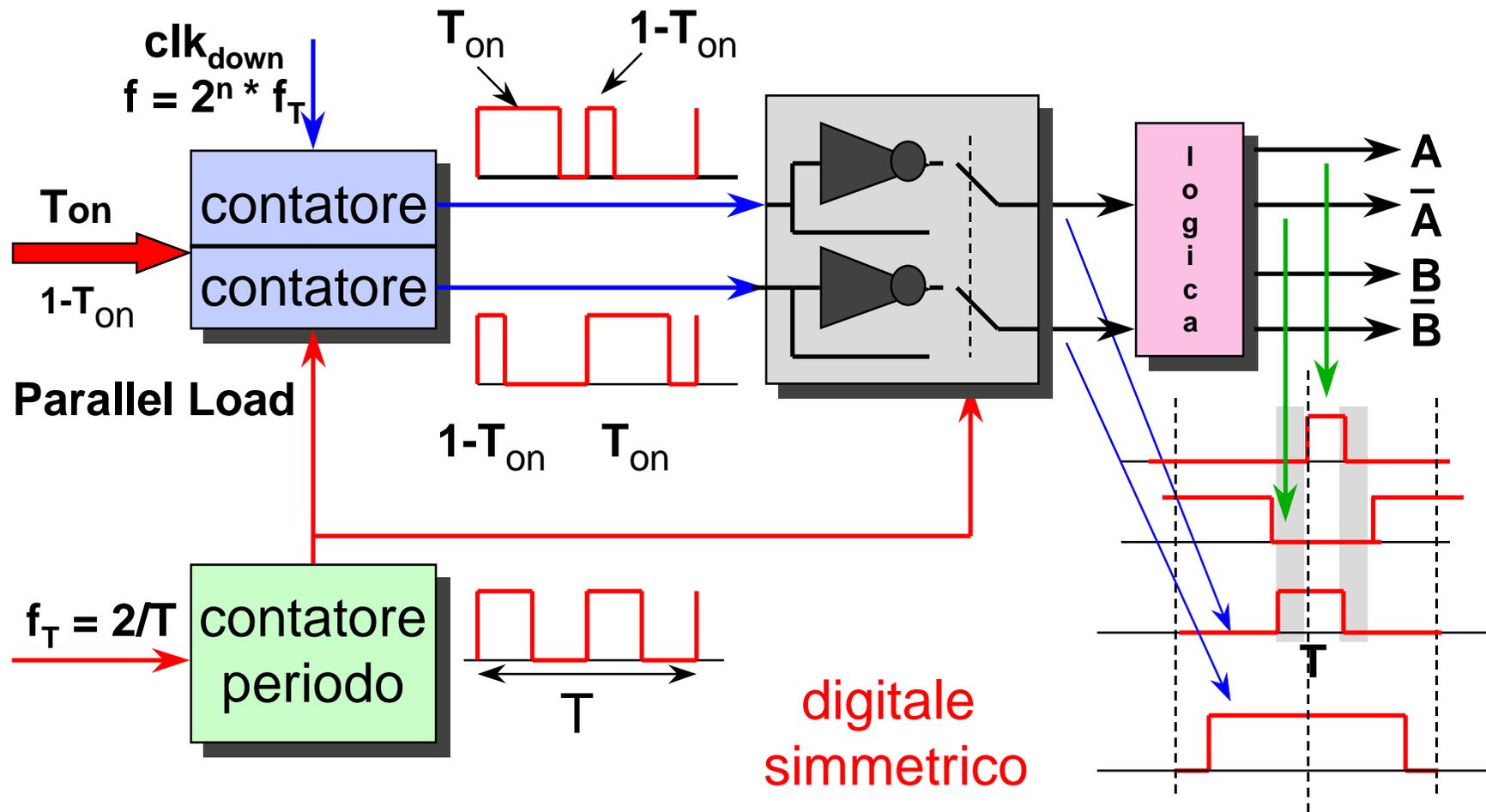
# Amplificatore di potenza

## 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)