



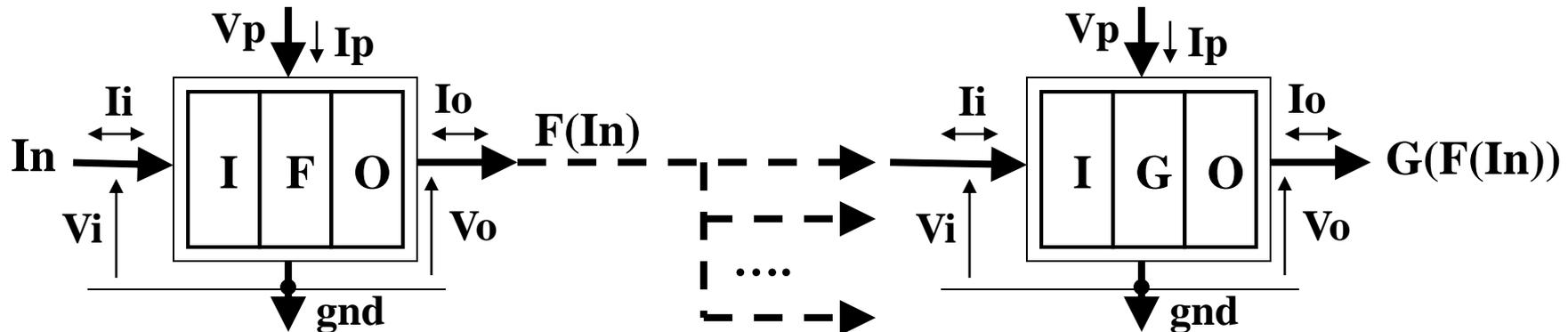
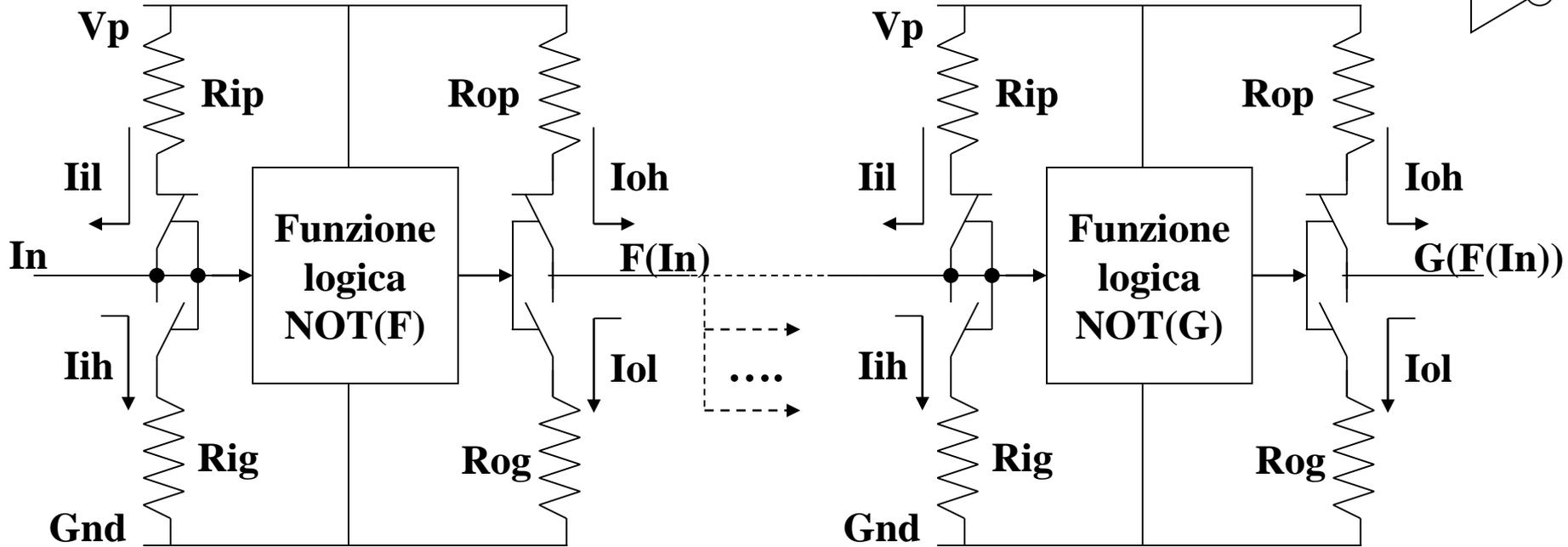
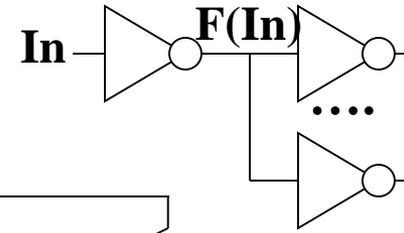
Sistemi di Elettronica Digitale, Sez.1

Alessandra Flammini
alessandra.flammini@unibs.it
Ufficio 24 Dip. Ingegneria dell'Informazione
030-3715627 Lunedì 16:30-18:30

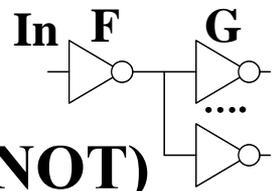
Modello dei dispositivi, analisi statica e dinamica

Logica ed Elettronica, logica a interruttori

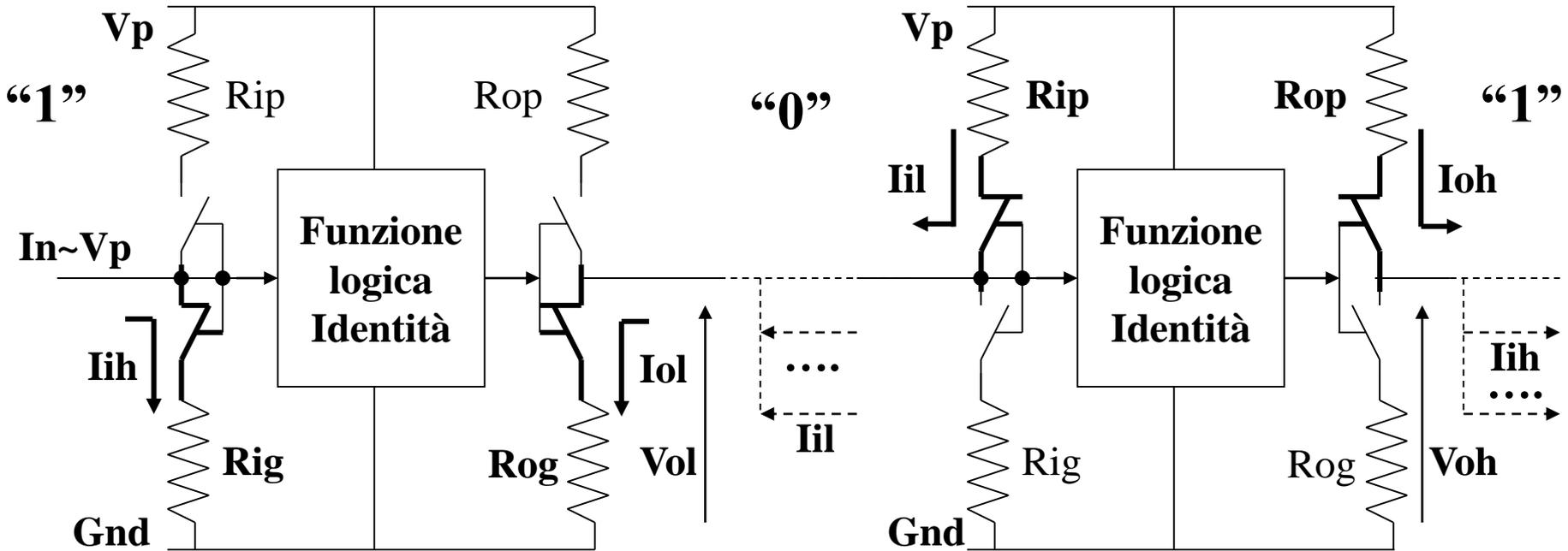
- Modello statico del dispositivo, interfacciamento



Logica ed Elettronica, logica a interruttori

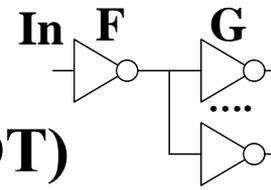


- Modello statico del dispositivo, resistenze ($In="1"$ $F=G=NOT$)

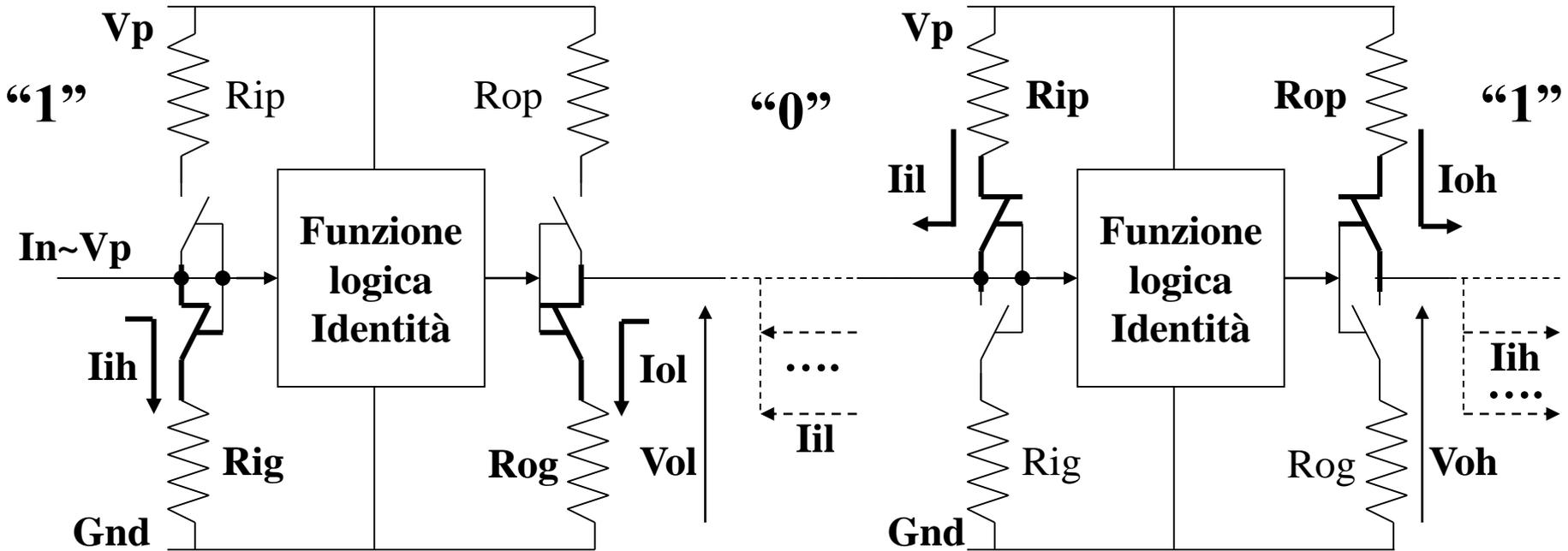


- Per segnali a “1” l’uscita eroga corrente (I_{oh}) e l’ingresso assorbe (I_{ih})
 - Per segnali a “0” l’uscita assorbe corrente (I_{ol}) e l’ingresso eroga (I_{il})
 - $I_{ol} = \Sigma I_{il}$ trascurando correnti di perdita da V_p e verso gnd ($I_{oh} = \Sigma I_{ih}$)
 - Per avere $V_o = F(In) \sim gnd (=V_{ol})$ si deve avere $R_{og} \cdot I_{ol} = R_{og} \cdot \Sigma I_{il} = R_{og} \cdot n \cdot I_{il} \sim gnd$ ma, trascurando il rumore, $I_{il} = (V_p - V_{ol}) / R_{ip} \sim V_p / R_{ip} \rightarrow V_p \cdot n \cdot R_{og} / R_{ip} \sim gnd$ quindi: R_{og} piccola, R_{ip} grande (analogamente R_{op} piccola, R_{ig} grande)
- ➔ i dispositivi digitali devono avere alta resistenza d’ingresso e bassa d’uscita

Logica ed Elettronica, logica a interruttori

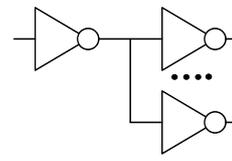


- Modello statico del dispositivo, carichi ($I_n = "1"$ $F = G = \text{NOT}$)

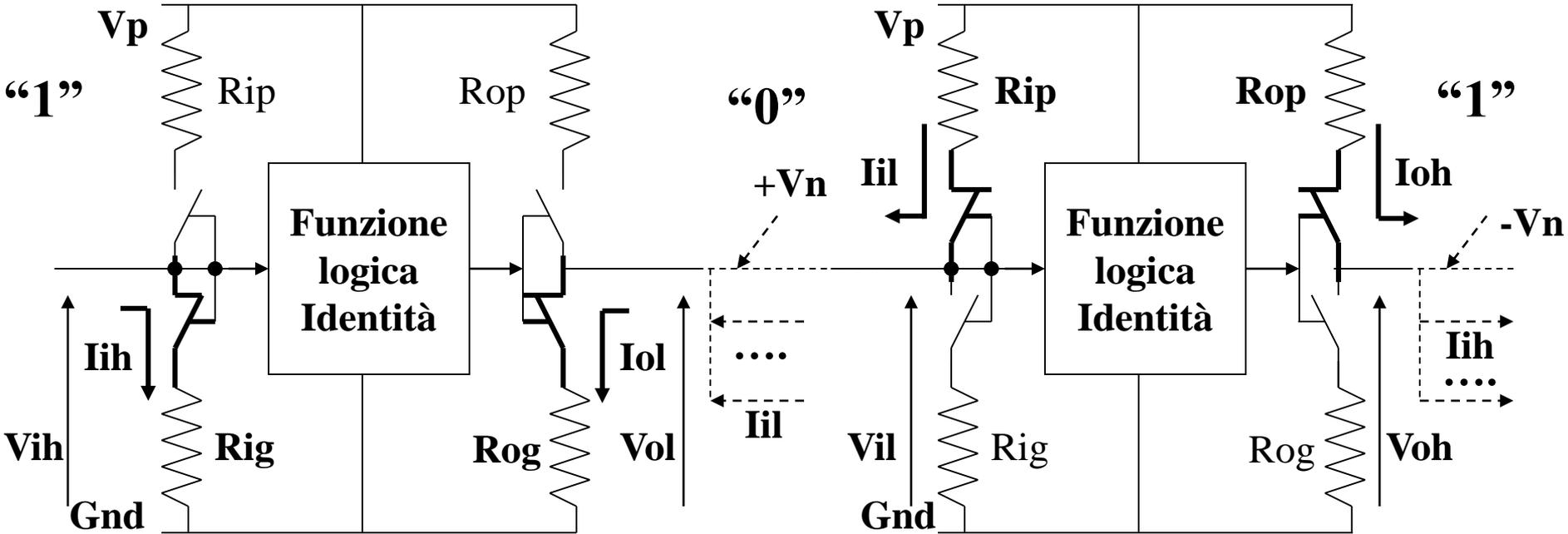


- Per segnali a “1” l’uscita impone una tensione $V_o = V_{oh} = V_p - R_{op} \cdot I_{oh}$ se $I_{oh} \sim 0$ –uscita a vuoto- allora $V_{oh} \sim V_p$, se $I_{oh} = I_{oh,max}$ allora $V_{oh} = V_{oh,min}$ $I_{oh,max}$ dipende dall’interruttore; $I_{oh,max} = N_{max} \cdot I_{ih} \rightarrow N_{max} = I_{oh,max} / I_{ih}$
 - Per segnali a “0” l’uscita impone una tensione $V_o = V_{ol} = R_{og} \cdot I_{ol}$ se $I_{ol} \sim 0$ –uscita a vuoto- allora $V_{ol} \sim \text{gnd}$, se $I_{ol} = I_{ol,max}$ allora $V_{ol} = V_{ol,max}$ $I_{ol,max}$ dipende dall’interruttore; $I_{ol,max} = N_{max} \cdot I_{il} \rightarrow N_{max} = I_{ol,max} / I_{il}$
- ➔ il massimo numero di carichi è $N_{max} = \min(I_{ol,max} / I_{il} \quad I_{oh,max} / I_{ih})$

Logica ed Elettronica, logica a interruttori



- Modello statico del dispositivo, tensioni d'ingresso



– Uscita a “1” $V_{oh,min} < V_o < V_p$, dove $V_{oh,min} = V_p - R_{op} \cdot I_{oh,max}$

– Uscita a “0” $gnd < V_o < V_{ol,max}$, dove $V_{ol,max} = R_{og} \cdot I_{ol,max}$

➔ $V_{ol,max} < V_s < V_{oh,min}$, dove V_s è la soglia in ingresso tra “0” e “1”

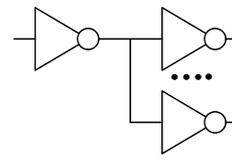
– V_s è un valore critico (dipende da V_p , temperatura, tecnologia,...)

– Al segnale in uscita può sommarsi/sottrarsi rumore V_n

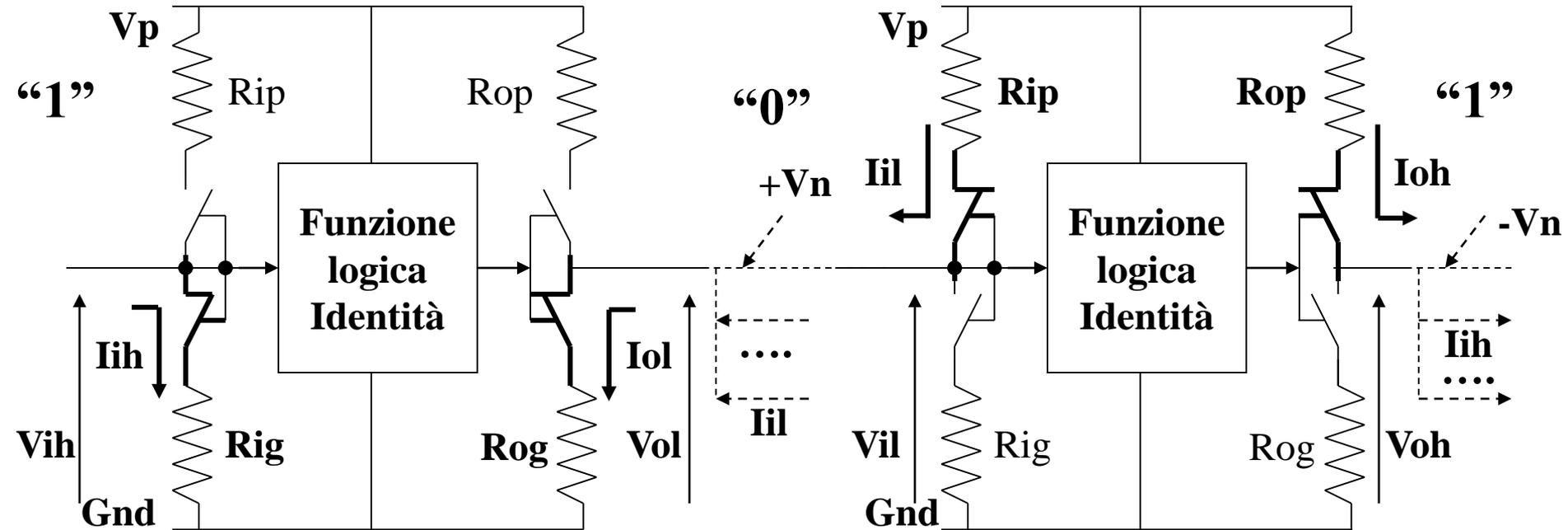
➔ $V_{ol,max} < V_{il,max} < V_s < V_{ih,min} < V_{oh,min}$

dove $V_{il,max} = V_{ol,max} + V_n$ e $V_{ih,min} = V_{oh,min} - V_n$

Logica ed Elettronica, logica a interruttori



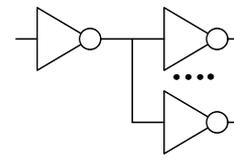
- **Modello statico del dispositivo, livelli di tensione**



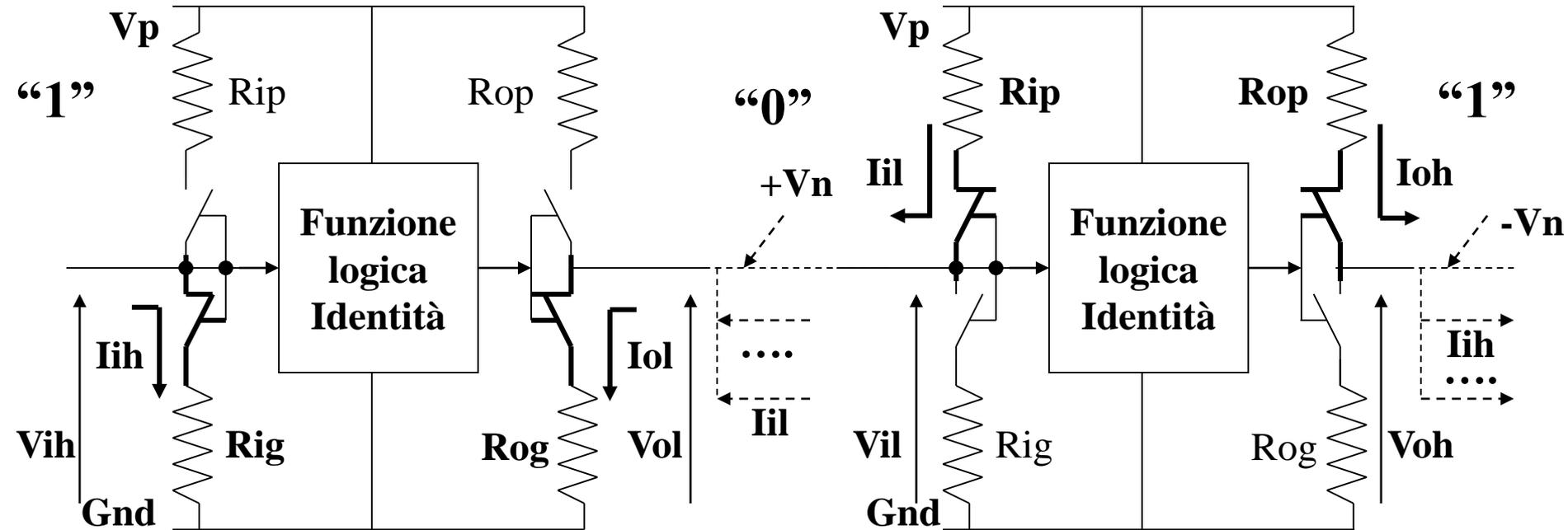
- **Livelli di tensione**

- V_{ol} = massima tensione di uscita quando l'uscita è a "0"
- V_{oh} = minima tensione di uscita quando l'uscita è a "1"
- V_{il} = massima tensione che, applicata all'ingresso, è riconosciuta come "0"
- V_{ih} = minima tensione che, applicata all'ingresso, è riconosciuta come "1"
- (V_p = tensione di alimentazione -definita all'interno di tolleranze-)

Logica ed Elettronica, logica a interruttori



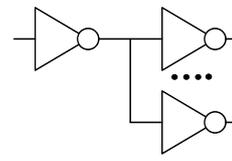
- **Modello statico del dispositivo, livelli di corrente**



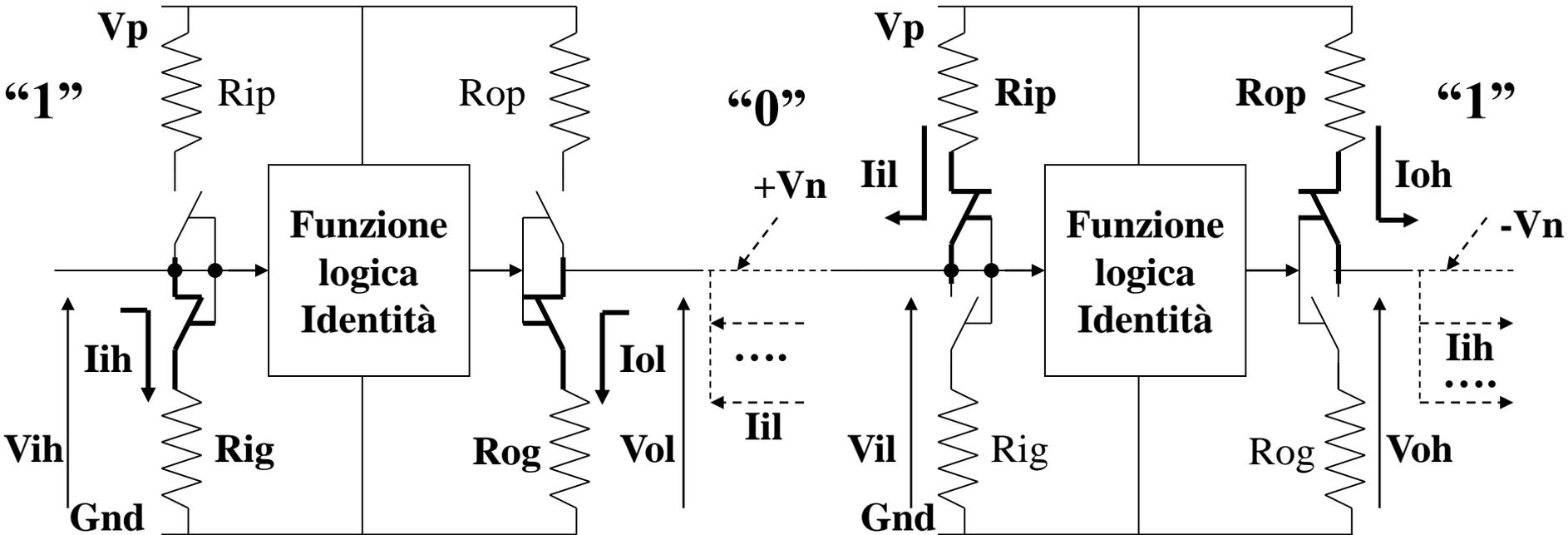
- **Livelli di corrente**

- I_{ol} = massima corrente di uscita (entrante) quando l'uscita è a "0" (@ V_{ol})
- I_{oh} = massima corrente di uscita (uscente) quando l'uscita è a "1" (@ V_{oh})
- I_{il} = massima corrente di ingresso (uscente) quando l'ingresso è a "0"
- I_{ih} = massima corrente di ingresso (entrante) quando l'ingresso è a "1"
- (I_p = max. corrente scambiata con V_p e/o gnd -corrente di alimentazione-)

Logica ed Elettronica, logica a interruttori



- **Modello statico del dispositivo, parametri statici**



- **Immunità al rumore (indispensabile al corretto funzionamento)**

– massimo rumore che può essere sommato/sottratto all'uscita

➔ $V_n = \min (V_{il} - V_{ol} , V_{oh} - V_{ih})$ Normalmente $V_n > 0,1 \text{ V}$

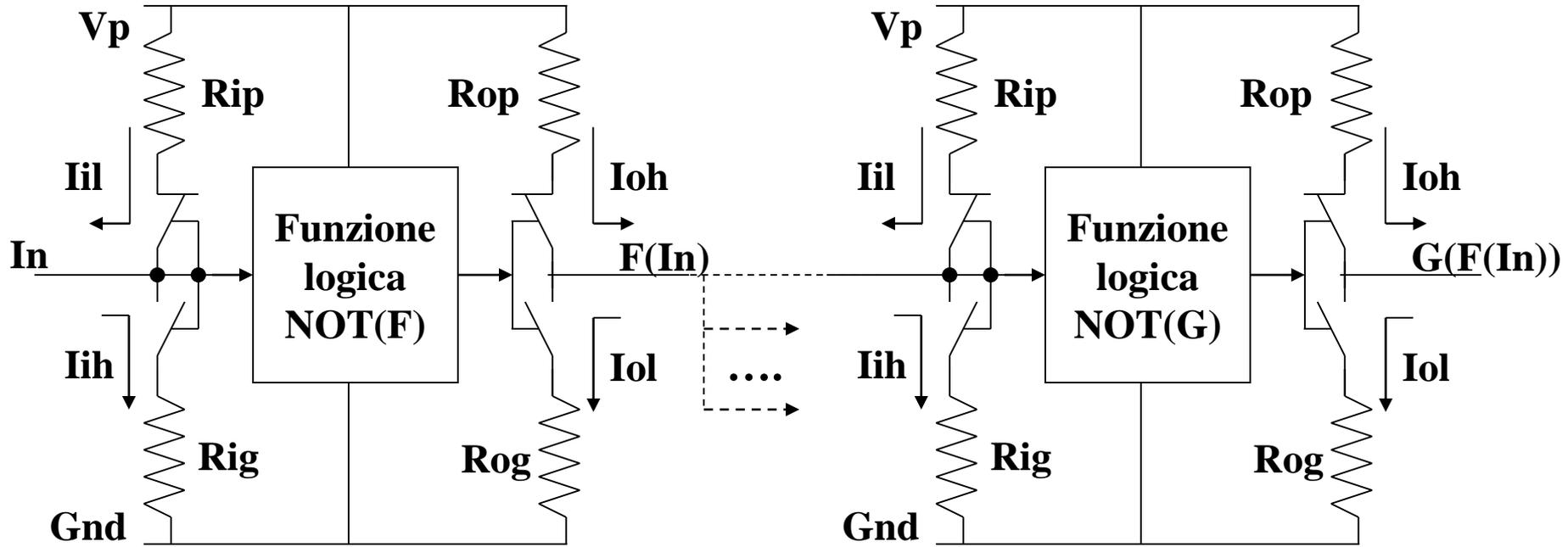
- **FAN-OUT statico (indispensabile al corretto funzionamento)**

– Numero massimo di carichi che possono essere connessi ad un dispositivo

➔ $N_{max} = \min (I_{oh} / I_{ih} , I_{ol} / I_{il})$ Normalmente $N_{max} > 10$

Logica ed Elettronica, logica a interruttori

- Modello statico del dispositivo, parametri statici

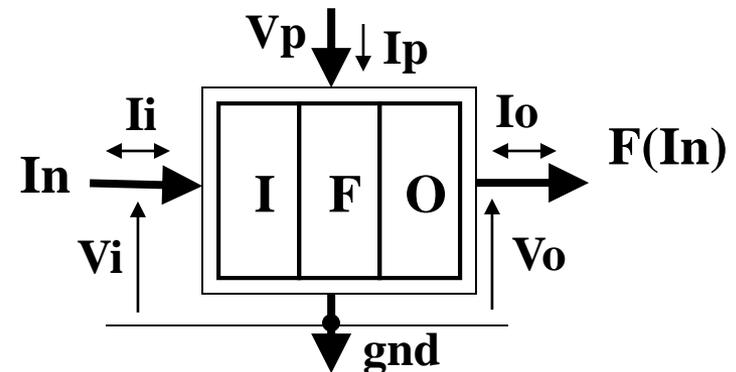


- **Dissipazione di potenza statica**

- stadio di ingresso (I_{il} , I_{ih} , perdite)
- stadio funzionale
- stadio di uscita (I_{ol} , I_{oh} , perdite)

- **Lo stadio simmetrico non ha percorso diretto di corrente tra V_p e gnd ($I_p \sim 0$)**

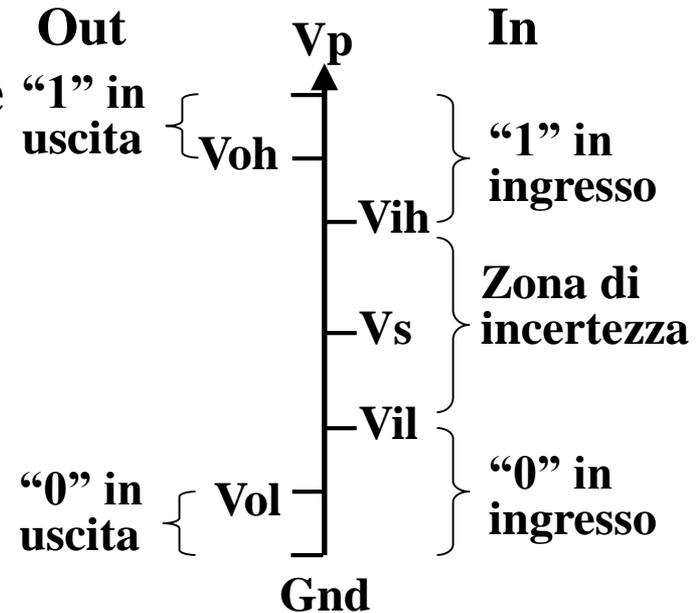
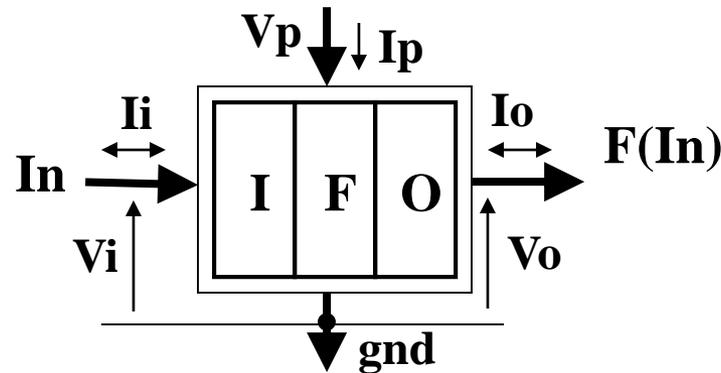
➔ **bassa dissipazione di potenza statica (stadio funzionale)**



Logica ed Elettronica, logica a interruttori

• Modello statico del dispositivo

significato dei livelli di tensione

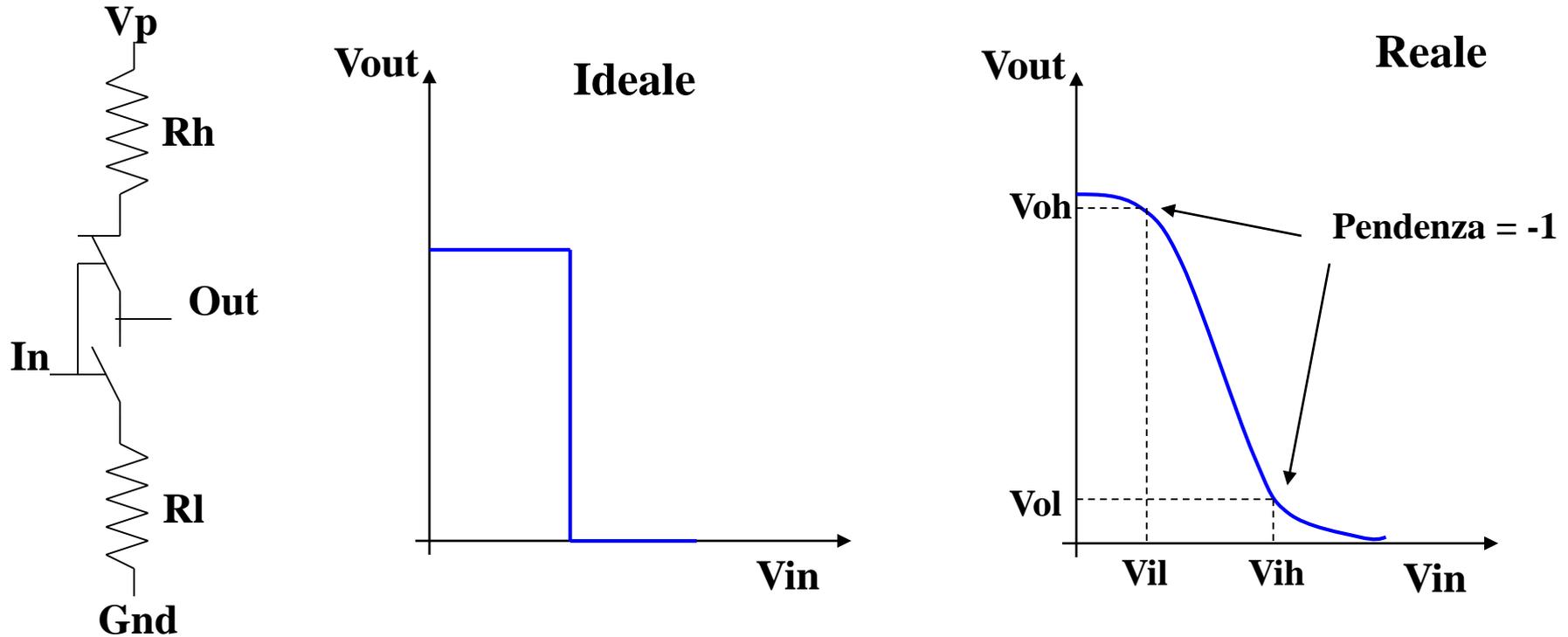


• Applicare uno “0” (“1”) in ingresso ad una porta logica equivale ad applicare una tensione tra Gnd e V_{il} (tra V_{ih} e V_{cc}) e a scambiare una corrente tra 0 e I_{il} (I_{ih})

• Uno “0” (“1”) generato da una porta logica equivale ad una tensione tra Gnd e V_{ol} (tra V_{oh} e V_{cc}) e a scambiare una corrente tra 0 e I_{ol} (I_{oh})

Logica ed Elettronica, logica a interruttori

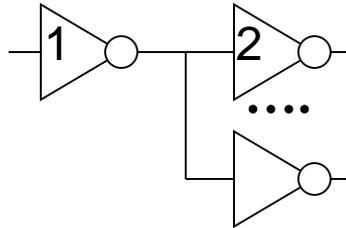
- Invertitore ideale e reale, caratteristica ingresso - uscita



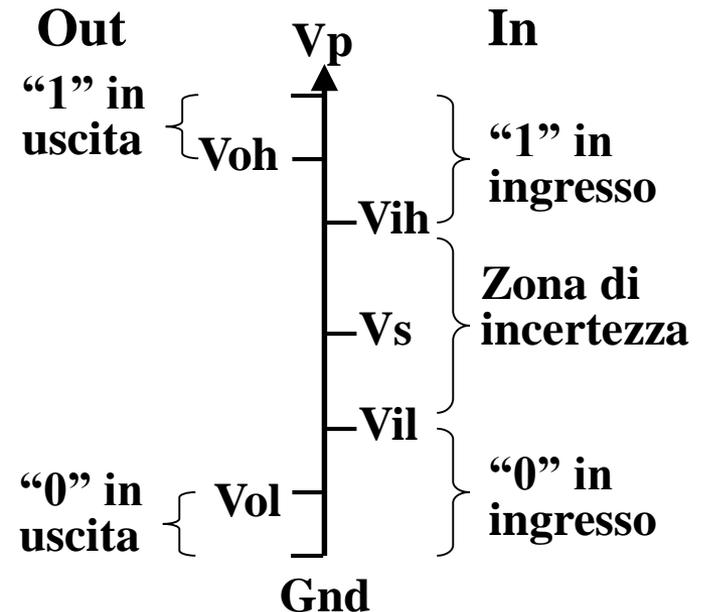
- Le caratteristiche ingresso – uscita di tensione e di corrente dipendono dalla tecnologia scelta per realizzare gli interruttori
- Se l'ingresso è in zona di incertezza si ha un'uscita imprevedibile
 - la caratteristica reale varia al variare di temperatura, tensione di alimentazione, condizioni di carico, processo tecnologico,...). I valori **Vil**, **Vih**, **Vol**, **Voh** sono garantiti sotto tutte le condizioni di funzionamento ammesse

Logica ed Elettronica, logica a interruttori

- Invertitore ideale e reale, la regione d'incertezza



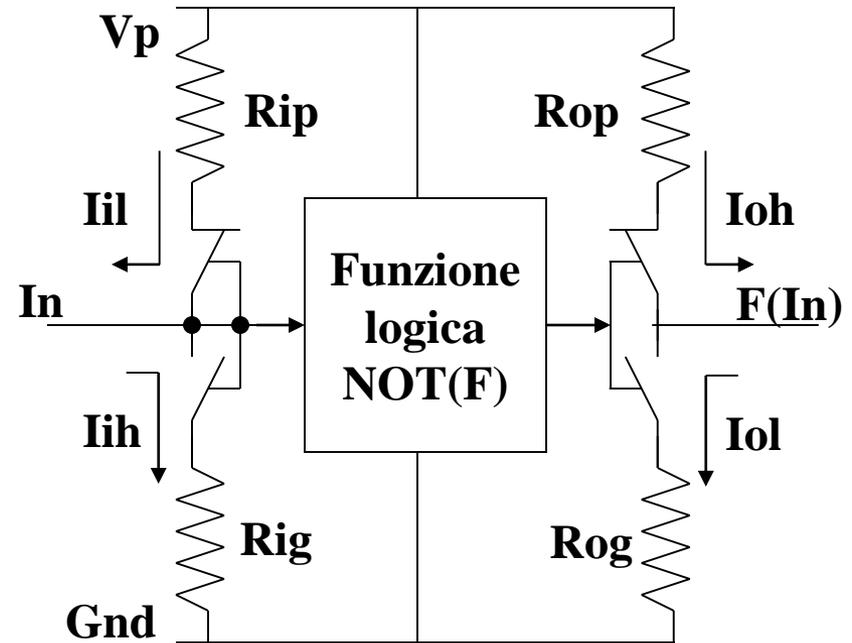
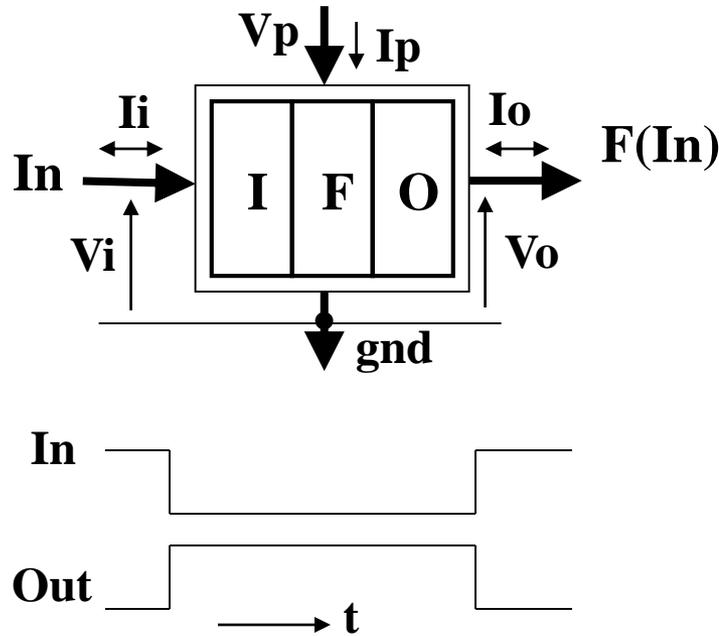
- Staticamente la porta 1 impone livelli fuori dalla regione d'incertezza
...ma durante la commutazione?
(la commutazione reale non è istantanea)



- Se le porte 1 e 2 sono realizzate con la stessa tecnologia
 - il tempo di commutazione della porta 1 è “quasi istantaneo” rispetto al tempo di reazione della porta 2 (non reagisce alla regione d'incertezza)
- Se la porta 1 è molto più lenta della porta 2
 - la porta 2 reagisce all'area d'incertezza fornendo un'uscita non predicibile

Logica ed Elettronica, logica a interruttori

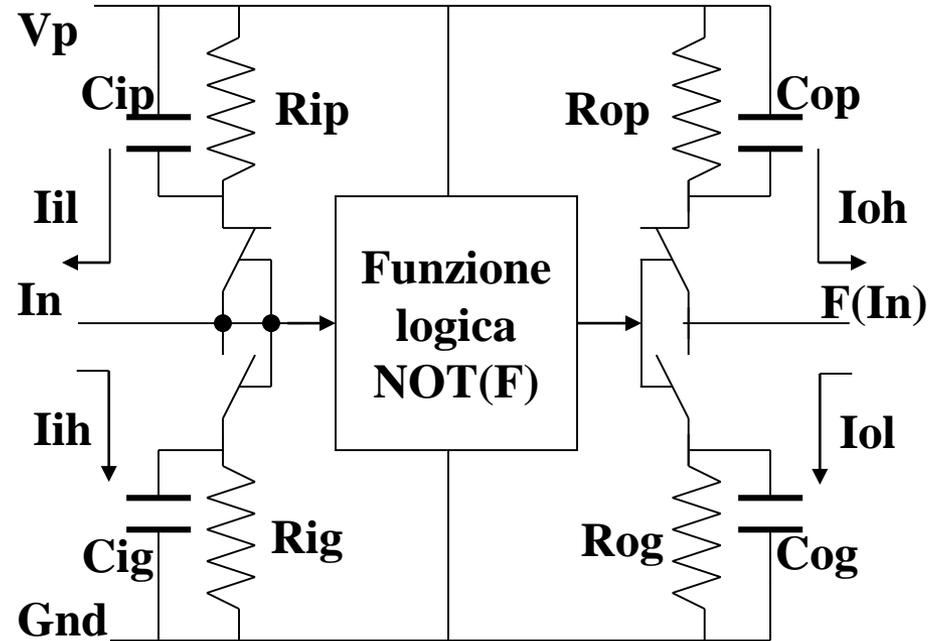
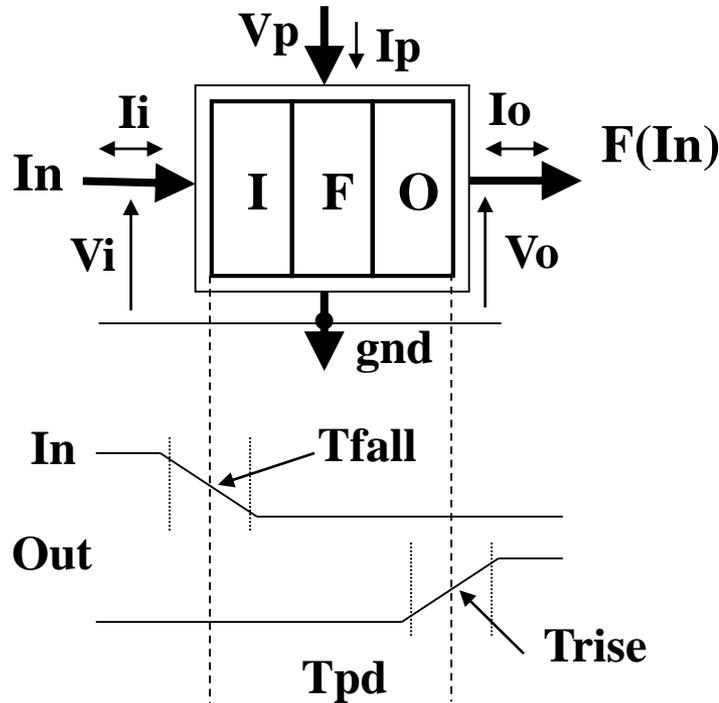
- Modello dinamico del dispositivo (interruttori ideali)



- **Ipotesi:** gli interruttori hanno tempi di apertura e chiusura nulli
➔ L'uscita del dispositivo segue istantaneamente l'ingresso
- **Nei sistemi elettronici le commutazioni non sono immediate**
- **Esiste un tempo non nullo nel quale i segnali si propagano attraverso i dispositivi elettronici**
- **I ritardi nei segnali di tensione si modellizzano con capacitori**

Logica ed Elettronica, logica a interruttori

- Modello dinamico del dispositivo (interruttori con ritardi)



- $T_{pd} = T_i + T_f + T_o$, T_{rise} è il tempo da 10% a 90% (T_{fall} opposto)

- T_i ($\sim T_{fall}/2$ o $T_{rise}/2$) dipende da C_{ip} o da C_{ig} ($C_{ip} \approx C_{ig} = C_{in}$)

- T_f dipende dalla complessità della funzione NOT(F)

- T_o ($\sim T_{fall}/2$ o $T_{rise}/2$) dipende da C_{op} o da C_{og} ($C_{og} \approx C_{op} = C_{out}$)

- $C_{in} \sim C_{out}$ (il valore dipende dalla tecnologia dell'interruttore)

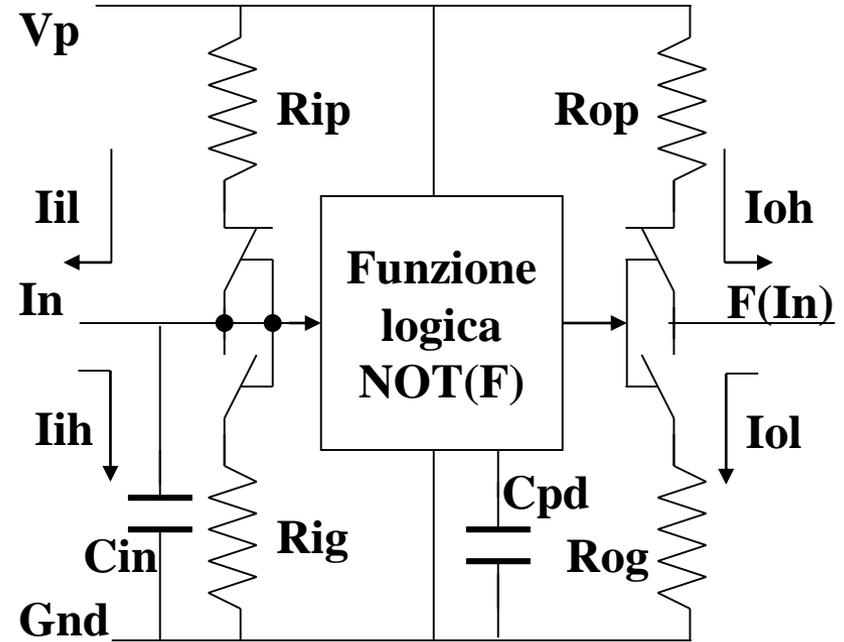
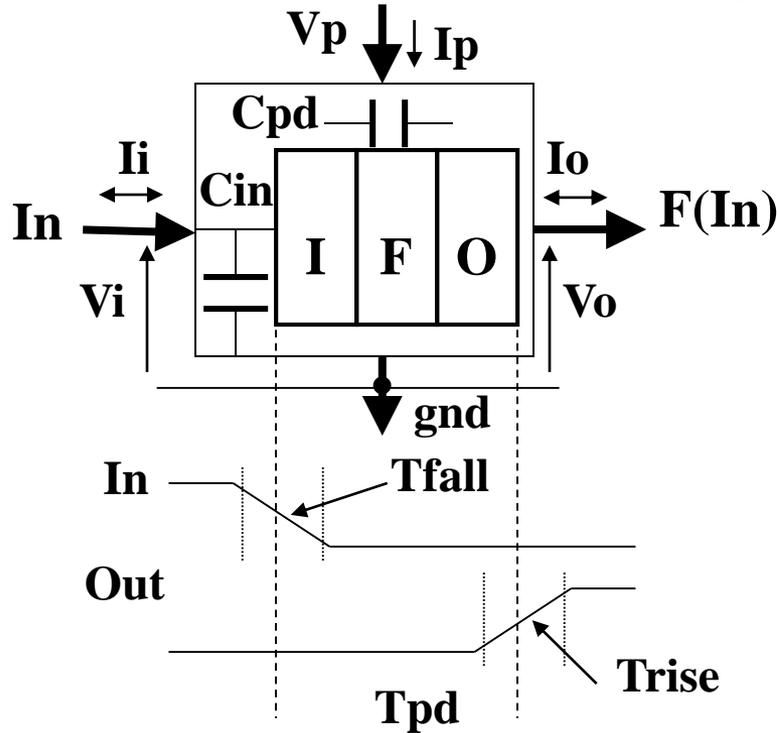
- Ai fini dell'analisi dinamica V_p e gnd sono collegati

E' possibile semplificare il modello



Logica ed Elettronica, logica a interruttori

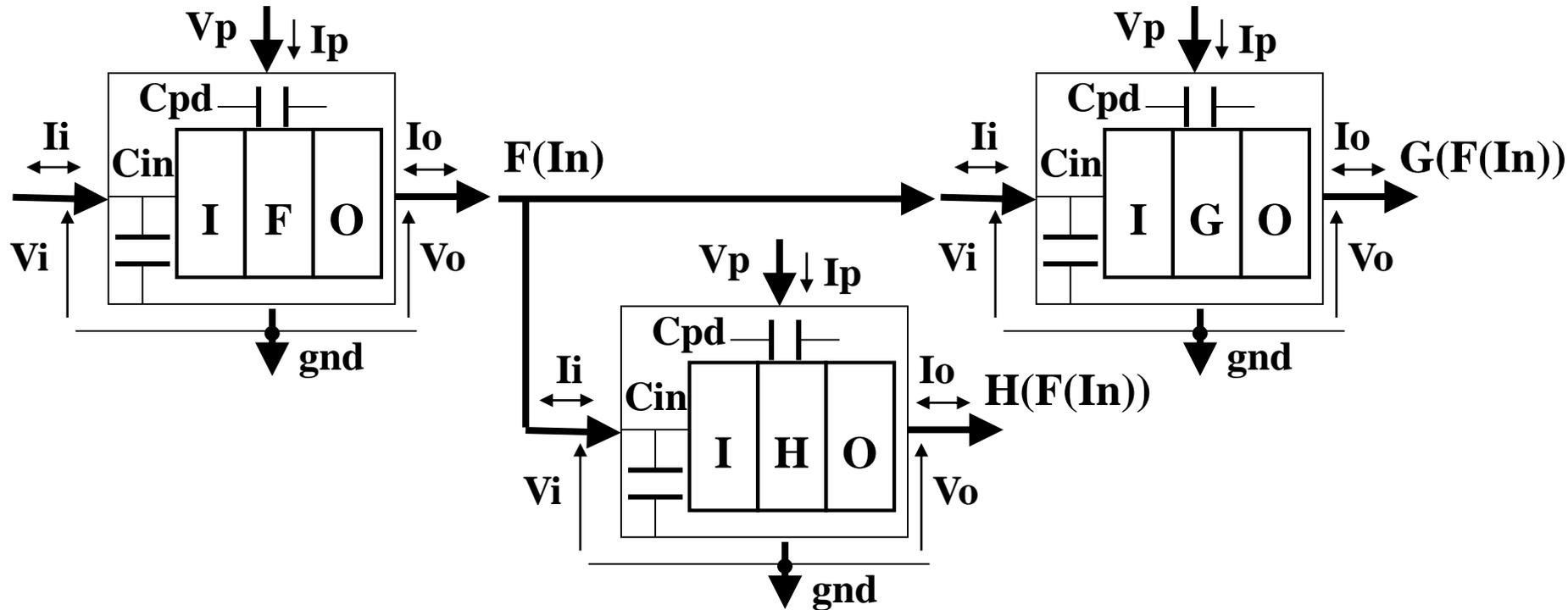
- Modello dinamico del dispositivo (interruttori con ritardi)



- La funzione logica può avere capacità interne (C_{pd})
- C_{out} si considera inglobata in C_{pd}
- Se un dispositivo ne pilota N allora vede una capacità $C_l = N \cdot C_{in}$
- T_o (parte di T_{pd}) dipende da C_l
- Durante la commutazione, I_p carica o scarica C_l e C_{pd} (dissipazione di potenza dinamica)

Logica ed Elettronica, logica a interruttori

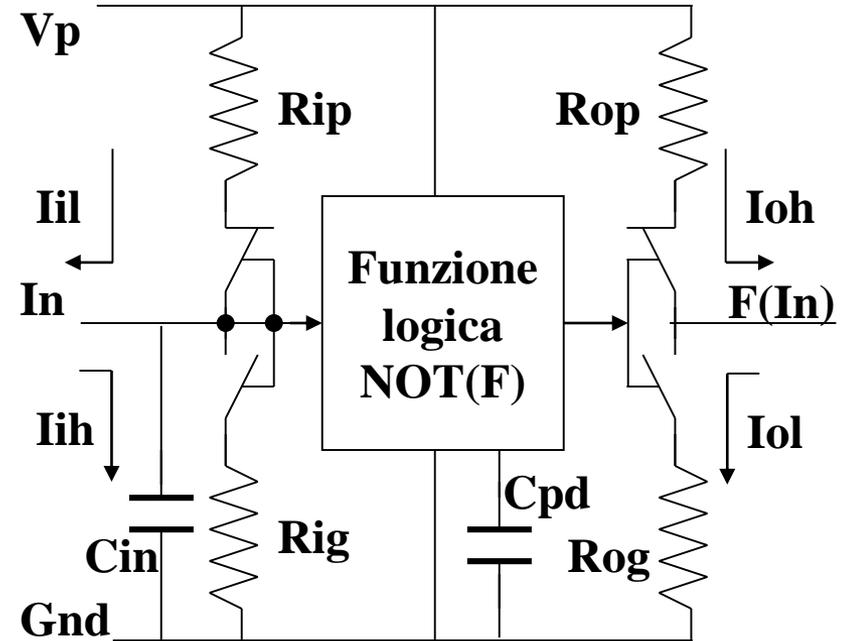
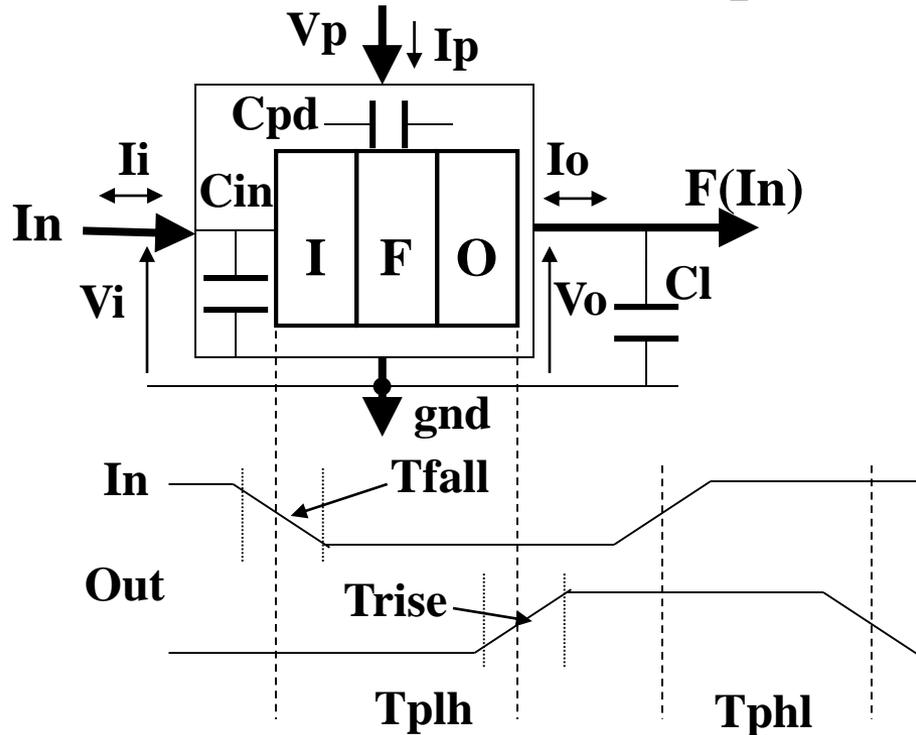
- Modello dinamico del dispositivo, dissipazione di potenza dinamica



- $Cl(F) = C_{in}(G) + C_{in}(H) = \Sigma C_{in}$
- L'energia immagazzinata nella commutazione è $E = Q \cdot V_p / 2$
- $Q = (C_{pd} + Cl) \cdot V_p$ $E = (C_{pd} + Cl) \cdot V_p^2 / 2$
- La potenza P è pari a $2f \cdot E$, dove $2f$ = frequenza delle commutazioni (f = frequenza del segnale)
- La potenza dinamica dissipata è $P = (C_{pd} + Cl) \cdot f \cdot V_p^2$

Logica ed Elettronica, logica a interruttori

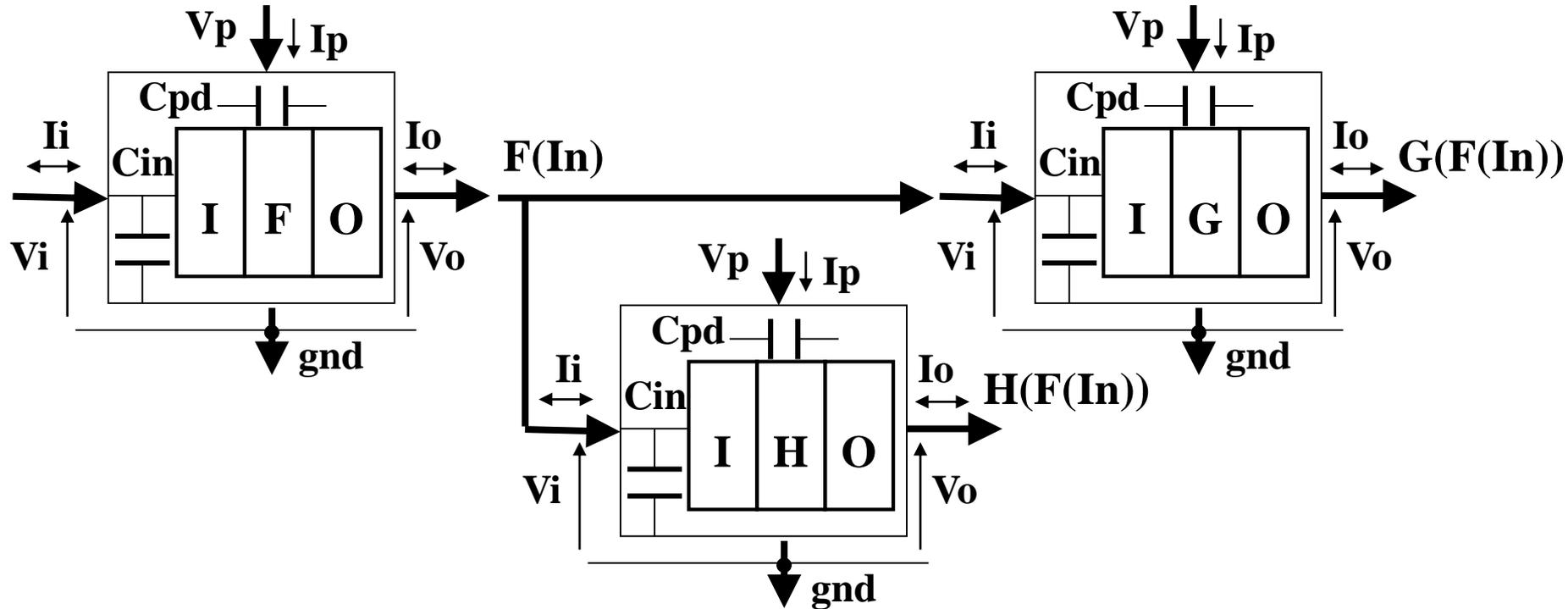
- Modello dinamico del dispositivo, parametri caratteristici



- T_{plh} = tempo di propagazione da ingresso a uscita per una commutazione dell'uscita da basso a alto (@ $C_l=C_{lo}$, $V_p=typ.$, $T=20^\circ C$)
- T_{phl} = tempo di propagazione da ingresso a uscita per una commutazione dell'uscita da alto a basso (@ $C_l=C_{lo}$, $V_p=typ.$, $T=20^\circ C$)
- $T_{phl} = T_i + T_f + T_o = T_i + T_f + T_{fall}/2$
- $T_{plh} = T_i + T_f + T_o = T_i + T_f + T_{rise}/2$
- T_{fall} e T_{rise} sono in genere funzioni lineari di $C_l = \Sigma C_{in}$
- La massima frequenza operativa del circuito $f_{max} \sim (T_{phl}+T_{plh})^{-1}$

Logica ed Elettronica, logica a interruttori

- Modello dinamico del dispositivo, FANOUT dinamico

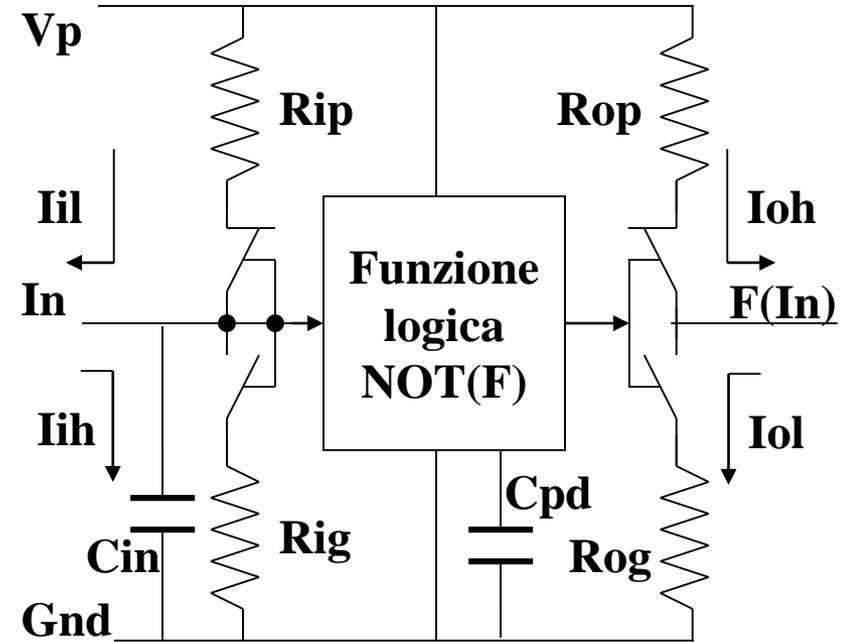


- $C_l = \Sigma C_{in}$, $T_{phl}(/T_{plh}) = T_i + T_f + T_o = T_i + T_f + T_{fall}/2$ ($/T_{rise}/2$)
- I tempi T_{phl} e T_{plh} (typ. e max.) sono dati e garantiti per $C_l = C_{lo}$
- FANOUT dinamico = FANOUTd = numero massimo di carichi senza degrado delle prestazioni = C_{lo}/C_{in}
- Se si eccede FANOUTd “di poco” si può ricalcolare T_o
 - Se T_{fall} e T_{rise} grandi, il segnale sta a lungo nella regione di incertezza

Logica ed Elettronica, logica a interruttori

• Esercizi

• Dati un CMOS ($V_p=5V$, $V_{oh}=4,9V$, $V_{ol}=0,1V$, $V_{ih}=3,5V$, $V_{il}=1,5V$, $I_{il}=I_{ih}=1\mu A$, $I_{ol}=I_{oh}=4mA$), calcolare i valori di R_{ip} , R_{ig} , R_{op} , R_{og}

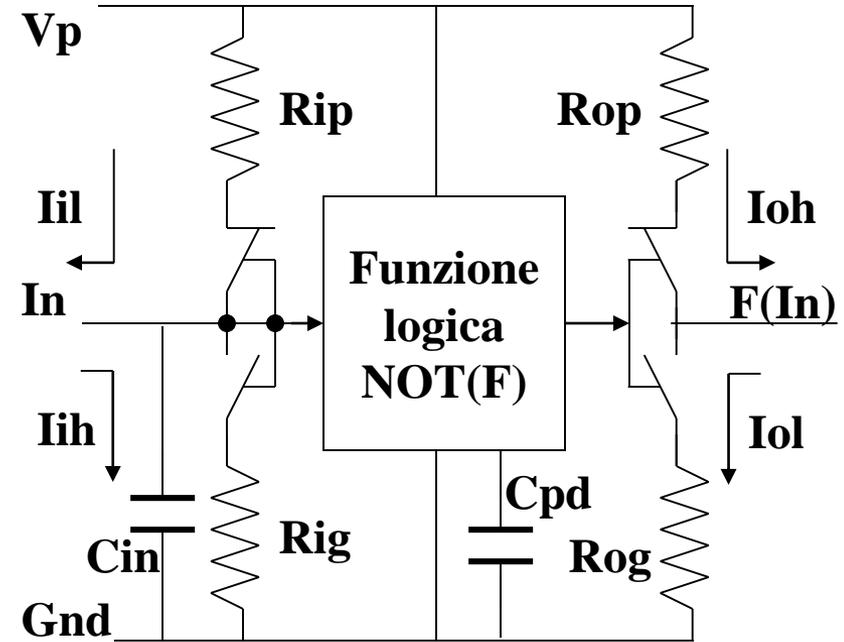


- Il dimensionamento delle resistenze di ingresso deve garantire che per nessun valore di tensione ammissibile la corrente di ingresso superi il valore massimo
- $I_{il} \geq (V_p - V_{in})/R_{ip}$ ma $0 < V_{in} < V_{il}$ da cui $R_{ip} \geq (V_p - V_{in})/I_{il}$ per ogni $V_{in} = "0"$ quindi $R_{ip} \geq (V_p - V_{il, \min})/I_{il}$ ossia $R_{ip} = 5M\Omega$
- Analogamente $I_{ih} \geq V_{in}/R_{ig}$ ma $V_{ih} < V_{in} < V_p$ ossia $R_{ig} \geq V_p/I_{ih}$ ossia $R_{ig} = 5M\Omega$
- Il dimensionamento delle resistenze di uscita deve garantire che per V_{oh} si abbia corrente I_{oh} e per V_{ol} si abbia corrente I_{ol}
- $(V_p - V_{oh})/R_{op} = I_{oh}$ e $V_{ol}/R_{og} = I_{ol}$ ossia $R_{op} = R_{og} = 25 \Omega$
- Il CMOS ha basse resistenze di uscita e alte resistenze di ingresso

Logica ed Elettronica, logica a interruttori

• Esercizi

• Dati un TTL ($V_p=5V$, $V_{oh}=2,7V$, $V_{ol}=0,5V$, $V_{ih}=2,0V$, $V_{il}=0,8V$, $I_{il}=0,4mA$, $I_{ih}=20\mu A$, $I_{ol}=8mA$, $I_{oh}=0,4mA$), calcolare i valori di R_{ip} , R_{ig} , R_{op} , R_{og}



- Il dimensionamento delle resistenze di ingresso deve garantire che per nessun valore di tensione ammissibile la corrente di ingresso superi il valore massimo
- $I_{il} \geq (V_p - V_i)/R_{ip}$ ma $0 < V_i < V_{il}$ da cui $R_{ip} \geq (V_p - V_i)/I_{il}$ per ogni V_i
quindi $R_{ip} \geq (V_p - V_{il, \min})/I_{il} = (V_p - 0)/I_{il} = 5V/0,4mA$ ossia $R_{ip} = 12,5k\Omega$
- Analogamente $I_{ih} \geq V_i/I_{ih}$ ma $V_{ih} < V_i < V_p$ ossia $R_{ig} \geq V_p/I_{ih}$ ossia $R_{ig} = 250k\Omega$
- Il dimensionamento delle resistenze di uscita deve garantire che per V_{oh} si abbia corrente I_{oh} e per V_{ol} si abbia corrente I_{ol}
- $(V_p - V_{oh})/R_{op} = I_{oh}$ e $V_{ol}/R_{og} = I_{ol}$ ossia $R_{op} = 5,75k\Omega$ e $R_{og} = 62,5\Omega$
- Il TTL ha resistenze di uscita inferiori alle resistenze di ingresso

Logica ed Elettronica, logica a interruttori

• Esercizi (modello ideale)

• Calcolare i parametri statici a vuoto del dispositivo (modello in figura, perdite e rumore nulli)

- $R_{ip}=R_{ig}=20k\Omega$, $R_{op}=R_{og}=1k\Omega$
- $V_p = 5V$

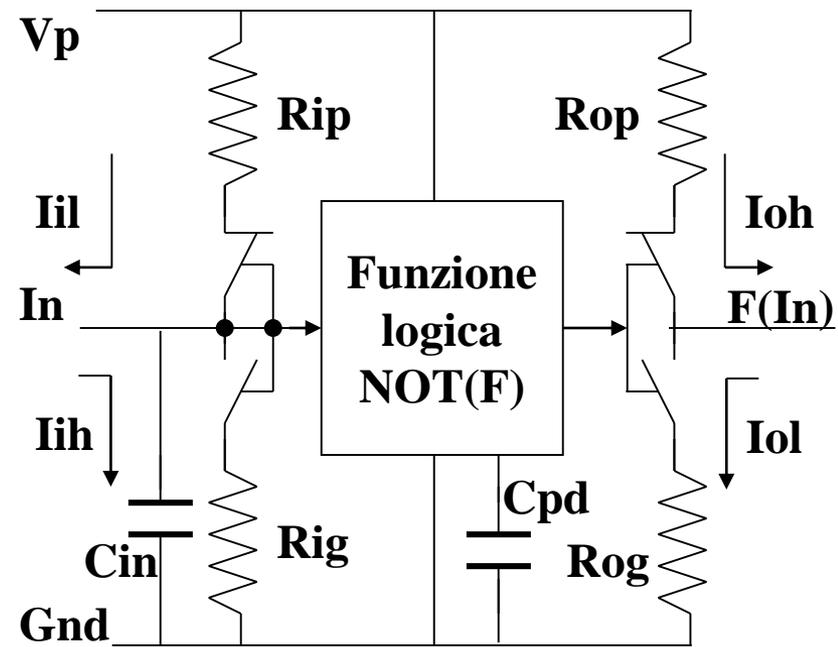
• A vuoto $I_{ol}=I_{oh}=0$ e quindi $V_{oh}=V_p$ e $V_{ol}=Gnd$

• Se applico in ingresso $V_{ih}=V_{oh}$ (rumore nullo) allora $I_{ih} = V_{ih}/R_{ig} = 0,25mA$ (analogamente $I_{il} = (V_p-V_{il})/R_{ip} = 0,25mA$)

• Nota: I_{ih} e I_{il} sono comunque i valori max.

• La dissipazione di potenza statica è nulla in quanto lo stadio funzionale non ha perdite ed è in logica complementare e lo stadio di uscita è a vuoto

• A vuoto, senza rumore e senza perdite il modello ha parametri statici di uscita ideali



Logica ed Elettronica, logica a interruttori

• Esercizi (correnti di perdita, rumore)

• Parametri statici a vuoto del dispositivo (corrente di perdita $I_l = 1\mu\text{A}$ -interruttore aperto-, rumore V_n di tensione = $\pm 0,1\text{ V}$)

- $R_{ip}=R_{ig}=20\text{k}\Omega$, $R_{op}=R_{og}=1\text{k}\Omega$
- $V_p = 5\text{V}$

• A vuoto $I_{ol}=I_{oh}=0\text{ ma}$, a causa di I_l , $V_{oh} = V_p - I_l \cdot R_{op} = 4,999\text{V}$ e $V_{ol} = I_l \cdot R_{og} = 1\text{mV}$

• **NOTA:** $(R_{SW\ open} + R_{op} + R_{og}) \cdot I_l = V_p$

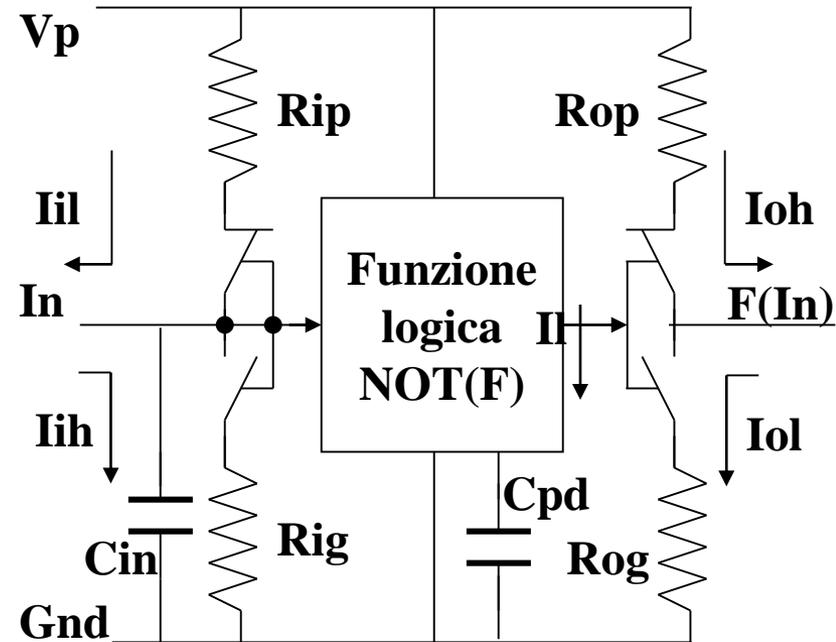
• Se ho in ingresso $V_{ih} = V_{oh} \pm 0,1\text{V} = 4,899\text{V}$ allora

$I_{ih} = V_{ih} / R_{ig} < 0,25\text{mA}$ ($I_{ih} = I_{il} = 0,25\text{mA}$)

(nota: sarebbe $I_{ih} = I_l + (V_{ih} / R_{ig})$ ma I_l è trascurabile)

• Dissipazione di potenza statica $\sim V_p \cdot I_l \sim 5\ \mu\text{W}$

• Le correnti di perdita e il rumore in tensione influiscono poco sullo stadio di uscita



Logica ed Elettronica, logica a interruttori

• Esercizi (effetto dei carichi)

• Calcolare i parametri statici con 2 carichi del dispositivo (modello in figura, $I_l = 1\mu\text{A}$, $V_n = \pm 0,1\text{ V}$)

- $R_{ip}=R_{ig}=20\text{k}\Omega$, $R_{op}=R_{og}=1\text{k}\Omega$
- $V_p = 5\text{V}$

• $I_{il} = I_{ih} = 0,25\text{mA}$

• $I_{ol} = 2I_{il} = 0,5\text{mA}$, $I_{oh} = 2I_{ih} = 0,5\text{mA}$

• $V_{oh} = V_p - (I_l + I_{oh}) \cdot R_{op} \approx 4,5\text{V}$

• $V_{ol} = (I_l + I_{ol}) \cdot R_{og} \approx 0,5\text{V}$

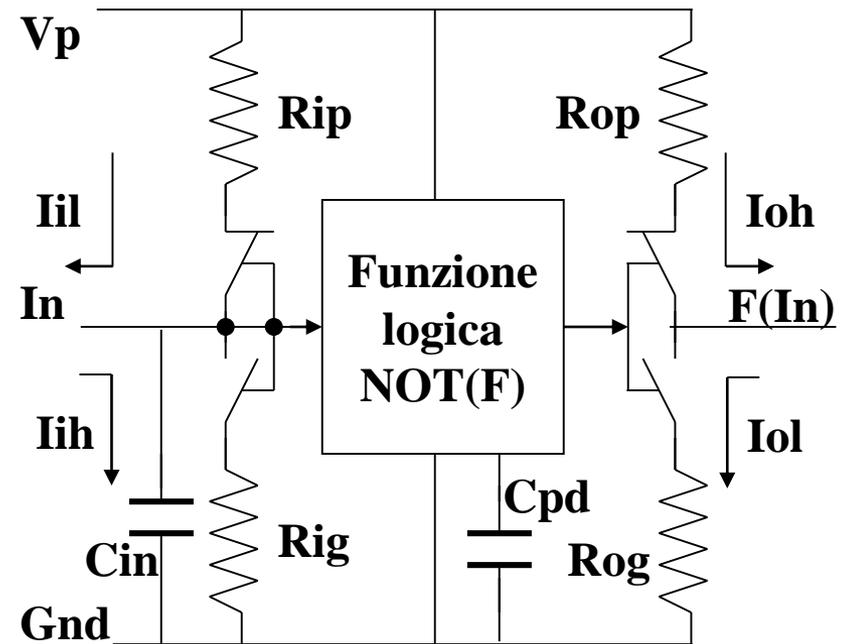
• $V_{ih} = V_{oh} \pm 0,1 \approx 4,4\text{V}$

• $V_{il} = V_{ol} \pm 0,1 \approx 0,6\text{V}$

• Dissipazione di potenza statica dello stadio funzionale $\sim V_p \cdot I_l \sim 5\mu\text{W}$

• Lo stadio di uscita scambia I_{oh}/I_{ol} e quindi assorbe/eroga dall'alimentazione $\sim V_p \cdot I_{oh} \sim 2,5\text{mW}$. Tale potenza si considera potenza di “interfacciamento”

• I carichi possono influire molto sulle caratteristiche statiche di uscita



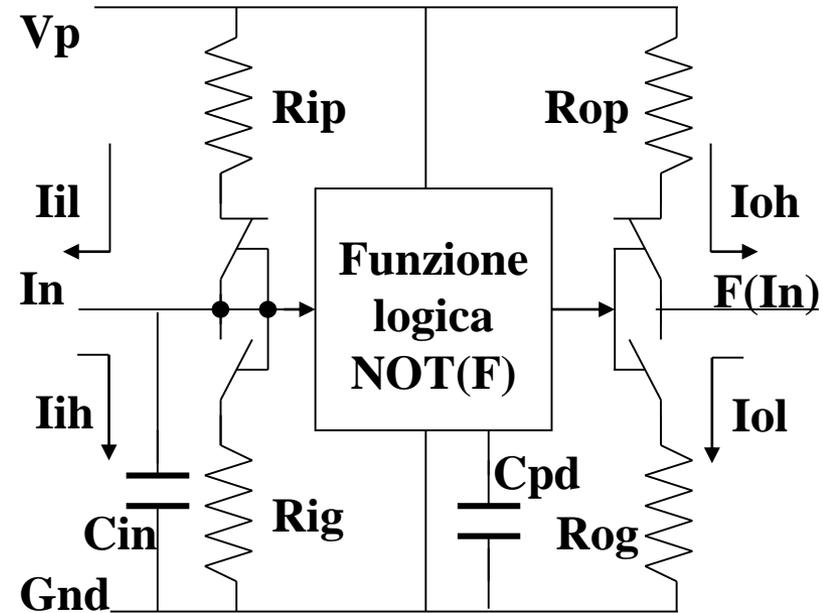
Logica ed Elettronica, logica a interruttori

• Esercizi (FANOUT impossibili)

• Dato il modello in figura ($V_p=5V$), si dimensionino R_{ig} e R_{ip} così da avere $I_{ih}=I_{il}=0,1mA$

• Supponendo $R_{op}=R_{og}=1k\Omega$, FANOUT=10 e immunità al rumore pari a $0,1V$, si calcolino i rimanenti parametri statici di segnale

• Cosa sarebbe successo se avessi ipotizzato FANOUT=50?



• I_{il} e I_{ih} sono i valori massimi, che si hanno quando in ingresso si applica Gnd o V_p .

Si ha: $I_{ih} = V_{ih}/R_{ig} < V_p/R_{ig} = 0,1mA$

$I_{il} = (V_p - V_{il})/R_{ip} < V_p/R_{ip} = 0,1mA$

$R_{ig} = 50k\Omega$

$R_{ip} = 50k\Omega$

• I rimanenti parametri statici di segnale sono:

$I_{oh} = N \cdot I_{ih} = 10 \cdot I_{ih} = 1mA$,

$V_{oh} = V_p - (I_{oh} \cdot R_{op}) = 5 - 1 = 4V$

$V_{ih} = V_{oh} \pm 0,1 = 3,9V$

$I_{ol} = N \cdot I_{il} = 10 \cdot I_{il} = 1mA$

$V_{ol} = I_{ol} \cdot R_{og} = 1V$

$V_{il} = V_{ol} \pm 0,1 = 1,1V$

• Se avessi ipotizzato FANOUT=50 si sarebbe avuto:

$I_{oh} = N \cdot I_{ih} = 50 \cdot I_{ih} = 5mA$,

$V_{oh} = V_p - (I_{oh} \cdot R_{op}) = 5 - 5 = 0V!!!$

$I_{ol} = N \cdot I_{il} = 50 \cdot I_{il} = 5mA$

$V_{ol} = I_{ol} \cdot R_{og} = 5V!!!$

Ma è impossibile ottenere $V_{oh} < V_{ol}$ quindi non è possibile avere FANOUT=50

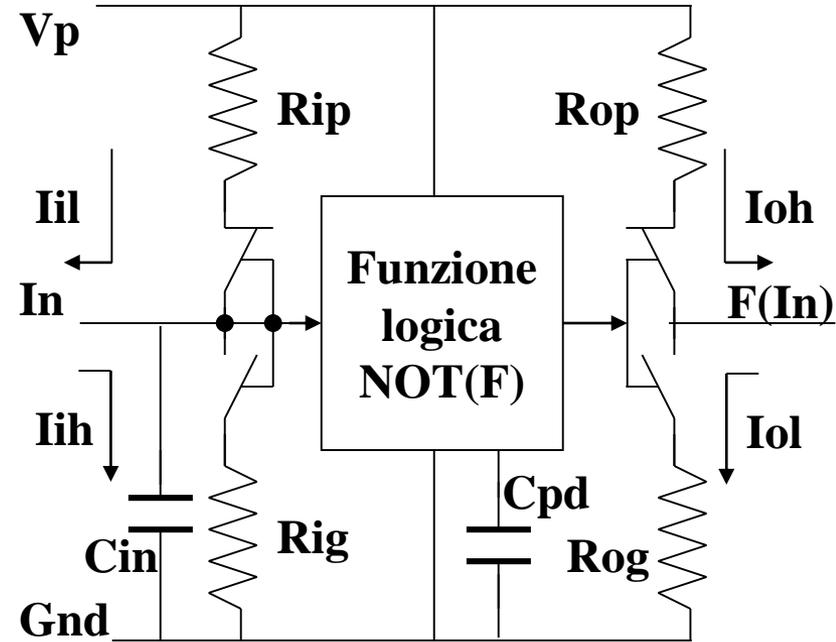
Logica ed Elettronica, logica a interruttori

- Esercizi (caratteristiche dinamiche)
- Calcolare i parametri dinamici a vuoto del dispositivo ipotizzando un'onda quadra in ingresso $f=10\text{MHz}$ ($I_l=1\mu\text{A}$, $V_n=\pm 0,1\text{V}$)
 - $R_{ip}=R_{ig}=20\text{k}\Omega$, $R_{op}=R_{og}=1\text{k}\Omega$
 - $V_p = 5\text{V}$, $C_{in}=10\text{pF}$, $C_{pd}=20\text{pF}$
 - $T_{rise,typ}=T_{fall,typ} = 1\text{ns}+(40\text{ps/pF})\cdot C_l$
 - $T_{phl,typ}=T_{plh,typ}=8\text{ ns } (@ C_{lo} = 50\text{pF})$
 - $T_{phl,max}=T_{plh,max}=10\text{ ns } (@ C_{lo}= 50\text{pF})$

- $T_{phl} = T_i + T_f + T_o = T_i + T_f + T_{fall}/2$
- $T_{plh} = T_i + T_f + T_o = T_i + T_f + T_{rise}/2$
- A vuoto $C_l=0\text{pF}$ e, dato che $C_l < C_{lo}$, valgono gli stessi valori massimi. Per i valori tipici $T_{rise}=T_{fall}=1\text{ns}$ e

$$T_{phl,typ}=T_{plh,typ}=8\text{ns}-1,5\text{ns}+0,5\text{ns}=7\text{ns}$$

- La dissipazione di potenza dinamica è pari a $V_p^2 \cdot f \cdot (C_l + C_{pd}) = V_p^2 \cdot f \cdot C_{pd} = 5\text{mW}$



FANOUT_d = $C_{lo}/C_{in} = 5$
(numero max di carichi senza degrado delle prestazioni)

Logica ed Elettronica, logica a interruttori

• Esercizi (FANOUT dinamico)

- Calcolare i parametri dinamici con **N** carichi del dispositivo con un'onda quadra in ingresso $f=10\text{MHz}$

- $V_p = 5\text{V}$, $C_{in}=10\text{pF}$, $C_{pd}=20\text{pF}$
- $T_{rise,typ} = T_{fall,typ} = 1\text{ns} + (40\text{ps/pF}) \cdot C_l$
- $T_{phl,typ} = T_{plh,typ} = 8\text{ ns } (@ C_{lo} = 50\text{pF})$
- $T_{phl,max} = T_{plh,max} = 10\text{ ns } (@ C_{lo} = 50\text{pF})$

- $T_{phl} = T_i + T_f + T_o = T_i + T_f + T_{fall}/2$

- $T_{plh} = T_i + T_f + T_o = T_i + T_f + T_{rise}/2$

- Con **N** carichi, $C_l = N \cdot C_{in}$ da cui $T_{rise,typ} = T_{fall,typ} = 1\text{ns} + (40\text{ps/pF}) \cdot C_l = 1\text{ns} + 0,4\text{ns} \cdot N$

- $T_{phl,typ}(C_l) = T_{plh,typ}(C_l) = 8\text{ns} - 0,5T_{rise,typ} @ C_{lo} + 0,5T_{rise,typ} @ C_l = 7\text{ns} + 0,2\text{ns} \cdot N$

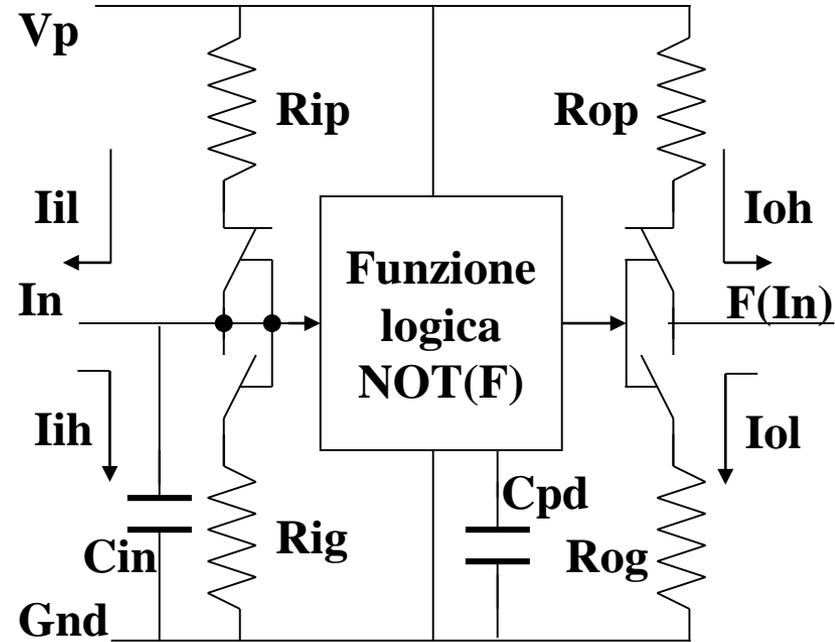
- $FANOUT_d = C_{lo}/C_{in} = 5$.

- Se $N \leq 5$ i valori massimi rimangono invariati

- Se $N > 5$ I valori massimi si ricalcolano in proporzione $T_{phl,max}(C_l)/T_{phl,max}(C_{lo}) = T_{phl,typ}(C_l)/T_{phl,typ}(C_{lo})$ e analogamente per T_{plh} .

- **ATTENZIONE!** Il tempo di permanenza del segnale nella zona di incertezza ($=V_{ih}-V_{il}$), pari a circa $0,5 \cdot T_{fall}$, deve essere minore del tempo di reazione (tempi tipici @ C_{lo}). Si deve avere $0,5\text{ns} + 0,2\text{ns} \cdot N < 8\text{ns}$ per cui, in questo caso, $N < 38$

- La dissipazione di potenza dinamica è pari a $V_p^2 \cdot f \cdot (C_l + C_{pd}) = V_p^2 \cdot f \cdot (N \cdot C_{in} + C_{pd})$

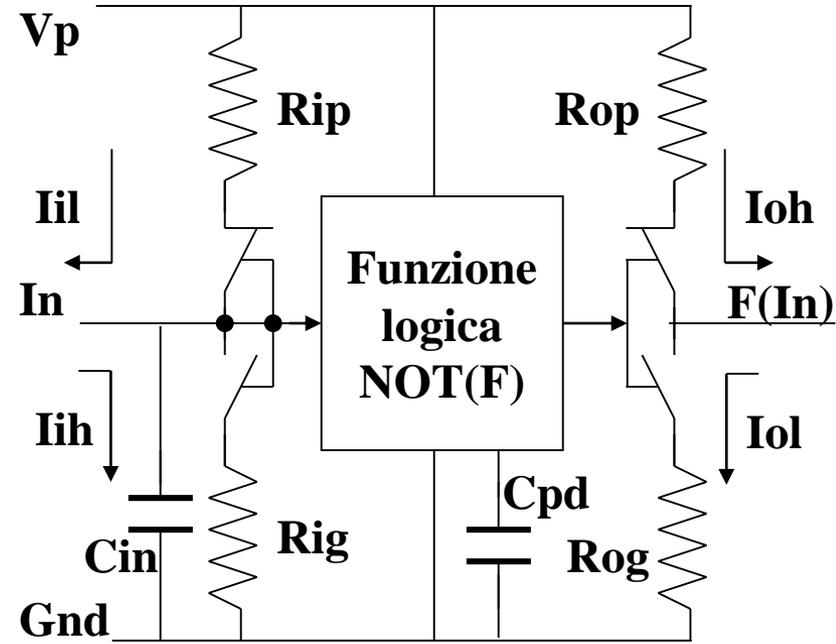


Logica ed Elettronica, logica a interruttori

•Esercizi (FANOUT dinamico)

• Un dispositivo con il modello indicato in figura ne pilota due uguali. Nel caso in cui $V_p=3.3V$, $I_l=1nA$, $C_{pd}=20pF$ e $C_{in}=10pF$, e $T_{phl}=T_{plh}=10ns$ ($@C_l=50pF$, $V_p=3,3V$, $T=20^\circ C$), si calcoli il FANOUTd residuo, qual è la massima frequenza di funzionamento e il relativo consumo.

Cosa cambia se connesso al pilota ulteriori 8 dispositivi uguali?



• $FANOUTd = C_{lo}/C_{in} = 5$, tuttavia, dato che 2 dispositivi sono già presenti, il FANOUTd residuo è 3

• Dato che il FANOUTd è rispettato, $T_{phl} = T_{plh} = 10ns$ e $F_{max} \sim 1/(T_{phl}+T_{plh}) = 50MHz$

• La dissipazione di potenza è interamente dinamica (dissipazione statica = $3.3nW$) ed è pari a $V_p^2 \cdot f \cdot (C_l + C_{pd}) = V_p^2 \cdot f \cdot (N \cdot C_{in} + C_{pd}) = 544,5M(20pF + 20pF) = 21,78mW$

• Nel caso di ulteriori 8 dispositivi si viola FANOUTd e si devono ricalcolare T_{phl} e T_{plh} (non disponendo delle leggi di T_{rise} e T_{fall} si suppone un contributo al 50%)
 $T_{phl} = T_{plh} = 5ns + (5ns \cdot 100pF / 50pF) = 15ns$ da cui $F_{max} \sim 33MHz$

La potenza dinamica diventa $359,4M(100pF + 20pF) = 43,12mW$

Logica ed Elettronica, logica a interruttori

•Esercizi (FANOUT e FANOUTd)

• Dato il circuito in figura, con i seguenti valori:

$$R_{ip}=R_{ig}=20k\Omega, R_{op}=R_{og}=1k\Omega$$

$$V_p = 5V, C_{in}=10pF, C_{pd}=20pF$$

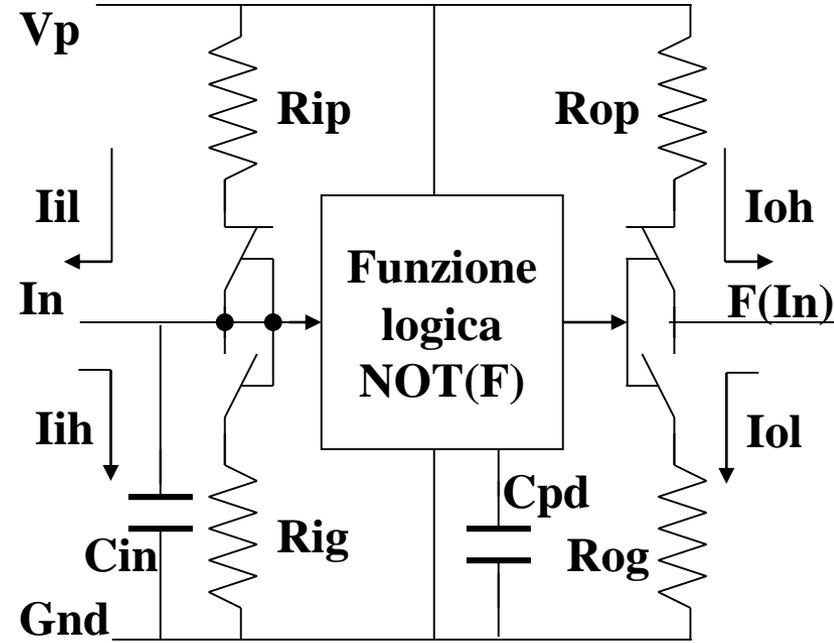
$$T_{rise,typ}=T_{fall,typ}= 1ns+(40ps/pF)*C_l$$

$$T_{phl,typ}=T_{plh,typ}=8 ns (@ C_{lo} = 50pF)$$

$$T_{phl,max}=T_{plh,max}=10 ns (@ C_{lo}= 50pF), \text{ si calcoli:}$$

• Il FANOUT per $V_{oh}=4,5V$ $V_{ol}=0,5V$ e FANOUTd

• Le caratteristiche dinamiche a vuoto e con 10 carichi, nel qual caso si calcoli la potenza dinamica media e massima se il dispositivo è sollecitato con un segnale periodico ($T=100ms$) che per il 20% è a 10MHz e per il restante 80% a 1MHz.



• Fanout: $I_{il}=V_p/R_{ip}=0,25mA$ $I_{ih}=V_p/R_{ig}=0,25mA$ $I_{ol}=V_{ol}/R_{og}=0,5mA$ $I_{oh}=(V_p-V_{oh})/R_{og}=0,5mA$

FANOUT= $\min(I_{oh}/I_{ih}, I_{ol}/I_{il})=2$ FANOUTd = $C_{lo}/C_{in} = 5$

• Caratteristiche dinamiche a vuoto $C_l=0pF$ e, dato che $C_l < C_{lo}$, valgono gli stessi valori massimi. Per i valori tipici si ha: $T_{rise}=T_{fall}=1ns$ e $T_{phl,typ}=T_{plh,typ}=8ns-1,5ns+0,5ns=7ns$

• Con 10 carichi NON E' GARANTITO IL FUNZIONAMENTO A CAUSA DEL FANOUT STATICO!
(Se invece il FANOUT statico fosse stato rispettato con 10 carichi, allora $C_l = 100 pF$

e si avrebbe: $T_{rise}=T_{fall}=1ns+4ns=5 ns$ per cui: $T_{phl,typ}=T_{plh,typ}=8ns-1,5ns+2,5ns=9ns$
Per i tempi massimi, ricalcolando in proporzione, si avrebbe $T_{phl,max} = T_{plh,max} = 11,25 ns$)

• La frequenza media (media pesata) è pari a 2,8MHz, per cui si ha

$$P_{media} = 25V^2 * 2,8MHz * 120pF = 8,4mW$$

$$P_{max} = 25V^2 * 10MHz * 120pF = 30mW$$