Il linguaggio Macchina

Architettura
degli Elaboratori e delle Reti,
Turno I

Alberto Borghese
Università degli Studi di Milano
Dipartimento di Scienze dell'Informazione
email: borghese@dsi.unimi.it

Linguaggio macchina

Codifica binaria

- Codifica posizionale
- 2 simboli, base 2.

$01001101 = 0x2^7 + 1x2^6 + 0x2^5 + 0x2^4 + 1x2^3 + 1x2^2 + 0x2^1 + 1x2^0 = 77$

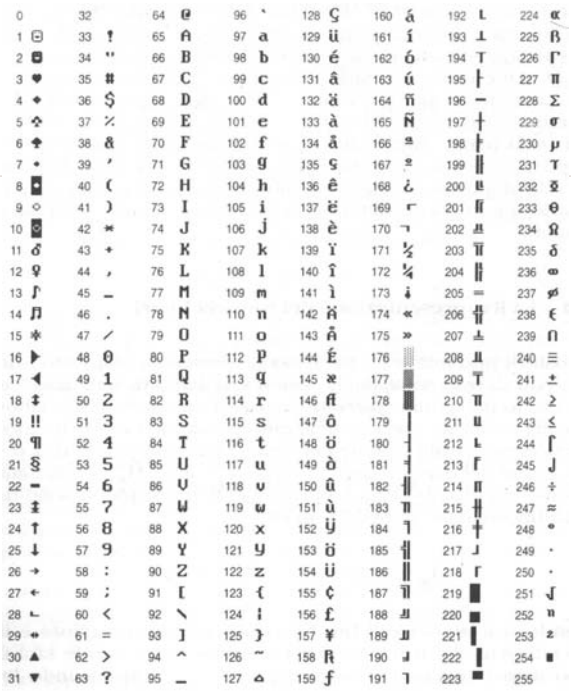
Codifica esadecimale

- 16 simboli, base 16.

$0x4D = 4x16^1 + 13x16^0 = 77$

Relazione tra codifica binaria ed esadecimale

0100 -> 4 4 -> 0100
1101 -> D D -> 1101



Il codice ASCII

- 8 bit
- 0-31 codici di controllo.
- 128-255 extended ASCII

3

Linguaggio macchina

- Le istruzioni in linguaggio assembly devono essere tradotte in linguaggio macchina (cioè in sequenze di 0 e 1) per poter essere eseguite.
- Le istruzioni in linguaggio macchina sono lunghe **32 bit** (come i registri e le parole di memoria).

Linguaggio assembly → Linguaggio macchina

Linguaggio macchina

- E' necessaria una convenzione per rappresentare i registri tramite numeri.
- In MIPS:
  - **$zero → 0,** **0x00**
  - **$at → 1** (registro riservato) **0x01**
  - **$v0, $v1 → 2, 3** **0x02, 0x03**
  - **$a0 - $a3 → 4 – 7** **0x04 – 0x07**
  - **$t0 - $t7 → 8 – 15** **0x08 – 0x0F**
  - **$s0 - $s7 → 16 – 23** **0x10 – 0x17**
  - **$t8, $t9 → 24, 25** **0x18, 0x19**
  - **$k0, $k1 → 26, 27** (registri riservati) **0x1A, 0x1B**
  - **$gp, $sp, $fp, $ra → 28, 29, 30, 31** **0x1C - 0x1F**

Formato istruzioni

- La rappresentazione binaria di un'istruzione assembly è composta da *32* bit (la stessa dimensione di una parola di memoria) e rispetta il seguente formato (tipo R) nel caso di istruzione aritmetico-logica tra registri.

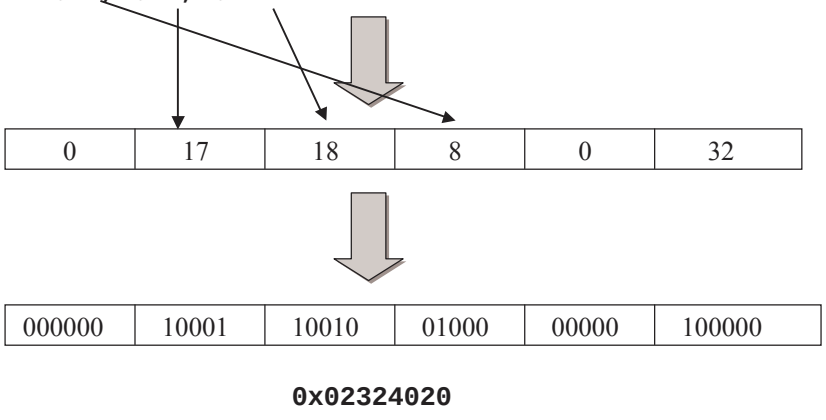
Formato istruzioni di tipo R

op	rs	rt	rd	shamt	funct
6 bit	5 bit	5 bit	5 bit	5 bit	6 bit

- Ai vari campi sono stati assegnati dei nomi mnemonici:
  - **op:** (opcode) identifica il tipo di istruzione
  - **rs:** registro contenente il primo operando sorgente
  - **rt:** registro contenente il secondo operando sorgente
  - **rd:** registro destinazione contenente il risultato
  - **shamt:** shift amount (scorrimento)
  - **funct:** indica la variante specifica dell'operazione

Istruzioni di tipo R: esempio

```
add $t0, $s1, $s2
```



0x02324020

Istruzioni di tipo R

- Istruzioni aritmetico-logiche con il tipo di formato visto, vengono chiamate di **tipo R** (registro).
- Esempi:
  - somma, prodotto, divisione
  - shift (scorrimento)
  - AND, OR, NOT
- Le diverse istruzioni aritmetico-logiche si distinguono tra loro in base al campo **`funct.`**

Istruzioni di tipo R: esempi

Nome campo	op	rs	rt	rd	shamt	funct
Dimensione	6-bit	5-bit	5-bit	5-bit	5-bit	6-bit
`add $s1, $s2, $s3`	000000	10010	10011	10001	00000	100000

Nome campo	op	rs	rt	rd	shamt	funct
Dimensione	6-bit	5-bit	5-bit	5-bit	5-bit	6-bit
`sub $s1, $s2, $s3`	000000	10010	10011	10001	00000	100010

Nome campo	op	rs	rt	rd	shamt	funct
Dimensione	6-bit	5-bit	5-bit	5-bit	5-bit	6-bit
`and $s1, $s2, $s3`	000000	10010	10011	10001	00000	100100

Nome campo	op	rs	rd	immediate
Dimensione	6-bit	5-bit	5-bit	16-bit
`addi $s2, $s3, const`	001000	10011	10010	10001010100111011

Formato R ed operazioni logico-matematiche

Non tutte le operazioni logico-matematico, sono di tipo R.

Le operazioni logico-matematiche di tipo R hanno codice operativo 0.

Non tutte le operazioni con codice operativo 0 sono logico-matematiche (ad esempio ci sono le istruzioni di *jr, syscall…*).

Linguaggio macchina

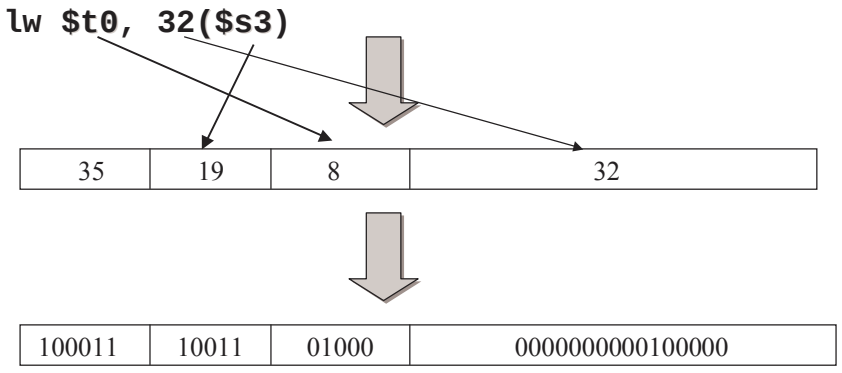
- Il formato delle istruzioni di tipo R non è adatto a rappresentare istruzioni di load/store.
- Al campo indirizzo (offset) delle istruzioni **lw** e **sw** sarebbe riservato un campo di **5 bit** (le costanti sarebbero al massimo di dimensione $2^5 = 32$)
- Per le istruzioni di load/store si utilizza un formato diverso (**tipo I**) utilizzando sempre 32 bit complessivi

Formato istruzioni di tipo I

op	rs	rt	Indirizzo (=costante)
6 bit	5 bit	5 bit	16 bit

- In questo caso, i campi hanno il seguente significato:
  - **op** identifica il tipo di istruzione;
  - **rs** indica il registro base;
  - **rt** indica il registro destinazione dell'istruzione di caricamento;
  - **Indirizzo** riporta lo spiazzamento (offset).
- Con questo formato una istruzione **lw (sw)** può indirizzare byte nell'intervallo -2^{15} ÷ $+2^{15}-1$ rispetto all'indirizzo base.

Istruzioni di tipo I: esempio



0x8E680020

Istruzioni di tipo I: esempi

- Il secondo tipo di formato istruzioni è il formato per le *istruzioni di load/store*:

Nome campo	op	rs	rt	indirizzo
Dimensione	6-bit	5-bit	5-bit	16-bit
`lw $t0, 32 ($s3)`	100011	10011	01000	0000 0000 0010 0000

Nome campo	op	rs	rt	indirizzo
Dimensione	6-bit	5-bit	5-bit	16-bit
`sw $t0, 32 ($s3)`	101011	10011	01000	0000 0000 0010 0000

Esempio

A[300] = h + A[300]

```
lw $t0, 1200($t1)
add $t0, $s2, $t0
sw $t0, 1200($t1)
```

`$s2` ⟶ h

`$t1` ⟶ Indirizzo base di *A*

Esempio (cont.)

35	9	8	1200		
0	18	8	8	0	32
43	9	8	1200		

100011	01001	01000	0000010010110000		
000000	10010	01000	01000	00000	100000
101011	01001	01000	0000010010110000		

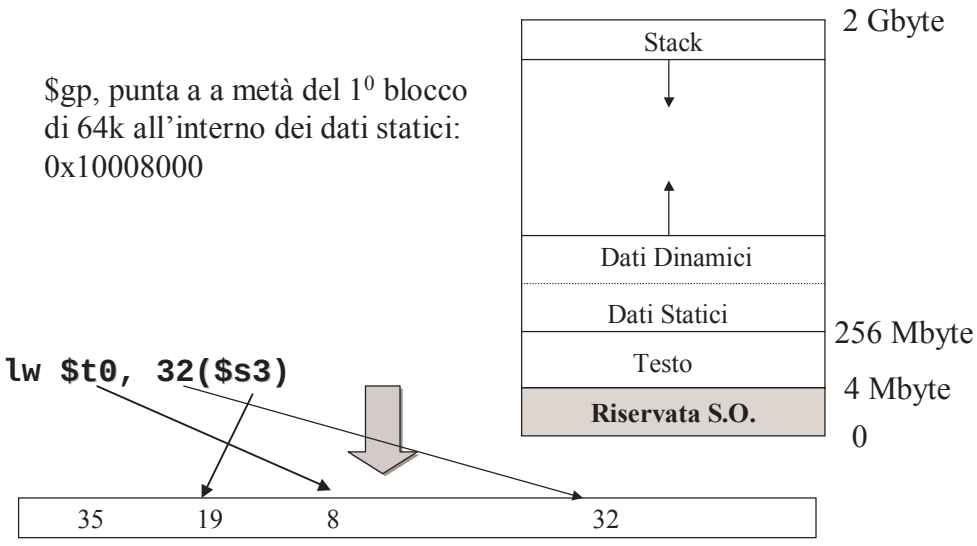
0x8D2804B0

0x02484020

0xAD2804B0

Problema con load/store

$gp, punta a a metà del 1^0 blocco di 64k all'interno dei dati statici: 0x10008000



Problema con lw

Per caricare dalla memoria occorrono due operazioni:

- Caricare il base address del vettore.
- Caricare l'offset.

- lui $s0, 0x1000
- lw $s1, 0x8000($s0)

- lw $s1, 0($gp)

- Sono facilitati gli accessi ai dati compresi tra 256Mbyte e 256,064Mbyte.

Istruzioni di salto

Aggiornamento del Program Counter

- Il PC viene incrementato di 4 (byte) durante l'esecuzione di un'istruzione.
- Viene forzato nel PC l'indirizzo dell'istruzione nel caso di salto (branch, jump o chiamata a procedura).

Istruzioni di salto condizionato

- Salti condizionati relativi:
  - **`beq r1, r2, L1`** (*branch on equal*)
  - **`bne r1, r2, L1`** (*branch on not equal*)
- Salti condizionati relativi:
  - Il flusso sequenziale di controllo cambia solo se la condizione è vera.
  - Il calcolo del valore dell'etichetta **`L1`** (indirizzo di destinazione del salto) è relativo al Program Counter (PC).

Formato istruzioni di salto condizionato (tipo I)

op	rs	rt	Indirizzo
6 bit	5 bit	5 bit	16 bit

- Nel caso di salti condizionati, i campi hanno il seguente significato:
  - **op** identifica il tipo di istruzione;
  - **rs** indica il primo registro;
  - **rt** indica il secondo registro;
  - **Indirizzo** riporta lo spiazzamento (offset).
- Per l'offset si hanno a disposizione solo 16-bit del campo **indirizzo** ⇒ rappresentano un indirizzo di **parola** relativo al PC **(PC-relative word address)**
- Con questo formato una istruzione **salto** può indirizzare parole nell'intervallo -2^{15} + $+2^{15}-1$ rispetto all'indirizzo base.

Istruzioni di salto condizionato (tipo I)

- L'indirizzamento relativo al Program Counter permette di fare dei salti condizionati ad aree di memoria il cui indirizzo non è esprimibile con 16-bit
- Esempio: **bne $s0, $s1, L1**
  - Per esprimere l'etichetta **L1** si hanno a disposizione solo 16-bit ⇒ il valore di **L1** è calcolato rispetto al Program Counter in modo da saltare di 2^{15} **parole** avanti o indietro rispetto all'istruzione corrente.
- Per il **principio di località** degli indirizzi di memoria è utile calcolare l'indirizzo di destinazione del salto come **offset** rispetto all'istruzione corrente.

Istruzioni di salto condizionato (tipo I)

- I 16-bit del campo indirizzo esprimono **l'offset** rispetto al PC rappresentato in complemento a due per permettere salti in avanti e all'indietro.
- L'offset varia tra -2^{15} e $+2^{15}-1$
- Esempio: **`bne $s0, $s1, L1`**
- L'assemblatore sostituisce l'etichetta **`L1`** con l'indirizzo **di parola** relativo a PC: **(L1 - PC)/4**
  - PC contiene già l'indirizzo dell'istruzione successiva al salto
  - La divisione per 4 serve per calcolare l'indirizzo di parola
- Il valore del campo **`indirizzo`** può essere negativo (salti all'indietro)

Istruzioni di salto condizionato (tipo I)

- Indirizzare una parola (4-Byte) corrisponde alla divisione per 4 (ottimizzazione possibile grazie alla memoria indirizzata al byte)
  - I due bit meno significativi sono sempre 00

NB si può saltare ad una ***parola*** nell'intervallo -2^{15} $+2^{15}-1$ rispetto all'indirizzo base dato dal PC.

Istruzioni di tipo I: esempio

Nome campo	op	rs	rt	indirizzo			
Dimensione	6-bit	5-bit	5-bit	16-bit			
`beq $s1, $s2, 100`	000100	10001	10010	0000	0000	0001	1001

L1 = 100 in byte Codifica 0000000000011001(00) in binario.

Nome campo	op	rs	rt	indirizzo			
Dimensione	6-bit	5-bit	5-bit	16-bit			
`beq $s1, $s2, -100`	000100	10001	10010	1111	1111	1110	0111

L1 = -100 in byte Codifica 1111111111100111(00) in binario.

Esempio

```
Loop:  add $t1, $s3, $s3          80000: 0 19 19 9 0 32
        ……
       bne $t0, $s5, Exit         80016: 5 8 21  2
       (bne $t0, $s5, 8)
       add $s3, $s3, $s4
       beq $t0,$s5, Loop
Exit:                             80028: (Exit) ...
        ……
```

2 = (80028 – 80020) / 4

Nota: quando si esegue la **bne**, PC punta già all'istruzione successiva (80020)

Esempio

```
Loop: add $t1, $s3, $s3
       ……
      bne $t0, $s5, Exit
      add $s3, $s3, $s4
      beq $t0,$s5, Loop
Exit:
       ……
```

```
80000: 0 19 19 9 0 32
……
      80016: 5 8 21  2
80020: 0 19 20 19 0 32
      80024: 4 8 21 -7
      80028: (Exit) ...
```

```
-7 = (80000 – 80028)/4
```


Istruzioni di tipo I: esempi

- Il tipo I è il formato per le istruzione con operandi immediati: ad esempio `addi` (addition immediate) e `slti` (set less than immediate)

Nome campo	op	rs	rt	"Indirizzo"
Dimensione	6-bit	5-bit	5-bit	16-bit
addi $s1, $s1, 4	001000	10001	10001	0000 0000 0000 0100

Nome campo	op	rs	rt	"indirizzo"
Dimensione	6-bit	5-bit	5-bit	16-bit
slti $t0, $s2, 8	001010	10010	01000	0000 0000 0000 1000

```
# $t0 = 1 if $s2 < 8
```

Istruzioni di salto

- Salti condizionati relativi:
  - **`beq r1, r2, L1`** (*branch on equal*)
  - **`bne r1, r2, L1`** (*branch on not equal*)
- Salti incondizionati assoluti:
  - **`j L1`** (*jump*)
  - **`jr r`** (*jump register*)
  - **`jal L1`** (*jump and link*) (chiamata a procedura)

Istruzioni di salto

- Salti condizionati relativi:
  - Il flusso sequenziale di controllo cambia solo se la condizione è vera.
  - Il calcolo del valore dell'etichetta **`L1`** (indirizzo di destinazione del salto) è relativo al Program Counter (PC).
- Salti incondizionati assoluti:
  - Il salto viene sempre eseguito.
  - L'indirizzo di destinazione del salto è un indirizzo assoluto di memoria.

Istruzioni di salto

Nome	Formato
beq	I
bne	I
j	J
jr	J
jal	J

Indirizzamento relativo al PC

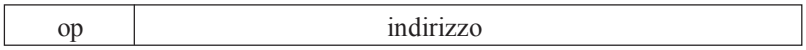
- Esempio: Operazione di salto condizionato (formato tipo I):

Nome campo	op	rs	rt	indirizzo
Dimensione	6-bit	5-bit	5-bit	16-bit
`beq $s1, $s2, 100`	000100	10001	10010	0000 0000 0001 1001

Nome campo	op	rs	rt	indirizzo
Dimensione	6-bit	5-bit	5-bit	16-bit
`bne $s1, $s2, 100`	000101	10001	10010	0000 0000 0001 1001

Formato istruzioni di tipo J

- Il terzo tipo di formato istruzione (Formato J) è il formato usato per le istruzioni di salto incondizionato *(jump)*:



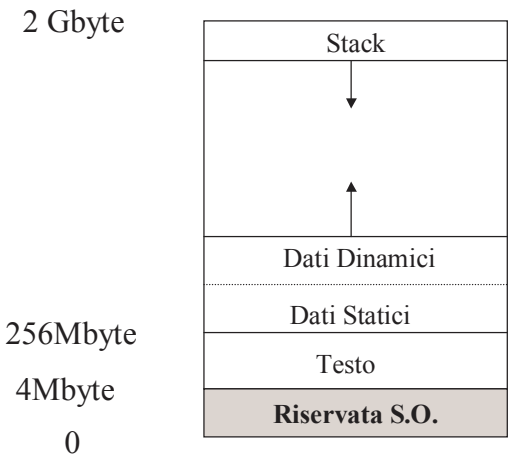
6 bit 26 bit

- In questo caso, i campi hanno il seguente significato:
  - **op** indica il tipo di operazione;
  - **indirizzo** (composto da **26-bit**) riporta una parte (26 bit su 32) dell'indirizzo **assoluto** di destinazione del salto.
- I 26-bit del campo **indirizzo** rappresentano un indirizzo di parola **(word address)**

Istruzioni di salto incondizionato (tipo J)

- L'assemblatore sostituisce l'etichetta **L1** con i 28 bit meno significativi traslati a destra di 2 (divisione per 4 per calcolare l'indirizzo di parola) per ottenere 26-bit
  - In pratica elimina i due 0 finali
  - Si amplia lo spazio di salto:
    si salta tra 0 e 2^{28} Byte (2^{26} word) = 256 Mbyte.
- I 26-bit di indirizzo nelle jump rappresentano un indirizzo di parola (word address) $\Rightarrow$ corrispondono ad un indirizzo di byte (byte address) composto da 28-bit.
- Poiché il registro PC è composto da 32-bit $\Rightarrow$ l'istruzione jump rimpiazza solo i 28-bit meno significativi del PC, lasciando inalterati i rimanenti 4-bit più significativi.

Organizzazione logica della memoria



Esempio precedente

```
Loop: add $t1, $s3, $s3
        ……
      bne $t0, $s5, Exit

      add $s3, $s3, $s4
      beq $t0,$s5, Loop
Exit:
        ……
```

```
80000: 0 19 19 9 0 32
……
      80016: 5 8 21 2

80020: 0 19 20 19 0 32
      80024: 4 8 21 -7
      80028: Exit ...
```

`beq $t0,$s5, Loop` ➔ `j Loop`

Esempio

```
Loop: add $t1, $s3, $s3
       ……
      bne $t0, $s5, Exit
      add $s3, $s3, $s4
      j Loop      (j 80000)
Exit:
       ……
```

```
80000: 0 19 19 9 0 32
……
      80016: 5 8 21 2
80020: 0 19 20 19 0 32
      80024: 2 20000
      80028: Exit ...
```


Istruzioni di tipo J: esempio

Nome campo	op	indirizzo				
Dimensione	6-bit	26-bit				
j 32	000010	00 0000	0000	0000 0000	0000	1000

Esempio precedente: j 80000 = 00000000 0001001110 0010000000

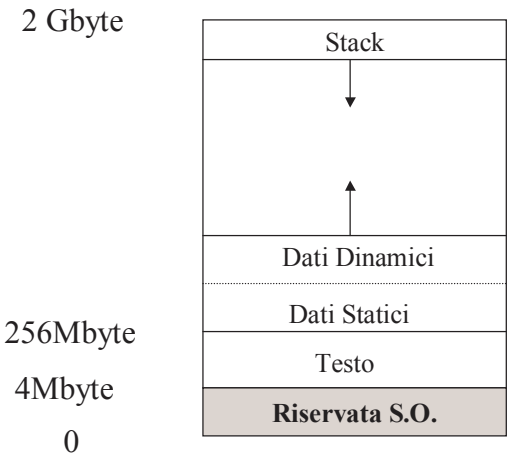
Nome campo	op	indirizzo				
Dimensione	6-bit	26-bit				
j 80000	000010	00	00000	0001	0011 1000	1000	0000

Salti incondizionati

- Per saltare ad indirizzi superiori a 2^{28} Byte si usa l'istruzione:

  `jr rs` (jump register con **formato R**)
- Salta all'indirizzo di memoria **assoluto** contenuto nel registro **rs** (spazio di 2^{32} Word cioè 2^{34} byte = 8 Gbyte > intero spazio di memoria)

Organizzazione logica della memoria



Riepilogo: Assembly vs Linguaggio macchina

Programma in linguaggio ad alto livello (C)

```
a = a + c
b = b + a
var = m [a]
```

Compilatore

Programma in linguaggio assembly (MIPS)

```
add $2, $4, $2
add $3, $3,$2
lw $15, 4($2)
```

Assemblatore

Programma in linguaggio macchina

```
011100010101010
000110101000111
000010000010000
001000100010000
```


Gestione della memoria

- La memoria è indirizzata per byte.
- Le istruzioni sono lunghe 1 parola (4 byte)

- I dati nel segmento dati sono allineati al byte.
- Le istruzioni, contenute nel segmento testo, sono reperibili ogni 4 byte.

Gestione dei salti

Assembly (riferisce al byte)

```
Loop:  add $t1,$s3,$s3
        ..........
       bne $t0,$s5,Exit
       (bne $t0,$s5,8)
       add $s3,$s3,$s4
       j Loop
       (j 80000)
Exit:
        ..........
```

Linguaggio macchina (riferisce all'implementazione dell'istruzione)

```
80000: 0 19 19 9 0 32
       ........
80016: 5 8 21  2

80020: 0 19 20 19 0 32
80024: 2 20000

80028: Exit ...
       ..........
```

Esecuzione dell'istruzione bne:

Program Counter (80020) : 00000000 00000001 00111000 100101 00 +

Offset: 2 word : 00000000 00000000 00000000 000010(00) =

Program Counter al termine dell'esecuzione della bne contiene 80028:

00000000 00000001 00111000 10011100

Riepilogo: Assembly vs Linguaggio macchina

Programma in linguaggio ad alto livello (C)

```
a = a + c
b = b + a
var = m [a]
```

Compilatore

Programma in linguaggio assembly (MIPS)

```
add $2, $4, $2
add $3, $3,$2
lw $15, 4($2)
```

Assemblatore

Programma in linguaggio macchina

```
011100010101010
000110101000111
000010000010000
001000100010000
```

Salti condizionati di dimensioni maggiori

```
      beq $s0, $s1, L1
```

```
      bne $s0, $s1, L2
      j L1
L2: ……
```


Formato istruzioni

- I diversi formati (R, I, J) vengono riconosciuti tramite il valore del primo campo, ***codice operativo*** (***opcode***), che indica alla macchina come trattare i rimanenti bit dell'istruzione.

	6-bit	5-bit	5-bit	5-bit	5-bit	6-bit
R	op	rs	rt	rd	shamt	funct
I	op	rs	rt	indirizzo		
J	op	indirizzo				