



# Fondamenti di Elettronica Digitale

**Alessandra Flammini**  
**[alessandra.flammini@ing.unibs.it](mailto:alessandra.flammini@ing.unibs.it)**  
**Ufficio 24 Dip. Ingegneria dell'Informazione**  
**030-3715627 Lunedì 16:30-18:30**

# Programma del corso

Fondamenti di elettronica digitale (Prof.ssa A. Flammini)

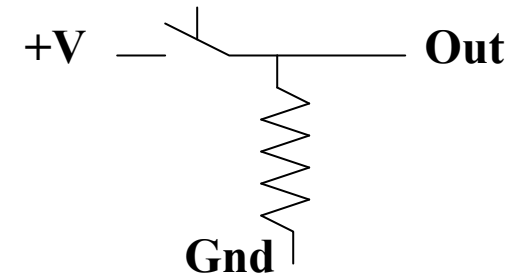
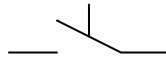
- Famiglie logiche bipolari e CMOS
- Evoluzioni delle famiglie logiche
- Memorie: cenni
- Circuiti e dispositivi logici combinatori e sequenziali
- Dispositivi logici programmabili (SPLD, CPLD, FPGA)
- Uso del linguaggio VHDL
- Sistemi di conversione analogico/digitale e digitale/analogico: cenni

# Logiche a interruttori

# Logica ed Elettronica, logiche elementari

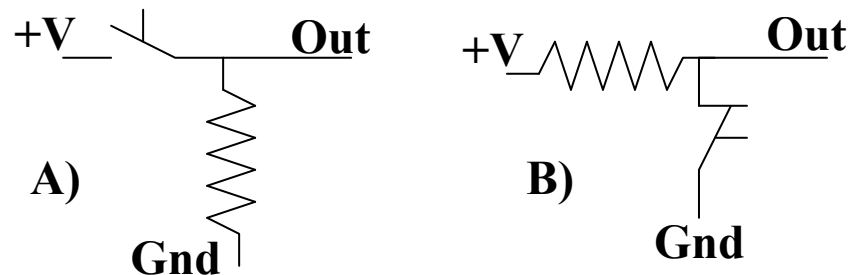
- Logica binaria

- (“0”, “1”), (spento, acceso), (assenza, presenza), interruttore



- Logica attiva alta e attiva bassa

### Logica di uscita attiva alta

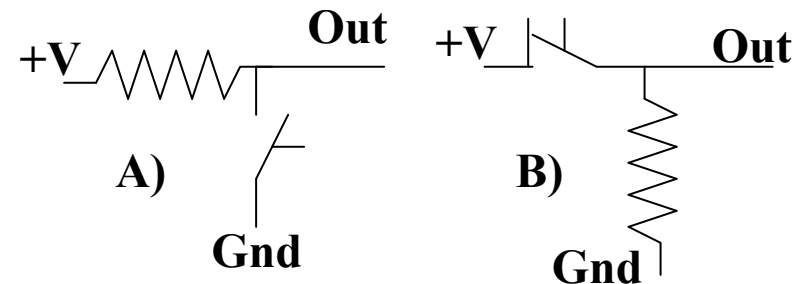


Azione = “chiudo switch” -> Out=“1”

A) “1” forte, “0” debole (I dipende da R)

B) “0” forte, “1” debole (I dipende da R)

### Logica di uscita attiva bassa



Azione = “chiudo switch” -> Out=“0”

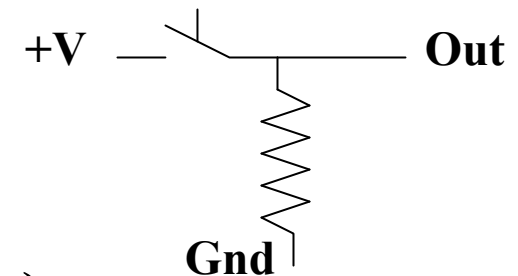
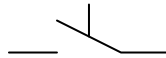
A) “0” forte, “1” debole (I dipende da R)

B) “1” forte, “0” debole (I dipende da R)

# Logica ed Elettronica, logiche elementari

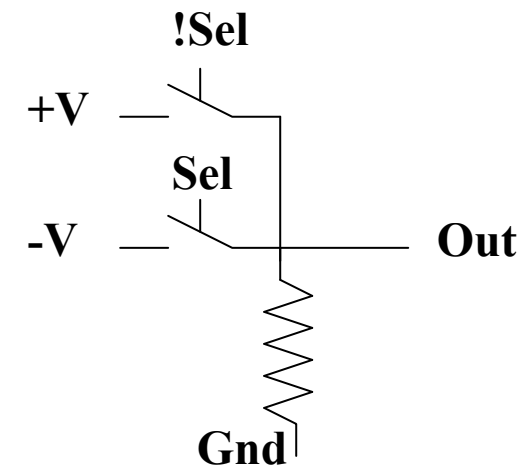
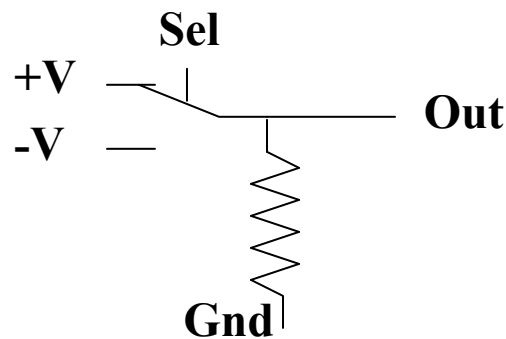
- **Logica binaria**

- (“0”, “1”), (spento, acceso), (assenza, presenza), interruttore



- **Logica bipolare (sottocaso della logica binaria)**

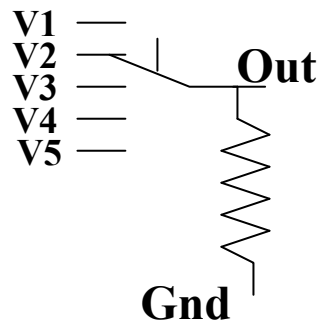
- (“-1”, “+1”), (“destra”, “sinistra”), deviatore a 2 poli
- un deviatore si realizza con due interruttori
- in un deviatore scorre sempre corrente



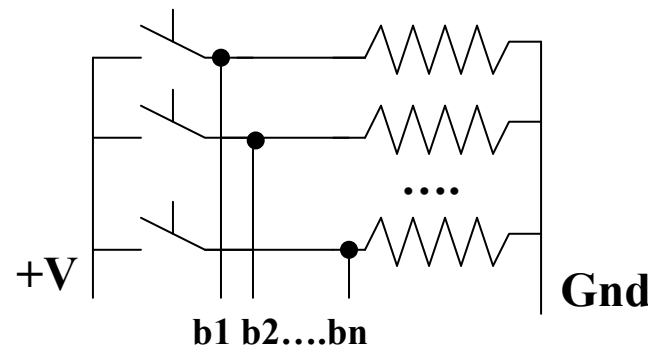
**Logica attiva alta o attiva bassa?**

# Logica ed Elettronica, logiche complesse

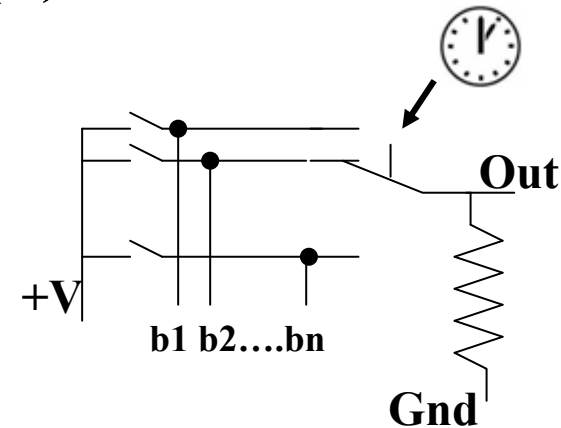
- **Logica multilivello**
  - (“0”, “1”, “2”, ...”n”), simbolo a  $n$  valori, deviatore a  $n$  poli
- **Logica parallela**
  - codifica istantanea di  $n$  logiche binarie indipendenti (tanti interruttori)
- **Logica seriale**
  - codifica sequenziale, cadenzata nel tempo, di  $n$  logiche binarie elementari (tanti interruttori sequenziati nel tempo)



Multilivello



Parallela



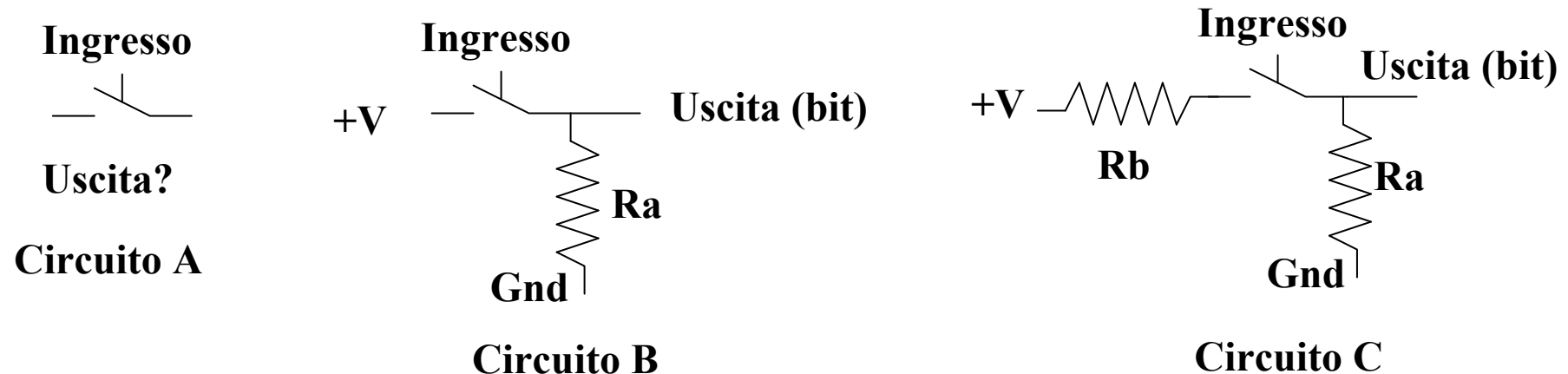
Seriale

- **Esempio: Gigabit Ethernet 1000BaseT**
  - 4 fili (doppini) a 5 livelli ( $5^4 = 625$  codici) a 125Mbaud (PAM-5)

# Logica ed Elettronica, logiche elementari

## Logica binaria

- (“0”, “1”), (spento, acceso), (assenza, presenza), interruttore



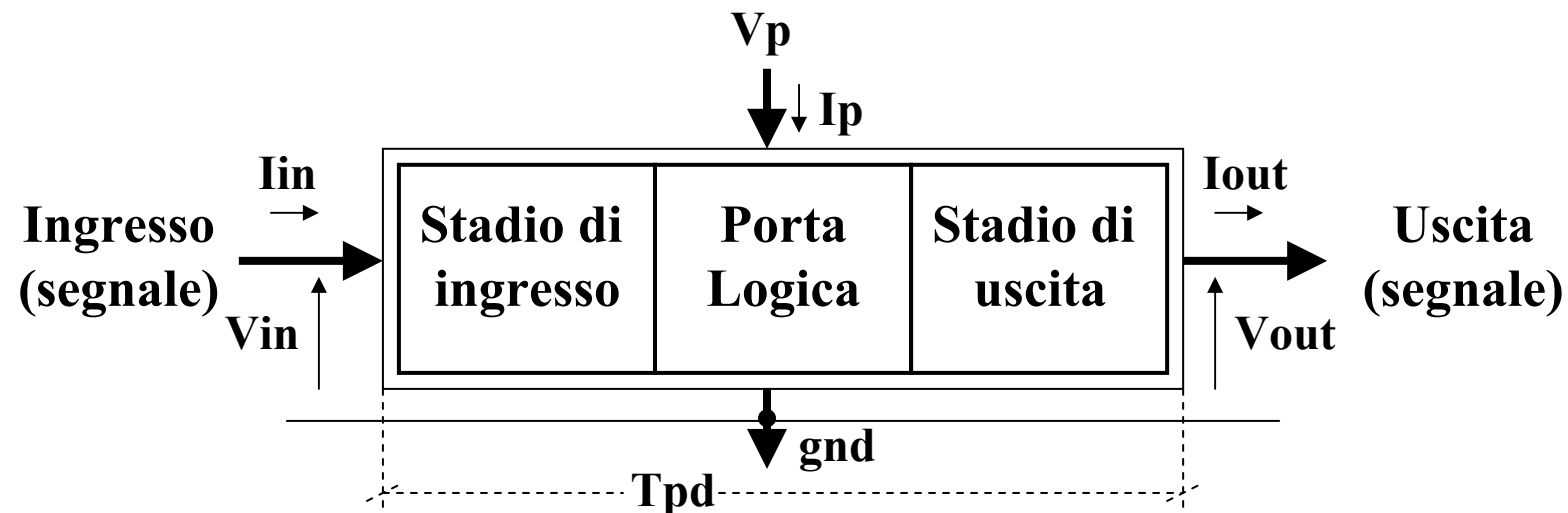
- Nel circuito A non c'è alimentazione e non c'è uscita:
- Nel circuito B c'è alimentazione ( $+V$ ,  $gnd$ ) e un'uscita in tensione
  - A cosa serve la resistenza  $R_a$ ?
  - Quando si può dire che l'uscita è a “0” e quando è a “1”?
- Nel circuito C appare la resistenza  $R_b$  dell'interruttore
  - Perché è necessario che  $R_b \ll R_a$ ?
  - L'uscita varia “circa” tra  $+V$  e  $gnd$  ma con quali correnti?

# Logica ed Elettronica, logiche elementari

- **La logica binaria tratta un trasferimento di informazioni**
  - Il modello comportamentale è una tabella della verità (Look-up Table, LUT)



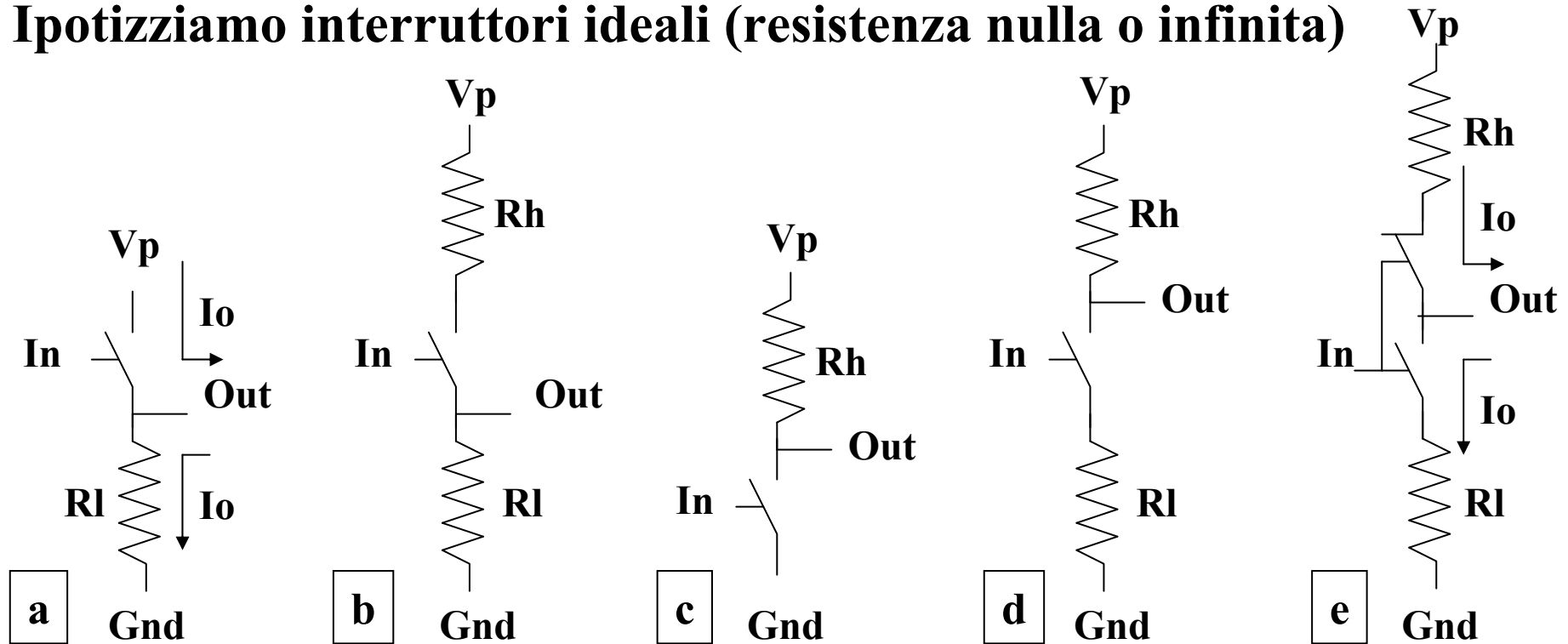
- **L'elettronica digitale tratta un trasferimento di segnali elettrici**
  - Il modello comportamentale è molto più complesso (correnti, tensioni, ritardi di propagazione, il concetto di alimentazione)





# Logica ed Elettronica, logica a interruttori

- Ipotizziamo interruttori ideali (resistenza nulla o infinita)

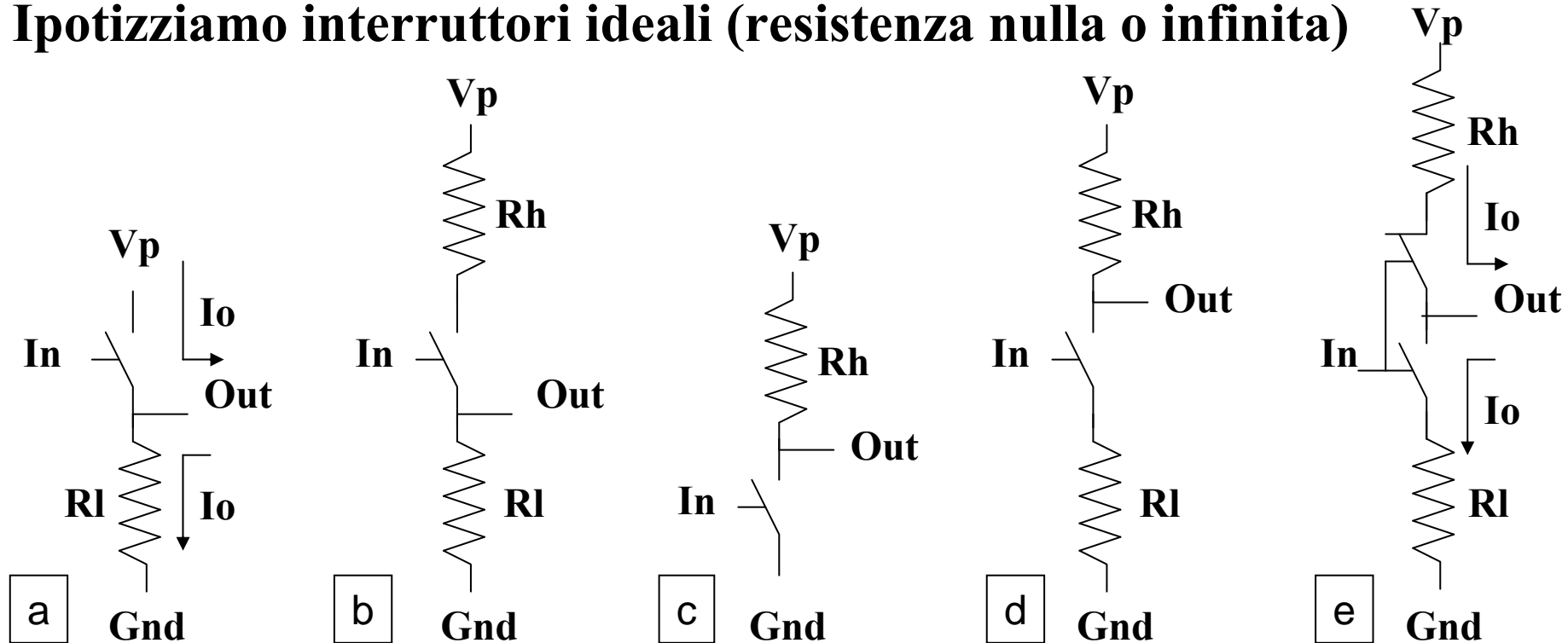


<b>a</b>	Identità, “1” forte ( $V_o = V_p$ , $I_o$ infinita), “0” debole ( $V_o = R_l \cdot I_o$ )
<b>b</b>	Identità, “1” meno forte ( $V_o = (V_p - I_o \cdot R) / 2$ se $R_l = R_h = R$ , ma $V_o = V_p / 2$ se $I_o = 0$ ), “0” come <b>a</b>
<b>c</b>	NOT, “0” forte ( $V_o = \text{gnd}$ , $I_o$ infinita), “1” debole ( $V_o = V_p - R_h \cdot I_o$ )
<b>d</b>	NOT, “0” meno forte ( $V_o = (V_p + I_o \cdot R) / 2$ se $R_l = R_h = R$ , ma $V_o = V_p / 2$ se $I_o = 0$ ), “1” come <b>c</b>
<b>e</b>	NOT, “1” “0” simmetrici se $R_l = R_h$ ( $V_o = R_l \cdot I_o$ se $\text{Out} = \text{“0”}$ , $V_o = V_p - R_h \cdot I_o$ se “1”)

Un livello di uscita è “forte” se la tensione di uscita dipende poco dal numero dei carichi ( $I_o$ )

# Logica ed Elettronica, logica a interruttori

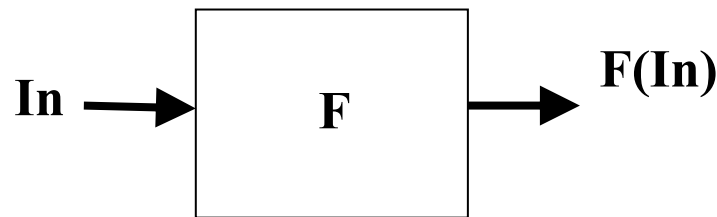
- Ipotizziamo interruttori ideali (resistenza nulla o infinita)



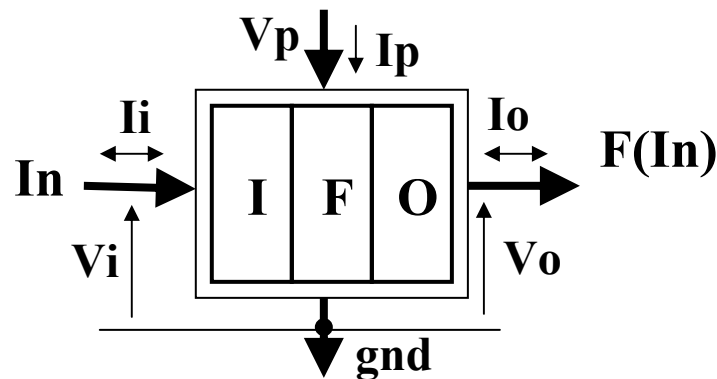
- Negli schemi a interruttori, anche con interruttori ideali,
  - la tensione di uscita dipende dalla corrente di uscita  $I_o$  (a “0” e/o a “1”)
  - $I_o$  è erogata dal dispositivo (Out=“1”) o assorbita (Out=“0”)
  - $I_o$  corrisponde circa alla somma delle correnti  $I_{L_i}$  richieste dai “carichi”  $L_i$
  - i “carichi” sono altri dispositivi digitali -> modello dello stadio di ingresso?
  - le architetture simmetriche (come “e”) assicurano piena complementarità

# Logica ed Elettronica, logica a interruttori

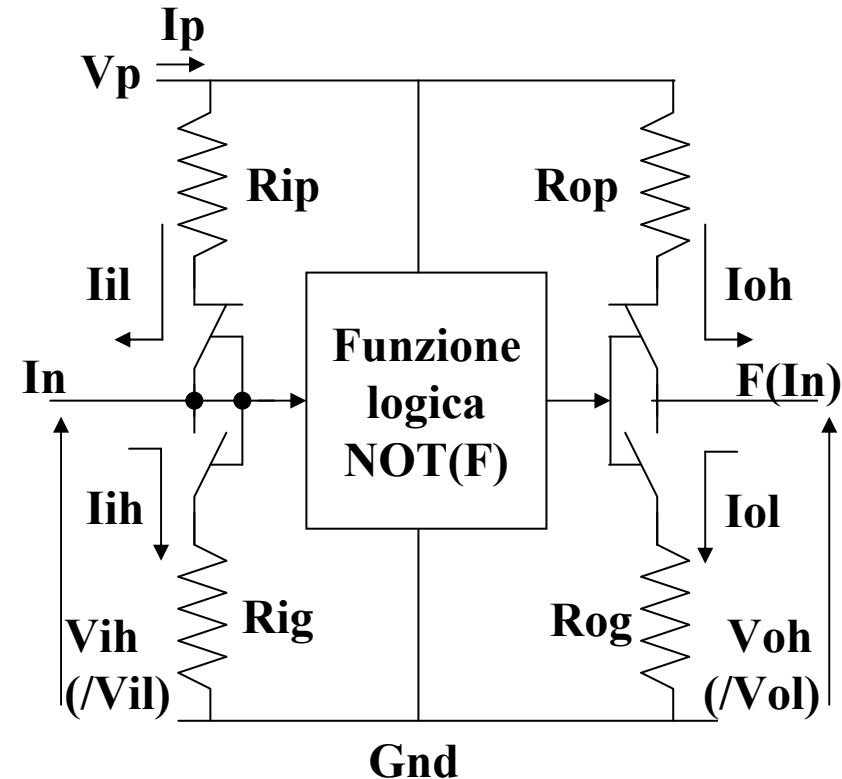
- Modello statico del dispositivo (interruttori ideali)



Modello logico del dispositivo con funzione F



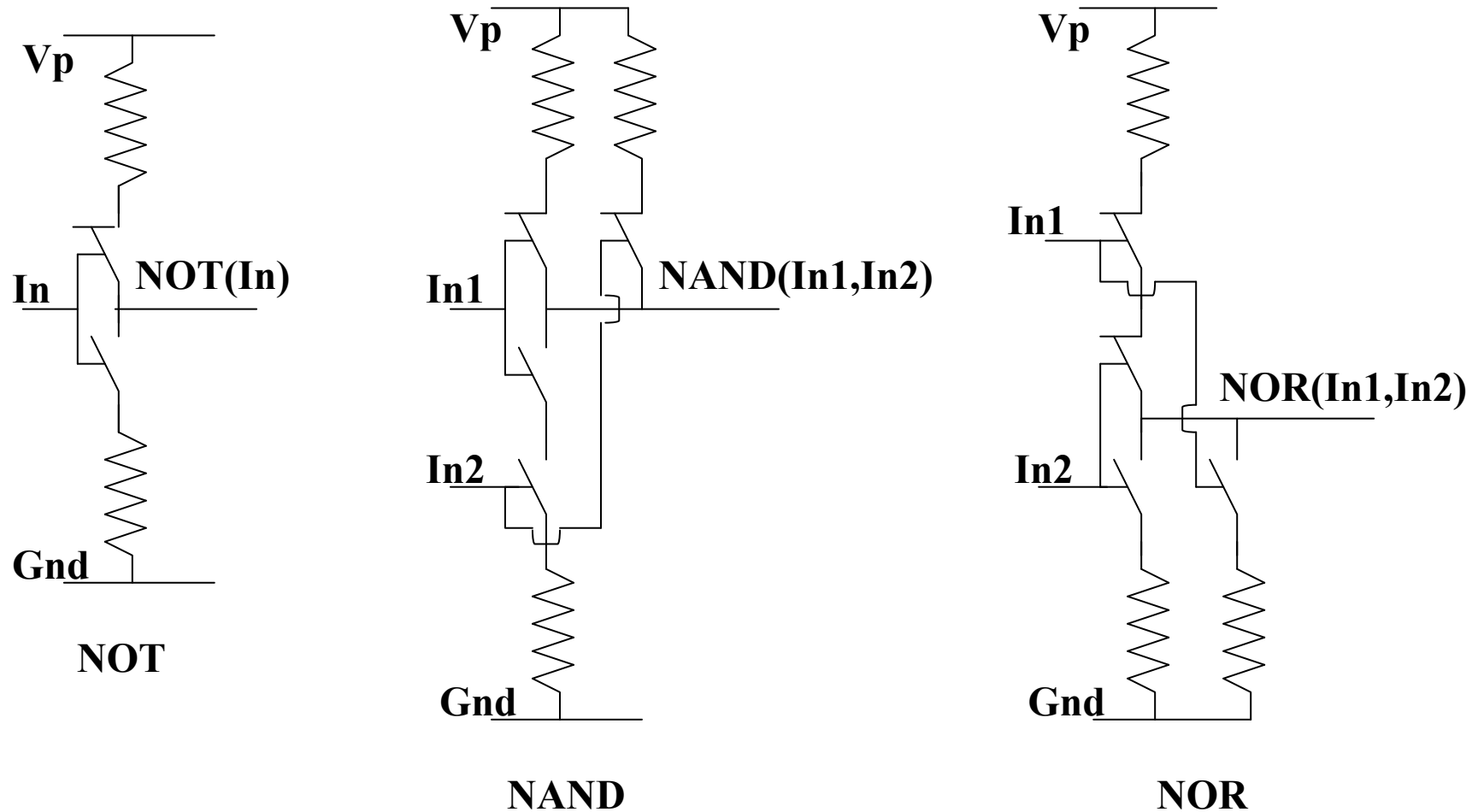
Modello elettrico statico del dispositivo con funzione F



Modello elettrico statico del dispositivo con funzione F (maggiore dettaglio)

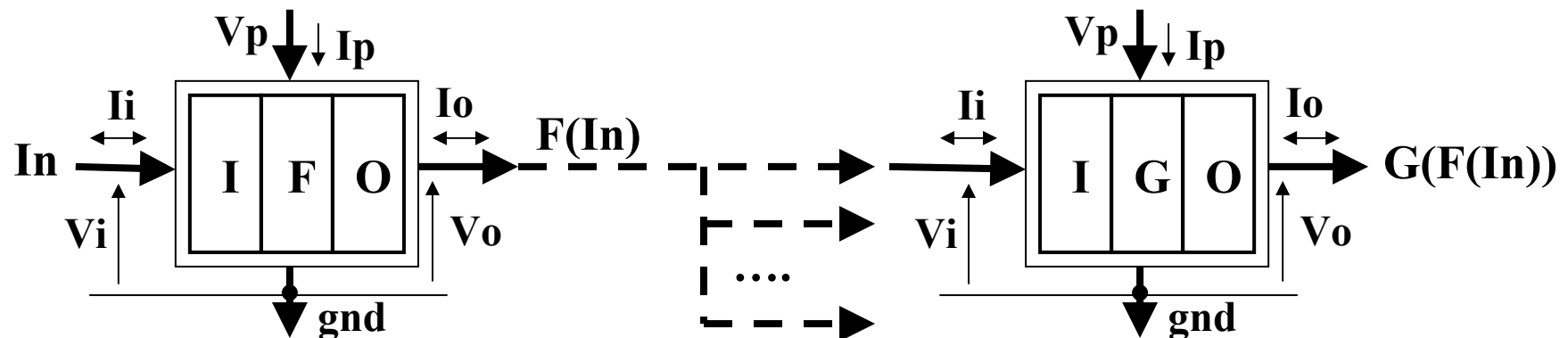
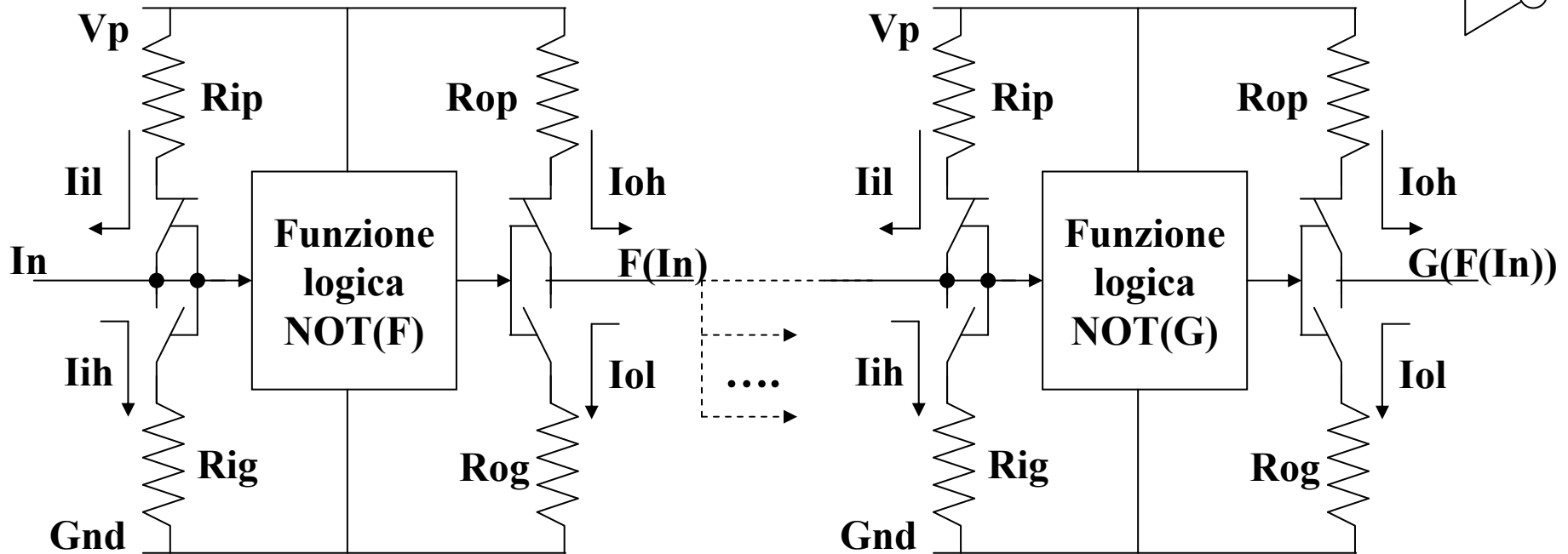
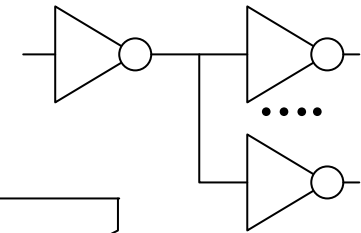
# Logica ed Elettronica, la logica a interruttori

- Funzioni logiche realizzate mediante interruttori

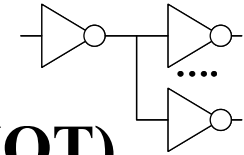


# Logica ed Elettronica, logica a interruttori

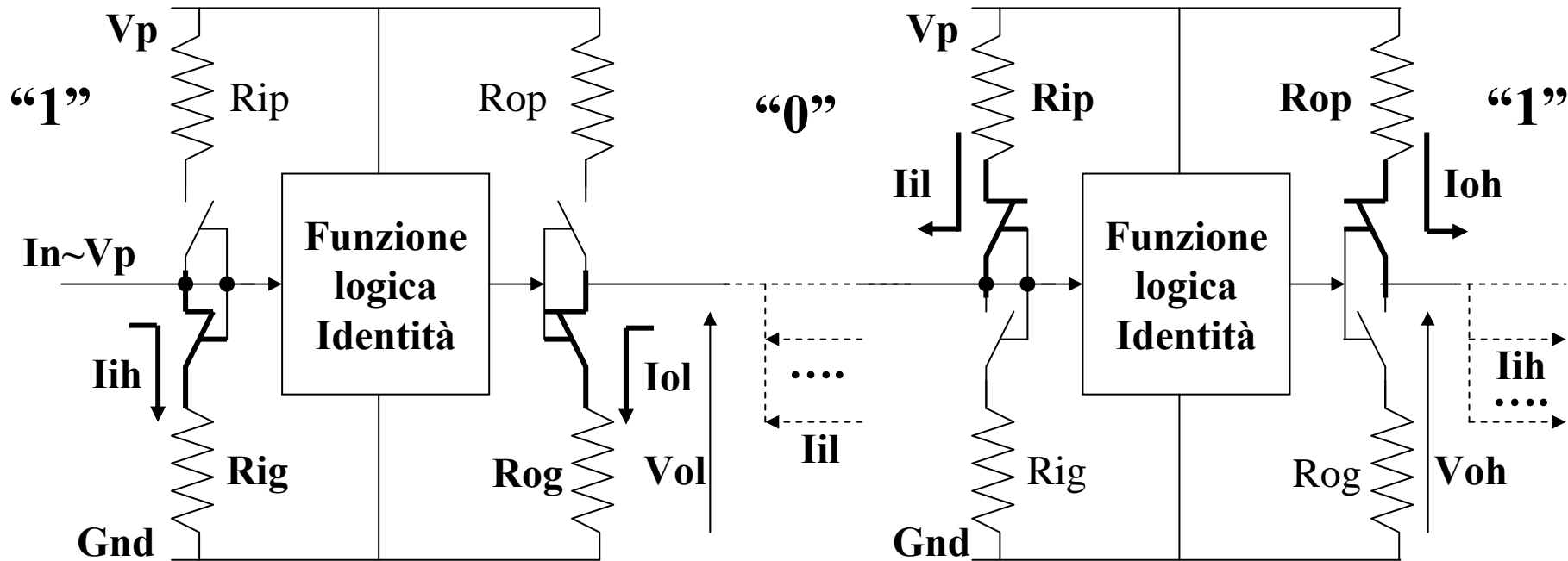
- Modello statico del dispositivo, interfacciamento



# Logica ed Elettronica, logica a interruttori

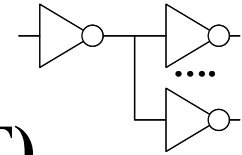


- **Modello statico del dispositivo, resistenze (In="1" F=G=NOT)**

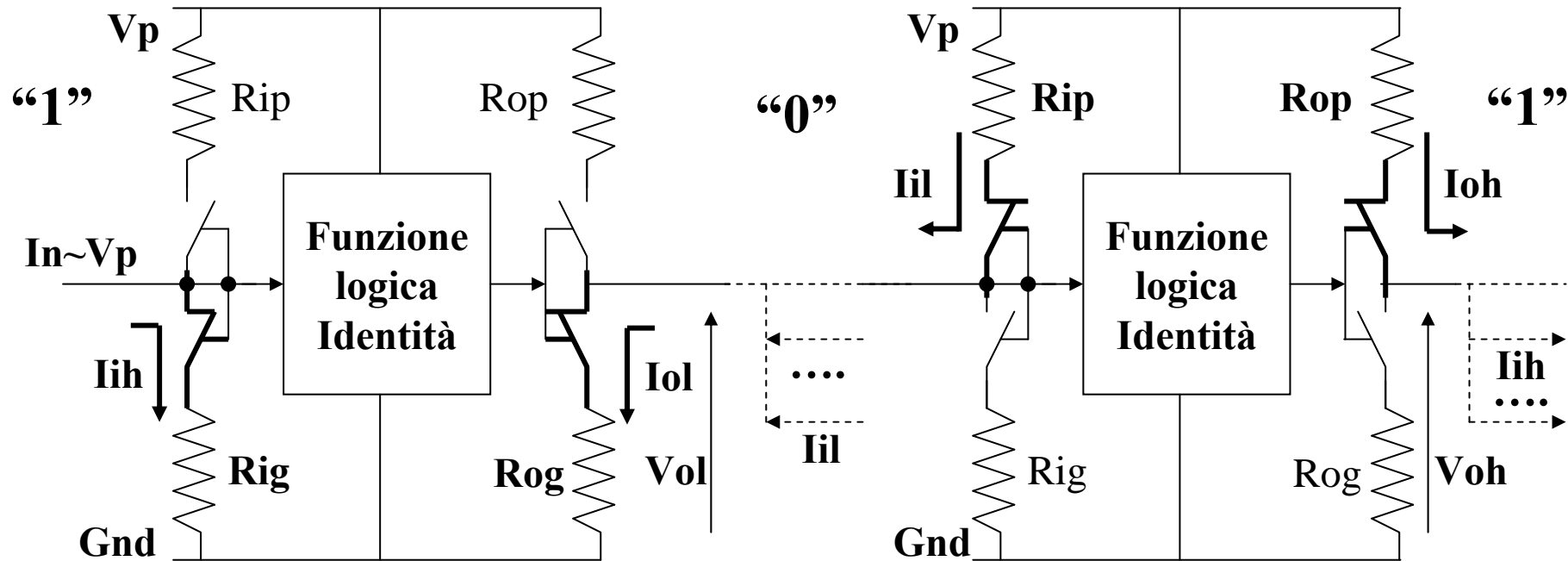


- Per segnali a “1” l’uscita eroga corrente ( $I_{oh}$ ) e l’ingresso assorbe ( $I_{ih}$ )
  - Per segnali a “0” l’uscita assorbe corrente ( $I_{ol}$ ) e l’ingresso eroga ( $I_{oh}$ )
  - $I_{ol} = \Sigma I_{il}$  trascurando correnti di perdita da  $V_p$  e verso  $gnd$  ( $I_{oh} = \Sigma I_{ih}$ )
  - Per avere  $V_o = F(In) \sim gnd (=V_{ol})$  si deve avere  $R_{og} \cdot I_{ol} = R_{og} \cdot \Sigma I_{il} \sim gnd$
  - ma, trascurando il rumore,  $I_{il} = (V_p - V_{ol}) / R_{ip} \sim V_p / R_{ip} \rightarrow V_p \cdot R_{og} / R_{ip} \sim gnd$
  - 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 (In="1" F=G=NOT)**

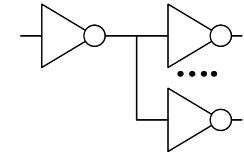


– Per segnali a “1” l’uscita impone una tensione  $V_o = V_{oh} = V_p - R_{op} \cdot I_{oh}$   
 se  $I_{oh} \sim 0$  –uscita a vuoto- allora  $V_{oh} \sim V_p$ , se  $I_{oh} = I_{oh,max}$  allora  $V_{oh} = V_{oh,min}$   
 $I_{oh,max}$  dipende dall’interruttore;  $I_{oh,max} = N_{max} \cdot I_{ih}$ ,  $\rightarrow N_{max} = I_{oh,max} / I_{ih}$

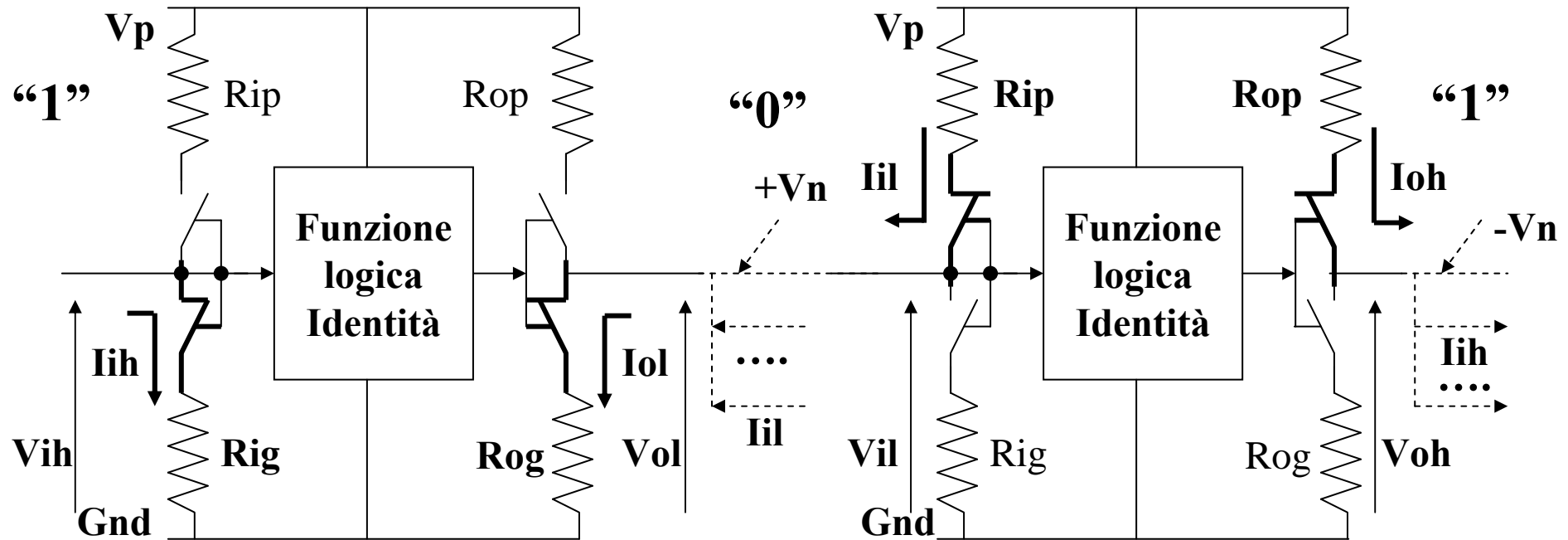
– Per segnali a “0” l’uscita impone una tensione  $V_o = V_{ol} = R_{og} \cdot I_{ol}$   
 se  $I_{ol} \sim 0$  –uscita a vuoto- allora  $V_{ol} \sim gnd$ , se  $I_{ol} = I_{ol,max}$  allora  $V_{ol} = V_{ol,max}$   
 $I_{ol,max}$  dipende dall’interruttore;  $I_{ol,max} = N_{max} \cdot I_{il}$ ,  $\rightarrow N_{max} = I_{ol,max} / I_{il}$

➡ **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,...)

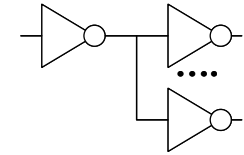
–Al segnale in uscita può sommarsi/sottrarsi rumore  $V_n$

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

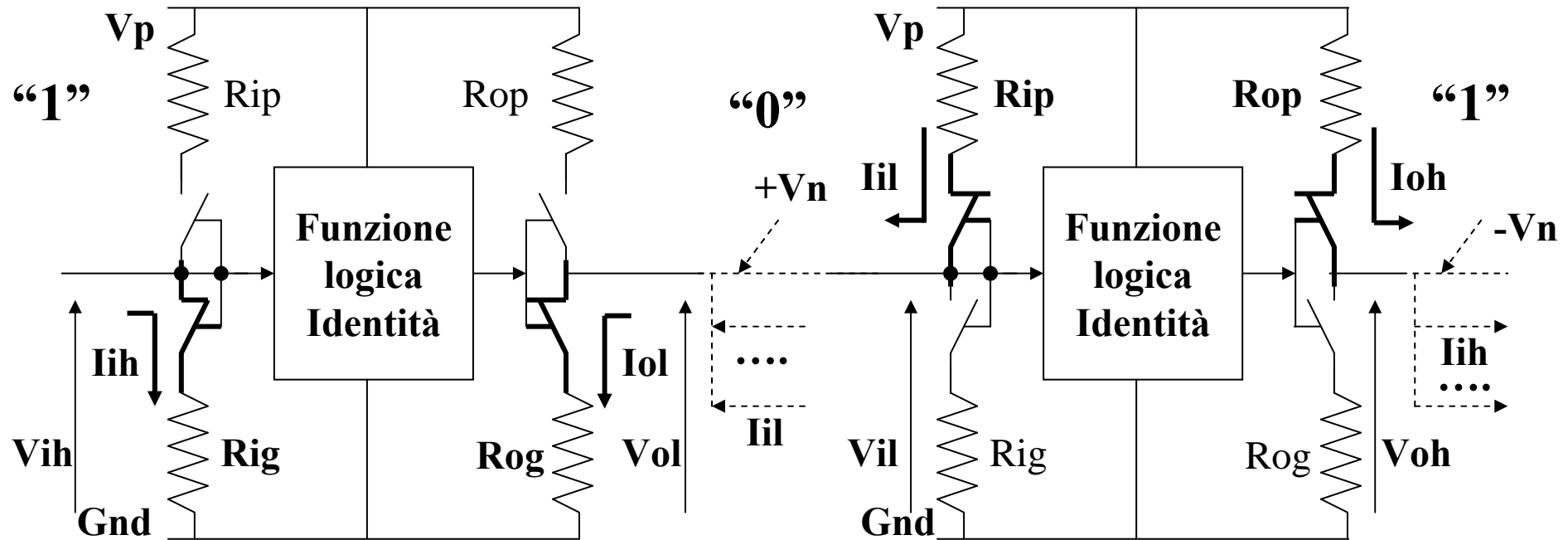
dove  $V_{il,max} = V_{ol,max} + V_n$  e  $V_{ih,min} = V_{oh,min} - V_n$



# Logica ed Elettronica, logica a interruttori



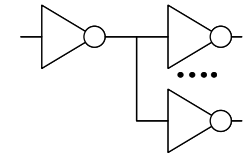
- Modello statico del dispositivo, livelli di tensione



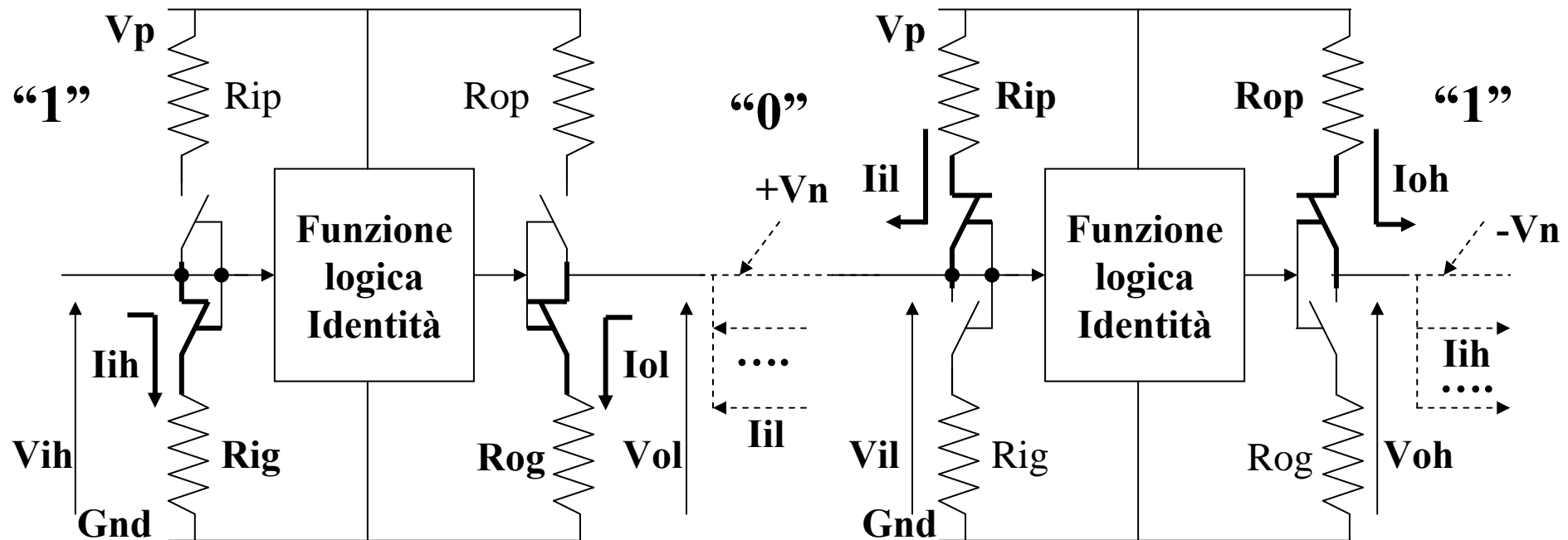
- Livelli di tensione

- $V_{ol}$  = 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



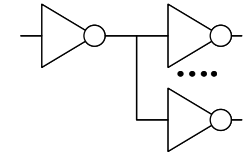
- **Modello statico del dispositivo, livelli di corrente**



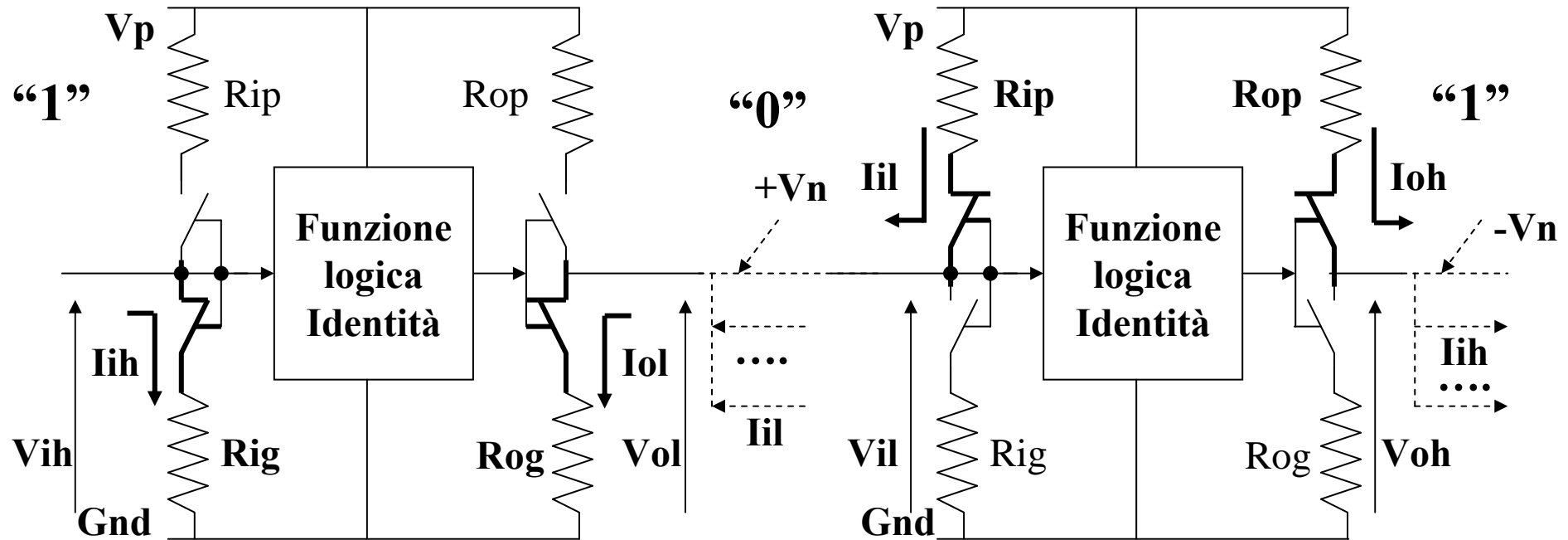
- **Livelli di corrente**

- $I_{ol}$  = 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  $V_n > 0,1 \text{ V}$

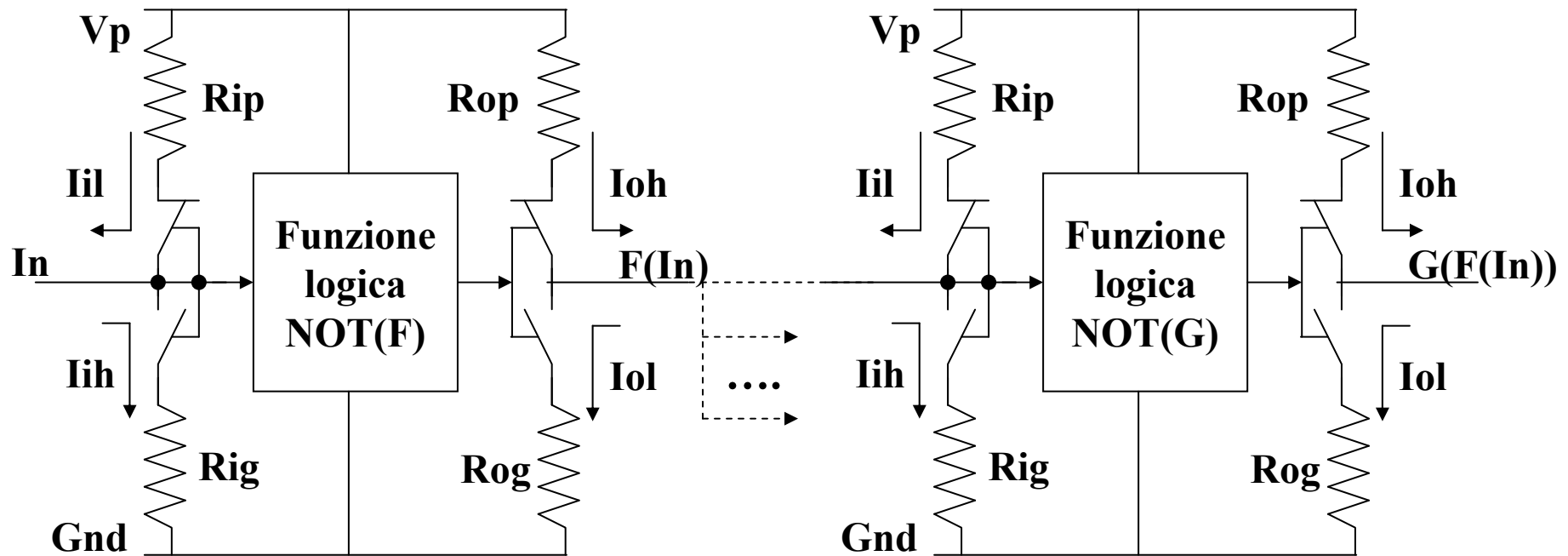
- **FAN-OUT statico (indispensabile al corretto funzionamento)**

– 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

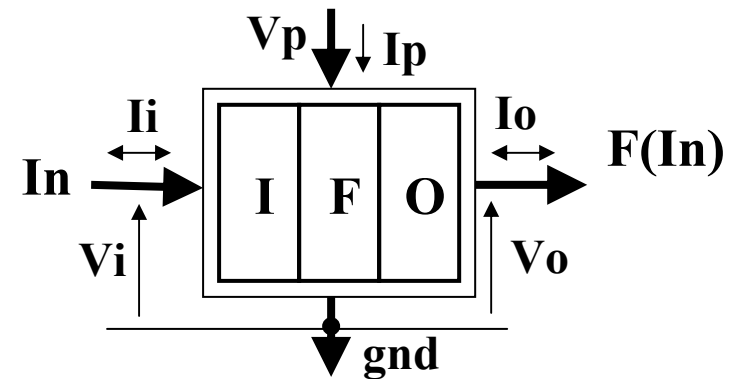


- Dissipazione di potenza statica

- 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 ( $I_p \sim 0$ )

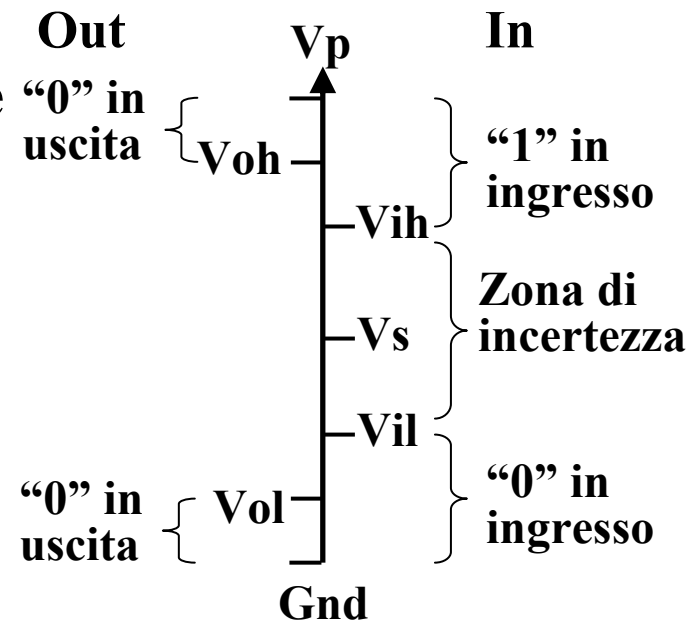
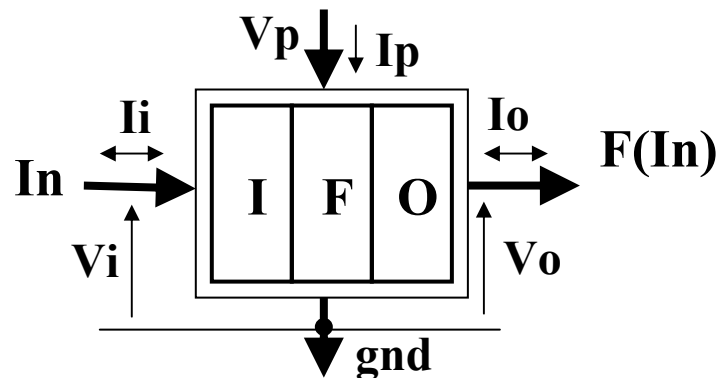
➔ **bassa dissipazione di potenza statica (stadio funzionale)**



# Logica ed Elettronica, logica a interruttori

- **Modello statico del dispositivo**

significato dei livelli di tensione

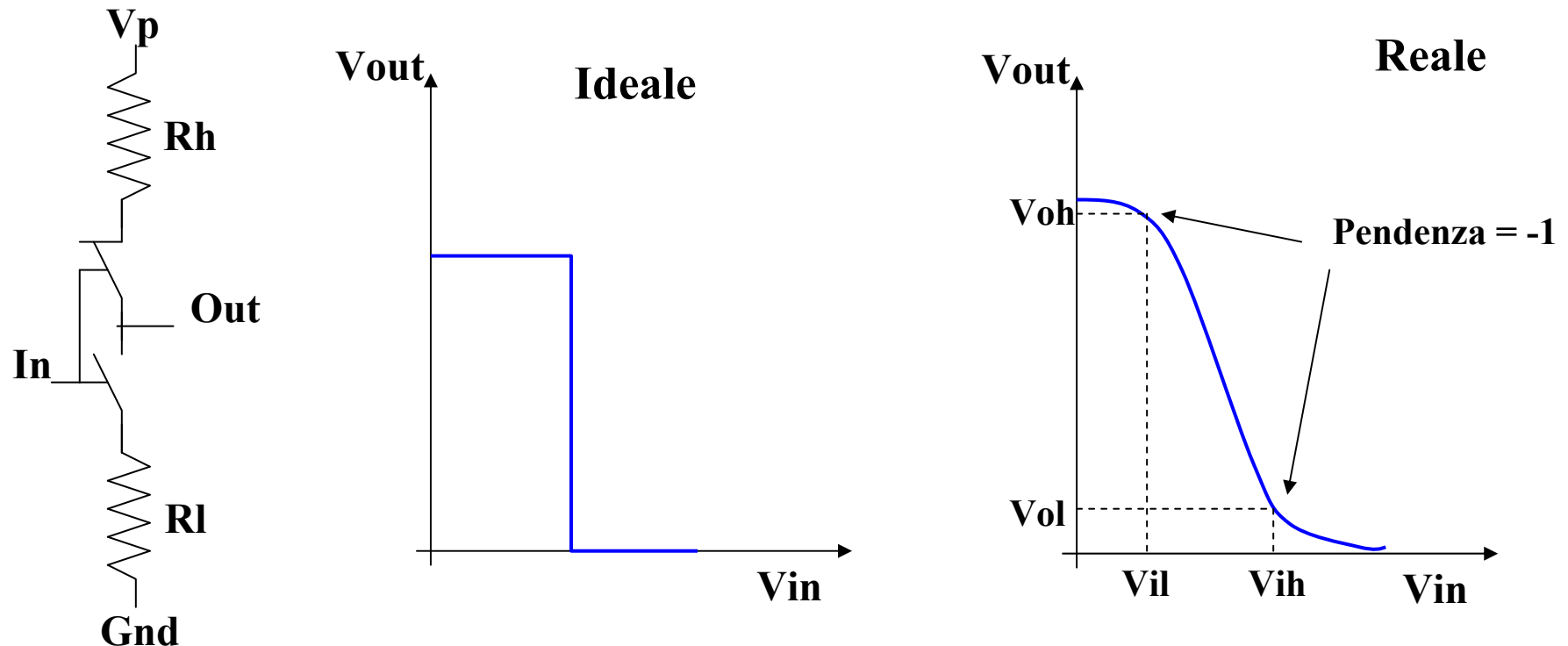


- **Applicare uno “0” (“1”) in ingresso ad una porta logica equivale ad applicare una tensione tra Gnd e  $V_{il}$  (tra  $V_{ih}$  e  $V_{cc}$ ) e a scambiare una corrente tra 0 e  $I_{il}$  ( $I_{ih}$ )**

- **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

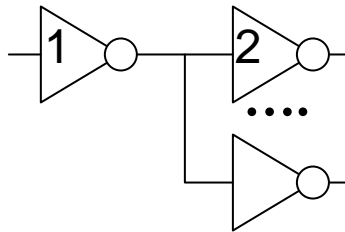
- Invertitore ideale e reale, caratteristica ingresso - uscita



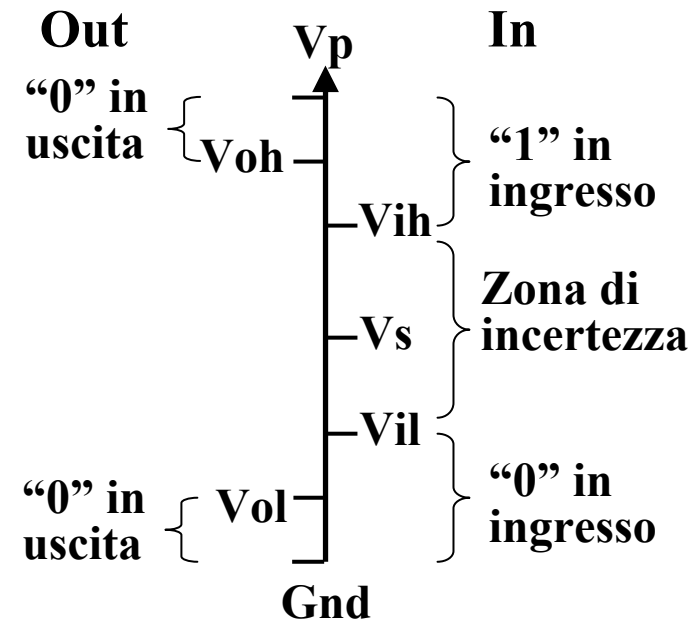
- Le caratteristiche ingresso – uscita di tensione e di corrente dipendono dalla tecnologia scelta per realizzare gli interruttori
- Se l'ingresso è in zona di incertezza si ha un'uscita imprevedibile
  - la caratteristica reale varia al variare di temperatura, tensione di alimentazione, condizioni di 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



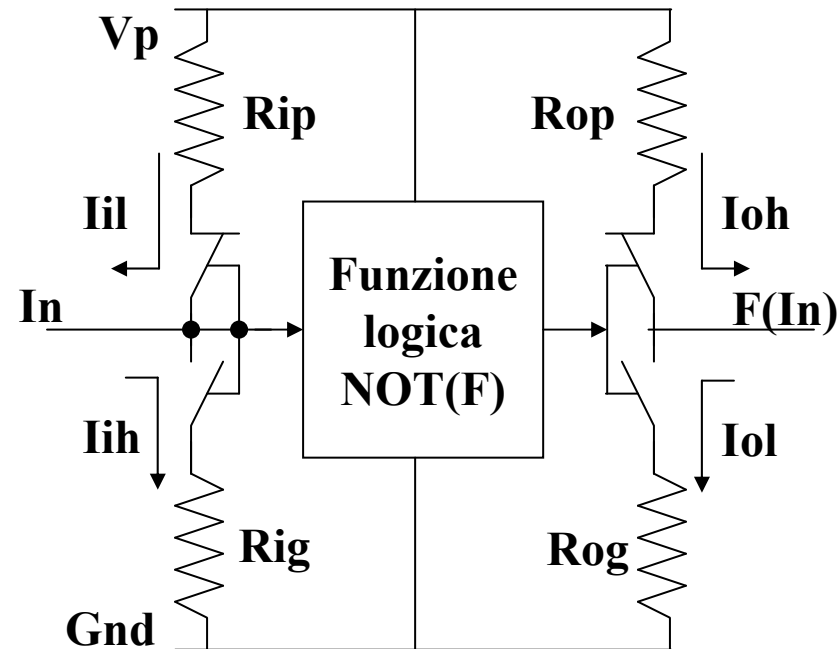
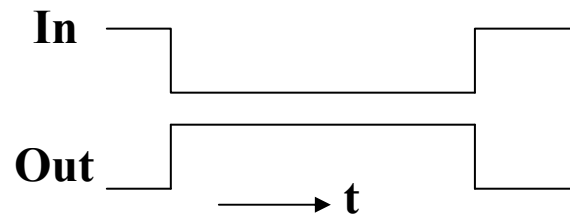
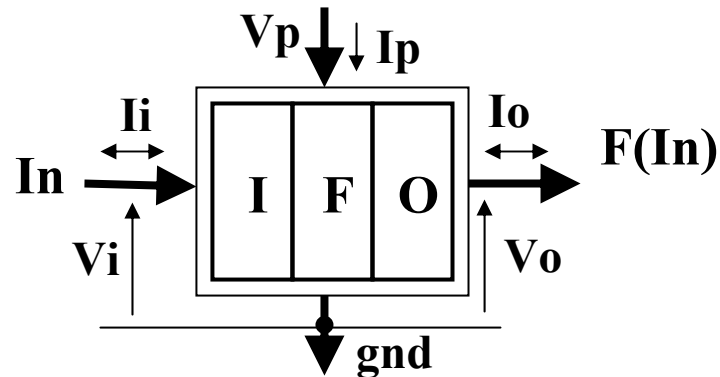
- Staticamente la porta 1 impone livelli fuori dalla regione d'incertezza  
...ma durante la commutazione?  
(la commutazione reale non è istantanea)



- 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)

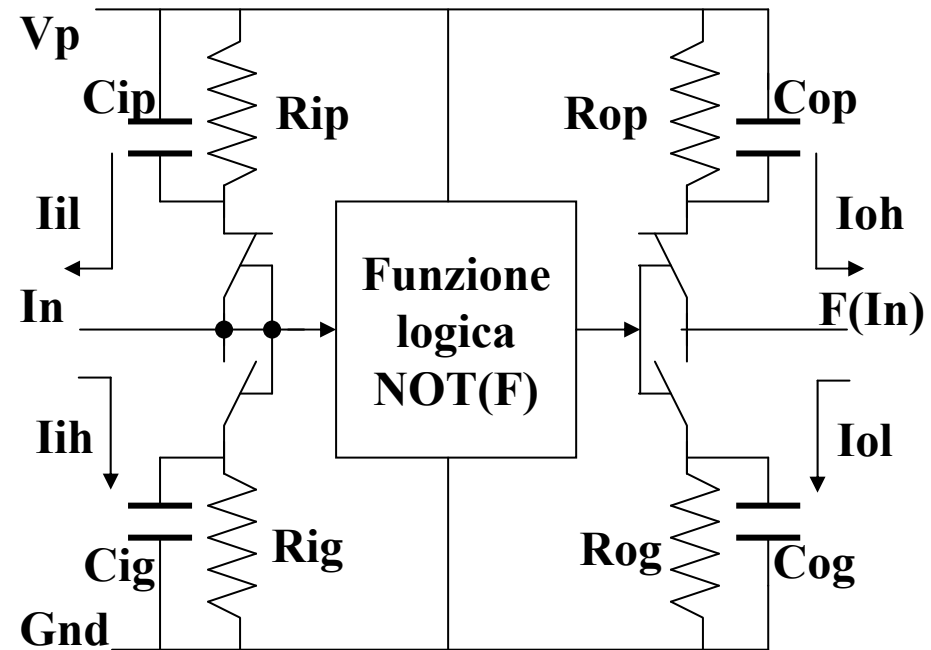
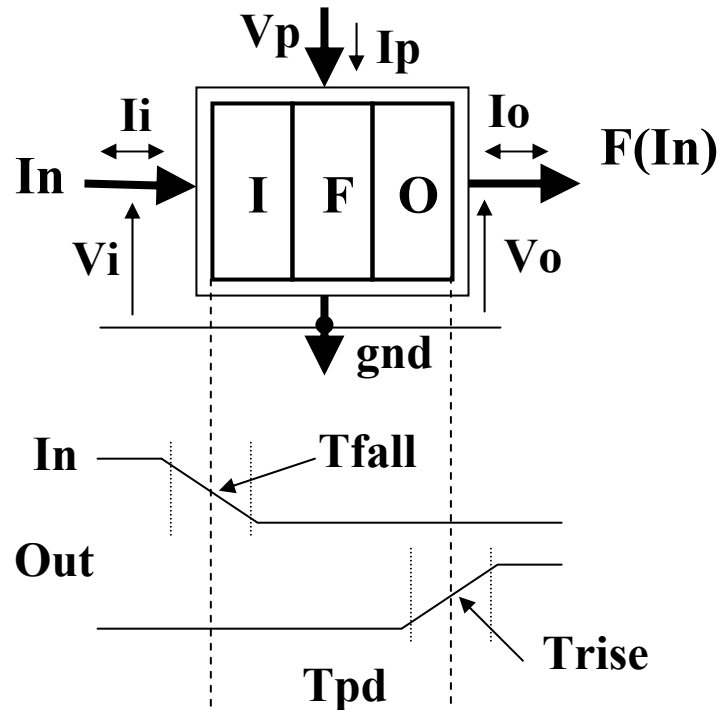


- **Ipotesi: gli interruttori hanno tempi di apertura e chiusura nulli**  
➔ **L'uscita del dispositivo segue istantaneamente l'ingresso**
- **Nei sistemi elettronici le commutazioni non sono immediate**
- **Esiste un tempo non nullo nel quale i segnali si propagano attraverso i dispositivi elettronici**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



# Logica ed Elettronica, logica a interruttori

- Modello dinamico del dispositivo (interruttori con ritardi)



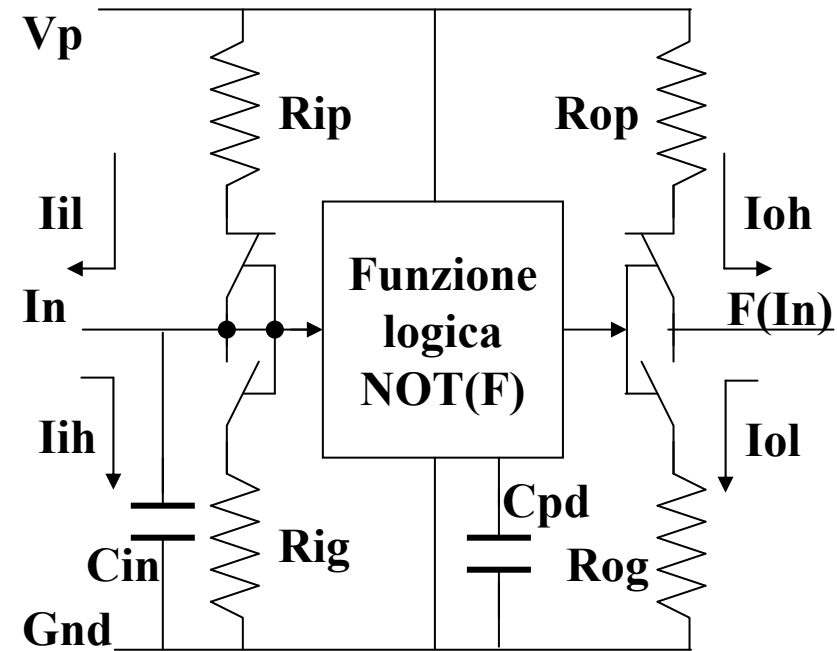
- $T_{pd} = T_i + T_f + T_o$ ,  $T_{rise}$  è il tempo da 10% a 90% ( $T_{fall}$  opposto)
  - $T_i$  ( $\sim T_{fall}/2$  o  $T_{rise}/2$ ) dipende da  $C_{ip}$  o da  $C_{ig}$  ( $C_{ip} \approx C_{ig} = C_{in}$ )
  - $T_f$  dipende dalla complessità della funzione  $NOT(F)$
  - $T_o$  ( $\sim T_{fall}/2$  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

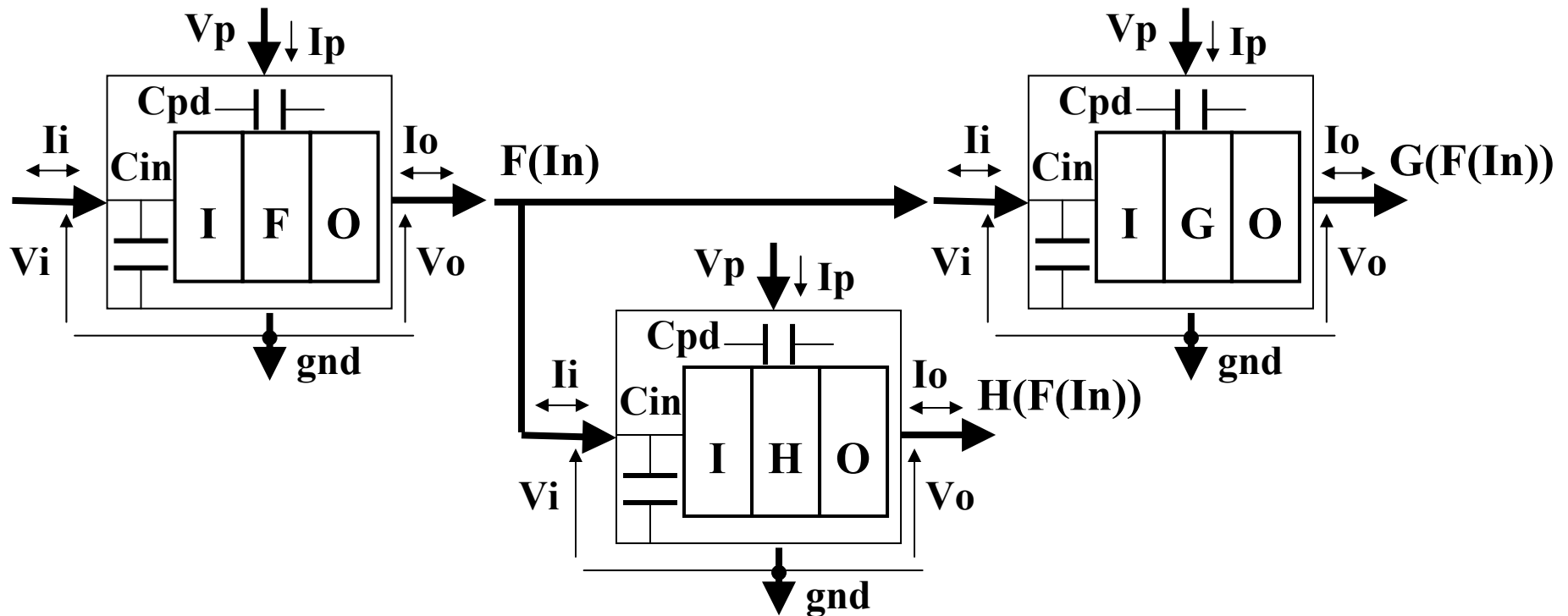
- **Modello dinamico del dispositivo (interruttori con ritardi)**



- **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  $C_I = N \cdot C_{in}$**
- **$T_o$  (parte di  $T_{pd}$ ) dipende da  $C_I$**
- **Durante la commutazione,  $I_p$  carica o scarica  $C_I$  e  $C_{pd}$  (dissipazione di potenza dinamica)**

# Logica ed Elettronica, logica a interruttori

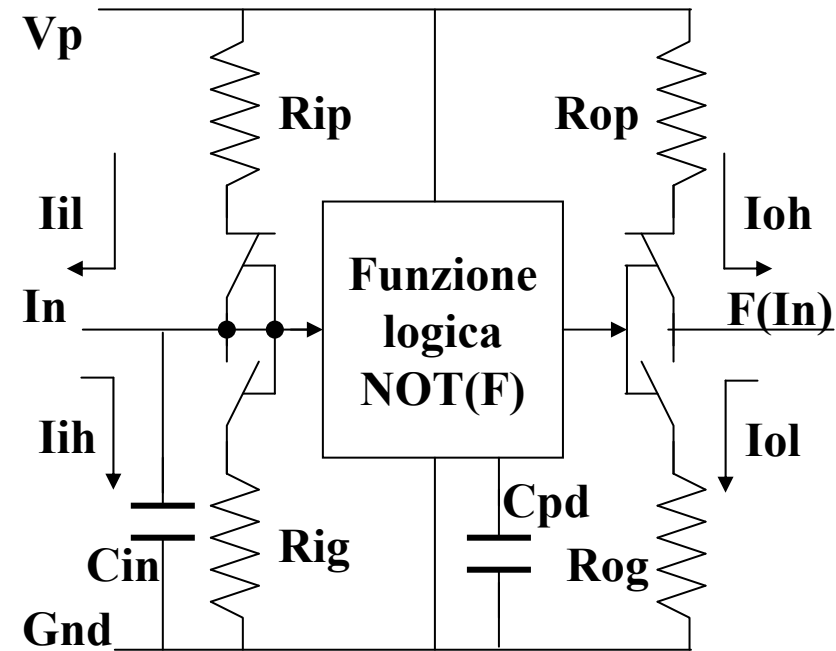
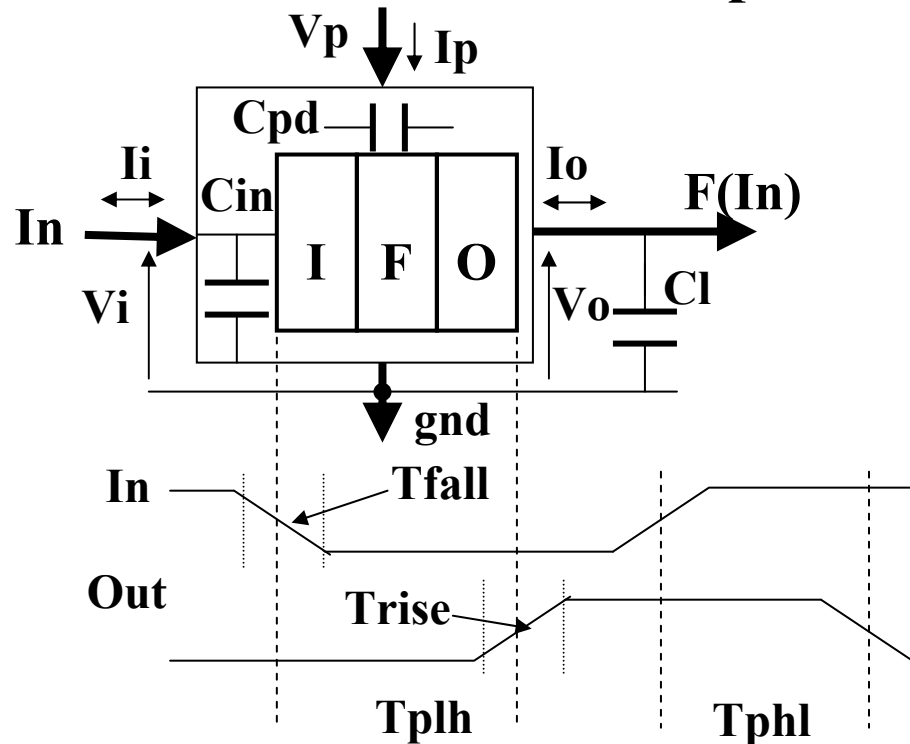
- Modello dinamico del dispositivo, dissipazione di potenza dinamica



- $Cl(F) = C_{in}(G) + C_{in}(H) = \Sigma C_{in}$
- 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

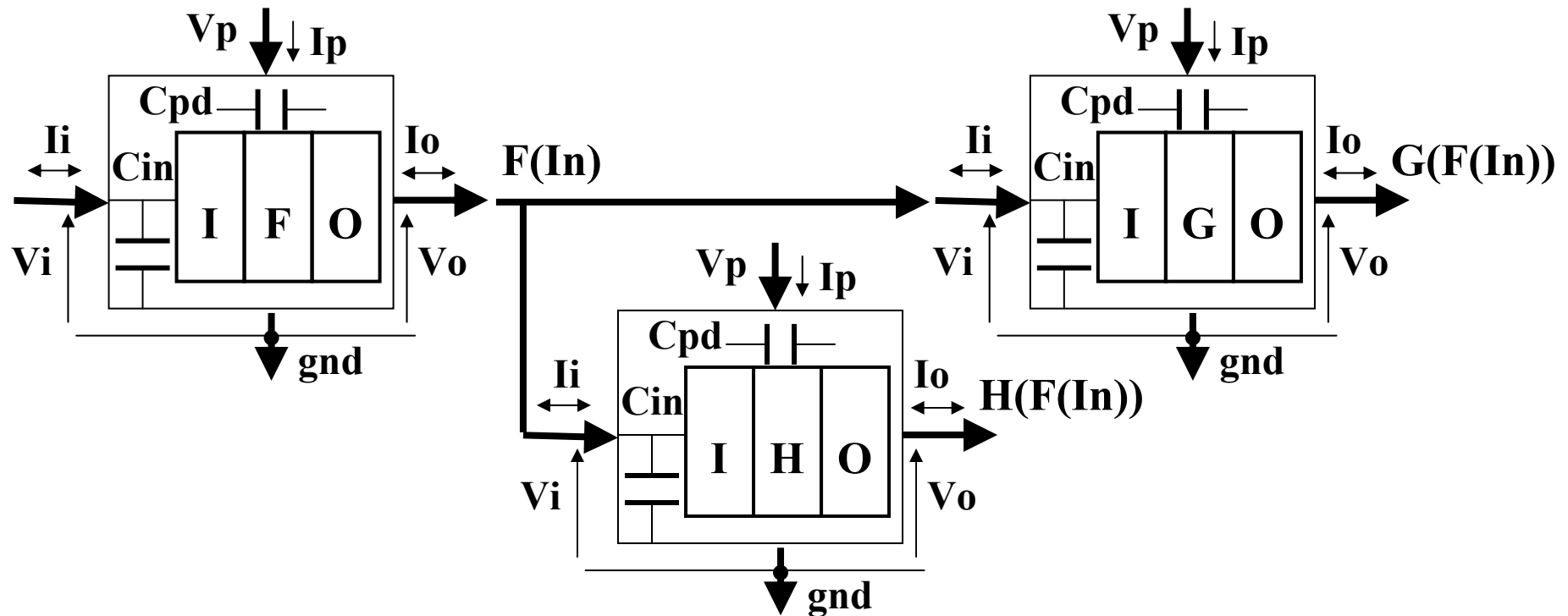
- Modello dinamico del dispositivo, parametri caratteristici



- $T_{plh}$  = 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

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

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

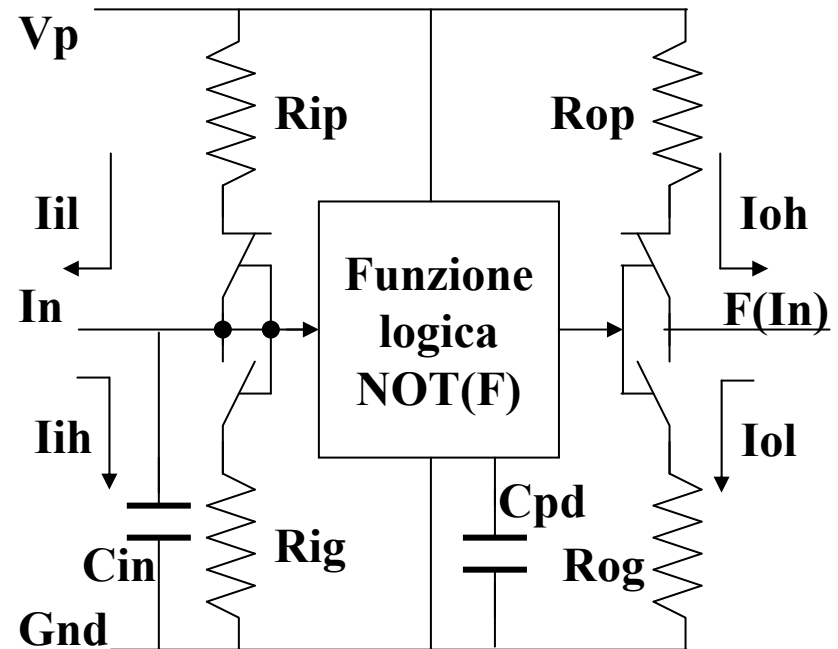
• **A vuoto  $I_{ol}=I_{oh}=0$  e quindi  $V_{oh}=V_p$  e  $V_{ol}=Gnd$**

• **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

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

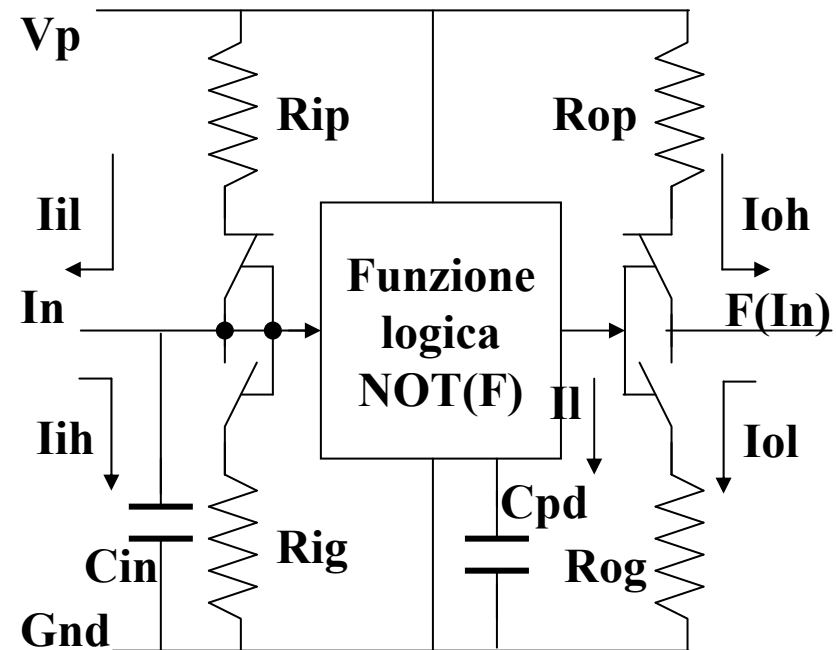
• Se ho in ingresso  $V_{ih} = V_{oh} \pm 0,1\text{V} = 4,899\text{V}$  allora

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

(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**

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

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

- $I_{il} = I_{ih} = 0,25\text{mA}$

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

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

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

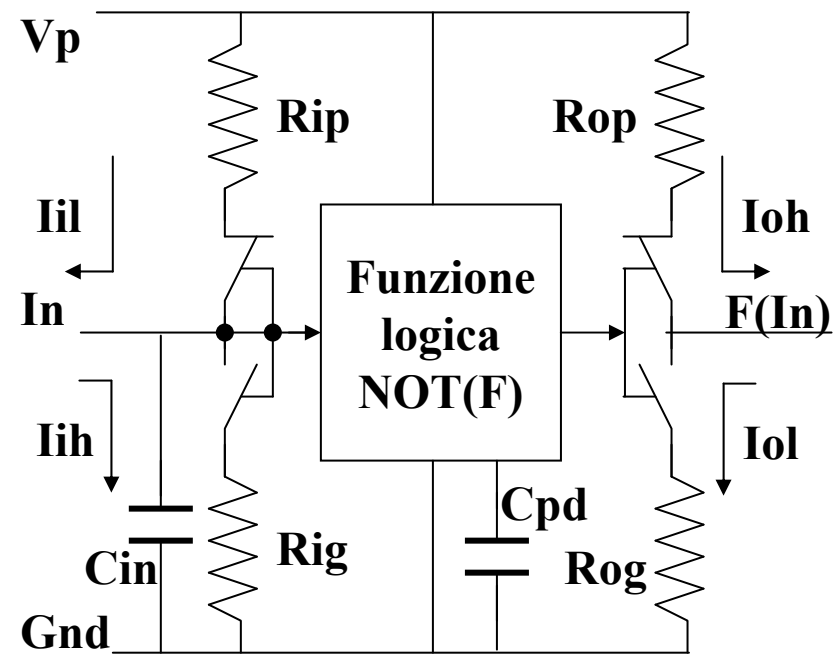
- $V_{ih} = V_{oh} \pm 0,1 \approx 4,4\text{V}$

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

- **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 influiscono molto sulle caratteristiche statiche di uscita**





# Logica ed Elettronica, logica a interruttori

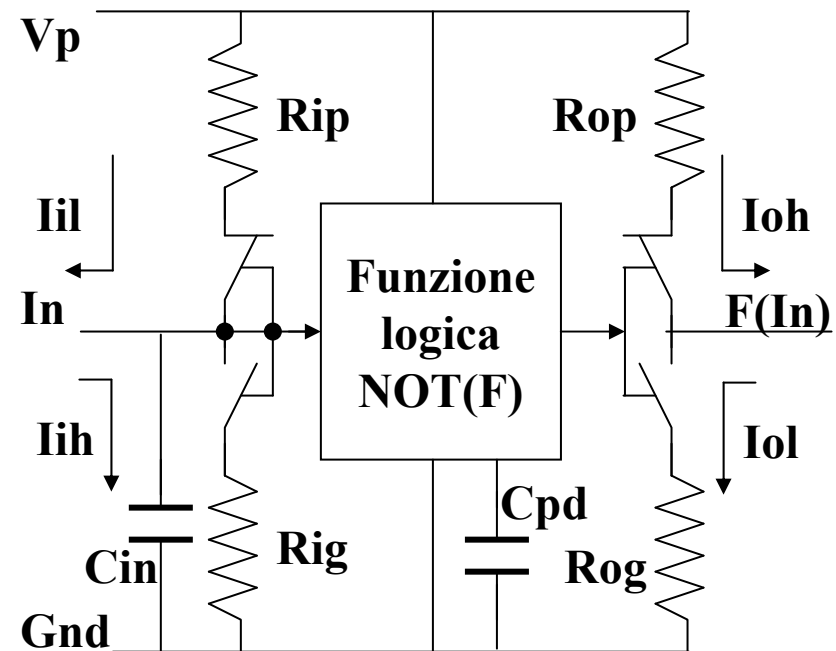
## •Esercizi

- Calcolare FANOUT e Immunità al rumore  $V_{n,max}$  del dispositivo (modello in figura,  $I_I = 1\mu A$ )

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

- FANOUT =  $\min(I_{oh}/I_{ih}, I_{ol}/I_{il}) = N$
- $V_{n,max} = \min(V_{oh}-V_{ih}, V_{il}-V_{ol})$

FANOUT e  $V_{n,max}$  sono legati tra loro



- Fissato  $V_{n,max}$ , si impone  $V_{ih}=V_{oh}-V_{n,max}$  e  $V_{il}=V_{ol}+V_{n,max}$ , ma  $V_{oh}=V_{oh}(I_{oh})$  e  $V_{ol}=V_{ol}(I_{ol})$  quindi si condiziona il FANOUT
- $V_{ih}-V_{il}\geq 1V$  per tenere conto di non idealità
- $I_{il} = I_{ih} = 0,25mA$ ,  $I_{ol} = N \cdot I_{il}$ ,  $I_{oh} = N \cdot I_{ih}$
- $V_{oh} = V_p - (I_I + I_{oh}) \cdot R_{op} \approx V_p - I_{oh} \cdot R_{op}$ ,  $V_{ol} = (I_I + I_{ol}) \cdot R_{og} \approx I_{ol} \cdot R_{og}$
- Noti  $I_{il}$ ,  $I_{ih}$ ,  $R_{og}$ ,  $R_{op}$  si ha:

$V_{oh} \approx V_p - N \cdot I_{ih} \cdot R_{op}$ ,  $V_{ol} \approx N \cdot I_{il} \cdot R_{og}$ ,  $V_{oh} - V_{ol} = V_{ih} + V_{n,max} - (V_{il} - V_{n,max}) \geq 1V + 2V_{n,max}$

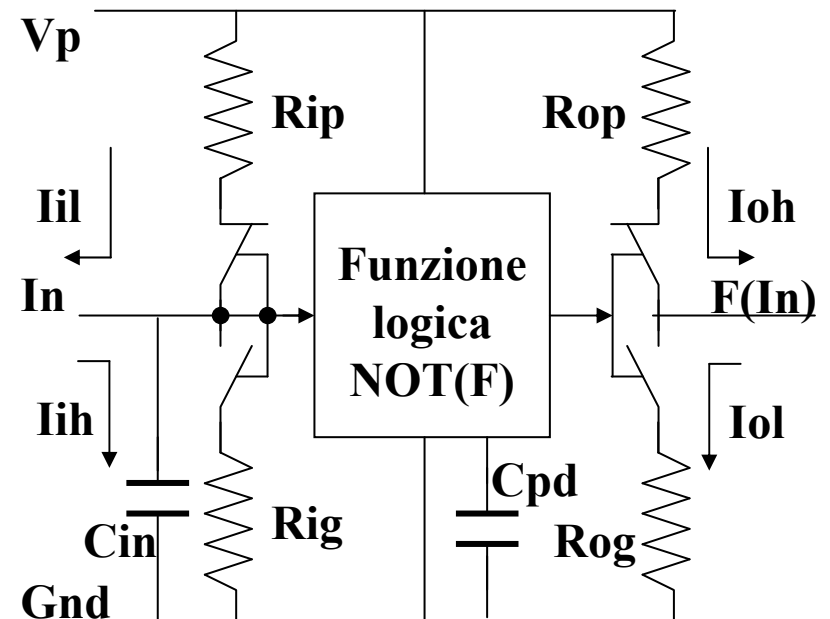
quindi  $(V_p - N \cdot I_{ih} \cdot R_{op} - N \cdot I_{il} \cdot R_{og} - 1V) / 2 > V_{n,max}$   $N < 8 - (V_{n,max} / 0,25V)$

In un dispositivo reale conosco  $I_{il}$ ,  $I_{ih}$ ,  $I_{ol}$ ,  $I_{oh}$ ,  $V_{il}$ ,  $V_{ih}$ ,  $V_{ol}$ ,  $V_{oh}$  ed è più facile

# Logica ed Elettronica, logica a interruttori

## •Esercizi

- 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:  $I_{ih} = V_{ih}/R_{ig} < V_p/R_{ig} = 0,1mA$   $R_{ig} = 50k\Omega$

$I_{il} = (V_p - V_{il})/R_{ip} < V_p/R_{ip} = 0,1mA$   $R_{ip} = 50k\Omega$

- I rimanenti parametri statici di segnale sono:

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

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

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

$I_{ol} = N * I_{il} = 10 * I_{il} = 1mA$

$V_{ol} = I_{ol} * R_{og} = 1V$

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

- Se avessi ipotizzato  $FANOUT=50$  si sarebbe avuto:

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

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

$I_{ol} = N * I_{il} = 50 * I_{il} = 5mA$

$V_{ol} = I_{ol} * R_{og} = 5V$

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

# Logica ed Elettronica, logica a interruttori

- Esercizi

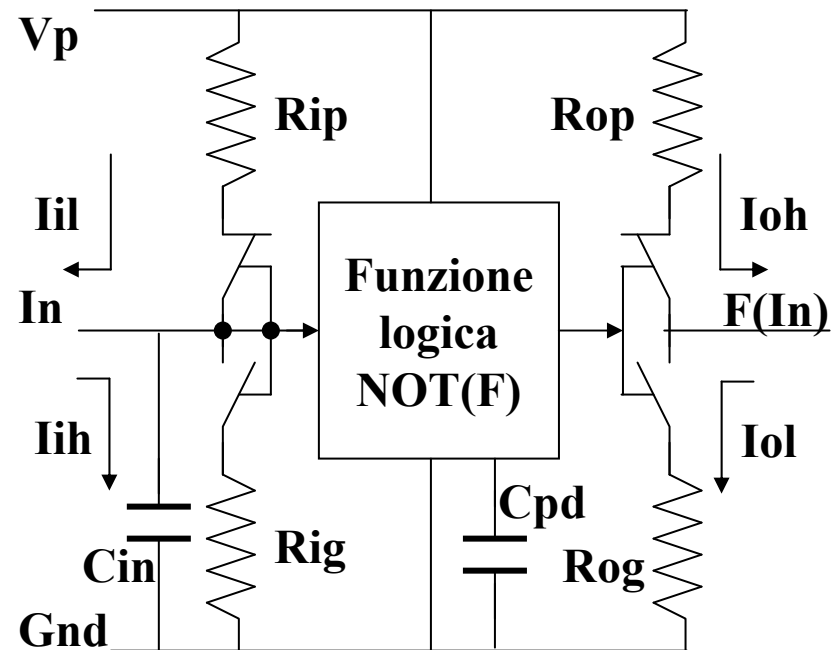
- Calcolare i parametri dinamici a vuoto del dispositivo ipotizzando un'onda quadra in ingresso  $f=10\text{MHz}$  ( $I_i=1\mu\text{A}$ ,  $V_n=\pm 0,1\text{V}$ )

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

- $T_{phl} = T_i + T_f + T_o = T_i + T_f + T_{fall}/2$
- $T_{plh} = T_i + T_f + T_o = T_i + T_f + T_{rise}/2$
- 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  $V_p^2 \cdot f \cdot (C_l + C_{pd}) = V_p^2 \cdot f \cdot C_{pd} = 5\text{mW}$



$$\text{FANOUT}_d = C_{lo}/C_{in} = 5$$

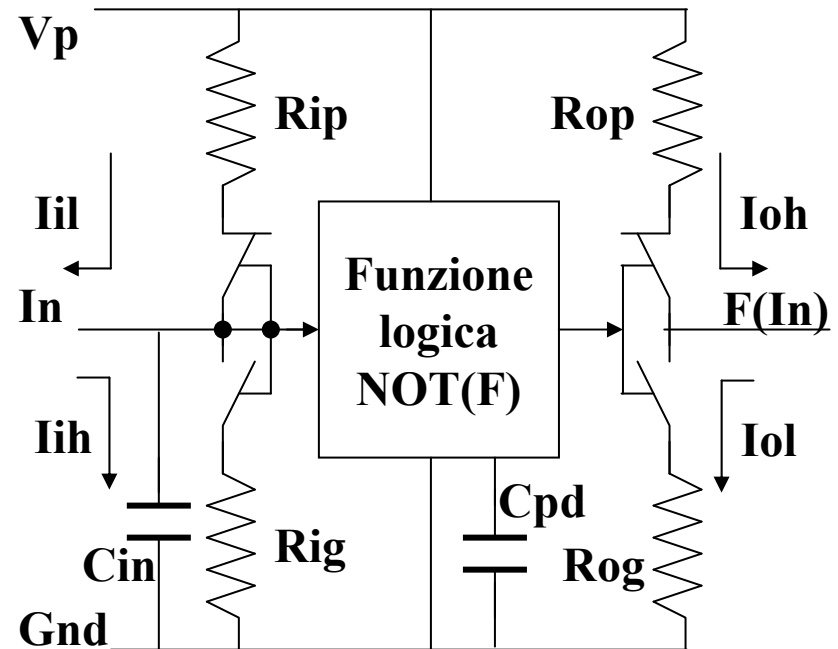
(numero max di carichi senza degrado delle prestazioni)

# Logica ed Elettronica, logica a interruttori

## •Esercizi

- Calcolare i parametri dinamici con N carichi del dispositivo con un'onda quadra in ingresso  $f=10\text{MHz}$  ( $I_I=1\mu\text{A}$ ,  $V_n=\pm 0,1\text{V}$ )

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



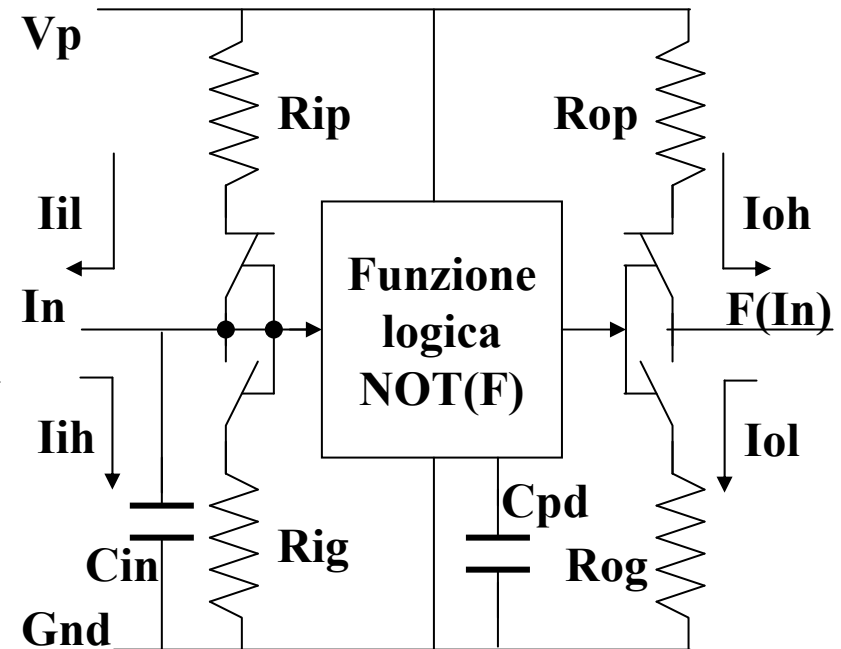
- $T_{phl} = T_i + T_f + T_o = T_i + T_f + T_{fall}/2$
- $T_{plh} = T_i + T_f + T_o = T_i + T_f + T_{rise}/2$
- Con N carichi,  $C_I=N\cdot C_{in}$ . Se  $N>5$  allora  $C_I>C_{lo}$ , si devono ricalcolare i valori max. Per i valori tipici  $T_{rise}(C_I)=T_{fall}(C_I)=1\text{ns}+0,4\text{ns}\cdot N$  e  $T_{phl,typ}(C_I)=T_{plh,typ}(C_I)=8\text{ns}-1,5\text{ns}+0,5\text{ns}+0,2\text{ns}\cdot N=7\text{ns}+0,2\text{ns}\cdot N$
- I valori massimi si ricalcolano in proporzione  $T_{phl,max}(C_I)/T_{phl,max}(50\text{pF}) = T_{phl,typ}(C_I)/T_{phl,typ}(50\text{pF})$  e analogamente per  $T_{plh}$
- La dissipazione di potenza dinamica è pari a  $V_p^2\cdot f\cdot(C_I+C_{pd})=V_p^2\cdot f\cdot(N\cdot C_{in}+C_{pd})$  (se  $N=10$  si ha  $30\text{mW}$ )
- Se f è variabile, spesso sono richieste la potenza massima e la potenza media

# Logica ed Elettronica, logica a interruttori

## •Esercizi

• 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 FANOUT<sub>d</sub> residuo, qual è la massima frequenza di funzionamento e il relativo consumo.

Cosa cambia se connesso al pilota ulteriori 8 dispositivi uguali?



• FANOUT<sub>d</sub> =  $C_{lo}/C_{in} = 5$ , tuttavia, dato che 2 dispositivi sono già presenti, il FANOUT<sub>d</sub> residuo è 3

• Dato che il FANOUT<sub>d</sub> 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 FANOUT<sub>d</sub> 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

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

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

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

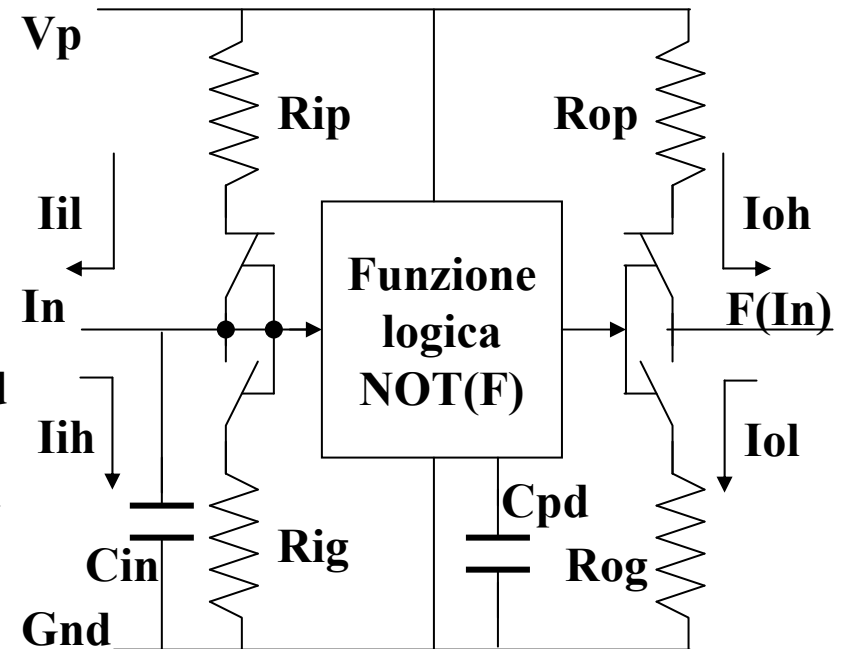
$$T_{rise,typ}=T_{fall,typ}= 1ns+(40ps/pF)*C_l$$

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

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

- 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  $C_l = 100 pF$  si ha:  $T_{rise}=T_{fall}=1ns+4ns=5 ns$  per cui:  $T_{phl,typ}=T_{plh,typ}=8ns-1,5ns+2,5ns=9ns$   
 Per i tempi massimi, ricalcolando in proporzione, si ha  $T_{phl,max} = T_{plh,max} = 11,25 ns$

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

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

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