

# Architettura degli Elaboratori

Appunti: Simone Pepi  
Stesura in L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X: Federico Matteoni

# Indice

0.1	Introduzione . . . . .	2
0.2	Cosa riguarda il corso . . . . .	2
<b>1</b>	<b>Fondamenti di strutturazione</b>	<b>3</b>
1.1	Struttura a livelli . . . . .	3
1.2	Macchine Virtuali . . . . .	3
1.2.1	Le Macchine Virtuali . . . . .	4
1.2.2	Struttura Interna . . . . .	5
1.2.3	Parallelismo . . . . .	5
1.2.4	Modelli di Cooperazione . . . . .	6
1.3	Compilazione vs Interpretazione . . . . .	7
<b>2</b>	<b>MV0 – Hardware</b>	<b>8</b>
2.1	Reti Logiche . . . . .	8
2.1.1	Reti Combinatorie . . . . .	8
2.1.2	Algebra Booleana . . . . .	8
2.1.3	Tecnica della Somma di Prodotti, o codifica degli 1 . . . . .	9
2.1.4	Porte Logiche . . . . .	10
2.2	Assembler D-RISC . . . . .	10
2.3	moduli operativi/unità funzionali . . . . .	10
2.4	La Memoria . . . . .	11

## 0.1 Introduzione

Appunti del corso di **Architettura degli Elaboratori** presi a lezione da **Federico Matteoni**.

Prof.: **Maurizio Bonuccelli**, maurizio.angelo.bonuccelli@unipi.it

Riferimenti web:

- <http://pages.di.unipi.it/bonuccelli/aeb.html>
- [didawiki.cli.di.unipi.it/doku.php/informatica/ae/start](http://didawiki.cli.di.unipi.it/doku.php/informatica/ae/start)

Ricevimento: Martedì 10-12, stanza 294 DE

Esame: **scritto** (*closed book*) e **orale**. I compiti sono validi solo per la sessione invernale (gen-feb)

Libri

- M. Vanneschi *Architettura degli Elaboratori*, Pisa University Press
- D. A. Patterson *Computer Organization & Design - The Hardware/Software Interface*

## 0.2 Cosa riguarda il corso

Consiste in come sono fatti pc internamente da un punto di vista di sottosistemi senza scendere nei dettagli elettrici.

Il corso è diviso in quattro parti:

- Fondamenti e strutturazione firmware (I Compitino)
- Macchina assembler (D-RISC) e processi
- Architetture General-Purpose
- Architetture parallele (II Compitino)

# Capitolo 1

## Fondamenti di strutturazione

### 1.1 Struttura a livelli

**Dividere** Per dedicarci allo studio di un sistema complesso spesso è utile **dividerlo in pezzi**. Nel caso di un sistema di elaborazione, in alcuni casi è **interessante avere una visione vicina alla struttura fisica** in termini di componenti hardware. In altri casi è **interessante avere una visione astratta del sistema** per poterne osservare le funzionalità e le strutture più adatte alla specifica applicazione.

**Astrarre** Da questa necessità deriva la possibilità di strutturare un sistema a vari **livelli di astrazione** che non descrivono una reale struttura fisica, ma è **utile per ragioni specifiche** quali:

Saper riconoscere **quale metodo di progettazione strutturata** viene seguito o conviene seguire (**top-down, bottom-up, middle-out**)

Saper riconoscere **se i vari livelli rispettano una relazione gerarchica** oppure se non esiste alcun tipo di ordinamento

Essere in grado di **valutare a quali livelli conviene descrivere e implementare** determinate funzioni del sistema

### 1.2 Macchine Virtuali

**Sistema di elaborazione** Le funzionalità di un sistema di elaborazione nel suo complesso possono essere **ripartite su un certo numero di livelli** che vengono definite **macchine virtuali**. La suddivisione può seguire **due approcci** fondamentali:

- **Linguistico**: stabilisce i livelli in base ai linguaggi usati
- **Funzionale**: stabilisce i livelli in base a cosa fanno

I vari livelli sono schematizzati come in figura:



$MV_i$  realizza politica  $P_i$  con linguaggio  $L_i$  e risorse  $R_i$ .

$MV_i$  utilizza le funzionalità che il livello  $MV_{i-1}$  (cioè le sue primitive) fornisce **attraverso l'interfaccia**.

L'interfaccia definita è fondamentale per poter rendere possibile la collaborazione tra le macchine virtuali, e permettere così ai linguaggi di  $MV_i$  di sfruttare funzionalità e meccanismi di  $MV_{i-1}$ .

Le macchine virtuali godono delle **seguenti proprietà**:

L'**insieme** degli oggetti o risorse  $R_i$  di  $MV_i$  è **accessibile soltanto da parte dei meccanismi di  $L_i$**

Al livello  $MV_i$  **non sono note le politiche adottate dai livelli inferiori**

**Supporto a tempo di esecuzione** Anche detto **Runtime Support**, è l'insieme dei livelli sottostanti. Nell'esempio,  $MV_i$  ha come runtime support i livelli  $MV_{i-1} \dots MV_0$ .

**Virtualizzazione ed Emulazione** Con **virtualizzazione** o astrazione intendiamo il **processo secondo cui un livello  $MV_i$  usa funzionalità dei livelli superiori**.

Con **emulazione** o concretizzazione intendiamo il **processo secondo cui un livello  $MV_i$  usa funzionalità dei livelli inferiori**.

**Modularità** Tutte queste funzionalità sono **alla base della strutturazione di sistemi con elevata modularità, modificabilità, portabilità, manutibilità e testabilità**.

### 1.2.1 Le Macchine Virtuali

**$MV_4$**  Applicazioni

$L_4$ : Java, C, ML...

$R_4$ : oggetti astratti, costrutti, tipi di dato definibili dall'utente

\_\_\_\_\_ *Interfaccia*: chiamate di sistema \_\_\_\_\_

**$MV_3$**  Sistema Operativo

$L_3$ : C, linguaggi di programmazione concorrente, linguaggi sequenziali con librerie che implementano meccanismi di concorrenza

$R_3$ : variabili condivise, risorse condivise, oggetti astratti usati per la cooperazione tra processi e thread

\_\_\_\_\_ *Interfaccia*: istruzioni assembler \_\_\_\_\_

**$MV_2$**  Macchina assembler

$L_2$ : assembler (D-RISC)

$R_2$ : registri, memoria, canali di comunicazione

\_\_\_\_\_ *Interfaccia*: istruzioni firmware per l'assembler \_\_\_\_\_

**$MV_1$**  Firmware

$L_1$ : microlinguaggio

$R_1$ : sommatore, commutatore, registri, strutture di interconnessione intra-unità e inter-unità

\_\_\_\_\_ *Interfaccia*: hardware \_\_\_\_\_

**$MV_0$**  Hardware

$L_0$ : *funzionamento dei circuiti elettronici*

$R_0$ : circuiti elettronici elementari (AND, OR, NOT), collegamenti fisici, reti logiche

Il corso riguarderà principalmente i livelli  $MV_2 \rightarrow MV_0$  inclusi, comprese le istruzioni assembler.

Il livello firmware sarà fatto da **memoria**, **processore** e **dispositivi I/O**. I dispositivi di I/O comunicano bilateralmente con la memoria e il processore comunica bilateralmente con memoria. Opzionalmente, i dispositivi di I/O comunicano bilateralmente direttamente con il processore. Questa è l'**architettura standard**, presentata in maniera **estremamente semplicistica**.

Vedremo nel dettaglio il processore e la memoria, non i dispositivi di I/O perché troppo complessi.

### 1.2.2 Struttura Interna

**Da Verticale a Orizzontale** Fin'ora abbiamo parlato delle macchine virtuali in senso **verticale**, adesso vogliamo trovare un modo concettualmente uniforme – **orizzontale** – per poter studiare i livelli **al loro interno**.

**Sistema di Elaborazione** Una volta scelta la struttura verticale di un sistema, dobbiamo capire come funziona l'interno di ciascun livello per poter far funzionare tutto il sistema, cioè dobbiamo capire **come funziona il sistema di elaborazione di un livello** composto da due componenti:

**Moduli di Elaborazione**, ad ognuno dei quali è affidata l'elaborazione di un sottoinsieme di operazioni del livello.

**Struttura di Interconnessione**, con la quale i moduli di elaborazione del livello **cooperano e comunicano tra loro**.

Essa può essere di due tipi:



**Moduli di Elaborazione** Un modulo di elaborazione è definito come **un'entità autonoma e sequenziale**.

**Autonomia** L'autonomia è **data dal fatto che ogni modulo di elaborazione esegue un proprio controllo in maniera indipendente da altri moduli**.

Esso dunque **definisce le proprie strutture dati, operazioni elementari e interfacce verso altri moduli**.

**Sequenzialità** La sequenzialità è **data dal fatto che ogni modulo di elaborazione ha un singolo luogo di controllo: la sua attività è descritta da un algoritmo di controllo costituito da una lista sequenziale di comandi**.

La sequenzialità **non implica che un modulo non possa fare uso di forme di elaborazione concorrenti o parallele**. Alcuni o tutti i comandi di una lista sequenziale possono essere costituiti da una o più operazioni elementari eseguite simultaneamente.

### 1.2.3 Parallelismo

**Sovrapporre** Poichè i moduli sono autonomi fra loro, sono in grado di **operare indipendentemente l'uno dall'altro**. **Le loro attività possono quindi essere sovrapposte nel tempo** eccetto quando, per ragioni legate alla sincronizzazione, alcuni di loro devono attendere il verificarsi di certi eventi dipendenti dall'elaborazione di altri. In alcuni **casi limite** seppur realistici, il **funzionamento di tutti i moduli è rigidamente sequenziale**.

Tutto questo **vale per qualsiasi livello** o Macchina Virtuale, quindi sia per firmware che hardware.

### 1.2.4 Modelli di Cooperazione

Dato un sistema di elaborazione a un certo livello, i vari moduli presenti possono cooperare secondo due modalità:

**Ambiente Globale:** esiste un insieme di oggetti comuni accessibili da tutti i moduli che devono cooperare tra loro, e tutti i moduli possono operare su tale insieme

**Ambiente Locale:** i moduli non condividono nulla, quindi non esiste alcun oggetto condiviso tra i moduli. La cooperazione avviene tramite scambio di messaggi.



## 1.3 Compilazione vs Interpretazione

**Programmi** L'obiettivo di un calcolatore è **rendere possibile l'esecuzione di programmi** con una certa qualità di servizio. I programmi vengono **progettati mediante linguaggi di alto livello**, quindi **occorre operare una traduzione da linguaggio di alto livello a linguaggio assembler**.

Tale traduzione può essere effettuata tramite due ben note tecniche e loro combinazioni:

**Compilatore:** è statico.

**Sostituisce l'intera sequenza del programma** sorgente con una sequenza di istruzioni assembler. Questa traduzione viene effettuata staticamente, vale a dire in fase di preparazione e **prima che il programma passi in esecuzione**.

Uno compilatore ha **completa visione del codice** e quindi **può ottimizzarlo**. La sua attività è analoga all'opera di un traduttore, che può leggersi il testo più volte per tradurlo alla perfezione.

**Interprete:** è dinamico

Scandisce la sequenza **sostituendo ogni singolo comando** con una sequenza di istruzioni assembler. La traduzione è effettuata dinamicamente, cioè **a tempo di esecuzione**, quindi non può ottimizzare. Il firmware riceve un'istruzione alla volta, quindi la interpreta.

Il suo svantaggio è che il **tempo di interpretazione viene pagato ogni volta che lancio il programma** e che **non può ottimizzare non avendo una visione globale del programma**.

Entrambe servono per tradurre il **codice sorgente** nel **programma oggetto** o **eseguibile**. L'esecuzione è quindi **più veloce in un programma compilato** rispetto ad un programma interpretato.

$\text{ADD R1, R2, R3} \rightarrow \text{compilatore} \rightarrow \text{OBJ} \rightarrow \text{Interprete Firmware (interfaccia tra MV ASM e MV FW)}$

Intuitivamente, dall'istruzione ad alto livello viene **compilato un programma oggetto OBJ** il quale è un insieme di bit che **viene interpretato dall'interprete firmware**.

**Esempio** Suppongo programmi:

**A**

```
for i=0; i++; i<n
  A[i] = A[i] + B[i];
```

**B**

```
for i=0; i++; i<n
  B[i] = B[i] + C;
```

Ricevendo i due blocchi di istruzioni, il **compilatore riconosce che sono diverse e le compila in modo diverso**. Però in entrambi i casi sono del tipo *oggetto = somma due oggetti*, quindi produce una sequenza di istruzioni analoga (a meno di registri e dati, ovviamente). Parte del secondo pezzo di codice, ad esempio, verrà tradotto in questa maniera:

LOAD  $R_{base}$ ,  $R_I$ ,  $R_1$

ADD  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_1$

STORE  $R_{base}$ ,  $R_I$ ,  $R_1$

INC  $R_I$

IF<  $R_I$ ,  $R_N$ , LOOP

$M[R[base] + R[I]] \rightarrow R[1]$

$R[1] + R[2] \rightarrow R[1]$

$R[1] \rightarrow M[R[base] + R[I]]$

$R[I] + 1 \rightarrow R[I]$

**Microlinguaggio corrispondente**



# Capitolo 2

## MV0 – Hardware

### 2.1 Reti Logiche

L'implementazione a livello hardware di funzioni "pure" dà luogo alle **Reti Combinatorie**.  
L'implementazione a livello hardware di funzioni "con stato" dà luogo alle **Reti Sequenziali**.

**Famiglia** Entrambe definiscono la famiglia delle **Reti Logiche** che permettono di realizzare il livello hardware di un sistema di elaborazione.

#### 2.1.1 Reti Combinatorie

Una **rete combinatoria** è una rete logica con  $n$  ingressi binari  $X_1 \dots X_n$  e  $m$  uscite binarie  $Z_1 \dots Z_m$ . Ad ogni combinazione di valori in entrata corrisponde una ed una sola combinazione di valori in uscita. La corrispondenza è definita secondo la funzione implementata dalla rete combinatoria.

Indichiamo  $X_1 \dots X_n$  e  $Z_1 \dots Z_m$  come **variabili logiche** di ingresso ed uscita. **Tutte le combinazioni possibili** delle variabili logiche **sono dette stati** di ingresso – con  $2^n$  possibilità – e di uscita –  $2^m$  possibilità.

Per descrivere le proprietà e la struttura interna delle reti combinatorie si usa un'algebra isomorfa a quella logica, chiama **Algebra Booleana**.

#### 2.1.2 Algebra Booleana

L'algebra booleana è computata su **due valori** e **tre operatori**:

false	AND
true	OR
	NOT

Esistono anche altri operatori, derivati dai tre precedenti: XOR, NAND, NOR ecc..

**Proprietà** Vale la proprietà distributiva anche per la somma rispetto alla moltiplicazione, oltre il viceversa, quindi:  
 $A(B+C) = AB + AC$ , ma anche  $A + BC = (A + B)(A + C)$ .

Inoltre si hanno le cosiddette **proprietà di DeMorgan**:

- $\overline{A+B} = \overline{A} * \overline{B}$
- $\overline{AB} = \overline{A} + \overline{B}$

#### AND

Anche detta **moltiplicazione logica**.

X	Y	Z
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

#### OR

Anche detta **somma logica**.

X	Y	Z
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

#### NOT

Anche detta **negazione logica**.

Y	Z
0	1
1	0

Per costruire una **rete combinatoria** esistono varie tecniche. Quella che useremo si chiama **somma di prodotti**.

### 2.1.3 Tecnica della Somma di Prodotti, o codifica degli 1

**La tecnica nel dettaglio** Partendo dalla **tabella di verità**, identifico le uscite che valgono 1. Di quelle uscite, **moltiplico (AND)** tra loro le entrate **sulla stessa riga, nego le entrate che valgono 0 e sommo (OR)** tra loro le diverse righe.

**Un esempio con la somma algebrica** Partendo dalla seguente tabella di verità.

X	Y	Z	R
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

Sfruttando la tecnica descritta sopra ottengo le seguenti espressioni per le due uscite:

$$Z = \overline{X} * Y + X * \overline{Y}$$

$$R = X * Y$$

Alternativamente, posso anche realizzare la **funzione complementare**, ovvero fare il solito procedimento ma per le uscite che valgono 0 per poi negarle.

X	Y	$\overline{Z}$	R
0	0	1	0
0	1	0	0
1	0	0	0
1	1	1	1

$$Z = \overline{\overline{X} * \overline{Y} + X * Y}$$

$$R = X * Y$$

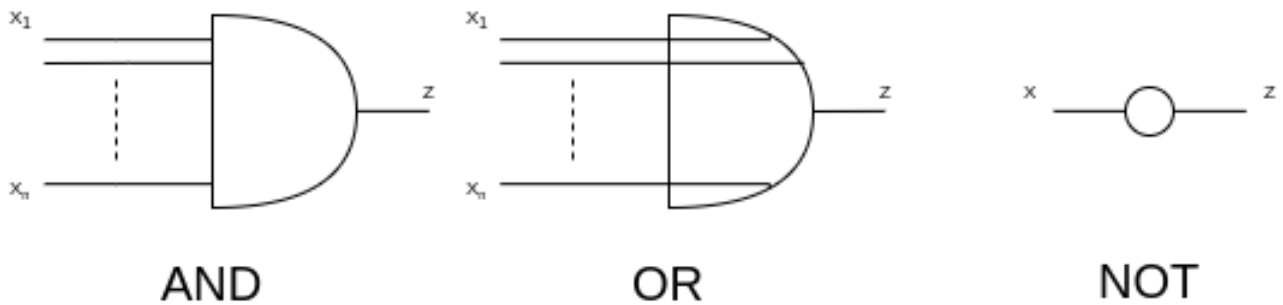
#### Esempio

S1	S2	X	Y	S1*
0	0	0	0	0
0	0	0	1	0
0	0	1	0	0
0	0	1	1	1
0	1	0	0	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	0
0	1	1	1	1
1	0	0	0	0
1	0	0	1	1
1	0	1	0	1
1	0	1	1	1
1	1	0	0	0
1	1	0	1	1
1	1	1	0	1
1	1	1	1	1

$$S1^* = \overline{S1} * \overline{S2} * X * Y + \overline{S1} * S2 * X * Y + S1 * \overline{S2} * \overline{X} * \overline{Y} + S1 * \overline{S2} * X * \overline{Y} + S1 * \overline{S2} * X * Y + S1 * S2 * \overline{X} * Y + S1 * S2 * X * \overline{Y} + S1 * S2 * X * Y$$

### 2.1.4 Porte Logiche

Una volta ricavata l'espressione logica dalla tabella di verità, è **immediato realizzare lo schema logico utilizzando le componenti hardware elementari**, dette anche **porte logiche**:



Ogni porta logica AND e OR **comporta un ritardo nel calcolo di 1tp**. Inoltre, ogni AND e OR può avere **massimo 8 ingressi**, quindi se ho più di 8 segnali in ingresso devo avere *almeno* due livelli: un livello con tante porte logiche quando  $n/8$  con  $n$  numero di segnali in ingresso, e *almeno* un livello in cui "unire" i segnali in uscita in una porta logica analoga.

## 2.2 Assembler D-RISC

Istruzioni lunghe 32bit, primi 8bit per identificativo istruzione. Poi tre blocchi di 6Bit ( $R_i$ ,  $R_j$ ,  $R_h$ , in ogni blocco vi è semplicemente l'indice  $i$ ,  $j$  o  $h$ ). Poi 6 bit tipicamente inutilizzati (per estensioni future, istruzioni particolare e per riempire le locaz. di mem che sono tutte a 32 bit).

$2^6 = 64$  registri generali nel processore

Ad esempio  $\text{ADD } R_i, R_j, R_h$  significa  $M[R[i]] + R[j] \rightarrow R[h]$ , e ADD è memorizzato con un determinato codice identificativo.

Per l'inizializzazione, ho il registro  $R_0$  che contiene sempre 0.

**Esempio di RTS**  $MV3 \ C = A + B$

Su  $MV_2$  diventa  $\text{ADD } R_A, R_B, R_C$

Su  $MV_1$  ho registro A, registro B verso addizionatore/sottrattore (con alfa che indica operazione) e porta in C (con beta che indica scrittura attiva o meno)

Su  $MV_0$  i vari componenti sono costruiti da una serie di gate (AND, OR, NOT).

PO Parte Operativa

PC Parte Controllo

roba eventuale

## 2.3 moduli operativi/unità funzionali

Parte operativa: produce l'output

Parte controllo: dice alla PO *come controllare* i suoi componenti (es. produce gli alfa (dicono cosa fare ai componenti) e i beta (quali registri in scrittura e quali no)). La PO porta alla PC le **variabili di condizionamento**, che istruiscono la PC su *come* produrre alfa e beta.

PO e PC sono reti sequenziali.

In generale le mealY sono migliori: mediamente costano non di più e sono non più lente.

in mealY  $x$  va anche in omega.

1. PO -var condiz-  $i$  PC

2. PC -alfa, beta-  $i$  PO

3. PO -output  $Z$ -  $i$  fuori

PO la faccio M-

PC la faccio M-

PO moore (ma non sarà automa), PC mealY

Funzionalmente MealY e Moore sono **equivalenti**. Moore risponde dopo un clock, mealY risponde subito.

var condiz: info che PO passa alla PC affinché P generi alfa e beta.

microlinguaggio uao

## **2.4 La Memoria**