

OTIMIZAÇÃO DE ROTEIROS TURÍSTICOS: UMA APLICAÇÃO PARA O CASO DO PORTO MARAVILHA NO RIO DE JANEIRO

Igor Tureta Zanchetta
Rodrigo Pereira Pagliusi
Laura Silva Bahiense da Silva Leite
Universidade Federal do Rio de Janeiro

RESUMO

O Rio de Janeiro por se tratar de uma cidade turística, é caracterizado por acomodar cruzeiros no Porto Maravilha com frequência. Porém, mais da metade dos cruzeiristas que atracam no RJ não realizam passeios turísticos pela cidade devido a diversos fatores, tais como: segurança, tempo, trânsito e falta de instrução. Portanto, o objetivo deste artigo é apresentar um modelo matemático, baseado em programação inteira, que realiza o roteiro ótimo para os cruzeiristas, levando em consideração a satisfação dos turistas, o deslocamento, os custos e a janela de tempo disponibilizada para os passeios. Esse modelo foi implementado com apoio do *software* Xpress IVE[®] e um estudo de caso foi conduzido considerando os dados do Rio de Janeiro. Os resultados mostram que, conforme a quantidade de pontos turísticos aumenta, a janela de tempo se torna o limitante do problema, sendo assim, a escolha por pontos turísticos próximos à região portuária é vista como prioridade para o passeio.

PALAVRAS CHAVE. Otimização, Roteamento, Logística.

ABSTRACT

The Rio de Janeiro is a tourist city, soon is characterized by accommodating frequently cruises in Porto Maravilha. However, more than half of the cruise passengers who dock in RJ do not tour the city due to several factors, such as: safety, time, traffic and lack of education. Therefore, the objective of this article is to present the optimal itinerary for cruise travelers, taking into account tourist satisfaction, displacement, cost and time window. For this, a mathematical model of routing was developed based on the concepts of Linear Programming Problems. The model was simulated from the *software* Xpress IVE[®] and based on three scenarios. The results showed that, as the number of nodes of the model (tourist spots) increases, the time window becomes the limiting problem, so the choice of tourist points near the port region is seen as a priority for the tour.

KEYWORDS. Optimization, Linear Programming, Routing.

1. INTRODUÇÃO

O turismo é considerado um dos maiores setores econômicos do mundo, quando se trata de faturamento e empregabilidade, influenciando assim o mercado regional e fatores sociais e econômicos (Sampaio e Zamignan, 2015). Além disso, o investimento necessário para alavancar o setor de turismo é significativamente menor quando comparado aos investimentos em P&D (Pesquisa e Desenvolvimento) ou infraestrutura (Coriolano, 2012). Portanto, cidades como o Rio de Janeiro, em que o turismo é altamente relevante, devem-se levar em consideração medidas para incentivar e promover de maneira positiva o setor.

O Rio de Janeiro é a cidade turística mais visitada da América Latina, além disso, é reconhecida nacionalmente pela sua variedade de serviços turísticos (Embratur, 2017). Tendo em vista o potencial da cidade, o projeto do porto Maravilha surgiu para revitalizar a zona portuária do centro do Rio de Janeiro, já que, a região portuária se encontrava ociosa, sem utilidade devido às mudanças no transporte de carga por contêiner (Toledo, 2012). O projeto teve início em 2011, com o objetivo de promover maiores atividades socioeconômicas da região. Com isso, o espaço portuário recebeu investimentos para a implantação do veículo leve sobre trilhos (VLT), Museu da Arte do Rio de Janeiro (MAR), Museu do Amanhã e AquaRio. A partir da revitalização da região portuária, foi estimado que cerca de 400 mil

turistas fossem beneficiados com o projeto do porto Maravilha (Ferreira, 2010). Segundo os dados da prefeitura do Rio de Janeiro, 1,48 milhões de estrangeiros visitaram o Rio de Janeiro no ano de 2016 (DataRio, 2018).

Segundo Esch (2017), cerca de 89% dos cruzeiristas atracados no Porto Maravilha durante a temporada de 2015 e 2016 apresentaram motivação para sair do terminal a fim de conhecer a cidade, passear e ir a atrativos turísticos. A confiabilidade, segurança e tempo se destacam como as maiores impedâncias para visitas turísticas na cidade do Rio de Janeiro. Sendo assim, os pontos turísticos próximos à região portuária são comumente visitados pelos cruzeiristas, já que requer menor tempo para deslocamento, e a região transparece maior segurança para os turistas. Porém, os cruzeiristas apontaram grande satisfação em visitar pontos turísticos mais distantes da região portuária, tais como: Corcovado, Pão de Açúcar e praia de Copacabana. Sendo assim, verifica-se que ferramentas que pudessem elaborar roteiros turísticos para os cruzeiristas, dadas as suas limitações e desejos, seria importante para esse público que é bastante seletivo.

Dentre os problemas de roteamento encontrados na literatura, o problema do caixeiro viajante ou TSP (*Traveling Salesman Problem*) é um dos que se aproxima dos roteiros desejados pelos turistas pois, no TSP, dado um conjunto de pontos a serem visitados, o seu objetivo consiste em visitar todos eles e retornar ao ponto de origem, garantindo que cada ponto será visitado uma única vez e que a distância total percorrida será a menor possível (Hillier e Liebermann, 2014). Porém, no caso dos cruzeiristas, nem todos os pontos turísticos são visitados, embora o turista deseje, muitas vezes por restrições de tempo. Neste caso, o problema de elaborar rotas para turistas consiste numa variação do TSP, pois no caso do Rio de Janeiro, os turistas devem deixar o porto Maravilha, visitar aqueles locais mais interessantes para ele, e retornar ao final ao ponto de origem para então embarcar no seu navio e seguir viagem. Busca-se nesse caso, maximizar a satisfação do turista e minimizar o custo de visitação e de distância percorrida, levando em consideração restrições de tempo. Esse problema pode ainda ser visto como uma variação do problema do caixeiro viajante com coleta de prêmios (Silva, 2017).

Portanto, o objetivo deste artigo é propor um modelo matemático que elabora o melhor roteiro turístico para os cruzeiristas que permanecem atracados no porto Maravilha durante um curto período de tempo, levando em consideração a satisfação do turista em visitar determinado ponto turístico, o tempo destinado a realizar o passeio, o custo de visitação e o deslocamento total. O quesito segurança, item importante para o turista, não foi levado em consideração nesse modelo devido à complexidade em mensurar quantitativamente o seu impacto na escolha do roteiro turístico, pois parte-se do pressuposto que ele fará visitas a locais com bom aparato de segurança.

Daqui por diante, este artigo está assim estruturado. A Seção 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre o problema abordado, que é seguida da Seção 3 que detalha a metodologia utilizada no desenvolvimento desse trabalho. A Seção 4 apresenta a formulação matemática proposta, destacando suas principais características e as modificações realizadas com base na literatura. A Seção 5 descreve o *software* e a linguagem de programação utilizada bem como os cenários que foram utilizados que levam em consideração os locais turísticos do Rio de Janeiro. Por fim, a Seção 6 apresenta as considerações finais do trabalho juntamente com as propostas de trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ao considerar os problemas que envolvem a elaboração de rotas sob o ponto de vista de modelagem matemático, o problema do caixeiro viajante por coleta de prêmio se enquadra para a proposta deste artigo. Este tipo de problema é encontrado na literatura como *Prize Collecting Traveling Salesman Problem (PCTSP)*, em que, o viajante recebe um prêmio para visitar determinada cidade, e sofre uma penalização por não visitar outra cidade. Assim, o objetivo do viajante é de minimizar os custos de viagem e reduzir as penalidades, garantindo dessa maneira, o maior valor pelo prêmio coletado ao visitar as cidades (Balas, 1989).

Silva (2017) desenvolveu um modelo matemático de otimização de roteiros turísticos com base nos conceitos do *PCTSP*, e foi aplicado para o caso do Belém-PA. O modelo apresentado pelo autor é uma variação do *PCTSP*, cujo objetivo é de maximizar a qualidade do serviço de turismo e minimizar o custo total. Para isso, foi utilizada uma abordagem de prêmios recebidos pelo turista ao visitar determinado ponto turístico, assim como um prêmio por ordem de visitação, enquanto o custo foi calculado com base no deslocamento percorrido.

De outro modo, Black *et al.* (2013) utilizaram os conceitos do *PCTSP* para propor um modelo matemático de roteamento em que o tempo é determinante na tomada de decisão. O objetivo do modelo proposto pelos autores é auxiliar a tomada de decisão no gerenciamento de transporte, em que, é necessário avaliar o número de caminhões carregados e os pontos de entrega a partir da rede de transporte, a janela de tempo de entrega e a jornada de trabalho do motorista.

Além disso, Stenger *et al.* (2013) desenvolveram um modelo matemático para resolução de problemas de roteamento com base nos conceitos do *PCTSP*. O objetivo do modelo proposto pelos autores foi de minimizar os custos de transportes de pequenas entregas, levando em consideração múltiplos depósitos e custos não lineares. O modelo foi testado com dados reais e verificou-se ótimo desempenho computacional, além de identificar a quantidade mínima de demanda necessária para que ocorra o roteamento com o menor custo de transporte possível.

A fim de resolver problemas matemáticos com grande complexidade, diversos *solvers* estão disponíveis no mercado, tais como: *BPMPD*, *CLP*, *FortMP*, *GIPALS32*, *GLPK*, *HOPDM*, *CPLEX*, *LINDO*, *LIPSOL*, *LOQO*, *Microsoft Solver Foundation*, *MOSEK*, *PCx*, *SAS/OR*, *Xpress Optimizer*. Vale ressaltar dois pontos importantes quanto à escolha do solver: (1) eficiência de resolução do problema e (2) acessibilidade, tendo em vista que o *Comercial Solver* requer licença para uso e o *Open Source Solver* é disponibilizado de maneira gratuita (Benson, 2010).

Sendo assim, aplicações dos *solvers* mencionados anteriormente são encontradas na literatura, dentre elas, Halvorsen-weare *et al.* (2012) utilizaram o *solver Xpress-IVE/Xpress Optimizer* para solucionar o problema de planejamento de transporte marítimo da empresa *Statoil*. Babae Tirkolae *et al.* (2016) aplicaram o *solver CPLEX* para resolver problemas de coleta de lixo urbano. Rieck e Zimmermann (2010) apresentaram em seu trabalho a aplicação do *solver CPLEX* na resolução de um problema de roteamento complexo, levando em consideração múltiplos veículos, janelas de tempo e entrega simultânea com coletas. Al Shamsi *et al.* (2014) utilizaram o *solver LINDO* para resolver o modelo matemático que aborda o problema de roteamento de veículos com produtos perecíveis, levando em consideração a redução de poluentes. Por último, cita-se Rabeh *et al.* (2011) que aplicaram o

solver LINDO em um caso de agendamento de atividades de assistência de saúde em domicílio.

Além disso, problemas com maior complexidade computacional necessitam de *solvers* com maior capacidade, logo, alguns deles apresentam melhor desempenho computacional quando comparado a outros. Segundo Silva (2017), os resultados obtidos utilizando o *solver* GAMS/CPLEX em um modelo de otimização de roteiros turísticos foram satisfatórios para a abordagem de 10 pontos turísticos, com potencial de resolução de até 30 pontos. Contudo, para problemas maiores (50 pontos ou mais) o autor não recomenda a aplicação de *solvers*, mas sim o uso da metaheurísticas como a Busca Tabu.

Assim, com base na literatura, o trabalho de Silva (2017) foi escolhido como referência para elaboração do modelo matemático proposto, e optou-se pelo *solver* Xpress Optimizer devido ao seu sucesso no processo de solução de problemas complexos. Contudo, o modelo apresentado por Silva (2017) não leva em consideração as janelas de tempo e os custos de visitação, desta forma, o modelo proposto neste artigo apresenta a base de um modelo matemático para a aplicação de otimização de problemas de roteamento para situações reais.

3. METODOLOGIA

A metodologia utilizada para desenvolver este artigo foi dividida em três etapas, sendo elas: (1) Etapa conceitual, (2) Etapa de modelagem e (3) Etapa de análise, conforme a Figura 1. A partir da Etapa 1 foi realizado a delimitação do ambiente de estudo, obtenção dos dados e elaboração das instâncias para testes do modelo proposto. A Etapa 2 consistiu na formulação matemática, modelagem em linguagem Mosel e validação do modelo matemático. Por fim, a Etapa 3 consistiu em analisar os resultados obtidos a partir da solução ótima do modelo matemático.

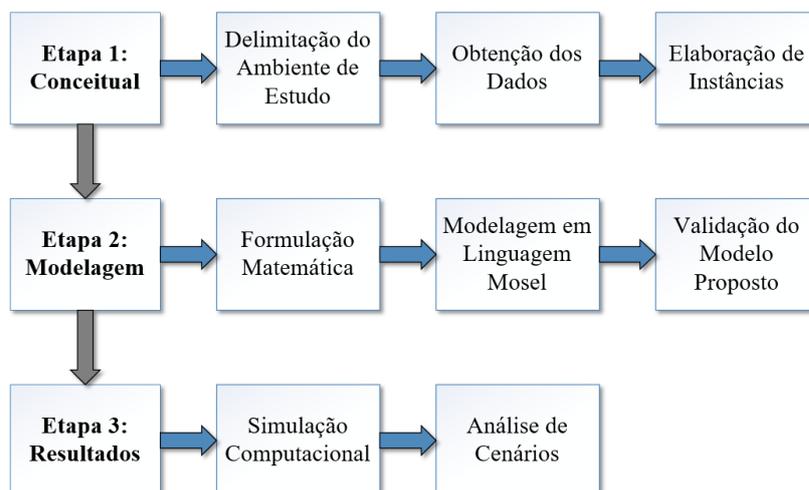


Figura 1: Etapas da metodologia de pesquisa

Fonte: Elaborado pelos autores

A primeira parte da etapa conceitual consistiu em delimitar o ambiente de estudo com base na proposta inicial tendo em vista que o objetivo do artigo é desenvolver um modelo matemático que represente o melhor roteiro turístico para os cruzeiristas que atracaram no porto Maravilha do Rio de Janeiro. Ao analisar a literatura, verificou-se que Esch (2017) realizou

uma pesquisa de campo que identificou os atrativos turísticos mais visitados pelos cruzeiristas que chegam à cidade pelo porto Maravilha durante a temporada de 2016/2017

Sendo assim, esse trabalho foi utilizado para definição dos pontos turísticos a serem considerados, assim como a relevância de cada um deles de acordo com a opinião dos cruzeiristas. Dentre os pontos turísticos do Rio de Janeiro, seis foram relatados pelos entrevistados como mais atraentes, sendo eles: Boulevard Olímpico, Corcovado/Cristo Redentor, Museu do Amanhã, Pão de Açúcar, Praia de Copacabana, Praia de Ipanema.

A etapa de obtenção de dados foi realizada a partir de duas ferramentas *web*, sendo elas: (1) *API Google* e (2) *TripAdvisor*. A partir do *API Google* foi possível exportar os dados de tempo e distância de um ponto turístico a outro, permitindo assim a elaboração da matriz origem e destino contendo todos os dados necessários. Além disso, o custo de visitação e o tempo médio de permanência em um ponto turístico foram baseados nos dados fornecidos pelo Google. O nível de satisfação de cada ponto turístico foi determinado com base nas notas adotada pelo *TripAdvisor*, assim como a quantidade de avaliações presente em cada ponto turístico. A quantidade de avaliações do ponto turístico foi utilizada como fator de desempate, já que vários pontos turísticos apresentam as mesmas notas no *TripAdvisor*, ou seja, levando em consideração o Pão de Açúcar e o Corcovado, ambos apresentam a mesma nota igual 4,5, porém, a quantidade de visitas no corcovado é significativamente maior, sendo assim, o corcovado apresenta um nível maior de satisfação para o turista.

A fim de verificar a complexidade de resolução de cada problema, foram delimitadas três instâncias cuja complexidade varia entre fácil, médio e difícil, conforme o Quadro 1. A quantidade de nós (pontos possíveis de interesse do turista) foi determinada a partir da quantidade de pontos turístico do modelo acrescido de duas unidades, que representa o ponto de origem e de chegada (porto maravilha), portanto, a Instância 1 é composta por seis pontos turísticos, a Instância 2 de 12 pontos turísticos e a Instância 3 de 18 pontos turísticos. Vale ressaltar que os pontos turísticos foram apresentados de maneira acumulativa em cada instância para melhor visualização, logo, a Instância 3 representa os pontos turísticos das Instâncias 1 e 2 assim como os seis novos pontos turísticos destacados no Tabela 1.

Tabela 1: Resumo das instâncias utilizadas durante a simulação

Características das Instâncias		
Instâncias do modelo matemático	Nº de nós	Pontos Turísticos (acumulativos)
Instância 1	8	Cristo Redentor; Pão de Açúcar; Praia de Copacabana; Praia de Ipanema; Museu do Amanhã; Boulevard Olímpico
Instância 2	14	Jardim Botânico; Confeitaria Colombo; Maracanã; Teatro Municipal; Lagoa Rodrigo de Freitas; Escadaria Selarón
Instância 3	20	Centro Cultural Branco do Brasil; Praia Barra da Tijuca; Arcos da Lapa; Aqua Rio; Catedral Metropolitana de São Sebastião; Vista Chinesa

Fonte: Elaborado pelos autores

A Etapa 2 (modelagem) foi subdividida em três partes, sendo elas: (1) formulação matemática, (2) modelagem em linguagem *Mosel* e (3) validação e experimentação computacional. A formulação matemática é apresentada em detalhes na Seção 4, levando em consideração o passo a passo necessário à sua construção, ou seja, como as variáveis de decisão, função objetivo e restrições foram definidas.

Após a formulação matemática, o modelo matemático foi escrito na linguagem de programação *Mosel* com base nos conceitos descrito no manual por Dash (2008). Por fim, utilizando o *software* Xpress IVE[®] foi realizado o teste de validação do modelo, em que foram considerados alguns valores para os parâmetros a fim de verificar a ocorrência de incoerências nas restrições ou erros de codificação ao longo da programação em *Mosel*. Após a validação do modelo, todas as instâncias apresentadas na Tabela 1 foram resolvidas.

Por fim, a Etapa 3 consiste em analisar os resultados obtidos a partir dos resultados computacionais. Todos os resultados obtidos são detalhados ao longo da Seção 5.

4. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

O modelo proposto tem como principal objetivo elaborar uma rota que envolve pontos turísticos da cidade do Rio de Janeiro, focando nos turistas de cruzeiros, conforme já mencionado na Seção 1.

Considerando o trabalho de Silva (2017), conforme descrito na Seção 2, cinco alterações foram incorporadas para representar adequadamente o problema abordado neste trabalho. Essas alterações estão apresentadas na Tabela 2. O modelo de Silva (2017) considera a origem e o destino final como um único nó, ou seja, o hotel é o ponto de partida e também o ponto de destino final. A fim de garantir adequadamente o momento de chegada nos pontos turísticos e, conseqüentemente as janelas de tempo (horários de abertura e de fechamento do ponto turístico), optou-se por trabalhar com o conceito de depósito virtual, artifício comum em problemas de roteamento. Neste caso, o turista deve partir de um ponto inicial (Porto maravilha), visitar alguns pontos turísticos uma única vez, e caminhar em direção ao depósito virtual (que é na verdade uma nova representação da origem, ou seja do Porto Maravilha). A vantagem desta abordagem consiste no fato de a rota do turista é transformada em um caminho que deve iniciar na origem e terminar no depósito virtual.

O fator temporal foi inserido no modelo matemático para garantir as janelas de tempo (Alteração 2) Para isso, novas variáveis e restrições foram acrescentadas ao modelo base de Silva (2017). Ao analisar o modelo de Silva (2017), verificou-se que ele considera simultaneamente custos de deslocamento e nível de satisfação da Função Objetivo. Para evitar este problema e melhor definir o roteiro, a Alteração 3 consiste uma normalização da Função Objetivo que leva em consideração os valores máximos dos termos que a compõem.

A função objetivo do modelo de Silva (2017) é dividida em duas partes, sendo que o primeiro termo consiste em maximizar a satisfação do turista com base no prêmio recebido (satisfação de realizar aquela visita), enquanto o segundo termo consiste em minimizar o custo de deslocamento, conforme explicado na Seção 2. Desta forma, as Alterações 4 e 5 realizadas buscam maximizar a satisfação e a quantidade de pontos turísticos visitados e, ao mesmo tempo, minimizar a distância percorrida e os custos com visitação. Com isso, novas variáveis de decisão foram inseridas no modelo base de Silva (2017). Busca-se assim que o turista visita mais pontos turísticos, gerando uma maior satisfação, e que percorra a menor distância ao menor custo possível que está associado às entradas nos pontos turísticos.

Tabela 2: Resumo das alterações realizadas no modelo base de Silva(2017)

Alteração	Modelo Base de Silva (2017)	Modificação Realizada
-----------	-----------------------------	-----------------------

1	Origem = Destino Final	Depósito Virtual
2	Sem Janelas de Tempo	Com Janelas de Tempo
3	Função Objetivo com diferentes unidades	Normalização da Função Objetivo
4	Maximizar satisfação	Maximizar satisfação e quantidade de pontos turísticos visitados
5	Minimizar custo com base na distância percorrida	Minimizar a distância percorrida e os custos com visitaçao

Fonte: Elaborado pelos autores

Com base nas alterações descritas na Tabela 2, seja N o conjunto de pontos turísticos a serem visitados, sendo $|N|$ o número total desses locais. Considere ainda que o ponto de origem (Porto Maravilha) e o depósito virtual são representados pelos nós 0 e $|N| + 1$, respectivamente. Assim, o conjunto total de nós considerados no problema é dado por $\Gamma = N \cup \{0, |N| + 1\}$. Para representar a satisfação do turista, seja ρ_i o prêmio recebido ao visitar o nó $i \in N$ e seja σ_{ik} o prêmio recebido se esse nó for visitado na k -ésima ordem. A ideia é garantir que se um ponto turístico for visitado em uma ordem esperada pelo turista, então ele se torna ainda mais satisfeito.

Cada ponto turístico $i \in N$ possui ainda um custo de visitaçao c_i , um tempo estimado s_i , de visitaçao e janela de tempo $[a_i, b_i]$. Os deslocamentos dos turistas devem ser considerados, sendo assim seja d_{ij} a distância existente entre o nó $i \in \Gamma$ e o nó $j \in \Gamma$ e t_{ij} o tempo estimado para realizar esse deslocamento.

Com relação às variáveis de decisão, seja $x_{ij} \in \{0,1\}$, $i, j \in \Gamma$. Se $x_{ij} = 1$, o turista deve deixar o nó i e seguir em direção ao nó j , caso contrário, $x_{ij} = 0$. Além disso, seja $y_{ik} \in \{0,1\}$, $i \in \Gamma$, $k \in \{1, 2, 3, \dots, |N|\}$. Se $y_{ik} = 1$, o turista visita o nó i na k -ésima ordem, caso contrário, $y_{ik} = 0$.

Assim, o modelo matemático proposto está apresentado a seguir sendo $\rho_{max} = \text{Max}_{i \in N} \{\rho_i\}$, $\sigma_{max} = \text{Max}_{i \in N, k \in \{1,2,3,\dots,|N|\}} \{\sigma_{ik}\}$, $c_{max} = \text{Max}_{i \in N} \{c_i\}$ e $d_{max} = \text{Max}_{i \in \Gamma, j \in \Gamma} \{d_{ij}\}$,

A Equação (1) representa a Função Objetivo (FO) do problema proposto, cujo objetivo é maximizar a satisfação do turista em visitar determinado ponto turístico, a quantidade de pontos turísticos a ser visitado, assim como minimizar a distância percorrida e o custo de visitar o ponto turístico. O Quadro 3 apresenta todas as variáveis utilizadas no modelo, assim como suas descrições.

$$\text{Max} \sum_k \sum_i \frac{(\rho_i * y_{ik})}{\rho_{max}} + \frac{(\sigma_{ik} * y_{ik})}{\sigma_{max}} + \frac{y_{ik}}{N} - \frac{c_i * y_{ki}}{c_{max}} - \sum_i \sum_j \frac{d_{ij} * x}{d_{max}} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_j x_{1j} = 1 \quad (2)$$

$$\sum_i x_{i,\Gamma} = 1 \quad (3)$$

$$\sum_i x_{ij} = \sum_k y_{jk} \quad \forall_j \in N \quad (4)$$

$$\sum_j x_{ij} = \sum_k y_{jk} \quad \forall_i \in N \quad (5)$$

$$x_{1j} = y_{1j} \quad \forall_j \in \Gamma \quad (6)$$

$$x_{ij} \geq y_{k-1,j} + y_{kj} - 1 \quad \forall_i, \forall_j, \forall_k \in \Gamma \text{ e } k \neq 1 \quad (7)$$

$$\sum_i^\Gamma y_{ik} \geq \sum_j^\Gamma y_{j,k+1} \quad \forall_k \in \Gamma \text{ e } k \neq n \quad (8)$$

$$\sum_k^\Gamma y_{ik} \leq 1 \quad \forall_i \in \Gamma \quad (9)$$

$$\sum_i^\Gamma y_{ik} \leq 1 \quad \forall_k \in \Gamma \quad (10)$$

$$x_{ii} = 0 \quad \forall_i \in \Gamma \quad (11)$$

$$x_{i1} = 0 \quad \forall_i \in N \quad (12)$$

$$x_{\Gamma j} = 0 \quad \forall_j \in \Gamma \quad (13)$$

$$T_i - T_j + M * x_{ij} \leq M - t_{ij} - s_i \quad \forall_i, \forall_j \in \Gamma \quad (14)$$

$$T_i \geq a_i \quad \forall_i \in \Gamma \quad (15)$$

$$T_i \leq b_i \quad \forall_i \in \Gamma \quad (16)$$

$$x_{ij}, y_{ij} \in \{0,1\}$$

$$T_i \text{ real}$$

A Restrição (2) determina a saída do cruzeirista do Porto Maravilha (nó zero) e a Restrição (3) determina a chegada do cruzeirista no Porto Maravilha virtual (nó $|N|+1$). As Restrições (4) e (5) garantem a visita de um determinado ponto turístico, não sendo necessário visitar todos os pontos turísticos, com isso, quando o termo negativo da Função Objetivo (custo e deslocamento) for maior que o termo positivo (satisfação), a solução ótima será nula e o roteiro consistirá em sair do ponto zero (Porto Maravilha) e chegar ao nó $|N|+1$ (virtual). As Restrições (6)-(10) descrevem as restrições de ordem de visita. A Restrição (11) garante que o cruzeirista visite o mesmo ponto turístico, as Restrições (12) e (13) são utilizadas para garantir que o cruzeirista não volte para o nó inicial, e sim para o nó final ($|N|+1$). As Restrições (14)-(16) representam as janelas de tempo, em que a Restrição (15) garante o cálculo de T (horário de chegada ao ponto turístico), enquanto as Restrições (16) e (17) delimitam a janela de tempo para que ocorra a visita ao ponto turístico.

5. RESULTADOS COMPUTACIONAIS

O modelo matemático (1)-(17) foi escrito na linguagem de modelagem *mosel*, permitindo assim que testes computacionais fossem realizados no *solver* XPress IVE. Porém, conforme descrito na Seção 3, esse modelo inicialmente foi validado a partir de dados gerados em ambiente controlado. Após validação, passou para a resolução das instâncias apresentadas na Tabela 1 com apoio de um computador equipado com processador Intel® Core™ i7-4790 CPU @ 3,60GHz e 8,00 GB de memória RAM.

As instâncias descritas na Tabela 1 receberam informações com base Esch (2017). Segundo esse autor, durante a temporada de 2015 e 2016, os cruzeiros atracaram no Porto Maravilha por volta das 08:00h e seguiram suas viagens no mesmo dia, entre 17:00h e 23:00h. Sendo assim, adotou-se que as 20:00h os cruzeiros deixariam o Porto maravilha, o que limitou em 12h o tempo total disponível para as visitas. Levando em consideração essa restrição de tempo, Esch (2017) notou que alguns cruzeiristas preferiam realizar passeios próximos à região portuária, sendo assim, adotou-se três tipos de cenários para avaliar os possíveis comportamentos, conforme a Tabela 3.

Tabela 3: Resumo dos cenários para simulação

Cenários	Descrição	σ_{ik}
a	Preferência por viagens distantes ao	Nula para pontos turísticos dentro da região

	porto	portuária
b	Preferência por viagens próximas ao porto	Nula para pontos turísticos fora da região portuária
c	Sem Preferência	Nula para todos os pontos turísticos

Fonte: Elaborado pelos autores.

O primeiro cenário determina que o cruzeirista tenha preferência por realizar viagens mais distantes da região portuária, o segundo cenário garante que o cruzeirista prefere visitar os pontos turísticos próximos ao porto, e o terceiro cenário estabelece que o turista não tenha preferência por ordem de visita, e sim pelo roteiro ótimo de acordo com as restrições estabelecidas. Para isso, o centro do Rio de Janeiro foi estabelecido como referência para determinar os pontos turísticos próximos à região portuária e os pontos turísticos distantes, ou seja, qualquer ponto turístico que se encontra no centro da cidade foi classificado como próximo à região portuária.

Além disso, cada cenário considerou um valor diferente para o prêmio recebido por visitar um ponto turístico em uma dada ordem. Para o Cenário 1, considerou-se que esse parâmetro recebe um valor maior que zero para aqueles pontos turísticos distantes (fora do centro da cidade) do Porto Maravilha e zero para os demais. Já o Cenário 2 considera o posto do Cenário 1, ou seja, pontos turísticos localizados próximos (centro do Rio de Janeiro) ao Porto Maravilha recebem valores maiores que zero para a premiação, já aqueles locais afastados recebem como premiação o valor zero. Por último, o Cenário 3 considera que não existe preferência por visitar um local turístico. Nesse caso, todos os pontos turísticos recebem o valor zero para suas respectivas premiações. A Tabela 4 e 5 resume os resultados obtidos após os testes computacionais.

Tabela 4: Resultados dos testes computacionais

	Instância 1			Instância 2			Instância 3		
	Cenários			Cenários			Cenários		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
FO	0,38	1,38	0,38	0,66	1,49	0,60	1,41	2,08	1,41
Satisfação	1,34	1,17	0,17	1,73	1,57	2,57	2,64	2,50	2,62
Distância Total (km)	28,52	3,34	3,34	30,11	7,78	31,68	33,46	32,92	33,46
Custo Total (R\$)	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	90,00	80,00	0,00	80,00
Tempo de Deslocamento (h)	0,91	0,23	0,23	1,21	0,58	1,49	1,49	1,46	1,49
Tempo de Atividade (h)	6,50	2,50	2,50	8,50	4,50	8,50	10,50	9,50	10,50
Tempo Total do Roteiro Turístico (h)	7,41	2,73	2,73	9,71	5,08	9,99	11,99	10,96	11,99
Tempo de Operação Computacional (s)	0,08	0,11	0,08	4,28	1,99	3,71	5559	2317	8197
GAP	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	26,22 %	0%	24,09 %
Memória Utilizada	0	0	0	1,0M B	0	340k b	0,5GB	117M B	484M B
Quantidade de Nodes	1	1	1	281	53	1019	36503 1	27266 5	44636 7
Quantidade de Pontos Turísticos Visitado	4	2	2	6	4	5	6	7	6

Fonte: Elaborado pelos autores

Tabela 5: Ordem de visitação dos pontos turísticos

Instância 1	Cenários	a	Praia de Ipanema; Praia de Copacabana; Museu do Amanhã; Boulevard Olímpico
		b	Museu do Amanhã; Boulevard Olímpico
		c	Museu do Amanhã; Boulevard Olímpico
Instância 2	Cenários	a	Praia de Ipanema; Praia de Copacabana; Escadaria Selarón; Confeitaria Colombo; Museu do Amanhã; Boulevard Olímpico
		b	Escadaria Selarón; Confeitaria Colombo; Museu do Amanhã; Boulevard Olímpico
		c	Cristo Redentor; Escadaria Selarón; Confeitaria Colombo; Museu do Amanhã; Boulevard Olímpico
Instância 3	Cenários	a	Cristo Redentor; Escadaria Selarón; Arcos da Lapa; Confeitaria Colombo; Centro Cultural Branco do Brasil; Boulevard Olímpico
		b	Confeitaria Colombo; Arcos da Lapa; Escadaria Selarón; Jardim Botânico; Praia de Ipanema; Praia de Copacabana; Boulevard Olímpico
		c	Cristo Redentor; Escadaria Selarón; Arcos da Lapa; Confeitaria Colombo; Centro Cultural Branco do Brasil; Boulevard Olímpico

Fonte: Elaborado pelos autores

Em relação à Instância 1, todos os cenários foram resolvidos rapidamente pelo Xpress (menos de 0,1 segundos). Ao comparar os resultados obtidos da Instância 1 para os três cenários, verificou-se que a maior Função Objetivo foi a do Cenário b, em que, os pontos turísticos mais próximos são os mais desejados. Sendo assim, o roteiro turístico ótimo do Cenário b é caracterizado pela visita de apenas dois dos seis pontos turísticos disponíveis. O turista sai do ponto de origem (porto Maravilha), visita o Museu do Amanhã, seguido do Boulevard Olímpico e retorna ao Porto Maravilha. Ele percorre 3,3km, utiliza 2,7 horas nesse deslocamento e gasta apenas 10 reais.

De acordo com os resultados obtidos da Instância 2, verificou-se que o tempo de simulação computacional aumentou quando comparado à Instancia 1, variando entre 1,98 segundos e 4,28 segundos. A Função Objetivo do Cenário b se destacou novamente como a que apresentou o melhor valor, quando comparada aos demais cenários. Assim, o roteiro turístico ótimo para este cenário considera que o turista sai do ponto de origem (Porto Maravilha), visita a Escadaria Selarón, Confeitaria Colombo, Museu do Amanhã, Boulevard Olímpico e retorna ao Porto Maravilha. Nesse caso, ele percorre 7,7km, utiliza 5,0 horas e gasta 10 reais de visitação.

Ao tentar resolver a Instância 3, notou-se que o tempo computacional aumentou demasiadamente, conforme a Figura 2. Somente o Cenário b foi resolvido de maneira ótima. Nos demais, o Xpress parou por falta de memória. No Cenário a, o Xpress parou depois de 1,5h de execução com um GAP residual de 26,22% e no Cenário c, o *solver* parou após 2,3h com GAP residual de 24,09%. Além disso, a memória necessária aumentou significativamente, sendo necessários 0,5GB para o Cenário a, 117MB para o Cenário b e 484MB para o Cenário c.

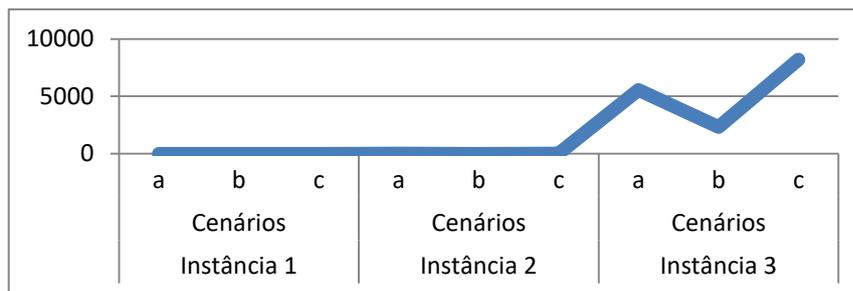


Figura 2: Tempo de resolução computacional

Fonte: Elaborado pelos autores

Em relação ao valor da Função Objetivo, o Cenário b foi de 2,08 enquanto os Cenários a e c obtiveram o mesmo resultado, no valor de 1,41. Verificou-se que, em todas as Instâncias, o Cenário b apresentou melhor resultado da Função Objetivo, isso é explicado principalmente pelo *trade-off* entre deslocamento e satisfação. Quando analisado as Instância 1 e 2, o nível de satisfação do Cenário b é menor quando comparado aos Cenários a e Cenário c, já que, os pontos turísticos com maior nível de satisfação se encontram distante da região portuária, tais como Copacabana, Ipanema, Cristo Redentor e Pão de Açúcar. Contudo, o deslocamento para estes pontos turísticos são elevados, impactando assim de maneira negativa o valor da Função Objetivo. Logo, é mais vantajoso visitar os pontos turísticos próximos à região portuária.

De outro modo, a Instância 3 apresenta um comportamento diferente, em que o nível de satisfação e deslocamento total percorrido mostram valores próximos, ou seja, o *trade-off* entre nível de satisfação e deslocamento é baixo. Neste caso, os fatores que corroboram para determinar o melhor valor da Função Objetivo foram: janela de tempo limitada, a quantidade de pontos turísticos visitados e o custo de visitação. O Cenário b apresentou mais pontos turísticos visitados, a janela de tempo foi satisfeita com folga e o custo de visitação foi nulo.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os testes computacionais desempenham um papel fundamental para a resolução de problemas reais. Sendo assim, os modelos matemáticos são frequentemente utilizados como ferramenta para auxiliar a tomada de decisão com base na melhor solução possível.

Este artigo apresentou um modelo matemático de otimização para identificar rotas para turistas que leva em consideração o comportamento, as opiniões e as escolhas dos cruzeiristas que atracam no Porto Maravilha na cidade do Rio de Janeiro (RJ). Os resultados obtidos, a partir dos cenários simulados, foram satisfatórios e coerentes com o esperado. Verificou-se que o *solver* Xpress IVE é capaz de resolver com eficiência problemas com até 14 nós. A partir de 20 nós a busca pela solução ótima requer maior tempo operacional. Portanto, para problemas maiores, recomenda-se o uso de outros métodos de solução como, por exemplo, Busca Tabu. Ainda neste sentido, o método de resolução computacional utilizado neste artigo não é recomendado para aplicações reais, já que, há um crescimento exponencial no tempo de resolução computacional conforme a quantidade de nós aumenta.

Além disso, observa-se que nenhum cenário apresentou um roteiro com todos os pontos turístico. Ainda que as Instância 1 e 2 apresentem folga nas janelas de tempo, alguns pontos turísticos não foram incluídos devido ao *trade-off* existente entre nível de satisfação e a relação deslocamento-custo. Ainda neste sentido, quando a quantidade de pontos turísticos aumenta, o roteiro ótimo tende a maximizar a quantidade de visitas realizadas, pois, quanto

maior a quantidade de pontos disponíveis para visitar, menor é o *trade-off* entre satisfação e deslocamento. Ou seja, para a Instância 3, é mais vantajoso visitar todos os pontos turísticos possível do que minimizar o deslocamento percorrido. Contudo, conforme a quantidade de pontos turísticos aumenta, a janela de tempo se torna um limitante forte para o problema, sendo assim, a escolha por pontos turísticos próximos à região portuária de fato deve ser vista como prioridade para o passeio turístico.

Vale ressaltar que o roteiro turístico ótimo pode ser utilizado para auxiliar a tomada de decisão dos cruzeiristas que buscam realizar passeios por conta própria, assim como as empresas de turismo que buscam vender pacotes de *tour* com o menor custo possível. Sendo assim, como proposta para trabalhos futuros, propõem-se a construção de um aplicativo de roteamento de pontos turísticos com base nos conceitos apresentados ao longo deste artigo. Para isso, será necessário o uso de um método de resolução computacional mais eficiente do que o método de utilizado pelo *solver* Xpress IVE.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al Shamsi, A.; Al Raisi, A.; Aftab, M. (2014). Pollution-inventory routing problem with perishable goods. *Proceedings...In: Logistics operations, supply chain management and sustainability*. Springer, Cham, 2014. p. 585-596.
- Babae Tirkolae E.; Alinaghian M.; Bakhshi Sasi M.; Seyyed Esfahani M. M. (2016). Solving a robust capacitated arc routing problem using a hybrid simulated annealing algorithm: a waste collection application. *Journal of Industrial Engineering and Management Studies*, v. 3, n. 1, p. 61-76.
- Balas, E. (1989). The prize collecting traveling salesman problem. *Networks*, v. 19, n.6, p. 621-636.
- Benson, H. Y. (2010) Interior-Point Linear Programming Solvers. *Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science*.
- Black, D.; Eglese, R.; & Wøhlk, S. (2013). The time-dependent prize-collecting arc routing problem. *Computers & Operations Research*, v. 40, n.2, p. 526-535.
- Coriolano, L. N. (2012). A contribuição do turismo ao desenvolvimento local. Turismo, espaço e estratégias de desenvolvimento local. João Pessoa, PB: Editora Universitária da UFPB, p. 61-70.
- Dash Optimization (2008). *Xpress MP Getting Started*. Fair Isaac Corporation. Disponível em : < <http://www.dashoptimization.com>>, acesso em: 15 de Abril de 2019.
- DataRio (2018). *Prefeitura do Rio de Janeiro*. Disponível em: <http://www.data.rio/search?groupIds=729990e9fbc04c6ebf81715ab438cae8&sort=-modified>. Acesso em 12 de julho de 2018.
- Embratur (2017). *Ministério do Turismo: Instituto Brasileiro do Turismo*. Disponível em: http://www.embratur.gov.br/piembratur-new/opencms/salaImprensa/noticias/arquivos/Rio_de_Janeiro_continua_sendo_o_destino_mais_visitado_da_America_do_Sul.html. Acesso em: 12 de julho de 2018.
- Esch, M. O. (2017). *Análise do deslocamento intradestinos dos cruzeiristas no rio de janeiro pela perspectiva do VLT*. Dissertação de mestrado (Engenharia de Transportes, COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ.
- Ferreira, A.. (2010). O projeto “Porto Maravilha” no Rio de Janeiro: inspiração em Barcelona e produção a serviço do capital?. *Biblio 3w: revista bibliográfica de geografia y ciencias sociales*, 2010.
- Halvorsen-Weare, E. E.; Fagerholt, K.; Monas, L. M.; Asbjørnslett, B. E. (2012). Optimal fleet composition and periodic routing of offshore supply vessels. *European Journal of Operational Research*, v. 223, n. 2, p. 508-517.
- Hillier, F. S.; Liebermann, G. J. (2014). *Operations Research: Einführung*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG.
- Rabeh, R.; Saïd, K.; Eric, M. (2011). Collaborative model for planning and scheduling caregivers’ activities in homecare. *IFAC Proceedings Volumes*, v. 44, n. 1, p. 2877-2882.
- Rieck, J.; Zimmermann, J. (2010). A new mixed integer linear model for a rich vehicle routing problem with docking constraints. *Annals of Operations Research*, v. 181, n. 1, p. 337-358.
- Sampaio, C. A. C.; Zamignan, G. (2015). Estudo da demanda turística: experiência de turismo comunitário da Microbacia do Rio Sagrado, Morretes (PR). *Cultur-Revista de Cultura e Turismo*, v. 6, n. 1, p. 25-39.
- Schneider, M.; Stenger, A.; Goeke, D. (2014). The electric vehicle-routing problem with time windows and recharging stations. *Transportation Science*, v. 48, n. 4, p. 500-520.

- Silva, A. A. (2017). *Abordagens de otimização para apoiar a elaboração e análise de roteiros turísticos*. Tese de doutorado (Engenharia de Produção), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos –SP.
- Stenger, A.; Schneider, M.; Goeke, D. (2013). The prize-collecting vehicle routing problem with single and multiple depots and non-linear cost. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, v. 2, n. 1-2, p. 57-87.
- Toledo, M. P. (2012). *Participação de instituições locais em projetos de revitalização urbana: o caso do Projeto Porto Maravilha na cidade do Rio de Janeiro*. Dissertação de mestrado (Gestão Social), Escola Brasileira de Administração Pública e de Empresas, Rio de Janeiro - RJ.

Igor Tureta Zanchetta (igor.zanchetta@pet.coppe.ufrj.br)

Rodrigo Pereira Pagliusi (rodrigo_pagliusi@poli.ufrj.br)

Laura Silva Bahiense da Silva Leite (laura@cos.ufrj.br)

Centro de Tecnologia - Rua Horácio Macedo, Bloco H, 2030 - 101 - Cidade Universitária, Rio de Janeiro - RJ, 21941-450