

# Algoritmos e Estrutura de Dados III

## O Problema da Viagem do Torneio

Pablo Cecilio Oliveira

Alexander Cristian

### 1 Introdução

O Problema da Viagem do Torneio Viajante (Traveling Tournament Problem) pode ser considerado como um problema de otimização matemática que envolve a criação de uma escala de jogos em um torneio viável.

A viabilidade da escala é definida de maneira geral por dois outros problemas. O primeiro é uma questão de viabilidade, o padrão de jogos em casa e longe deve ser suficientemente variado, de modo a evitar padrões de estadia e deslocamento excessivos. O segundo é uma questão de deslocamento, onde buscasse minimizar o custo total de deslocamento com objetivo de evitar viagens excessivas.

Neste trabalho prático é apresentado uma solução para o TTP do Campeonato Brasileiro de Futebol.

A escala de jogos do Campeonato Brasileiro de Futebol consiste em definir uma escala de jogos viável entre  $n$  times divididos em  $n - 1$  rodadas  $k$  no primeiro turno, onde cada time joga com cada um dos outros sem repetições, e sem que existam mais que três jogos consecutivos fora de casa. Para o retorno na rodada  $k + (n - 1)$ , os jogos são espelhados do primeiro turno, porem com o mando de campo invertido.

Na solução final para o problema, o custo de deslocamento dos times na escala de jogos deve ser considerado e seu retorno minimizado.

### 2 Implementação

Para a construção de uma solução inicial, utiliza-se o método de três fases proposto por Ribeiro e Urrutia (2004a)[1].

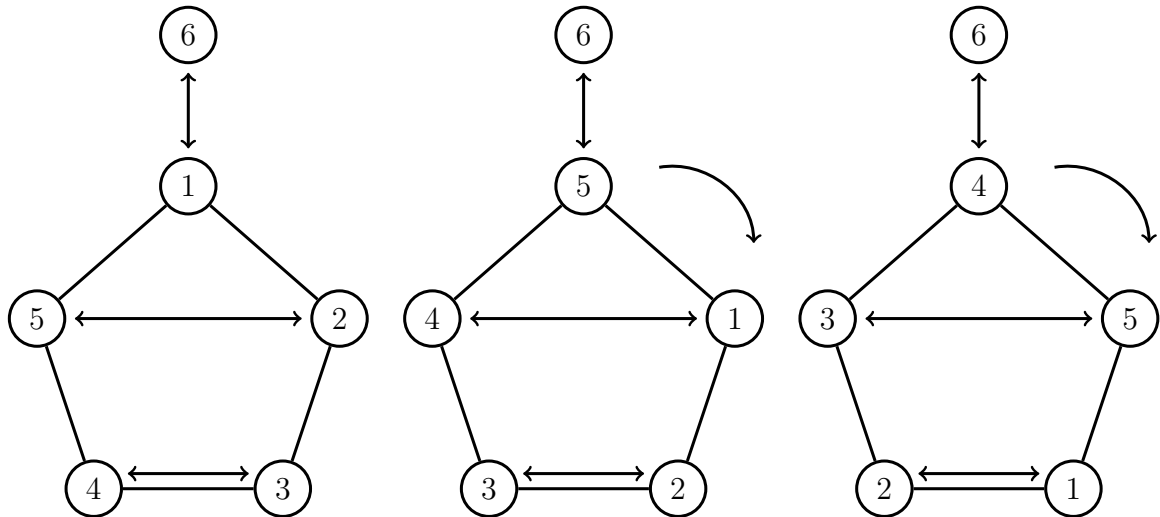
## 2.1 Método de três fases para geração de uma solução inicial

### 2.1.1 Primeira fase: Método do Polígono

A primeira fase da solução inicial consiste em uma fatoração que utiliza o Método do Polígono. Nesse método, sendo  $n$  o número de times participantes do campeonato, forma-se um polígono com  $n - 1$  nós numerados e um  $n$ -ésimo time é atribuído a um nó fora desse polígono.

A cada rodada, os times localizados nos nós  $k = 2, 3, \dots, n/2$  jogam contra os times localizados nos nós  $n + 1 - k$ , o  $n$ -ésimo time localizado fora do polígono joga contra o time localizado no primeiro nó do polígono. Para as  $n - 1$  rodadas seguintes, o polígono é movido em sentido horário para determinar os novos jogos. A Figura 1, demonstra a fatoração para as três primeiras rodadas de um campeonato com 6 times.

Figura 1: Método do Polígono para três primeiras rodadas com  $n = 6$



Fonte: Marcio [3]

A Tabela 1 mostra os resultados obtidos pelo Método do Polígono para 6 times nas primeiras  $n - 1$  rodadas e espelhado para as  $n - 1$  rodadas seguintes no MDRR. O mesmo método pode ser aplicado aos 20 times requeridos nesse trabalho prático, para esse número de times ou qualquer outro número par de times, um polígono com  $n - 1$  vértices é utilizado.

Tabela 1: Solução obtida pelo Método do Polígono

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Time 1	6	4	2	5	3	6	4	2	5	3
Time 2	5	3	1	4	6	5	3	1	4	6
Time 3	4	2	5	6	1	4	2	5	6	1
Time 4	3	1	6	2	5	3	1	6	2	5
Time 5	2	6	3	1	4	2	6	3	1	4
Time 6	1	5	4	3	2	1	5	4	3	2

Fonte: autores

### 2.1.2 Segunda fase: Associando Times

A segunda fase consiste na associação entre os times reais e os times abstratos. Para representar times abstratos usam-se as letras correspondentes aos números gerados pelo método do polígono, já os times reais são representados por números, correspondentes a ordem de seus índices.

Para essa fase, primeiro obtêm-se uma matriz quadrada de  $n \times n$  oponentes consecutivos gerada partir da escala criada pelo Método do Polígono.

São considerados como "oponentes consecutivos" no caso em que um time  $T_k$  possuir confrontos entre  $T_i \times T_k$  e  $T_j \times T_k$  em uma ou mais rodadas consecutivas, não importando a ordem dos jogos. Como exemplo, observa-se na Tabela 2 que os times B e E são oponentes consecutivos por 6 vezes de outros times.

Tabela 2: Oponentes consecutivos

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Time 1	F	D	<b>B</b>	<b>E</b>	C	F	D	<b>B</b>	<b>E</b>	C
Time 2	E	C	A	D	F	E	C	A	D	F
Time 3	D	<b>B</b>	<b>E</b>	F	A	D	<b>B</b>	<b>E</b>	F	A
Time 4	C	A	F	<b>B</b>	<b>E</b>	C	A	F	<b>B</b>	<b>E</b>
Time 5	B	F	C	A	D	B	F	C	A	D
Time 6	A	E	D	C	B	A	E	D	C	B

Fonte: autores

A Tabela 3 demonstra a matriz quadrada de oponentes consecutivos dos jogos entre os times abstratos. Nessa matriz podemos observar que além de B e E serem oponentes consecutivos por 6 vezes, outros times também são consecutivos por uma ou mais vezes, como exemplo, C e A também são consecutivos por 6 vezes.

Tabela 3: Matriz de oponentes consecutivos para  $n = 6$ 

	A	B	C	D	E	F
A	-	1	6	5	2	4
B	1	-	2	5	6	4
C	6	2	-	2	5	3
D	5	5	2	-	2	4
E	2	6	5	2	-	3
F	4	4	3	4	3	-

Fonte: autores

A associação, então, ocorre entre os pares de times reais que possuem a menor distância entre suas sedes com os pares de oponentes consecutivos de maior número de confrontos. Essa heurística é descrita a seguir.

Inicialmente, pares de times abstratos são ordenados em ordem decrescente conforme o número de oponentes consecutivos (Tabela 5). Times reais são ordenados em ordem crescente de distância em relação às sedes de seus oponentes (Tabela 4), e são associados aos times abstratos nesta ordem. Dessa forma, os times abstratos com maior número de oponentes consecutivos serão preferencialmente associados aos times reais com as distâncias entre sedes menores.

Tabela 4: Pares ordenados de times reais.

1	(2,6)	(Atlético Mineiro, Cruzeiro)	0 Km
2	(1,6)	(América Mineiro, Cruzeiro)	0 Km
3	(1,2)	(América Mineiro, Atlético Mineiro)	0 Km
4	(3,5)	(Atlético Paranaense, Corinthians)	415 Km
5	(2,4)	(Atlético Mineiro, Botafogo)	440 Km
6	(1,4)	(América Mineiro, Botafogo)	440 Km
7	(4,6)	(Botafogo, Cruzeiro)	441 Km
8	(4,5)	(Botafogo, Corinthians)	444 Km
9	(1,5)	(América Mineiro, Corinthians)	585 Km
10	(2,5)	(Atlético Mineiro, Corinthians)	585 Km
11	(5,6)	(Corinthians, Cruzeiro)	587 Km
12	(3,4)	(Atlético Paranaense, Botafogo)	849 Km
13	(1,3)	(América Mineiro, Atlético Paranaense)	1000 Km
14	(2,3)	(Atlético Mineiro, Atlético Paranaense)	1000 Km
15	(3,6)	(Atlético Paranaense, Cruzeiro)	1001 Km

Fonte: autores

Tabela 5: Pares ordenados de times abstratos.

1	(E,B)	6	11	(D,F)	4	21	(D,E)	2
2	(C,A)	6	12	(F,A)	4	22	(C,D)	2
3	(B,E)	6	13	(F,D)	4	23	(C,B)	2
4	(A,C)	6	14	(B,F)	4	24	(B,C)	2
5	(E,C)	5	15	(A,F)	4	25	(E,D)	2
6	(D,B)	5	16	(F,B)	4	26	(A,E)	2
7	(D,A)	5	17	(E,F)	3	27	(E,A)	2
8	(C,E)	5	18	(F,C)	3	28	(D,C)	2
9	(B,D)	5	19	(F,E)	3	29	(B,A)	1
10	(A,D)	5	20	(C,F)	3	30	(A,B)	1

Fonte: autores

O pseudo-código para a heurística dessa associação é mostrado no Algoritmo 1.

---

**Algoritmo 1:** Associa times reais à times abstratos

---

**repita**

Seja  $T_1$  o próximo time real a ser associado a um time abstrato  
e seja  $T_2$  o time, cuja cidade é mais próxima à cidade de  $T_1$ .

**se**  $T_2$  *já foi associado* **então**

Encontre o primeiro par  $(a, b)$  de times abstratos, tal que  $a$  esteja  
associado ao time  $T_2$  e  $b$  ainda não esteja associado a nenhum time real.

 $b \leftarrow T_1$ **senão**

Encontre o primeiro par  $(a, b)$  de times abstratos, tal  
que nenhum deles esteja associado a um time real.

 $a \leftarrow T_1$ **fim****até** todos os times reais sejam associados aos times abstratos;

Fonte: Marcio [3]

Essa associação tem como objetivo minimizar o deslocamento de um time  $T_k$ , baseando-se na ideia de que se existirem confrontos  $T_i \times T_k$  e  $T_j \times T_k$  consecutivos, a distância percorrida por  $T_k$  seria menor caso suas sedes forem próximas.

**2.1.3 Terceira fase: Mando de Campo**

Na terceira e última fase para gerar uma solução inicial, são estabelecidos os mandos de campo. Considera-se para isso a restrição de três jogos consecutivos dentro ou fora de casa, assim sendo, para gerar uma escala viável deve-se alternar o máximo possível o

mando de campo.

Os mandos de campo da primeira rodada são determinados aleatoriamente, e nas rodadas seguintes até a última do primeiro turno ( $n - 1$ ), uma heurística é utilizada para determinar o mando de um jogo entre os times  $T_1$  e  $T_2$ .

Para que a heurística possa ser usada, é preciso definir  $N_i$  como a quantidade total de jogos consecutivos dentro ou fora de casa que um time  $T_i$  jogou em rodadas anteriores, e a partir desse valor, o algoritmo 2 é aplicado.

---

**Algoritmo 2:** Determina o mando de campo dos jogos

---

Determine, de forma aleatória, o mando de campo dos jogos da primeira rodada.

**para cada** rodada  $k = 2, 3, \dots, (n - 1)$  **do primeiro turno faça**

**se**  $N_2 > N_1$  **então**

**se** *Se  $T_2$  jogou seu último jogo em casa* **então** a realização do jogo será na casa do time  $T_1$ ;

**se** *Se  $T_2$  jogou seu último jogo fora de casa* **então** a realização do jogo será na casa do time  $T_2$ ;

**fim**

**se**  $N_2 < N_1$  **então**

**se** *Se  $T_1$  jogou seu último jogo em casa* **então** a realização do jogo será na casa do time  $T_2$ ;

**se** *Se  $T_1$  jogou seu último jogo fora de casa* **então** a realização do jogo será na casa do time  $T_1$ ;

**fim**

**se**  $N_2 = N_1$  **então**

**se**  *$T_1$  jogou seu último jogo em casa e o time  $T_2$  jogou seu último jogo fora de casa* **então** a realização do jogo será na casa do time  $T_2$ ;

**se**  *$T_1$  jogou seu último jogo fora de casa e o time  $T_2$  jogou seu último jogo em casa* **então** a realização do jogo será na casa do time  $T_1$ ;

**senão** o mando de campo é determinado aleatoriamente;

**fim**

**fim**

Determinar os jogos do segundo turno espelhados ao primeiro turno.

Caso a escala ainda permanecer inviável, reinicie o algoritmo.

---

Fonte: Marcio [3]

### 3 Análise de complexidade

A análise feita é considerada para o pior caso, e sua complexidade é definida por tempo.

As Funções utilizadas pelo programa as quais um número fixo de instruções, sejam eles  $k$ , são executadas independente de  $n$ , essas classificam-se como  $\mathcal{O}(1)$  ou de complexidade constante. Dentre as listadas nas seções seguintes, se encontram:

- Funções que retornam uma condição booleana;
- Inicialização da Lista Simplesmente Encadeada;
- Inserção ou remoção de um nó a partir do nó "cabeça" de uma Lista Simplesmente Encadeada;
- Funções de retorno de impressão para mensagens de erro, ou para o retorno de impressão do tempo decorrido até determinado ponto relativo ao código;
- A Função que realiza a copia de um trecho de memória, ou a que retorna um conteúdo endereçado diretamente para uma área de memória;
- A Função que gera números randômicos através do seed fornecido pelo sistema.

As Funções analisadas como sendo de complexidade linear, ou  $\mathcal{O}(n)$ , tais que  $n$  mais um número fixo de instruções são menores do que  $cn$  ( $f(n) = (n + 1) \Rightarrow (n + 1) \leq cn$ ). Essas compõe a maioria do programa e são listadas de forma geral a seguir:

- A Função que retorna um o numero de linhas de um arquivo;
- Funções que carregam os dados dos arquivos para estruturas de dados;
- Funções que carregam os dados dos arquivos para estruturas de dados;
- Funções de uso geral da Lista Simplesmente Encadeada:
  - Funções que retorna um nó que contem um menor valor de um dado, ou a que retorna um nó que contem o maior valor de um dado;
  - Função que retorna a posição de um nó na lista;
  - Funções que carregam os dados dos arquivos para estruturas de dados;
  - Funções que removem ou inserem um nó da Lista conforme sua posição;
  - Função que troca as posições de dois nós;
  - Função que remove nós com dados duplicados;
  - Funções que ordenam a lista em ordem crescente ou decrescente;
  - Função que retorna a impressão da Lista;
  - Função que libera os dados da Lista da memoria
- Funções de de retorno de impressão do struct array de clubes ou de cidades;
- Função que altera os índices do struct array de clubes;
- As Funções de manuseio da Lista Encadeada criada como auxilio a função `associaClub()`;
- A Função de alocação de uma matriz de ponteiros;
- A Função que libera a memoria alocada por uma matriz;
- A Funções de espera por tempo ou por input;

As Funções analisadas como sendo de complexidade quadrática, assim como as funções analisadas como complexidade cúbica definem e compõe a solução do problema da geração de uma escala viável no programa apresentado.

Funções  $\mathcal{O}(n^2)$ , onde  $f(n) = (n + 1)^2 \Rightarrow (n + 1)^2 \leq cn^2$  :

- Funções que retornam a impressão de 2d arrays;
- Função que gera uma escala pelo Método do Polígono;
- As funções que criam as listas de pares de times reais e abstratos para a função `associaClub()`;
- A Função que verifica a restrição de jogos consecutivos dentro ou fora de casa;
- A Função espelha o mando de campo gerado no primeiro turno;
- A Função que copia um 2d array para outro 2d array;
- A Função que retorna os custos das distancias da escala criada.

Funções  $\mathcal{O}(n^3)$ , onde  $f(n) = n(n + 1)^2 \Rightarrow n(n + 1)^2 \leq cn^3$  :

- Função que associa times reais aos times abstratos conforme o pseudo-código do Algoritmo 1;
- Função que determina o mando de campo dos times conforme o pseudo-código descrito no Algoritmo 2;

### 3.1 Funções de arquivos para os dados

<code>getlines()</code>	Retorna o numero de linhas validas de um arquivo.	$\mathcal{O}(n)$
<code>getCLUB()</code>	Carrega os clubes a partir do arquivo de clubes, salva os dados em array struct.	$\mathcal{O}(n)$
<code>getCITY()</code>	Carrega as cidades a partir do arquivo de cidades, salva os dados em um array struct.	$\mathcal{O}(n)$
<code>getDIST()</code>	Carrega as distancias a partir do arquivo de distancias, salva os dados em uma matriz alocada.	$\mathcal{O}(n)$
<code>errFile()</code>	Retorna a msg de erro caso o arquivo não for encontrado.	$\mathcal{O}(1)$

### 3.2 Funções da Lista Encadeada Simples

<code>create()</code>	Inicializa uma Lista Encadeada Simples	$\mathcal{O}(1)$
<code>atP()</code>	Dada a posição, retorna um nó da Lista.	$\mathcal{O}(n)$
<code>LLmin()</code>	Retorna um nó com o menor valor de um dado.	$\mathcal{O}(n)$



<code>LLmax()</code>	Retorna um nó com o maior valor de um dado.	$\mathcal{O}(n)$
<code>LLidx()</code>	Retorna a posição de um nó.	$\mathcal{O}(n)$
<code>LLpsh()</code>	Insere os dados a partir da posição cabeça.	$\mathcal{O}(1)$
<code>LLpop()</code>	Remove os dados a partir da posição cabeça.	$\mathcal{O}(1)$
<code>LLdel()</code>	Remove um nó, dado sua posição na Lista.	$\mathcal{O}(n)$
<code>LLins()</code>	Insere um nó, dado sua posição na Lista.	$\mathcal{O}(n)$
<code>LLchg()</code>	Troca a posição de dois nós.	$\mathcal{O}(n)$
<code>LLdup()</code>	Remove os nós com dados duplicados.	$\mathcal{O}(n)$
<code>LLinc()</code>	Ordena a Lista em ordem crescente.	$\mathcal{O}(n)$
<code>LLdec()</code>	Ordena a Lista em ordem decrescente.	$\mathcal{O}(n)$
<code>LLprt()</code>	Retorna a impressão da Lista.	$\mathcal{O}(n)$
<code>LLclr()</code>	Libera os dados da Lista da memória.	$\mathcal{O}(n)$
<code>isEmpty()</code>	Retorna se uma Lista está ou não vazia.	$\mathcal{O}(1)$

### 3.3 Funções de Retorno de Impressão

<code>printTabela()</code>	Retorna a impressão formatada da escala.	$\mathcal{O}(n^2)$
<code>printEscala()</code>	Retorna a impressão não formatada da escala..	$\mathcal{O}(n^2)$
<code>printTravel()</code>	Retorna a impressão das distancias percorrida por cada um dos times.	$\mathcal{O}(n)$
<code>printMatrix()</code>	Retorna a impressão de uma matriz $n \times n$ .	$\mathcal{O}(n^2)$
<code>printCLUB()</code>	Retorna a impressão não formatada do array struct de clubes.	$\mathcal{O}(n)$
<code>printCITY()</code>	Retorna a impressão não formatada do array struct de cidades.	$\mathcal{O}(n)$

### 3.4 Funções da Solução inicial

<code>initPolygon()</code>	One-factorization para gerar uma tabela inicial valida.	$\mathcal{O}(n^2)$
<code>associaClub()</code>	Associa os times reais aos times abstratos conforme o pseudo-código descrito no Algoritmo 1.	$\mathcal{O}(n^3)$
<code>changeClube()</code>	Altera o índice dos clubes conforme a associação realizada em <code>associaClub()</code> .	$\mathcal{O}(n)$
<code>buildCalvin()</code>	Cria os pares de times reais para <code>associaClub()</code> .	$\mathcal{O}(n^2)$
<code>buildHarold()</code>	Cria os pares de times abstratos para <code>associaClub()</code> .	$\mathcal{O}(n^2)$

<code>buildLinked()</code>	Cria uma lista simplesmente encadeada para o controle dos times associados na <code>associaClub()</code> .	$\mathcal{O}(n)$
<code>islinked()</code>	Verifica se um time real já está associado.	$\mathcal{O}(n)$
<code>associar()</code>	Associa times reais com abstratos na lista criada por <code>buildlinked()</code> .	$\mathcal{O}(n)$
<code>areClubs()</code>	Verifica se todos os times já foram associados.	$\mathcal{O}(n)$
<code>findAT1()</code>	Função booleana de retorno para <code>associaClub()</code> .	$\mathcal{O}(1)$
<code>findBT1()</code>	Função booleana de retorno para <code>associaClub()</code> .	$\mathcal{O}(1)$

### 3.5 Funções de Mando de Campo

<code>setmando()</code>	Determina o mando de campo dos times conforme o pseudo-código descrito no Algoritmo 2.	$\mathcal{O}(n^3)$
<code>sorteia()</code>	Determina randomicamente os mandos de campo da primeira rodada.	$\mathcal{O}(n)$
<code>CSTMando()</code>	Verifica se a condição de três jogos consecutivos dentro ou fora de casa foi respeitada.	$\mathcal{O}(n^2)$
<code>espelha()</code>	Espelha os mandos gerados no primeiro turno para o retorno.	$\mathcal{O}(n^2)$
<code>randint()</code>	Gera um inteiro randomicamente conforme o seed do sistema.	$\mathcal{O}(1)$

### 3.6 Funções de uso comum ao programa

<code>allocTable()</code>	Aloca uma matriz de ponteiros.	$\mathcal{O}(n)$
<code>freeMemory()</code>	Libera a memória alocada por <code>allocTable()</code> .	$\mathcal{O}(n)$
<code>copyTable()</code>	Copia dados entre matrizes.	$\mathcal{O}(n^2)$
<code>shiftArray()</code>	Movimenta os dados em um array (shift).	$\mathcal{O}(1)$
<code>viagem()</code>	Retorna a distância entre as sedes dos times.	$\mathcal{O}(1)$
<code>custos()</code>	Calcula e retorna os custos totais de uma escala de jogos gerada, assim como o custo de deslocamento individual dos times.	$\mathcal{O}(n^2)$
<code>timeresult()</code>	Retorna o tempo de execução até determinado ponto.	$\mathcal{O}(1)$
<code>wait()</code>	Função de espera (pausa o tempo de execução por $n$ segundos).	$\mathcal{O}(n)$
<code>ask()</code>	Espera por um input fornecido pelo usuário.	$\mathcal{O}(n)$

## 4 Análise de resultados

Tabela 12: Análise dos resultados.

$S_0$	$S_k$	$k$	Tentativas	Tempo	Diferença %	Ganho
837635	784889	3	19698	1s 903ms	6.30%	52746
848148	790269	10	18519	1s 795ms	6.82%	57879
814842	772594	9	19458	1s 892ms	5.18%	42248
864708	782358	5	18773	1s 823ms	9.52%	82350
858557	780693	8	19692	1s 910ms	9.07%	77864
858637	755076	9	19651	1s 912ms	12.06%	103561
840565	781085	4	20540	1s 984ms	7.08%	59480
825463	781733	6	18880	1s 830ms	5.30%	43730
848581	772612	9	19195	1s 862ms	8.95%	75969
844549	770172	8	18408	1s 791ms	8.81%	74377
865979	779945	6	20467	1s 985ms	9.93%	86034
857004	767938	5	19898	1s 928ms	10.39%	89066
795849	774157	3	19754	1s 914ms	2.73%	21692
862298	769219	8	18952	1s 846ms	10.79%	93079
842242	777349	4	19309	1s 868ms	7.70%	64893
844337	776005				8.09%	68332

Fonte: autores

## Referências

- [1] Ribeiro Celso and Urrutia Sebastián. Heuristics for the mirrored traveling tournament problem. <https://pdfs.semanticscholar.org/89c1/3241f875a17238d5300ab42435aa6c0fbf66.pdf>. [Acesso em: 08-Outubro-2018].
- [2] Easton Kelly, Nemhauser George, and Trick Michael. Solving the traveling tournament problem. [https://mat.gsia.cmu.edu/TOURN/ttp\\_ipcp.pdf](https://mat.gsia.cmu.edu/TOURN/ttp_ipcp.pdf). [Acesso em: 09-Outubro-2018].
- [3] Mine Marcio. Programação de jogos de competições esportivas. [http://www.decom.ufop.br/prof/marcone/projects/ttp/Publications/RT\\_FAPEMIG\\_Mine\\_2006.pdf](http://www.decom.ufop.br/prof/marcone/projects/ttp/Publications/RT_FAPEMIG_Mine_2006.pdf). [Acesso em: 07-Outubro-2018].
- [4] Trick Michael. Challenge traveling tournament instances. <https://mat.gsia.cmu.edu/TOURN/>. [Acesso em: 09-Outubro-2018].

O histórico do desenvolvimento desse trabalho se encontra online em:  
<https://github.com/Durfan/ufsj-aeds3-tp2>.