

# Algoritmi

UniVR - Dipartimento di Informatica

**Fabio Irimie**

1° Semestre 2024/2025

# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>3</b>
1.1	Confronto tra algoritmi . . . . .	3
1.2	Rappresentazione dei dati . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Calcolo della complessità</b>	<b>3</b>
2.1	Linguaggi di programmazione . . . . .	3
2.1.1	Blocchi iterativi . . . . .	4
2.1.2	Blocchi condizionali . . . . .	4
2.1.3	Blocchi iterativi . . . . .	4
2.2	Esempio . . . . .	5
2.3	Ordine di grandezza . . . . .	5
2.3.1	Esempi di dimostrazioni . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Studio degli algoritmi</b>	<b>10</b>
3.1	Insertion sort . . . . .	11
3.2	Fattoriale . . . . .	12
3.3	Teorema dell'esperto . . . . .	15
3.4	Merge sort . . . . .	17
3.5	Heap . . . . .	18
3.5.1	Proprietà . . . . .	19
3.5.2	Heap sort . . . . .	19
3.6	Quick sort . . . . .	20
3.7	Algoritmi di ordinamento non per confronti . . . . .	21
3.7.1	Counting sort . . . . .	22
3.7.2	Radix sort . . . . .	22
3.7.3	Bucket sort . . . . .	22
<b>4</b>	<b>Algoritmi di selezione</b>	<b>24</b>
4.1	Ricerca del minimo o del massimo . . . . .	24
4.1.1	Ricerca del minimo e del massimo contemporaneamente . . . . .	25
4.2	Randomized select . . . . .	27
<b>5</b>	<b>Strutture dati</b>	<b>29</b>
5.1	Stack . . . . .	29
5.2	Queue . . . . .	30
5.3	Lista doppiamente puntata . . . . .	30
5.4	Albero binario . . . . .	30
5.4.1	Albero binario di ricerca . . . . .	31
5.4.2	RB-Tree (Red-Black Tree) . . . . .	32
5.5	Campi aggiuntivi . . . . .	45
5.6	Albero Binomiale . . . . .	46
5.7	Heap Binomiale . . . . .	48
5.7.1	Creazione di un heap binomiale . . . . .	49
5.7.2	Unione di due heap binomiali . . . . .	49
5.7.3	Inserimento . . . . .	50
5.7.4	Rimozione . . . . .	51
5.7.5	Riduzione . . . . .	51
5.7.6	Divisione . . . . .	52

<b>6</b>	<b>Tecniche di programmazione</b>	<b>52</b>
6.1	Programmazione dinamica . . . . .	52

# 1 Introduzione

Un'algoritmo è una sequenza **finita** di **istruzioni** volta a risolvere un problema. Per implementarlo nel pratico si scrive un **programma**, cioè l'applicazione di un linguaggio di programmazione, oppure si può descrivere in modo informale attraverso del **pseudocodice** che non lo implementa in modo preciso, ma spiega i passi per farlo.

Ogni algoritmo può essere implementato in modi diversi, sta al programmatore capire qual'è l'opzione migliore e scegliere in base alle proprie necessità.

## 1.1 Confronto tra algoritmi

Ogni algoritmo si può confrontare con gli altri in base a tanti fattori, come:

- **Complessità**: quanto ci vuole ad eseguire l'algoritmo
- **Memoria**: quanto spazio in memoria occupa l'algoritmo

## 1.2 Rappresentazione dei dati

Per implementare un algoritmo bisogna riuscire a strutturare i dati in maniera tale da riuscire a manipolarli in modo efficiente.

# 2 Calcolo della complessità

La complessità di un algoritmo mette in relazione il numero di istruzioni da eseguire con la dimensione del problema, e quindi è una funzione che dipende dalla dimensione del problema.

La **dimensione del problema** è un insieme di oggetti adeguato a dare un'idea chiara di quanto è grande il problema da risolvere, ma sta a noi decidere come misurare il problema.

Ad esempio una matrice è più comoda da misurare come il numero di righe e il numero di colonne, al posto di misurarla come il numero di elementi totali.

La complessità di solito si calcola come il **caso peggiore**, cioè il limite superiore di esecuzione dell'algoritmo.

## 2.1 Linguaggi di programmazione

Ogni linguaggio di programmazione è formato da diversi blocchi:

1. **Blocco iterativo**: un tipico blocco di codice eseguito sequenzialmente e tipicamente finisce con un punto e virgola.
2. **Blocco condizionale**: un blocco di codice che viene eseguito solo se una condizione è vera.
3. **Blocco iterativo**: un blocco di codice che viene eseguito ripetutamente finché una condizione è vera.

Questi sono i blocchi base della programmazione e se riusciamo a calcolare la complessità di ognuno di questi blocchi possiamo calcolare più facilmente la complessità di un intero algoritmo.

### 2.1.1 Blocchi iterativi

$$\begin{array}{l} I_1 \quad c_1(n) \\ I_2 \quad c_2(n) \\ \vdots \quad \vdots \\ I_l \quad c_l(n) \end{array}$$

Se ogni blocco ha complessità  $c_i(n)$ , allora la complessità totale è data da:

$$\sum_{i=1}^l c_i(n)$$

### 2.1.2 Blocchi condizionali

$$\begin{array}{l} \text{IF cond} \quad c_{\text{cond}}(n) \\ \quad I_1 \quad c_1(n) \\ \text{ELSE} \\ \quad I_2 \quad c_2(n) \end{array}$$

La complessità totale è data da:

$$c(n) = c_{\text{cond}}(n) + \max(c_1(n), c_2(n))$$

A volte la condizione è un test sulla dimensione del problema e in quel caso si può scrivere una complessità più precisa.

### 2.1.3 Blocchi iterativi

$$\begin{array}{l} \text{WHILE cond} \quad c_{\text{cond}}(n) \\ \quad I \quad c_0(n) \end{array}$$

Si cerca di trovare un limite superiore  $m$  al limite di iterazioni.

Di conseguenza la complessità totale è data da:

$$c_{\text{cond}}(n) + m(c_{\text{cond}}(n) + c_0(n))$$

## 2.2 Esempio

**Esempio 2.1.** Calcoliamo la complessità della moltiplicazione tra 2 matrici:

$$A_{n \times m} \cdot B_{m \times l} = C_{n \times l}$$

L'algoritmo è il seguente:

```
1
2  for i <- 1 to n // n ( 5 ml + 4l + 2) + n + 1
3  for j <- 1 to l // l (5m + 2 + 1) + 1 + 1
4    c[i][j] <- 0
5    for k <- 1 to m // (m + 1 + m(4))
6      // 3 (moltiplicazione, somma e assegnamento)
7      // 1 (incremento for)
8      c[i][j] += a[i][k] * b[k][j]
9
```

Partiamo calcolando la complessità del ciclo for più interno. Non ha senso tenere in considerazione tutti i dati, ma solo quelli rilevanti. In questo caso avremo:

$$(m + 1 + m(4)) = 5m + 1$$

Questa complessità contiene informazioni poco rilevanti perchè possono far riferimento alla velocità della cpu e un millisecondo in più o in meno non cambia nulla se teniamo in considerazione solo l'incognita abbiamo:

$$m$$

Questo semplifica molto i calcoli, rendendo meno probabili gli errori. Siccome la complessità si calcola su numeri molto grandi, le costanti piccole prima o poi verranno tolte perchè poco influenti.

La complessità totale alla fine sarebbe stata:

$$5nml + 4ml + 2n + n + 1$$

Ma ciò che ci interessa veramente è:

$$5nml + 4ml + 2n + n + 1$$

Se non consideriamo le costanti inutili, la complessità finale è:

$$nml$$

Nella maggior parte dei casi ci si concentra soltanto sull'ordine di grandezza della complessità, e non sulle costanti.

## 2.3 Ordine di grandezza

L'ordine di grandezza è una funzione che approssima la complessità di un algoritmo:

$$f \in O(g)$$

$$\exists c > 0 \exists \bar{n} \forall n \geq \bar{n} f(n) \leq cg(n)$$

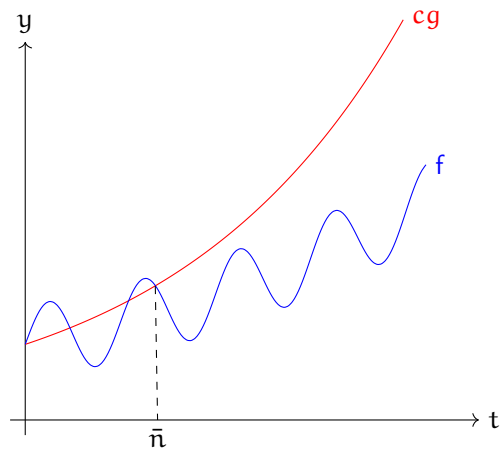


Figura 1: Esempio di funzione  $f \in O(g)$

$$f \in \Omega(g)$$

$$\exists c > 0 \exists \bar{n} \forall n \geq \bar{n} f(n) \geq cg(n)$$

$$f \in \Theta(g)$$

$$f \in O(g) \wedge f \in \Omega(g)$$

Per gli algoritmi:

**Definizione 2.1.**

$$A \in O(f)$$

So che l'algoritmo  $A$  termina entro il tempo definito dalla funzione  $f$ . Di conseguenza se un algoritmo termina entro un tempo  $f$  allora sicuramente termina entro un tempo  $g$  più grande. Ad esempio:

$$A \in O(n) \Rightarrow A \in O(n^2)$$

Questa affermazione è **corretta**, ma **non accurata**.

$$A \in \Omega(f)$$

Significa che esiste uno schema di input tale che se  $g(n)$  è il numero di passi necessari per risolvere l'istanza  $n$  allora:

$$g \in \Omega(f)$$

Quindi l'algoritmo non termina in un tempo minore di  $f$ .

Calcolando la complessità si troverà lo schema di input tale che:

$$g \in O(f)$$

cioè il limite superiore di esecuzione dell'algoritmo.

Successivamente ci si chiede se esistono algoritmi migliori e si troverà lo schema di input tale che:

$$g \in \Omega(f)$$

cioè il limite inferiore di esecuzione dell'algoritmo.

Se i due limiti coincidono allora:

$$g \in \Theta(f)$$

abbiamo trovato il tempo di esecuzione dell'algoritmo.

**Teorema 2.1** (Teorema di Skolem). Se c'è una formula che vale coi quantificatori esistenziali, allora nel linguaggio si possono aggiungere delle costanti al posto delle costanti quantificate e assumere che la formula sia valida con quelle costanti.



### 2.3.1 Esempi di dimostrazioni

**Esempio 2.2.** È vero che  $n \in O(2n)$ ?  
Se prendiamo  $c = 1$  e  $\bar{n} = 1$  allora:

$$n \leq c2n$$

Quindi è vero

**Esempio 2.3.** È vero che  $2n \in O(n)$ ?  
Se prendiamo  $c = 2$  e  $\bar{n} = 1$  allora:

$$2n \leq 2n$$

Quindi è vero

**Esempio 2.4.** È vero che  $f \in O(g) \iff g \in \Omega(f)$ ?

Dimostro l'implicazione da entrambe le parti:

- $\rightarrow$ : Usando il teorema di Skolem:

$$\forall n \geq \bar{n} \quad f(n) \leq cg(n)$$

Trasformo la disequazione:

$$\forall n \geq \bar{n} \quad \frac{f(n)}{c} \leq g(n)$$

$$\forall n \geq \bar{n} \quad g(n) \geq \frac{f(n)}{c}$$

$$\forall n \geq \bar{n} \quad g(n) \geq \frac{1}{c}f(n) \quad \square$$

Se la definizione di  $\Omega(g)$  è:

$$\exists c' > 0 \exists \bar{n}' \quad \forall n \geq \bar{n}' \quad f(n) \geq c'g(n)$$

sappiamo che:

$$c' = \frac{1}{c}$$

- $\leftarrow$ : Usando il teorema di Skolem:

$$\forall n \geq \bar{n}' \quad g(n) \geq c'f(n)$$

Trasformo la disequazione:

$$\forall n \geq \bar{n}' \quad \frac{g(n)}{c'} \geq f(n)$$

$$\forall n \geq \bar{n}' \quad f(n) \leq \frac{1}{c'}g(n) \quad \square$$

**Esempio 2.5.**

$$f_1 \in O(g) \quad f_2 \in O(g) \Rightarrow f_1 + f_2 \in O(g)$$

Dimostrazione:

Ipotesi

$$\bar{n}_1 c_1 \quad \forall n > n_1 \quad f_1(n) \leq c_1 g(n)$$

$$\bar{n}_2 c_2 \quad \forall n > n_2 \quad f_2(n) \leq c_2 g(n)$$

$$f_1(n) + f_2(n) \leq (c_1 + c_2)g(n) \quad \square$$

Quindi:

$$c = (c_1 + c_2)$$

$$\bar{n} = \max(\bar{n}_1, \bar{n}_2)$$

**Esempio 2.6.** Se

$$f_1 \in O(g_1) \quad f_2 \in O(g_2)$$

è vero che:

$$f_1 \cdot f_2 \in O(g_1 \cdot g_2)$$

Dimostrazione:

Ipotesi

$$\bar{n}_1 c_1 \quad \forall n > \bar{n}_1 \quad f_1(n) \leq c_1 g_1(n)$$

$$\bar{n}_2 c_2 \quad \forall n > \bar{n}_2 \quad f_2(n) \leq c_2 g_2(n)$$

$$f_1(n) \cdot f_2(n) \leq (c_1 \cdot c_2)(g_1(n) \cdot g_2(n)) \quad \square$$

Quindi:

$$c = c_1 \cdot c_2$$

$$\bar{n} = \max(\bar{n}_1, \bar{n}_2)$$

### 3 Studio degli algoritmi

Il problema dell'ordinamento si definisce stabilendo la relazione che deve esistere tra **input** e **output** del sistema.

- **Input:** Sequenza  $(a_1, \dots, a_n)$  di oggetti su cui è definita una relazione di ordinamento, cioè l'unico modo per capire la differenza tra due oggetti è confrontarli.
- **Output:** Permutazione  $(a'_1, \dots, a'_n)$  di  $(a_1, \dots, a_n)$  tale che:

$$\forall i < j \quad a'_i \leq a'_j$$

L'obiettivo è trovare un algoritmo che segua la relazione di ordinamento definita e risolva il problema nel minor tempo possibile.

### 3.1 Insertion sort

Divide la sequenza in due parti:

- **Parte ordinata:** Sequenza di elementi ordinati
- **Parte non ordinata:** Sequenza di elementi non ordinati

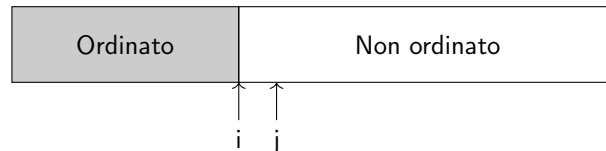


Figura 2: Parte ordinata e non ordinata

Pseudocodice:

```
1 insertion_sort(A)
2   for j <- 2 to length[A] // A sinistra di j e tutto ordinato-
3     key <- A[j]           //
4     i <- j - 1           //
5     while i > 0 and A[i] > key // --
6       A[i + 1] <- A[i]    // | 0(n)
7       i--               // |
8     A[i + 1] <- key      // --
```

La complessità di questo algoritmo è:

$$O(n^2)$$

Per capirlo è sufficiente guardare il numero di cicli nidificati e quante volte eseguono il codice all'interno.

Se l'array è già ordinato la complessità è:

$$\Omega(n)$$

Con l'input peggiore possibile la complessità è:

$$\Omega(n^2)$$

di conseguenza, visto che vale  $O(n^2)$  e  $\Omega(n^2)$  vale:

$$\Theta(n^2)$$

Quanto spazio in memoria utilizza questo algoritmo?

- Variabile j
- Variabile i
- Variabile key

A prescindere da quanto è grande l'array utilizzato, di conseguenza la memoria utilizzata è costante.

- **Ordinamento in loco:** se la quantità di memoria extra che deve usare non dipende dalla dimensione del problema allora si dice che l'algoritmo è in loco.
- **Ordinamento non in loco:** se la quantità di memoria extra che deve usare dipende dalla dimensione del problema allora si dice che l'algoritmo è non in loco.
- **Stabilità:** La posizione relativa di elementi uguali non viene modificata

L'insertion sort ordina in loco ed è stabile.

## 3.2 Fattoriale

```

1 Fatt(n)
2   if n = 0
3     ret 1
4   else
5     ret n * Fatt(n - 1)

```

L'argomento della funzione ci fa capire la complessità dell'algoritmo:

$$T(n) = \begin{cases} 1 & \text{se } n = 0 \\ T(n-1) + 1 & \text{se } n > 0 \end{cases}$$

Con problemi ricorsivi si avrà una complessità con funzioni definite ricorsivamente. Questo si risolve induttivamente:

$$\begin{aligned}
T(n) &= 1 + T(n-1) \\
&= 1 + 1 + T(n-2) \\
&= 1 + 1 + 1 + T(n-3) \\
&= \underbrace{1 + 1 + \dots + 1}_i + T(n-i)
\end{aligned}$$

La condizione di uscita è:  $n - i = 0 \quad n = i$

$$\begin{aligned}
&= \underbrace{1 + 1 + \dots + 1}_n + T(n-n) \\
&= n + 1 = \Theta(n)
\end{aligned}$$

Questo si chiama passaggio iterativo.

### Esempio 3.1.

$$T(n) = 2T\left(\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor\right) + n$$

Questa funzione si può riscrivere come:

$$T(n) = \begin{cases} \text{Costante} & \text{se } n < a \\ 2T\left(\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor\right) + n & \text{se } n \geq a \end{cases}$$

Se la complessità fosse già data bisognerebbe soltanto verificare se è corretta.

Usando il metodo di sostituzione:

$$T(n) = cn \log n$$

sostituiamo nella funzione di partenza:

$$\begin{aligned} T(n) &= 2T\left(\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor\right) + n \\ &\leq 2c\left(\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor\right) \log \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor + n \\ &\leq 2c \frac{n}{2} \log \frac{n}{2} + n \\ &= cn \log n - cn \log 2 + n \\ &\stackrel{?}{\leq} cn \log n \quad \text{se } n - cn \log 2 \leq 0 \\ c &\geq \frac{n}{n \log 2} = \frac{1}{\log 2} \end{aligned}$$

Il metodo di sostituzione dice che quando si arriva ad avere una disequazione corrispondente all'ipotesi, allora la soluzione è corretta se soddisfa una certa ipotesi.

### Esempio 3.2.

$$T(n) = T\left(\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor\right) + T\left(\left\lceil \frac{n}{2} \right\rceil\right) + 1 \in O(n)$$

$$T(n) \leq cn$$

$$\begin{aligned} T(n) &= T\left(\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor\right) + T\left(\left\lceil \frac{n}{2} \right\rceil\right) + 1 \\ &\leq c\left(\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor\right) + c\left(\left\lceil \frac{n}{2} \right\rceil\right) + 1 \\ &= c\left(\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor + \left\lceil \frac{n}{2} \right\rceil\right) + 1 \\ &= cn + 1 \stackrel{?}{\leq} cn \end{aligned}$$

Il metodo utilizzato non funziona perchè rimane l'1 e non si può togliere in alcun modo. Per risolvere questo problema bisogna risolverne uno più forte:

$$T(n) \leq cn - b$$

$$\begin{aligned}
T(n) &= T\left(\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor\right) + T\left(\left\lceil \frac{n}{2} \right\rceil\right) + 1 \\
&\leq c\left(\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor\right) - b + c\left(\left\lceil \frac{n}{2} \right\rceil\right) - b + 1 \\
&= c\left(\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor + \left\lceil \frac{n}{2} \right\rceil\right) - 2b + 1 \\
&= cn - 2b + 1 \stackrel{?}{\leq} cn - b \\
&= \underbrace{cn - b}_{\leq 0} + \underbrace{1 - b}_{\leq 0} \leq cn - b \quad \text{se } b \geq 1
\end{aligned}$$

Se la proprietà vale per questo problema allora vale anche per il problema iniziale perchè è meno forte.

### Esempio 3.3.

$$\begin{aligned}
T(n) &= 3T\left(\left\lfloor \frac{n}{4} \right\rfloor\right) + n \\
&= n + 3T\left(\left\lfloor \frac{n}{4} \right\rfloor\right) \\
&= n + 3\left(\left\lfloor \frac{n}{4} \right\rfloor + 3T\left(\left\lfloor \frac{\left\lfloor \frac{n}{4} \right\rfloor}{4} \right\rfloor\right)\right) \\
&= n + 3\left\lfloor \frac{n}{4} \right\rfloor + 3^2T\left(\left\lfloor \frac{n}{4^2} \right\rfloor\right) \\
&\leq n + 3\left\lfloor \frac{n}{4} \right\rfloor + 3^2\left(\left\lfloor \frac{n}{4^2} \right\rfloor + 3T\left(\left\lfloor \frac{\left\lfloor \frac{n}{4^2} \right\rfloor}{4} \right\rfloor\right)\right) \\
&= n + 3\left\lfloor \frac{n}{4} \right\rfloor + 3^2\left\lfloor \frac{n}{4^2} \right\rfloor + 3^3T\left(\left\lfloor \frac{n}{4^3} \right\rfloor\right) \\
&= n + 3\left\lfloor \frac{n}{4} \right\rfloor + \dots + 3^{i-1}\left\lfloor \frac{n}{4^{i-1}} \right\rfloor + 3^iT\left(\left\lfloor \frac{n}{4^i} \right\rfloor\right)
\end{aligned}$$

Per trovare il caso base poniamo l'argomento di T molto piccolo:

$$\begin{aligned}
\frac{n}{4^i} &< 1 \\
4^i &> n \\
i &> \log_4 n
\end{aligned}$$

L'equazione diventa:

$$\leq n + 3\left\lfloor \frac{n}{4} \right\rfloor + \dots + 3^{\log_4 n - 1}\left\lfloor \frac{n}{4^{\log_4 n - 1}} \right\rfloor + 3^{\log_4 n}c$$

Si può togliere l'approssimazione per difetto per ottenere un maggiorante:

$$\begin{aligned} &\leq n \left( 1 + \frac{3}{4} + \left(\frac{3}{4}\right)^2 + \dots + \left(\frac{3}{4}\right)^{\log_4 n - 1} \right) + 3^{\log_4 n} c \\ &\leq n \left( \sum_{i=0}^{\infty} \left(\frac{3}{4}\right)^i \right) + c 3^{\log_4 n} \end{aligned}$$

Per capire l'ordine di grandezza di  $3^{\log_4 n}$  si può scrivere come:

$$3^{\log_4 n} = n^{(\log_n 3^{\log_4 n})} = n^{\log_4 n \cdot \log_n 3} = n^{\log_4 3}$$

Quindi la complessità è:

$$= O(n) + O(n^{\log_4 3})$$

Si ha che una funzione è uguale al termine noto della funzione originale e l'altra che è uguale al logaritmo dei termini noti. Se usassimo delle variabili uscirebbe:

$$\begin{aligned} T(n) &= aT\left(\frac{n}{b}\right) + f(n) \\ &= O(f(n)) + O(n^{\log_b a}) \end{aligned}$$

### 3.3 Teorema dell'esperto

**Teorema 3.1** (Teorema dell'esperto o Master theorem). Per un'equazione di ricorrenza del tipo:

$$T(n) = aT\left(\frac{n}{b}\right) + f(n)$$

Si distinguono 3 casi:

- $f(n) \in O(n^{\log_b a - \epsilon})$  allora  $T(n) \in \Theta(n^{\log_b a})$
- $f(n) \in \Theta(n^{\log_b a})$  allora  $T(n) \in \Theta(f(n) \log n)$
- $f(n) \in \Omega(n^{\log_b a + \epsilon})$  allora  $T(n) \in \Theta(f(n))$

**Esempio 3.4.**

$$T(n) = 9T\left(\frac{n}{3}\right) + n$$

Applico il teorema dell'esperto:

$$a = 9$$

$$b = 3$$

$$f(n) = n$$

$$n^{\log_b a} = n^{\log_3 9} = n^2$$



Verifico se esiste un  $\varepsilon$  tale che:

$$n \in O(n^{2-\varepsilon})$$

prendo  $\varepsilon = -\frac{1}{2}$  e verifico:

$$n \in O(n^2 \cdot n^{-\frac{1}{2}})$$

Quindi ho trovato il caso 1 del teorema dell'esperto.

$$T(n) \in \Theta(n^2)$$

### Esempio 3.5.

$$T(n) = T\left(\frac{2n}{3}\right) + 1$$

Applico il teorema dell'esperto:

$$a = 1$$

$$b = \frac{3}{2}$$

$$f(n) = n^0$$

$$n^{\log_b a} = n^{\log_{\frac{3}{2}} 1} = n^0$$

Si nota che le due funzioni hanno lo stesso ordine di grandezza, quindi siamo nel secondo caso del teorema dell'esperto.

$$T(n) \in \Theta(\log n)$$

### Esempio 3.6.

$$T(n) = 3T\left(\frac{n}{4}\right) + n \log n$$

Applico il teorema dell'esperto:

$$a = 3$$

$$b = 4$$

$$f(n) = n \log n$$

$$n^{\log_b a} = n^{\log_4 3}$$

$$n \log n \in \Omega(n^{\log_4 3})$$

Esiste un  $\varepsilon$  tale che:

$$n \log n \in \Omega(n^{\log_4 3 + \varepsilon})$$

perchè basta che sia compreso tra  $\log_4 3$  e 1.

Quindi siamo nel terzo caso del teorema dell'esperto.

$$T(n) \in \Theta(n \log n)$$

**Esempio 3.7.**

$$T(n) = 2T\left(\frac{n}{2}\right) + n \log n$$

Applico il teorema dell'esperto:

$$a = 2$$

$$b = 2$$

$$f(n) = n \log n$$

$$n^{\log_b a} = n^{\log_2 2} = n$$

$$n \log n \in \Omega(n)$$

Verifico se esiste un  $\varepsilon$ , quindi divido per  $n$ :

$$\log n \in \Omega(n^\varepsilon)$$

Quindi si nota che questa proprietà non è verificata, quindi non si può applicare il teorema dell'esperto.

### 3.4 Merge sort

Questo algoritmo di ordinamento è basato sulla tecnica divide et impera:

- **Divide:** Dividi il problema in sottoproblemi più piccoli
- **Impera:** Risolvi i sottoproblemi in modo ricorsivo
- **Combina:** Unisci le soluzioni dei sottoproblemi per risolvere il problema originale

Questo algoritmo divide la sequenza in due parti uguali e le ordina separatamente, successivamente le unisce in modo ordinato. La complessità, considerando il merge con complessità lineare, risulta:

$$T(n) = 2T\left(\frac{n}{2}\right) + n$$

Applicando il teorema dell'esperto si ottiene:

$$a = 2$$

$$b = 2$$

$$f(n) = n$$

$$n^{\log_b a} = n$$

$$n \in \Theta(n)$$

Quindi siamo nel secondo caso del teorema dell'esperto:

$$T(n) \in \Theta(n \log n)$$

Definizione del merge sort:

```
1 // A: Array da ordinare
2 // P: Indice di partenza
3 // r: Indice di arrivo
4 merge_sort(A, p, r)           // --
5     if p < r                  // |
6         q <- floor((p + r) / 2) // |
7         merge_sort(A, p, q)    // | 0(n log n)
8         merge_sort(A, q + 1, r) // |
9         merge(A, p, q, r)      // --

1 // A: Array da ordinare
2 // P: Indice di partenza
3 // q: Indice di mezzo
4 // r: Indice di arrivo
5 merge(A, p, q, r)
6     i <- 1
7     j <- p
8     k <- q + 1
9     // Ordina gli elementi di A in B
10    while(j <= q and k <= r) // --
11        if j <= q and (k > r or A[j] <= A[k]) // |
12            B[i] <- A[j] // |
13            j++ // |
14        else // | 0(n)
15            B[i] <- A[k] // |
16            k++ // |
17            i++ // --
18
19    // Copia gli elementi di B in A
20    for i <- 1 to r - p + 1 // -|
21        A[p + i - 1] <- B[i] // -| 0(n)
```

L'algoritmo è stabile perchè non vengono scambiati elementi uguali e non è in loco perchè utilizza un array di appoggio.

### 3.5 Heap

È un albero semicompleto (ogni nodo ha 2 figli ad ogni livello tranne l'ultimo che è completo solo fino ad un certo punto) in cui i nodi contengono oggetti con relazioni di ordinamento.

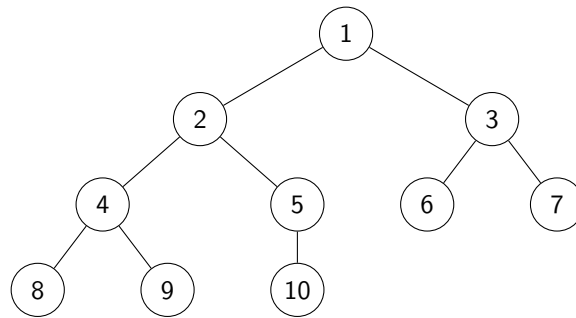


Figura 3: Heap con l'indice di un array associato ai nodi

### 3.5.1 Proprietà

∀ nodo il contenuto del nodo è  $\geq$  del contenuto dei figli. Per calcolare il numero di nodi di un albero binario si usa la formula:

$$N = 2^0 + 2^1 + 2^2 + \dots + 2^{h-1} = \frac{1 - 2^h}{1 - 2} = 2^h - 1$$

dove  $h$  è l'altezza dell'albero. Il numero di foglie di un albero sono la metà dei nodi.

Definiamo una funzione che "aggiusta" i figli di un nodo per mantenere la proprietà di heap:

```

1  heapify(A, i) // O(n)
2  l <- left[i] // Indice del figlio sinistro (2i)
3  r <- right[i] // Indice del figlio destro (2i+1)
4  if l < H.heap_size and H[l] > H[i]
5      largest <- l
6  else
7      largest <- i
8
9  if r < H.heap_size and H[r] > H[largest]
10     largest <- r
11  if largest != i
12     swap(H[i], H[largest])
13     heapify(H, largest)

```

Ora si vuole definire una funzione che costruisce un heap da un array:

```

1  build_heap(A) // O(n)
2  heapsize(a) <- length[A]
3  for i <- floor(length[A]/2) downto 1
4      heapify(A, i)

```

Una volta definito un heap si possono fare diverse operazioni, come ad esempio estrarre il nodo massimo:

```

1  extract_max(A)
2  H[1] <- H[H.heap_size]
3  H.heap_size <- H.heap_size - 1
4  heapify(H, 1)

```

### 3.5.2 Heap sort

Heap sort è un algoritmo di ordinamento basato su heap.

```

1 heap_sort(A) // O(n log n)
2   build_heap(A) // n
3   for i <- length[A] downto 2
4     scambia(A[1], A[i])
5     heapsize(A)--
6     heapify(A, 1) // log i

```

La complessità dell'algoritmo è precisamente:

$$\sum_{i=1}^n \log i = \log \prod_{i=1}^n i = \log n! = \Theta(\log n^n) = \Theta(n \log n)$$

Per la formula di Stirling  $n!$  ha ordine di grandezza  $n^n$ . Questo algoritmo è in loco e instabile.

Il caso pessimo è un array ordinato al contrario ( $O(n \log n)$ ) e il caso migliore è un array già ordinato ( $\Omega(n \log n)$ ), quindi la complessità è:

$$\Theta(n \log n)$$

### 3.6 Quick sort

Il concetto di questo algoritmo è quello di mettere prima in disordine l'algoritmo e poi ordinarlo. L'algoritmo divide l'array in 2 parti e ordina ricorsivamente le due parti; a quel punto l'array è ordinato.

```

1 // A: Array da ordinare
2 // p: Indice di partenza
3 // r: Indice di arrivo
4 quick_sort(A, p, r)
5   if p < r // Ordina solo se l'array ha piu' di un elemento
6     q <- partition(A, p, r) // Dividi l'array in due parti
7     quick_sort(A, p, q) // Ordina sinistra
8     quick_sort(A, q + 1, r) // Ordina destra

```

```

1 partition(A, p, r)
2   x <- A[p] // Elemento perno (o pivot)
3   i <- p - 1
4   j <- r + 1
5   while true
6     repeat // Ripete finche' la condizione non e' soddisfatta
7       j-- // n/2
8     until A[j] <= x // Trova un elemento che non puo' stare a
9     destra
10    repeat
11      i++ // n/2
12    until A[i] >= x // Trova un elemento che non puo' stare a
13    sinistra
14    if i < j
15      swap(A[i], A[j]) // n/2
16    return j // alla fine j puntera' all'ultimo elemento di
17    sinistra

```

Questo algoritmo è in loco e non è stabile. La sua complessità nel caso peggiore è:

$$\begin{aligned}
 T(n) &= T(\text{partition}) + T(q) + T(n - q) \\
 &= n + T(q) + T(n - q) \\
 &= n + \cancel{T(1)} + T(n - 1) \\
 &= n + T(n - 1) \\
 &= \Theta(n^2)
 \end{aligned}$$

Il caso peggiore è un array già ordinato.

Mediamente ci si aspetta che l'array venga diviso in 2 parti molto simili, quindi la complessità è  $O(n \log n)$  perchè:

$$0 < c < 1$$

$$T(n) = n + T(cn) + T((1 - c)n)$$

```

1  rand_partition(A, p, r)
2      i ← random(p, r)
3      swap(A[i], A[p])
4      return partition(A, p, r)

```

La complessità è la media di tutte le complessità con probabilità  $\frac{1}{n}$

$$\begin{aligned}
 T(n) &= n + \frac{1}{n} (T(1) + T(n - 1)) + \frac{n - 1}{n} (T(2) + T(n - 2)) \\
 &\quad + \dots + \frac{1}{n} (T(n - 1) + T(1)) \\
 T(n) &= n + \frac{1}{n} \sum_i (T(i) + T(n - i)) \\
 &= n + \frac{2}{n} \sum_i T(i)
 \end{aligned}$$

### 3.7 Algoritmi di ordinamento non per confronti

Si possono avere algoritmi di ordinamento con complessità  $< n \log n$ ?

Qualsiasi algoritmo che ordina per confronti deve fare almeno  $n \log n$  confronti nel caso pessimo

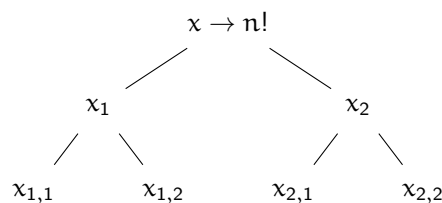


Figura 4: Heap con l'indice di un array associato ai nodi

Le foglie rappresentano ogni singola combinazione possibile. Il numero di foglie è  $n!$  e l'altezza sarà sempre

$$h \geq \log_2 n! = n \log n$$

### 3.7.1 Counting sort

Si vogliono ordinare  $n$  numeri con valori da 1 a  $k$ . L'idea di questo algoritmo è quella di creare un'array che contiene il numero di occorrenze di un certo valore (rappresentato dall'indice).

```
1 counting_sort(A, k)
2   for i <- 1 to k // k
3     C[i] <- 0 // Inizializzazione di un array a 0
4
5   for j <- 1 to length[A] // n
6     C[A[j]]++ // Conteggio delle occorrenze
7
8   // k
9   for i <- 2 to k          // In ogni indice metto il numero di
10    C[i] <- C[i] + C[i-1] // elementi minori o uguali
11                          // al numero dell'indice
12  // Alla fine l'array C conterra' l'ultima posizione di occorrenza
13  // per ogni elemento
14
15  for j <- length[A] downto 1 // n
16    B[C[A[j]]] <- A[j] // Inserimento dell'elemento in posizione
17    C[A[j]]--          // Decremento della posizione di occorrenza
```

La complessità di questo algoritmo è  $O(n + k)$  e siccome sappiamo che  $k$  è una costante fissata a priori la complessità è  $O(n)$ . Non è in loco, ma è stabile

### 3.7.2 Radix sort

Il radix sort è un ordinamento lessico grafico, cioè si ordinano le cifre partendo da quella meno significativa e se sono uguali si passa a quella più significativa.

La complessità dell'algoritmo è:

$$\Theta(l(n + k))$$

dove:

$l$  = numero di cifre =  $\log_k n$

$n$  = numero di elementi

$k$  = numero di valori possibili

Se rappresentiamo i numeri in base  $n$ , allora si avrà la seguente rappresentazione:

$$\dots n^2 n^1 n^0$$

e ad esempio per rappresentare  $n^2 - 1$  valori possibili serviranno 2 cifre. cifre.

### 3.7.3 Bucket sort

Dato un array di numeri con **supporto infinito** e **distribuzione nota**, si può dividere l'array in  $k$  parti (bucket) uguali (equiprobabili) e ordinare ricorsivamente. Ogni coppia di gruppi deve essere totalmente ordinata, cioè ogni elemento del primo gruppo deve essere minore di ogni elemento del secondo gruppo. Una volta ordinati i gruppi (con un algoritmo di ordinamento a scelta) si concatenano in modo ordinato.

Il caso peggiore è quello in cui tutti gli elementi finiscono in un singolo bucket, la probabilità che questo accada è molto bassa:

$$\underbrace{\frac{1}{n} \cdot \frac{1}{n} \cdot \dots \cdot \frac{1}{n}}_{n-1} = \frac{1}{n^{n-1}}$$

e la sua complessità diventa:

$$O(n^2)$$

Nel caso medio si ha che per creare i bucket si ha una complessità  $O(n)$  e per assegnare gli elementi ai bucket si ha una complessità  $O(n)$ . Per ogni bucket ci si aspetta che il numero di elementi al suo interno sia una **costante**, quindi **indipendente dal valore di  $n$** . Per ordinare un bucket si ha una complessità  $O(1)$  siccome il numero di elementi è costante. La complessità totale è quindi:

$$\Theta(n)$$

Formalizzando si ha:

Sia  $X_{ij}$  la variabile casuale che vale:  $\begin{cases} 1 & \text{se l'elemento } i \text{ va nel bucket } j \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$

Per esprimere il numero di elementi nel bucket  $j$  si può scrivere:

$$N_j = \sum_i X_{ij}$$

La complessità di questo algoritmo sarà quindi:

$$C = \sum_j (N_j)^2$$

Per ottenere il valore medio della complessità:

$$\begin{aligned} E[C] &= E \left[ \sum_j (N_j)^2 \right] \\ &= \sum_j E[(N_j)^2] \\ &= \sum_j (\text{Var}[N_j] + E[N_j]^2) \end{aligned}$$

sappiamo che  $N_j = \sum_i X_{ij}$ , quindi la media è:

$$E[N_j] = \sum_j^n E[X_{ij}] = \sum_j \frac{1}{n} = 1$$

e la varianza è:

$$\text{Var}[N_j] = \sum_j^n \text{Var}[X_{ij}] = \sum_j \frac{1}{n} \left( 1 - \frac{1}{n} \right) = 1 - \frac{1}{n}$$



La complessità diventa:

$$\begin{aligned} E[C] &= \sum_j \left( \left( 1 - \frac{1}{n} \right) - 1 \right) \\ &= \sum_j 2 - \frac{1}{n} \\ &= 2n - 1 \end{aligned}$$

## 4 Algoritmi di selezione

Dato in input un array  $A$  di oggetti su cui è definita una relazione di ordinamento e un indice  $i$  compreso tra 1 e  $n$  ( $n$  è il numero di oggetti nell'array), l'output dell'algoritmo è l'oggetto che si trova in posizione  $i$  nell'array ordinato.

```
1 selezione(A, i)
2   ordina(A) //  $O(n \log n)$ 
3   return A[i]
```

Quindi la complessità di questo algoritmo nel caso peggiore è  $O(n \log n)$  (limite superiore). È possibile selezionare un elemento in tempo lineare? Analizziamo un caso particolare dell'algoritmo di selezione, ovvero la ricerca del minimo (o del massimo).

### 4.1 Ricerca del minimo o del massimo

In tempo lineare si può trovare il minimo e il massimo di un array:

```
1 minimo(A)
2   min <- A[1]
3   for i <- 2 to length[A]
4     if A[i] < min
5       min <- A[i]
6   return min
```

trovare il minimo equivale a trovare `selezione(A, 1)` e trovare il massimo equivale a trovare `selezione(A, n)`. Si può però andare sotto la complessità lineare?

Per trovare il massimo (o il minimo) elemento  $n$  di un array bisogna fare **almeno**  $n - 1$  confronti perché bisogna confrontare ogni elemento con l'elemento massimo (o minimo) trovato per poter dire se è il massimo (o minimo). Di conseguenza, non è possibile avere un algoritmo per la ricerca del massimo (o minimo) in cui c'è un elemento che non "perde" mai ai confronti (cioè risulta sempre il più grande) e non viene dichiarato essere il più grande (o più piccolo).

**Dimostrazione:** Per dimostrarlo si può prendere un array in cui l'elemento  $a$  non perde mai ai confronti, ma l'algoritmo dichiara che il massimo è l'elemento  $b$ . Allora si rilancia l'algoritmo sostituendo l'elemento  $a$  con  $a = \max(b+1, a)$  e si ripete l'algoritmo con questo secondo array in cui  $a$  è l'elemento più grande. Si ha quindi che i confronti in cui  $a$  non è coinvolto rimangono gli stessi e i confronti in cui  $a$  è coinvolto non cambiano perché anche prima  $a$  non perdeva mai ai confronti, di conseguenza l'algoritmo dichiarerà che il massimo è  $b$  e quindi l'algoritmo non è

corretto, dimostrando che non esiste un algoritmo che trova il massimo in meno di  $n - 1$  confronti.

Abbiamo quindi trovato che la complessità del massimo (o minimo) nel caso migliore è  $\Omega(n)$  (limite inferiore) e nel caso peggiore è  $O(n)$  (limite superiore). Di conseguenza la complessità è  $\Theta(n)$ .

#### 4.1.1 Ricerca del minimo e del massimo contemporaneamente

Si potrebbe implementare unendo i 2 algoritmi precedenti:

```
1 min_max(A)
2   min <- A[1]
3   max <- A[1]
4   for i <- 2 to length[A]
5     if A[i] < min
6       min <- A[i]
7     if A[i] > max
8       max <- A[i]
9   return (min, max)
```

Questo algoritmo esegue  $n - 1 + n - 1 = 2n - 2$  confronti.

- **Limite inferiore:** Potenzialmente ogni oggetto potrebbe essere il minimo o il massimo. Sia  $m$  il numero di oggetti potenzialmente minimi e  $M$  il numero di oggetti potenzialmente massimi. Sia  $n$  il numero di oggetti nell'array.
  - All'inizio  $m + M = 2n$  perchè ogni oggetto può essere sia minimo che massimo.
  - Alla fine  $m + M = 2$  perchè alla fine ci sarà un solo minimo e un solo massimo.

Quando viene fatto un confronto  $m + M$  può diminuire.

- Se si confrontano due oggetti che sono potenzialmente sia minimi che massimi, allora  $m + M$  diminuisce di 2 perchè:

$$a < b$$

$b$  non può essere il minimo e  $a$  non può essere il massimo e si perdono 2 potenzialità.

- Se si confrontano due potenziali minimi (o massimi), allora  $m + M$  diminuisce di 1 perchè:

$$a < b$$

$b$  non può essere il minimo e si perde 1 potenzialità.

Un buon algoritmo dovrebbe scegliere di confrontare sempre 2 oggetti che sono entrambi potenziali minimi o potenziali massimi.

Due oggetti che sono potenzialmente sia minimi che massimi esistono se  $m + M > n + 1$  perchè se bisogna distribuire  $n$  potenzialità ne avanzano due che devono essere assegnate a due oggetti che hanno già una potenzialità. Quindi fino a quando  $m + M$  continua ad essere almeno  $n + 2$  si riesce a far diminuire  $m + M$  di 2 ad ogni confronto.

Questa diminuzione si può fare  $\lfloor \frac{n}{2} \rfloor$  volte, successivamente  $m + M$  potrà calare solo di 1 ad ogni confronto.

Successivamente il numero di oggetti rimane:

$$\begin{cases} n + 1 & \text{se } n \text{ è dispari} \\ n & \text{se } n \text{ è pari} \end{cases}$$

–  $n$  dispari:

$$\begin{aligned} n + 1 - 2 + \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor \\ = n - 1 + \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor \\ = \left\lfloor \frac{3}{2}n \right\rfloor - 1 \\ = \left\lceil \frac{3}{2}n \right\rceil - 2 \end{aligned}$$

–  $n$  pari:

$$\begin{aligned} n - 2 + \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor \\ = n - 2 + \frac{n}{2} \\ = \frac{3}{2}n - 2 \\ = \left\lceil \frac{3}{2}n \right\rceil - 2 \end{aligned}$$

Quindi la complessità è  $\Omega(\lceil \frac{3}{2}n \rceil - 2) = \Omega(n)$  (limite inferiore). Meglio di così non si può fare, ma non è detto che esista un algoritmo che raggiunga questo limite inferiore.

Un algoritmo che raggiunge il limite inferiore è il seguente:

1. Dividi gli oggetti in 2 gruppi:

$$\begin{array}{cc} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \\ \vdots & \vdots \\ a_{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor} & b_{\lceil \frac{n}{2} \rceil} \end{array}$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{Potenziali sia minimi che massimi}}$   
 $\underbrace{\hspace{5em}}_{\text{Potenziali minimi}} \quad \underbrace{\hspace{5em}}_{\text{Potenziali massimi}}$

2. Confronta  $a_i$  con  $b_i$ , supponendo  $a_i < b_i$  (mette a sinistra i più piccoli e a destra i più grandi)
3. Cerca il minimo degli  $a_i$  e cerca il massimo dei  $b_i$ :
4. Sistema l'eventuale elemento in più se l'array è dispari

## 4.2 Randomized select

Si può implementare un algoritmo che divide l'array in 2 parti allo stesso modo in cui viene effettuata la partition di quick sort:

```
1 // A: Array
2 // p: Indice di partenza
3 // r: Indice di arrivo
4 // i: Indice che stiamo cercando (compreso tra 1 e r-p+1)
5 randomized_select(A, p, r, i)
6   if p = r
7     return A[p]
8   q <- randomized_partition(A, p, r)
9   k <- q - p + 1 // Numero di elementi a sinistra
10  // Controlla se l'elemento cercato e' a sinistra o a destra
11  if i <= k
12    return randomized_select(A, p, q, i) // Cerca a sinistra
13  else
14    return randomized_select(A, q+1, r, i-k) // Cerca a destra
```

- Se dividessimo sempre a metà si avrebbe:

$$T(n) = n + T\left(\frac{n}{2}\right) = \Theta(n) \text{ (terzo caso del teorema dell'esperto)}$$

- Mediamente:

$$\begin{aligned} T(n) &= n + \frac{1}{n}T(\max(1, n-1)) + \frac{1}{n}T(\max(2, n-2)) + \dots \\ &= n + \frac{2}{n} \sum_{i=\frac{n}{2}}^{n-1} T(i) \end{aligned}$$

La complessità media è lineare.

Si esegue un solo ramo, che nel caso pessimo è quello con più elementi. La risoluzione è la stessa del quick sort.

Esiste un algoritmo che esegue la ricerca in tempo lineare anche nel caso peggiore?

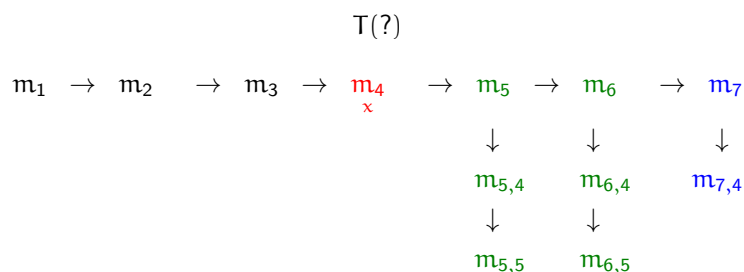
Si potrebbe cercare un elemento perno più ottimale, cioè che divida l'array in **parti proporzionali**:

1. Dividi gli oggetti in  $\lfloor \frac{n}{5} \rfloor$  gruppi di 5 elementi più un eventuale gruppo con meno di 5 elementi.
2. Calcola il mediano di ogni gruppo di 5 elementi (si ordina e si prende l'elemento centrale).  $\Theta(n)$
3. Calcola ricorsivamente il mediano  $x$  dei mediani

$$T\left(\left\lceil \frac{n}{5} \right\rceil\right)$$

4. Partiziona con perno  $x$  e calcola  $k$  (numero di elementi a sinistra).  $\Theta(n)$
5. Se  $i < k$  cerca a sinistra l'elemento  $i$ , altrimenti cerca a destra l'elemento  $i-k$ . La chiamata ricorsiva va fatta su un numero di elementi sufficientemente

piccolo, e deve risultare un proporzione di  $n$ , quindi ad esempio dividere in gruppi da 3 elementi non funzionerebbe.



Gli elementi verdi sono maggiori dell'elemento  $x$  e ogni elemento verde avrà 2 elementi maggiori di esso (tranne nel caso del gruppo con meno di 5 elementi rappresentato in blu).

$$\begin{aligned}
 \#left &\leq 3 \cdot \left( \underbrace{\left\lceil \frac{1}{2} \left\lceil \frac{n}{5} \right\rceil \right\rceil}_{\text{verdi} + \text{blu} + \text{rosso}} - \underbrace{2}_{\text{rosso} + \text{blu}} \right) = \frac{7}{10}n + 6 \\
 \#right &\geq 3 \cdot \left( \underbrace{\left\lceil \frac{1}{2} \left\lceil \frac{n}{5} \right\rceil \right\rceil}_{\text{verdi} + \text{blu} + \text{rosso}} - \underbrace{2}_{\text{rosso} + \text{blu}} \right) = \frac{7}{10}n + 6
 \end{aligned}$$

Da ogni parte si hanno almeno  $\frac{7}{10}n + 6$  elementi.

Quindi abbiamo trovato  $T(?)$ :

$$T(n) = \Theta(n) + T\left(\left\lceil \frac{n}{5} \right\rceil\right) + T\left(\frac{7}{10}n + 6\right)$$

Dimostriamo con il metodo di sostituzione, supponendo  $T(n) \leq cn$ , che la disequazione sia vera:

$$T(n) \leq n + c \left\lceil \frac{n}{5} \right\rceil + c\left(\frac{7}{10}n + 6\right)$$

Non sappiamo se  $\frac{7}{10}n + 6$  è minore di  $n$ , quindi lo calcoliamo:

$$\begin{aligned}
 \frac{7}{10}n + 6 &\leq n \\
 7n + 60 &\leq 10n \\
 3n &\geq 60 \\
 n &\geq 20
 \end{aligned}$$

Quindi per valori di  $n \leq 20$  la disequazione non è vera. Consideriamo quindi  $\bar{n} > 20$  e  $n > \bar{n}$ . Togliendo l'approssimazione per eccesso si ha:

$$\begin{aligned} T(n) &\leq n + c + \frac{c}{5}n + \frac{7}{10}n + 6c \\ &\leq \frac{9}{10}cn + 7c + n \\ &\stackrel{?}{\leq} cn \\ &= cn + \left(-\frac{1}{10}cn + 7c + n\right) \leq cn \text{ quando} \\ &\left(n + 7c - \frac{1}{10}cn\right) \leq cn \end{aligned}$$

Quindi  $T(n) \leq cn$  e quindi  $T(n) = O(n)$ . Abbiamo trovato un limite superiore e un limite inferiore, quindi la complessità è  $T(n) = \Theta(n)$ . Il problema è che le costanti sono così alte che nella pratica è meglio il `randomized_select`.

Esiste un modo per strutturare meglio le informazioni nel calcolatore per trovare l'elemento cercato in tempo  $\log n$ ? Si possono implementare delle **Strutture dati** che permettono di fare ricerche in tempo logaritmico.

## 5 Strutture dati

Una struttura dati è un modo per organizzare i dati in modo da poterli manipolare in modo efficiente. Bisogna avere un modo per comunicare con le strutture dati, senza dover sapere come sono implementate.

### 5.1 Stack

Ad esempio se consideriamo uno stack, si possono individuare le seguenti operazioni:

- `new()`: Crea uno stack vuoto
- `push(S, x)`: Inserisce un elemento  $x$  nello stack  $S$
- `top(S)`: Restituisce l'elemento in cima allo stack  $S$
- `pop(S)`: Rimuove l'elemento in cima allo stack  $S$
- `is_empty()`: Restituisce vero se lo stack è vuoto

Da queste operazioni si possono definire certe proprietà dello stack:

- `top(push(S, x)) = x`
- `pop(push(S, x)) = S`

Questo ci dice che lo stack è LIFO (Last In First Out).

Abbiamo quindi definito un'algebra dei termini da cui possono definire tutte le operazioni possibili, ad esempio uno stack è definito come una sequenza di push:

`push(push(push(empty(), 1), 2), 3)`

## 5.2 Queue

Una coda è una struttura dati in cui si possono inserire elementi in fondo e rimuoverli dall'inizio. Le operazioni possibili sono:

- `new()`: Crea una coda vuota
- `enqueue(Q, x)`: Inserisce un elemento  $x$  in fondo alla coda  $Q$
- `dequeue(Q)`: Rimuove l'elemento in cima alla coda  $Q$
- `front(Q)`: Restituisce l'elemento in cima alla coda  $Q$
- `is_empty()`: Restituisce vero se la coda è vuota

## 5.3 Lista doppiamente puntata

Una lista doppiamente puntata è una struttura dati in cui ogni nodo ha un puntatore al nodo precedente e al nodo successivo.

Per rimuovere un elemento  $x$  dalla lista bisogna:

1. Trovare il nodo  $x$
2. Collegare il nodo precedente a  $x$  con il nodo successivo a  $x$

Il problema di questa soluzione è che bisogna anche gestire i casi degli estremi separatamente. Per evitare di gestire i casi specifici si possono aggiungere dei nodi sentinella all'inizio e alla fine della lista.

## 5.4 Albero binario

Un albero binario è una struttura dati in cui ogni nodo ha al massimo 2 figli.

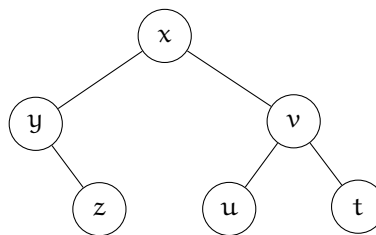


Figura 5: Albero binario

Le operazioni possibili su un albero binario sono:

- `new()`: Crea un albero vuoto
- `insert(T, x)`: Crea un nuovo nodo con valore  $x$  e lo aggiunge all'albero  $T$
- `extract(T, x)`: Rimuove il nodo con valore  $x$  dall'albero  $T$
- `is_empty()`: Restituisce vero se l'albero è vuoto
- `left(T)`: Restituisce il figlio sinistro dell'albero  $T$

- **right(T)**: Restituisce il figlio destro dell'albero T
- **value(T)**: Restituisce il valore del nodo dell'albero T

Un albero è **bilanciato** quando la differenza tra l'altezza del sottoalbero sinistro e di quello destro è al massimo 1. Un albero è **completo** quando tutti i livelli sono completi, cioè tutti i nodi sono presenti, tranne l'ultimo, che può essere incompleto.

La profondità di un albero di  $n$  nodi è:

$$P(n) = 1 + P\left(\left\lceil \frac{n-1}{2} \right\rceil\right) = \Theta(\log n)$$

#### 5.4.1 Albero binario di ricerca

Un albero binario di ricerca è un albero binario in cui per ogni nodo  $x$  valgono le seguenti proprietà:

- Tutti i nodi nel sottoalbero sinistro di  $x$  hanno valore minore di  $x$
- Tutti i nodi nel sottoalbero destro di  $x$  hanno valore maggiore di  $x$

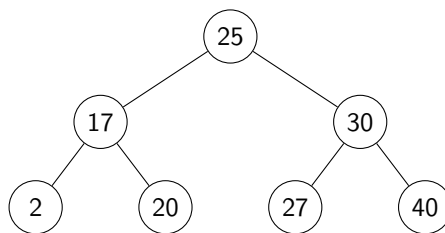


Figura 6: Albero binario di ricerca

Le operazioni possibili su un albero binario di ricerca sono:

- **insert(T, x)**: Inserisce un nodo con valore  $x$  nell'albero T
- **extract(T, x)**: Rimuove il nodo con valore  $x$  dall'albero T
- **search(T, x)**: Restituisce vero se il valore  $x$  è presente nell'albero T
- **min(T)**: Restituisce il valore minimo dell'albero T
- **max(T)**: Restituisce il valore massimo dell'albero T

Non è possibile inserire un nodo in un albero binario di ricerca in tempo logaritmico perchè potrebbe dover essere inserito in modo da sbilanciare l'albero, quindi per riottenere un albero bilanciato non rimane che spostare tutti gli elementi in una posizione diversa.

Per ottenere la complessità logaritmica, bisogna utilizzare un albero che si può sbilanciare, ma non troppo.

- **Inserimento** Per inserire un nodo in un albero binario di ricerca si può procedere nel seguente modo:



1. Si parte dalla radice e si scende fino a trovare il nodo in cui inserire il nuovo nodo rispettando le proprietà dell'albero binario di ricerca
2. Si inserisce il nodo in quel punto

● **Rimozione** Per rimuovere un elemento da un albero binario di ricerca si possono avere 3 casi:

1. Il nodo da rimuovere è una foglia: si può rimuovere direttamente
2. Il nodo da rimuovere ha un solo figlio: si può sostituire il nodo con il figlio
3. Il nodo da rimuovere ha due figli: si può sostituire il nodo con il minimo del sottoalbero destro o con il massimo del sottoalbero sinistro

Una volta che un nodo viene aggiunto o rimosso non si può più essere certi che l'albero sia ancora bilanciato, quindi bisogna fare in modo che l'albero venga bilanciato ogni volta che viene modificato e la complessità non sarà più logaritmica.

#### 5.4.2 RB-Tree (Red-Black Tree)

Gli alberi rosso-neri sono alberi binari di ricerca in cui ogni nodo può essere rosso o nero.

- **Nero:** Il nodo nero indica che il nodo è a posto
- **Rosso:** Il nodo rosso è un nodo ausiliario

Questo tipo di albero ha le seguenti proprietà:

1. Ogni nodo è rosso o nero
2. Ogni foglia è nera
3. I figli di un nodo rosso sono neri
4. Ogni cammino dalla radice ad una foglia contiene lo stesso numero di nodi neri

**Esempio 5.1.** Abbiamo un albero con 1 nodi neri nel sotto albero destro, quindi per la proprietà 4, il sotto albero sinistro deve avere 1 nodi neri:

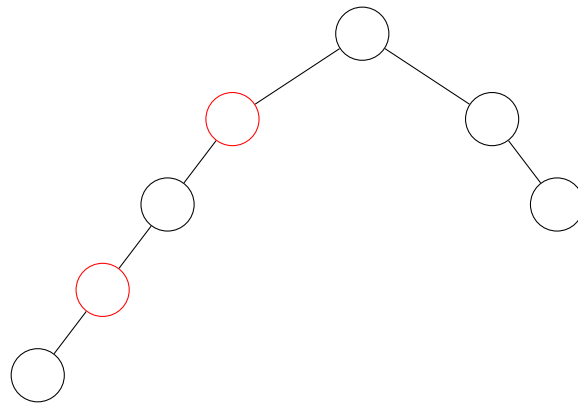


Figura 7: Albero rosso-nero

Il sotto albero sinistro avrà 21 nodi totali.

**Esempio 5.2.** Prendiamo ad esempio il seguente albero RB:

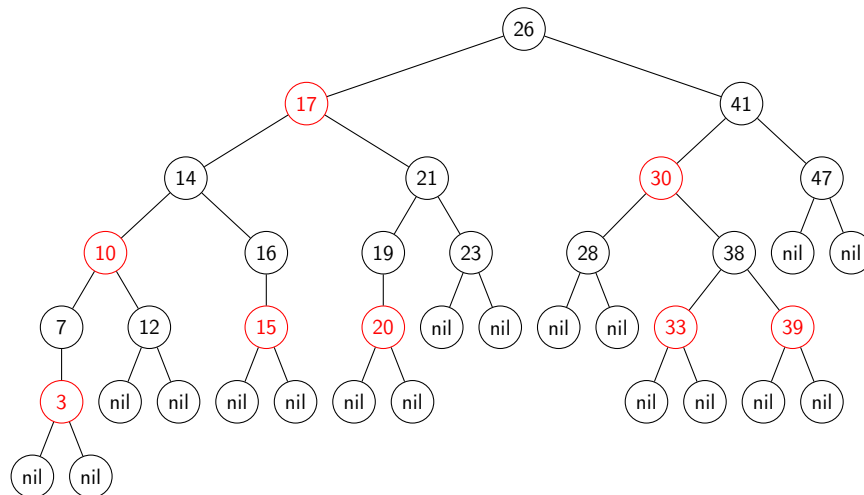


Figura 8: Albero rosso-nero

Tutte le proprietà sono verificate, però tutte le foglie sono dei `nil` (nero) e questo è uno spreco di memoria, perchè metà dei nodi di un albero sono foglie e quindi metà dei nodi sono utilizzati per la sentinella.

Questo si può risolvere facendo puntare tutte le sentinelle allo stesso valore `nil`, però facendo così non si riesce più a risalire all'elemento padre di una foglia.

Il concetto principale di questo tipo di alberi è quello della **black height**, cioè il numero di nodi neri che si incontrano lungo un cammino dalla radice ad una foglia. Prendendo in considerazione l'esempio 5.2 i nodi:

- **nil**: Hanno black height 0
- **3**: Ha black height 1
- **19**: Ha black height 1
- **14**: Ha black height 2
- **26**: Ha black height 3
- ecc...

**Lemma:**

Per ogni nodo  $x$  dell'albero, il sottoalbero radicato in  $x$  contiene almeno  $2^{bh(x)} - 1$  nodi interni (nodi che non sono una foglia).

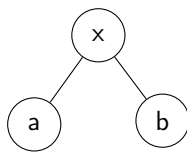
**Dimostrazione:**

Dimostriamo per induzione su  $bh(x)$ :

- **Caso base:** Se  $x$  è una foglia, allora  $bh(x) = 0$  e il sottoalbero radicato in  $x$  contiene 0 nodi interni.

$$2^{bh(x)} - 1 = 2^0 - 1 = 0$$

- Se  $x$  è un nodo con un figlio destro  $b$  e un figlio sinistro  $a$  allora:



$$bh(a) \geq bh(x) - 1 \quad e \quad bh(b) \geq bh(x) - 1$$

$$\#nodi(x) \geq \#nodi(a) + \#nodi(b) + 1$$

↓

$$\begin{aligned}
 \#nodi(x) &\geq 2^{bh(a)} - 1 + 2^{bh(b)} - 1 + 1 \\
 &\geq 2^{bh(x)-1} - 1 + 2^{bh(x)-1} - 1 + 1 \\
 &= 2 \cdot 2^{bh(x)-1} - 1 \\
 &= 2^{bh(x)} - 1
 \end{aligned}$$

Quindi

$$\#nodi(x) \geq 2^{bh(x)} - 1$$

**Complessità:** Consideriamo un albero RB di altezza  $h$  (distanza tra la radice e la foglia più lontana, escludendo la radice) e radice  $x$ , si ha che  $bh(x)$  vale:

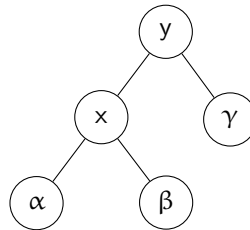
$$bh(x) \geq \frac{h}{2}$$

Il numero di nodi  $n$  (per il lemma) vale  $2^{\frac{h}{2}}$ , si ha quindi che l'altezza di un RB albero è **almeno** il doppio dell'altezza di un albero binario:

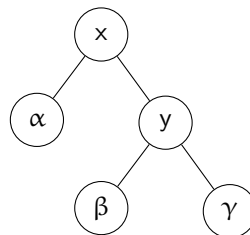
$$\begin{aligned} n &\geq 2^{\frac{h}{2}-1} \\ 2^{\frac{h}{2}} &\leq n + 1 \\ \frac{h}{2} &\leq \log_2(n + 1) \\ h &\leq 2 \log_2(n + 1) \end{aligned}$$

- **Inserimento:** L'inserimento di un nodo in un albero RB si fa allo stesso modo di un albero binario di ricerca. Per non violare la proprietà 4, si fa di colore rosso e si salva un puntatore al nuovo oggetto, questo perchè il nuovo albero è un RB albero, **tranne** per l'oggetto puntato dal puntatore perchè potrebbe avere un padre rosso. Si propaga l'anomalia verso la radice dell'albero per poter cambiare il colore della radice mantenendo tutte le proprietà. Per risolvere il problema si può fare una serie di **rotazioni** a destra o a sinistra.

Prendiamo in considerazione il seguente albero:



La rotazione a destra della coppia  $x$  e  $y$  è la seguente:



Questa operazione mantiene tutte le proprietà dell'albero binario di ricerca. L'operazione opposta è la rotazione a sinistra. Il tempo di esecuzione di una rotazione è costante.

Lo pseudocodice dell'algoritmo per risistemare l'albero è il seguente:

```

1 // Albero con radice sicuramente nera
2 // x: Nodo da cui si propaga l'anomalia
3
4 while x != root and color(parent(x)) == red
5   // Se il padre e' figlio sinistro del nonno
6   if parent(x) == left(parent(parent(x)))
  
```

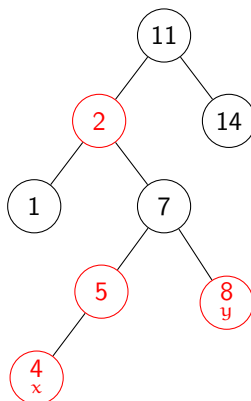
```

7  y <- right(parent(parent(x))
8  if color(y) == red
9    color(parent(parent(x))) <- red
10   color(parent(x)) <- black
11   color(y) <- black
12   x <- parent(parent(x))
13 else
14   if x == right(parent(x))
15     x <- parent(x)
16     left_rotate(x)
17
18   color(parent(x)) <- black
19   color(parent(parent(x))) <- red
20   right_rotate(parent(parent(x)))
21   x <- root
22
23 // Se il padre e' figlio sinistro del nonno
24 // Si fanno le stesse operazioni con le direzioni invertite

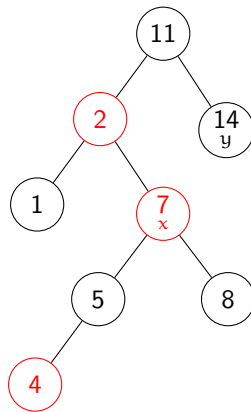
```

La complessità di questo algoritmo è  $O(\log n)$  perchè è un inserimento in un albero binario di ricerca con delle rotazioni per sistemare l'anomalia, ma il numero di rotazioni è costante.

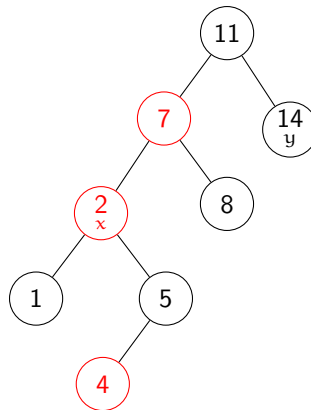
**Esempio 5.3.** Un esempio del precedente algoritmo è il seguente:



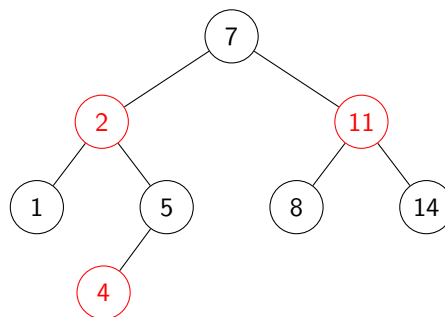
Si cambiano i colori dei nodi  $\text{parent}(x)$  e  $y$  e si sposta l'anomalia verso l'alto



Prendiamo la coppia 2 e 7 e ruotiamo a sinistra



Si cambiano i colori e si effettua una rotazione a destra



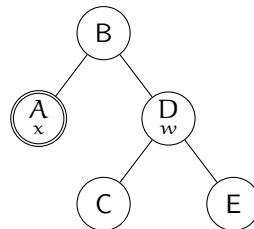
L'albero ora non ha più l'anomalia.

- **Rimozione:** La rimozione di un nodo da un albero RB si fa allo stesso modo di un albero binario di ricerca. Bisogna quindi distinguere i 3 casi:

1. **Il nodo da rimuovere è una foglia:** si può rimuovere direttamente e salviamo in un puntatore il nodo sentinella che sostituirà il nodo rimosso
2. **Il nodo da rimuovere ha un solo figlio:** si può sostituire il nodo con il figlio e si salva in un puntatore il figlio
3. **Il nodo da rimuovere ha due figli:** si può sostituire il nodo con il minimo del sottoalbero destro o con il massimo del sottoalbero sinistro

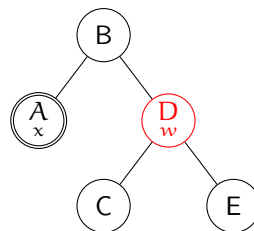
L'anomalia sarà un nodo rosso che dovrà essere nero per mantenere la proprietà 4, oppure un nodo nero che dovrà valere come due neri per mantenere la proprietà 4. Questa è un'anomalia locale che si può risolvere propagandola verso la radice dell'albero lavorando su un sottoinsieme di nodi.

Visto che ci sono i nodi sentinella i primi due casi sono risolti dallo stesso codice. L'algoritmo è il seguente:

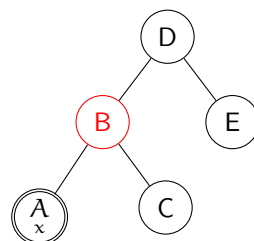


Consideriamo un nodo  $x$  non radice e **doppiamente nero** (anomalia), prendiamo il fratello  $w$  di  $x$  e distinguiamo i seguenti casi:

– Se  $w$  è rosso:



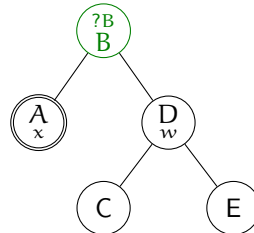
Per forza il padre di  $x$  deve essere nero (per mantenere la proprietà 3), di conseguenza lo sono anche i figli di  $w$ . Si scambia il colore tra il padre di  $x$  e  $w$  e si fa una rotazione a sinistra sul padre di  $x$ .



Questa trasformazione non viola nessuna proprietà dell'RB-albero, tranne per l'anomalia di  $x$ .

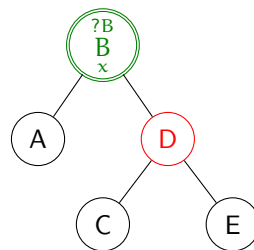
Non siamo più nel caso in cui il fratello di  $x$  è rosso.

– **Se  $w$  è nero:**



Se  $w$  è nero non si può dire nulla sul colore del padre di  $x$ . Anche adesso si distinguono due casi:

- \* **Se i figli di  $w$  sono neri:** Si toglie 1 nero dal livello di  $x$  e  $w$  e si aggiunge 1 nero al padre di  $x$ . Si propaga l'anomalia verso l'alto:



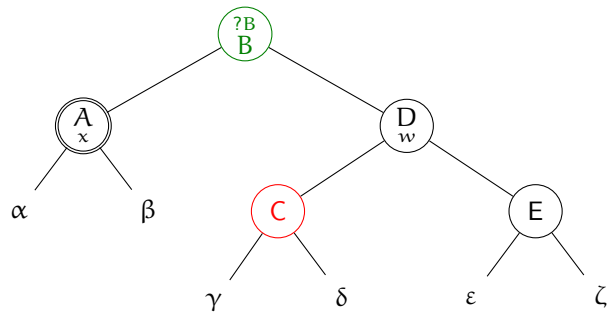
Se il nuovo  $x$  è rosso l'anomalia è risolta, altrimenti si applica la stessa procedura al nuovo  $x$ .

Questa trasformazione non viola nessuna proprietà dell'RB-albero; anche se  $x$  non ha un colore specifico (e se fosse rosso avrebbe un figlio rosso, di conseguenza violerebbe una proprietà dell'RB-albero), l'anomalia si è spostata sul nuovo  $x$ , di conseguenza se fosse rosso diventerebbe nero (anomalia risolta) e se fosse nero diventerebbe doppiamente nero.

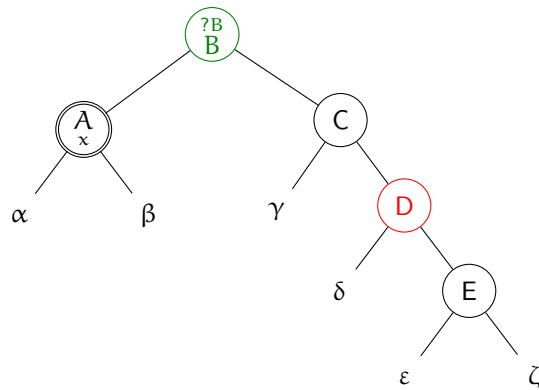
- \* **Se i figli di  $w$  non sono entrambi neri:**

- **Se il figlio destro di  $w$  è nero:** Visto che entrambi i figli di  $w$  non sono neri e il destro è nero, allora il sinistro è per forza rosso. (le lettere greche sono i sottoalberi delle foglie che non vengono considerati)



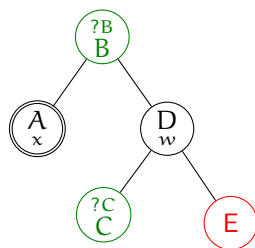


Si scambia il colore tra  $w$  e il figlio sinistro di  $w$  e si fa una rotazione a destra su  $w$ :

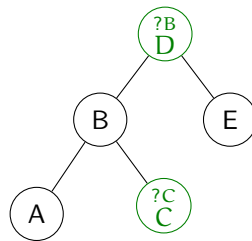


Questa trasformazione preserva l'RB-albero. Ora il figlio destro del fratello di  $x$  è rosso e si applica il caso successivo.

- **Se il figlio destro di  $w$  è rosso:** Visto che entrambi i figli di  $w$  non sono neri e il destro è rosso, allora il sinistro potrebbe essere sia rosso che nero.



Si assegna a  $w$  il colore del padre di  $x$ , al padre di  $x$  e al figlio destro di  $w$  il colore nero. Infine si fa una rotazione a sinistra sul padre di  $x$  e si porta l'anomalia alla radice.



Questa trasformazione preserva l'RB-albero.

L'anomalia punta alla radice dell'albero, in questo caso non punta a niente perchè non sappiamo se il nodo più in alto è la radice, quindi l'anomalia è risolta.

L'algoritmo è finito quando l'anomalia punta alla radice dell'albero. Lo pseudocodice dell'algoritmo è il seguente:

```

1 // x: Nodo da cui si propaga l'anomalia
2 while x != root and color(x) == black
3   w <- right(parent(x))
4   // Se x e' figlio sinistro del padre
5   if x == left(parent(x))
6     // Se w e' rosso (caso 1)
7     if color(w) == red
8       color(w) <- black
9       color(parent(x)) <- red
10      left_rotate(parent(x))
11   else // Se w e' nero
12     // Se i figli del w sono neri (caso 2, propaga x in alto)
13     if color(left(w)) == black and color(right(w)) == black
14       color(w) <- red
15       x <- parent(x)
16   else
17     // Se il figlio destro di w e' nero (caso 3, termina)
18     if color(right(w)) == black
19       color(left(w)) <- black
20       color(w) <- red
21       right_rotate(w)
22
23     // Se il figlio destro di w e' rosso (caso 4, termina)
24     color(w) <- color(parent(x))
25     color(parent(x)) <- black
26     color(right(w)) <- black
27     left_rotate(parent(x))
28     x <- root
29 // Se x e' figlio destro del padre
30 // Si fanno le stesse operazioni con le direzioni invertite

```

La complessità di questo algoritmo è  $\Theta(\log n)$  si fa un massimo di 3 rotazioni.

- **Selezione:** La selezione di un nodo in un albero RB si fa allo stesso modo di un albero binario di ricerca. Si parte dalla radice e si scende fino a trovare il nodo desiderato. La complessità di questo algoritmo è  $O(\log n)$ . Se riesco a trovare un modo per decidere se andare a sinistra o a destra in tempo costante allora è sufficiente a far diventare la complessità logaritmica.

– **Dato l'indice da trovare:** Per sapere la posizione dell'elemento della

radice si può salvare la grandezza del sottoalbero radicato nel nodo  $x$  e usare la seguente formula:

$$\text{size}(\text{left}(x)) + 1$$

Usando questa formula si può decidere se andare a sinistra o a destra in tempo costante e lo pseudocodice dell'algoritmo è il seguente:

```
1 // x: Nodo da cui si parte la selezione
2 // i: Indice dell'elemento da selezionare
3 select(x,i)
4   r <- size(left(x)) + 1
5   if i == r
6     return x
7   else if i < r
8     return select(left(x),i)
9   else
10    return select(right(x),i-r)
11
```

La complessità di questo algoritmo è  $O(\log n)$  perchè la decisione di andare a sinistra o a destra è in tempo costante.

Questo crea il problema di dover aggiornare la grandezza del sottoalbero ad ogni inserimento e rimozione di un nodo.

- \* In un inserimento, il valore size del nodo aggiunto vale 1, mentre il campo size di tutti i nodi del percorso seguito per inserire il nodo aumenta di 1.
- \* In un estrazione, il campo size di tutti i nodi del percorso seguito per rimuovere il nodo diminuisce di 1.
- \* Nella sistemazione dell'albero, i campi del colore non hanno alcuna influenza sul campo size, mentre se si fa una rotazione il valore di size deve cambiare:

```
1 size(x) <- size(left(x)) + size(right(x)) + 1
2
```

Questo funziona perchè il campo size è la somma dei campi size dei figli più 1, cioè viene ricalcolato da capo utilizzando il valore salvato nei figli.

In ogni caso dopo una rotazione gli unici nodi che cambiano il campo size sono i nodi alla radice che si scambiano il valore.

Abbiamo dimostrato che si può mantenere il campo size mantenendo la complessità logaritmica.

– **Dato un nodo da trovare:** Lo pseudocodice dell'algoritmo è il seguente:

```
1 // x: Nodo da cui si parte la selezione
2 // y: Nodo da trovare
3 rank(x)
4   count <- size(left(x)) + 1
5   while x != root
6     // Se x e' figlio destro del padre
7     if x == right(parent(x))
8       // Si aggiunge la grandezza del sottoalbero sinistro
       // del padre
```

```

9      count <- count + size(left(parent(x)) + 1
10
11      x <- parent(x)
12
13      return count

```

La complessità di questo algoritmo è  $O(\log n)$  perchè la decisione di andare a sinistra o a destra è in tempo costante.

Se si volessero inserire tutti gli elementi di un RB-albero in un array ordinato, si potrebbe usare un algoritmo di visita in-order dell'albero. Lo pseudocodice dell'algoritmo è il seguente:

```

1 // x: Nodo da cui si parte la visita
2 // A: Array in cui inserire x
3 // i: Indice dell'array in cui inserire x (passato per riferimento)
4 in_visit(x,A,i)
5   if x != nil
6     in_visit(left(x),A,i)
7     visit(x,A,i) // Inserisce x nell'array
8     in_visit(right(x),A,i)
9
10
11 // x: Nodo da inserire nell'array
12 // A: Array in cui inserire x
13 // i: Indice dell'array in cui inserire x (passato per riferimento)
14 visit(x,A,i)
15   A[i] <- value(x)
16   i++

```

Questo algoritmo ha complessità  $\Theta(n)$  perchè visita tutti i nodi dell'albero.

$$T(n) = T(n_{\text{left}}) + 1 + T(n_{\text{right}}) = n_{\text{left}} + 1 + n_{\text{right}} = n$$

Ci sono anche le seguenti alternative:

```

1 pre_visit(x,A,i)
2   if x != nil
3     visit(x,A,i) // Inserisce x nell'array
4     pre_visit(left(x),A,i)
5     pre_visit(right(x),A,i)
6
7 post_visit(x,A,i)
8   if x != nil
9     post_visit(left(x),A,i)
10    post_visit(right(x),A,i)
11    visit(x,A,i) // Inserisce x nell'array

```

Se si volesse creare un RB-albero partendo da un array (non necessariamente ordinato) si potrebbero fare  $n$  inserimenti in un RB-albero vuoto. La complessità di questo algoritmo è  $\Theta(n \log n)$ .

Oppure si potrebbe prima ordinare l'array e poi usare l'algoritmo di visita in-order per inserire tutti gli elementi in un RB-albero, per fare ciò però bisogna creare un "impalcatura", cioè un RB-albero con tutti i nodi nil, e poi inserire i nodi ordinati. Si fanno tutte le foglie rosse e tutti gli altri nodi neri. In pseudocodice l'algoritmo è il seguente:

```

1 // Crea un albero bilanciato con n nodi nil
2 build_empty_tree(n)
3   if n == 0
4     return nil
5   else
6     x <- new_node(nil)
7     left(x) <- build_empty_tree(floor((n-1)/2))
8     right(x) <- build_empty_tree(ceil((n-1)/2))
9     return x

```

Questo algoritmo non si può fare con complessità minore di  $n \log n$ .

#### Dimostrazione:

Supponiamo che `array_to_rb` abbia complessità  $f < n \log n$  e consideriamo:

```

1 sort(A)
2   T <- array_to_rb(A)
3   A <- rb_to_array(T)

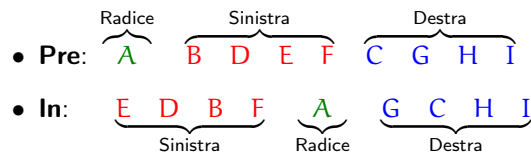
```

La complessità di questo algoritmo sarebbe:

$$f + n < n \log n$$

e ciò vorrebbe dire che è stato creato un algoritmo di ordinamento più veloce di  $n \log n$ , cosa impossibile, quindi l'algoritmo `array_to_rb` non può avere complessità  $f < n \log n$ .

Se visitiamo un albero con gli algoritmi in-visit e pre-visit otteniamo una stringa di nodi, è possibile ricostruire l'albero originale partendo dalla radice?



Dalle stringhe si possono individuare quali sono i sottoalberi sinistro e destro e qual'è la radice. L'algoritmo per ricostruire l'albero è il seguente:

```

1 // P: Stringa di visita pre-ordine
2 // I: Stringa di visita in-ordine
3 // Supponiamo che le stringhe abbiano la stessa lunghezza
4 str_to_tree(P,I)
5   if length(I) == 0
6     return nil
7   else
8     x <- new_node(P[1])
9     i <- find(I,P[1])
10    left(x) <- str_to_tree(P[2..i],I[1..i-1])
11    right(x) <- str_to_tree(P[i+1..length(P)],I[i+1..length(I)])
12    return x

```

L'albero sarà quindi:

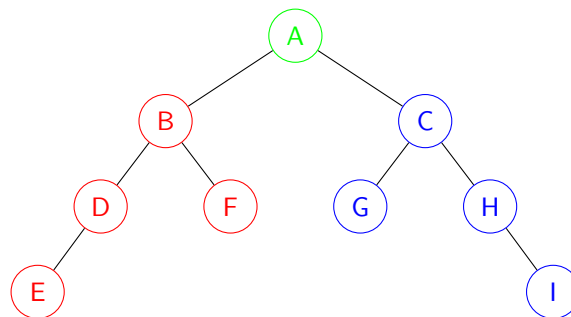


Figura 9: Albero ricostruito

È possibile implementare un algoritmo che unisce 2 RB-alberi in un unico RB-albero in tempo  $\log n$ ?

```

1 A1 <- rb_to_array(T1)
2 A2 <- rb_to_array(T2)
3 A <- merge(A1, A2)
4 T <- array_to_rb(A)

```

Questo ha complessità  $O(n)$  perchè è l'unione di più algoritmi con complessità lineare.

Questo problema è simile al concetto del merge sort, cioè prendere 2 metà, risolverle ed unire il risultato.

```

1 array_to_rb(A,p,q)
2   if p > q
3     return nil
4   else
5     r <- (p+q)/2
6     T1 <- array_to_rb(A,p,r)
7     T2 <- array_to_rb(A,r+1,q)
8     return union(T1,T2)

```

Questo algoritmo ha complessità:

$$T(n) = 2T(n/2) + C(\text{union})$$

Supponiamo che  $C(\text{union}) = \log n$ , quindi  $T(n) = \Theta(n \log n)$ , ma sappiamo che in tempo minore di  $n \log n$  non si può costruire un RB-albero, di conseguenza non è possibile che la union abbia complessità  $\log n$ .

## 5.5 Campi aggiuntivi

Si possono aggiungere dei campi aggiuntivi alle strutture dati per velocizzare alcuni algoritmi, ma bisogna stare attenti a mantenere la complessità delle operazioni inalterata.

**Teorema 5.1.** Sia  $F$  un campo aggiuntivo, se

$$\exists f. \forall x F(x) = f(\text{key}(x), F(\text{left}(x)), F(\text{right}(x)), \text{key}(\text{left}(x)), \text{key}(\text{right}(x)))$$

allora  $F$  è mantenibile in  $\log n$ .

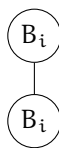
Cioè se il campo aggiuntivo è calcolabile utilizzando le operazioni definite in  $f$  allora la complessità di  $F$  è mantenibile.

## 5.6 Albero Binomiale

Gli alberi binomiali sono definiti ricorsivamente rispetto ad un valore chiamato **valore binomiale**. Un albero di dimensione 0 sarà da un solo nodo:



Per costruire un albero binomiale di dimensione  $i + 1$  si fa diventare il secondo albero un sottoalbero del primo albero:

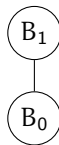


Quindi un albero di dimensione:

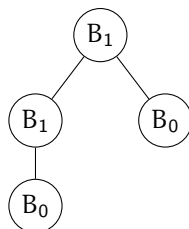
- $B_0$ :



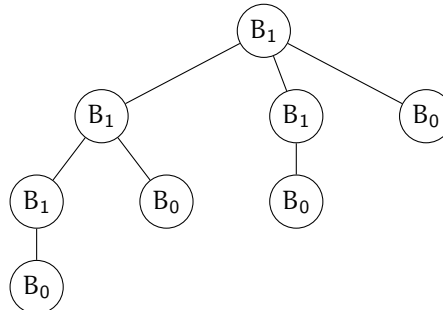
- $B_1$ :



- $B_2$ :



- $B_3$ :



**Teorema 5.2.** • Il numero di nodi è  $2^k$

– Dimostrazione:

Faccio vedere che la proprietà vale per 0 (caso base). Il numero totale di nodi in un albero binomiale di dimensione 0 è 1, cioè  $2^0$ . Supponiamo per induzione che in  $B_k$  ci siano  $2^k$  nodi. Per dimostrare che in  $B_{k+1}$  ci sono  $2^{k+1}$  nodi, utilizziamo la costruzione dell'albero binomiale  $B_k$  e aggiungiamo un altro albero binomiale  $B_k$  come figlio sinistro della radice di  $B_k$ . Quindi il numero di nodi in  $B_{k+1}$  è  $2^k + 2^k = 2^{k+1}$ .

- L'altezza dell'albero è  $k$

– Dimostrazione:

L'altezza di un albero binomiale di dimensione 0 è 0.

Supponiamo per induzione che la dimensione di un albero binomiale  $B_k$  sia  $k$ . Per dimostrare che la dimensione di un albero binomiale  $B_{k+1}$  sia  $k+1$ , sappiamo che l'altezza di un albero è il cammino più lungo radice-foglia, quindi il cammino più lungo dalla radice al figlio sinistro è  $k$  più un arco, quindi l'altezza è  $k+1$ .

- A profondità  $i$  ci sono  $\binom{k}{i}$  nodi:  $(1+i)^k$

– Dimostrazione:

Se consideriamo il triangolo di targaglia, abbiamo che l'elemento alla riga  $k$  e colonna  $i$  è  $\binom{k}{i}$ . Quindi il numero di nodi alla profondità  $i$  è:

$$\binom{k}{i} + \binom{k}{i-1} = \binom{k+1}{i}$$

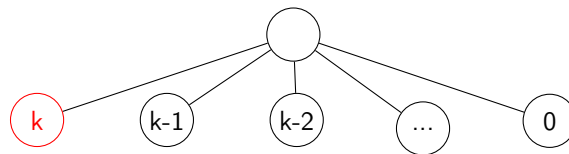
- I figli della radice da sinistra a destra sono radici di:

$$B_{k-1}, B_{k-2}, \dots, B_0$$



– Dimostrazione:

Un albero di dimensione 0 non ha figli, quindi la radice di  $B_k$  ha come figli le radici di  $B_{k-1}, B_{k-2}, \dots, B_0$ . Per  $k+1$  basta aggiungere un sottoalbero  $k$  come figlio sinistro della radice



## 5.7 Heap Binomiale

Un heap binomiale è una lista di alberi binomiali, dove:

- I contenuti dei nodi sono oggetti su cui è definita una relazione di ordinamento
- Per ogni dimensione c'è al più un albero binomiale
- I vari nodi soddisfano la proprietà di uno heap, cioè:

```
1 key(x) <= keys(children(x))
```

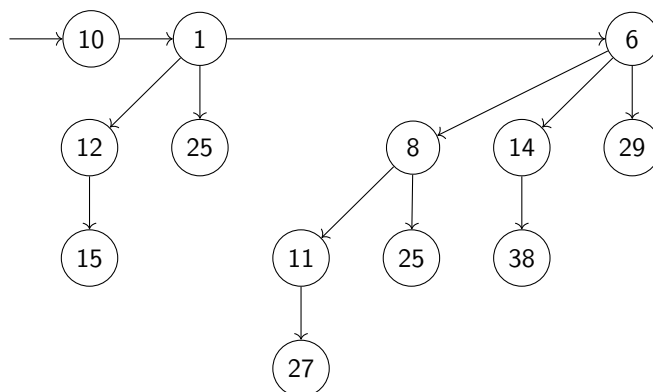


Figura 10: Esempio di heap binomiale

La complessità per cercare il minimo è data dal numero di radici.

In un heap di  $n$  nodi il numero di alberi binomiali è  $\log n$ .

$$2^k > 2^{\log_2 n} = n$$

Di conseguenza la complessità per trovare il minimo è  $O(\log n)$ .

Per questa struttura non esiste un algoritmo di visita in ordine, perchè se ci fosse vorrebbe dire che esisterebbe un algoritmo di ordinamento in tempo logaritmico e sappiamo che non esiste.

### 5.7.1 Creazione di un heap binomiale

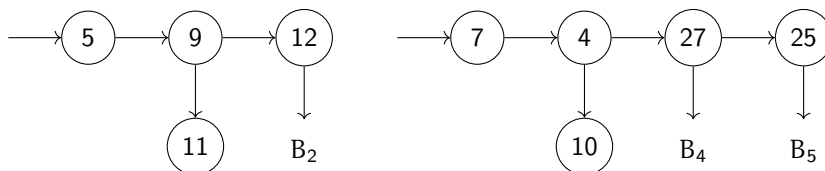
Per costruire un heap binomiale di dimensione  $n$  si può trasformare  $n$  in binario e considerare la notazione polinomiale:

$$n = 100101 \quad \begin{matrix} 2^5 & 2^4 & 2^3 & 2^2 & 2^1 & 2^0 \\ & & & & & 1 \end{matrix}$$

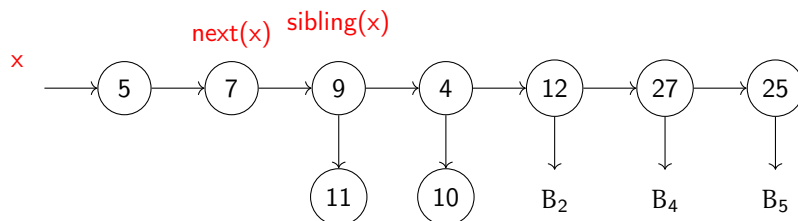
Si può esprimere un qualsiasi numero  $n$  come somma di potenze di 2. Se la cifra è 1 allora si crea un albero binomiale di quella dimensione, altrimenti si passa alla cifra successiva.

### 5.7.2 Unione di due heap binomiali

Si vogliono unire i seguenti heap binomiali:



Si scrive un'unica lista che è il merge delle due liste:

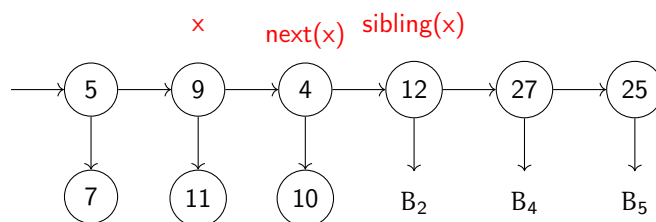


Le due liste rappresentate in binario sono:

$$L1 = 111 \quad L2 = 110011$$

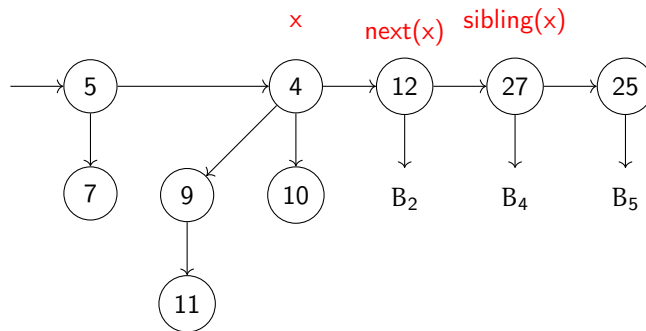
L'unione delle due liste si fa sommando i numeri binari: La nuova lista diventa:

1. Passo 1:



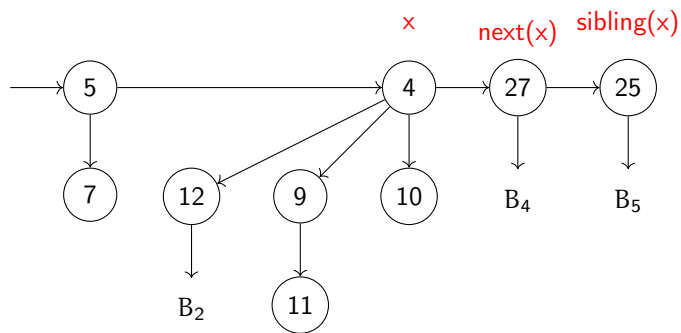
$$\begin{array}{ccccccc}
 & & & & 1 & 1 & 1 \\
 & & & 1 & 1 & 0 & 0 \\
 & & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\
 \hline
 & & & & & & 0
 \end{array}$$

2. Passo 2:



$$\begin{array}{ccccccc}
 & & & & 1 & 1^1 & 1 \\
 & & & 1 & 1 & 0 & 0 \\
 & & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\
 \hline
 & & & & & & 1 & 0
 \end{array}$$

3. Passo 3:



$$\begin{array}{ccccccc}
 & & & & 1 & 1^1 & 1^1 & 1 \\
 & & & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\
 \hline
 & & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0
 \end{array}$$

L'unione di due heap binomiali ha complessità  $O(\log n)$ .

### 5.7.3 Inserimento

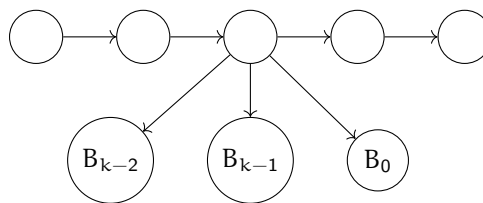
L'inserimento si può vedere come l'unione tra un heap binomiale e un heap binomiale con un solo nodo.

$$\begin{array}{cccccc}
 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
 & & & & & 1 \\
 \hline
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
 \end{array}$$

Anche l'inserimento ha complessità  $O(\log n)$ .

#### 5.7.4 Rimozione

- Se si vuole rimuovere il minimo elemento di un heap binomiale bisogna rimuovere una radice. Sappiamo che i figli di una radice sono tutti heap binomiali di dimensione minore.



La complessità per rimuovere il minimo elemento è  $O(\log n)$ .

Per rimuovere un nodo arbitrario si usa la *reduce* diminuendo il valore della chiave del nodo e facendolo salire fino a che non arriva alla radice eliminando il nodo.

#### 5.7.5 Riduzione

La riduzione prende un nodo, lo abbassa (diminuendo il valore della chiave) e gli assegna la chiave  $a$ , mantenendo le proprietà di un heap.

La proprietà dello heap viene mantenuta rispetto ai figli, ma non rispetto al padre. Se la chiave del padre è maggiore di quella del figlio, si scambiano le chiavi e si fa salire il nodo fino a che non si rispettano le proprietà dello heap.

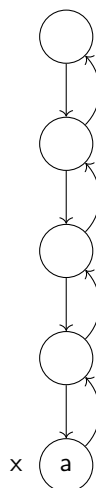


Figura 11: Riduzione della chiave di un nodo

La complessità della riduzione è  $O(\log n)$ .

#### 5.7.6 Divisione

Per dividere un heap binomiale mantenendo la differenza di nodi tra le due parti al più uno bisogna mantenere da parte il nodo di dimensione 0 e dividere il resto. Il nodo da parte verrà poi riaggiunto ad una delle due lista utilizzando la union.

## 6 Tecniche di programmazione

Fin'ora abbiamo utilizzato la tecnica del **divide et impera**, cioè dividere il problema in parti più piccole e risolverle con lo stesso algoritmo per poi unirle per ottenere il risultato. Questa non è l'unica tecnica di programmazione esistente, ce ne sono molte altre, ad esempio la **programmazione greedy**, cioè prendere le decisioni il prima possibile e sperare che siano le migliori, oppure la **programmazione dinamica**, cioè creare un'infrastruttura prima di poter prendere una decisione.

### 6.1 Programmazione dinamica

Prendiamo ad esempio il problema della **moltiplicazione di matrici**. Sappiamo che se abbiamo due matrici  $A$  di dimensione  $n \times m$  e  $B$  di dimensione  $m \times l$ , il prodotto tra le due matrici avrà complessità  $\Theta(nml)$ .

Se volessimo moltiplicare 3 matrici:  $A_1 \cdot A_2 \cdot A_3$  di dimensione:

$$A_1 : 10 \times 100$$

$$A_2 : 100 \times 5$$

$$A_3 : 5 \times 50$$

possiamo sfruttare la proprietà associativa:

$$(A_1 \cdot A_2) \cdot A_3 = A_1 \cdot (A_2 \cdot A_3)$$

Solo che il numero di operazioni nei due casi è diverso, quindi per rendere minimo il numero di operazioni è più conveniente fare:  $(A_1 \cdot A_2)A_3$  perchè:

$$(A_1 \cdot A_2)A_3 \quad 10 \times 100 \times 5 + 10 \times 5 \times 50 = 5000 + 2500 = 7500$$

$$A_1(A_2 \cdot A_3) \quad 100 \times 5 \times 50 + 10 \times 100 \times 50 = 25000 + 50000 = 75000$$

Supponiamo di avere un insieme di matrici  $A_1, A_2, \dots, A_n$ , vogliamo trovare la **parentesizzazione** ottimale per minimizzare il numero di operazioni.

Un modo per affrontare il problema è quello di provare tutte le combinazioni di parentesi e vedere quale è la migliore.

C'è per forza una moltiplicazione che dovrà essere eseguita per ultima, quindi distinguiamo  $k$  come il punto in cui verrà fatta l'ultima moltiplicazione.

$$(A_1 \cdots A_k) \cdot (A_{k+1} \cdots A_n)$$

Il numero modi per moltiplicare le matrici è dato dal numero di modi per moltiplicare le matrici  $A_1 \dots A_k$  e le matrici  $A_{k+1} \dots A_n$ .

$$C(n) = \sum_{k=1}^{n-1} C(k) + C(n-k) \in \Omega\left(\frac{4^n}{n^{\frac{3}{2}}}\right)$$

Supponiamo che qualcuno ci dica il valore ottimo di  $k$ , allora è sicuro che il modo in cui vengono moltiplicate le matrici  $(A_1 \dots A_k)$  e  $(A_{k+1} \dots A_n)$  è ottimale:

$$\underbrace{(A_1 \dots A_k)}_{\text{Ottimo}} \cdot \underbrace{(A_{k+1} \dots A_n)}_{\text{Ottimo}}$$

Il numero di moltiplicazioni effettuate è dato da:

$$\begin{aligned} N(A_1 \dots A_n) &= \\ &= N(A_1 \dots A_k) + N(A_{k+1} \dots A_n) + \text{Costo ultima moltiplicazione} \\ &= N(A_1 \dots A_k) + N(A_{k+1} \dots A_n) + \text{rows}(A_1) \cdot \text{cols}(A_k) \cdot \text{cols}(A_n) \end{aligned}$$

Se  $k$  è ottimo, allora  $N(A_1 \dots A_k)$  e  $N(A_{k+1} \dots A_n)$  sono ottimi perchè il risultato viene sommato e se non fossero ottimi il risultato finale non sarebbe ottimo. Il problema è che non sappiamo quale sia il valore di  $k$  ottimo.

Un possibile algoritmo per trovare  $k$  è il seguente:

```

1 // P e' un vettore che descrive le matrici
2 // P[0] = rows(A1)
3 // P[i] = cols(Ai)
4 // Quindi Ai ha dimensione P[i-1] x P[i]
5 // i e' l'indice di partenza
6 // j e' l'indice di fine
7 matrix_chain_order(P,i,j)
8   if i == j
9     return 0
10  else
11    m <- +inf
12    for k <- i to j-1
13      m <- min(m,
14        matrix_chain_order(P,i,k) +
15        matrix_chain_order(P,k+1,j) +
16        P[i-1]*P[k]*P[j])
17    return m

```

Questo algoritmo ha una complessità esponenziale.

Cerchiamo di migliorare l'algoritmo, implementando l'**albero di ricorrenza**, cioè un albero i cui nodi rappresentano le chiamate ricorsive dell'algoritmo, identificate dai parametri  $i$  e  $j$ .

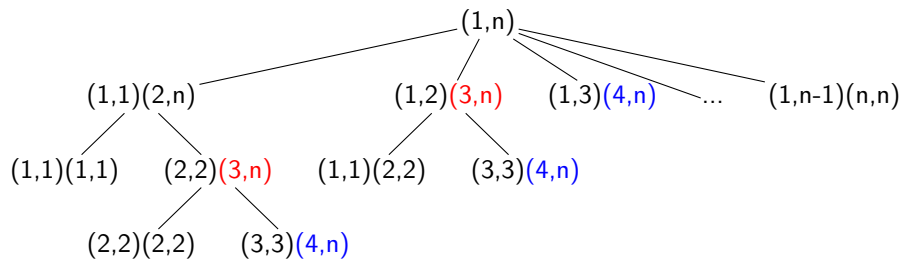


Figura 12: Albero di ricorrenza

Notiamo che ci sono molte chiamate ricorsive ripetute, ad esempio  $(4, n)$ , e questo aumenta la complessità dell'algoritmo inserendo istanze del problema che abbiamo già affrontato. Al massimo ci saranno  $n^2$  istanze di un problema.

Anziché risolvere il problema ogni volta che lo incontriamo, possiamo risolvere ogni singolo problema una sola volta:

```

1 matrix_chain_order(P)
2   n <- length(p) - 1
3   for i <- 1 to n // n
4     // La moltiplicazione di una sola matrice costa 0 perché non c'
      // è nulla da moltiplicare
5     M[i,i] <- 0 // Matrice che salva tutte le soluzioni (i,j)
6
7   for l <- 2 to n // n --*
8     for i <- 1 to n - l + 1 // n --*
9       j <- i + l - 1 // n^3
10      M[i,j] <- +inf // |
11      for k <- i to j - 1 // n --*
12        M[i,j] <- min(M[i,j],
13          M[i,k] + M[k+1,j] + P[i-1]*P[k]*P[j])
14
15  return m[1,n]
```

Questo ci dice quante moltiplicazioni sono necessarie per moltiplicare tutte le matrici, però per sapere la posizione dell'ultima moltiplicazione da fare invece si può riscrivere l'algoritmo precedente come:

```

1 matrix_chain_order(P)
2   ...
3   for k <- i to j - 1
4     m <- M[i,k] + M[k+1,j] + P[i-1]*P[k]*P[j]
5     if m < M[i,j]
6       m[i,j] <- m // Numero moltiplicazioni
7       s[i,j] <- k // Indice dell'ultima moltiplicazione
8   ...
```

La complessità di questo algoritmo è  $O(n^3)$ .

L'algoritmo precedente scritto in modo iterativo si potrebbe anche scrivere ricorsivamente e l'idea è che prima di calcolare il risultato si controlla se è già stato calcolato e si utilizza quello, altrimenti si calcola e si salva il risultato.

```

1 matrix_chain_order(P)
2   for i <- 1 to n
3     for j <- 1 to n
4       M[i,j] <- +inf
5
6   matrix_chain_order_aux(P,1,n)
```

```

7
8
9 matrix_chain_order(P,i,j)
10   if M[i,j] != +inf
11     return M[i,j]
12   else
13     if i == j
14       M[i,j] <- 0
15     else
16       m <- +inf
17       for k <- i to j-1
18         m <- min(m,
19           matrix_chain_order(P,i,k) +
20           matrix_chain_order(P,k+1,j) +
21           P[i-1]*P[k]*P[j])
22       M[i,j] <- m
23
24   return M[i,j]

```

Per ogni istanza del problema si calcola una sola volta il risultato, quindi la complessità è  $O(n^3)$ .

**Definizione 6.1.** La tecnica di memorizzare i risultati già calcolati si chiama **memoizzazione**.