



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

---

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

*Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Informatica*

TESINA DI RICERCA OPERATIVA 2

**TRAVELLING SALESMAN  
PROBLEM**

*Autori*

Raffaele Di Nardo Di Maio 1204879

Cristina Fabris 1205722

---

ANNO ACCADEMICO 2019-2020



# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Istanze e soluzioni del problema</b>	<b>3</b>
2.1	Istanze . . . . .	3
2.2	Soluzioni . . . . .	4
2.2.1	Gnuplot . . . . .	4
<b>3</b>	<b>CPLEX</b>	<b>7</b>



# Introduzione

L'intera tesina verterà sul Travelling Salesman Problem. Quest'ultimo si pone l'obiettivo di trovare un tour ottimo, ovvero di costo minimo, all'intero di un grafo orientato.

In questa trattazione verranno analizzate soluzioni algoritmiche per una sua variante, detta simmetrica, che viene applicata a un grafo completo non orientato.

Di seguito viene riportata la formulazione matematica di tale versione:

$$\begin{cases} \min \sum_{e \in E} c_e x_e \\ \sum_{e \in \delta(v)} x_e = 2 & \forall v \in V \\ \sum_{e \in E(S)} x_e \leq |S| - 1 & \forall S \subsetneq V : |S| \geq 3 \end{cases}$$

Un'istanza di tale problema viene definita normalmente da un grafo, per cui ad ogni nodo viene associata un numero intero (Es.  $\Pi = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ ).

I risolutori che verranno applicati al problema sono di due tipologie:

- **Risolutori esatti**

basati sul Branch & Bound. I più conosciuti sono:

- **IBM ILOG CPLEX**  
gratuito se utilizzato solo a livello accademico.
- **XPRESS**
- **Gurobi**
- **CBC**  
l'unico Open-Source tra questi

- **Risolutori euristici (meta-euristici)**  
algoritmi che forniscono una soluzione approssimata.

Esempio di risolutori: Concorde [2]

William Cook [1]

# Istanze e soluzioni del problema

## 2.1 Istanze

Le istanze del problema, analizzate durante il corso, sono punti dello spazio 2D, identificati quindi da due coordinate  $(x,y)$ . Per generare istanza enormi del problema, si utilizza un approccio particolare in cui viene definito un insieme di punti a partire da un'immagine già esistente.

La vicinanza dei punti generati dipende dalla scala di grigi all'interno dell'immagine (es. generazione di punti a partire dal dipinto della Gioconda[3]). Le istanze che vengono elaborate dai programmi, creati durante il corso, utilizzano il template **TSPlib**. Di seguito viene riportato il contenuto di un file di questa tipologia.

```
1 NAME : esempio
2 COMMENT : Grafo costituito da 5 nodi
3 TYPE : TSP
4 DIMENSION : 5
5 EDGE_WEIGHT_TYPE : ATT
6 NODE_COORD_SECTION
7 1 6734 1453
8 2 2233 10
9 3 5530 1424
10 4 401 841
11 5 3082 1644
12 EOF
```

Listing 2.1: esempio.tsp

Le parole chiave più importanti, contenute in questi file 2.1, sono:

- **NAME**  
seguito dal nome dell'istanza TSPlib
- **COMMENT**  
seguito da un commento associato all'istanza

- **TYPE**  
seguito dalla tipologia dell'istanza
- **DIMENSION**  
seguito dal numero di nodi nel grafo (*num\_nodi*)
- **EDGE\_WEIGHT\_TYPE**  
seguito dalla specifica del tipo di calcolo che viene effettuato per ricavare il costo del tour
- **NODE\_COORD\_SECTION**  
inizio della sezione composta di *num\_nodi* righe in cui vengono riportate le caratteristiche di ciascun nodo, nella forma seguente:  

indice_nodo	coordinata_x	coordinata_y
-------------	--------------	--------------
- **EOF**  
decreta la fine del file

## 2.2 Soluzioni

Una soluzione del problema è una sequenza di nodi che corrisponde ad una permutazione dell'istanza (es.  $S = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  tale che  $x_i = x_j \iff x_i \in \Pi \wedge x_j \in \Pi \wedge x_i! = x_j \forall i \neq j$ ). Poichè in questa variante non esiste alcuna origine, ogni tour può essere descritto da due versi di percorrenza e l'origine può essere un nodo qualsiasi del grafo.

### 2.2.1 Gnuplot

Una volta ottenuta la soluzione del problema di ottimizzazione, viene disegnato il grafo per facilitare all'utente la comprensione della sua correttezza. Per fare ciò viene utilizzato Gnuplot, un programma di tipo command-driven. Per poterlo utilizzare all'interno del proprio programma esistono due metodi:

- Collegare la libreria ed invocare le sue funzioni all'interno del nostro programma
- Collegare l'eseguibile interattivo al proprio programma. In questo caso i comandi deve essere passati all'eseguibile attraverso un file di testo e l'utilizzo di un pipe.



In questa trattazione è stato scelto il secondo metodo. All'interno del file è possibile specificare a Gnuplot le caratteristiche grafiche che deve aver il grafo. Di seguito viene riportato un esempio di tale file.

```

1 set style line 1 \
2   linecolor rgb '#0000ff' \
3   linetype 1 linewidth 1 \
4   pointtype 7 pointsize 0.5
5
6 plot 'solution.dat' with linespoints linestyle 1 title "Solution"
7   ,'' using 1:2:( sprintf("%d", $3)) notitle with labels center
8   offset 1
9
10 set term png
11 set output "solution.png"
12 replot

```

Listing 2.2: style.txt

Nell'esempio sopra riportato, nella prima parte viene definito lo stile, il colore delle linee e la tipologia di punti, che verranno in seguito visualizzati all'interno del grafico prodotto.

In seguito viene effettuato il plot del grafo in una finestra, utilizzando il primo e secondo valore di ciascuna riga del file **solution.dat** come coordinate mentre il terzo valore viene utilizzato come etichetta.

Il file **solution.dat** contiene le informazioni relative alla soluzione del grafico in cui ciascuna riga ha la seguente forma:

coordinata_x	coordinata_y	posizione_in_tour
--------------	--------------	-------------------

**coordinata\_x** rappresenta la coordinata x del nodo;

**posizione\_in\_tour** rappresenta la coordinata y del nodo;

**posizione\_in\_tour** rappresenta l'ordine del nodo all'interno del tour, assunto come nodo di origine il nodo 1.

Il grafico viene generato dal comando **plot**, leggendo tutte le righe non vuote e disegnando un punto nella posizione (**coordinata\_x,coordinata\_y**) del grafico 2D. In seguito viene tracciata una linea solo tra coppie di punti, legati a righe consecutive non vuote all'interno di **solution.dat**.

Attraverso le istruzioni riportate nelle righe 10-12 di **style.txt**, viene invece salvato il grafico appena generato nell'immagine **solution.png**.

Di seguito vengono riportate le varie fasi necessarie alla definizione di un pipe e al passaggio di questo al programma GNUplot:

- **Definizione del pipe**

```
1 FILE* pipe = _popen(GNUPLOT_EXE, "w");
```

dove **GNUPLOT\_EXE** è una stringa composta dal percorso completo dell'eseguibile di GNUplot, seguita dall'argomento **-persistent** (es. *"D:/Programs/GNUplot/bin/gnuplot -persistent"*).

- **Passaggio delle istruzioni a GNUplot**

```
2 f = fopen("style.txt", "r");
3
4 char line[180];
5 while (fgets(line, 180, f) != NULL)
6 {
7     fprintf(pipe, "%s ", line);
8 }
9
10 fclose(f);
```

viene passata una riga alla volta, del file **style.txt**, a GNUplot mediante il pipe precedentemente creato.

- **Chiusura del pipe**

```
11 _pclose(pipe);
```

# CPLEX

Per poter utilizzare gli algoritmi di risoluzione forniti da CPLEX è necessario costruire il modello matematico del problema, legato all'istanza sopra descritta.

CPLEX ha due meccanismi di acquisizione dell'istanza:

1. **modalità interattiva:**  
in cui il modello viene letto da un file precedentemente generato (*model.lp*)
2. **creazione nel programma:**  
il modello viene creato attraverso le API del linguaggio usato per la scrittura del programma

Le strutture utilizzate da CPLEX sono due (vedi Figura 3.1):

- **ENV (enviroment):** contiene i parametri necessari all'esecuzione e al salvataggio dei risultati
- **LP:** contiene il modello che viene analizzato da CPLEX durante la computazione del problema di ottimizzazione

Ad ogni ENV è possibile associare più LP, in modo da poter risolvere in parallelo più problemi di ottimizzazione, ma nel nostro caso ne sarà sufficiente solo uno.

Come prima cosa, per poter costruire il modello da analizzare, è necessario creare un puntatore alle due strutture dati utilizzate da CPLEX.

```
1  int error;  
2  CPXENVptr env = CPXopenCPLEX(&error);  
3  CPXLPptr lp = CPXcreateprob(env, &error, "TSP");
```

Listing 3.1: modelTSP.txt

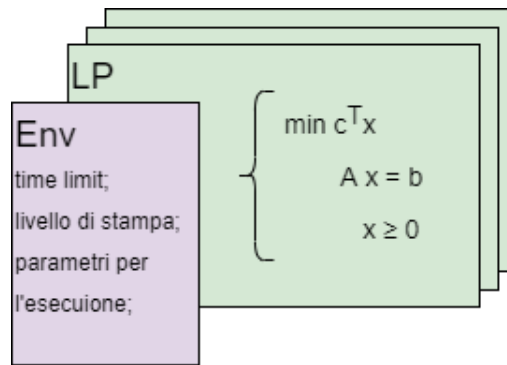


Figura 3.1: Strutture CPLEX

La funzione alla riga 2 alloca la memoria necessaria e riempie la struttura con valori di default. Nel caso in cui non termini con successo memorizza un codice d'errore in *Errore*.

La funziona invocata nella riga successiva, invece, associa la struttura LP all'ENV che gli viene fornito. Il terzo parametro passato, nell'esempio "TSP", sarà il nome del modello creato. Al termine di queste operazioni verrà quindi creato un modello vuoto. All'interno del nostro programma per inizializzarlo è stata costruita la seguente funzione:

```
void cplex_build_model(istanza_problema , env , lv);
```

- istanza\_problema:** puntatore alla struttura che contiene l'istanza del problema (letta dal file TSPLib)
- env:** puntatore di tipo CPXENVptr alla struttura ENV precedentemente creata
- lp:** puntatore di tipo CPXLPptr alla struttura LP precedentemente creata

All'interno di **build\_model()** viene aggiunta una colonna alla volta al modello, definendo quindi anche la funzione obiettivo. Le variabili aggiunte corrispondono agli archi del grafo e per ciascuno di questi viene calcolato il costo come distanza euclidea. La funzione necessaria ad inserire colonne e definire la funzione di costo è la seguente:

```
CPXnewcols(env, lp, num_colonne, costi, lower_bound,
           upper_bound, tipi_variabili, nomi_variabili);
```

- env:** puntatore di tipo CPXENVptr alla struttura ENV precedentemente creata
- lp:** di tipo CPXLPptr, è un puntatore alla struttura LP precedentemente creata
- num\_colonne:** numero di colonne da inserire
- costi:** vettore dei costi relativi agli archi da inserire
- lower\_bound:** vettore contenente i lower bound dei valori assumibili dalle variabili da inserire
- upper\_bound:** vettore contenente gli upper bound dei valori assumibili dalle variabili da inserire
- tipi\_variabili:** vettore contenente la tipologia delle variabili da inserire
- nomi\_variabili:** vettore di stringhe contenenti i nomi delle variabili da inserire

La generica colonna **i**, aggiunta dalla funzione, sarà definita dalle informazioni contenute all'interno della posizione **i** degli array, ricevuti come parametri. Nel programma elaborato durante il corso, viene aggiunta una colonna alla volta all'interno del modello. Per far ciò, è necessario comunque utilizzare riferimenti alle informazioni da inserire, in modo da ovviare il problema riguardante la tipologia di argomenti richiesti, che sono array. Ad esempio, nel nostro caso, la tipologia di una nuova variabile inserita sarà un riferimento al carattere '**B**', che la identifica come binaria.

Per convenzione è stato deciso di etichettare i rami  $(i, j)$ , con  $i \neq j$ , rispettando la proprietà  $i < j$ . In Figura 3.2 è riportato lo schema degli indici che vengono utilizzati per etichettare le variabili.

ù In questa figura le celle  $(i, j)$  bianche, sono quelle effettivamente utilizzate per indicare un arco secondo la convenzione. Il numero all'interno di queste caselle rappresenta invece l'ordine in cui queste variabili vengono inserite nel modello e quindi gli indici associati da CPLEX per accedere alla soluzione.

j i \		0	1	2	3	4	5
0			0	1	2	3	4
1				5	6	7	8
2					9	10	11
3						12	13
4							14
5							

Figura 3.2: Indici della matrice

Per poter inserire il primo insieme di vincoli del problema

$$\sum_{e \in \delta(v)} x_e = 2 \quad \forall v \in V$$

viene invece sfruttata la seguente funzione:

```
CPXnewrows(env, lp, numero_righe, termini_noti,
            tipi_vincoli, range_valori, nomi_vincoli);
```

**env:** puntatore di tipo CPXENVptr alla struttura ENV precedentemente creata

**lp:** puntatore di tipo CPXLPptr alla struttura LP precedentemente creata

**numero\_righe:** numero di righe (vincoli) da inserire

**termini\_noti:** vettore dei termini noti dei vincoli

**tipi\_vincoli:** vettore di caratteri che specifica il tipo di vincoli da inserire. Ogni carattere può assumere:

'L' per vincolo  $\leq$

'E' per vincolo  $=$

'G' per vincolo  $\geq$

'R' per vincolo definito in un intervallo

- range\_valori:** vettore di range per i valori di ogni vincolo  
(nel nostro caso è NULL)
- nomi\_vincoli** vettore di stringhe contenenti i nomi  
delle variabili da inserire

In modo analogo all'inserimento delle colonne, nel nostro programma viene aggiunta una riga alla volta nel modello. L' $i$ -esima riga aggiunta corrisponderà al vincolo imposto sul nodo  $i$ -esimo, imponendo a 1 il coefficiente della variabile  $x_{k,j}$  se  $k = i$   $j = i$  per ogni variabile del modello.

Per ottenere la soluzione ottima del problema di ottimizzazione del problema correlato al modello definito in cplex, vengono utilizzate due fasi:

- **Risoluzione del problema di ottimizzazione**

```
CPXmipopt( env , lp );
```

- env:** puntatore di tipo CPXENVptr alla struttura ENV  
precedentemente creata
- lp:** puntatore di tipo CPXLPptr alla struttura LP  
precedentemente creata

- **Ottenimento della soluzione**

```
CPXgetx( env , lp , x , inizio , fine );
```

- env:** puntatore di tipo CPXENVptr alla struttura ENV  
precedentemente creata
- lp:** puntatore di tipo CPXLPptr alla struttura LP  
precedentemente creata
- x:** puntatore a un vettore di double in cui verranno salvati

i valori delle variabili ottenuti dalla soluzione ottima

**inizio:** primo indice della variabile di cui si vuole memorizzare  
ed analizzare il valore

**fine:** indice dell'ultima variabile di cui si vuole memorizzare  
ed analizzare il valore

Questa funzione salva in  $x$  tutte le variabili che hanno indice  $i \in [inizio, fine]$  e quindi  $x$  deve essere un vettore di almeno  $fine - inizio + 1$  valori. Nel nostro programma, vengono analizzati i valori di tutte le variabili in gioco.

Per questo motivo **inizio**=0 e **fine**=**num\_colonne** - 1<sup>12</sup>. In seguito il nostro programma analizza la correttezza della soluzione svolgendo la verifica su:

- *valori assunti dalle variabili*  
ciascun  $x_{i,j}$  assume valore 0 o 1 con una tolleranza di  $\epsilon = 10^{-5}$
- *grado di ciascun nodo*  
il tour è composto al massimo da due archi che toccano lo stesso nodo

Resta però un problema da risolvere in tale modello, poichè non è stato inserito alcun sub-tour elimination. La soluzione ottenuta non è quindi ottima ma è costituita da diverse componenti connesse.

---

<sup>1</sup>numero di variabili=CPXgetnumcols(env,lp);

<sup>2</sup>numero di vincoli=CPXgetnumrows(env,lp);



# Bibliografia

- [1] *<http://www.math.uwaterloo.ca/tsp/>*
- [2] *<http://www.math.uwaterloo.ca/tsp/concorde/index.html>*
- [3] *<http://www.math.uwaterloo.ca/tsp/data/ml/monalisa.html>*