

# IL PONTE A 'H'

In questo Workshop riuniremo parte delle conoscenze di elettronica analogica e digitale acquisite con l'avanzare di questo corso per realizzare uno dei circuiti più utili in robotica: il ponte a 'H'.

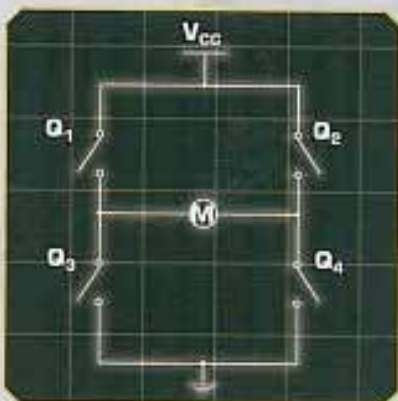
**N**ei precedenti Workshop abbiamo già affrontato esperimenti di 'controllo' dei motori elettrici a spazzole, dapprima alimentandoli con una semplice batteria e un carico resistivo variabile (fascicolo 9) e successivamente attraverso un transistor (fascicolo 14). Una delle principali questioni emerse nell'utilizzo dei motori è legata al **quantitativo di corrente necessaria per attivarli**: come hai potuto verificare, infatti, affinché un motore elettrico avvii il suo moto rotativo è necessario che venga alimentato con una serie di valori elettrici minimi, valori che non si rivelano, però, compatibili con le tensioni e le correnti operative dei circuiti digitali (vedi il FOCUS ON che troverai alla fine di questo articolo). La possibilità di controllare dispositivi di potenza (ossia che richiedono correnti e tensioni elevate), tuttavia, è una necessità irrinunciabile in una disciplina tecnologica come la robotica. Servono quindi sistemi specifici che svolgano la funzione

➔ **A destra uno schema generico 'a interruttori' di un ponte a 'H' (noto anche come H-bridge), mostrato con i quattro interruttori aperti.**

di interfacce hardware tra l'elettronica di controllo (solitamente di tipo digitale e di bassa potenza) e i dispositivi di media e alta potenza controllati.

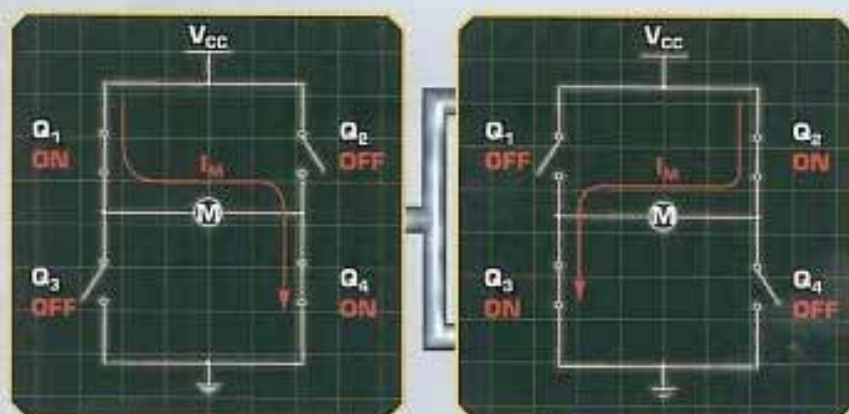
## IL PONTE A 'H' >>>

In questo Workshop prenderemo in considerazione un particolare circuito, che si rivelerà particolarmente utile (con i dovuti adattamenti) ogniquale volta avremo la necessità di controllare un motore elettrico a spazzole utilizzando un segnale di bassa potenza: il **ponte a 'H'** (noto anche con il nome inglese **H-bridge**). Il ponte a H è un sistema basato su **transistor**, disposti in modo da assumere una struttura simile alla lettera H, che consente di imporre un preciso verso di scorrimento della corrente all'interno di un carico (nel nostro caso un motore elettrico) o di inibire completamente il passaggio



di elettricità. Per capirne il principio di funzionamento prendiamo come riferimento il **'modello a interruttori'** mostrato nell'immagine a fondo pagina con i quattro interruttori aperti. In esso vediamo rappresentati **quattro differenti interruttori (Q<sub>1</sub>, Q<sub>2</sub>, Q<sub>3</sub> e Q<sub>4</sub>)**, al centro dei quali è posto un **motore (M)**, che rappresenta l'attuatore pilotato. Vediamo ora cosa accade chiudendo progressivamente e in maniera 'mirata' i quattro interruttori. Per prima cosa **chiodiamo Q<sub>1</sub>**: con questa operazione abbiamo **collegato il terminale sinistro del motore al potenziale positivo di alimentazione**. Tuttavia, poiché il terminale destro è fisicamente scollegato dal circuito (circuito aperto), non vi sarà passaggio di corrente, né tanto meno movimento del motore. Ora immaginiamo di **chiodare** anche l'interruttore **Q<sub>4</sub>**: a questo punto **anche il terminale destro del motore è collegato al circuito, e in particolare alla massa elettrica**. L'attuatore sarà quindi alimentato; la corrente scorrerà da **V<sub>CC</sub>** a **GND** attraversando **Q<sub>1</sub>**, **M** (dal terminale sinistro a quello destro) e, infine, **Q<sub>4</sub>** (vedi figura in alto a sinistra nella pagina successiva). Il motore si metterà in movimento



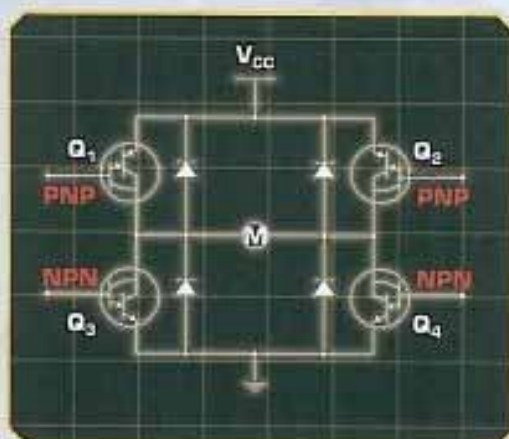


per effetto del passaggio di elettricità. Ora ragioniamo in termini simmetrici pensando di **chiudere**  $Q_2$  e  $Q_3$  e di **lasciare aperti**  $Q_1$  e  $Q_4$  (figura sopra a destra). Anche in questo caso avremo un passaggio di corrente da  $V_{CC}$  a **GND**. Tuttavia, tale flusso di corrente seguirà un **percorso complementare** rispetto a quello visto in precedenza. La corrente, infatti, scorrerà attraverso gli interruttori  $Q_2$  e  $Q_3$ , passando anche in questo caso per il motore, ma **con verso opposto rispetto a quello ottenuto dalla chiusura di  $Q_1$  e  $Q_4$** . Ricordando quanto visto nel fascicolo 9, inoltre, **poiché il verso del flusso di corrente è stato invertito, sarà invertito anche il senso di rotazione del motore stesso**. Questa struttura geometrica di interruttori, quindi, ci permette non solo di **'accendere'** e **'spegnere'** il motore, ma anche di **'pilotarlo'** scegliendone il **senso di rotazione**. Negli esempi citati abbiamo fatto riferimento a un modello circuitale composto da interruttori,

ossia dispositivi che possono essere usati per aprire e chiudere un circuito in modo meccanico. Ovviamente, tale scelta è stata fatta esclusivamente per motivi teorici e didattici, in maniera da facilitare la comprensione dei principi di funzionamento di questa struttura elettrica.

#### IL PONTE A 'H' CON I TRANSISTOR >>>

Nelle applicazioni reali, invece, gli interruttori sono rimpiazzati da **transistor** (che abbiamo più volte paragonato a interruttori comandabili elettricamente) o eventualmente **relè**, nel caso di motori che richiedano tensioni e correnti particolarmente elevate. Quello che vedremo ora (e che sposteremo nei prossimi Workshop) è uno



**C** A sinistra sono mostrate le due configurazioni di 'conduzione'. Attivando in modo mirato i transistor (ad esempio  $Q_1$  e  $Q_4$  o  $Q_2$  e  $Q_3$ ) è possibile avviare il motore  $M$  secondo i due versi di rotazione.

schema generico di un H-bridge basato su transistor a giunzione bipolare (in particolare di tipo **Darlington**, dello stesso tipo di quelli introdotti nello StepbyStep del fascicolo 14). Ognuno dei quattro transistor (schema in basso) svolge un ruolo praticamente identico a quello dell'interruttore corrispondente: ciò significa che anche in questo caso il comportamento del motore dipende dallo stato (interdizione o conduzione) dei quattro Darlington. I **diodi** che si vedono inseriti all'interno del circuito, invece, hanno la funzione di proteggere i transistor dai picchi di tensione generati dal motore in movimento (vedi StepbyStep del fascicolo 14). Puoi notare anche i due differenti tipi di transistor utilizzati: i due inferiori ( $Q_3$  e  $Q_4$ ) sono di tipo 'npn', mentre quelli superiori ( $Q_1$  e  $Q_2$ ) sono di tipo 'pnp'. Ciò significa che i loro funzionamenti saranno 'elettricamente opposti' (ad esempio gli npn amplificano la corrente entrante dalla base, mentre i pnp quella uscente;

**C** Un ponte a 'H' realizzato con transistor Darlington (in alto di tipo PNP, in basso di tipo NPN). I transistor hanno un ruolo equivalente a quello degli interruttori di tipo meccanico.



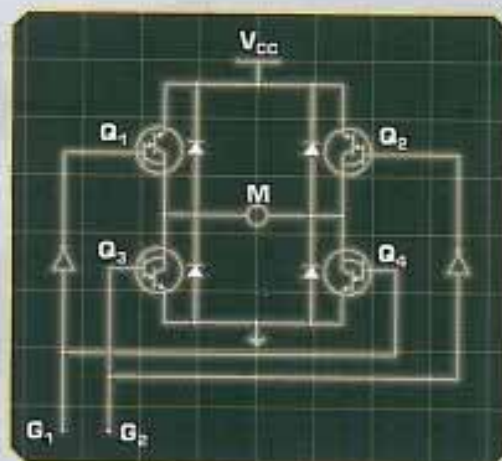
le tensioni di polarizzazione sono opposte ecc). L'utilizzo delle due tipologie di Darlington complementari consente di avere un comportamento 'speculare' tra la metà superiore e la metà inferiore del ponte a 'H'.

**IL CIRCUITO DI CONTROLLO >>>**

Abbiamo definito in modo generico la struttura circuitale di 'alimentazione' del motore elettrico; non abbiamo, però, ancora accennato al modo in cui tale struttura può essere controllata. In particolare, ciò che ci interesserà in questo paragrafo sarà la **realizzazione di un circuito di tipo digitale** che ci permetta di pilotare il motore secondo le tre configurazioni di interruttori identificate in precedenza. Ipotizziamo, come specifica, un **sistema logico formato da due differenti linee di ingresso**, aventi due funzioni ben precise. Chiameremo la prima di esse **EN ('Enable')**. Tale ingresso costituirà la linea di **'attivazione'**

**Il circuito che stiamo progettando è composto da un ponte a 'H' controllato da una interfaccia digitale a due linee: una di accensione e una di selezione del verso di rotazione.**

del motore. **Se EN=0 il motore sarà spento; al contrario se EN=1 il ponte a 'H' alimenterà il motore**, ma secondo quale dei due versi di rotazione? La scelta del verso di rotazione sarà effettuabile impostando lo stato del **secondo ingresso**, che chiameremo **DIR** (come **'Direzione'**). Con **DIR=0 il motore ruoterà in un verso, con DIR=1 il motore ruoterà nel verso opposto** [ovviamente se, come detto in precedenza, viene settato EN=1). Prima di procedere con la progettazione dell'interfaccia, dedichiamo una breve osservazione al comportamento che vogliamo riprodurre: in tutte e tre le configurazioni descritte (ossia **Q<sub>1</sub>=Q<sub>2</sub>=Q<sub>3</sub>=Q<sub>4</sub>=OFF; Q<sub>1</sub>=Q<sub>4</sub>=ON, Q<sub>2</sub>=Q<sub>3</sub>=OFF; Q<sub>1</sub>=Q<sub>4</sub>=OFF, Q<sub>2</sub>=Q<sub>3</sub>=ON**) si può notare che i transistor operano 'a coppie'. In particolare possiamo osservare come **Q<sub>1</sub> e Q<sub>4</sub> operino sempre accoppiati e come lo stesso valga anche per Q<sub>2</sub> e Q<sub>3</sub>**. Possono quindi essere raggruppati a due a due. Chiameremo **G<sub>1</sub> il segnale di comando per l'attivazione di Q<sub>1</sub> e Q<sub>4</sub> e G<sub>2</sub> quello che attiva la**



**Una possibile scelta per facilitare il controllo del ponte a 'H' consiste nel 'raggruppare' i transistor opposti rispetto a M. In questo caso Q<sub>1</sub> si attiva assieme a Q<sub>4</sub> (gruppo G<sub>1</sub>) e Q<sub>2</sub> assieme a Q<sub>3</sub> (gruppo G<sub>2</sub>).**

**coppia Q<sub>2</sub>, Q<sub>3</sub>**. Un'ulteriore importante osservazione deve essere fatta a partire dalla presenza delle due differenti famiglie di Darlington (npn e npn): come ricordato in precedenza, mentre gli npn amplificano la corrente 'entrante' nella base, i npn amplificano quella 'uscente' da essa. Uno dei modi per ottenere ciò è **'negare' il segnale di controllo attraverso una porta NOT**. Così facendo, in presenza di una tensione alta sul transistor npn appartenente a un determinato gruppo, avremo un valore basso sull'altro e viceversa. Il circuito diviene quindi quello mostrato nella figura in alto. A questo punto non resta che progettare il rimanente blocco elettronico per il controllo del ponte a 'H'. Abbiamo già detto che tale rete circuitale sarà dotata di due ingressi distinti, chiamati EN e DIR (attivazione e direzione di movimento del motore).

**SCHEMA DEL PONTE A 'H'**





Abbiamo infine suddiviso i quattro transistor in gruppi di due, comandabili attraverso due segnali distinti chiamati  $G_1$  e  $G_2$ . La rete logica che dovremo progettare, quindi, avrà come ingressi le due linee di controllo EN e DIR e come uscite i due segnali  $G_1$  e  $G_2$ , che andranno a collegarsi direttamente all'H-bridge.

**LA SINTESI DELLA RETE DI CONTROLLO**

Realizziamo ora la tabella di verità della rete di controllo. Usiamo come ingressi le variabili EN e DIR e come uscite le linee  $G_1$  e  $G_2$ . Come prima cosa consideriamo i casi di ingresso con EN=0. Abbiamo detto che portare la variabile EN a zero significa 'spegnere' il motore. Dobbiamo quindi fare in modo che tutti i transistor si trovino in condizioni di interdizione e che non vi sia, di conseguenza, passaggio di corrente attraverso il motore. Osservando lo schema elettrico in alto nella pagina precedente è possibile notare come sia possibile 'spegnere' i Darlington portando gli ingressi delle due linee a massa (ossia a un valore logico basso). In tali condizioni, infatti, i dispositivi npn avranno entrambe le giunzioni polarizzate inversamente (regione di interdizione, fascicolo 14). Alla stessa maniera, le porte NOT forzeranno le basi dei pnp a un

valore alto ( $V_{DD}$ ), mantenendo anch'essi in condizioni di interdizione. Entrambe le righe della tabella di verità con EN=0, quindi, dovranno avere le uscite  $G_1$  e  $G_2$  basse:

EN	DIR	$G_1$	$G_2$
0	0	0	0
0	1	0	0
1	0	-	-
1	1	-	-

Le cose cambiano, invece, in condizioni di attivazione del motore, ossia con EN=1. In questi stati, infatti, sarà necessario attivare i due gruppi di transistor in modo da far fluire la corrente attraverso M secondo le due possibili direzioni. Ciò è possibile portando in stato di conduzione i Darlington accoppiati in maniera mutuamente esclusiva (se è 'acceso' il gruppo  $G_1$  è 'spento'  $G_2$  e viceversa). Come si può vedere, non è stato considerato il caso in cui vengano attivati tutti i transistor in contemporanea: questa condizione, infatti, creerebbe un cortocircuito tra l'alimentazione e la massa, con tutte le conseguenze che ne derivano. A questo punto non ci resta che completare la tabella di verità, considerando anche gli ultimi due casi citati. Portiamo a '1' l'uscita  $G_1$  in

presenza di DIR=0 e, viceversa, portiamo a '1'  $G_2$  quando DIR assume valore uguale a 1.

EN	DIR	$G_1$	$G_2$
0	0	0	0
0	1	0	0
1	0	1	0
1	1	0	1

La tabella di verità è completata, non ci resta che ricavare le espressioni logiche associate. Innanzitutto osserviamo che vi sono due uscite indipendenti. Ciò significa che dovremo ricavare due espressioni logiche differenti: una per ogni uscita. Iniziamo da  $G_1$ . Considerando tale uscita, è possibile vedere che vi è un unico caso in cui si presenta alta, ossia quando EN=1 e DIR=0. Applicando la tecnica vista nel fascicolo precedente, mettiamo in AND i due ingressi, negando la variabile DIR, in quanto uguale a 0. La rete logica  $G_1$  sarà quindi:

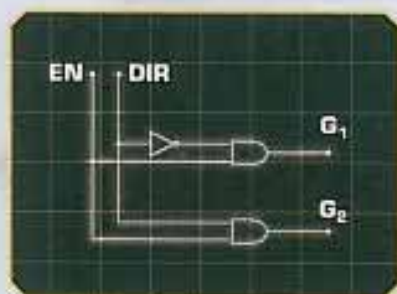
$$G_1 = EN \overline{DIR}$$

A sua volta  $G_2$  è alta solo quando sia EN che DIR si presentano con valore alto. In pratica lo stesso comportamento dell'operatore semplice AND. Tale espressione sarà, quindi:

$$G_2 = EN \cdot DIR$$

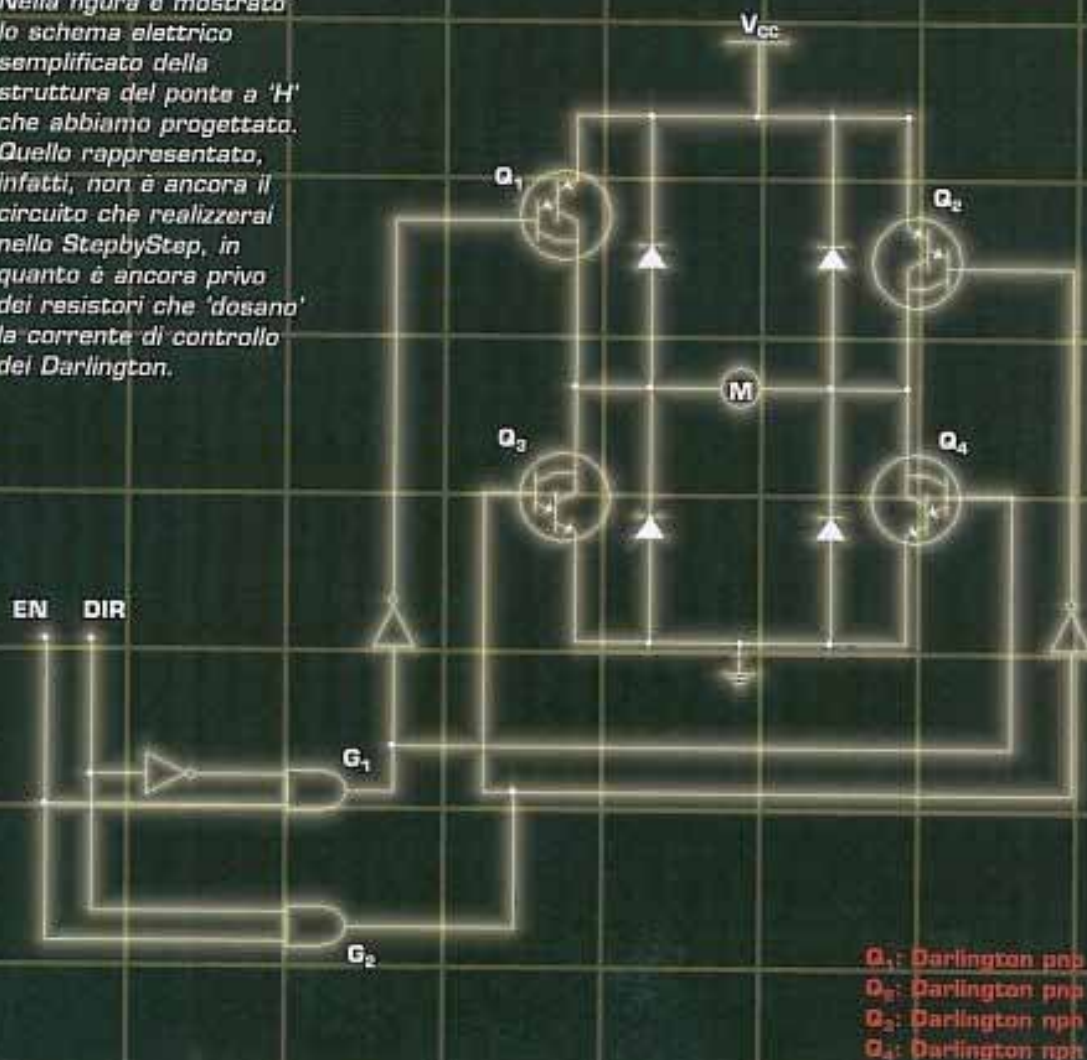
Le due espressioni sono rappresentate, quindi, dal circuito mostrato nelle figure a lato, che collegato al ponte a 'H' darà origine allo schema circuitale presentato nella prossima pagina. La struttura del circuito è praticamente

La semplice rete logica di controllo che traduce le due linee in ingresso (chiamate EN e DIR) nei due segnali elettrici di attivazione dei transistor Darlington.





Nella figura è mostrato lo schema elettrico semplificato della struttura del ponte a 'H' che abbiamo progettato. Quello rappresentato, infatti, non è ancora il circuito che realizzerai nello StepbyStep, in quanto è ancora privo dei resistori che 'dosano' la corrente di controllo dei Darlington.



ultimata, anche se non è ancora del tutto completa: mancano, infatti, **alcuni resistori** (che andranno posti tra le uscite delle porte logiche e i pin di base dei Darlington) che **regolino e limitino l'intensità di corrente** passante attraverso le porte logiche, ma per l'inserimento dettagliato di tali componenti rimandiamo ai prossimi Workshop, all'interno dei quali realizzeremo fisicamente il circuito progettato.

#### IN CONCLUSIONE >>>

In queste pagine abbiamo introdotto e progettato un semplice, ma utile, sistema, a cui potremo far ricorso ogni volta che vi sia la necessità di pilotare un motorino elettrico a spazzole (di quelli acquistabili nei negozi di modellismo). La scelta di progettare questo sistema di 'pilotaggio' per motori con un'interfaccia hardware di tipo digitale ci permetterà, in futuro, di interfacciarlo

con i comuni microcontrollori o con le più semplici reti logiche (a patto che si rispettino le specifiche elettriche dei livelli logici). Anche se realizzeremo il ponte a 'H' utilizzando dispositivi 'elementari' è importante far presente che sul mercato sono facilmente acquistabili **H-bridge integrati** (come l'**L298**), ossia circuiti che incorporano in pochi centimetri uno o più ponti a 'H', assieme alla logica di controllo.

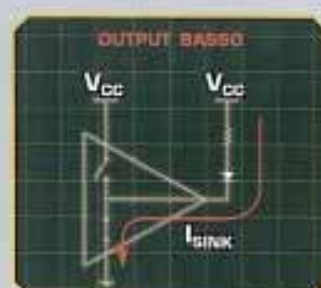
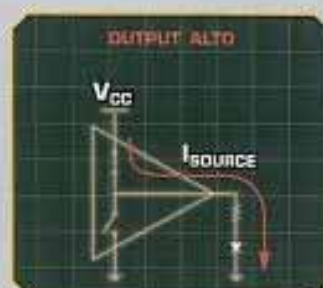
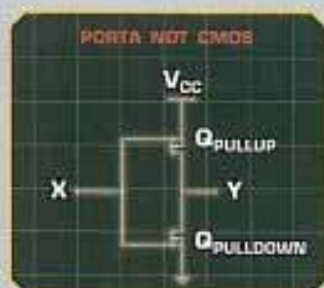


# F O C U S O N

## IN USCITA DAI CIRCUITI LOGICI

I circuiti logici sono sistemi basati su transistor che elaborano i segnali in ingresso secondo precisi livelli elettrici. Restano, comunque, circuiti elettrici con proprietà fisiche ben precise e di cui è indispensabile tenere conto in fase di progettazione. In questo FOCUS ON ci concentreremo, in particolare, sulle caratteristiche di funzionamento dei blocchi circuitali di uscita presenti all'interno delle porte logiche. Prendiamo come riferimento una porta NOT CMOS, il cui schema è mostrato nell'immagine in basso a sinistra. Il blocco di uscita da tale porta è composto da due transistor MOSFET di tipo complementare (da cui CMOS), la cui attivazione è mutuamente esclusiva. Tali transistor prendono il nome di 'transistor di pullup' (di innalzamento) e 'transistor di pulldown' (di abbassamento), due appellativi che derivano direttamente dalla funzione svolta all'interno del circuito elettronico. Il transistor di pullup (realizzato con un p-MOS), infatti, si attiva in presenza di un ingresso 'basso' collegando l'uscita Y a  $V_{CC}$  (ossia 'innalza' l'uscita, immagine in basso al centro). Al contrario, il transistor

di pulldown (di tipo n-MOS, in basso a destra) si attiva in presenza di un ingresso alto 'abbassando' l'uscita a massa. Quindi, l'uscita di una porta logica può essere utilizzata sia come generatore di tensione continua (tensione pari al valore di tensione 'alto' della porta), sia come una massa circuitale (valore di uscita 'basso' della porta logica). Perché, allora, non è possibile alimentare motori direttamente dalle porte logiche? Perché i transistor di cui sono composte non sono in grado di sopportare le correnti elevate richieste per far muovere un motore. Con l'aiuto dei datasheet è possibile scoprire le correnti sopportate dai componenti facendo riferimento a due specifiche voci. La corrente di 'sink' rappresenta la massima corrente assorbibile dall'ingresso della porta logica. Al contrario, la corrente di 'source' costituisce la massima corrente erogabile dal circuito integrato. In termini pratici, le correnti devono essere limitate facendo ricorso a resistori e, dove necessario, a sistemi di amplificazione, in modo da non portare i dispositivi integrati in condizioni di superamento dei valori critici.



Nella figura sottostante è riportata una porzione di un datasheet relativo al circuito integrato Philips 74HC04. Si può vedere evidenziata la specifica relativa alle correnti di source e sink.

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
$V_{CC}$	supply voltage		-0.5	+7.0	V
$I_{IK}$	input diode current	$V_I < -0.5 \text{ V}$ or $V_I > V_{CC} + 0.5 \text{ V}$	-	±20	mA
$I_{OS}$	output diode current	$V_O < -0.5 \text{ V}$ or $V_O > V_{CC} + 0.5 \text{ V}$	-	±20	mA
$I_O$	output source or sink current	$-0.5 \text{ V} < V_O < V_{CC} + 0.5 \text{ V}$	-	±25	mA