

# Projeto e Análise de Algoritmos: Trabalho Prático 1

João Mateus de Freitas Veneroso

Departamento de Ciência da Computação da Universidade Federal de Minas Gerais

June 15, 2017

## 1 Introdução

Este relatório descreve a implementação do trabalho prático 2 da disciplina Projeto e Análise de Algoritmos. O trabalho consistiu em resolver um problema de compartilhamento de viagens por meio de três paradigmas diferentes: força bruta, programação dinâmica e algoritmos gulosos.

## 2 Força Bruta

O algoritmo de força bruta descrito abaixo é o mesmo implementado no Trabalho Prático 1.

O algoritmo 1 implementa uma solução de força bruta para o problema de compartilhamento de viagens. Primeiro inicializa-se o benefício máximo  $b^*$  com um valor negativo, dessa forma qualquer configuração válida vai proporcionar um benefício maior. A partir daí, no loop das linhas 5-10, para cada configuração válida, calcula-se o benefício total e atualiza-se o valor de  $b^*$  se este benefício for maior do que qualquer um encontrado até então. Além disso, a variável  $G_p^*$  guarda a configuração que proporcionou o maior benefício. Ao final do algoritmo,  $b^*$  guarda o valor do benefício máximo para o grafo  $G$  e  $G_p^*$  guarda a configuração que proporcionou este benefício.

A complexidade deste algoritmo depende do número de configurações  $G_p$  diferentes e do custo da função *ConstraintsAreValid*. O número de configurações  $G_p$  diferentes é  $2^m$  para  $m$  igual ao número de arestas no grafo  $G$ . Pois, cada aresta pode estar presente ou não em  $G_p$  e nós queremos as combinações possíveis para todas as arestas  $m$ . O custo da função *ConstraintsAreValid* depende do número de arestas, pois, para cada aresta  $(u, v)$ , temos de verificar se ela é a única aresta que sai do vértice  $u$ , se o vértice  $v$  é um motorista e se  $v$

possui espaço para acomodar todos os passageiros de  $u$ . Como todas estas operações tem custo constante, a função *ConstraintsAreValid* tem custo  $O(m)$ . Por último, a linha 7 calcula a soma dos pesos de todas as arestas também com custo  $O(m)$ . Logo, a complexidade total do algoritmo é  $2m2^m$  e o algoritmo é  $O(m2^m)$ .

---

**Algorithm 1** MaximizeBenefit

---

```

1: procedure MAXIMIZEBENEFIT( $G(V,A)$ )
2:    $b^* \leftarrow -1$ 
3:    $G_p^* \leftarrow \emptyset$ 
4:
5:   for all  $G_p = (V, A_p) : A_p \subseteq G.A$  do
6:     if ConstraintsAreValid( $G_p$ ) then
7:        $b \leftarrow \sum_{(v_i, v_j) \in A_p} B(v_i, v_j)$ 
8:       if  $b > b^*$  then
9:          $b^* \leftarrow b$ 
10:         $G_p^* \leftarrow G_p$ 

```

---

Uma melhora ainda pode ser alcançada se deixarmos de testar parte das configurações inválidas de  $G$ . Sabemos que um passageiro somente pode pegar carona em um carro, portanto, qualquer combinação  $G_p$  onde existirem arestas  $(u, v_i), (u, v_j) : i \neq j$  é inválida. Dessa forma, basta manter uma única aresta ativa por vez na lista de adjacência de cada vértice. É necessário lembrar que um vértice pode representar um motorista sem passageiros ou um grupo de passageiros que não vai pegar carona com ninguém, portanto, o número total de combinações se torna  $\sum_{v \in V} G.Adj(v) + 2$  e, no pior caso (um grafo completo), o número de combinações se torna  $O(n^n)$  onde  $n$  é o número de vértices no grafo  $G$ . Feitas estas considerações, a complexidade assintótica do algoritmo é  $O(mn^n)$ . Apesar da complexidade parecer pior do que o algoritmo descrito anteriormente, devido a forma como o algoritmo é construído ele é sempre necessariamente melhor ou igual ao algoritmo anterior. Pois, no máximo, ele testa todas as combinações de arestas  $2^m$ . O algoritmo de força bruta implementado em Python para este trabalho utiliza este método.

A complexidade de espaço do algoritmo original e da versão aprimorada é  $O(n + m)$ , pois o grafo é armazenado na forma de listas de adjacência.

### 3 Programação Dinâmica

Em qualquer solução válida para o problema dos compartilhamentos de viagem, os passageiros-motoristas tem de decidir se vão atuar exclusivamente como passageiros ou motoristas devido às restrições do problema. Dessa forma, sendo  $k$  o número de passageiros-motoristas, ao variar quais deles atuam como passageiros e quais atuam como motoristas, existem  $2^k$  combinações possíveis que dão origem a problemas distintos. Cada um destes problemas pode ser pensado

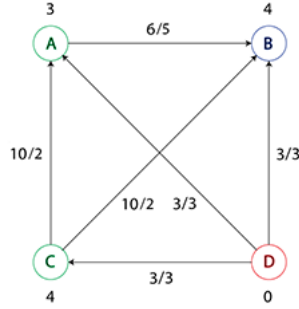


Figure 1: Exemplo do problema de compartilhamento de viagens modelado em forma de grafo

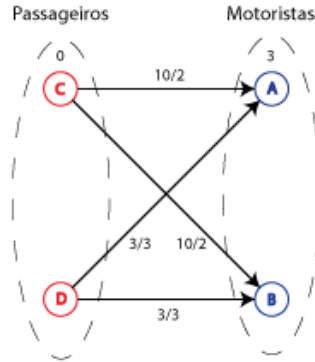


Figure 2: Grafo bipartido após definição dos passageiros e motoristas no grafo da figura 1

como um grafo bipartido  $G(V, A)$  onde os vértices de passageiros pertencem a um subconjunto de  $V$  e os vértices de motoristas pertencem a um outro subconjunto de  $V$ , sendo que todas as arestas conectam um vértice passageiro a um vértice motorista e os dois subconjuntos são disjuntos.

A figura 1 mostra um exemplo do problema de compartilhamento de viagens modelado na forma de um grafo, onde vértices vermelhos representam grupos de passageiros, vértices azuis representam motoristas e vértices verdes representam passageiros-motoristas. Os números próximos aos vértices representam a capacidade do veículo e os números próximos às arestas  $(v_i, v_j)$  representam o benefício do compartilhamento  $B(v_i, v_j)$  e o número de passageiros na viagem  $Q(v_i, v_j)$  separados por uma barra. Perceba que os vértices A e C são passageiros-motoristas e os demais vértices são passageiros ou motoristas exclu-

sivos. Ao selecionar o vértice A como motorista e o vértice C como passageiro, podemos modelar o problema com o grafo bipartido da figura 2. Para cada uma das combinações de passageiros e motoristas podemos construir um grafo bipartido similar. Nesta forma, o problema passa a se parecer bastante com o *0-1 Multiple Knapsack Problem*, com a diferença que alguns itens podem estar restritos à sacolas específicas. No caso, as sacolas representam os carros e os itens representam os grupos de passageiros. Além disso, é possível mapear o *0-1 Multiple Knapsack Problem* no problema de compartilhamento de viagens se considerarmos o caso em que todos os passageiros podem pegar carona em todos os veículos. Logo, o problema do compartilhamento de viagens é NP-difícil.

Dado um grafo  $G(V, A)$ , cada motorista  $v_j$  dá origem a um *0-1 Knapsack Problem*. Pois, cada aresta  $(v_i, v_j) \in G.A$  representa uma possibilidade do grupo de passageiros  $v_i$  seguir viagem com  $v_j$ . Logo, para maximizar o benefício dos compartilhamentos do motorista  $v_j$  ( $B_{max}(G, v_j)$ ) é preciso escolher o conjunto de arestas  $(v_i, v_j)$  que confira o maior benefício sem exceder a capacidade do carro, que é basicamente a definição do *0-1 Knapsack Problem*. No entanto, a forma como um motorista maximiza o benefício dos seus compartilhamentos influencia como os outros motoristas podem maximizar os seus compartilhamentos. Logo, assumindo que o motorista  $v_j$  está levando o grupo de passageiros  $X$ , o próximo motorista deverá maximizar seu benefício com base no grafo  $G'(V - X - v_j, A')$ , sendo que  $A'$  é o conjunto de arestas original  $A$  sem as arestas que contêm  $v_j$  ou qualquer um dos passageiros levados por ele. No caso de motoristas que podem ser passageiros, também existe a possibilidade do motorista  $v_j$  não levar passageiro nenhum. Nesse caso, as arestas incidentes em  $v_j$  serão apagadas do grafo  $G$ , mas as arestas que saem de  $v_j$  serão mantidas e, o vértice  $v_j$  também será mantido.

Se o motorista  $v_j$  decide levar um passageiro  $v_i$ , os demais motoristas vão maximizar seus benefícios sem considerar o passageiro  $v_i$  no grafo. Por conta disso, o benefício encontrado não será necessariamente máximo. Por exemplo, tome o caso em que  $v_j$  pode levar um dos grupos de passageiros  $\{p_1 = 12/2, p_2 = 20/1, p_3 = 1/1\}$  onde o primeiro valor associado a cada grupo representa o seu benefício e o segundo valor representa o número de pessoas naquele grupo (note que a barra não representa divisão nesse caso). Assumindo que  $v_j.capacidade = 2$ ,  $v_j$  maximiza o benefício dos seus compartilhamentos se escolher os passageiros  $\{p_2, p_3\}$  auferindo um benefício total de 21. Agora assuma que existe um outro motorista  $v_{j+1}$  que pode compartilhar viagem apenas com  $p_2$ . Nesse caso, o motorista  $v_{j+1}$  ficará impedido de compartilhar essa viagem. No entanto, o benefício máximo dos compartilhamentos seria claramente maior se  $v_j$  tivesse escolhido levar  $\{p_1\}$  ao invés de  $\{p_2, p_3\}$ .

Por conta da incapacidade de prever localmente qual é o benefício total máximo do plano de compartilhamento, é necessário testar qual o benefício máximo para cada combinação de vértices no grafo  $G$ . Considere os motoristas  $\{D_1, D_2, \dots, D_n\}$ . Agora, assuma uma combinação de passageiros válida em  $D_i$  que faz parte de um plano de benefício máximo  $B_{max}(G, D_i)$  e remova de  $G$  todos os passageiros escolhidos por  $D_i$  e o próprio motorista  $D_i$ , gerando o grafo  $G'$ . Ora,  $B_{max}(G, D_i) = B(D_i) + B_{max}(G', D_{i-1})$ , onde  $B(D_i)$  é a soma

dos benefícios dos passageiros de  $D_i$ . Ou seja, o problema tem subestrutura ótima. A prova deste teorema é que, se  $B(G, D_i)$  é ótimo mas a configuração que gera o benefício  $B(G', D_{i-1})$  não é máxima, poderíamos substituí-la por uma configuração que gerasse um benefício total maior, no entanto, isso contradiz a hipótese inicial que  $B_{max}(G, D_i)$  era máximo. Então,  $B_{max}(G, D_i)$  tem de ser máximo.

Todavia, nós não sabemos qual é a configuração de passageiros de benefício máximo para  $D_i$ . Portanto, devemos testar todas as possibilidades e escolher aquela que oferece o maior benefício. Finalmente, podemos construir a seguinte equação de recorrência:

$$B_{max}(G, D_i) = \begin{cases} 0, & \text{se } G = \emptyset. \\ \max_{P_{comb} \subseteq D_i.P} B_{max}(G', D_{i-1}) + \sum_{p \in P_{comb}} B(p), & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (1)$$

onde  $P_{comb}$  representa uma das combinações de passageiros do motorista  $D_i$ , e  $D.P$  são todos os potenciais passageiros do motorista  $D_i$  no grafo  $G$ .  $G'$  depende da escolha dos passageiros como explicado nos parágrafos anteriores e  $B(P)$  é o benefício do passageiro  $P$ . A ordem de escolha dos motoristas  $D_i$  não é importante uma vez que todas as possíveis combinações de passageiros acabam sendo testadas de uma forma ou de outra.

A implementação ingênua desta equação de recorrência acaba calculando várias vezes o mesmo problema, pois, o problema  $B(G, D_i)$  pode ocorrer mais de uma vez na árvore de recursão. Portanto, podemos ganhar eficiência ao salvar os resultados dos cálculos em uma tabela.

No caso do cálculo do benefício máximo, podemos aplicar uma abordagem de programação dinâmica *Bottom Up*. Digamos que  $D = D_1, D_2, \dots, D_n$  é a lista dos motoristas no grafo  $G$ . E, o grafo  $G$  possui  $2^n$  subgrafos com combinações diferentes dos vértices  $G.V$ . Consideremos agora o problema de encontrar o benefício máximo para cada uma das combinações de  $G.V$  considerando apenas os motoristas  $\{D_1, D_2, \dots, D_i\}$ . Como demonstrado anteriormente, este problema tem subestrutura ótima e as construções para  $D_{i+1}, D_{i+2}, \dots$  dependem de sua solução. Podemos produzir uma matriz  $B_{max}$  com  $n$  linhas representando os conjuntos de motoristas e  $2^n$  colunas representando todas as possíveis combinações  $V_j \subseteq G.V$ , sendo que os índices são a codificação binária das combinações. Por exemplo,  $\{0 \Rightarrow \emptyset, 1 \Rightarrow \{V_1\}, 2 \Rightarrow \{V_2\}, 3 \Rightarrow \{V_1, V_2\}, \dots\}$ . Cada célula  $B_{max}[i][j]$  representa o benefício máximo considerando apenas os motoristas  $\{D_1, D_2, \dots, D_i\}$  no grafo  $G'$  onde  $v_k \in V_j \forall v_k \in G'.V$ . O tamanho total da matriz  $B_{max}$  será  $O(n2^n)$  sendo  $n$  o número de vértices do grafo  $G$ .

Finalmente, o algoritmo para a abordagem *Bottom Up* está descrito em ???. Os nomes de todas as variáveis são equivalentes aos definidos nos últimos parágrafos. A única informação nova é a função  $GetCombIndex(G.V)$  que retorna o índice  $j$  na tabela  $B_{max}$  para o subconjunto de vértices do grafo  $G$ . Para  $n$  igual ao número de vértices no grafo  $G$ , o loop principal é chamado no máximo  $n$  vezes. O loop secundário é chamado exatamente  $2^n$  vezes e o terceiro loop é

---

**Algorithm 2** DPMaximizeBenefit

---

```
1: procedure DPMAXIMIZEBENEFIT( $G(V,E)$ )
2:    $Drivers := GetDrivers(G)$ 
3:    $B_{max} := Array[Drivers.length]$ 
4:    $Combinations := |G.V|^2$ 
5:    $i := 0$ 
6:
7:   for all  $i < Drivers.length$  do
8:      $B_{max}[i] := Array[Combinations]$ 
9:
10:    for all  $D_i \in Drivers$  do
11:      for all  $V_j \subseteq G.V$  do
12:        if  $D_i \in V_j$  then
13:           $MaxBenefit := 0$ 
14:          if  $i > 0$  then
15:             $MaxBenefit := B_{max}[i-1][j] \triangleright$  Benefit without adding
            any passengers.
16:            Remove  $D_i$  from  $G.V$ 
17:            for all  $P_{comb} \subseteq D_i.P$  do
18:               $Benefit := 0$ 
19:              for all  $p \in P_{comb}$  do
20:                 $Benefit := Benefit + B(p)$ 
21:                Remove  $p$  from  $G.V$ 
22:               $CombIndex := GetCombIndex(G.V)$ 
23:               $Benefit := Benefit + B_{max}[i-1][CombIndex]$ 
24:              if  $Benefit > MaxBenefit$  then
25:                 $MaxBenefit := Benefit$ 
26:              Add  $D_i$  back to  $G.V$ 
27:              for all  $p \in P_{comb}$  do
28:                 $Benefit := Benefit + B(p)$ 
29:                Add  $p$  back to  $G.V$ 
30:            else
31:               $B_{max}[i][j] = 0$ 
32:              if  $i > 0$  then
33:                 $B_{max}[i][j] = B_{max}[i-1][j]$ 
34:             $MaxBenefit := 0$ 
35:             $i := Drivers.length - 1$ 
36:
37:    for all  $V_j \subseteq G.V$  do
38:      if  $B_{max}[i][j] > MaxBenefit$  then
39:         $MaxBenefit := B_{max}[i][j]$ 
40:    return  $MaxBenefit$ 
```

---

chamado no máximo  $2^n$  vezes. Por último, o loop final é chamado exatamente  $2^n$  vezes. Portanto, a complexidade do algoritmo é  $n2^n2^n + 2^n = n2^{2n} + 2^n$  e o algoritmo é  $O(n4^n)$ . A complexidade de espaço do algoritmo é  $O(n2^n)$  como exposto anteriormente, mas podemos reduzi-la para  $O(2^n)$  se salvarmos apenas a linha anterior em cada iteração e, na iteração final, podemos simplesmente escolher a combinação que dê o benefício máximo sem salvar as respostas para cada combinação. Não é uma solução muito eficiente, mas já é bem melhor do que o algoritmo de força bruta. Devido ao fato do problema do compartilhamento de viagens ser NP-difícil, todas as soluções serão de ordem exponencial.

Para encontrar a configuração que gerou o benefício máximo, basta salvar o valor  $j$  da linha anterior sempre que acharmos uma configuração de benefício maior. Então, começando de trás para frente é só conferir quais vértices foram adicionados entre o melhor  $j$  da linha anterior e o  $j$  atual. Assim, saberemos que os elementos adicionados são os passageiros do motorista da linha atual. Para guardar os valores dos  $j$  anteriores precisaremos de uma tabela com o mesmo tamanho de  $B_{max}$ . O código referente a este trabalho está implementado conforme descrito neste parágrafo.

## 4 Algoritmo Guloso

O algoritmo guloso para o problema do compartilhamento de viagens o problema de escolher o subconjunto ótimo de passageiros para cada motorista a cada iteração como uma instância separada do *0-1 Knapsack Problem*. Basicamente, os itens da sacola (passageiros) serão ordenados por ordem não crescente de eficiência, sendo que a eficiência é definida por:

$$\frac{\text{benefício}}{\text{número de passageiros na viagem}}$$

A estratégia gulosa vai escolher os itens nesta ordem até que o carro não comporte mais nenhum passageiro. Adicionalmente, conferimos se colocar apenas o passageiro de maior benefício dentro do carro vai conferir um benefício maior do que a estratégia descrita e, se este for o caso, substituímos os passageiros escolhidos pelo passageiro de maior benefício. Essa estratégia não garante uma solução ótima para o problema, mas é bastante rápida e tem complexidade  $O(n \log n)$  devido à ordenação dos passageiros.

Dado um grafo  $G$ , escolheremos o motorista cujo benefício calculado pelo *0-1 Knapsack Problem* é o maior entre todos os motoristas do grafo. Então, adicionamos o benefício obtido ao benefício total e retiramos as arestas que saem dos passageiros e do motorista do grafo  $G$ , produzindo o grafo  $G'$ . Repetimos o processo até que não haja mais motoristas no grafo e, ao final do processo, obtemos o benefício total. Da mesma forma que o *0-1 Knapsack Problem*, esta estratégia não produz necessariamente um resultado ótimo. No entanto, a complexidade para a escolha do motorista é  $n^2 \log n$  e este processo é repetido no máximo  $n$  vezes, portanto, a complexidade do algoritmo é  $O(n^3 \log n)$ , que é polinomial e, portanto, consideravelmente melhor do que as alternativas exatas.

---

**Algorithm 3** GreedyMaximizeBenefit

---

```
1: procedure GREEDYMAXIMIZEBENEFIT( $G(V,E)$ )
2:    $Plan := \emptyset$ 
3:    $MaxBenefit := 0$ 
4:
5:   while  $G.E \neq \emptyset$  do
6:      $BestDriver := null$ 
7:      $BestPlan := \emptyset$ 
8:      $MaxDriverBenefit := 0$ 
9:
10:    for all  $D_i \in G.Drivers$  do
11:       $S := KnapsackGreedy(D_i, G.V)$ 
12:       $DriverBenefit := GetBenefit(S)$ 
13:      if  $DriverBenefit > MaxDriverBenefit$  then
14:         $MaxDriverBenefit = DriverBenefit$ 
15:         $BestDriver = D_i$ 
16:         $BestPlan = S$ 
17:    Update Plan with the edges in BestPlan
18:    Remove edges from best driver and all passengers in graph G
19:     $MaxBenefit = MaxBenefit + MaxDriverBenefit$ 
return MaxBenefit
```

---

A abordagem gulosa para o problema da maximização de benefício no grafo de compartilhamento de viagens está descrita no algoritmo 3. A função *KnapsackGreedy* utiliza a estratégia gulosa descrita anteriormente para selecionar o melhor conjunto de passageiros para o motorista  $D_i$ . A função *GetBenefit* simplesmente calcula o benefício total do conjunto de passageiros selecionados pelo *KnapsackGreedy*.

## 5 Experimentos

Foram feitos experimentos com grafos completos variando entre 1 e 20 vértices em cada uma dos três paradigmas implementados. A figura 3 descreve o desempenho de cada um dos algoritmos propostos. No caso do algoritmo guloso também foi calculado quanto a solução gulosa se aproximou da solução ótima. O resultado está descrito na tabela 1.

## 6 Conclusão

Este relatório descreveu a implementação do trabalho prático 2 da disciplina Projeto e Análise de Algoritmos. Entre as três abordagens propostas, a abordagem gulosa apresentou claramente o melhor desempenho chegando a uma aproximação média de 90% da resposta ótima em um tempo 100 vezes menor



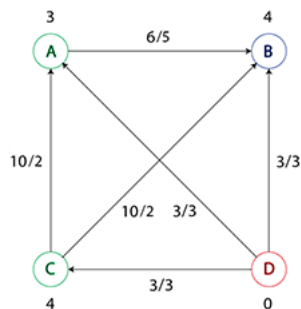


Figure 3: Número de vértices X Tempo de execução

Vértices	Algoritmo Guloso	Algoritmo Exato	Aproximação
1	65	233106	233106%
2	33	220774	220774%
3	22	220127	220127%
4	15	278959	278959%
5	13	211959	211959%
6	7	223152	223152%
7	4	247336	247336%
8	2	285716	285716%
9	2	235183	235183%
10	2	302967	302967%
11	2	302967	302967%
12	2	302967	302967%
13	2	302967	302967%
14	2	302967	302967%
15	2	302967	302967%
16	2	302967	302967%
17	2	302967	302967%
18	2	302967	302967%
19	2	302967	302967%
20	2	302967	302967%

Table 1: Aproximação pelo algoritmo guloso

do que as abordagens exatas. A programação dinâmica não mostrou um ganho muito grande em relação à força bruta devido ao *overhead* na montagem da tabela de respostas. No entanto, talvez o resultado seja diferente para grafos significativamente maiores.