

**Corso di Calcolatori Elettronici I**

---

**Rappresentazione  
dei numeri reali  
in un calcolatore**

**ing. Alessandro Cilaro**

Corso di Laurea in Ingegneria Biomedica

---

# Rappresentazione di numeri reali

---

- Con un numero finito di cifre è solo possibile rappresentare un numero razionale *che approssima con un certo errore* il numero reale dato
- Vengono usate due notazioni:

## A) Notazione in virgola fissa

Dedica parte delle cifre alla parte intera e le altre alla parte frazionaria

$\pm \text{XXX}.\text{YY}$

## B) Notazione in virgola mobile

Dedica alcune cifre a rappresentare un esponente della base che indica l'ordine di grandezza del numero rappresentato

---

# Numeri reali: rappresentazione in virgola fissa

---

- Quando di un numero frazionario si rappresentano separatamente la parte intera e la parte frazionaria si parla di rappresentazione in *virgola fissa*
  - La rappresentazione dei due contributi può essere realizzata secondo una delle tecniche viste in precedenza
  - La parte frazionaria è rappresentata con un numero finito  $m$  di cifre binarie, scalata di un fattore  $2^m$  che la rende intera
  - La posizione della virgola è fissa e resta sottintesa
-

# Numeri reali in virgola fissa

---

- La stringa

$$,b_{-1}b_{-2}\dots b_{-m}$$

si interpreta come

$$b_{-1}2^{-1} + b_{-2}2^{-2} + \dots + b_{-m}2^{-m}$$

- Esempio:

$$.1011$$

si interpreta come

$$2^{-1} + 2^{-3} + 2^{-4} = 1/2 + 1/8 + 1/16 = 0,5 + 0,125 + 0,0625 = 0,6875$$

ovvero come

$$11 / 16 = 0,6875$$

- La stringa 1011 è rappresentativa dell'intero  $(11)_{10}$  che va scalato del fattore  $2^{-4}$
-

# Numeri reali: rappresentazione in virgola mobile

---

- Un numero reale  $x$  può essere rappresentato dalla tripla

$$(s, m, e)$$

tale che:

$$x = (-1)^s \cdot m \cdot b^e$$

- $s$  è il segno ( $s=0$  positivo,  $s=1$  negativo)
  - $m$  è detta *mantissa*
  - $e$  è detto *esponente*
  - $b$  è la base di numerazione adottata
- In macchina sia  $m$  che  $e$  hanno un numero prefissato di cifre
    - intervalli limitati ed errori di arrotondamento
-

# Normalizzazione

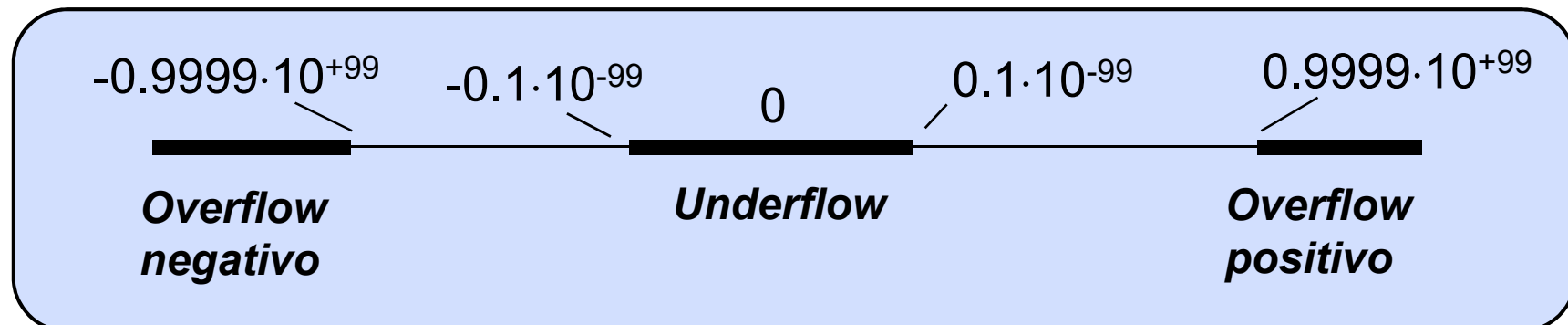
---

- Per ciascun numero esistono infinite coppie mantissa-esponente che lo rappresentano
  - Esempio (b=10):
    - 346.09801 è rappresentato da
      - » m= 346.09801, e=0 oppure
      - » m= 346098.01, e= - 3 oppure
      - » m= 0.034609801, e= 4 ecc...
  - Per **rappresentazione normalizzata** del numero si intende convenzionalmente quella in cui la mantissa ha la prima cifra a destra della virgola diversa da zero
  - ovvero:  $1/b \leq m < 1$
  - Esempio:  
( 0.34609801, 3 )
-

## Esempio: intervallo di rappresentazione

- Con  $b=10$ , usando 4 cifre per  $m$  e 2 per  $e$  (più due bit per i relativi segni), l'insieme rappresentabile (utilizzando solo rappresentazioni normalizzate) è:

$$[-0.9999 \times 10^{99}, -0.1000 \times 10^{-99}] \cup \{0\} \cup [+0.1000 \times 10^{-99}, +0.9999 \times 10^{99}]$$



Con le stesse **6=4+2** cifre in virgola fissa  $\pm$  **XXXX.YY** :

- L'intervallo scende  **$[-9999.99, +9999.99]$**
- Ma si hanno **6** cifre significative invece di **4**

# Approssimazione

---

- Come è facile verificare, in questo tipo di rappresentazione l'approssimazione non è costante
  - In particolare la precisione assoluta è molto spinta in prossimità dello zero e va diminuendo progressivamente a mano a mano che il numero aumenta (in valore assoluto)
  - Ad esempio:
    - in prossimità dello zero l'errore massimo che può essere commesso è  $0.1001 \cdot 10^{-99} - 0.1000 \cdot 10^{-99} = \mathbf{0.0001 \cdot 10^{-99}}$
    - in prossimità dell'estremo superiore dell'intervallo di rappresentazione, invece, l'errore massimo che si può commettere è  $0.9999 \cdot 10^{99} - 0.9998 \cdot 10^{99} = \mathbf{0.0001 \cdot 10^{99}}$
  - Si commettono quindi “errori piccoli” su “numeri piccoli” ed “errori grandi” su “numeri grandi”
  - Quello che resta inalterato è invece l'errore relativo, costante su tutto l'asse di rappresentabilità
-

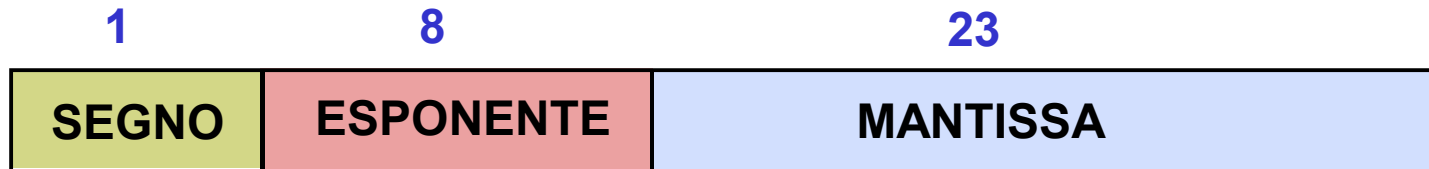
# Overflow e Underflow

---

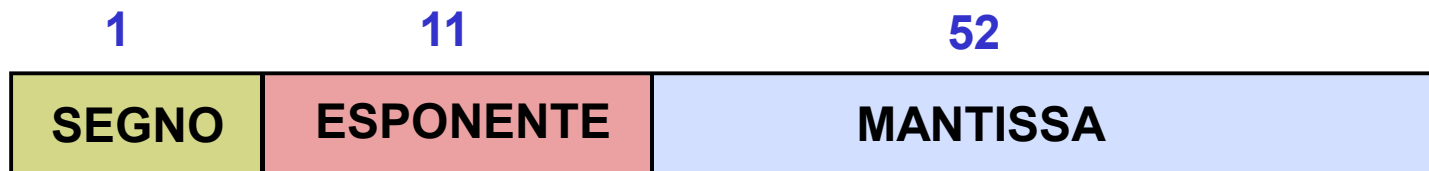
- L'errore relativo dipende dal numero di cifre della mantissa
  - Gli estremi dell'intervallo di rappresentazione dipendono dal numero di cifre dell'esponente
  - Nel caso precedente di 2 cifre per l'esponente, si ha overflow per numeri maggiori (in modulo) di  $10^{99}$  e si ha underflow per numeri minori (in modulo) di  $10^{-99}$
-

# Standard IEEE 754 (1985)

- 
- Formato standard indipendente dall'architettura
  - Precisione semplice a 32 bit:

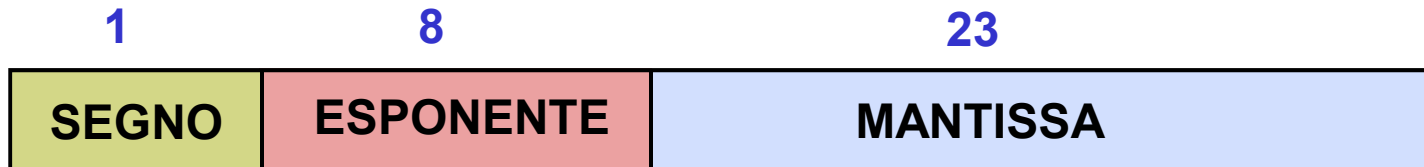


- Precisione doppia a 64 bit



- Notazioni in modulo e segno
  - Alcune configurazioni dell'esponente sono riservate
-

# IEEE 754 a 32 bit



- $x = (-1)^S \times 1.F \times 2^{\text{Exp-bias}}$

- **ESPONENTE**

- Rappresentato in eccesso 127
- L'intervallo è **[-126, +127]**
- Il valore **-127** è riservato per rappresentazioni speciali

- **MANTISSA**

- Se ne rappresenta solo la parte frazionaria

$$\begin{cases} N = (-1)^S \times 1.\textit{fraction} \times 2^{\textit{exponent}-127}, & 1 \leq \textit{exponent} \leq 254 \\ N = (-1)^S \times 0.\textit{fraction} \times 2^{\textit{exponent}-126}, & \textit{exponent} = 0 \end{cases}$$

---

# IEEE 754: forma normalizzata

---

- Nell'IEEE 754 si intende normalizzata la mantissa che ha un 1 a sinistra della virgola binaria. L'esponente deve essere impostato di conseguenza
  - Essendo sempre presente tale cifra non è informativa, così come la virgola binaria; viene pertanto considerata implicitamente presente e non viene memorizzata
  - Per evitare confusione con una frazione tradizionale la combinazione dell'1 implicito della virgola binaria e delle 23/52 cifre significative vengono chiamate **significando** (invece che frazione o mantissa)
    - Tutti i numeri normalizzati hanno un esponente  $e > 0$
    - Tutti i numeri normalizzati hanno un significando  $s$  tra  $1 \leq s < 2$
    - I numeri normalizzati non possono avere un esponente composto da soli 1. Tale configurazione serve per modellare il valore infinito ( $\infty$ ) ed altri casi speciali
-

# IEEE 754: forma denormalizzata

---

- La mantissa binaria denormalizzata può assumere qualsiasi configurazione. Questa rappresentazione viene utilizzata per rappresentare valori inferiori a  $2^{-126}$ 
    - Tutti i bit dell'esponente sono posti a 0 (questa configurazione indica l'utilizzo della forma denormalizzata)
    - Il bit della mantissa a sinistra della virgola binaria è posto implicitamente a 0
    - Il numero più piccolo rappresentabile in questa configurazione è composto da una mantissa con tutti 0 a eccezione del bit più a destra
    - La rappresentazione denormalizzata comporta una progressiva perdita di cifre significative
-

# Rappresentazioni speciali

---

Esponente  $255 = 11111111_2$  indica un valore speciale

Esponente  $255 = 11111111_2$  ed  $f = 0$ ,  
Il valore rappresentato è  $\pm$  infinity

Esponente  $255 = 11111111_2$  ed  $f$  diverso da zero  
Il valore rappresentato è Not a Number (NaN)

---