



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DELL'AQUILA

**DIPARTIMENTO DI
INGEGNERIA INDUSTRIALE E
DELL'INFORMAZIONE E DI ECONOMIA**



TESINA DI ELETTRONICA DEI SISTEMI DIGITALI 2

**Implementazione di metodi di indirizzamento specifici per un
sistema digitale a logica programmata**

Giacomo Mammarella

ANNO ACCADEMICO 2017–2018

Indice

1	Introduzione	2
	Introduzione	2
	Logica Programmata	2
	Esecuzione delle istruzioni	6
	Von Neumann migliorato	8
	Metodi di indirizzamento	10
	Istanziamento zero	11
2	Prima istanziamento	13
2.1	Schema a blocchi e definizione dei segnali IN/OUT:	13
2.2	Regola protocollare:	14
2.3	Task eseguibili, set di istruzioni e organizzazione della RAM interna:	14
2.4	Strategia e problematiche	16

Capitolo 1

Introduzione

La realizzazione di un sistema digitale complesso è possibile mediante due diverse strategie realizzative basilari: la sintesi in *hardware diretto* e la sintesi in *logica programmata*. Entrambe queste metodologie realizzative, seppur presentando differenze architettureali sostanziali, possono garantire la sintesi di due sistemi digitali assolutamente equivalenti dal punto di vista del legame ingresso-uscita, che mantengano ossia prestazioni funzionali invariate.

La scelta della metodologia di realizzazione di un sistema digitale dipende dalle circostanze strettamente legate alla funzionalità del sistema da realizzare. Ogni soluzione presenta i propri vantaggi e svantaggi ed è compito del progettista verificare che la soluzione adottata sia compatibile con le specifiche imposte dal problema in esame.

Logica Programmata

In generale, un esecutore a logica programmabile è un sistema dotato di un set di istruzioni finito, la cui combinazione appropriata può garantire l'implementazione di algoritmi generici definibili dall'utente.

Il sistema dunque dispone di un'architettura interna in grado di supportare l'esecuzione di istruzioni base, il cui insieme definisce *instruction-set*. Architettura e set di istruzioni non sono parametri fissi, dunque il ventaglio delle soluzioni disponibili nella realizzazione di un esecutore programmabile è molto ampio, esistendo una molteplicità di soluzioni distinguibili in prima approssimazione secondo i parametri di *area occupata*, *performance* e *potenza dissipata*.

A monte è possibile tuttavia differenziare i sistemi a logica programmabile secondo il tipo di architettura interna adottata. Storicamente, agli albori dello sviluppo dei microcontrollori digitali integrati, nacquero sistemi come l'Intel 4004 basati su un'architettura denominata *architettura di Von Neumann*, dal nome del matematico che la introdusse. Tale architettura costituisce un esecutore programmabile strettamente sequenziale di tipo master-slave completo ed è internamente strutturata come nella figura seguente.

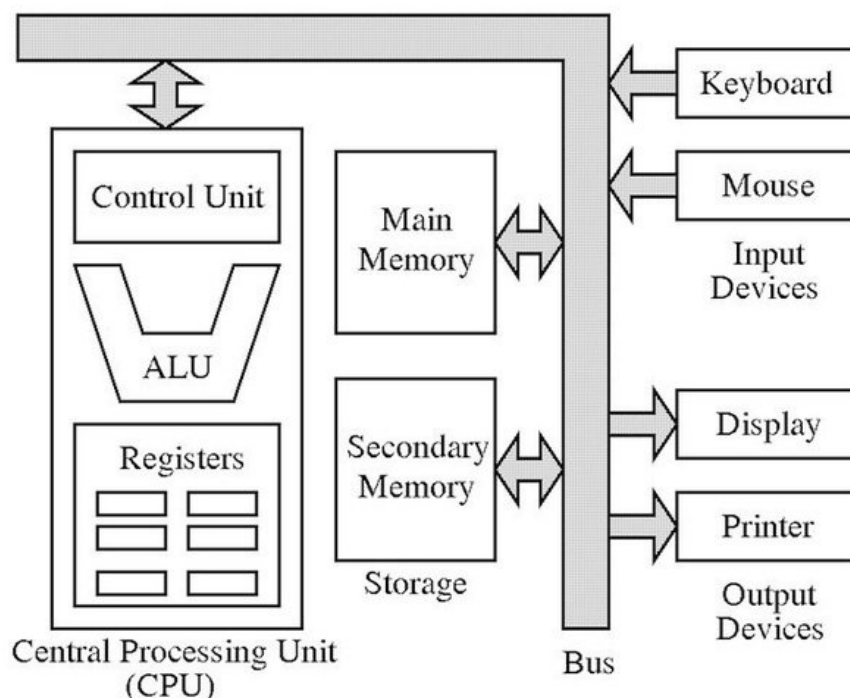


Figura 1.1: Architettura di Von Neumann.

La struttura così costituita è composta da tre componenti fondamentali a cui vanno ad aggiungersi le periferiche collegate tramite un modulo di input - output. Tali componenti sono:

- Il sistema di memoria, dove risiedono le istruzioni ed i dati necessari all'esecuzione del programma. La memoria può essere costituita da diversi livelli gerarchici. In linea generale si può considerare il "sistema di memoria" come una memoria principale di tipo RAM nella quale, a runtime, siano già precaricate le istruzioni ed i dati relativi al programma in esecuzione. La memoria

può essere vista come un insieme di registri indirizzabili singolarmente e di tipo general purpose, aventi ossia la possibilità di mantenere dati ed istruzioni.

- Il sistema di calcolo centralizzato (CPU) che si occupa delle fasi di esecuzione delle istruzioni caricate nella memoria, ossia di eseguire le fasi di FETCH, DECODE, EXECUTE, WRITE BACK per ogni singola istruzione. Al suo interno contiene il sistema di calcolo aritmetico-logico (ALU), l'unità di controllo ed un banco di registri ad alta velocità nel quale i dati vengono salvati mano a mano che viene eseguito il processamento di un'istruzione.
- il BUS, che interconnette con la CPU la memoria ed i dispositivi di ingresso - uscita facenti parte del sistema. È un bus unico per dati, istruzioni e comandi di controllo, pertanto costituisce un limite prestazionale di tale architettura di calcolo.

Come detto su tale architettura è possibile definire un insieme delle istruzioni elementari eseguibili, denominato *instruction-set*. All'interno dell'*instruction-set* sono disponibili le istruzioni, i registri, le modalità di indirizzamento, l'architettura della memoria, la gestione degli interrupt e delle eccezioni, ed eventualmente l'indirizzamento per i dispositivi di I/O esterni.

La combinazione degli elementi presenti all'interno dell'*instruction-set* in maniera non univoca e più o meno efficiente, permette l'implementazione di un algoritmo fisicamente eseguibile sull'architettura hardware adottata. L'*instruction-set* corrisponde dunque a un'interfaccia tra software ed hardware che permette al progettista dell'algoritmo di operare in maniera più semplice sui dispositivi e i segnali interni al sistema digitale col fine dell'implementazione dell'algoritmo stesso.

La progettazione dell'*instruction-set* dipende dall'architettura adottata nel progetto dell'esecutore, differenziando tra sistemi di tipo “general purpose” come i microprocessori o “special purpose” come ad esempio i microcontrollori. A titolo di esempio di un noto set di istruzioni si riporta di seguito quello relativo al microprocessore Intel 4004, il primo microprocessore integrato a 4 bit rilasciato da Intel nel 1971.

Intel 4004 Instructions Set				
INSTRUCTION	MNEMONIC	BINARY EQUIVALENT		MODIFIERS
		1st byte	2nd byte	
No Operation	NOP	00000000	-	none
Jump Conditional	JCN	0001CCCC	AAAAAAAA	condition, address
Fetch Immediate	FIM	0010RRR0	DDDDDDDD	register pair, data
Send Register Control	SRC	0010RRR1	-	register pair
Fetch Indirect	FIN	0011RRR0	-	register pair
Jump Indirect	JIN	0011RRR1	-	register pair
Jump Unconditional	JUN	0100AAAA	AAAAAAAA	address
Jump to Subroutine	JMS	0101AAAA	AAAAAAAA	address
Increment	INC	0110RRRR	-	register
Increment and Skip	ISZ	0111RRRR	AAAAAAAA	register, address
Add	ADD	1000RRRR	-	register
Subtract	SUB	1001RRRR	-	register
Load	LD	1010RRRR	-	register
Exchange	XCH	1011RRRR	-	register
Branch Back and Load	BBL	1100DDDD	-	data
Load Immediate	LDM	1101DDDD	-	data
Write Main Memory	WRM	11100000	-	none
Write RAM Port	WMP	11100001	-	none
Write ROM Port	WRR	11100010	-	none
Write Status Char 0	WR0	11100100	-	none
Write Status Char 1	WR1	11100101	-	none
Write Status Char 2	WR2	11100110	-	none
Write Status Char 3	WR3	11100111	-	none
Subtract Main Memory	SBM	11101000	-	none
Read Main Memory	RDM	11101001	-	none
Read ROM Port	RDR	11101010	-	none
Add Main Memory	ADM	11101011	-	none
Read Status Char 0	RD0	11101100	-	none
Read Status Char 1	RD1	11101101	-	none
Read Status Char 2	RD2	11101110	-	none
Read Status Char 3	RD3	11101111	-	none
Clear Both	CLB	11110000	-	none
Clear Carry	CLC	11110001	-	none
Increment Accumulator	IAC	11110010	-	none
Complement Carry	CMC	11110011	-	none
Complement	CMA	11110100	-	none
Rotate Left	RAL	11110101	-	none
Rotate Right	RAR	11110110	-	none
Transfer Carry and Clear	TCC	11110111	-	none
Decrement Accumulator	DAC	11111000	-	none
Transfer Carry Subtract	TCS	11111001	-	none
Set Carry	STC	11111010	-	none
Decimal Adjust Accumulator	DAA	11111011	-	none
Keyboard Process	KBP	11111100	-	none
Designate Command Line	DCL	11111101	-	none

Figura 1.2: Il set di istruzioni relativo al microprocessore Intel 4004

Esecuzione delle istruzioni

Sulla base dell'architettura di Von Neumann esposta, a partire dall'Instruction-Set precedentemente definito, è possibile implementare un algoritmo specifico combinando le istruzioni con i dati che realizzano la funzione desiderata. In prima approssimazione si può pensare che dati e programmi relativi a tale algoritmo siano presenti all'interno della memoria del sistema in maniera sequenziale e sotto forma di linguaggio macchina.

Prendendo ad esempio un programma in grado di realizzare la somma tra due valori binari caricati all'interno di altrettanti registri (denominati DR1 e DR2) e il salvataggio del risultato su di un terzo registro (denominato RIS), si avrà il seguente codice assembler:

```
MV DR1, OP1      % copia il valore di DR1 in OP1
MV DR2, OP2      % salva il valore di DR2 in OP2
SUM              % somma OP1 e OP2 (risultato in ACC)
MV ACC, RIS      % salva il valore di ACC in RIS
```

in cui le etichette dei registri corrispondono ad un identificativo hardware (indirizzo) anch'esso definito all'interno dell'Instruction-Set. In memoria RAM saranno presenti quindi le istruzioni ed i dati derivanti da tale esempio di programma in maniera sequenziale e come riportato nella figura seguente.

0x00	MV
0x01	DR1
0x02	OP1
0x03	MV
0x04	DR2
0x05	OP2
0x06	SUM
0x07	MV
0x07	ACC
0x09	RIS
0x0A	END
	...
	...
0xFF	...

L'esecuzione di un'istruzione avviene col ciclo di *fetch-execute*, mantenuto da parte dell'unità di processamento centrale CPU. Al suo interno sono infatti presenti tutti i sistemi relativi alla sequenziazione delle operazioni (unità di controllo CU), al calcolo aritmetico nonché registri di appoggio dedicati al salvataggio di dati temporanei ed indirizzamento della memoria.

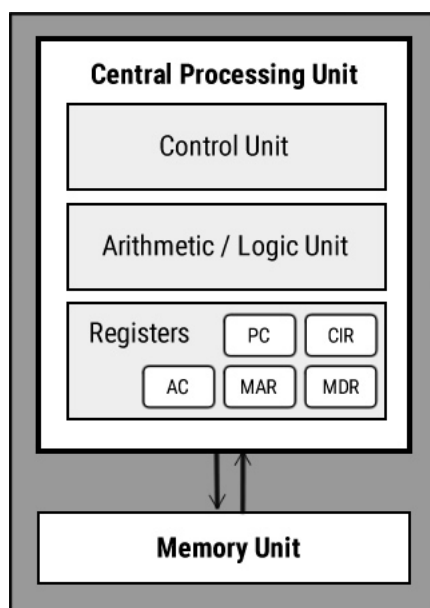


Figura 1.3: La CPU all'interno di un sistema alla Von Neumann

Nel caso pratico dell'esempio precedentemente riportato, all'avvio dell'esecuzione del programma la CPU darà il comando di *fetch* dell'istruzione presente nella locazione di memoria avente indirizzo 0x00.

Al riconoscimento dell'istruzione (*fase di decode*) il sistema diviene al corrente del fatto che ai successivi due prelievi dalla memoria corrisponderanno gli operandi dell'istruzione precedentemente caricata.

La fase di *execute* inizia con il prelievo dei dati dagli indirizzi 0x01 e 0x02. Avendo quindi caricato i dati relativi alla prima MOVE il sistema esegue l'istruzione che ha come risultato il salvataggio nel registro denominato OP1 del valore contenuto nel registro denominato DR1.

A seguire il sistema esegue a seconda istruzione (prelevata all'indirizzo 0x03 ripetendo quanto detto con la prima MOVE) che termina col salvataggio del dato presente in DR2 sul registro OP2.

Al prelievo dell'istruzione all'indirizzo 0x06, corrispondente alla SUM, il siste-

ma esegue la somma dei valori caricati sui registri OP1 ed OP2, precedentemente aggiornati ai valori desiderati. La somma termina col salvataggio del risultato sul registro accumulatore interno (denominato ACC). Infine, con l'istruzione 0x07 si esegue una ulteriore MOVE del dato salvato in ACC sul registro denominato RIS. Il programma termina con l'esecuzione dell'istruzione all'indirizzo 0x0A e denominata END, che comunica alla macchina il termine delle operazioni del programma.

L'esecuzione delle istruzioni in questo modello architetturale di memoria prevede il fatto che i dati ed i programmi siano caricati in maniera sequenziale nelle locazioni di memoria. L'indirizzamento della memoria è affidato ad un particolare registro denominato "Program-Counter", abbreviato con l'identificativo PC. Il valore mantenuto all'interno del PC costituisce quindi l'indirizzo della istruzione in esecuzione o del dato relativo all'istruzione che lo necessita. All'avvenuto prelievo dell'istruzione o del dato corrente (o comunque prima del prelievo della successiva) il PC viene incrementato di 1 puntando di fatto alla successiva locazione di memoria che conterrà un dato o una nuova istruzione.

Inoltre poiché si è supposto che l'avvio dell'esecuzione del programma parta dal fetch dell'istruzione all'indirizzo 0x00, allora questa locazione deve necessariamente contenere la prima istruzione che costituisce l'inizio dell'algoritmo.

Quanto detto costituisce un limite prestazionale all'impiego dell'architettura di Von Neumann in quanto la presenza di un unico bus per dati ed istruzioni (e segnali di controllo) limita fortemente le prestazioni di throughput dei dati da parte del sistema. Unitamente a questo limite prestazionale derivante dall'architettura stessa, la gestione della memoria come descritta, ossia contenente i dati relativi alle istruzioni nelle locazioni di memoria strettamente successive alle istruzioni stesse, non permette la realizzazione di tecniche di parallelizzazione volte all'incremento delle prestazioni del sistema.

Per tale motivo nel seguente paragrafo verrà descritto un sistema di gestione della memoria più efficiente e compatibile con le tecniche di parallelizzazione.

Von Neumann migliorato

Una soluzione al problema descritto nelle ultime righe del precedente paragrafo prevede la modifica della gestione della memoria nel salvataggio di dati e istruzioni. Questa può essere concettualmente divisa in due aree, una dove vengono salvate in

sequenza le istruzioni da eseguire, l'altra che contiene i dati relativi a tali istruzioni, come schematizzato nella figura successiva.

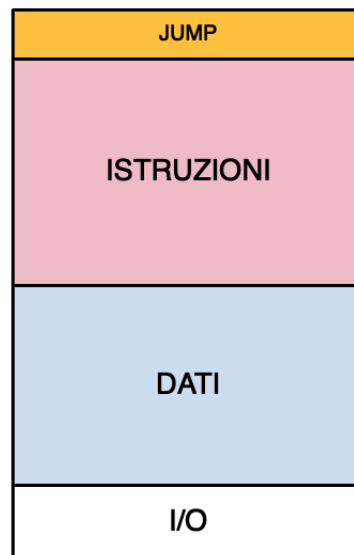


Figura 1.4: Gestione della memoria in un'architettura di Von Neumann migliorata

In tale architettura la gestione della memoria prevede, oltre al classico puntatore all'istruzione denominato program-counter, un puntatore al dato denominato data-counter, abbreviato DC. Tale puntatore contiene l'indirizzo da fornire alla memoria per il prelievo del dato relativo alla istruzione che lo necessita. In questo modo si riescono a garantire due importanti prerogative:

- Nel caso in cui non si debba effettuare un salto l'indirizzo relativo alla prossima istruzione è sempre dato dall'indirizzo corrente di PC sommato ad 1.
- Nel caso in cui si debba effettuare un salto il valore che punta alla prossima istruzione può già essere puntato da DC e non deve essere ricavato eseguendo un ulteriore aggiornamento di PC per il prelievo di tale dato. In questo modo (nel caso di chiamata a subroutine) il valore di PC può essere salvato come indirizzo di ritorno prima di aggiornare il PC all'indirizzo prelevato dalla memoria e al quale eseguire il salto.

L'indirizzamento della memoria si ottiene supponendo delle dimensioni fisse per le aree riservati a istruzioni e dati.

Una qualsiasi istruzione presente nell'area dedicata è indirizzabile tramite due coordinate. Una prima fissa, denominata *base istruzione* ed una seconda che indica l'*offset* rispetto a tale base. L'indirizzamento dunque avviene per mezzo del calcolo della seguente somma:

$$ADDR_P = P_0 + \Delta P \quad (1.1)$$

Analogamente, in riferimento al calcolo della posizione di un dato si avrà:

$$ADDR_D = D_0 + \Delta D \quad (1.2)$$

Metodi di indirizzamento

In base a quanto detto fino ad ora si può procedere alla definizione dell'argomento di questa tesina. Scopo del problema è la progettazione di una UC per un'architettura di Von Neumann curando l'implementazione di parte del set di istruzioni relativo all'indirizzamento della memoria RAM interna, in cui sia prevista la gestione migliorata della memoria precedentemente discussa.

In particolare è richiesta l'implementazione delle seguenti istruzioni:

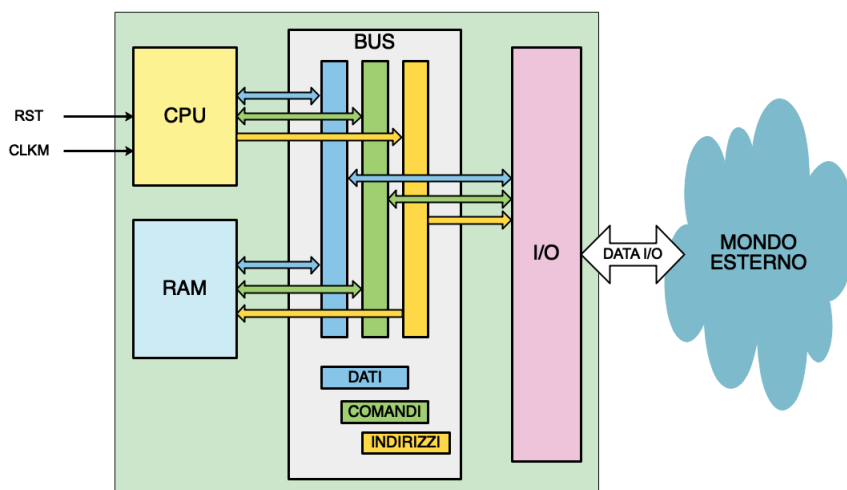
- **RD ADDR:** Esegue una READ della memoria all'indirizzo fornito attraverso il dato ADDR. Il valore letto è salvato su di un registro interno.
- **WR DATA, ADDR:** Esegue la scrittura del valore identificato con DATA nella locuzione di memoria RAM relativa all'indirizzo ADDR. È un'istruzione dal formato “un'istruzione e due dati”.
- **JMP ADDR:** Esegue una JUMP incondizionale all'indirizzo presente nel dato ADDR. Tale istruzione realizza un “salto immediato”. Il formato dell'istruzione è del tipo “una istruzione e un dato”.
- **JMP OFFS:** Esegue una JUMP incondizionale all'indirizzo dato dal valore corrente di PC sommato al dato in ingresso denominato OFFS. Costituisce un'istruzione denominata “salto diretto” e prende in ingresso un unico dato.
- **JMP BASE, OFFS:** Esegue una JUMP incondizionale all'indirizzo calcolato tramite somma dei due dati in ingresso BASE e OFFS. Costituisce un tipo di salto denominato “salto indiretto” e possiede un formato del tipo “una istruzione e due dati”.

Inoltre, dotando la CPU di un insieme di registri interni di tipo “general-purpose” in appoggio al sistema di calcolo, si implementerà la seguente istruzione:

- **MV REG1, REG2:** Esegue la copia del dato contenuto nel registro avente etichetta REG1 sul registro avente etichetta REG2. Tale istruzione si applica sui registri interni alla CPU.

Istanziamento zero

Dunque, in base a quanto esposto precedentemente, si parte con un sistema alla Von Neumann basilare come di seguito nuovamente riportato. All’avvio delle operazioni si suppone che la memoria RAM sia già precaricata con le istruzioni ed i dati nelle aree di memoria dedicate.



Le comunicazioni con l’esterno avvengono per mezzo del bus di I/O ad N bit. Si partirà nello svolgimento del problema tipo “carta e penna” con un valore per le dimensioni del bus dati pari a $N = 4$. La dimensione del bus indirizzi si sceglie pari a $M = 2 \cdot N$ bit che definisce uno spazio di indirizzamento della memoria pari a $2^8 = 256$ parole a N bit. In seguito, su ambiente di sviluppo ISE, si modificherà la dimensione del bus dati (e di conseguenza quella del bus indirizzi) per un valore di $N = 8$ bit. Dunque i segnali presenti a questo livello di definizione del problema sono i seguenti:

- **OPERANDI E RISULTATO:**
 - **DATA IO** (N bit): bus di input-output di collegamento con l’esterno.

- **CLOCK MACCHINA:**

- **CLKM:** clock macchina per evoluzione sincrona.

- **RESET:**

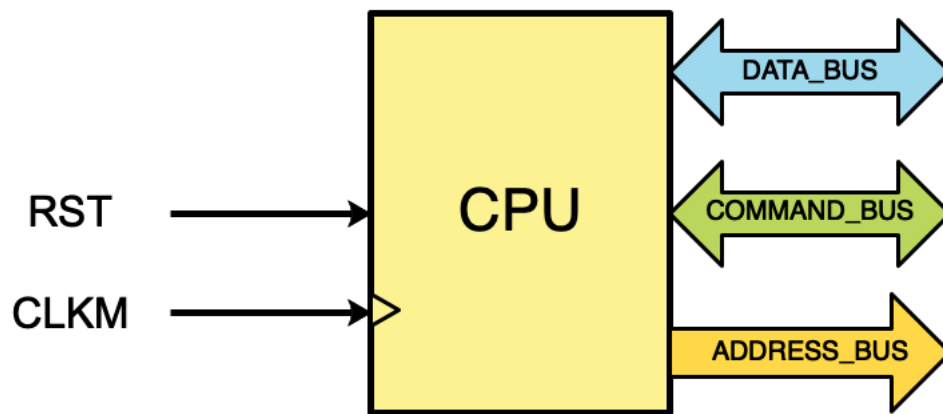
- **RST:** {0: funzionamento normale; 1: reset attivo → il sistema riavvia l'esecuzione dalla prima istruzione}.

Capitolo 2

Prima istanziazione

2.1 Schema a blocchi e definizione dei segnali IN/OUT:

In base a quanto detto nel precedente capitolo si può procedere ad una prima istanziazione della CPU.



I segnali presenti a questo livello sono:

- **OPERANDI E RISULTATO:**

- **DATA_BUS** (N bit): bus dati di input-output connesso con il bus DATI di sistema.
- **COMMAND_BUS** (N bit): bus contenente un raggruppamento dei segnali di controllo connesso con il bus COMANDI di sistema.
- **ADDRESS_BUS** (2N bit): bus contenente i segnali di indirizzo per la memoria e le periferiche, connesso con il bus INDIRIZZI di sistema.

- **CLOCK MACCHINA:**

- **CLKM:** clock macchina per evoluzione sincrona.

- **RESET:**

- **RST:** {0: funzionamento normale; 1: reset attivo → il sistema riavvia l'esecuzione dalla prima istruzione}.

2.2 Regola protocolcolare:

- *ESTERNO:*

1. La macchina procede con l'esecuzione del programma salvato nella memoria RAM in modo sequenziale evolvendo con gli impulsi di clock esterni.

- *INTERNO:* La CPU si trova nella condizione di reset e genera l'indirizzo 0000h per la memoria. Tale locazione conterrà la prima istruzione del programma scritto in RAM. Per ogni istruzione si esegue il ciclo di fetch-execute:

1. **FETCH:** La CPU preleva l'istruzione dalla memoria all'indirizzo fornito dal PC e la salva nel registro istruzione IR. Infine esegue un aggiornamento del PC.
2. **DECODE:** La CPU riconosce l'istruzione e si occupa del prelievo eventuale dei dati dalla memoria salvandoli nei registri di appoggio interno.
3. **EXECUTE:** La CPU esegue l'istruzione.
4. (se previsto) **WRITE-BACK:** La CPU si occupa del salvataggio del dato sulla memoria.

2.3 Task eseguibili, set di istruzioni e organizzazione della RAM interna:

In questa sezione ci si occupa di definire parte del set di istruzioni relativo a quanto discusso nel paragrafo “Metodi di indirizzamento” di pagina 10. Riassumendo i task da eseguire e considerando i dati relativi a tali istruzioni si ottiene la seguente tabella.

INSTRUCTION	CODE	BINARY EQUIVALENT			MODIFIERS
		COD. OP	1st nibble	2nd nibble	
No operation	NOP	0000	-	-	-
Read RAM	RD	0001	$A_7 A_6 A_5 A_4$	$A_3 A_2 A_1 A_0$	address
Write RAM at address	WR	0011	$A_7 A_6 A_5 A_4$	$A_3 A_2 A_1 A_0$	address, data
Jump at Address	JPA	0100	$A_7 A_6 A_5 A_4$	$A_3 A_2 A_1 A_0$	address
Jump Offset	JPO	0101	$O_3 O_2 O_1 O_0$	-	offset
Jump at Base+Offset	JBO	0111	$O_3 O_2 O_1 O_0$	$B_3 B_2 B_1 B_0$	offset, base
Move reg A to B	MV	1000	$A_3 A_2 A_1 A_0$	$B_3 B_2 B_1 B_0$	reg. A, reg. B

Tabella 2.1: Set di istruzioni

Il numero di bit riservato al codice operazione è sovradimensionato rispetto al numero di operazioni. Per discriminare tra le operazioni possibili sarebbero stati sufficienti $\lceil \log_2 7 \rceil = 3$ bit; tuttavia considerando la futura ed eventuale aggiunta di ulteriori istruzioni, nonché il fatto di avere un bus dati a 4 bit, si è scelto di mantenere un codice operazione a 4 bit.

Come si può notare dalla tabella precedente sistema lavora su istruzioni operanti su 0, 1, o 2 operandi a 4 bit. Sarà dunque compito della UC interna, una volta prelevata l'istruzione ed eseguita la decodifica, richiedere il numero di dati necessari all'esecuzione dell'istruzione stessa.

Si ricorda che la memoria è organizzata come in Figura 1.4, dunque le istruzioni del programma troveranno posto in modo sequenziale nell'area "istruzioni", così come i dati nell'area "dati" sottostante. Poiché si dispone di un bus dati a 4 bit, nelle istruzioni dove si debba prelevare un indirizzo dalla memoria, si necessita di più accessi a locazioni di memoria contigue presenti all'area dati. Si suppone dunque che la fase di traduzione da codice assembler a linguaggio macchina tenga conto di tale questione, procedendo ad inserire i dati nell'area di memoria dedicata ordinati in maniera sequenziale.

2.4 Strategia e problematiche

La struttura interna della CPU sarà ricavata in questo paragrafo tenendo conto del set di istruzioni e delle prerogative di progetto.

Anzitutto poiché dati e programmi sono reperiti a runtime dalla memoria RAM interna sarà necessario dotare la CPU di sistemi che permettano l'indirizzamento della memoria ai programmi ed al dato. In particolare si necessiterà quindi di due puntatori: un "program counter" ed un "data counter". Il PC conterrà l'indirizzo relativo alla prossima istruzione da eseguire, mentre il DC contiene l'indirizzo relativo al dato da prelevare. In generale si può considerare che l'indirizzo per la lettura/scrittura della memoria può avere tre sorgenti:

- il PC: come nel caso del prelievo delle istruzioni.
- il DC: come nel caso del prelievo/scrittura dei dati.
- un indirizzo generato internamente dalla CPU, ad esempio a seguito di un calcolo.

A tal proposito, nel procedere al corretto indirizzamento della memoria, l'uscita del bus indirizzi sarà pilotata da un registro al cui ingresso è presente un multiplexer controllato dalla UC interna col fine di discriminare quale dei tre registri sorgenti contenga il valore col quale indirizzare la memoria.

Entrambi i registri PC e DC, devono essere aggiornati (incrementati di 1) ad ogni prelievo relativamente di un'istruzione o di un dato. A tal proposito si doteranno entrambi i registri della possibilità di auto-incremento affiancando agli stessi un sommatore semplice.

Per dotare la CPU della possibilità di indirizzare la memoria da programma (come nel caso della RD e della WR) si può pensare di connettere uno dei registri interni presenti nel banco d'appoggio al mux di selezione. In tale caso l'indirizzamento della memoria sarà possibile senza compromettere i valori presenti in PC e DC. Tale registro avrà la funzione speciale di poter indirizzare la memoria e la sua etichetta sarà definita AR0.

Nel caso dell'operazione di RD l'indirizzo di lettura si suppone già presente nel registro AR0. Successivamente si effettua una lettura a tale indirizzo salvando il dato proveniente dalla RAM sul registro bidirezionale in/out. Nel caso dell'operazione di WR si suppone che il dato da salvare sia già stato precaricato all'interno del

registro bidirezionale in/out che pilota il bus dati dal lato CPU. Come nel caso della read, l'indirizzo su cui salvare il dato sarà stato precedentemente posto in AR0. L'operazione termina abilitando la memoria al salvataggio del dato su tale indirizzo.

Nel caso della jump immediata l'indirizzo di salto è indicato dal valore del dato prelevato dalla memoria. Il valore su cui effettuare il salto viene dapprima composto unendo le due letture della memoria che forniscono le due sottoparti dell'indirizzo nel registro AR0. Successivamente il PC verrà aggiornato al valore contenuto in AR0, indirizzato su di esso tramite multiplexer.

Nel caso delle operazioni denominate JPO e JBO il risultato del salto è dato dalla somma di un indirizzo "*base*" e di un *offset* riferito a tale base. A seguito di una o due letture necessarie al caricamento di offset e base ed al caricamento di queste in due particolari registri di appoggio denominati DRO e DRB il valore di PC viene aggiornato a quello corretto eseguendo il calcolo del nuovo indirizzo su di una unità di calcolo ausiliare. In questo modo non si necessiterà dell'impiego della ALU principale nel caso di calcolo di tali indirizzi di salto. Il collegamento elettrico che permette l'incremento del PC al valore corretto è presentato nel successivo schema di seconda istanziazione.

Infine, considerando la struttura elementare interna di un'architettura di Von Neumann come quella riportata in Figura 1.3, la CPU contiene al suo interno un banco di registri di appoggio al calcolo. In particolare, nel caso relativo a questo esercizio, oltre ai già noti PC e DC trovano posto:

- 10 registri di appoggio per i dati con etichetta.
- 1 registro accumulatore ACC.
- 4 registri di supporto al calcolo di ADDR, tra cui AR0.
- 1 registro bidirezionale per il salvataggio dei dati in ingresso/uscita, connesso al bus dati di sistema.

Su tutti questi registri si applica l'operazione di move parametrica (COD. OP: MV), la quale eseguirà la copia del contenuto di uno dei registri sorgente in un altro di destinazione. Per l'esecuzione di tale operazione si può pensare di inserire all'interno dell'area dedicata ai registri una logica combinatoria che apra il "canale di transito" al dato dal registro sorgente a quello destinazione. Uno strobe da parte

della UC master sul registro destinazione ne copierà il dato all'interno completando l'operazione. Per discriminare i registri coinvolgibili in tale operazione si doterà ognuno di questi di una etichetta caratteristica, ossia definita a livello di microcodice. Al programmatore sarà sufficiente scrivere i tag dei registri opportuni nella programmazione a livello assembler per garantire la riuscita dell'operazione in modo corretto.

Detto questo si può procedere alla seconda istanziazione della CPU.