Lezione 5: Architettura dell'elaboratore LC-3

Elementi di Architettura e Sistemi Operativi
Docente: Tiziano Villa

Corso di Laurea in Bioinformatica

Dicembre 2015

Ricorda...

Il ciclo di esecuzione di un'istruzione è composto da sei fasi:

- Prelievo
- Decodifica
- Calcolo dell'indirizzo
- Prelievo dell'operando
- Esecuzione
- Memorizzazione dei risultati

Ricorda...

Che cos'è l'architettura dell'insieme d'istruzioni di un elaboratore (ISA) ?

L'acronimo inglese ISA (Instruction Set Architecture) descrive gli aspetti dell'architettura di un elaboratore che sono visibili al programmatore, quando scrive programmi nel linguaggio della macchina.

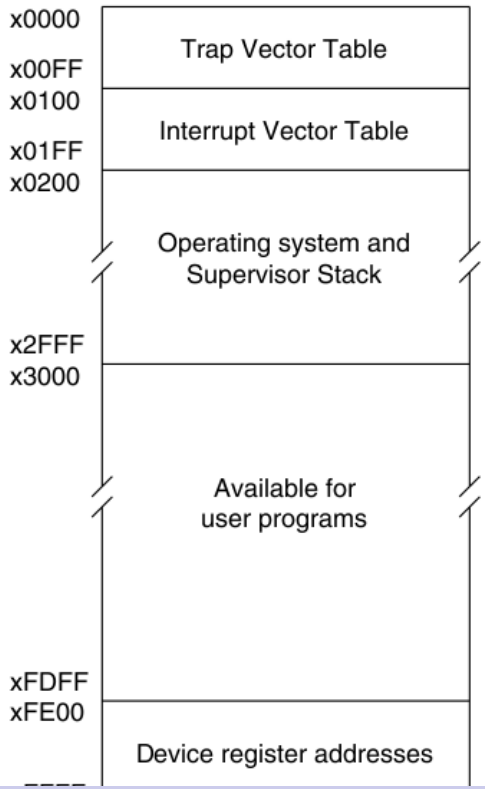
Tali aspetti includono:

- l'organizzazione della memoria
- l'insieme dei registri
- l'insieme delle istruzioni:
  - codice operativo
  - tipi di dato
  - modi di indirizzamento

Vediamole nel dettaglio...

LC-3 - Organizzazione della memoria

La memoria di LC-3 ha uno spazio di indirizzamento di 2^{16} (= 65536) locazioni, e indirizzi a 16 cifre binarie. Gli indirizzi di memoria sono numerati da 0 (0x0000) a 65536 (0xFFFF). Gl'indirizzi identificano locazioni di memoria, e registri di dispositivi ingresso-uscita mappati sulla memoria. Alcune regioni della memoria sono riservate per usi speciali.



LC-3 - Insieme dei registri

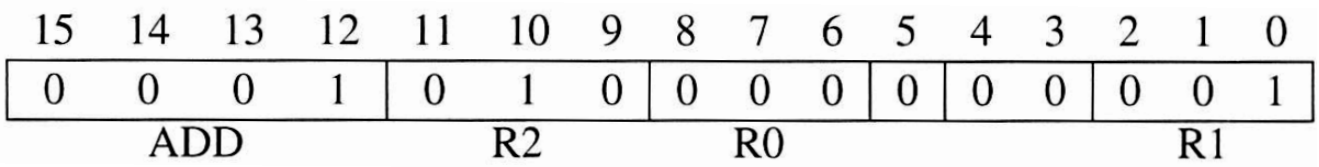
- LC-3 mette a disposizione 8 registri generali (General Purpose Register, GPR);
- i registri sono a 16 cifre binarie (parola, word);
- l'insieme degli 8 registri (chiamati R0, R1, ..., R7) è identificato da un indirizzo a 3 cifre binarie.

Register 0	(R0)	0000000000000001
Register 1	(R1)	0000000000000011
Register 2	(R2)	0000000000000101
Register 3	(R3)	0000000000000111
Register 4	(R4)	1111111111111110
Register 5	(R5)	1111111111111100
Register 6	(R6)	1111111111111010
Register 7	(R7)	1111111111111000

LC-3 - Insieme delle istruzioni

- Un'istruzione è identificata da DUE componenti:
  - **codice operativo:** specifica che cosa l'istruzione chiede di fare alla macchina;
  - **operandi:** specificano i dati su cui la macchina andrà ad operare;

- Un'istruzione è codificata su 16 cifre binarie. Esempio: vogliamo addizionare i contenuti dei registri R0 e R1 e memorizzare il risultato in R2. L'istruzione sarà:



LC-3 - Insieme delle istruzioni (OPCODE)

- L'architettura di LC-3 definisce 15 istruzioni, ciascuna identificata da un codice operativo univoco;
- Il **codice operativo** è specificato dalle cifre [12:15] di un'istruzione. Poichè si usano 4 cifre binarie, si possono identificare 16 istruzioni; LC-3 ne specifica 15, lasciandone libera una (codice 1101).
- Ci sono 3 diversi tipi di istruzioni:
  - *spostamento di dati*: spostano informazioni tra registri e memoria e viceversa;
  - *operazioni sui dati*: elaborano informazioni;
  - *controllo*: cambiano il flusso d'esecuzione delle istruzioni.
- In appendice è riportato l'elenco completo delle istruzioni.

LC-3 - Insieme delle istruzioni (TIPI DI DATO)

- Per *tipo di dato* s'intende una forma di rappresentazione dell'informazione per cui l'architettura definisce dei codici operativi che operano su di essa;
- Ci sono molti modi per rappresentare un'informazione...
- L'architettura di LC-3 utilizza solo la forma **interi in complemento a due**.

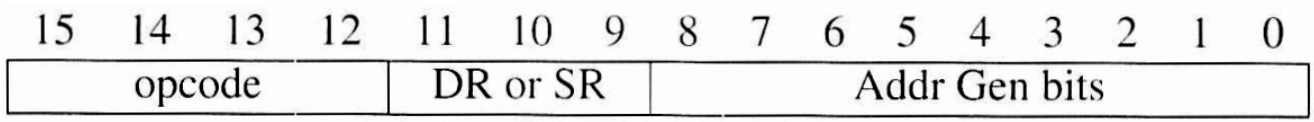
LC-3 - Insieme delle istruzioni (MODI D'INDIRIZZAMENTO)

- Il *modo d'indirizzamento* è il meccanismo per specificare dove si trova un operando;
- LC-3 definisce cinque modi di indirizzamento:
  - indirizzo all'interno dell'istruzione stessa (literal o immediate)
  - indirizzo in registri
  - indirizzo in memoria (tre modi):
    - relativo al contatore di programma (PC-relative)
    - indiretto
    - base + scostamento (offset)

Spostamento di dati e modi di indirizzamento

LC-3 - Insieme delle istruzioni (METODI DI INDIRIZZAMENTO)

- LC-3 definisce 7 istruzioni per spostare dati: LD, LDR, LDI, LEA, ST, STR e STI;
- In generale il formato delle istruzioni di load e store è:



- Nota: le cifre binarie [0:8] si usano per generare l'indirizzo (*l'address generation bits*), cioè rappresentano l'informazione usata per calcolare l'indirizzo a 16 cifre binarie che costituisce il secondo operando dell'istruzione. **Il codice operativo specifica come si devono interpretare queste cifre binarie**.

LC-3 - Indirizzamento immediato (1)

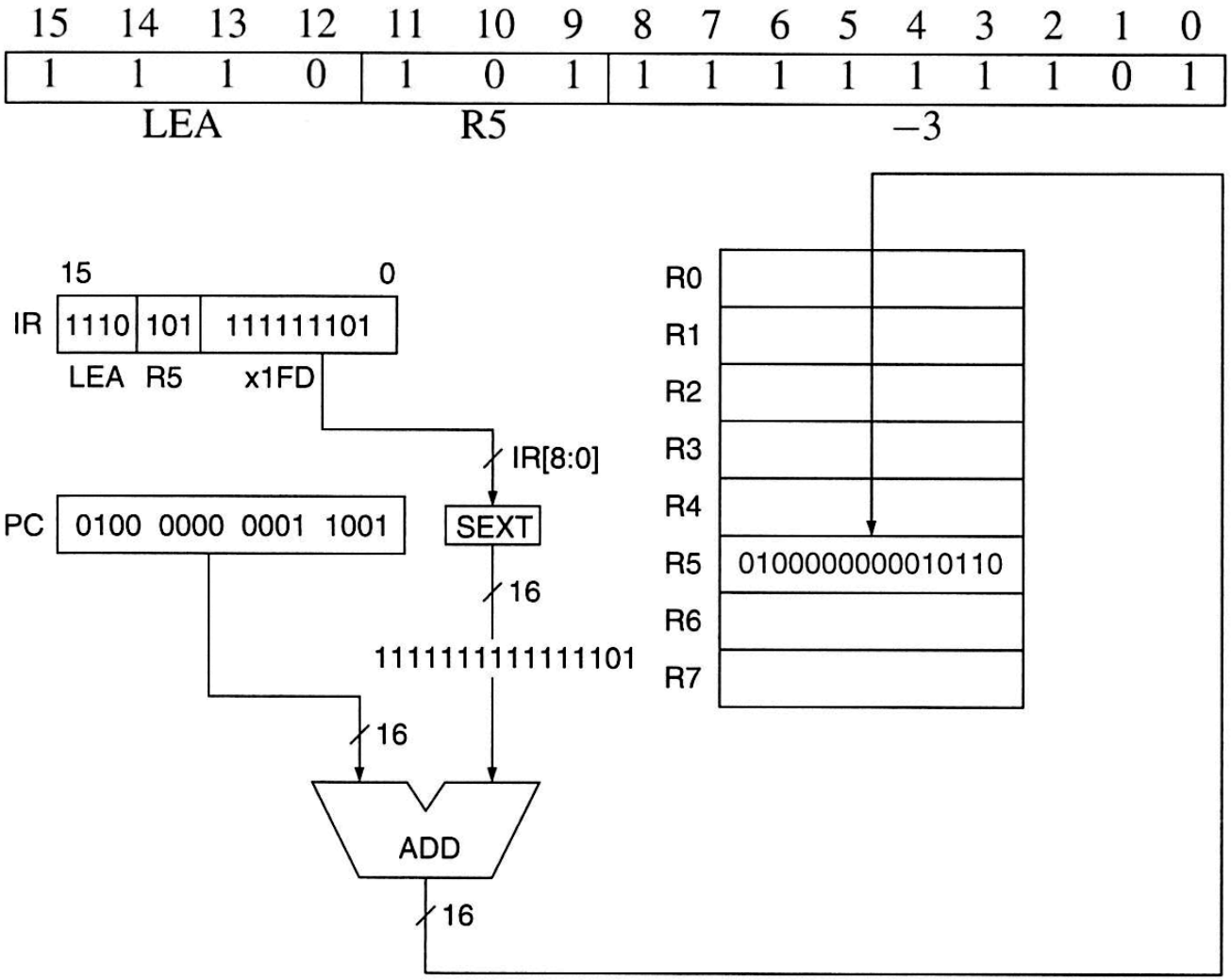
- Si usa *SOLO* con l'istruzione di caricamento effettivo di un indirizzo (Load Effective Address LEA);

L'istruzione LEA (codice operativo = 1110) carica nel registro specificato nelle posizioni [9:11] il valore ottenuto sommando il valore del PC incrementato con il valore indicato nelle posizioni [0:8] dell'istruzione (rappresentato su 16 cifre binarie).

- Di solito l'istruzione LEA è usata per inizializzare un registro con un indirizzo molto vicino all'indirizzo di memoria che si sta usando;

- Esempio: supponiamo che la locazione di memoria 0x4018 contenga l'istruzione "LEA R5, #-3" e il PC+1 contenga 0x4019; dopo l'esecuzione dell'istruzione LEA all'indirizzo 0x4018, R5 conterrà 0x4016.

LC-3 - Indirizzamento immediato (2)



LC-3 - Indirizzamento relativo al contatore di programma (PC-relative) (1)

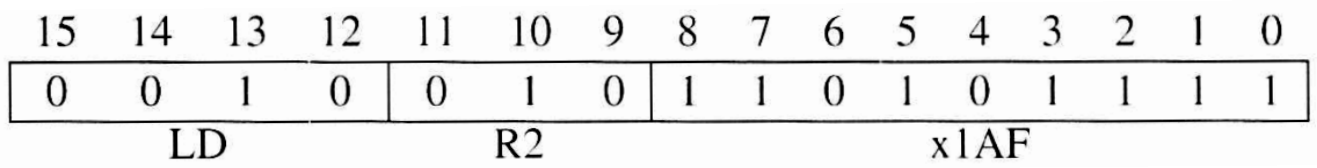
- Le istruzioni **LD** (codice operativo = 0010) e **ST** (codice operativo = 0011) specificano l'indirizzamento relativo al contatore di programma (PC-relative);
- Si chiama così perchè le posizioni [0:8] specificano lo scostamente da sommare al contatore di programma (PC);

L'indirizzo di memoria a cui fa riferimento l'operazione è calcolato sommando al valore del PC incrementato il valore, esteso su 16 cifre binarie, indicato dalle posizioni [0:8] dell'istruzione.

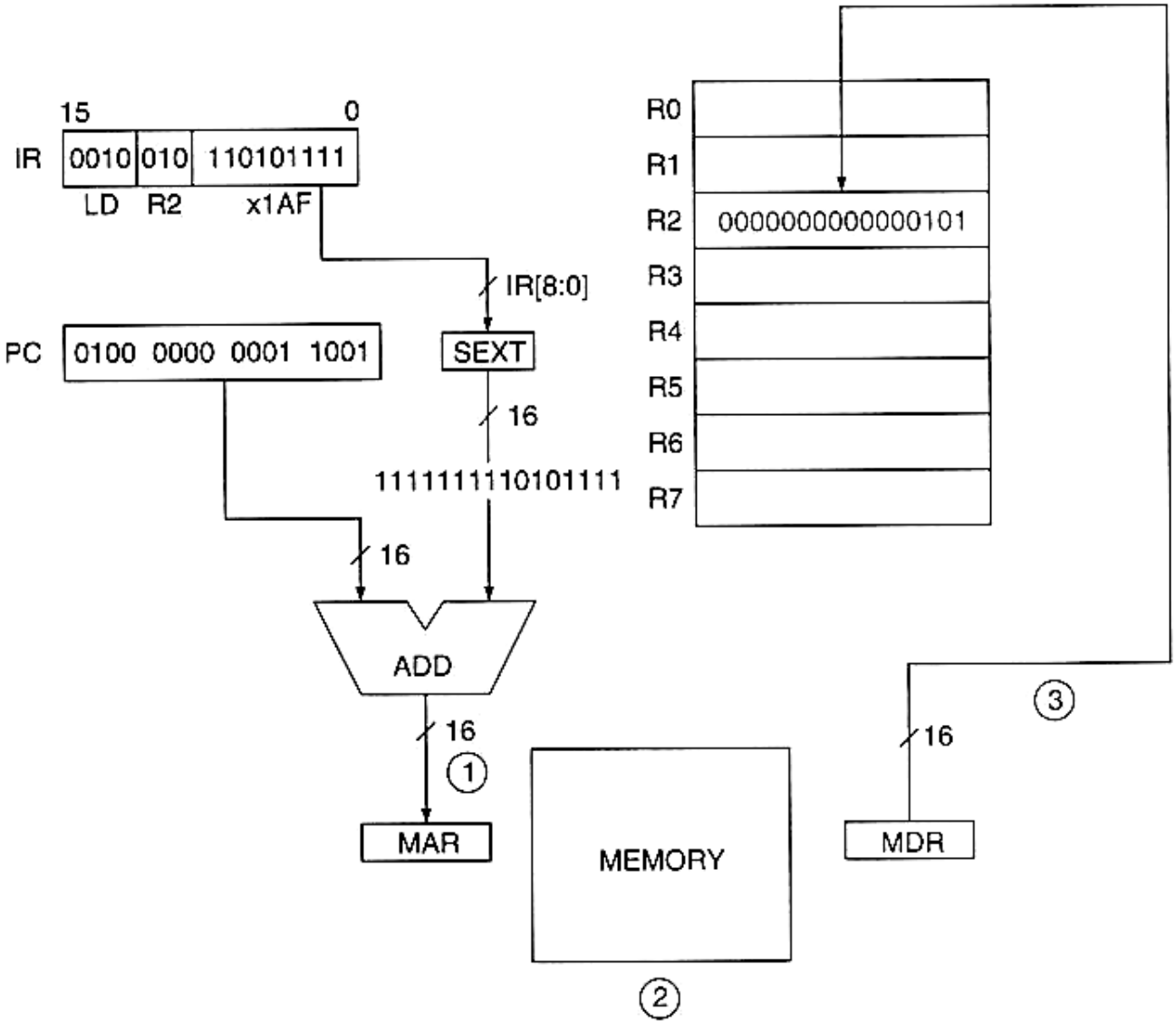
- Se l'operazione è di load, si scrive nel registro indicato dalle posizioni [9:11] il valore contenuto all'indirizzo di memoria calcolato; se è di store, si memorizza all'indirizzo di memoria calcolato il valore contenuto nel registro indicato dalle posizioni [9:11].

LC-3 - Indirizzamento relativo al contatore di programma (2)

- Esempio: supponiamo che il valore del PC sia 0x4019 e l'istruzione sia "LD R2, x1AF"; in R2 sarà caricato il valore contenuto in memoria all'indirizzo 0x3FC8. *Nota: sono necessari tre passi.*



LC-3 - Indirizzamento relativo al contatore di programma (3)

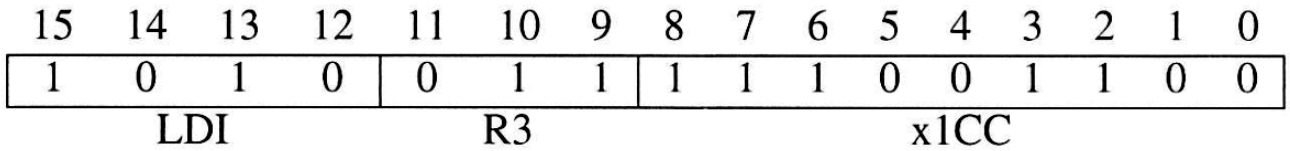


LC-3 - Indirizzamento indiretto (1)

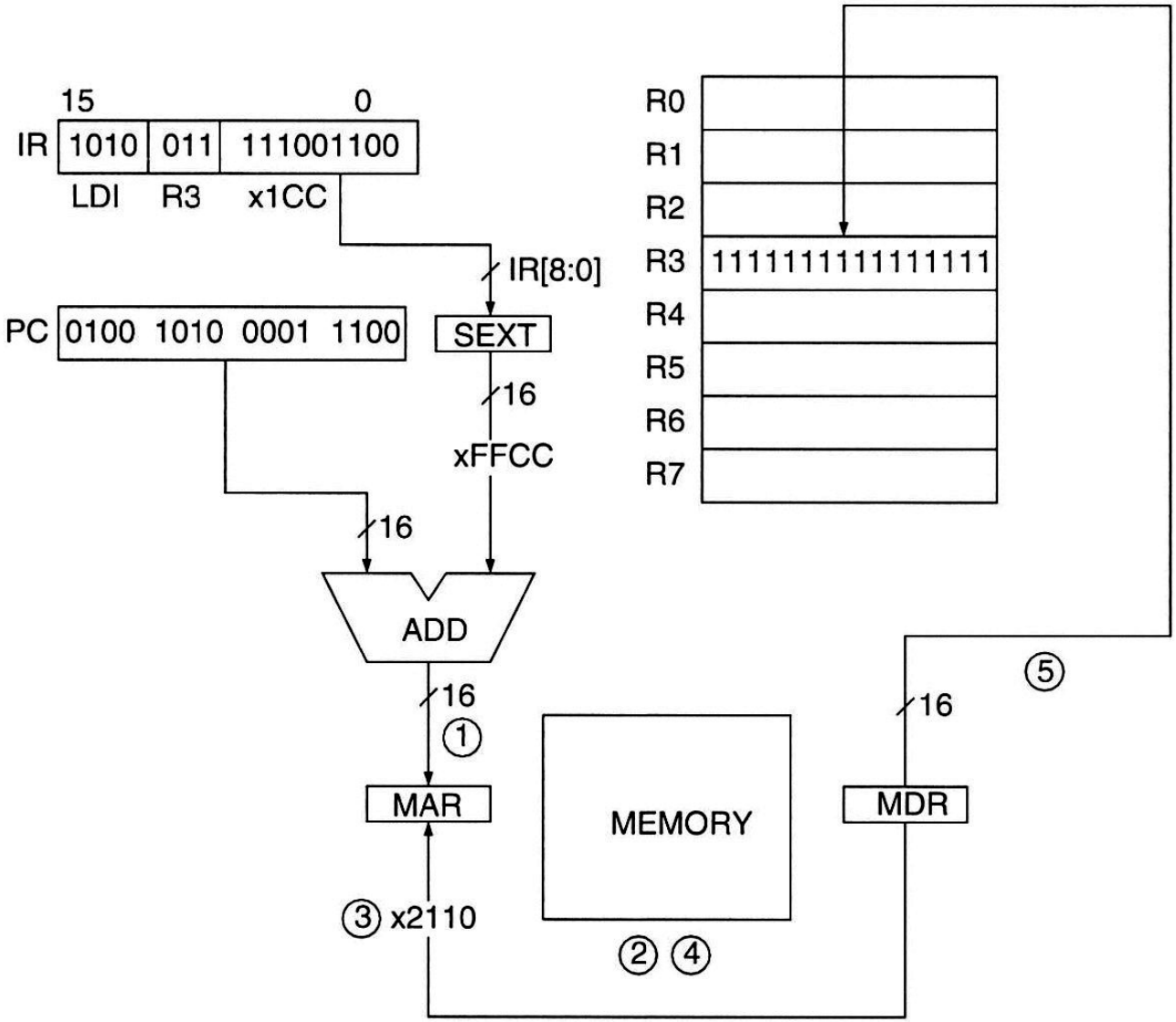
- Le istruzioni **LDI** (codice operativo = 1010) e **STI** (codice operativo = 1011) specificano l'indirizzamento indiretto;
- Funzionano esattamente come le istruzioni LD e ST, ma l'indirizzo calcolato dalla somma tra il PC e il valore specificato nell'istruzione *non è l'indirizzo della parola di memoria da/in cui leggere/scrivere l'operando,* ***ma è l'indirizzo della parola di memoria che contiene l'indirizzo della parola di memoria da/in cui leggere/scrivere l'operando***;

LC-3 - Indirizzamento indiretto (2)

- Esempio: supponiamo che l'istruzione in 0x4A1B sia "LDI R3, x1CC", e che l'indirizzo di memoria 0x49E8 (ottenuto sommando il PC incrementato, 0x4A1C, all'estensione su 16 cifre binarie con segno dello scostamente, 0xFFCC) contenga 0x2110; l'esecuzione sarà:
  - si somma lo scostamento con il PC e si ottiene come risultato l'indirizzo 0x49E8 che si carica nel MAR (fase 1);
  - si legge la memoria all'indirizzo 0x49E8 e si carica il suo contenuto (0x2110) nel MDR (fase 2);
  - tale indirizzo (0x2110) e' caricato nel MAR (fase 3);
  - si legge la memoria all'indirizzo 0x2110 e si carica il suo contenuto 0xFFFF nel MDR (fase 4);
  - si carica 0xFFFF nel registro di destinazione R3 (fase 5).



LC-3 - Indirizzamento indiretto (3)



LC-3 - Indirizzamento base+scostamento (offset) (1)

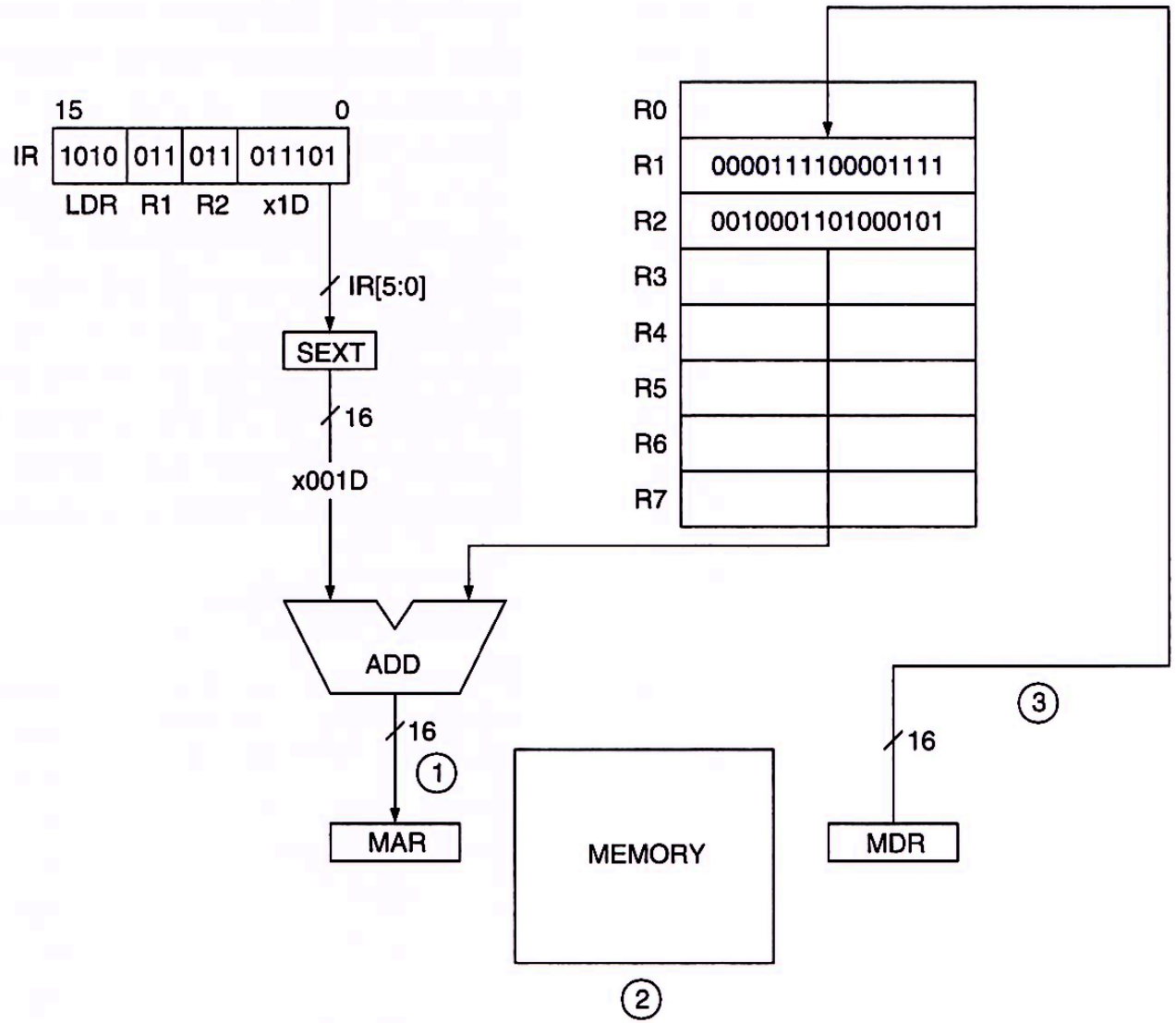
- Le istruzioni **LDR** (codice operativo = 0110) e **STR** (codice operativo = 0111) specificano l'indirizzamento base+scostamento;

L'indirizzo dell'operando è ottenuto aggiungendo lo scostamento indicato dalle 6 cifre binarie [0:5], esteso a 16 cifre binarie, al registro di base indicato dalle cifre binarie [6:8].

- le 6 cifre binarie utilizzate per rappresentare lo scostamento vanno sempre considerate come interi in complemento a 2 (quindi valori compresi fra -32 e +31);

- Esempio: si supponga che R2 contenga il valore 0x2345, e che l'istruzione da eseguire sia "LDR R1, R2, x1D"; dopo la sua esecuzione, in R1 si avrà il contenuto 0x0F0F della cella di memoria il cui indirizzo 0x2362 è stato calcolato sommando 0x2345 a 0x1D.

LC-3 - Indirizzamento base+scostamento (offset) (2)



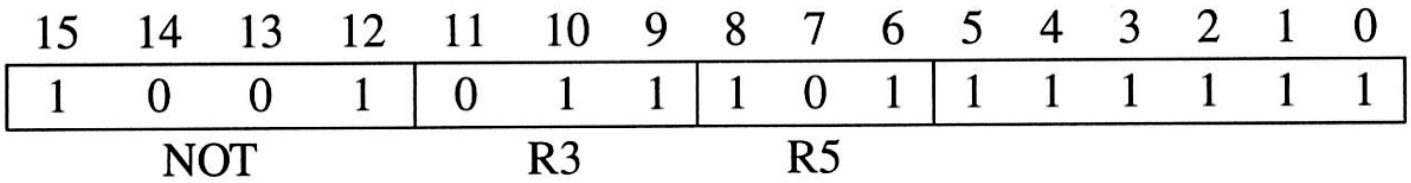
Operazioni sui dati

LC-3 - Operazioni sui dati

- Le operazioni sui dati sono istruzioni che elaborano i dati; possono essere di tipo aritmetico (ADD, SUB, MUL, DIV) o di tipo logico (AND, OR, NOT);
- LC-3 definisce tre istruzioni di questo tipo:
  - NOT
  - AND
  - ADD

LC-3 - Operazioni sui dati (NOT)

- L'istruzione **NOT** (codice operativo = 1001) è l'unico operatore ad utilizzare un solo operando (operazione unaria);
- Utilizza l'indirizzamento a registro sia per la sorgente che per la destinazione;
- Esegue il complemento cifra a cifra delle 16 cifre binarie specificate nel registro sorgente, e memorizza il risultato nel registro destinazione;
- Esempio: si vuole scrivere nel registro R3 la negazione del registro R5; l'istruzione sarà:



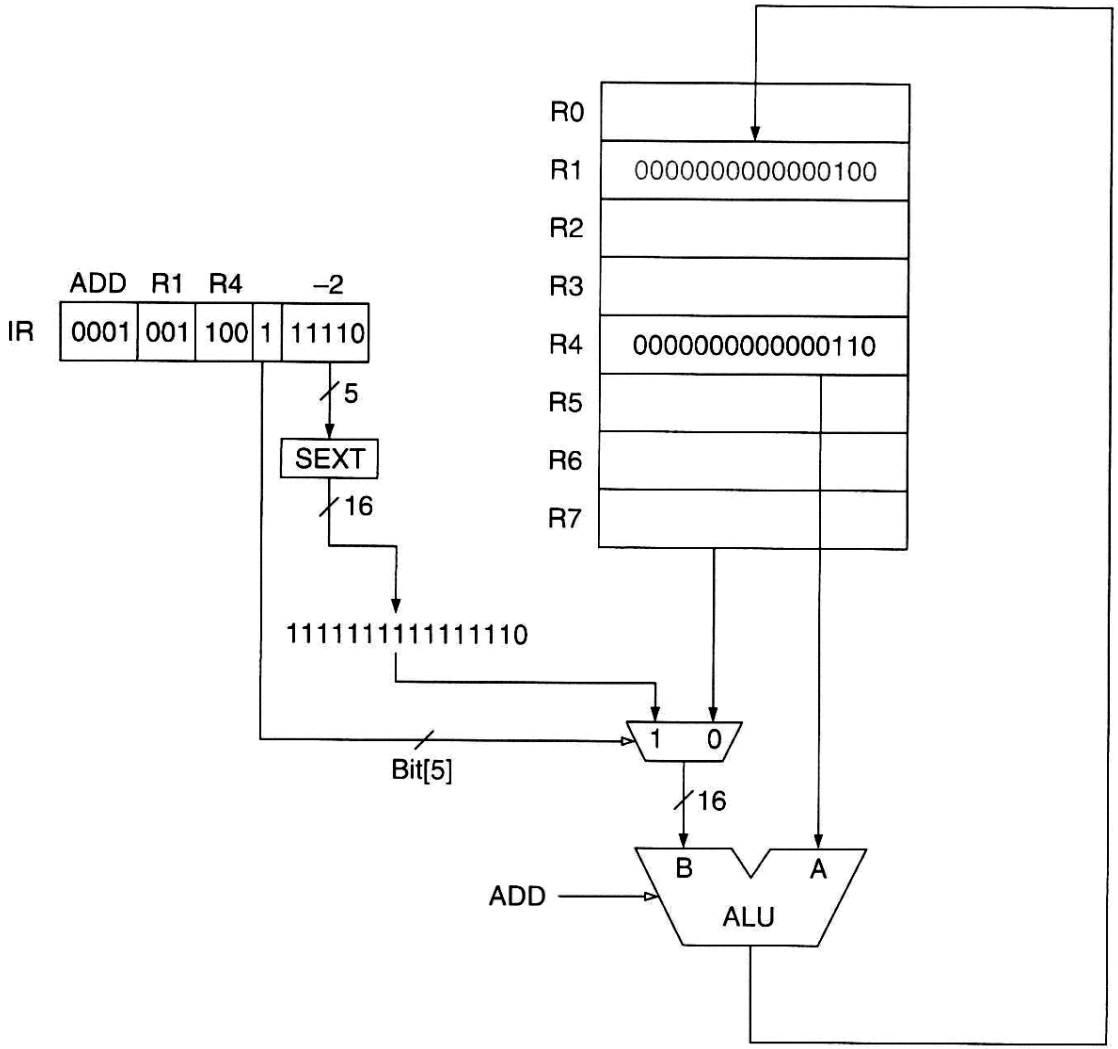
- Nota: le cifre binarie [0:5] sono tutte 1.

LC-3 - Operazioni sui dati (AND e ADD)

- Le istruzioni **AND** (codice operativo = 0101) e **ADD** (codice operativo = 0001) operano su due operandi a 16 cifre binarie;
- ADD esegue l'addizione in complemento a due tra gli operandi;
- AND esegue la congiunzione (prodotto) cifra a cifra tra gli operandi;
- A differenza di NOT, il secondo operando sorgente può essere specificato sia utilizzando l'indirizzamento a registro, che immediato. Nel primo caso la cifra [5] è posta a 0, così come le cifre [4:3], mentre le cifre [2:0] indicano il registro; invece nel secondo caso la cifra [5] è posta a 1, e l'operando è contenuto nelle cifre [4:0] dell'istruzione (vedi esempio).

LC-3 - Operazioni sui dati (AND e ADD)

Esempio di esecuzione dell'istruzione "ADD R1, R4, #-2":



Controllo

LC-3 - Controllo

- LC-3 ha 5 operazioni (codice operativo) riservate per il controllo di flusso:
  - **salto condizionale**
  - **salto non condizionale**
  - chiamata a funzione
  - TRAP
  - ritorno da un'interruzione (interrupt)
- In questa lezione vedremo solo i salti condizionali e non.

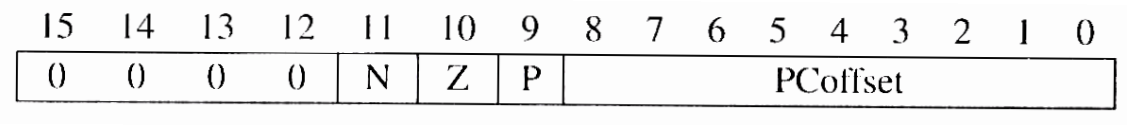
Nota:

LC-3 ha 3 registri ciascuno costituito da una sola cifra binaria che sono posti a 1 o a 0 ogni volta che si scrive in uno degli otto registri generali. Essi sono:

- negative (indicato con N)
- zero (indicato con Z)
- positive (indicato con P)

LC-3 - Salti condizionali (1)

- L'istruzione di branch è **BR** (codice operativo = 0000);
- Il suo formato è:



- Le cifre binarie [9:11] corrispondono alle tre condizioni N, Z e P; esse sono usati per cambiare il flusso di esecuzione;
- Durante la fase di ESECUZIONE il processore esamina le cifre N, Z, P, e:
  - se la cifra binaria [11] = 1, si esamina la condizione corrispondente a N;
  - se la cifra binaria [10] = 1, si esamina la condizione corrispondente a Z;
  - se la cifra binaria [9] = 1, si esamina la condizione corrispondente a P;

LC-3 - Salti condizionali (2)

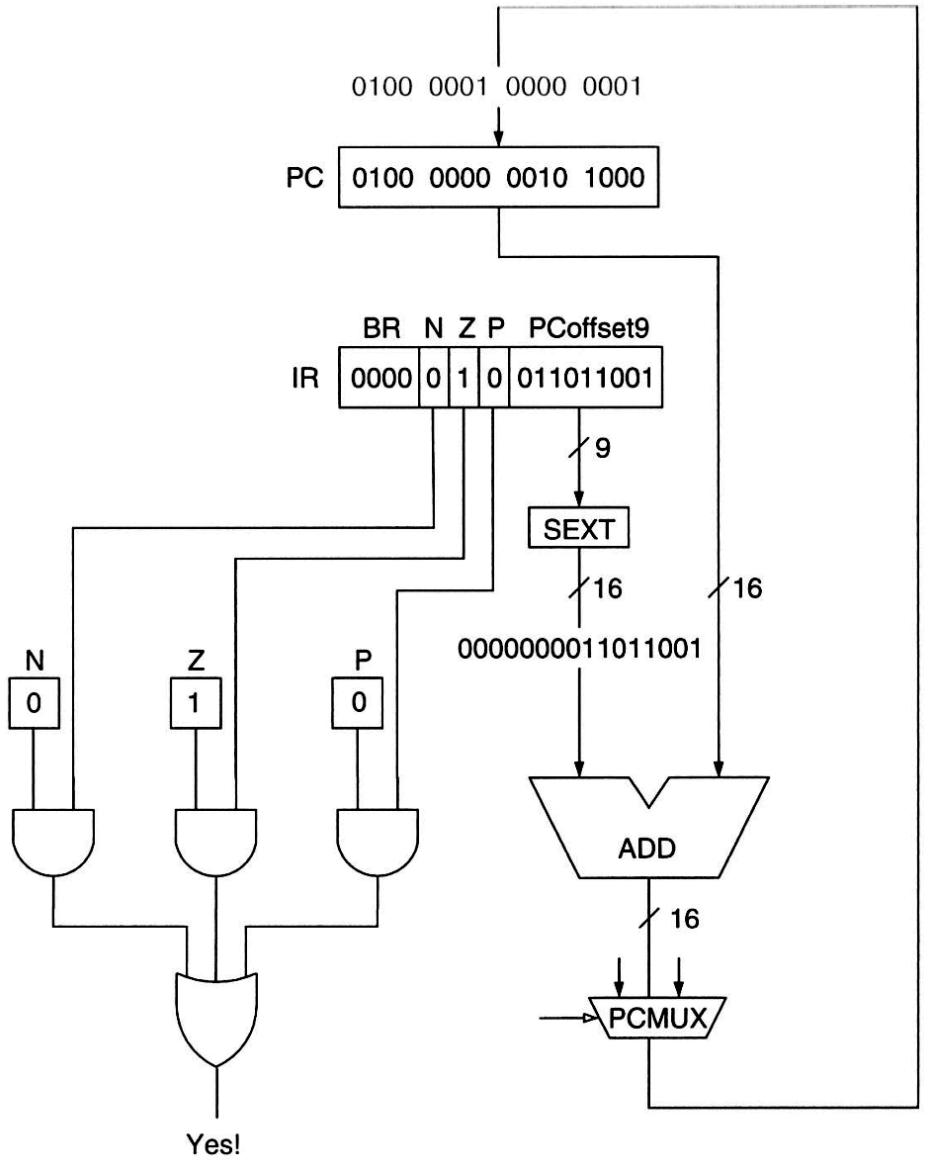
- *Solo se nessuna delle condizioni verificate è vera si lascia immutato il PC*;
- **Altrimenti si riscrive il PC ...**

...

si aggiorna il PC con il valore calcolato come somma tra il PC incrementato e lo scostamento del PC (PC offset) indicato nell'istruzione.

Esempio: supponiamo che l'istruzione precedente abbia prodotto in un registro generale il valore 0; il PC ha valore 0x4028 e l'istruzione corrente è "BRz x0D9" (0000 0*1*0 011011001, Z=1). Dopo l'esecuzione di questa istruzione il PC avrà valore 0x4101 e non 0x4028.

LC-3 - Salti condizionali (3)

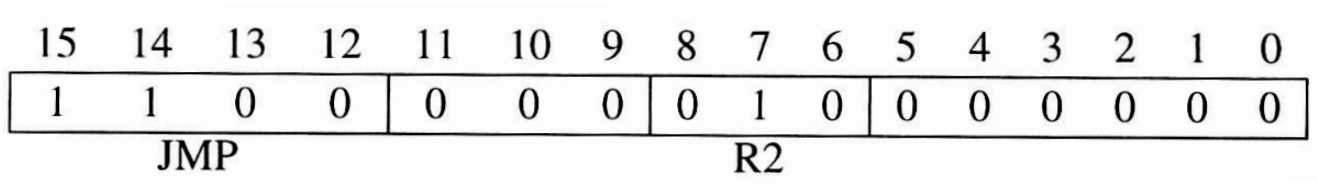


LC-3 - Salti condizionali (4)

- Se tutte e tre le cifre [11:9] sono 1, si esaminano tutti e tre i codici di condizione, di cui uno sicuramente deve essere uguale a 1. Quindi si aggiorna il PC al nuovo valore calcolato. Questo è un salto incondizionato.
- Se tutte e tre le cifre [11:9] sono 0, non si modifica il PC. Quindi non si salta, ma si prosegue con l'indirizzo presente nel PC.

LC-3 - Salti non condizionali

- LC-3 mette a disposizione l'istruzione **JMP** (codice operativo = 1100) per eseguire salti non condizionati;
- JMP carica nel contatore di programma (PC) il valore contenuto nel registro indicato dalle posizioni [6:8];
- Esempio:



LC-3 - Controllo

- Le istruzioni di controllo viste ci permettono di scrivere programmi per LC-3 che contengono costrutti condizionali e cicli;

Due metodi per il controllo dei cicli:

- *for*: a priori si conosce il numero di volte in cui si deve eseguire il ciclo; si utilizza quindi un registro contatore (ad esempio R2) che viene decrementato ad ogni ciclo. Esempio: somma dei primi dodici numeri a partire da una locazione di memoria.
- *while*: a priori non si conosce il numero di volte in cui il ciclo sarà eseguito; si utilizza la tecnica della **sentinella**. Supponiamo ad esempio di voler sommare un insieme di valori tutti positivi (zero escluso) presenti in memoria; al termine di tali valori occorre piazzare una sentinella, che in questo caso potrebbe essere lo zero o un numero negativo. In questo modo si può uscire dal ciclo appena si trova uno zero o un negativo.

- Analizziamo questi esempi...

LC-3 - Controllo (FOR)

Esempio: somma dei primi dodici numeri memorizzati a partire da una locazione di memoria. Di seguito è riportata una possibile realizzazione nei linguaggi C ed Assembly.

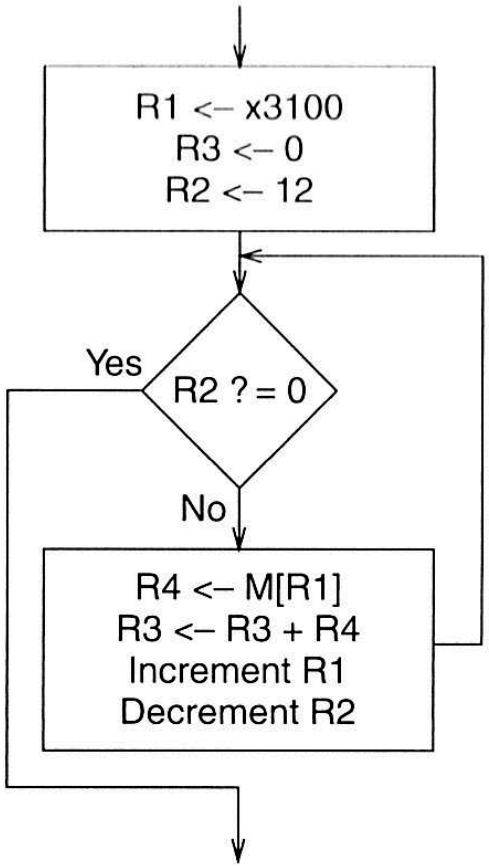
```
int main(){
 int A[20]={1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,0,0,0,0,0,0,0,0};
 int i=0;
 int r=0;
 for(int k=12;k>0;k--){
   r=r+A[i];
   i++;
 }
}
```

```
.ORIG x3000
LEA R1, x0FF ; x3100 indir. A[0] in R1
AND R3,R3,#0 ; R3=0 (variabile r)
AND R2,R2,#0 ; R2=0 (variabile k)
ADD R2,R2,#12 ; k=12
BRz x005       ; salta a x300A
LDR R4,R1,x0 ; contenuto A[i] in R4
ADD R3,R3,R4 ; R3=R3+A[i]
ADD R1,R1,#1 ; i++
ADD R2,R2,#-1 ; k--
BRnzp x1FA ; salta a x3004
.END
```

LC-3 - Controllo (FOR)

- LEA R1, x0FF: 0x3001 (PC incrementato) + 0x00FF (scostamento) = 0x3100 (semantica: DR <– (PC+1) + SEXT(PCoffset))
- BRz x005: 0x3005 (PC incrementato) + 0x0005 (scostamento) = 0x300A
- BRnzp x1FA: 0x300A (PC incrementato) + 0xFFFA (-6, scostamento) = 0x3004

LC-3 - Controllo (FOR)



Address	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	
x3000	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	R1<- 3100
x3001	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	R3 <- 0
x3002	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	R2 <- 0
x3003	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	R2 <- 12
x3004	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	BRz x300A
x3005	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	R4 <- M[R1]
x3006	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	R3 <- R3+R4
x3007	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	R1 <- R1+1
x3008	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	R2 <- R2-1
x3009	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	BRnzp x3004

LC-3 - Controllo (WHILE)

Esempio: somma dei numeri maggiori di zero memorizzati a partire da una locazione di memoria. Di seguito è riportata una possibile realizzazione nei linguaggi C ed Assembly.

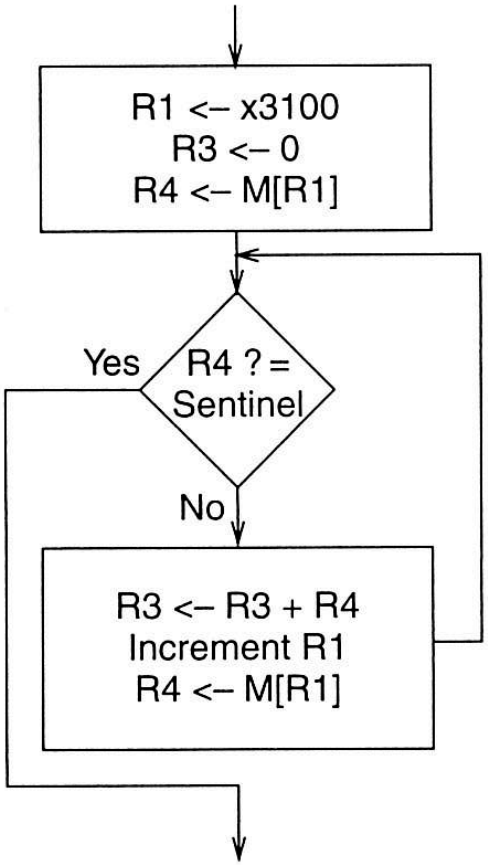
```
int main(){
 int A[20]={1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,-1,0,0,0,0,0,0,0};
 int i=0;
 int r=0;
 while(A[i]>0){  //Nota: -1 è la se
   r=r+A[i];
   i++;
 }
}
```

```
.ORIG x3000
LEA R1, x0FF ; x3100 indir. A[0] in R1
AND R3,R3,#0 ; R3=0 (variabile r)
LDR R4,R1,x0 ; contenuto A[0] in R4
BRn x004 ; salta a x3008
ADD R3,R3,R4 ; R3=R3+A[i]
ADD R1,R1,#1 ; corrisponde a i++
LDR R4,R1,x0 ; contenuto A[i] in R4
BRnzp x1FB ; salta a x3003
.END
```

LC-3 - Controllo (WHILE)

- LEA R1, x0FF: 0x3001 (PC incrementato) + 0x00FF (scostamento) = 0x3100 (semantica: DR <– (PC+1) + SEXT(PCoffset))
- BRn x004: 0x3004 (PC incrementato) + 0x0004 (scostamento) = 0x3008
- BRnzp x1FB: 0x3008 (PC incrementato) + 0xFFFB (-5, scostamento) = 0x3003

LC-3 - Controllo (WHILE)



Address	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	
x3000	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	`R1<- x3100`
x3001	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	`R3 <- 0`
x3002	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	`R4 <- M[R1]`
x3003	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	`BRn x3008`
x3004	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	`R3 <- R3+R4`
x3005	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	`R1 <- R1+1`
x3006	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	`R4 <- M[R1]`
x3007	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	`BRnzp x3003`

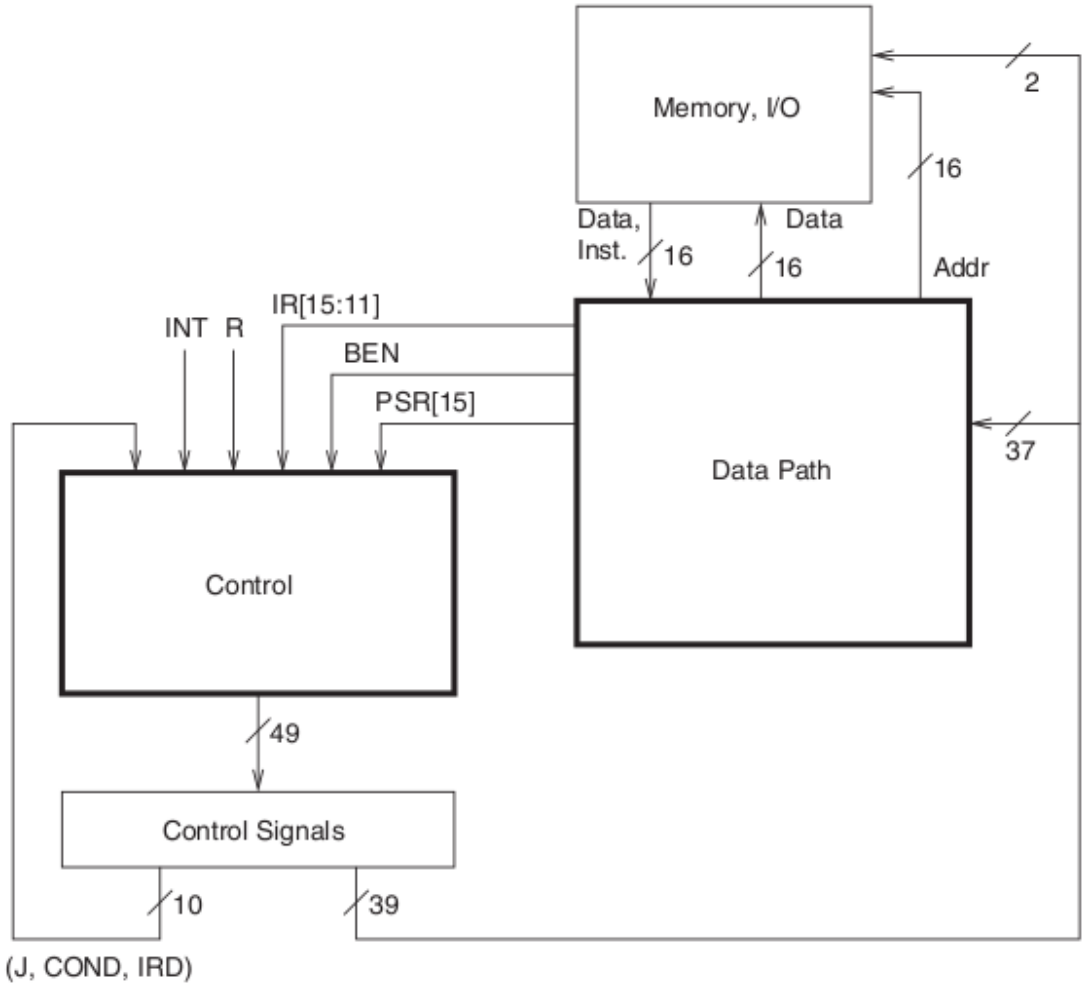
Approfondimento

LC-3 - Approfondimento

- Le due componenti principali di un'architettura sono:
  - **controllore**: contiene tutte le componenti per generare i segnali di controllo necessari per controllare i componenti logici in ogni ciclo;
  - **unità esecutiva**: è l'insieme di tutte le componenti che eseguono le istruzioni.
- In questa lezione abbiamo visto le componenti principali dell'unità esecutiva. Vediamo ora la struttura completa dell'unità esecutiva, e un breve cenno al controllore.
- Maggiori dettagli si possono trovare nell'appendice C del testo.

LC-3 - Approfondimento

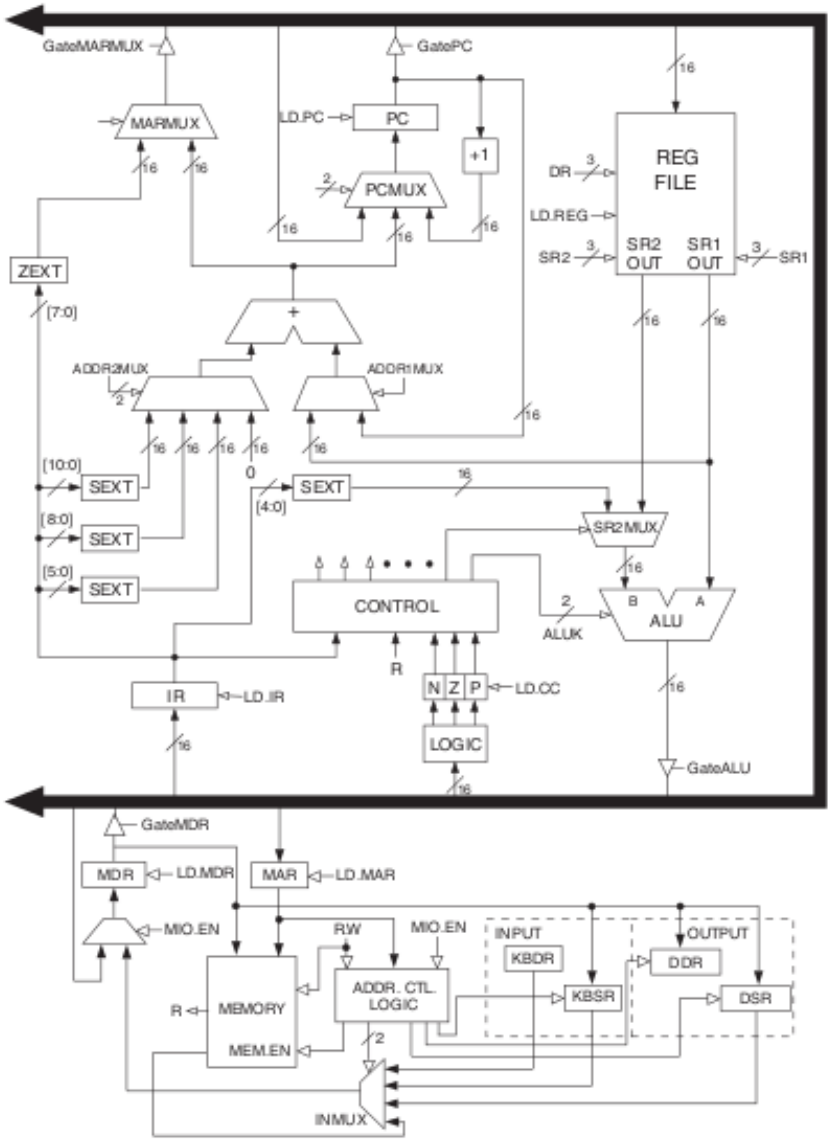
- La microarchitettura di LC-3 è la seguente:



LC-3 - Approfondimento

- L'unità esecutiva è l'insieme di tutte le componenti che eleborano le informazioni durante il ciclo d'esecuzione;
- Occorre notare che ad ogni componente è associato un segnale di controllo;
- In tutto ci sono 39 segnali di controllo diretto che, ad ogni ciclo di orologio, fanno collaborare le componenti dell'unità esecutiva per processare correttamente i dati;
- Di seguito viene riportato uno schema complessivo dell'unità esecutiva.

LC-3 - Approfondimento



LC-3 - Approfondimento

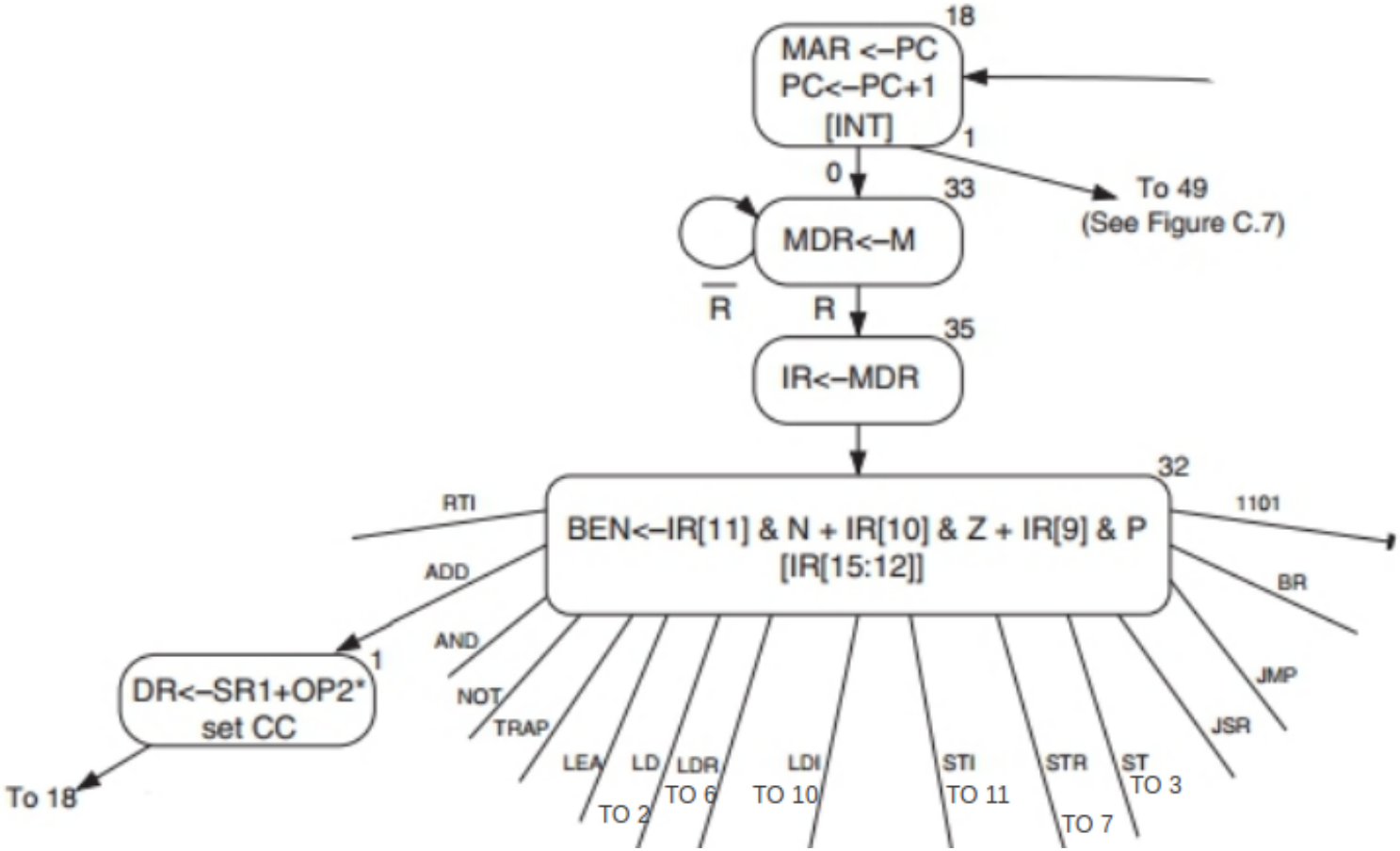
- Il controllore è la componente che stabilisce il comportamento della microarchitettura durante un ciclo di orologio;
- E' implementato da una macchina a stati finiti (MSF, FSM);
- Ogni ciclo di orologio è completamente determinato da 49 segnali (più ulteriori 9); 39 di questi servono per gestire l'unità esecutiva, e 10 segnali servono per determinare lo stato futuro della MSF;
- Complessivamente i 49 segnali si chiamano **microistruzioni**;
- La MSF è composta in tutto da 52 stati distinti, ciascuno dei quali corrisponde ad una microistruzione;

Nota:

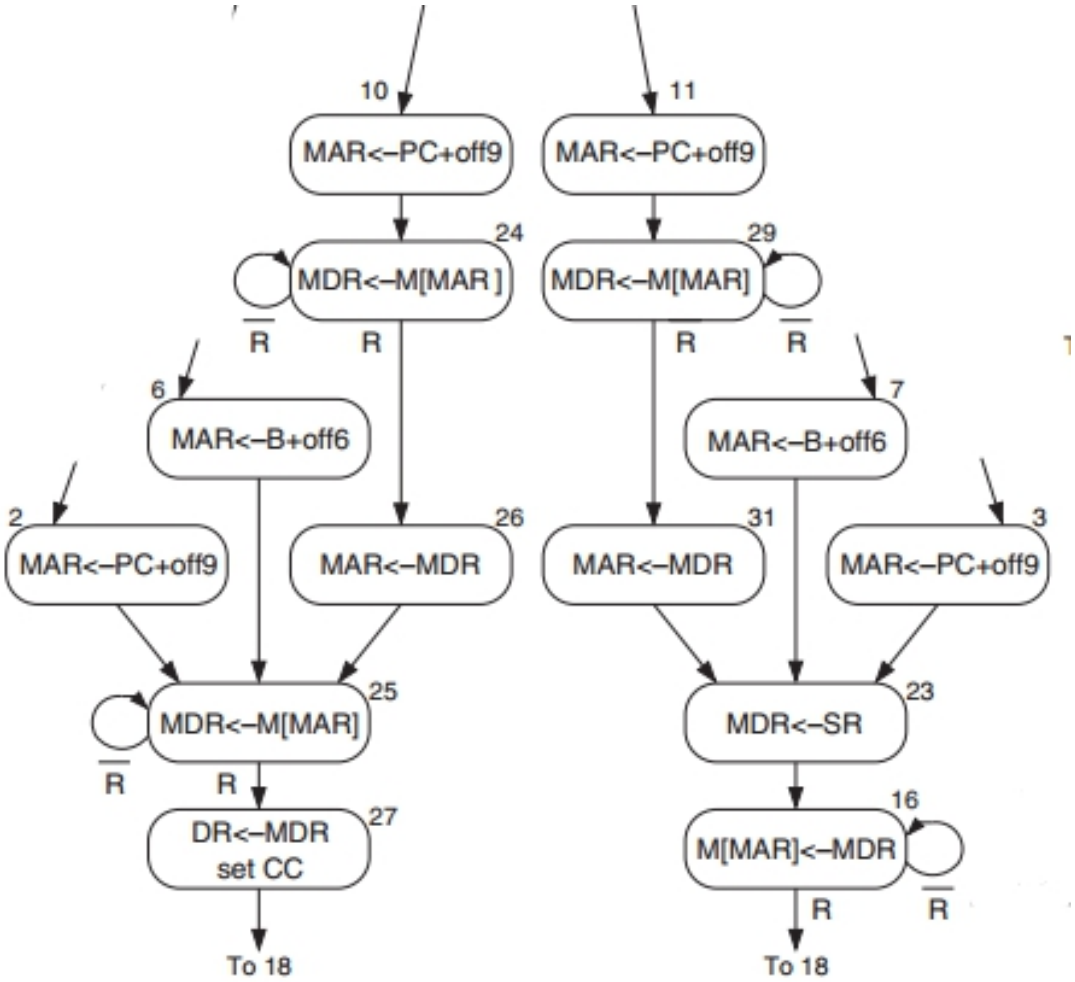
Dalla MSF si ricava quanti cicli di orologio sono effettivamente necessari per eseguire un'istruzione.

LC-3 - Approfondimento

- Riportiamo di seguito un frammento della MSF:



LC-3 - Approfondimento



Elenco completo delle istruzioni di LC-3

LC-3 - Istruzioni di LC-3