

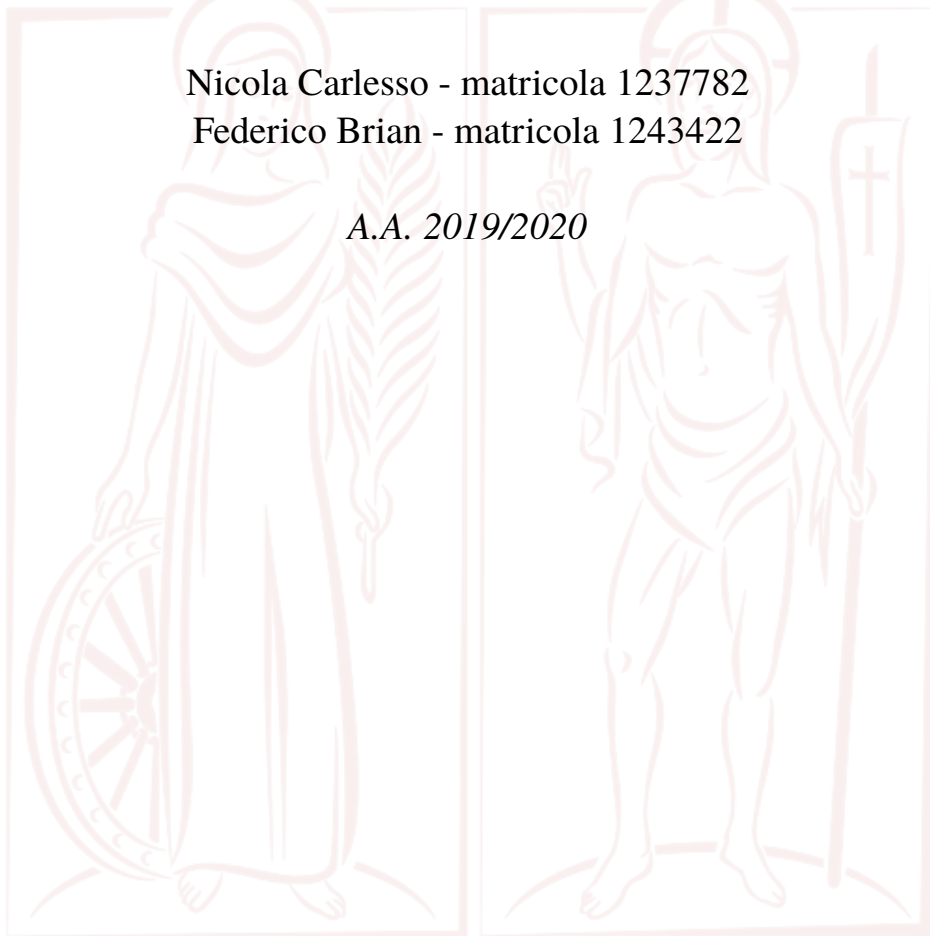
Relazione di Algoritmi Avanzati

Laboratorio 2 - Traveling Salesman Problem

Nicola Carlesso - matricola 1237782

Federico Brian - matricola 1243422

A.A. 2019/2020



Indice

1	Introduzione	1
1.1	Problema TSP	1
1.2	Tipologia di distanze	1
2	Scelta del linguaggio di programmazione	2
3	Scelte implementative	2
3.1	Modello	3
3.2	Algoritmi	4
3.3	Main	4
3.4	Test	5
3.5	Documentazione	5
4	Risultati degli algoritmi	6
4.1	Domanda 1	6
4.1.1	Svolgimento	6
4.2	Held-Karp	6
4.2.0.1	Held-Karp con 1 minuto	7
4.2.0.2	Held-Karp con 5 minuti	7
4.2.0.3	Held-Karp con 10 minuti	8
4.2.0.4	Conclusioni	8
4.3	CheapestInsertion	9
4.4	TriangleTSP	10
5	Conclusioni	11
5.1	HeldKarp	11
5.2	CheapestInsertion e TriangularTSP	11

Elenco delle figure

1	Calcolo della distanza Euclidea.	1
2	Calcolo della distanza Geografica.	1
3	Esempio di tabella riportante i risultati ottenuti.	6

Elenco delle tabelle

1	Risultati dei tre algoritmi implementati rispetto alla domanda 1	6
2	Risultati dell'algoritmo Held-Karp concedendo 1 minuto	7
3	Risultati dell'algoritmo Held-Karp concedendo 5 minuti	8
4	Risultati dell'algoritmo Held-Karp concedendo 10 minuti	8
5	Rapporto Errore-(Tempo di computazione) tra CheapestInsertion e TriangularTSP	11

1 Introduzione

Il presente documento descrive le scelte architettureali ed implementative del secondo elaborato di laboratorio del corso di Algoritmi Avanzati. Di seguito, verrà offerta una panoramica sul lavoro svolto dagli studenti Nicola Carlesso e Federico Brian, riguardante lo studio ed il confronto di tre diversi algoritmi visti a lezione per la risoluzione del *Travelling Salesman Problem*¹, definito come segue.

1.1 Problema TSP

*“Date le coordinate x, y di N punti nel piano (i vertici) ed una funzione di peso $w(u, v)$ definita per tutte le coppie di punti (gli archi), trovare il ciclo semplice di peso minimo che visita tutti gli N punti. La funzione peso $w(u, v)$ è definita come la distanza Euclidea o Geografica tra i punti u e v . La funzione peso è simmetrica e rispetta la **disuguaglianza triangolare**².”*

1.2 Tipologia di distanze

La distanza tra due punti u e v può essere:

- * **Euclidea:** dati due punti $(x_a; y_a)$ e (x_b, y_b) la distanza tra di loro è calcolata come segue, arrotondando all'intero più vicino:

```
public static Integer euclidean(double xa, double ya, double xb, double yb){
    return Integer.valueOf((int) (Math.sqrt(Math.pow(xa - xb, 2) + Math.pow(ya - yb, 2)) + 0.5));
}
```

Figura 1: Calcolo della distanza Euclidea.

- * **Geografica:** se TSP è un problema da risolvere con distanze geografiche, allora i punti si trovano nella superficie terrestre, di raggio 6378.388 km. Le loro coordinate indicano la latitudine e la longitudine del corrispondente punto sul pianeta Terra: di seguito viene riportato il metodo utilizzato per calcolare questo tipo di distanza.

```
public static Integer geo(double xa, double ya, double xb, double yb){
    xa = toRad(xa);
    ya = toRad(ya);
    xb = toRad(xb);
    yb = toRad(yb);

    double RRR = 6378.388;

    double q1 = Math.cos( ya - yb );
    double q2 = Math.cos( xa - xb );
    double q3 = Math.cos( xa + xb );
    return (int) ( RRR * Math.acos( 0.5*((1.0+q1)*q2 - (1.0-q1)*q3) ) + 1.0);
}

private static Double toRad(double x) {
    double PI = 3.141592;
    int deg = (int) x;
    double min = x - deg;
    return PI * (deg + 5.0 * min/3.0)/180.0;
}
```

Figura 2: Calcolo della distanza Geografica.

¹d'ora in poi TSP

² $\forall u, v, w \in V$ vale che $c(u, v) \leq c(u, w) + c(w, v) \Rightarrow c(< u, v >) \leq c(< u, w, v >)$

Gli algoritmi da implementare per risolvere il problema rientrano in tre categorie:

1. **Algoritmi esatti**, ovvero l'algoritmo di **Held e Karp**³ che ritorna la soluzione esatta del problema TSP con complessità $\mathcal{O}(n^2 2^n)$;
2. **Euristiche costruttive**, cioè algoritmi che non possono dare nessun vincolo sulla soluzione ritornata. Essi arrivano alla soluzione procedendo un vertice alla volta seguendo delle regole prefissate. In particolar modo vedremo l'euristica **Cheapest Insertion**⁴ che, in caso la disuguaglianza triangolare venga rispettata, si dimostra approssimare la soluzione al più di un fattore 2. Generalmente, quando la disuguaglianza triangolare non viene rispettata, è possibile dimostrare che questo algoritmo permette di trovare una soluzione $\log(n)$ -approssimata a TSP.
3. **Algoritmo 2-approssimato**, cioè un algoritmo di approssimazione che può ritornare una soluzione al più 2 volte peggiore di quella ritornata da un algoritmo esatto. Dato che la disuguaglianza triangolare viene rispettata, vedremo l'algoritmo **Triangle TSP**⁵ che risolve il problema TSP con un algoritmo 2-approssimato attraverso la costruzione di un MST⁶.

Infine, verranno esposti ed adeguatamente discussi i risultati ottenuti.

2 Scelta del linguaggio di programmazione

Per lo svolgimento di questo *assignment*, come per il precedente, è stato scelto Java nella sua versione 8 come linguaggio di programmazione. La scelta è derivata, principalmente, da due fattori:

- * è stato sia studiato durante il percorso di laurea triennale, sia approfondito autonomamente da entrambi;
- * in Java, è possibile utilizzare riferimenti ad oggetti piuttosto che oggetti stessi. Questo ha permesso un'implementazione degli algoritmi che si potrebbe definire "accademica", perché coerente con la complessità dichiarata e semanticamente vicina allo pseudocodice visto a lezione. Sono infatti evitate complessità aggiuntive derivanti da inavvertite copie profonde.

3 Scelte implementative

Come specificato nel precedente paragrafo, nell'implementazione dei tre algoritmi si è cercato di creare meno oggetti possibile usando quasi esclusivamente riferimenti. Questo ha permesso non solo un risparmio in termini di memoria ma anche di prestazioni: nell'implementazione abbiamo infatti cercato di creare strutture dati che risparmiassero quanta più memoria possibile, dato che l'algoritmo *HeldKarp*, oltre ad essere computazionalmente oneroso, richiede anche l'utilizzo di molta memoria. Difatti, nell'eseguire l'esecuzione del *main*, è necessario richiedere l'utilizzo di più memoria RAM per il corretto funzionamento dell'algoritmo attraverso il flag `-Xmx6500m`. Benché il codice sia stato adeguatamente commentato⁷, di seguito è riportata una *summa* delle caratteristiche di ogni classe implementata che non compaiono nella documentazione, ripartita per package.

³d'ora in poi *HeldKarp*

⁴d'ora in poi *CheapestInsertion*

⁵d'ora in poi *TriangleTSP*

⁶*Minimum Spanning Tree*

⁷come si può vedere dal Javadoc, automaticamente generato e accessibile all'interno della cartella `JavaLab2/doc/`, aprendo il file `index.html` con il browser preferito

3.1 Modello

Le componenti del modello, vale a dire le classi presenti all'interno del package chiamato `lab2.model`, comprendono tutte le strutture dati utilizzate nella risoluzione dei tre problemi assegnati.

- * **AdjacentMatrix**: matrice di adiacenza usata per rappresentare i grafi, che si presenta come una normale matrice $n \times n$ simmetrica rispetto alla sua diagonale nulla⁸. Gli algoritmi `HeldKarp`, `CheapestInsertion` e `TriangleTSP`, difatti, la trattano come tale. In verità è stata implementata come matrice triangolare inferiore, contenendo $n - 1$ array di lunghezza crescente: questa scelta è stata fatta per risparmiare memoria, evitando di costruire una matrice quadrata. Tale classe presenta i metodi standard `get(u,v)` e `set(u,v)`, per ottenere ed impostare il peso del lato (u,v) , ed un metodo `getMinAdjacentVertexWeightIndex(v)` per ottenere il lato con peso minore che ha per estremo il vertice v ;
- * **Graph**: contiene esclusivamente una matrice di adiacenza, dato che tutte le informazioni necessarie dei nodi (i quali iniziano ad essere contati da 0) e dei lati possono essere ottenute analizzando la matrice di adiacenza;
- * **Node**: classe non utilizzata direttamente da *Graph*, ma usata per costruire il MST (Minimum Spanning Tree) per l'algoritmo di 2-approssimazione richiesto. Essa dunque contiene solo l'*ID*, un riferimento al nodo padre e una lista di riferimenti ai nodi figli;
- * **Edge**: come la classe *Node*, anche *Edge* viene utilizzata solo per costruire l'MST attraverso l'algoritmo *Kruskal* implementato nello scorso assignment.
- * **DisjointSet**: questa struttura dati gestisce partizioni di oggetti, rappresentati con un numero intero che li identifica. Ogni oggetto può stare in una sola delle partizioni degli insiemi disgiunti presenti. La struttura dati è utilizzata all'interno dell'algoritmo *Kruskal*.
- * **TSP**: contiene tutti gli algoritmi richiesti dagli assignment, più le funzioni ausiliarie per il corretto funzionamento di questi ultimi, in particolar modo è importante menzionare:
 - `copyWithoutV`: funzione *utility* di `HeldKarpCore` che serve a ricreare l'insieme $S \setminus \{v\}$, necessaria all'algoritmo di Held e Karp per proseguire con le chiamate ricorsive;
 - `getResults`: funzione che ritorna $(d[0, V], T)$, cioè il valore del ciclo hamiltoniano di costo minimo disponibile dopo T minuti di computazione;
 - `preorder`: metodo utilizzato per l'algoritmo di 2-approssimazione *TrangularTSP*, per ottenere una lista pre-ordinata dei nodi del MST ottenuto dal metodo *Kruskal*.

TSP contiene inoltre tre campi dati, utilizzati dall'algoritmo `HeldKarp`:

- **d**: struttura dati che rappresenta $(d[v, S], cost)$, cioè che mappa la coppia $\langle v, S \rangle$ con il corrispondente peso del cammino minimo che parte da 0 e termina in v , visitando tutti i nodi in S . Per memorizzare il valore di $d[v, S]$, quindi, si inserisce una nuova chiave $\langle v, S \rangle$ in **d** e la si mappa con il rispettivo costo minimo calcolato. Per recuperare un valore, invece, si accede alla struttura dati con la chiave $\langle v, S \rangle$, chiedendo quale valore sia stato ivi memorizzato. Nell'implementazione, quindi, è stato scelto di rappresentarla con il tipo `HashMap<Pair<Integer, ArrayList<Integer>>, Integer>`;
- **pi**: struttura dati dello stesso tipo e del tutto simile a **d**, che mappa la medesima chiave con un valore intero che rappresenta il nodo predecessore di v ;

⁸poiché non esistono cappi

- `w`: variabile segnaposto della matrice di adiacenza del grafo su cui calcolare `HeldKarp`, incapsulata nella classe `TSP` al solo scopo di offrire maggior leggibilità e coerenza con lo pseudocodice visto in classe.

3.2 Algoritmi

Il package `lab2.algorithm` contiene un'unica classe, `TSP`, che permette di risolvere il problema TSP utilizzando gli algoritmi `HeldKarp`, `CheapestInsertion` e `TrangularTSP`.

- * `HeldKarp`: funzione adibita all'inizializzazione e alla chiamata dell'algoritmo di Held e Karp. Si occupa di preparare l'ambiente necessario alla funzione `HeldKarpCore` e di catturare eventuali eccezioni lanciate dalla JVM⁹ dovute alla mancanza di memoria (`OutOfMemoryException`);
- * `HeldKarpCore`: funzione principale che implementa l'algoritmo di Held e Karp, del tutto coerente con lo pseudocodice visto a lezione. L'unica differenza è, naturalmente, la gestione degli *interrupt*: se una certa istanza di `TSP` dovesse metterci più del tempo a disposizione T^{10} , l'algoritmo interrompe immediatamente ogni ulteriore visita del grafo lasciando comunque l'opportunità di memorizzare i risultati finora calcolati. Questo comporta, a volte, un ritardo sui tempi di computazione consentiti: ciò non è visto dagli studenti come un problema poiché, di fatto, la computazione viene interrotta quindi non si è in presenza di alcun *cheat*.
- * `CheapestInsertion`: l'algoritmo fa uso del metodo `getMinAdjacentVertexWeightIndex` per trovare il lato col peso minore che ha come estremo il nodo 0. Viene dunque creato un array di nodi che rappresenta il cammino per TSP ed un array coi nodi ancora non visitati. L'algoritmo dunque esegue un ciclo fino a quando il cammino non raggiunge lunghezza $n + 1$ ed trova per ogni nodo non visitato e per ogni lato presente nel cammino trovato fino a quel momento, il minore `minCost`, indicando che nodo `k` non visitato deve essere inserito nel cammino e in che posizione. L'algoritmo ha complessità $\mathcal{O}(n^3)$;
- * `TrangularTSP`: l'algoritmo, attraverso l'algoritmo *Kruskal*, ottiene prima il MST sotto forma di *Node*, un nodo che possiede la lista di puntatori ai nodi figli, dopodiché ottiene la lista pre-ordinata dei nodi dell'albero ottenuto. L'algoritmo ha complessità $\mathcal{O}(m \lg n + n)$.

3.3 Main

Il package `lab1.main` contiene la classe `Main`, responsabile dell'esecuzione degli algoritmi. All'interno vi sono tre funzioni:

- * la funzione `Main` che fa partire il calcolo oppure il test del costo della soluzione per TSP secondo l'algoritmo desiderato;
- * la funzione `compute` che si occupa di calcolare il costo della soluzione per TSP di ogni grafo presente nel dataset, di salvarlo in un file di testo e di proseguire al test dello stesso. Per utilizzare/testare i tre diversi algoritmi, inserire all'interno della funzione `compute` una tra le seguenti stringhe:
 - `HeldKarp` per l'algoritmo di Held e Karp;
 - `Heuristic` per l'algoritmo di 2-approssimazione che sfrutta l'euristica strutturale della disuguaglianza triangolare;

⁹Java Virtual Machine

¹⁰come avviene nella maggior parte dei casi

- 2Approx l'algoritmo che attraverso il calcolo del MST calcola una soluzione per TSP con 2-approssimazione.
- * la funzione `test`, che esegue alcuni, banali, test sugli algoritmi utilizzati come *Kruskal*.
- * le funzioni `printHeapInfo` e `formatSize` che sono adibite, rispettivamente, a fornire informazioni e rappresentare l'utilizzo di memoria degli algoritmi.

3.4 Test

Il package `lab2.test` contiene due classi:

- * `TestTSP` il cui scopo è di testare la bontà delle soluzioni ritornate con i tre algoritmi sviluppati e di calcolarne l'eventuale errore relativo;
- * `TestKruskal` che è servita per testare il funzionamento dell'algoritmo di *Kruskal*.

3.5 Documentazione

Il codice, opportunamente commentato, possiede una documentazione auto-generata con la funzionalità `javadoc`: la si può consultare accedendo alla directory `JavaProject/doc` ed aprendo il file `index.html` con il proprio browser preferito.

4 Risultati degli algoritmi

Questa sezione risponderà alla Domanda 1: verranno riportati sotto forma di tabella i risultati dei costi per il problema TSP dei grafi richiesti, il tempo di esecuzione di ogni algoritmo e l'errore relativo rispetto alla soluzione esatta.

4.1 Domanda 1

Eseguite i tre algoritmi che avete implementato (Held-Karp, euristica costruttiva e 2-approssimato) sui 13 grafi del dataset. Mostrate i risultati che avete ottenuto in una tabella come quella sottostante. Le righe della corrispondono alle istanze del problema. Le colonne mostrano, per ogni algoritmo, il peso della soluzione trovata, il tempo di esecuzione e l'errore relativo calcolato come $(SoluzioneTrovata - SoluzioneOttima)/SoluzioneOttima$. Potete aggiungere altre informazioni alla tabella che ritenete interessanti.

Istanza	Held-Karp			Euristica costruttiva			2-approssimato		
	Soluzione	Tempo (s)	Errore	Soluzione	Tempo (s)	Errore	Soluzione	Tempo (s)	Errore
burma14.tsp	3323	0,59	0,00%						
ulysses16.tsp									
berlin52.tsp									
kroA100.tsp									
ch150.tsp									
gr202.tsp									
pcb442.tsp									

Figura 3: Esempio di tabella riportante i risultati ottenuti.

4.1.1 Svolgimento

Istanza	Held-Karp			Cheapest Insertion			TriangleTSP		
	Soluzione	Tempo (s)	Errore (%)	Soluzione	Tempo (s)	Errore (%)	Soluzione	Tempo (s)	Errore (%)
berlin52.tsp	17441	120,0174	131,25	9004	0,0096	19,38	10402	0,0074	37.92
burma14.tsp	3323	0,2029	0,0	3588	0,0003	7,97	4003	0,0002	20.46
ch150.tsp	47935	120,95	634,30	7998	0,0678	22,52	9126	0,02343	39.80
d493.tsp	111947	120,4769	219,83	39969	0,4976	14,19	45300	0,1063	29.42
dsj1000.tsp	551274242	120,0012	2854,36	22291165	7,5382	19,46	25526005	0,5358	36.80
eil51.tsp	986	120,0005	131,46	494	0,0006	15,96	614	0,0009	44.13
gr202.tsp	55127	119,9998	37,26	46480	0,0406	15,74	52615	0,0189	31.01
gr229.tsp	176212	120,0008	30,91	153896	0,0493	14,33	179335	0,0249	33.23
kroA100.tsp	164223	120,0003	671,65	24942	0,0038	17,20	30536	0,0014	43.48
kroD100.tsp	144125	120,0012	576,83	25204	0,0036	18,36	28599	0,0017	34.31
pcb442.tsp	202233	120,4061	298,27	60834	0,3954	19,80	68841	0,0901	35.57
ulysses16.tsp	6859	0,5584	0,0	7368	0,0001	7,42	7788	0,0001	13.54
ulysses22.tsp	7013	59,4115	0,0	7709	0,0001	9,92	8308	0,0001	18.47

Tabella 1: Risultati dei tre algoritmi implementati rispetto alla domanda 1

4.2 Held-Karp

Mobilitati da curiosità abbiamo provato a variare il tempo di calcolo a disposizione dell'algoritmo di Held e Karp, per vedere se le soluzioni che impiegavano più di due minuti ritornavano una soluzione

migliore, oppure se, con meno tempo a disposizione, la soluzione ritornata risultava peggiore. Le tabelle sottostanti riportano quello che è stato ottenuto.

4.2.0.1 Held-Karp con 1 minuto

Istanza	Held-Karp		
	Soluzione	Tempo (s)	Errore (%)
berlin52	17441	60,706	131,25
burma14	3323	0,1014	0,00
ch150	47935	59,999	634,29
d493	111947	60,598	219,83
dsj1000	551274242	60,001	2854,35
eil51	986	60,000	131,45
gr202	55127	60,000	37,26
gr229	176212	59,999	30,91
kroA100	165018	60,000	675,38
kroD100	146158	59,999	586,38
pcb442	202517	59,999	298,82
ulysses16	6859	0,3550	0,00
ulysses22	7013	53,181	0,00

Tabella 2: Risultati dell'algoritmo Held-Karp concedendo 1 minuto

4.2.0.2 Held-Karp con 5 minuti

Istanza	Held-Karp		
	Soluzione	Tempo (s)	Errore (%)
berlin52	17441	303,951	131,25
burma14	3323	0,15270	0,00
ch150	47935	316,682	634,29
d493	111947	308,136	219,83
dsj1000	551274242	306,492	2854,35
eil51	984	300,463	130,98
gr202	55127	305,269	37,26
gr229	176212	312,290	30,91
kroA100	162606	308,605	664,05
kroD100	144125	314,625	576,83
<i>Continua nella pagina seguente</i>			

Tabella 3 – <i>continuazione della pagina precedente</i>			
Istanza	Held-Karp		
	Soluzione	Tempo (s)	Errore (%)
pcb442	202044	300,972	297,89
ulysses16	6859	0,40430	0,00
ulysses22	7013	57,7751	0,00

Tabella 3: Risultati dell'algoritmo Held-Karp concedendo 5 minuti

4.2.0.3 Held-Karp con 10 minuti

Istanza	Held-Karp		
	Soluzione	Tempo (s)	Errore (%)
berlin52	17441	603,349	131,25
burma14	3323	0,15163	0,00
ch150	47885	606,479	633,53
d493	111947	603,658	219,83
dsj1000	550719964	611,369	2851,38
eil51	963	601,293	126,05
gr202	55125	605,391	37,26
gr229	175982	603,008	30,74
kroA100	161443	699,899	658,58
kroD100	143960	605,555	576,05
pcb442	202044	603,171	297,89
ulysses16	6859	0,40640	0,00
ulysses22	7013	58,3268	0,00

Tabella 4: Risultati dell'algoritmo Held-Karp concedendo 10 minuti

4.2.0.4 Conclusioni

4.3 CheapestInsertion

L'algoritmo opera con l'assunzione che il grafo dato rispetti la disuguaglianza triangolare, inserendo iterativamente un nodo k all'interno del circuito parziale per la soluzione a TSP per $n - 2$, $n = |V|$ volte con V l'insieme dei nodi del grafo. In particolare, dato $k \notin C \subseteq V$, con C l'insieme dei nodi nel circuito parziale, e i nodi $u, v \in C$ t.c. $(u, v) \in P$, con P l'insieme dei lati nel circuito parziale, k viene scelto ed inserito nel circuito parziale tra i nodi u e v minimizzando: $w(u, k) + w(k, v) - w(u, v)$.

La complessità dell'algoritmo si può calcolare analizzando i tre cicli `for` nell'algoritmo. Il ciclo più esterno viene eseguito $n - 2$ volte. I due cicli più interni scorrono tutti i nodi $k \notin C$ e i lati $(u, v) \in P$. È possibile vedere come, ad ogni iterazione del ciclo `for` più esterno il numero di iterazioni dei due cicli più interni, rispettivamente diminuiscano ed aumentino; in particolare il numero totale di iterazioni compiute dai tre cicli `for` è: $\sum_{i=2}^{n-1} (n-i)i = \frac{1}{6}(n^3 - 7n + 6)$. Dunque l'algoritmo CheapestInsertion possiede una complessità di $\mathcal{O}(n^3)$. Questo risultato risulta evidente analizzando i tempi di risoluzione dei vari grafi in Tabella 1, il quale aumenta esponenzialmente all'aumentare della taglia del grafo, passando dai 0.004 s per un grafo da 100 nodi, a 7.5 s per un grafo da 1000 nodi.

L'algoritmo è 2-approssimato per TSP, anche se nei grafi forniti l'errore relativo massimo è del 22%, dimostrando dunque di essere molto efficace.

4.4 TriangleTSP

L'algoritmo crea il circuito per TSP attraverso la lista preordinata dei nodi del MST ottenuto dall'algoritmo `Kruskal`. Tale algoritmo costruisce un albero la cui radice è un'istanza della classe `Node`, che non ha niente a che fare con la classe `Graph` ed è utilizzata esclusivamente dall'algoritmo `Kruskal`. Un discorso analogo vale per la classe `Edge` usata solamente dall'algoritmo `Kruskal` per ottenere una lista ordinata per peso dei lati del grafo.

Dato $n = |V|$ e $m = |E|$, l'algoritmo `TriangleTSP`, dato utilizza `Kruskal`, ha una complessità $\mathcal{O}(m \log n)$.

L'algoritmo è 2-approssimazione per TSP, e per i grafi forniti ottiene risultati con un errore relativo al massimo del 45%, impiegando un tempo di esecuzione di 0.5 secondi. Dunque un algoritmo molto efficiente.

5 Conclusioni

In questa sezione sono analizzate le performance dell'algoritmo HeldKarp e viene effettuato un confronto delle performance tra `TriangularTSP` e `CheapestInsertion`.

5.1 HeldKarp

5.2 CheapestInsertion e TriangularTSP

Entrambi gli algoritmi sono una 2-approssimazione per TSP, ma riportano risultati differenti: `CheapestInsertion` richiede più tempo per essere eseguito rispetto a `TriangularTSP`, ma ottiene un errore relativo minore. Per capire dunque quale dei due algoritmi sia più efficiente ed efficace, è possibile osservare la Tabella 5 che mostra il prodotto tra l'errore relativo e il tempo di esecuzione. Facendo una media dei valori è possibile vedere come l'utilizzo di `TriangularTSP` sia più vantaggioso, infatti il prodotto ottenuto per `CheapestInsertion` è 13, mentre per `TriangularTSP` è 2. Questo perché, `TriangularTSP` ottiene in media un errore relativo più alto (32%) rispetto a `CheapestInsertion` (16%), ma possiede un tempo di esecuzione molto più basso. Dunque per grafi di grande taglia è consigliabile utilizzare `TriangularTSP`.

N.	Name Graph	CheapestInsertion ratio	TriangularTSP ratio
1	berlin52	0.2126	0.3175
2	burma14	0.0022	0.0042
3	ch150	1.6794	1.0099
4	d493	8.0955	3.1753
5	dsj1000	153.453	15.9731
6	eil51	0.1554	0.0245
7	gr202	1.3764	0.5801
8	gr229	0.7594	0.6749
9	kroA100	0.0702	0.0639
10	kroD100	0.0744	0.0674
11	pcb442	7.7838	2.9663
12	ulysses16	0.0002	0.0008
13	ulysses22	0.0009	0.0017
	Average	13.36	1.91

Tabella 5: Rapporto Errore-(Tempo di computazione) tra `CheapestInsertion` e `TriangularTSP`