

# **LOGICA DI CONTROLLO PER PILOTAGGIO HALF STEP – FULL STEP DI UN MOTORE PASSO-PASSO**

**Specializzando  
Alessandro Vitale**

# INDICE

<b>INTRODUZIONE</b>	<b>3</b>
<b>1 I MOTORI STEPPER</b>	<b>4</b>
1.1 Principio di funzionamento	4
1.2 Costruzione elettromeccanica	8
1.3 Modalità di pilotaggio	9
1.3.1 Motori unipolari	10
1.3.2 Motori bipolari	12
<b>2 ANALISI E SINTESI DELLA RETE SEQUENZIALE</b>	<b>14</b>
2.1 Tabella di verità	15
2.2 Sintesi con mappe di Karnaugh	15
<b>3 REALIZZAZIONE SU BREAD BOARD</b>	<b>19</b>
3.1 Il clock e il circuito antirimbalzo	19
3.2 Flip-flop e logica di stato futuro	20
3.3 Codifica delle uscite	22
3.4 Amplificatore di potenza	23
<b>PIEDINATURE DEGLI INTEGRATI UTILIZZATI</b>	<b>25</b>

## INTRODUZIONE

Nel presente lavoro è illustrato il progetto, e la relativa realizzazione su bread-board, di una rete sequenziale sincrona in grado di comandare il movimento unidirezionale di un motore stepper bipolare, implementando due diverse tecniche di pilotaggio: l'half step e il full step.

Dal punto di vista didattico, è possibile presentare questo progetto dopo aver descritto le modalità di funzionamento dei motori stepper e dopo aver illustrato le relative tecniche di controllo digitali più semplici basate sull'impiego di automi a stati finiti.

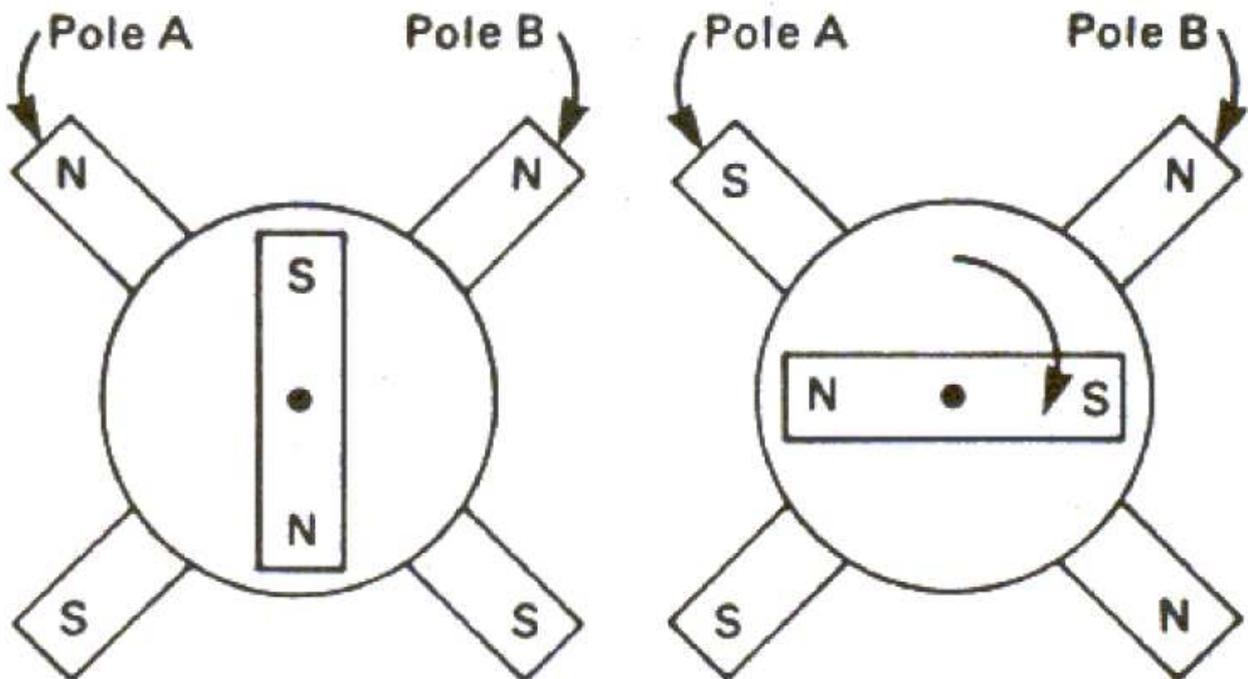
Gli allievi dovranno, inoltre, possedere buona conoscenza riguardo l'analisi e la sintesi di reti sequenziali sincrone con flip-flop, nonché dimestichezza nei montaggi su bread-board.

Considerando la realizzazione di una certa complessità (almeno per allievi al terzo anno di un istituto tecnico), prima di procedere all'assemblaggio su bread-board, è stata dedicata molta cura alla schematizzazione su carta del montaggio, in modo da poter realizzare dapprima tutti i collegamenti più brevi e in seguito tutti gli altri.

# 1 I MOTORI STEPPER

## 1.1 Principio di funzionamento

La figura mostra una rappresentazione semplificata di un motore passo-passo a magneti permanenti:



Il motore è costituito da due parti principali: il rotore che consiste in una serie di magneti permanenti distribuiti radialmente sull'albero di rotazione, e lo statorio costituito da elettromagneti in modo che, opportunamente alimentati, possano generare campi magnetici orientati come in figura. La rotazione dell'albero avviene poiché i magneti permanenti che lo costituiscono tendono ad allinearsi al campo magnetico generato dagli elettromagneti dello statorio. In base all'avvolgimento statorico che viene percorso da corrente ed in base al verso di percorrenza della stessa, è possibile creare un campo magnetico statorico che può assumere (in questa semplificazione) 4 orientamenti spaziali che potremmo individuare come: ALTO, DESTRA, BASSO, SINISTRA.

Il rotore nell'allinearsi al campo magnetico statorico compie una rotazione; il permanere della rotazione del rotore si ottiene ripetendo la sequenza ALTO, DESTRA, BASSO, SINISTRA.

I motori passo-passo sono motori che, a differenza di tutti gli altri, hanno come scopo quello di mantenere fermo l'albero in una posizione di equilibrio: se alimentati si limitano infatti a bloccarsi in una ben precisa posizione angolare. Solo indirettamente è possibile ottenerne la rotazione: occorre inviare al motore una serie di impulsi di corrente, secondo un'opportuna sequenza, in modo tale da far spostare, per scatti successivi, la posizione di equilibrio. E' così possibile far ruotare l'albero nella posizione e alla velocità voluta semplicemente contando gli impulsi ed impostando la loro frequenza, visto che le posizioni di equilibrio dell'albero sono determinate meccanicamente con estrema precisione. I motori stepper sono caratterizzati da una serie di particolarità che li rendono particolarmente adatti a tutte quelle applicazioni che richiedono precisione nello spostamento angolare e nella velocità di rotazione.

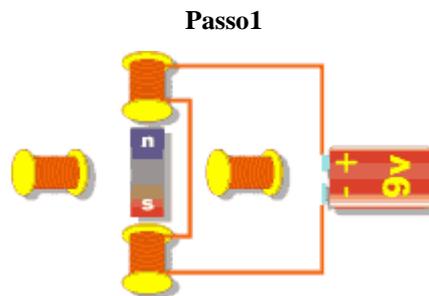
L'uso di un motore stepper presenta i seguenti vantaggi:

- E' possibile realizzare azionamenti di precisione a catena aperta, cioè senza utilizzare sensori di posizione o di velocità.
- Elevata robustezza meccanica ed elettrica.
- Facilità nel far compiere all'albero piccole rotazioni angolari in ambedue i versi e bloccarlo in una determinata posizione.
- La velocità di rotazione può essere molto bassa anche senza l'uso di riduttori meccanici.
- Basso errore di posizione (circa  $3\div 5\%$  del passo).

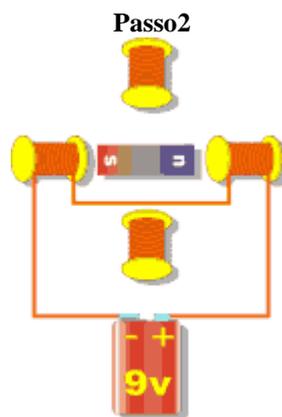
Esistono, inoltre, alcuni aspetti negativi nell'uso di motori stepper di cui bisogna tener conto:

- Richiedono sempre circuiti elettronici per il pilotaggio, in genere di tipo digitale.
- Hanno un funzionamento a scatti e con forti vibrazioni, soprattutto ai bassi regimi e se si adottano le tecniche di pilotaggio più semplici.
- Hanno un costo elevato, relativamente ad altri tipi di motore con analoghe prestazioni.
- Il rendimento energetico è basso e, in genere, la potenza meccanica piccola.
- Difficilmente è possibile raggiungere velocità di rotazione elevate.

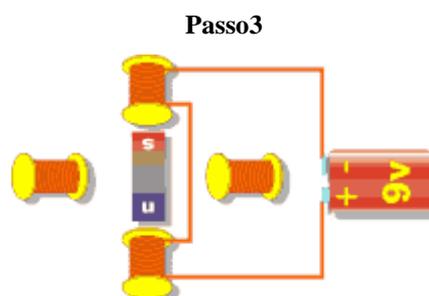
Il principio di funzionamento può essere illustrato, in modo abbastanza semplice, facendo riferimento ad un motore con 4 passi per giro. Il motore presenta quattro elettromagneti collegati in serie a coppie ed una calamita libera di ruotare<sup>1</sup>:



Nel primo passo vengono alimentati i due elettromagneti in verticale. I due magneti sono in serie, il solenoide in alto affaccia il polo S alla calamita mentre il solenoide in basso mostra il proprio polo N. Poli opposti si attraggono, perciò la calamita si porterà con il polo N in alto ed il S in basso.

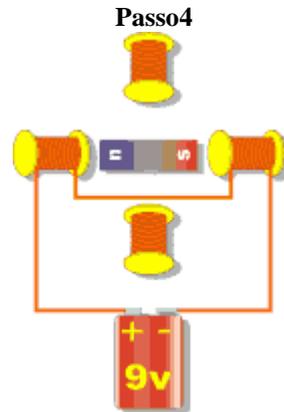


Al passo successivo, sono alimentati i due magneti posti in orizzontale. Anche questi solenoidi sono collegati in serie. La calamita "vedrà" il polo S a destra ed il N a sinistra, e si porterà in questa posizione compiendo un quarto di giro in senso orario. Non ruota dalla parte opposta perchè poli uguali si respingono.



<sup>1</sup> <http://www.nutchip.com/progetti/stepper.htm>

Al terzo passo colleghiamo ancora l'avvolgimento verticale, ma invertendo la polarità della batteria: la corrente circola in senso inverso, il polo S è ora in basso e quello N in alto. La calamita ruota di un altro quarto di giro in senso orario, attirata dai poli opposti. La situazione è simmetrica rispetto al primo passo.



Nell'ultimo passo si alimentano di nuovo i solenoidi in orizzontale, con polarità rovesciata rispetto al secondo passo. La calamita ruota di un ulteriore quarto di giro, per avvicinare il proprio polo N al polo S che ora si trova a sinistra, ed il proprio polo S al polo N che ora è a destra.

La sequenza prosegue ricominciando dal passo 1: così facendo la calamita tornerà alla posizione iniziale e avrà compiuto un giro intero.

## 1.2 Costruzione elettromeccanica

I motori passo-passo si dividono tradizionalmente in tre grandi gruppi: motori a magneti permanenti, motori a riluttanza variabile e motori ibridi; questi ultimi sono i migliori e la quasi totalità di quelli oggi reperibili sul mercato sono proprio di questo tipo. Un motore ibrido è costituito da un rotore e da uno statore:



Il rotore appare come una coppia di ruote dentate affiancate e solidali all'albero (i "denti" sono chiamati coppette) costituite da un nucleo magnetico (le due ruote sono permanentemente magnetizzate, una come NORD, l'altra come SUD) e le coppette in materiale ferromagnetico. Il numero di denti è variabile ma 50 è, in assoluto, il più frequente. Nel rotore non sono presenti fili elettrici e quindi manca completamente ogni connessione elettrica tra la parte in movimento e quella fissa. In genere il rotore è montato su cuscinetti a sfera. Lo statore appare come il classico insieme di avvolgimenti ed il circuito magnetico è costituito da 4 o, più frequentemente, 8 "espansioni polari" (come quello in figura). All'interno dello statore sono presenti piccoli denti che si affacciano esattamente a quelli del rotore; più precisamente, sono esattamente affacciati al rotore solo il gruppo di denti appartenenti ad una espansione polare e a quella opposta; le altre coppie sono sfalsate rispettivamente di  $1/4$ ,  $1/2$  e  $3/4$  del passo dei denti. Avvolti intorno ai poli magnetici dello statore ci sono i fili che, opportunamente percorsi da corrente, generano il campo magnetico.

Dal punto di vista elettrico, i motori stepper possono essere classificati in base al numero di fasi ed al verso di circolazione della corrente negli avvolgimenti (unipolari e bipolari).

Le fasi possono essere avvolte secondo due schemi:

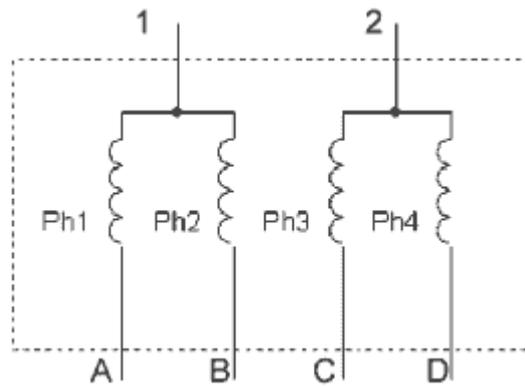
- Sono presenti due soli avvolgimenti (avvolti su più espansioni polari) e quindi all'esterno arrivano due sole coppie di fili: in questo caso si parla di motori bipolari in quanto la corrente dovrà percorrere le fasi nei due versi al fine di creare gli opportuni campi magnetici.
- Sono presenti quattro avvolgimenti avvolti a coppie, in antiparallelo, sulle espansioni polari; all'esterno arrivano almeno cinque fili (spesso sono infatti presenti delle connessioni interne al motore tra le varie fasi). Si parla in questo caso di motori unipolari in quanto la corrente nella singola fase ha sempre lo stesso verso. E' possibile creare due campi magnetici opposti semplicemente scegliendo in quale dei fili deve passare la corrente.

Per distinguere i due tipi di motore, per i quali sono richieste tecniche di pilotaggio diverse, basta contare i fili uscenti: se sono 4 abbiamo un motore bipolare, se sono 5 un unipolare.

Una tipologia particolare di motore passo-passo è utilizzabile sia in configurazione unipolare che bipolare: si tratta di quelli a 6 fili. Nei motori stepper disponibili in commercio, il numero di passi per giro viene aumentato incrementando il numero di poli presenti sul rotore. Valori tipici sono 12, 24, 48, 100 e 200 che permettono rispettivamente una risoluzione di 30, 15, 7.5, 3.6 e 1.8 gradi per giro.

### **1.3 Modalità di pilotaggio**

Per comandare un motore passo-passo è necessario indurre il passaggio della corrente negli avvolgimenti del motore secondo un'opportuna sequenza. Nella figura seguente sono riportati gli avvolgimenti di un motore stepper a 6 fili, che può funzionare sia in modalità unipolare (con i terminali 1 e 2 connessi entrambi all'alimentazione positiva), che bipolare (con i terminali 1 e 2 non connessi e quindi le fasi risultano connesse due a due):



I terminali A, B, C, D servono a regolare il passaggio o meno di corrente nei rispettivi avvolgimenti.

### 1.3.1 Motori unipolari

Per questo tipo di motori stepper, al valore logico 1 sui segnali A, B, C e D corrisponde il passaggio della corrente nella fase corrispondente; la sequenza con cui la corrente è applicata alle fasi può essere di vari tipi:

**Wave mode:** è il sistema base di funzionamento; con esso la corrente è applicata ad una sola delle fasi alla volta, secondo la tabella seguente:

<b>Passo</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
<b>1</b>	0	0	0	1
<b>2</b>	1	0	0	0
<b>3</b>	0	0	1	0
<b>4</b>	0	1	0	0

**Full step:** la corrente è applicata contemporaneamente a due fasi

Passo	A	B	C	D
1	1	0	0	1
2	1	0	1	0
3	0	1	1	0
4	0	1	0	1

In questo modo, il rotore è trattenuto in posizioni di equilibrio intermedie a quelle tipiche del funzionamento wave mode. La coppia disponibile è circa 1,4 volte maggiore di quella ottenuta con una sola fase attiva alla volta; il consumo di corrente e, quindi, il riscaldamento raddoppiano.

**Half step:** è in pratica l'alternarsi delle configurazioni dei due metodi appena visti e si basa sulla constatazione che tra le posizioni di equilibrio delle due sequenze precedentemente viste è presente uno sfasamento di esattamente mezzo passo.

Passo	A	B	C	D
1	0	0	0	1
2	1	0	0	1
3	1	0	0	0
4	1	0	1	0
5	0	0	1	0
6	0	1	1	0
7	0	1	0	0
8	0	1	0	1

Il vantaggio di questo tipo di pilotaggio è che raddoppia il numero di passi disponibile per un certo motore. Lo svantaggio è una certa irregolarità nella coppia (che per ogni passo cambia da 1 a 1.4 o viceversa), e nel consumo di potenza (che, sempre per ogni passo, cambia da 1 a 2).

Questo metodo è spesso indicato come half-step senza controllo di coppia per sottolineare come la coppia meccanica sia variabile. In alternativa è possibile adottare tecniche capaci di rendere omogenea la coppia ma, per i motori unipolari, questa non è una scelta conveniente a causa della

complessità del circuito da realizzare in rapporto agli effetti utili; è, invece, una via praticabile per motori bipolari.

### 1.3.2 Motori bipolari

In questo caso, ai valori logici 1 e 0 sui segnali A, B, C e D corrispondono rispettivamente un livello alto o basso di tensione sul terminale corrispondente del motore. Anche in questo caso è possibile realizzare diverse sequenze di comando:

**Wave mode:** la corrente è applicata ad una sola delle fasi alla volta, secondo la tabella seguente.

<b>Passo</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
<b>1</b>	T	T	0	1
<b>2</b>	1	0	X	X
<b>3</b>	Y	Y	1	0
<b>4</b>	0	1	Z	Z

Per ogni passo i segnali contrassegnati con le stesse lettere devono avere lo stesso valore logico, in modo tale che sui terminali corrispondenti sia imposto lo stesso potenziale. Le condizioni di funzionamento per ciascuna fase sono tre: corrente in un verso, corrente nell'altro verso, assenza di corrente.

**Full step:** la corrente è applicata contemporaneamente a due fasi, ma cambia verso. La sequenza di comando è illustrata nella tabella seguente:

<b>Passo</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
<b>1</b>	1	0	0	1
<b>2</b>	1	0	1	0
<b>3</b>	0	1	1	0
<b>4</b>	0	1	0	1

**Half step:** è l'insieme dei due metodi precedenti, con l'effetto principale di ottenere il raddoppio del numero dei passi. Gli effetti sulla coppia e la corrente assorbita sono quelli descritti in precedenza a proposito dei motori unipolari.

<b>Passo</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
<b>1</b>	T	T	0	1
<b>2</b>	1	0	0	1
<b>3</b>	1	0	X	X
<b>4</b>	1	0	1	0
<b>5</b>	Y	Y	1	0
<b>6</b>	0	1	1	0
<b>7</b>	0	1	Z	Z
<b>8</b>	0	1	0	1

## 2 ANALISI E SINTESI DELLA RETE SEQUENZIALE

Nel presente lavoro è stata implementata sia la tecnica di pilotaggio di tipo full-step, che quella half-step; agendo su un ingresso di selezione (indicato nel seguito con la lettera “V”), realizzato con un interruttore, è possibile passare da un tipo di pilotaggio all’altro, evidenziando, di fatto, un cambiamento di velocità di rotazione dello step motor. La realizzazione del progetto, implementato quasi interamente con integrati della famiglia logica TTL LS 74, ha richiesto l’utilizzo dei seguenti componenti:

- Un multivibratore astabile per generare gli impulsi di sincronismo;
- un interruttore e relativo circuito antirimbalzo;
- tre flip flop di tipo “D” (per il pilotaggio half-step sono necessari otto diversi stati) e relativa logica di stato futuro;
- integrati con porte logiche universali di tipo NAND, per la logica combinatoria dei terminali A, B, C, D;
- un amplificatore di potenza per la connessione del motore (è stato utilizzato l’integrato CMOS L293D, particolarmente adatto a pilotare carichi induttivi come i motori).

Utilizzando 16 stati (e quindi otto stati ridondanti), si poteva ottenere una notevole semplificazione circuitale rispetto all’implementazione scelta, ma col rischio che il sistema potesse capitare in stati non previsti da quelli di lavoro con conseguente situazione di stallo del motore; si è deciso, quindi, di realizzare l’automa ad otto stati, rispettando, ad ogni transizione, la codifica di Gray.

Tabella di verità

V	Q2	Q1	Q0	D2	D1	D0	A	B	C	D
1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1
1	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0
1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0
1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1
1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1
1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0
1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0
1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1
0	0	0	0	0	0	1	T	T	0	1
0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1
0	0	1	1	0	1	0	1	0	X	X
0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0
0	1	1	0	1	1	1	Y	Y	1	0
0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0
0	1	0	1	1	0	0	0	1	Z	Z
0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1

Non trovando significative differenze fra le varie scelte possibili, riguardo le configurazioni “TT”, “XX”, “YY” e “ZZ” è stato assegnato a tutte il valore logico “0”, pervenendo alla seguente sintesi mediante mappe di Karnaugh:

$D_0$

		$Q_1 Q_0$			
		00	01	11	10
$V$	0	1	1		
	0			1	1
	1			1	1
	1	1	1		

$$D_0 = \overline{Q_1} \cdot \overline{Q_2} + Q_1 \cdot Q_2 = \overline{\overline{\overline{\overline{Q_1} \cdot Q_2}}}$$

$D_1$

		$Q_1 Q_0$			
		00	01	11	10
$\vee$	$Q_2$	0	1	1	1
	0				1
	1				1
	1				1
	1	1	1	1	
	0				

$$D_1 = Q_0 \cdot \overline{Q_2} + Q_1 \cdot \overline{Q_0} = \overline{\overline{\overline{\overline{Q_0} \cdot Q_2} \cdot \overline{Q_1} \cdot Q_0}}$$

$D_2$

		$Q_1 Q_0$			
		00	01	11	10
$\vee$	$Q_2$	0	1	1	1
	0				1
	1		1	1	1
	1				1
	1	1	1	1	
	0				

$$D_2 = Q_0 \cdot Q_2 + Q_1 \cdot \overline{Q_0} = \overline{\overline{\overline{\overline{Q_0} \cdot Q_2} \cdot \overline{Q_1} \cdot Q_0}}$$

A

		$Q_1 Q_0$			
		00	01	11	10
$V$	$Q_2$	0	0	1	1
	0				
	1			1	1
	1	1	1		

$$A = \overline{\overline{\overline{Q_1 \cdot \overline{V} \cdot Q_2 \cdot Q_0} \cdot \overline{V} \cdot Q_2} \cdot \overline{V} \cdot Q_1 \cdot Q_2} \cdot \overline{V} \cdot Q_1 \cdot Q_2;$$

B

		$Q_1 Q_0$			
		00	01	11	10
$V$	$Q_2$	0	0	1	1
	0	1	1	1	
	1	1	1		
	1			1	1

$$B = \overline{\overline{\overline{Q_1 \cdot Q_2 \cdot Q_0} \cdot \overline{V} \cdot Q_2} \cdot \overline{V} \cdot Q_1 \cdot Q_2};$$

C

		$Q_1 Q_0$			
		00	01	11	10
$V$	$Q_2$	0	0	1	1
	0			1	1
	1		1	1	
	1		1	1	

$$C = \overline{\overline{Q_0} \cdot \overline{V} \cdot \overline{Q_1} \cdot \overline{V} \cdot \overline{Q_2} \cdot \overline{V} \cdot \overline{Q_1} \cdot \overline{Q_0}};$$

D

		$Q_1 Q_0$			
		00	01	11	10
$V$	$Q_2$	0	0	1	1
	0	1	1		
	1	1			1
	1	1			1

$$D = \overline{\overline{\overline{Q_0} \cdot \overline{V} \cdot \overline{Q_0} \cdot \overline{Q_1} \cdot \overline{V} \cdot \overline{Q_1} \cdot \overline{Q_2}}}$$

## 3 REALIZZAZIONE SU BREAD-BOARD

Il montaggio può essere suddiviso nei seguenti blocchi:

1. Astabile e circuito antirimbalo
2. Flip-flop e relativa logica di stato futuro
3. Codifica per i terminali A, B, C, D
4. Amplificatore di potenza.

Alla fine di ogni blocco può essere testato il funzionamento parziale mediante diodi LED connessi in logica negativa.

### 3.1 Il clock e il circuito antirimbalo

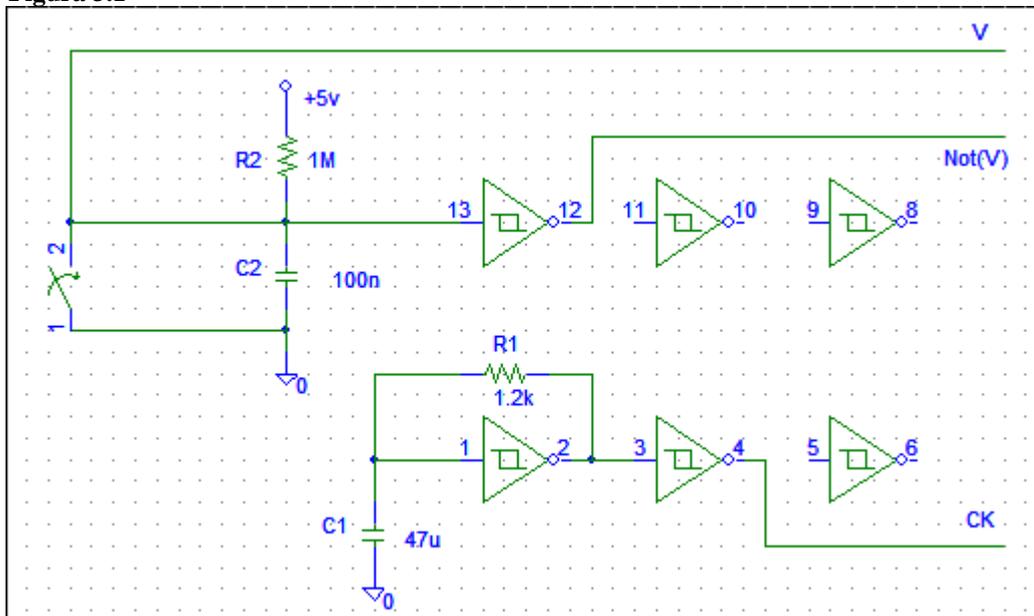
Sono stati realizzati entrambi su un unico integrato, il 74HC14, compatibile con la serie 74LS; la scelta di questo integrato in logica high speed CMOS ha diverse motivazioni:

- L'uso di porte trigger è più efficiente per i circuiti antirimbalo. Se ad esempio, dopo aver chiuso l'interruttore, la tensione ai capi del condensatore  $C_2$  (figura 3.1) supera la tensione di soglia inferiore  $V_{TL}$  della porta trigger, ma non quella superiore  $V_{TH}$ , l'uscita della porta NOT permane nello stato alto ed è quindi insensibile a rimbalzi meccanici.
- Nelle logiche CMOS le tensioni di soglia superiore e inferiore sono simmetriche rispetto ai livelli logici alto e basso (risp.  $1/3$  e  $2/3 V_{CC}$ ), a differenza delle TTL.
- Avendo la necessità, in fase di montaggio, di provare mano a mano il funzionamento degli integrati già assemblati, era necessaria una costante di tempo di clock dell'ordine di alcuni secondi e, dato che i condensatori elettrolitici in commercio arrivano al più a  $470\mu F$ , ciò equivaleva ad utilizzare resistenze dell'ordine dei  $10\text{ k}\Omega$ , cosa possibile solo nelle logiche CMOS (nelle logiche TTL il valore massimo utilizzabile è di circa  $2\text{ k}\Omega$ )

## DIMENSIONAMENTO DEI COMPONENTI

Per quanto riguarda l'antirimbalzo, la costante di tempo  $\tau = R_2C_2$  deve essere sufficientemente grande da evitare che la carica sul condensatore raggiunga il valore di  $2/3 V_{CC}$  (o  $1/3 V_{CC}$  nella transizione opposta) quando l'uscita della porta è alta (risp. bassa); una scelta opportuna può essere<sup>2</sup>  $\tau = 100 \text{ ms}$  e quindi  $R_2 = 1 \text{ M}\Omega$ ,  $C_2 = 100 \text{ nF}$ . Per quel che concerne l'astabile, il cui periodo è  $\approx 1.4 R_1C_1$ , è stata scelta sperimentalmente, dopo aver connesso lo step motor, una costante di tempo di  $56.4 \text{ ms}$ .

Figura 3.1



I pin 14 e 7 dell'integrato, non presenti in figura, vanno connessi rispettivamente a 5V e al comune.

### 3.2 Flip-flop e logica di stato futuro

I tre flip-flop D necessari sono disponibili nell'integrato 74LS175 (4 F.F.); non disponendo di quest'ultimo e accorgendomi di avere spazio sufficiente sulla bread-board ho utilizzato due integrati 74LS74. Per le funzioni di stato futuro  $D_0$ ,  $D_1$  e  $D_2$  sono sufficienti otto porte NAND a due ingressi (il mintermine  $\overline{Q_0} \cdot Q_1$  è presente sia per  $D_1$  che per  $D_2$ ) e quindi due integrati 74LS00.

<sup>2</sup> Panella-Spalierno, Corso di elettronica 1, Arnoldo Mondadori Scuola, pag.163-164

### COLLEGAMENTI DA REALIZZARE

Indicando i quattro integrati 74LS74, 74LS74, 74LS00, 74LS00 rispettivamente con le lettere F, G, H, I si hanno, nell'ordine, i seguenti collegamenti:

- I pin 14 di tutti gli integrati a 5V, i pin 7 di tutti gli integrati al comune;
- Clock (ck) – F<sub>3</sub> – G<sub>3</sub> – G<sub>11</sub>;
- clear: F<sub>1</sub> – G<sub>1</sub> – G<sub>13</sub> -5V;
- preset: F<sub>4</sub> – G<sub>4</sub> – G<sub>10</sub> – 5V;
- H<sub>13</sub> – I<sub>1</sub> – F<sub>5</sub> ( $= Q_0$ );
- H<sub>10</sub> – F<sub>6</sub> ( $= \overline{Q_0}$ );
- H<sub>4</sub> – H<sub>9</sub> – G<sub>5</sub> ( $= Q_1$ );
- H<sub>1</sub> – G<sub>6</sub> ( $= \overline{Q_1}$ );
- H<sub>5</sub> – I<sub>2</sub> – G<sub>9</sub> ( $= Q_2$ );
- H<sub>2</sub> – H<sub>12</sub> – G<sub>8</sub> ( $= \overline{Q_2}$ );
- I<sub>13</sub> – H<sub>3</sub> ( $= \overline{\overline{Q_1 \cdot Q_2}}$ );
- I<sub>12</sub> – H<sub>6</sub> ( $= \overline{Q_1 \cdot Q_2}$ );
- I<sub>10</sub> – H<sub>11</sub> ( $= \overline{Q_0 \cdot \overline{Q_2}}$ );
- I<sub>9</sub> – I<sub>5</sub> – H<sub>8</sub> ( $= \overline{\overline{Q_0 \cdot Q_1}}$ );
- I<sub>4</sub> – I<sub>3</sub> ( $= \overline{Q_0 \cdot Q_2}$ );
- I<sub>11</sub> – F<sub>2</sub> ( $= D_0$ );
- I<sub>8</sub> – G<sub>2</sub> ( $= D_1$ );
- I<sub>6</sub> – G<sub>12</sub> ( $= D_2$ );

Le uscite dei flip-flop e l'ingresso di selezione V sono state riportate, in colonna, all'uscita del secondo blocco, sul lato inferiore della basetta; analogamente è stato fatto sul lato superiore, dove sono state riportate le uscite complementate sia dei F.F. che dell'ingresso di selezione; questa operazione ha semplificato sensibilmente i collegamenti per la codifica d'uscita.

### 3.3 Codifica delle uscite

Occorre realizzare 17 porte NAND, di cui una a 4 ingressi, quattro a 2 ingressi e dodici a 3; sono stati utilizzati, quindi, 5 integrati 74LS10 (tre NAND a 3 ingressi) e un integrato 74LS20 (due NAND a 4 ingressi). Con questa scelta, quattro NAND a 3 ingressi e una NAND a 4 sono utilizzate con due degli ingressi cortocircuitati (indicati con un asterisco).

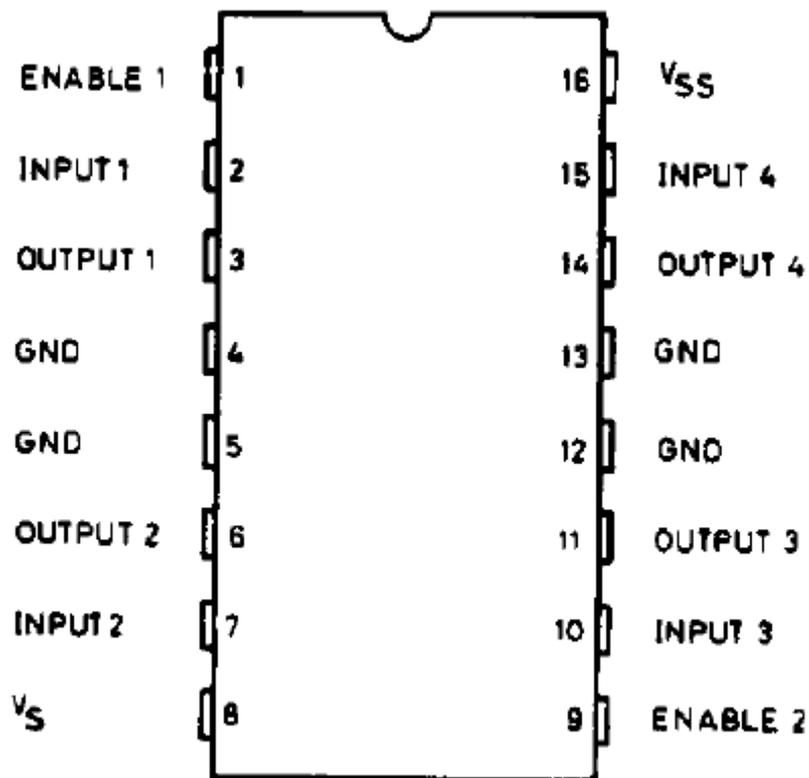
#### COLLEGAMENTI DA REALIZZARE

Indicando i cinque integrati 74LS10, e l'integrato 74LS20 rispettivamente con le lettere L, M, N, O, P, R si hanno i seguenti collegamenti:

- I pin 14 di tutti gli integrati a 5V, i pin 7 di tutti gli integrati al comune;
- $Q_0 - L_3 - N_1 - N_2^* - P_5$ ;
- $\overline{Q_0} - M_9 - N_3 - O_1 - O_2^*$ ;
- $Q_1 - L_{11} - M_{11} - M_3 - P_1 - R_9 - R_{10}^*$ ;
- $\overline{Q_1} - L_{13} - N_4 - N_5^* - O_9 - P_9$ ;
- $Q_2 - L_1 - L_2^* - L_4 - M_4 - R_{12}$ ;
- $\overline{Q_2} - L_9 - O_{11} - P_{11} - P_{13} - P_4$ ;
- $V - L_{10} - N_{13} - O_{13} - P_{10} - R_{13}$ ;
- $\overline{V} - L_5 - M_5 - M_{10} - O_{10} - P_2 - P_3$ ;
- $M_1 - L_6 = \overline{Q_0 \cdot Q_2 \cdot \overline{V}}$ ;
- $M_2 - L_8 = \overline{Q_1 \cdot \overline{Q_2} \cdot V}$ ;
- $M_{13} - L_{12} = \overline{\overline{Q_1 \cdot Q_2}}$ ;
- $N_9 - M_6 = \overline{Q_1 \cdot Q_2 \cdot \overline{V}}$ ;
- $N_{10} - M_8 = \overline{\overline{Q_0 \cdot Q_1 \cdot \overline{V}}}$ ;
- $N_{11} - N_{12} = \overline{Q_0 \cdot V}$ ;
- $O_3 - N_6 = \overline{\overline{Q_0 \cdot Q_1}}$ ;
- $O_4 - O_{12} = \overline{\overline{Q_0 \cdot V}}$ ;
- $O_5 - O_8 = \overline{\overline{Q_1 \cdot \overline{Q_2} \cdot \overline{V}}}$ ;

- $R_1 - P_{12} = \overline{Q_1 \cdot Q_2 \cdot V}$ ;
- $R_2 - P_8 = \overline{Q_1 \cdot Q_2 \cdot V}$ ;
- $R_4 - P_6 = \overline{Q_0 \cdot Q_2 \cdot V}$ ;
- $R_5 - R_8 = \overline{Q_1 \cdot Q_2 \cdot V}$ ;
- $R_3 - R_{11}$  : floating.

### 3.4 Amplificatore di potenza



Dalla piedinatura dell'integrato si deduce che:

- Gli ingressi di Enable (1 e 9), non essendo previsto un controllo specifico, vanno abilitati entrambi (5V).

- L'alimentazione principale  $V_s$  va a 5V, mentre quella supplementare  $V_{ss}$  non è necessaria in questa applicazione e si può lasciare floating.

I collegamenti rimanenti sono quindi:

4-5-12-13 al comune;

2 –  $R_6$ ;

7 –  $M_{12}$ ;

10 –  $N_8$ ;

15 –  $O_6$ ;

3 – terminale A;

6 – terminale B;

11 – terminale C;

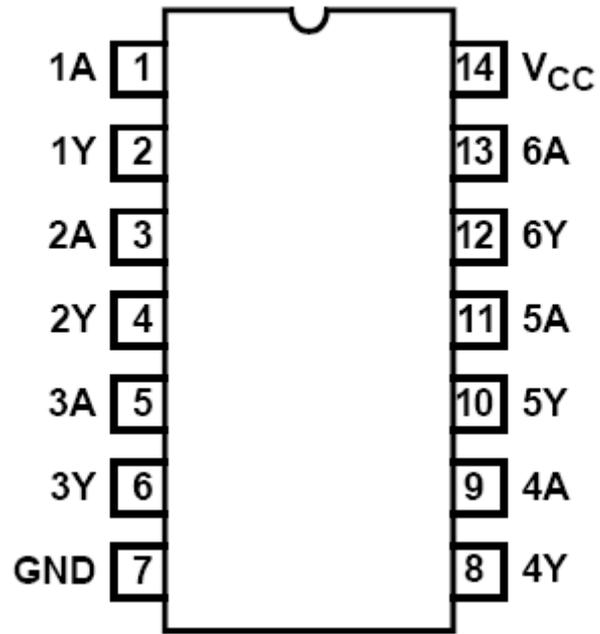
14 – terminale D.

Non essendo previsto un controllo specifico, il motore ruoterà in una sola direzione; è, tuttavia, possibile ottenere la rotazione nel verso opposto fornendo ai terminali A, B, C, D la sequenza contraria a quella stabilita.

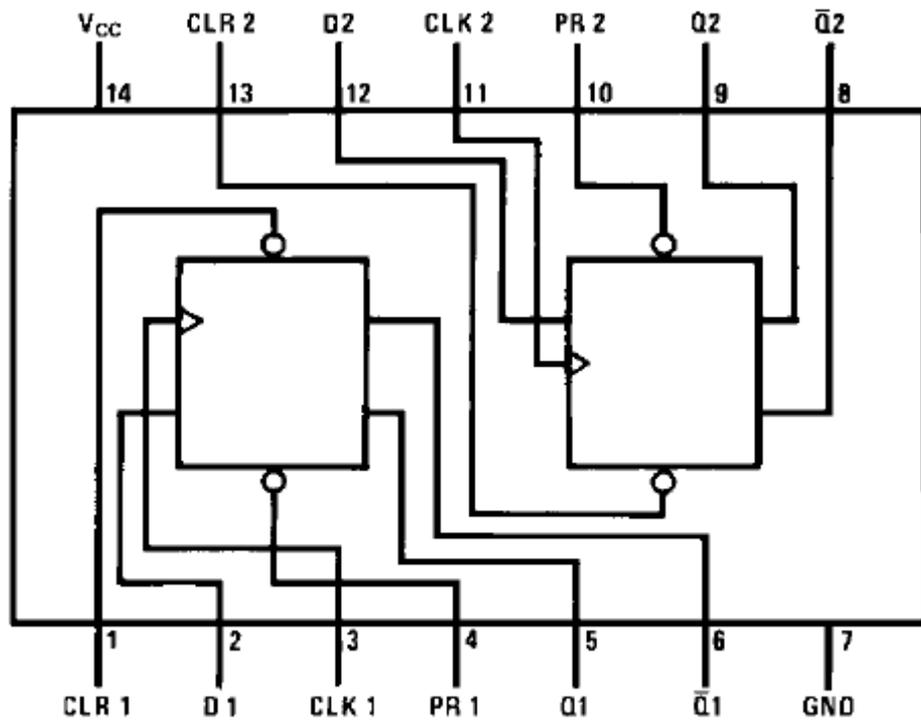
A tale scopo è sufficiente invertire tra loro o i terminali A e B, oppure C e D.

Il metodo utilizzato di schematizzare su carta tutti i collegamenti da realizzare, prima di procedere al montaggio su bread-board, e la suddivisione dell'automa in più blocchi distinti ha reso molto agevole il successivo montaggio, sebbene esso mi sembrasse, inizialmente, abbastanza laborioso.

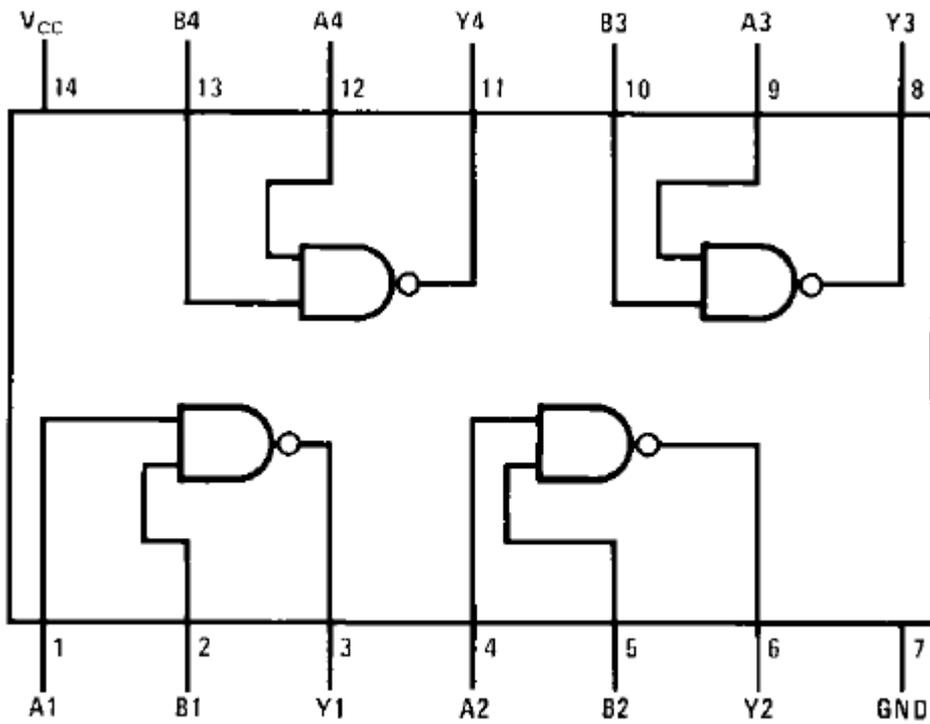
## PIEDINATURE



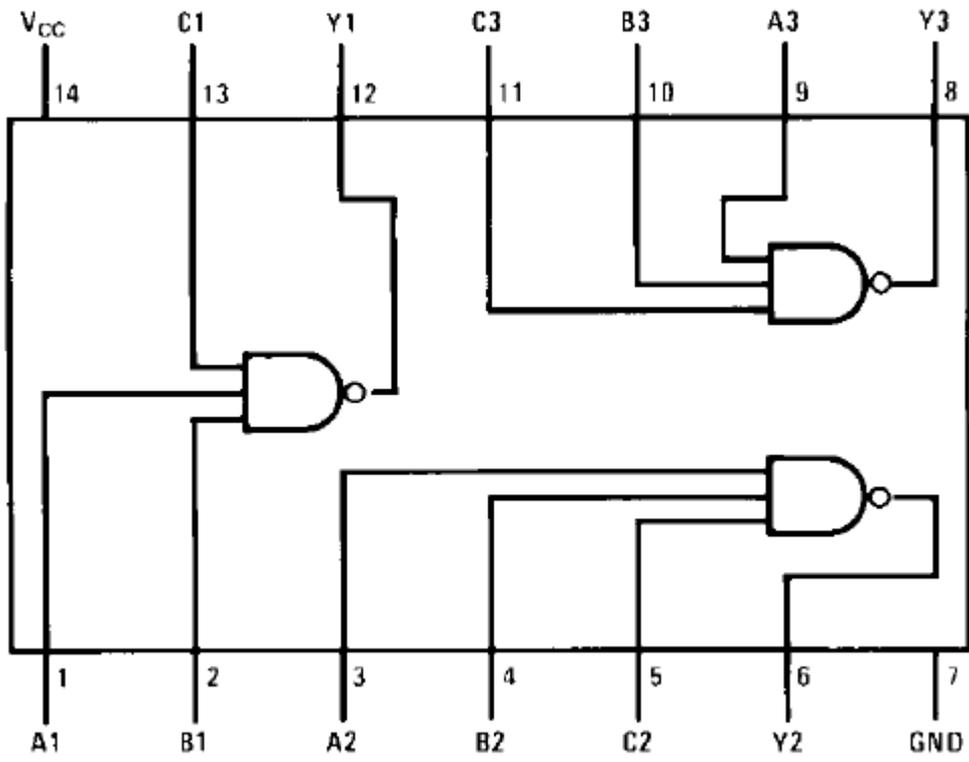
74HC14



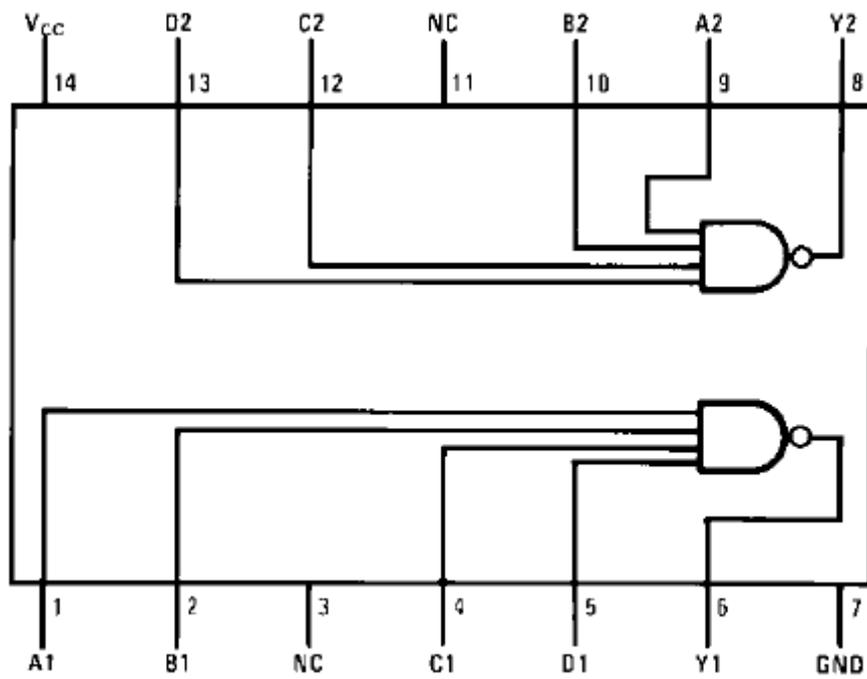
74LS74



74LS00



74LS10



74LS20

