

Procedimento transitorio:

- Per $t \rightarrow 0^-$,
 - calcolare variabile di stato prima dell'inizio del transitorio
 - In questa fase il condensatore/induttore si comporta come circuito aperto/cortocircuito
 - Sfrutterò nella fase 2 la continuità della variabile di stato
- Per $t \rightarrow 0^+$ (per var. NON di stato es. v_x, i_x)
 - (Eventuale chiusura interruttore)
 - Sfrutto continuità variabile di stato:**
 $v_C(t_0^-) = v_C(t_0^+) / i_L(t_0^-) = i_L(t_0^+)$
 - Sostituisco al transitorio GENERATORE IDEALE DI TENSIONE/ CORRENTE con valore pari alla variabile di stato appena calcolata**

$$E = V_C(t \rightarrow 0^-) \quad I = I_L(t \rightarrow 0^-)$$

- Per $t \rightarrow \infty$ / $t > 0$:

(a) Soluzione di tipo esponenziale

i. Formule variabili di stato:

$$\begin{aligned} V_C(t) &= V_{C_\infty} + [V_C(0) - V_{C_\infty}] e^{-\frac{t}{\tau}} \\ I_L(t) &= I_{L_\infty} + [I_L(0) - I_{L_\infty}] e^{-\frac{t}{\tau}} \end{aligned}$$

ii. Formule per le grandezze non di stato:

$$\begin{aligned} I_C(t) &= I_{C_\infty} + [I_C(0^+) - I_{C_\infty}] e^{-\frac{t}{\tau}} \\ V_L(t) &= V_{L_\infty} + [V_L(0^+) - V_{L_\infty}] e^{-\frac{t}{\tau}} \end{aligned}$$

iii. Qui, siamo ancora a regime: il condensatore/induttore si comporta come circuito aperto/cortocircuito

iv. Cerco la variabile di stato per $t \rightarrow \infty$

v. Cerco τ :

- Mi serve R_{eq} ai morsetti di dove c'è transitorio
- Spengo generatori non pilotati**
- uso generatore sonda (c.g.) - cerco corrente che passa sul ramo della sonda in funzione di V_S : $? \rightarrow I_S(V_S)$

$$R_{eq} = \frac{V_S}{I_S(V_S)}$$

D. Calcolo τ :

$$\tau = C \cdot R_{eq} = \frac{L}{R_{eq}}$$

Grafico

- Traccio asintoto
- Sfrutto proprietà dell'esponenziale: tangente al grafico in $t = 0$ interseca il valore asintotico dopo $\Delta t = \tau$
- Dopo $t = 5\tau$ la funzione assume valore asintotico

Resistenze e Alimentazioni

Resistenze in parallelo:

- Caso con 2 resistenze:

$$R_{eq} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

- Caso generale (n resistenze):

$$\frac{1}{R_{eq}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$$

△ NOTA IMPORTANTE - Tensioni di alimentazione

Le tensioni fornite dalle alimentazioni sono le massime e minime possibili nel circuito.

I NODI della rete NON possono mai avere tensioni:

- Più alte di V_{max} (alimentazione massima)
- Più basse di V_{min} (alimentazione minima)

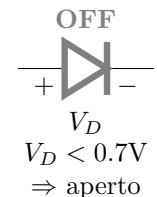
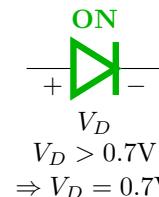
ATTENZIONE: Questo vale per le tensioni dei NODI (riferite a massa).

Le cadute di tensione (misurate tra due nodi diversi) possono superare questi limiti!

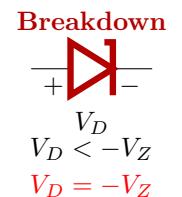
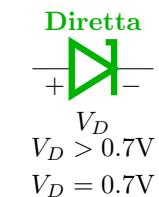
Uso pratico: Fondamentale quando si fanno ipotesi sullo stato dei diodi (ON/OFF). Se un'ipotesi porta un nodo oltre V_{max} o sotto V_{min} , l'ipotesi è sbagliata.

Diodi

- Diodo normale:

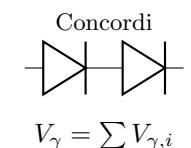
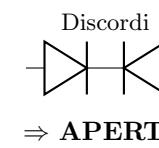


- Diodo Zener:



ATTENZIONE: In breakdown, la tensione $V_D = -V_Z$ ha polarità opposta rispetto ai +0.7V della conduzione diretta!

- Configurazioni in serie:



★ TRUCCO PRATICO - Verifica stato diodo:
Quando sei in un intorno della soglia ($V_D \approx 0.7V$, anche infinitesimamente superiore), le correnti sono molto basse.

\Rightarrow Per verificare se il diodo si accende puoi ignorare le resistenze in serie ($I \approx 0 \Rightarrow \Delta V_R \approx 0$).

Uso nei transitori: A fine esercizio, verifica che l'ipotesi sul diodo (ON/OFF) resti valida in:

- \hat{T}^- (istante prima della transizione)
- \hat{T}^+ (istante dopo della transizione)
- $t \rightarrow \infty$ (regime)

Capacità: Formule e Comportamento

1. Tensione del condensatore:

$$V_C(t) = V_C(0^+) + [V_C(\infty^*) - V_C(0^+)] \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

$V_C(0^+)$: iniziale; $V_C(\infty^*)$: a regime; $\infty^* \neq \infty$

2. Corrente: $I_C(t) = C \frac{dV_C(t)}{dt}$

Proprietà: La corrente varia istantaneamente; La tensione NON commuta: $V_C(t_0^-) = V_C(t_0^+)$

★ REGOLA D'ORO - A REGIME

A regime ($t \rightarrow \infty$): $\frac{dV_C}{dt} = 0 \Rightarrow I_C = 0$
Condensatore = CIRCUITO APERTO

Per calcolare $V_C(\infty)$:

1. Sostituisci C con circuito aperto
2. Risovi il circuito semplificato
3. Calcola la tensione nel punto dove c'era C

Ese: $V \xrightarrow{R_1} \bullet \xrightarrow{R_2} \text{GND} + C \parallel R_2$
 $\Rightarrow V_C(\infty) = V \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ (partitore)

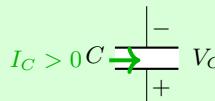
3. Ripple: $\Delta V_{out} = V_{picco} \frac{\Delta T}{\tau} = V_{picco} \frac{T}{f \cdot \tau}$

4. Comportamento fisico ($Q = C \cdot V$; $I = C \frac{dV}{dt}$)

CARICA ($\frac{dV_C}{dt} > 0$): Corrente ENTRA ($I_C > 0$)

Il condensatore accumula energia; $V_C \uparrow$

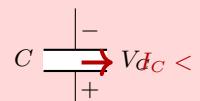
Corrente ENTRA



SCARICA ($\frac{dV_C}{dt} < 0$): Corrente ESCE ($I_C < 0$)

Il condensatore rilascia energia; $V_C \downarrow$

Corrente ESCE



Regola: $V_C \uparrow \Rightarrow$ CARICA; $V_C \downarrow \Rightarrow$ SCARICA; segno I_C indica verso

Transitori con gradini multipli

Formula tempo centrale \hat{T} :

$$V_C(\hat{T}) = V_C(0^+)_{\hat{T}} + [V_C(\infty^*) - V_C(0^+)_{\hat{T}}] \left(1 - e^{-\frac{\hat{T}}{\tau}}\right)$$

Prassi: segnale rettangolare
salita → plateau → discesa

Procedimento step-by-step:

1. FASE 1 - Salita

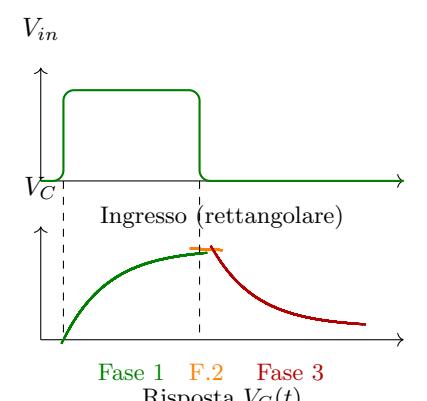
- Analizza $t = 0^-$ (condizioni iniziali)
- $V_C(0^+)$ per continuità
- Determina stato diodi
- Calcola $V_C(\infty^*)$
- Applica formula con τ

2. FASE 2 - Plateau

- Se durata $\gg 5\tau$: regime
- Se durata $< 5\tau$: calcola V_C fine
- Verifica diodi (Box 7)

3. FASE 3 - Discesa

- $V_C(0^+) = V_C(\text{fine plateau})$
- Ridetermina stato diodi
- Nuovo $V_C(\infty^*)$
- Applica formula



Verifica ipotesi stato diodi

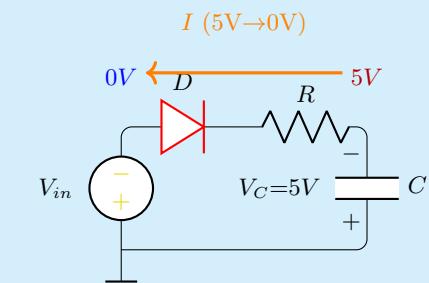
△ VERIFICA FONDAMENTALE

Verifica ipotesi diodo (ON/OFF) rimanga valida per tutto il transitorio

FASE 0: Metodo intuitivo

Regola: I scorre da V_+ a V_-

- 1) $V_C(0^+)$ continuità
- 2) Trova V_{max}
- 3) I va da V_{max} a V_{min}
- 4) Compatibile con diodo?
- 5) No \Rightarrow cambia stato



Contraddizione! I va ←
ma D conduce solo →
 \Rightarrow D OFF

1. Ipotesi (es: D ON)

2. Risovi (ON: gen 0.7V; OFF: aperto)

3. Calcola $V_C(t)$

4. Verifica $\forall t$:

ON: $I_D(t) > 0$? No \rightarrow errore

OFF: $I_D(t) < 0.7V$? No \rightarrow errore

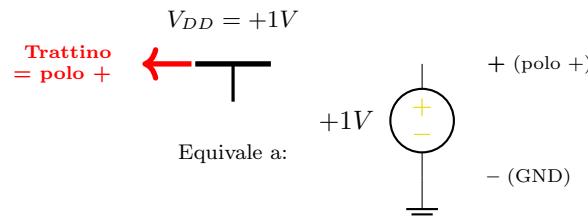
5. Se errore: dividi in 2 fasi (t^* cambio), ricalcola

Notazione alimentazioni

NOTAZIONE ALIMENTAZIONI

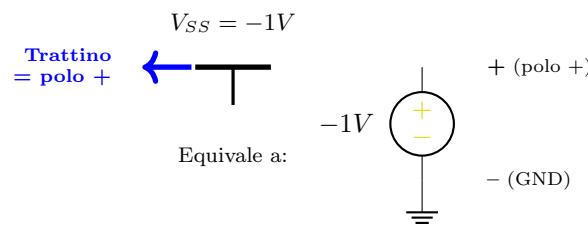
REGOLA D'ORO: Il trattino indica SEMPRE il **polo + del generatore**, sia con tensione positiva che negativa!

Caso 1: $V_{DD} = +1V$ (alimentazione positiva)



Tensione $+1V \rightarrow$ polo + sul trattino, tutto normale

Caso 2: $V_{SS} = -1V$ (alimentazione negativa)



Tensione $-1V \rightarrow$ polo + è comunque sul trattino!

TRUCCO: Con $V_{SS} = -1V$ puoi ridisegnare il generatore invertendo polarità E segno: diventa $+1V$ con polo + su GND.
Utile per evitare tensioni negative nei calcoli.

Formazione del Canale nei MOSFET

1. Zona OFF (o Cutoff):

- (a) Non c'è formazione del canale.
- (b) Il dispositivo è spento e non permette il flusso di corrente tra drain e source.

2. Zona Ohmica (o Triodo):

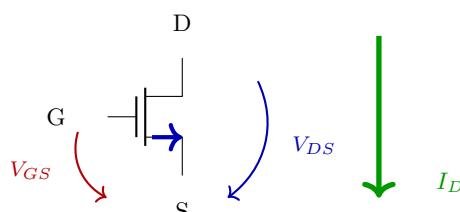
- (a) Si forma un canale.
- (b) Quando il gate è abbastanza polarizzato (cioè $V_{GS} > V_{Tn}$ per nMOS o $V_{GS} < V_{Tp}$ per pMOS), si forma un canale conduttivo tra il drain e il source.
- (c) Il dispositivo si comporta come un **resistore il cui valore varia in base alla tensione V_{GS}** .

3. Zona di Saturazione (o Pinch-off):

- (a) Si forma un canale.
- (b) Il canale diventa "strozzato" o "pinched-off" vicino al drain (per il nMOS) o vicino al source (per il pMOS).
- (c) Anche se la tensione V_{DS} aumenta ulteriormente, la corrente I_D rimane costante.
- (d) Questo comportamento è **analogo a quello di un generatore di corrente**.

Simboli e convenzioni nMOS/pMOS

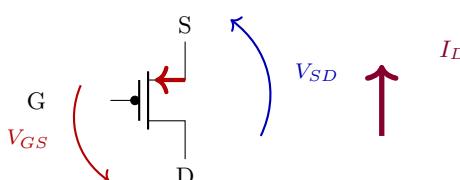
nMOS:



nMOS: Gate a sinistra, Drain in alto, Source in basso

Corrente: Da Drain → Source (verso il basso)

pMOS:

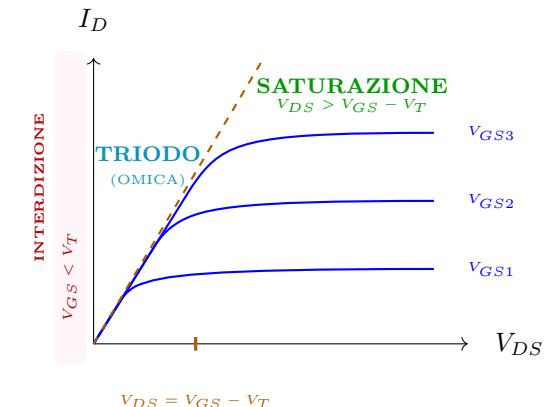


pMOS: Gate a sinistra, Source in alto, Drain in basso

Corrente: Da Source → Drain (verso il basso)

NOTA: Nel pMOS il source è in alto (invertito rispetto a nMOS)!

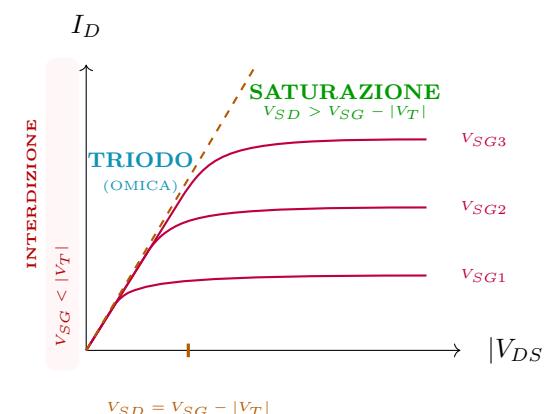
Caratteristica I-V nMOS



Zone di funzionamento:

- **INTERDIZIONE:** $V_{GS} < V_T \rightarrow I_D = 0$
- **TRIODO (OMICA):** $V_{GS} > V_T$ e $V_{DS} < (V_{GS} - V_T)$
- **SATURAZIONE:** $V_{GS} > V_T$ e $V_{DS} > (V_{GS} - V_T)$

Caratteristica I-V pMOS



Zone di funzionamento:

- **INTERDIZIONE:** $V_{SG} < |V_T| \rightarrow I_D = 0$
- **TRIODO (OMICA):** $V_{SG} > |V_T|$ e $V_{SD} < (V_{SG} - |V_T|)$
- **SATURAZIONE:** $V_{SG} > |V_T|$ e $V_{SD} > (V_{SG} - |V_T|)$

Overdrive e Parametro K

Overdrive (V_{OV}):

Misura quanto fortemente è acceso il transistor.
Indica di quanto si è superata (o scesi sotto) la soglia.

nMOS: Per accendere un nMOS, V_{GS} deve superare la soglia positiva V_T .

$$V_{OV} = V_{GS} - V_T$$

pMOS: Un pMOS si accende quando V_{GS} diventa più negativa della sua soglia negativa.

$$V_{OV} = V_{SG} - |V_T|$$

(La tensione di overdrive è la differenza tra V_{SG} e il valore assoluto della soglia)

Ogni qualvolta in cui un transistor si trova in **saturazione**, la corrente che scorre da D a S sarà:

$$I_D = K(V_{GS} - V_T)^2 = K \cdot V_{OV}^2$$

Parametro K (Transconduttanza):

$$K = \frac{1}{2} \mu \cdot C_{OX} \cdot \frac{W}{L}$$

Dove:

- μ = mobilità dei portatori nel canale
- C_{OX} = capacità specifica dell'ossido
- W/L = dimensioni fisiche del MOSFET (Width/Length)

⚠ NOTA IMPORTANTE - Fattore 1/2

K può essere definito **SENZA** il fattore $\frac{1}{2}$ al suo interno.
In tal caso, le formule delle correnti devono essere **riadattate**:

• Saturazione:

$$I = \frac{K}{2}(V_{GS} - V_T)^2 \text{ invece di } I = K(V_{GS} - V_T)^2$$

• Omica:

$$I = K \left[(V_{GS} - V_T)V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$$

$$\text{invece di } I = K [2(V_{GS} - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2]$$

nMOS - Metodo operativo

PRIMO CONTROLLO: V_{GS} vs V_T

- Se $V_{GS} < V_T \Rightarrow \text{MOSFET OFF}$

- $I_D = 0$ (circuito aperto)
- Non c'è conduzione

- Se $V_{GS} > V_T \Rightarrow \text{MOSFET ON}$

- Proseguire al **SECONDO CONTROLLO**

SECONDO CONTROLLO (solo se ON): V_{DS} vs $(V_{GS} - V_T)$

- ZONA DI SATURAZIONE:** Se $V_{DS} > (V_{GS} - V_T)$

$$I_D = K(V_{GS} - V_T)^2$$

Nota: La corrente dipende **SOLO** da V_{GS}

- ZONA OHMICA (Triodo):** Se $V_{DS} < (V_{GS} - V_T)$

$$I_D = K [2(V_{GS} - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2]$$

Nota: La corrente dipende da V_{GS} E V_{DS}

★ REGOLA FONDAMENTALE - nMOS

Affinché il MOSFET sia **ON**, il **gate** deve essere **più in alto del source di almeno una soglia (V_T)**:

$$V_G - V_S \geq V_T$$

Direzione corrente: In nMOS, I_D scorre da **Drain → Source**

pMOS - Metodo operativo

⚠ CRITICO - Metodo valori assoluti

Il metodo del valore assoluto funziona **SOLO** se verifichi **CONTEMPORANEAMENTE** che:

1. $|V_{GS}| > |V_T|$ (in valore assoluto)
2. Il **source sia sopra al gate** di almeno una soglia

Se hai $|V_{GS}| > |V_T|$ ma con **verso opposto**, il pMOS **NON** si accende!

PRIMO CONTROLLO: Source sopra Gate

1. Se $V_S - V_G < |V_T| \Rightarrow \text{MOSFET OFF}$

- $I_D = 0$ (circuito aperto)

2. Se $V_S - V_G > |V_T| \Rightarrow \text{MOSFET ON}$

- Equivalente a $|V_{GS}| > |V_T|$ con polarità corretta
- Proseguire al **SECONDO CONTROLLO**

SECONDO CONTROLLO (solo se ON): V_{SD} vs V_{OV}

- ZONA DI SATURAZIONE:** Se $V_{SD} > (V_{SG} - |V_T|)$

$$I_D = K(V_{SG} - |V_T|)^2 = K \cdot V_{OV}^2$$

(equivalentemente: $I_D = K(V_{GS} - V_T)^2$ con V_{GS} e V_T negativi)

Nota: La corrente dipende **SOLO** da V_{SG} (**overdrive**)

- ZONA OHMICA (Triodo):** Se $V_{SD} < (V_{SG} - |V_T|)$

$$I_D = K [2(V_{SG} - |V_T|)V_{SD} - V_{SD}^2]$$

(equivalentemente: $I_D = K[2(V_{GS} - V_T)V_{SD} - V_{SD}^2]$ con V_{GS} , V_T negativi)

IMPORTANTE: Si usa V_{SD} (non V_{DS}) perché nel pMOS la corrente va da S→D

Nota: La corrente dipende da V_{SG} (**overdrive**) E V_{SD}

Direzione corrente: In pMOS, I_D scorre da **Source → Drain** (da alto verso basso nel simbolo)

cMOS

cMOS (Inverter):

- Ingresso Alto (logica '1'):**
rete PULL-UP(pMOS ON SAT, nMOS OFF)

nMOS: $V_{GS} > V_{th}$ (Conduzione)

pMOS: $V_{GS} > V_{TP}$ (Cutoff)

Uscita: GND (logica '0')

- Ingresso Basso (logica '0'):**
rete PULL-DOWN(nMOS ON SAT, pMOS OFF)

nMOS: $V_{GS} < V_{th}$ (Cutoff)

pMOS: $V_{GS} < V_{TP}$ (Conduzione)

Uscita: VDD (logica '1')

- Zona intermedia: entrambi in saturazione**
[....]

[grafico delle caratteristiche]

cMOS

AND/nAND

AND (AND/nAND):

- Entrata:**
 $A = 0, B = 0$
Uscita: 0
- $A = 0, B = 1$
Uscita: 0
- $A = 1, B = 0$
Uscita: 0
- $A = 1, B = 1$
Uscita: 1

OR/nOR

OR (nOR):

- Entrata:**
 $A = 0, B = 0$
Uscita: 0
- $A = 0, B = 1$
Uscita: 1
- $A = 1, B = 0$
Uscita: 1
- $A = 1, B = 1$
Uscita: 1

Box 18

XOR/nXOR

XOR (nXOR):

- Entrata:**
 $A = 0, B = 0$
Uscita: 0
- $A = 0, B = 1$
Uscita: 1
- $A = 1, B = 0$
Uscita: 1
- $A = 1, B = 1$
Uscita: 0

Box 19

Box 20

Box 17

Box 21

Box 22

Box 23