

Carlos Eduardo Sanches de Andrade
(Organizador)

O Desenvolvimento Sustentável do Sistema de Transportes do Brasil



Carlos Eduardo Sanches de Andrade
(Organizador)

O Desenvolvimento Sustentável do Sistema de Transportes do Brasil



2019 by Atena Editora
Copyright © Atena Editora
Copyright do Texto © 2019 Os Autores
Copyright da Edição © 2019 Atena Editora
Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira
Diagramação: Lorena Prestes
Edição de Arte: Lorena Prestes
Revisão: Os Autores



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição Creative Commons. Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores. Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

Profª Drª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior – Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Faria – Universidade Estácio de Sá
Prof. Dr. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima
Prof. Dr. Fabiano Tadeu Grazioli – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Profª Drª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Universidade Federal do Maranhão
Profª Drª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Sandra Regina Gardacho Pietrobom – Universidade Estadual do Centro-Oeste
Profª Drª Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia
Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Profª Drª Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia
Prof. Dr. Écio Souza Diniz – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto
Prof. Dr. Alexandre Leite dos Santos Silva – Universidade Federal do Piauí
Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)	
D451	<p>O desenvolvimento sustentável do sistema de transportes do Brasil [recurso eletrônico] / Organizador Carlos Eduardo Sanches de Andrade. – Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2019.</p> <p>Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-85-7247-855-7 DOI 10.22533/at.ed.557191912</p> <p>1. Transporte e Estado – Brasil. 2. Transportes – Brasil – Planejamento. I. Andrade, Carlos Eduardo Sanches de. CDD 380.5068</p>
Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422	

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná - Brasil
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

A obra “O Desenvolvimento Sustentável do Sistema de Transportes do Brasil” publicada pela Atena Editora apresenta, em seus 8 capítulos, estudos sobre o setor de transportes e seu desenvolvimento sustentável.

O tema é de grande relevância, pois o setor de transportes é vital para o crescimento do país, Tanto no transporte de passageiros quanto no transporte de cargas há inúmeros desafios a serem superados. O desenvolvimento econômico depende de um sistema de transporte bem estruturado e o desafio é estruturar o sistema de transporte de uma maneira sustentável.

O desenvolvimento sustentável do sistema de transportes do Brasil deve ser visto em seus aspectos econômicos, sociais e ambientais. Deve prover a solução efetiva de menor custo, que ofereça maior mobilidade e segurança e que tenha o menor impacto ambiental possível. Os capítulos apresentados abordam temas ligados a esses aspectos,

A tecnologia tem um papel preponderante nesse desenvolvimento e é preciso sempre ficar atento às inovações tecnológicas que ofereçam maior qualidade ao serviço de transporte. Os denominados ITS – *Intelligent Transportation Systems* são sistemas de transporte que utilizam as tecnologias da informação e comunicação e são cada vez mais aperfeiçoados e utilizados.

Ferramentas tradicionais de modelagem, otimização e pesquisa operacional ajudam a planejar um sistema de transporte sustentável. A boa gestão das empresas de transporte também é importante para a efetividade do sistema.

No contexto brasileiro, com inúmeros rios, o transporte fluvial oferece uma grande oportunidade de transporte sustentável a ser explorada, sendo capaz de atender tanto ao transporte de passageiros quanto ao de carga.

O setor de transporte é grande emissor dos gases de efeito estufa, que produzem um impacto ambiental considerável, as alterações climáticas. Assim, o desenvolvimento do transporte sustentável deve mitigar essas emissões.

Agradecemos aos autores dos diversos capítulos apresentados e esperamos que essa compilação seja proveitosa para os leitores.

Carlos Eduardo Sanches de Andrade.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	17
ADAPTAÇÃO DA FERRAMENTA QFD PARA ANÁLISE DA POTENCIALIDADE DE ITS NA SEGURANÇA VIÁRIA	
Christine Tessele Nodari Noara Foiatto Maurício Castilhos de Oliveira Francisco Marchet Dalosto Maria Beatriz Berti da Costa	
DOI 10.22533/at.ed.5571919121	
CAPÍTULO 2	17
CARACTERIZAÇÃO E MODELAGEM DAS VIAGENS EM MOTOCICLETAS EM PÓLOS UNIVERSITÁRIOS: O CASO DA UNIVERSIDADE NACIONAL DE LA RIOJA, ARGENTINA	
Violeta Silvia Irene Depiante Patricia Mónica Maldonado Jorge José Galarraga	
DOI 10.22533/at.ed.5571919122	
CAPÍTULO 3	33
MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA O CONTROLE ATIVO DO PLANO DE TEMPORIZAÇÃO SEMAFÓRICA DE INTERSEÇÕES	
Samara Soares Leal Paulo Eduardo Maciel de Almeida José Elievam Bessa Júnior	
DOI 10.22533/at.ed.5571919123	
CAPÍTULO 4	39
A PESQUISA OPERACIONAL COMO FERRAMENTA DE APOIO À ELABORAÇÃO DE ROTEIROS TURÍSTICOS	
Admilson Alcântara da Silva Reinaldo Morabito Neto Vitória Maria Miranda Pureza	
DOI 10.22533/at.ed.5571919124	
CAPÍTULO 5	52
SISTEMÁTICA DE GERENCIAMENTO E ORGANIZAÇÃO DA INFORMAÇÃO UMA ABORDAGEM ORIENTADA PARA A GESTÃO DE EMPRESAS DE TRANSPORTE URBANO DE PASSAGEIROS POR ÔNIBUS	
Oneida Barros Bezerra Sérgio Fernando Mayerle	
DOI 10.22533/at.ed.5571919125	
CAPÍTULO 6	65
TRANSPORTE FLUVIAL POR EMBARCAÇÕES MISTAS: UMA VISÃO ECONÔMICA A PARTIR DO MODELO ECD	
Lucas Gabriel Melo da Silva Márcio Antônio Couto Ferreira Salomão Franco Neves Edilson Pinto Barbosa	
DOI 10.22533/at.ed.5571919126	

CAPÍTULO 7	79
A INFRAESTRUTURA URBANA DE TRANSPORTES E O AQUECIMENTO GLOBAL: UM ESTUDO SOBRE POSSÍVEIS MEDIDAS DE MITIGAÇÃO	
Berta Castelar Pinheiro	
Suzana Kahn Ribeiro	
DOI 10.22533/at.ed.5571919127	
CAPÍTULO 8	94
A CONTRIBUIÇÃO DOS SISTEMAS METROVIÁRIOS PARA O ATINGIMENTO DAS METAS DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA – ESTUDOS EM METRÔS DO BRASIL E DE PORTUGAL	
Carlos Eduardo Sanches de Andrade	
Márcio de Almeida D’Agosto	
DOI 10.22533/at.ed.5571919128	
SOBRE O ORGANIZADOR	107
ÍNDICE REMISSIVO	108

A PESQUISA OPERACIONAL COMO FERRAMENTA DE APOIO À ELABORAÇÃO DE ROTEIROS TURÍSTICOS

Admilson Alcântara da Silva

Universidade Federal de São Carlos
Departamento de Engenharia de Produção
E-mail: admilson.alcantara@yahoo.com.br

Reinaldo Morabito Neto

Universidade Federal de São Carlos
Departamento de Engenharia de Produção
E-mail: morabito@dep.ufscar.br

Vitória Maria Miranda Pureza

Universidade Federal de São Carlos
Departamento de Engenharia de Produção
E-mail: vpureza@dep.ufscar.br

RESUMO: Este trabalho aborda o problema de elaboração de roteiros turísticos, levando-se em conta parâmetros como custos, distâncias e valoração dos turistas das atrações oferecidas, assim como suas preferências em relação à ordem de visita dessas atrações. O problema é descrito por um modelo de otimização que visa obter roteiros que maximizem a satisfação dos turistas e minimizem os custos envolvidos, e cuja resolução pode ser feita tanto por meio de técnicas de programação matemática como pela aplicação de um algoritmo de busca tabu. São reportados resultados com instâncias geradas aleatoriamente e com base em dados reais, não se tendo conhecimento de trabalhos na literatura similares.

ABSTRACT: This work addresses the problem of elaborating touristic itineraries, taking into account costs, distances and the valuation of the attractions by the visitors, as well as their preferences regarding the order of visit of these attractions. The problem is described by an optimization model, which aims to generate itineraries that maximize the customers' satisfaction and minimize the travel costs, either by means of mathematical programming, or by applying a tabu search algorithm. We present results with these two solution approaches for sets of instances based on randomly generated and real data. As far as we know, there is no similar work reported in the literature.

1 | INTRODUÇÃO

A Organização Mundial do Turismo (OMT, 2014) estima que as atividades turísticas sejam diretamente responsáveis por 6% a 8% dos empregos gerados no mundo. No Brasil, essas atividades movimentaram cerca de 11,9 bilhões de reais em 2014, representando um mercado de seis milhões de turistas viajando pelo país (MTUR, 2015). Esses dados motivam e justificam iniciativas que levem a melhorias do setor, e em particular, na elaboração de roteiros turísticos.

Um roteiro turístico pode ser definido

como o itinerário planejado de uma atividade turística, que engloba a descrição pormenorizada dos atrativos e atividades dos destinos visitados, bem como o período de duração e a especificação dos horários e serviços inclusos. O roteiro constitui a viagem e a estada com uma sequência de atividades realizadas em um destino ou em várias localidades. No caso de agências turísticas, o primeiro passo de sua montagem consiste no levantamento das preferências dos visitantes. Segundo Silva (2017), cada público alvo tem diferentes níveis de interesse nas atrações disponíveis, e muitas vezes, expressam preferências também em relação à ordem em que essas visitas devem ocorrer durante o passeio. Por exemplo, certos públicos priorizam vistas à museus, enquanto outros desejam apenas que tais visitas ocorram no início do itinerário. Além disso, uma parcela não desprezível dos turistas aceitaria pagar em certa medida por mudanças no roteiro e/ou na ordem das visitas. Faz-se então importante, valorar as preferências de atrações e de sua ordem e confrontá-las aos custos envolvidos, de maneira a permitir a elaboração de roteiros que simultaneamente maximizem a satisfação dos clientes e minimizem os custos.

Alinhado a este interesse, Silva, Morabito e Pureza (2016) propõem um modelo de programação matemática baseado em formulações de duas variantes do Problema do Caixeiro Viajante para apoio à elaboração de roteiros turísticos. O presente artigo dá continuidade ao estudo, com a proposição de um algoritmo de busca tabu (GLOVER e LAGUNA, 2007). Métodos heurísticos se fazem necessários para o tratamento de instâncias de maior porte, pois assim como a maioria dos problemas de roteamento de interesse, o Problema do Caixeiro Viajante e ambas as variantes pertencem à classe NP-hard, sendo, portanto, considerados de difícil resolução. Ressalta-se que tanto quanto sabido, não são reportados estudos em roteiros turísticos que utilizem abordagens de otimização na mesma linha de pesquisa explorada neste trabalho.

A estruturação do restante deste artigo é descrita como se segue. Na Seção 2 faz-se um breve resumo sobre o Problema do Caixeiro Viajante e suas variantes que resultaram no modelo que descreve o problema de elaboração de roteiros turísticos. A modelagem matemática é revista na Seção 3. Na Seção 4 é descrita a abordagem heurística proposta. A Seção 5 apresenta os resultados e análises dos resultados computacionais com instâncias geradas aleatoriamente e com base em dados reais. Finalmente, a Seção 6 apresenta as conclusões e algumas perspectivas de pesquisa futura.

2 | A ELABORAÇÃO DE ROTEIROS TURÍSTICOS SOB A ÓTICA DO PROBLEMA DO CAIXEIRO VIAJANTE

O Problema do Caixeiro Viajante (TSP – *Traveling Salesman Problem*) consiste em definir uma rota de distância mínima que visite exatamente uma vez n pontos distribuídos no espaço bidimensional, retornando-se então ao ponto de partida. O TSP é um dos problemas mais estudados em otimização de redes e tem uma ampla

variedade de aplicações práticas (CHRISTOFIDES, 1979) (APPLEGATE et. al., 2006) e que muitas vezes transcendem o escopo logístico. Desde o trabalho seminal de Dantzig e colaboradores (DANTZIG, FULKERSON e JOHNSON, 1954; DANTZIG e RAMSER; 1959), uma variedade de modelos e métodos de solução vêm sendo propostos para representar e resolver de forma eficaz instâncias de diferentes portes. Muitas variantes do TSP são reportadas na literatura e modelos de programação matemática são frequentemente a base da maioria destas variantes.

Duas variantes do Problema do Caixeiro Viajante são particularmente relevantes para a presente pesquisa, especificamente, um tipo de Problema do Caixeiro Viajante com Lucros (TSPP – *Traveling Salesman Problem with Profits*) conforme discutido em Feillet, Dejax e Gendreau (2005), e o Problema do Caixeiro Viajante com Prêmios de Prioridade (TSPPP – *Traveling Salesman Problem with Priority Prizes*), proposto em Pureza, Morabito e Luna (2016). O TSPPP pode ser visto como uma extensão do TSP clássico, em que todos os pontos precisam ser visitados, mas a ordem das visitas é considerada na função objetivo do problema.

Especificamente, um valor de prêmio p_{ki} é recebido se o ponto i é visitado na ordem da rota, enquanto um custo de viagem c_{ij} incorre devido ao percorrimto do trecho entre i e j . Ressalta-se que pode-se incluir um prêmio p_i que o caixeiro viajante recebe ao visitar o ponto i , independentemente de ordem k , além do prêmio de prioridade p_{ki} que ele recolhe ao visitar o ponto i na k -ésima posição da rota. A variante TSPP aqui considerada, associa, por sua vez, um prêmio p_i a cada ponto i , e consiste em obter uma rota que visite o subconjunto de pontos que maximiza o prêmio total ao mesmo tempo que os custos de viagem são minimizados. Em outras palavras, não é necessário visitar todos os pontos.

O problema de elaboração de roteiros turísticos pode ser formulado pela combinação de aspectos das duas variantes supracitadas. Dado um conjunto de atrações turísticas disponíveis, valores de prêmio coletados quando a atração é visitada, valores de prêmio p_i coletados quando a atração i é visitada na ordem k do roteiro, e custos de viagem entre os pontos i e j , ele consiste na obtenção de uma rota que visite um subconjunto de atrações que maximiza o lucro total, resultado da diferença dos prêmios coletados e dos custos de viagem. Este problema é aqui denominado Problema do Caixeiro Viajante com Lucros e Prêmios de Prioridade (TSPPPP – *Traveling Salesman Problem with Profits and Priority Prizes*) Note que o TSPPPP adota uma função objetivo mais geral que o TSP, com critérios opostos, à procura de soluções que, de alguma forma considerem a qualidade de serviço aos clientes e as prioridades de entrega, maximizando os prêmios recebidos e minimizando os custos de entrega do serviço.

3 I DEFINIÇÃO E FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O TSPPPP pode ser representado por um grafo $G(N,A)$ com n nós, tal que o primeiro nó ($i=1$) representa o ponto de partida do cliente (por exemplo, o hotel onde ele está hospedado), enquanto os demais $n-1$ nós representam as atrações disponíveis. O problema pode ser formulado como um modelo de programação inteira mista (com $x_{ii}=0$), como se segue:

Parâmetros

- : valoração (prêmio) do turista ao visitar a atração i na ordem k .
- : prêmio ao visitar a atração i , independente de sua ordem de visita.
- : custo de viagem do nó i ao nó j .

Variáveis de decisão

z_i : Variável auxiliar para evitar subciclos

$$Maxf = \sum_k \sum_i (p'_{ki} + p_i) y_{ki} - \sum_i \sum_{\substack{j \\ i \neq j}} c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

$$\sum_i x_{ij} = \sum_k y_{kj}, \forall j \quad (2)$$

$$\sum_{\substack{i \\ i \neq 1}} x_{i1} = 1 \quad (3)$$

$$\sum_{\substack{j \\ j \neq i}} x_{ij} = \sum_k y_{ki}, \forall i \quad (4)$$

$$\sum_{\substack{j \\ j \neq 1}} y_{1j} = 1 \quad (5)$$

$$Z_i - Z_j + nx_{ij} \leq n - 1, \forall i, \forall j, i \neq j, i \neq 1 \quad (6)$$

$$x_{1j} = y_{1j} \quad (7)$$

$$X_{ij} \geq y_{(k-1)} + Y_{kj} - 1, \forall i, \forall j, \forall k, k \neq 1 \quad (8)$$

A função objetivo (1) maximiza os prêmios recebidos nas visitas aos nós, tanto pela visita em si como pela ordem da visita, decrementados pelos os custos de transporte incorridos nas visitas. As igualdades (2) e (4) consistem de restrições de atribuição e acoplamento das variáveis x e y . As igualdades (4) asseguram que um único arco emerge de um nó se este for visitado, enquanto as igualdades (2) asseguram que único arco incidem em um nó se este for visitado. As igualdades

(3) e (5) garantem que o roteiro comece e termine no ponto de partida (nó 1). As restrições (6) evitam subciclos. As restrições (7) e (8) também acoplam as variáveis x e y . As restrições (9) a (11), embora não necessárias para garantir a factibilidade das soluções, evitam simetrias (soluções factíveis equivalentes) e desta maneira, melhoram o desempenho de métodos de programação matemática. Finalmente, as restrições (12) definem o domínio das variáveis de decisão.

Convém ressaltar que diferentemente do TSPPP, o TSPPPP não requer que todos os nós sejam visitados no roteiro, mas apenas aqueles que maximizam o valor da função objetivo. E diferentemente do TSPP, o TSPPPP considera prêmios de prioridade no roteiro do turista, além dos prêmios de visita.

4 | A ABORDAGEM HEURÍSTICA

Dadas as dificuldades intrínsecas na resolução de instâncias maiores do TSPPPP com métodos exatos, propõe-se um algoritmo heurístico capaz de fornecer soluções de alta qualidade em tempos computacionais relativamente curtos para todas as instâncias abordadas. O algoritmo baseia-se na abordagem de busca tabu adaptativa proposta em França, Sosa e Pureza (1999) para o Problema de Agrupamento Capacitado e posteriormente aplicada em Pureza, Morabito e Reimann (2012) para o Problema de Roteamento de Veículos com Janelas de Tempo e Múltiplos Entregadores, e em Pureza, Morabito e Luna (2016) para o Problema do Caixeiro Viajante com Prêmios de Prioridade. A abordagem consiste em um mecanismo integrado de intensificação/diversificação que altera a regra de ativação tabu (GLOVER & LAGUNA, 1997) de acordo com os padrões de trajetória de busca (a curva do valor da solução versus iteração) durante a busca local. Basicamente, assume-se que os padrões de trajetória de busca refletem o nível de restritividade imposto pelos valores dos parâmetros tabu, ou seja, pelo período tabu e pela regra de ativação tabu, de maneira que o foco do algoritmo é o de alterar os níveis de restritividade de forma a intensificar a exploração quando as trajetórias identificam regiões possivelmente promissoras, e promover a diversificação da busca para outras partes do espaço de solução se as chances da melhoria parecem mínimas.

4.1 Padrões de trajetória

Para identificar um padrão de trajetória, o processo de busca é dinamicamente dividido em estágios e para cada dois estágios consecutivos $g - 1$ e g , o valor médio da solução no estágio g (μ_g) é comparado com o valor médio da solução no estágio $g - 1$ (μ_{g-1}). Se esses valores médios forem aproximadamente iguais e o coeficiente de variação das médias dos dois estágios estiver próximo de zero, entende-se que a busca descreve uma trajetória estagnada. Por outro lado, se μ_g é maior que μ_{g-1} , uma trajetória de ascensão está ocorrendo. Similarmente, uma trajetória descendente

é identificada se μ_g é menor do que μ_{g-1} .

Uma vez que o padrão de trajetória é identificado, alterações nos níveis de restritividade são prescritas para iterações τh , em que h é um número inteiro gerado aleatoriamente em uma faixa pré-especificada $[h_{min}, h_{max}]$ e τ é um fator de ajuste associado ao padrão de trajetória observado. Antes da avaliação da trajetória, verifica-se se houve melhora na última etapa. Neste caso, os níveis de restritividade e o valor do fator de ajuste também são definidos de forma apropriada. Ou seja, a abordagem reage a fases de melhoria, estagnação, trajetórias ascendentes e trajetórias de descendente, o implica em quatro valores de fator de ajuste t possíveis para definir a duração da aplicação das alterações nos níveis de restritividade. O período de aplicação corresponde a um novo estágio $g + 1$ e uma vez que este termina, uma nova avaliação de padrão de trajetória é realizada usando os valores médios dos estágios g e $g + 1$, e assim por diante.

A Figura 1a ilustra a identificação de uma trajetória descendente no estágio de busca ($\mu_{g-1} > \mu_g$) e a conseqüente prescrição de redução dos níveis de restritividade. A Figura 1b mostra o impacto da redução desses níveis no estágio $g+1$. Quando uma nova avaliação do padrão de trajetória é realizada após $\tau hg+1$ iterações, μ_{g+1} é comparada a μ_g , indicando uma trajetória ascendente. Note que no caso do TSPPPP, trajetórias ascendentes e fases de melhoria indicam regiões promissoras para as quais se prescreve nenhuma mudança ou a redução dos níveis de restritividade, enquanto que para trajetórias descendentes, a restritividade imposta pelos parâmetros tabu é levemente relaxada para interromper a diversificação. Por fim, quando ocorre estagnação na busca, são impostos altos níveis de restritividade, visando a diversificação.

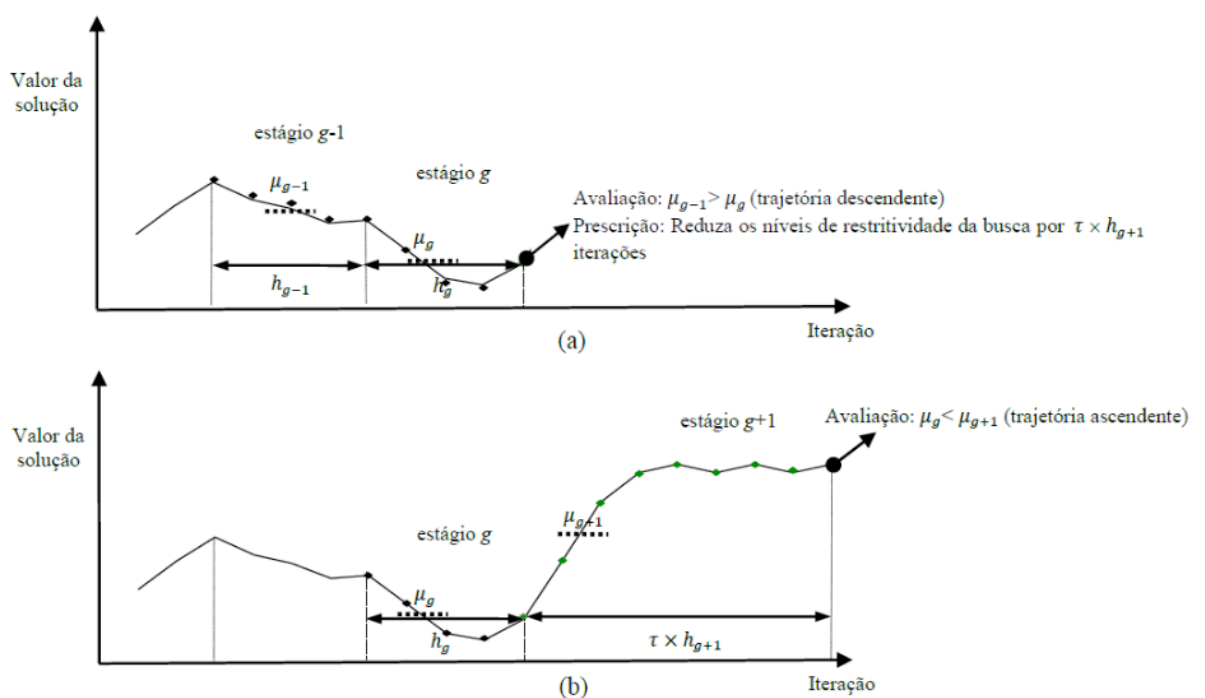


Figura 1: Mecanismo de intensificação/diversificação.

4.2 Descrição do algoritmo

Uma descrição do algoritmo de busca tabu para o TSPPPP (doravante referenciado como algoritmo TS) é apresentada a seguir:

1. Seja n o número total de nós a serem considerados no roteamento.
2. (Construção da rota) A partir de uma rota parcial S , compreendendo um nó escolhido aleatoriamente i ($i \neq 1$) e o nó 1 fixado na n -ésima posição da rota, expanda S selecionando o nó não roteado j e sua posição de inserção que resulta no maior lucro. Repita a etapa até que todos os nós sejam roteados.
3. Inicialize a iteração atual, defina os parâmetros tabu padrão e aplique a busca local para dois estágios consecutivos $g - 1$ e g .
4. Repita até que o tempo máximo de execução T_{\max} seja atingido:
 - 4.1 Se nenhuma melhoria da solução tiver sido obtida no estágio g , identifique o padrão de trajetória atual descrito pelos estágios $g-1$ e g .
 - 4.2 Defina os parâmetros tabu de acordo com o padrão de trajetória ou fase de melhoria. Aplique a busca local para o número prescrito de iterações, obtendo um novo estágio de busca $g + 1$. Faça $g - 1 = g$ e $g = g + 1$.
5. Retorne a melhor solução encontrada.

As rotas iniciais produzidas pela heurística de construção (passo 2) são melhoradas aplicando quatro tipos de movimentos. Dois deles, troca de arcos 2-OPTe troca de posição de dois nós, são utilizados em Pureza et al. (2016) para o TSPPPP. O terceiro e quarto movimentos, por sua vez, consistem respectivamente na remoção de um nó da rota para o conjunto de nós não roteados US , e na reinserção de um nó do conjunto US para a posição da rota que resulta no maior lucro total. Note que esses dois últimos movimentos são necessários para o TSPPPP, uma vez que este admite rotas com um número de nós menor que n .

No caso dos movimentos 2-OPTe troca, os arcos excluídos (adicionados) são rotulados como tabu-ativos pelo período tabu determinado aleatoriamente na faixa sempre que um novo movimento prescreve sua adição (remoção), e conforme mencionado na seção anterior, os níveis de restritividade são manipulados pela regra de ativação tabu. Esta última prescreve o número tolerável de arcos tabu-ativos para cada um dos dois tipos de movimento em um determinado estágio de busca. Observe que quanto menor for o valor de tolerância, mais restrito é o processo de busca. Valores de tolerância para 2- OPT e troca são dados pelos parâmetros TL e TE, respectivamente. No caso do movimento de remoção (reinserção) de um nó, sua reinserção (remoção) é rotulada como tabu-ativa, e o número de nós tabu-ativos tolerados por um destes dois tipos de movimento são dados pelos parâmetros TR (remoção) e TA (reinserção). A duração (número de iterações) do status tabu-ativo de um dado arco ou nó é selecionada aleatoriamente no intervalo $[t_{\min}, t_{\max}] = [10, 20]$.

No passo 3, os valores iniciais de tolerâncias (TL, TE, TR, TA) = (1, 1, 1, 1) são aplicados nos dois primeiros estágios de pesquisa. O primeiro estágio compreende

todas as soluções entre a solução de partida e o primeiro ótimo local, enquanto o segundo estágio começa com a solução que se segue ao primeiro ótimo local e termina com a solução obtida h iterações à frente, sendo h aleatoriamente gerado no intervalo $[t_{min}, t_{max}] = [10, 20]$. também utilizado para gerar os comprimentos dos demais estágios.

No passo 4.2, se alguma melhoria da solução é obtida no último estágio, valores de tolerância (TL, TE, TR, TA) e fator de ajuste τ passam a ser iguais a (1, 2, 1, 1) e 0,1, respectivamente. Esses valores de tolerância visam intensificar a exploração em regiões possivelmente promissoras. Embora não pareçam altos, valores maiores quase invariavelmente levam à ciclagem. Usa-se um valor baixo para τ (resultando em um número relativamente pequeno de iterações) porque, em alguns casos, há geralmente apenas alguns movimentos de melhoria subsequentes.

Tolerâncias baixas (TL, TE, TR, TA) = (0, 1, 0, 0) com $\tau = 0,5$ são impostas quando ocorre a estagnação da busca, especificamente, quando o valor absoluto do percentual do desvio da solução entre a média da fase atual e solução da média da fase anterior é inferior ou igual a 5%, e o coeficiente de variação das médias dos dois estágios é inferior ou igual a 0,2. Ou seja, a estagnação é identificada quando

$$\left| \frac{\mu_{g-1} - \mu_g}{\mu_{g-1}} \right| \leq 0,05 \text{ com } \sigma\mu \leq 0,2$$

Se o valor médio da solução aumenta (trajetória ascendente e possivelmente região promissora) não são aplicadas alterações de tolerância, porém faz-se $\tau = 2$. Finalmente, se o valor médio da solução diminui, as tolerâncias são definidas como (TL, TE, TR, TA) = (0, 1, 0, 0) e $\tau = 1$.

5 | EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

Com o propósito de verificar a aplicabilidade da programação matemática e do algoritmo TS na elaboração de roteiros turísticos, foram realizados experimentos computacionais com instâncias geradas aleatoriamente e com uma instância baseada em dados reais da cidade de Belém, coletados no estudo de caso de Silva (2017). O objetivo dos experimentos com instâncias aleatórias é verificar se as soluções são obtidas em tempo computacional aceitável, e se a quantidade de nós que o modelo suporta corresponde à quantidade de pontos turísticos visitados em um roteiro turístico usual. Os testes com a instância baseada em dados reais visam, por sua vez, comparar roteiros produzidos com o modelo e que consideram a valoração das atrações pelos clientes com um roteiro comercial praticado por agências de turismo.

O modelo TSPPPP foi implementado na linguagem de modelagem GAMS e resolvidos com o solver CPLEX 24.0.2. O algoritmo de busca tabu, por sua vez, foi codificado e resolvido em Borland Delphi. Todos os experimentos foram realizados

em um computador Intel i5, 2,6 GHz e 4 GB RAM.

5.1 Instâncias Geradas Aleatoriamente

A distribuição uniforme foi selecionada para gerar custos de viagem (c_{ij}) e prêmios de visita e ordens de visita (p_i e p_{ki} , respectivamente). Especificamente, p_i foi gerado no intervalo (-100,100) e p_{ki} no intervalo (0,100). Note que valores de p_i negativos e de grande magnitude indicam alto grau de rejeição na seleção da atração.

Dez instâncias foram geradas e para cada número n de nós ($n = 10, 20, 30, 50, 100, 200$) e o solver CPLEX foi aplicado a cada instância por 3600 segundos. A Tabela 1 apresenta os resultados médios (f e CPU em segundos) para cada valor de n , assim como o desvio percentual médio do valor da função objetivo das soluções de TS em relação ao obtido com programação matemática.

n		Modelo TSPPP com GAMS/CPLEX	Algoritmo TS	$\frac{(\bar{f}_{TS} - \bar{f}_{Modelo})}{\bar{f}_{Modelo}} \times 100$ (%)
10	\bar{f}	799,06	799,06	0
	\overline{CPU} (s)	0,13	0,01	
20	\bar{f}	1.830,1	1.830,1	0
	\overline{CPU} (s)	5,0	0,01	
30	\bar{f}	2.568,9	2.568,9	0
	\overline{CPU} (s)	411,1	0,06	
50	\bar{f}	4.441,8	4.441,8	0
	\overline{CPU} (s)	3598,1	2,74	
100	\bar{f}	585,47	2378,9	+ 306,3
	\overline{CPU} (s)	4403,37	1,97	
200	\bar{f}	Soluções factíveis não encontradas	5236,4	-
	\overline{CPU} (s)	3600	35,17	

Tabela 1: Resultados computacionais médios com instâncias aleatórias

Conforme observado na Tabela 1, ambas a programação matemática e o algoritmo tabu apresentam desempenho comparável no tratamento de instâncias com $n = 10$ e $n = 20$. Para essas duas classes de exemplos, todas as soluções obtidas são comprovadamente ótimas, com alguma vantagem para o algoritmo TS em função dos tempos computacionais menores. A partir desses tamanhos de instância, TS se mostra mais bem sucedido, seja em relação a tempos computacionais ($n = 30, 50$), seja em relação à qualidade das soluções ($n = 100$). Para $n = 200$, nenhuma solução factível para as dez instâncias geradas foi obtida pelo solver CPLEX em 3600

segundos de processamento, revelando suas dificuldades intrínsecas de tratamento de instâncias de médio e grande porte.

5.2 Instância Baseada em Dados Reais

Nesta seção, são utilizados os dados coletados em um estudo de caso realizado em Belém do Pará e reportados em Silva (2017), a fim de analisar os roteiros turísticos obtidos via programação matemática. Para tal, são considerados cinco exemplos, sendo que nos dois primeiros, considera-se um roteiro já comercializado por agências de turismo, e aqui denominado de roteiro R. Desta forma é possível comparar o roteiro R, correntemente praticado, com aqueles produzidos com o modelo TSPPPP e que considera a valoração das atrações pelos clientes.

O roteiro R contempla sete nós, sendo o nó 1 o ponto de saída e fim do roteiro, e seis nós correspondentes às seguintes atrações turísticas de Belém: Estação das docas (nó 2), Ver-o-Peso (nó 3), Forte do Castelo (nó 4), Santuário Basílica de Nazaré (nó 5), Museu Emílio Goeldi (nó 6) e Praça da República (nó 7). No exemplo 1, à cada par de nós foram atribuídos custos de viagem correspondentes às tarifas de taxi, e a cada atração turística, os prêmios de visita sugeridos pelos turistas entrevistados no estudo de caso. No exemplo 2, além dos custos e dos prêmios de visita, incluiu-se os prêmios de prioridade também atribuídos pelos turistas.

No exemplos 3 a 5, a elaboração dos roteiros considera atrações turísticas consideradas preferenciais por classes selecionadas de turistas entrevistados. Especificamente:

- Exemplo 3 (turistas do gênero feminino): Polo Joalheiro (nó 2), Santuário Basílica de Nazaré (nó 3), Igreja de Santo Alexandre (nó 4), Praça Dom Frei Caetano (nó 5), Igreja da Sé (nó 6) e Forte do Presépio (nó 7)
- Exemplo 4 (turistas com renda de 3 a 5 salários mínimos): Polo Joalheiro (nó 2), Casa Rosada (nó 3), Palacete Pinho (nó 4), Santuário Basílica de Nazaré (nó 5), Praça Dom Frei Caetano (nó 6) e Igreja da Sé (nó 7)
- Exemplo 5 (turistas com renda de 8 a 12 salários mínimos): Pólo Joalheiro (nó 2), Santuário Basílica de Nazaré (nó 3), Igreja de Santo Alexandre (nó 4), Praça Dom Frei Caetano (nó 5), Casa Rosada (nó 6) e Ver-o-peso (nó 7).

Assim como nos exemplos 1 e 2, à cada par de nós desses 3 exemplos foram atribuídos custos de viagem correspondentes às tarifas de taxi, enquanto os prêmios de visita e de prioridade foram fornecidas pela classe de turistas associada. A Figura 1 ilustra o roteiro R e os roteiros obtidos com o modelo TSPPPP nos exemplos 1 a 5. Em todos os exemplos, soluções ótimas foram obtidas em menos de 1 segundo de processamento.

Enquanto o custo de viagem para completar o roteiro comercial R é igual a R\$71, o custo de viagem do roteiro com a valoração de prêmios de visita (exemplo 1) é de R\$ 68. Ou seja, a programação matemática não só produziu um roteiro de menor custo como elevou o nível de serviço, ao levar em consideração as preferências

dos turistas. No exemplo 2, o custo de viagem é de R\$ 69, ou seja, a inclusão de mudanças na ordem de visita devido a prêmios de prioridade trouxe um aumento de custo apenas marginal.

Para o exemplo 3, o custo de viagem (R\$74) é um pouco maior do que o custo do roteiro R, no entanto, os prêmios coletados (416,3) são substancialmente maiores do que o que seria obtido com R (370,7). Afinal, neste exemplo, os turistas do gênero feminino visitam os nós de sua preferência, aumentando o valor dos prêmio total coletado. Resultados similares são também obtidos para os exemplos 4 e 5. Por exemplo, o custo de viagem para completar o roteiro preferencial de turistas com renda de 8 a 12 salários mínimos (R\$79,9) é maior do que o custo para completar o roteiro R, porém o prêmio total coletado é maior (432,2).

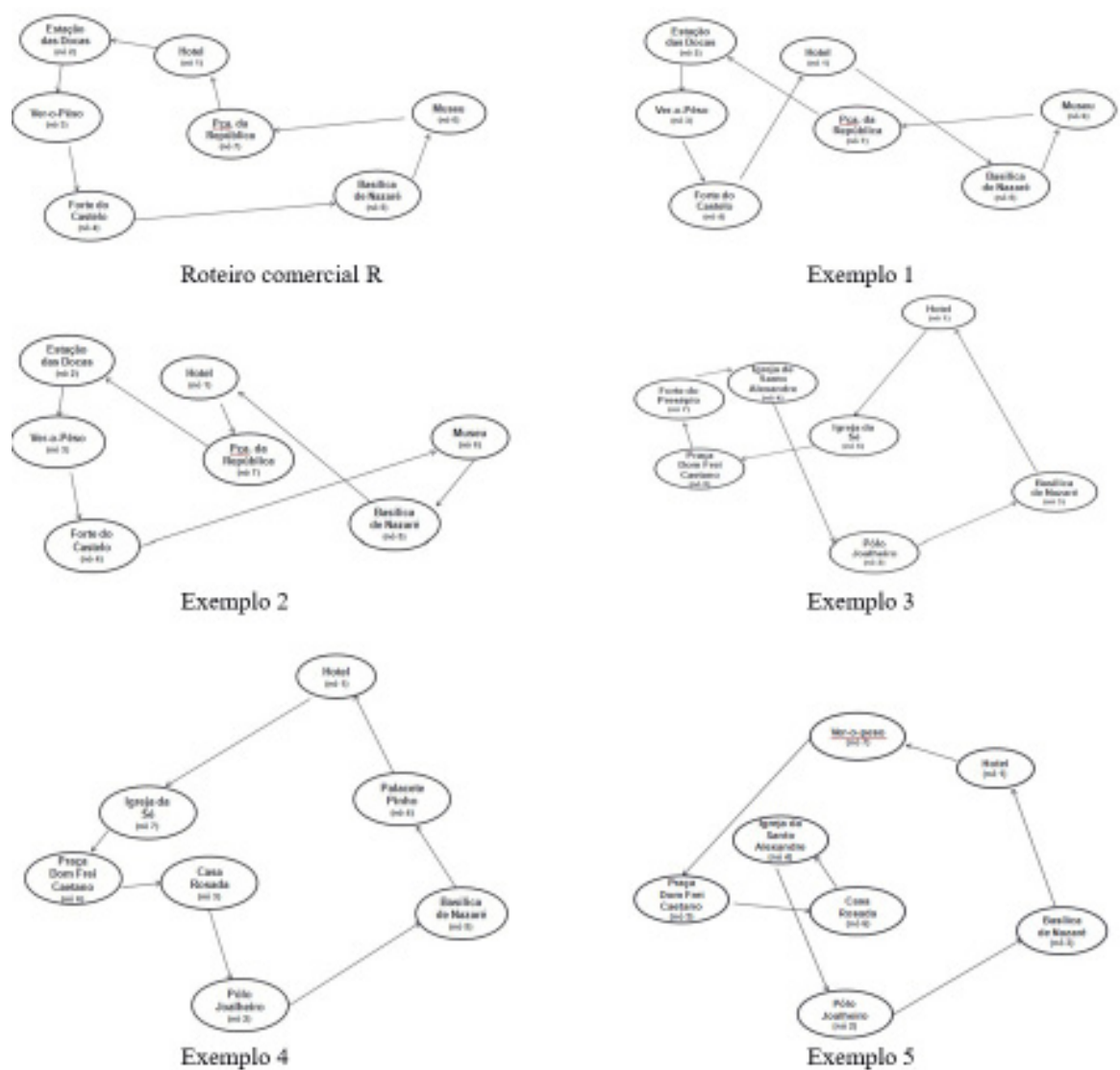


Figura 2: Roteiros turísticos obtidos nos experimentos com dados reais coletados na cidade de Belém.

6 | CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE PESQUISA FUTURA

Este artigo abordou o problema de elaboração de roteiros turísticos por meio

de técnicas de pesquisa operacional. O problema consiste em obter roteiros que visitem um subconjunto de atrações turísticas de forma a maximizar o atendimento às preferências dos turistas e minimizar os custos envolvidos. Neste sentido, foi revistado o modelo TSPPPP de Silva, Morabito e Pureza (2016), e proposto um algoritmo de busca tabu.

Resultados com instâncias geradas aleatoriamente indicam que tanto a programação matemática como a metaheurística são capazes de obter soluções de alta qualidade em um curto tempo computacional para instâncias até 20 atrações turísticas. Para instâncias de maior porte, o algoritmo de busca tabu apresenta melhor desempenho. Resultados com instâncias baseadas em dados reais, por sua vez, confirmam que a consideração da valoração dos turistas, tanto na seleção de atrações como na ordem das visitas, pode resultar em roteiros turísticos diferentes praticados por agências. Nota-se também que como a valoração depende de características tais como gênero e renda do cliente, roteiros diferentes são também obtidos. Ressalta-se ainda que as roteiros obtidos foram analisadas e validadas por operadores turísticos, indicando o potencial da aplicação das abordagens propostas.

Como perspectivas de pesquisa futura, sugere-se que este estudo seja aplicado a outros municípios e roteiros turísticos da região, e de outros estados do Brasil. Sugere-se também que o modelo TSPPPP seja estendido para incluir decisões de programação (*scheduling*) dos roteiros, ou seja, considerando tempos de permanência em cada atração turística e de deslocamento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do CNPq e da Fapesp.

REFERÊNCIAS

Applegate, D.L.; Bixby, R.E.; Chvatal, V.; Cook, W.J (2006) *The Traveling Salesman Problem: A Computational Study*. Princeton University Press, 2006.

Christofides, N. (1979) *The Traveling Salesman Problem*. Wiley Chichester.

Dantzig, R.; Fulkerson, R. e Johnson, S. (1954) Solution of a large-scale traveling salesman problem. *Operations Research*, 2:393-410.

Dantzig, G. e J. Ramser (1959) The truck dispatching problem. *Operations Research*, 12:81-91.

Feillet, D.; P. Dejax, P. e M. Gendreau. (2005) Traveling Salesman Problems with Profits. *Transportation Science*, v. 39, n. 2, p. 188-205.

França, P.M.; N.M. Sosa e V. Pureza (1999) An adaptive tabu search algorithm for the capacitated clustering problem. *International Transactions in Operational Research*, 6, 665-678.

Glover, F. e M. Laguna (1997) *Tabu Search*. Kluwer Academic Publishers, Massachusetts. MTUR (2015) *Documento referencial do turismo no Brasil*. Ministério do Turismo, Brasília. OMT (2014)

Pureza, V.; R. Morabito, R. e H.P. Luna (2017) Modeling and solving the traveling salesman problem with priority prizes. Submetido a *Mathematical Problems in Engineering*.

Pureza, V.; R. Morabito e M. Reimann (2012) Vehicle routing with multiple deliverymen: Modeling and heuristic approaches for the VRPTW. *European Journal of Operational Research*, vol. 218, pp. 636-647.

Silva, A.A. (2017) *Abordagens de otimização para apoiar a elaboração e análise de roteiros turísticos: um estudo de caso no estado do Pará*. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

Silva, A.A.; R. Morabito e V. Pureza (2016) Método de otimização para apoiar a elaboração e análise de roteiros turísticos. *Anais do XXIII SIMPEP – Simpósio de Engenharia de Produção*.

SOBRE O ORGANIZADOR:

CARLOS EDUARDO SANCHES DE ANDRADE - Mestre e Doutor em Engenharia de Transportes. Possui 2 graduações: Administração (1999) e Engenharia de Produção (2004) ; 3 pós-graduações lato sensu: MBA em Marketing (2001), MBA em Qualidade e Produtividade (2005) e Engenharia Metroferroviária (2017) ; e 2 pós-graduações stricto sensu - Mestrado e Doutorado em Engenharia de Transportes pela COPPE/UFRJ (2009 e 2016). É professor adjunto da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Goiás (FCT/UFG), das graduações em Engenharia de Transportes e Engenharia Civil. Atuou como Engenheiro de Operações do Metrô do Rio de Janeiro por mais de 15 anos (2003 - 2019), nas gerências de: Planejamento e Controle Operacional, Engenharia Operacional, Operação, Inteligência de Mercado, Planejamento de Transportes e Planejamento da Operação Metroviária (de trens, das linhas de ônibus Metrô Na Superfície, e das estações metroviárias). Experiências acadêmica e profissional nas áreas de: Engenharia de Transportes, Operação de Transporte, Planejamento da Operação, Transporte Público, Sustentabilidade, Engenharia de Produção, Gestão, Administração e Engenharia de Projetos, atuando principalmente nos seguintes temas: operação, avaliação de desempenho operacional, ferramentas de gestão e de controle operacional, documentação operacional, indicadores de desempenho, planejamento da operação, satisfação dos usuários de transporte, pesquisas e auditoria de qualidade, sustentabilidade, emissões de gases do efeito estufa em sistemas de transportes, planejamento e acompanhamento de projetos de engenharia e de melhoria em sistemas de transporte.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Algoritmos Genéticos 33, 36, 37

Aquecimento Global 79, 80, 81, 82, 86, 88, 89, 90

C

Controle Ativo 33, 34, 36

Controle de Semáforos 33

Controle de Tráfego 33, 35, 36

D

Desdobramento da Função Segurança 1, 3, 13

Desdobramento das Funções da Qualidade 1

E

ECD 65, 66, 67, 68, 72, 73, 75, 76, 77

Embarcações Mistas 65, 66, 74, 76, 77

Emissões de CO2 90, 94

Emissões Evitadas 94, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104

Empresas de Ônibus 52, 55

G

Gases de Efeito Estufa 79, 80, 86, 90, 92

GEE 80, 81, 90, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104

Geração de Viagens 17, 19, 24, 28, 29, 30, 31, 32

Gerenciamento da Informação 52

Gestão de Empresas 52

H

Heurística 40, 43, 45

I

Indicadores 10, 51, 54, 64, 65, 66, 68, 72, 73, 74, 75, 76, 107

Infraestrutura Urbana 79, 80, 81, 82, 87, 88, 89, 90

ITS 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 34, 53, 66, 79

M

Modelo TSPPPP 41, 42, 43, 44, 45, 46, 48, 50

Motocicletas 17, 18, 19, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 29, 30, 31, 95, 96, 99, 101

O

Otimização 33, 35, 36, 37, 39, 40, 51, 59

P

Pesquisa Operacional 39, 50

Plano Operacional 62, 63

Políticas de Mitigação 88, 89

Polos Educacionais 17

Pólos Universitários 17

Problema do Caixeiro Viajante 40, 41, 43

Q

QFD 1, 2, 3, 5, 6, 7, 14, 15, 16

R

Redução das Emissões 94, 95, 96, 97, 104, 105

Rio de Janeiro 16, 21, 32, 38, 77, 78, 79, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 92, 93, 94, 96, 97, 98, 99, 100, 103, 104, 105, 106, 107

Roteiros Turísticos 39, 40, 41, 46, 48, 49, 50, 51

S

Segurança Viária 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 13, 14, 15, 18

Setor de Transportes 66, 68, 79, 80, 82, 88, 90, 92, 94, 95, 97, 103, 104

SFD 1, 2, 3, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15

Sistemas Inteligentes de Transportes 1, 3, 14, 34

Sistemas Metroviários 94, 95, 96, 98, 104

T

Temporização Semafórica 33, 34

Tomada de Decisão 2, 14, 15, 52, 54, 57, 59, 61, 62, 63, 68

Transporte de Passageiros E Cargas 67, 71

Transporte Fluvial 65, 66, 67, 73, 74, 76, 77

Transporte Urbano de Passageiros 52, 54, 55, 56, 64

U

Universidade Nacional de La Rioja 17, 18

Agência Brasileira do ISBN

ISBN 978-85-7247-855-7



9 788572 478557