

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS JURÍDICAS E ECONÔMICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO PÚBLICA

ERIC ARANTES RIBEIRO

**MODELO MATEMÁTICO E META-HEURÍSTICA
SIMULATED ANNEALING PARA ELABORAÇÃO DE
ROTEIROS TURÍSTICOS COM BASE NO *TOURIST
TRIP DESIGN PROBLEM***

VITÓRIA

2015

ERIC ARANTES RIBEIRO

**MODELO MATEMÁTICO E META-HEURÍSTICA
SIMULATED ANNEALING PARA ELABORAÇÃO DE
ROTEIROS TURÍSTICOS COM BASE NO *TOURIST
TRIP DESIGN PROBLEM***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Gestão Pública do Centro de Ciência Jurídicas e Econômicas da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Gestão Pública, na área de Gestão de Operações.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa

Co-orientador: Prof. Dr. Geraldo Regis Mauri

VITÓRIA
2015

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

Ribeiro, Eric Arantes, 1988-
R484m Modelo matemático e meta-heurística simulated annealing
para elaboração de roteiros turísticos com base no tourist trip
design problem / Eric Arantes Ribeiro. – 2015.
63 f. : il.

Orientador: Rodrigo de Alvarenga Rosa.
Coorientador: Geraldo Regis Mauri.
Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão Pública) –
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências
Jurídicas e Econômicas.

1. Turismo. 2. Simulated annealing (Matemática). 3. Tourist
Trip Design Problem with Time Window. 4. Team Orienteering
Problem with Time Windows. I. Rosa, Rodrigo de Alvarenga. II.
Mauri, Geraldo Regis, 1981-. III. Universidade Federal do
Espírito Santo. Centro de Ciências Jurídicas e Econômicas. IV.
Título.

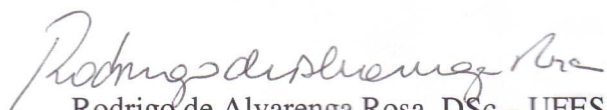
CDU: 35

**MODELO MATEMÁTICO E META-HEURÍSTICA SIMULATED
ANNEALING PARA ELABORAÇÃO DE ROTEIROS TURÍSTICOS COM
BASE NO TOURIST TRIP DESIGN PROBLEM**

Eric Arantes Ribeiro

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Gestão Pública da Universidade Federal do Espírito Santo como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre.

Aprovado em 23 de fevereiro de 2015 por:



Rodrigo de Alvarenga Rosa, DSc – UFES – Orientador



Geraldo Regis Mauri, DSc – UFES – Coorientador



Teresa Cristina Janes Carneiro, DSc – UFES



Leandro Colombi Resendo, DSc – IFES

Agradecimentos

Aos meus pais Ivan e Lucineia e à toda minha família que me apoiaram e não permitiram que eu desistisse, especialmente ao meu pai que, vendo minha dificuldade em fazer a dissertação, dada minhas limitações de saúde, criou artesanalmente um suporte de madeira, vital para conclusão do mestrado.

Ao professor e amigo Rodrigo de Alvarenga Rosa pela orientação imprescindível na realização deste trabalho, pela paciência e confiança nos momentos críticos que passei ao longo do mestrado.

Ao professor Geraldo Regis Mauri pela orientação e pela colaboração nos momentos mais desesperadores, sem as quais a meta-heurística teria sido uma causa perdida.

Aos colegas do projeto “Rede de Difusão do Desempenho do Turismo Capixaba” pelo empenho na coleta dos dados e elaboração do sítio.

Às equipes das clínicas de reabilitação, que tem acompanhado minha situação praticamente todo o tempo dessa dissertação, ouvindo minhas conjecturas sem reclamar muito e me deixando trabalhar na dissertação, mesmo durante as sessões.

Aos colegas e professores do Mestrado Profissional em Gestão Pública.

Aos colegas e amigos da UFES que, de diversas formas, colaboraram com esta dissertação.

Resumo

O turismo é um importante setor para economia mundial e vem crescendo consistentemente nos últimos anos. Porém, um fator determinante para escolha do destino de um turista é a existência de pontos de interesse que ele deseja visitar na região e, para tanto, as informações dos pontos de interesse de uma região devem estar disponíveis. Dada às limitações de tempo do turista, não é possível para ele visitar todos os atrativos e, por essa razão, se faz necessário a criação de roteiros turísticos. Muito embora existam diversos pacotes de viagens com destinos predefinidos, contemplando locais mais populares, nos últimos anos tem crescido a procura por soluções que criem roteiros personalizados voltados às necessidades de cada turista. Para suprir essa nova demanda, Van Oudheusden e Vansteenwegen (2007) propuseram o *Tourist Trip Design Problem* (TTDP) e sugeriram o uso do *Orienteering Problem* (OP) e suas extensões para resolução do TTDP. Esta dissertação tem por objetivo o desenvolvimento de um modelo matemático e de uma meta-heurística *Simulated Annealing* (SA) para resolução do TTDP. O objetivo considerado consiste em gerar roteiros que maximizem a soma das notas atribuídas aos atrativos em função do grau de interesse do turista, levando em conta o período que ele tem disponível na localidade e o horário que cada atrativo está disponível para ser visitado.

Palavras-chave: *Tourist Trip Design Problem with Time Window*, *Simulated Annealing*, *Team Orienteering Problem with Time Windows*, Turismo.

Abstract

Tourism is an important sector for the world economy and has been growing steadily over recent years. However, a decisive factor for the choice of a tourist destination is the existence of points of interest in the region he wants to visit and, therefore, the information from points of interest in a region should be available. Given the tourist time constraints, it is not possible for him to visit all the attractions and, therefore, it is necessary the creation of tourist routes. Although there are several packages with predefined destinations contemplating most popular locations in recent years has increased the demand for solutions that create custom tours for the needs of each tourist. To meet this new demand Van Oudheusden and Vansteenwegen (2007) proposed the Tourist Trip Design Problem (TTDP) and they suggested that the use of the Orienteering Problem (OP) and its extensions is the best approach to the TTDP. This thesis proposes the development of a mathematical model and a Simulated Annealing (SA) metaheuristic to solve the TTDP. The objective considered is to generate routes that maximize the sum of scores awarded to the attractions based on the degree of interest of the tourist taking into account the time that he has in the locality and the time that each attraction is available to be visited.

Keywords: Tourist Trip Design Problem with Time Window, Simulated Annealing, Team Orienteering Problem with Time Windows, Tourism.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplo de rota.	19
Figura 2: Pseudocódigo do Simulated Annealing	28
Figura 3: Pseudocódigo do gerador de instâncias	37
Figura 4: Pseudocódigo Simulated Annealing proposto	42
Figura 5: Movimento Reordenar atrativos	43
Figura 6: Movimento Realocar atrativos	44
Figura 7: Movimento Trocar atrativos.....	45
Figura 8: Movimento Remover atrativos	46
Figura 9: Movimento Acrescentar atrativos	47
Figura 10: Movimento Troca Atrativo Visitado por um Não Visitado	48
Figura 11: Diagrama da Aplicação	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Atributos dos atrativos turísticos	17
Tabela 2. Revisão bibliográfica do TOP	29
Tabela 3. Resultados obtidos pelo CPLEX.	49
Tabela 4. Parâmetros do SA.	50
Tabela 5. Resultado SA-5M $\text{tim}_{\max}=120\text{s}$ e $T_0 = 20000$	50
Tabela 5. Resultado SA-5M $\text{tim}_{\max}=120\text{s}$, $\text{tim}_{\max}=900\text{s}$ e $\text{tim}_{\max}=1800\text{s}$	51
Tabela 6. Resultado SA-6M $\text{tim}_{\max}=120\text{s}$ e $T_0=20000$	52
Tabela 7. Resultados obtidos pelas instâncias R29a1d, R29a2d, R29a3d.....	54

LISTA DE SIGLAS

ACO	<i>Ant Colony Optimization</i>
AEPTD	<i>Adaptive Ejection Pool with Toggle-Rule Diversification</i>
ALNS	<i>Adaptive Large Neighborhood Search</i>
AMP	<i>Adaptive Memory Procedure</i>
B&P	<i>Branch&Price</i>
BLFFS	<i>Bi-level Filter-and-Fan Search</i>
CGW	Heurística de 5 passo de Chao, Golden e Wasil
CTOP	<i>Capacitated Team Orienteering Problem</i>
CTOPIS	<i>Capacitated Team Orienteering Problem with Incomplete Service</i>
CTOPSD	<i>Capacitated Team Orienteering Problem with Split Deliveries</i>
CTOPSDIS	<i>Capacitated Team Orienteering Problem with Split Deliveries and Incomplete Service</i>
DABC	<i>Discrete Artificial Bee Colony</i>
EACS	<i>Enhanced Ant Colony System</i>
ELS	<i>Evolutionary Local Search</i>
ESP	<i>Elementary Shortest Path</i>
FAPES	Fundação de Amparo a Pesquisa do Espírito Santo
FCAA	Fundação Ceciliano Abel de Almeida
FO	Função Objetivo
GA	<i>Genetic Algorithm</i>
GIT	Grau de Interesse do Turista
GLS	<i>Guided Local Search</i>
GRASP	<i>Greedy Randomized Adaptive Search Procedure</i>
GVNS	<i>Granular Variable Neighborhood Search</i>
I3CH	<i>Iterative Three-Component Heuristic</i>
ILS	<i>Iterated Local Search</i>
LB	<i>Lower Bound</i>
LNS	<i>Large Neighborhood Search</i>
LS	<i>Local Search</i>
MA	<i>Memetic Algorithm</i>
OP	<i>Orienteering Problem</i>
POI	<i>Point of Interest</i>
PSI	<i>Particle Swarm Inspired</i>
RN	<i>Rich Neighborhood</i>
SVNS	<i>Skewed Variable Neighborhood Search</i>
TDTOPTW	<i>Time-Dependent Team Orienteering Problem with Time Windows</i>
TOP	<i>Team Orienteering Problem</i>
TOPTW	<i>Team Orienteering Problem with Time Windows</i>
TS	<i>Tabu Search</i>
UB	<i>Upper Bound</i>
VNS	<i>Variable Neighborhood Search</i>
VRP	<i>Vehicle Routing Problem</i>
VRPP	<i>Vehicle Routing Problem with Profits</i>

VRPTW	<i>Vehicle Routing Problem with Time Windows</i>
TTDP	<i>Tourist Trip Design Problem</i>

SUMÁRIO

1. Introdução.....	12
1.1 Objetivos	14
1.1.1 Objetivos Gerais.....	14
1.1.2 Objetivos Específicos.....	14
1.1.3 Justificativa	15
2. Descrição do problema	16
3. Referencial Teórico	20
3.1 <i>Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW)</i>	20
3.2 <i>Vehicle Routing Problem with Profits (VRPP)</i>	23
3.2.1 <i>Orienteering Problem (OP)</i>	24
3.2.2 <i>Team Orienteering Problem</i>	25
3.3 <i>Simulated annealing (SA)</i>	27
3.4 Revisão bibliográfica	29
4. Metodologia	35
4.1 Processo utilizado para criação das instâncias	36
4.2 Modelo Matemático proposto	38
4.3 Meta-heurística Simulated Annealing proposta	42
5. Resultados e discussões	49
6. Plano de Implantação	55
7. Conclusão	57
7.1 Trabalhos Futuros	57
8. Referências.....	59

1. INTRODUÇÃO

O turismo é responsável direta e indiretamente por 9% do PIB mundial e, mesmo com as crises recentes, vem tendo um crescimento ininterrupto em todo o mundo. O número de desembarques internacionais de turistas cresceu de 25 milhões em 1950 para 278 milhões em 1980, e 1 bilhão em 2013. Entre o período de 2010 a 2030, é esperado um crescimento de 3,3% ao ano, podendo, então, esse valor chegar a 1,8 bilhões em 2030 (UNWTO, 2013).

Sendo o turismo de grande importância para economia, o governo do Estado do Espírito Santo tem acreditado no potencial turístico do estado e investido em campanhas publicitárias, obras de acesso e reurbanização. Porém, pode-se perceber ainda certo desamparo ao turista que, mesmo possuindo muitas opções de pontos turísticos, as informações destes são dispersas ou inexistentes. As maiores dúvidas são os horários de funcionamento, localização, distância, entre outras questões que tornam difícil a decisão de qual é o melhor lugar para se visitar.

Problemas de roteamento de veículos, na maioria dos casos, lidam com modelos que retratam uma empresa que necessita atender à demanda de vários clientes, sendo essencial que todos os clientes sejam atendidos, mesmo que para isso, seja necessário o aumento da frota ou um turno de trabalho maior para o atendimento. Entretanto, em problemas de roteamento turístico, o cliente, no caso o turista, é quem visita uma série de pontos de interesse (POI). Porém, como o turista possui tempo limitado para visitar todos os atrativos existentes na região, ele necessita escolher qual ele irá visitar dentre os atrativos disponíveis. Para o contexto desta dissertação, todo POI que representa um local de interesse turístico será chamado de atrativo turístico ou simplesmente atrativo.

O turista pode buscar por informações dos atrativos a fim de delimitar quais lhe pareçam mais interessantes, mesmo que nem sempre estes possuam muitas informações disponíveis. Essa estratégia pode ser viável para um passeio curto ou regiões onde existam poucos pontos turísticos. Porém, é um processo muito trabalhoso e tende a negligenciar locais menos conhecidos. Assim, é interessante para o gestor de turismo de uma região oferecer uma ferramenta de elaboração de um roteiro turístico automatizado.

Esta classe de problema para elaboração de rotas turísticas é conhecida como *Tourist Trip Design Problem* (TTDP), a qual Van Oudheusden e Vansteenwegen (2007) sugerem o uso do *Orienteering Problem* (OP) e suas extensões para resolução desta classe de problemas. No *Tourist Trip Design Problem* (TTDP) um roteiro turístico automatizado deve ser gerado a partir de três conjuntos de informações (Vansteenwegen e Van Oudheusden, 2007):

- 1) informação sobre os atrativos;
- 2) perfil do turista;
- 3) informação da viagem.

As informações dos atrativos consideradas são: dias e horários de funcionamento, melhor período do ano para visita, custo de acesso, tempo médio de visita, tipos do atrativo, etc. Podem ainda ser atribuídas notas aos atrativos, analisando a opinião dos visitantes por meio de enquete ou questionário. Todas as informações devem ser as mais atuais possíveis.

O perfil do turista indica o quanto o turista aprecia atrativos que pertençam a uma determinada categoria como arquitetura religiosa, centro de cultura, museu, praia, praça, etc. De acordo com as necessidades do perfil do turista, pode haver outras informações como, por exemplo, se o turista prefere ver o máximo de atrativos possíveis ou os atrativos de maiores notas de uma categoria, o tempo médio de visita do atrativo, quanto dinheiro o turista pretende gastar, dentre outros.

O tipo do atrativo define, em função de uma pontuação, quão importante é o atrativo para certa categoria turística (Davies *et al.*, 2001). Como exemplo, o Convento da Penha em Vila Velha, no Espírito Santo, possui pontuação alta como arquitetura histórica, religiosa e mirante, e possui notas baixas ou nulas em artesanato e praia. Cruzando os tipos do atrativo com o perfil do turista, pode-se determinar qual o grau de interesse do turista por eles e, assim, atrativos com maior valor tendem a compor a rota gerada de visita dos POIs.

As informações de viagem dizem respeito ao número de dias que o turista pretende passar na região, quais os horários que ele pretende sair e voltar para o hotel, qual o meio de transporte que o turista pretende usar para visitar os POIs, etc.

Espera-se gerar um roteiro com uma rota para cada dia de visita do turista na região a partir dos três conjuntos de informações descritos por Van Oudheusden e Vansteenwegen (2007). Uma rota consiste em um caminho a ser percorrido pelo turista com início no ponto de partida, usualmente o hotel, depois passando por uma série de atrativos, respeitando suas janelas de tempo de funcionamento e o tempo médio de duração da visita e, por fim, retornando ao ponto de partida, normalmente o mesmo hotel de onde ele partiu. O tempo gasto na rota não pode ultrapassar o tempo disponível para o passeio no dia definido pelo turista. O objetivo do roteiro é maximizar a somatória do grau de interesse do turista por cada atrativo que compõe todas as rotas do roteiro sem violar as restrições impostas.

Quanto às estratégias de roteamento, Van Oudheusden e Vansteenwegen(2007) sugerem o uso da classe de problemas *Vehicle Routing Problem with Profits* (VRPP) para solução de

problemas de roteamento turístico, mais especificamente as subclasses *Orienteering Problem*(OP) e o *Team Orienteering Problem*(TOP), que têm como objetivo obter o maior lucro possível dado um intervalo de tempo. No caso de uma aplicação turística não visar lucro, mas sim a satisfação do turista, o objetivo passa a ser maximizar a soma das notas atribuídas aos atrativos visitados durante um intervalo de tempo determinado pelo turista.

Visando criar mecanismos para incentivar o turismo no estado do Espírito Santo, esta dissertação propõe um modelo matemático e uma meta-heurística *Simulated Annealing* para elaborar roteiros turísticos que atendam aos desejos de um turista. Cada roteiro é elaborado para cada um dos d dias de estadia do turista, o roteiro começa e termina em um ponto de partida definido (hotel, aeroporto, rodoviária, etc.) com o objetivo de maximizar a somatória do grau de interesse do turista por cada atrativo que compõe todas as rotas do roteiro.

Diversos experimentos computacionais foram realizados a partir de dados de teste e a meta-heurística SA proposta foi capaz de resolver instâncias com até sete dias e 30 atrativos, chegando aos resultados “ótimo” encontrados pelo modelo matemático. Além disso, instâncias de 100 a 300 atrativos onde o modelo matemático não pôde encontrar o resultado “ótimo” após 4 horas de execução, o SA provou ser capaz de obter uma solução em tempo relativamente baixo.

Já nos testes propostos com dados reais dos municípios de Vila Velha, Guarapari, Cariacica e Viana. A meta-heurística foi capaz de encontrar o resultado “ótimo” em todos os casos com o tempo médio de execução de 14,21 segundos no cenário mais complexo, e chegando a 0,15 segundos nos cenários mais simples e que possuíam um número maior de dias.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo geral desta dissertação é propor um modelo matemático com base no *Team Orienteering Problem with Time Windows* (TOPTW) e uma meta-heurística *Simulated Annealing* (SA) para o problema *Tourist Trip Design Problem* (TTDP), visando o desenvolvimento de um aplicativo a ser disponibilizado pela Secretária de Turismo - SETUR – ES para os turistas que desejam visitar o estado.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos incluem:

- Realizar uma revisão bibliográfica da classe de problemas *Vehicle Routing Problems with Profits* (VRPP) e no *Team Orienteering Problem with Time Windows* (TOPTW);
- Levantar os pontos turísticos e suas notas em função da importância por tipo na região de estudo, municípios de Vila Velha, Guarapari, Cariacica, Viana e Vitória.

1.1.3 JUSTIFICATIVA

A criação de uma ferramenta para a área de turismo aplicada à divulgação do turismo no Estado do Espírito Santo pode proporcionar um melhor contato do turista com o estado, sendo de grande importância para o desenvolvimento do turismo estadual.

Aliada a isso, esta dissertação está integrada ao projeto “Rede de Difusão do Desempenho do Turismo Capixaba” da Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES), junto à Secretaria de Ciência e Tecnologia e à Secretaria de Turismo do Espírito Santo e realizado pela Fundação Ceciliano Abel de Almeida (FCAA), cujo objetivo principal consiste em formular, avaliar e aplicar metodologias de apuração de informações econômicas setoriais para o turismo no âmbito da região metropolitana do Estado do Espírito Santo.

2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Quando um turista visita uma região turística, ele necessita de apoio para elaboração de roteiros que contenham os pontos turísticos mais interessantes para seus desejos, representados por um conjunto de parâmetros selecionados pelo turista e às restrições dos atrativos turísticos e do próprio turista. Assim, deve ser gerada uma rota para cada dia de estadia do turista, começando e terminando em um ponto de partida definido (hotel, aeroporto, rodoviária, etc.). O objetivo é maximizar a somatória das notas atribuídas aos atrativos turísticos que comporão o roteiro, sem permitir a violação de tempo total disponível por dia definido pelo turista e os horários de funcionamento dos atrativos.

Os parâmetros a serem definidos pelo turista são:

- Ponto de partida (hotel, aeroporto, rodoviária, etc.);
- Período do roteiro (data de início e data de fim);
- Horário do dia disponível para o passeio (hora de começo e hora de término por dia de visita);
- Tipos de atrativos que deseja visitar.

Os atrativos turísticos consistem numa série de pontos georreferenciados, cada um com os seguintes atributos:

- Coordenada georreferenciada do atrativo turístico;
- Nome do atrativo;
- Município;
- Dias que funciona;
- Horário de funcionamento (Abertura e Fechamento);
- Tempo médio da visita;
- Lista com notas atribuídas ao atrativo.

A Tabela 1 apresenta como exemplo alguns atrativos e seus atributos.

Tabela 1. Atributos dos atrativos turísticos

<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Nome</i>	<i>Município</i>	<i>H. Abre</i>	<i>H. Fecha</i>	<i>Dias que funciona</i>	<i>T.M. Visita</i>
365281	7751578	Parque da Prainha	Vila Velha	00:00	23:59	1,2,3,4,5,6,7	40
365183	7751643	Prainha	Vila Velha	00:00	23:59	1,2,3,4,5,6,7	240
365123	7751550	Casa da Memória	Vila Velha	08:00	17:00	2,3,4,5,6	25
365119	7751464	Igreja Nossa Senhora do Rosário	Vila Velha	08:00	17:00	1,3,6	20
365074	7751558	Museu Homero Massena	Vila Velha	10:00	16:00	1,2,3,4,5,6,7	60
365277	7751338	Convento da Penha	Vila Velha	05:00	17:00	1,2,3,4,5,6,7	40

Fonte: Próprio autor.

A existência do atributo “horário de funcionamento” ajuda a caracterizar melhor o problema abordado. Neste trabalho, o horário de funcionamento é considerado como sendo o intervalo de tempo existente entre a abertura e o fechamento do atrativo. Esse tipo de intervalo é chamado, nos problemas de roteamento, de veículos de janela de tempo (*Time Windows*).

Embora atrativos de acesso público como praias e algumas praças não possuam restrições de horário de abertura e de fechamento, outros atrativos como museus e igrejas possuem um horário específico de abertura e fechamento, janela de tempo, e o turista só poderá visitá-los dentro dessa janela de tempo, restringindo o roteiro a ser criado.

A lista de notas atribuídas aos atrativos contém uma nota para cada tipo de atrativo existente. Esses tipos são definidos segundo orientação do Guia Brasileiro de Orientação Turística, disponibilizado pelo Ministério do Turismo (Brasil, 2013), que classifica os POIs em 76 tipos de atrativos e serviços, e os agrupa em sete categorias. Duas categorias são de Serviços de Apoio (Serviços de Transporte e Serviços Variados) contendo 26 tipos de serviço. As outras cinco são categorias de atrativos turísticos, com 53 tipos de atrativos turísticos (Atrativos Turísticos Naturais Atrativos Históricos e Culturais, Área para Prática de Esportes, Áreas de Recreação e Locais para Atividades de Interesse Turístico). Assim, pode-se atribuir a um POI notas para cada um dos 76 tipos de acordo com as suas características específicas ou da região onde está inserido.

Essas notas podem ser atualizadas com o passar do tempo, analisando a opinião dos visitantes através de enquete ou questionário, sendo atribuídas notas numa escala de 0 a 5 onde:

- 0 - Não se aplica;

- 1 - Péssimo;
- 2 - Ruim;
- 3 - Regular;
- 4 - Bom;
- 5 - Ótimo.

A soma das notas atribuídas a um atrativo é denominada Grau de Interesse do Turista (GIT), onde são levantados apenas os tipo de atrativos que o turista deseja visitar.

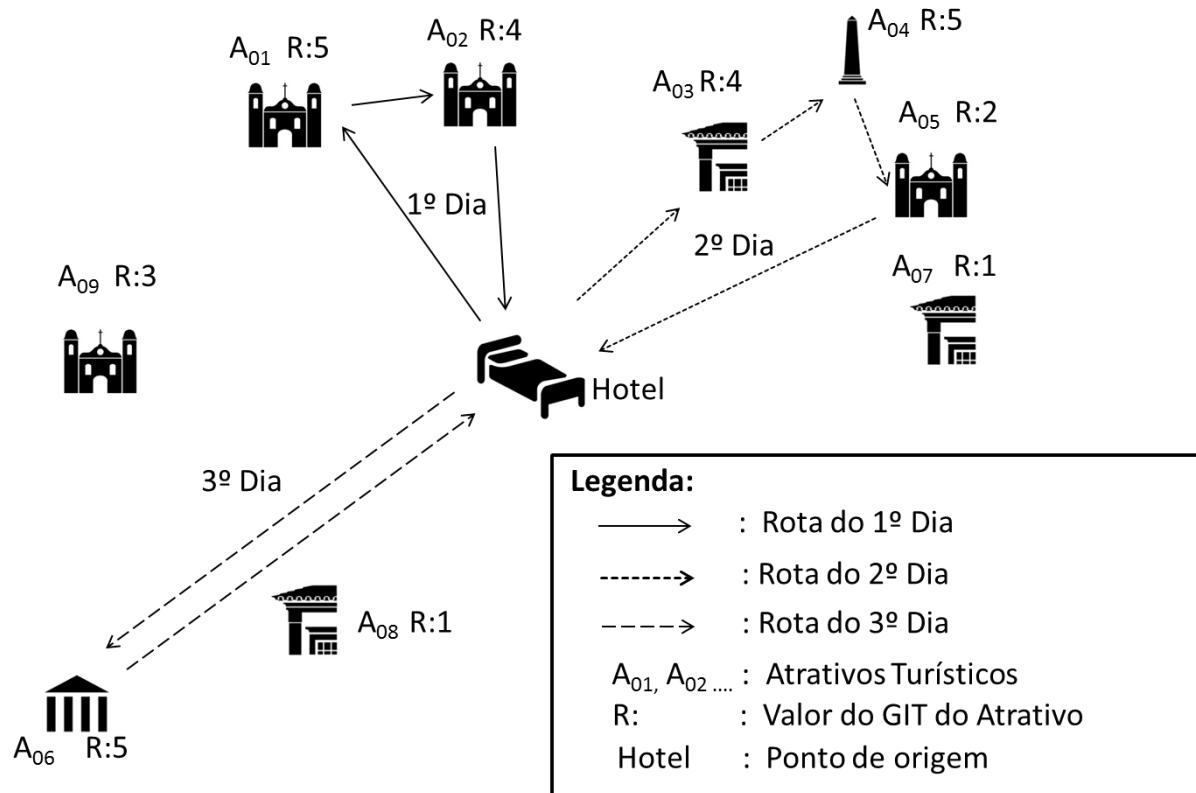
O GIT tem por função determinar quais atrativos se adequam melhor aos interesses do turista. Para um turista com interesses em arquitetura religiosa, arquitetura histórica e monumentos, por exemplo, o GIT do Convento da Penha para este turista seria 11, sendo as notas atribuídas ao Convento da Penha para essas categorias respectivamente 5, 4 e 2.

A somatória dos GIT de todos os atrativos que o turista visitará no roteiro criado define um padrão de satisfação do turista no roteiro, que é o que se quer maximizar: a satisfação do turista.

A partir destes parâmetros, atributos e restrições, será gerado um roteiro com uma rota para cada dia de visita do turista na região turística. Uma rota consiste em um caminho a ser percorrido pelo turista com início no ponto de partida, usualmente o hotel, depois passando por uma série de atrativos, respeitando suas janelas de tempo de funcionamento e o tempo médio de duração da visita. Por fim, retornará ao ponto de partida, usualmente o mesmo hotel de onde ele partiu. O tempo gasto na rota não pode ultrapassar o tempo disponível para o passeio no dia definido pelo turista. O objetivo do roteiro é maximizar a somatória dos GIT de todos atrativos que compõe todas as rotas do roteiro sem violar nenhuma restrição imposta.

No exemplo a seguir (Figura 1), pode-se ver algumas rotas geradas para um turista que deseja visitar a região turística por três dias e que tenha interesse por atrativos históricos e culturais.

Figura 1: Exemplo de rota.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 1, para cada um dos três dias determinados pelo turista, tem-se uma rota. No primeiro dia, o ponto de partida da rota é o hotel, passando pelos pontos A₀₁, A₀₂ e, por fim, retornando para o hotel. No segundo dia a rota sai do hotel e passa pelos pontos A₀₃, A₀₄, A₀₅ e retorna para o hotel. No terceiro e último dia a rota sai do hotel e passa pelo ponto A₀₆ e retorna ao hotel. A grande distância do ponto A₀₆ fez com que a rota do terceiro dia tivesse apenas um atrativo, porém o alto GIT do atrativo A₀₆ faz dele um ponto indispensável para o turista. Os atrativos A₀₇, A₀₈ e A₀₉ não foram visitados no final dos três dias devido às restrições de tempo e por não possuírem um GIT muito alto em comparação aos atrativos próximos a eles.

Sendo assim, para que sejam maximizados os GIT dos atrativos, respeitando o horário de funcionamento dos mesmos, será necessário combinar duas variações do *Vehicle Routing Problem* (VRP): o *Vehicle Routing Problem with Time Windows* (VRPTW), para as restrições de horário do atrativo turístico, e o *Vehicle Routing Problem with Profits* (VRPP) para a maximização dos GIT.

No próximo capítulo é apresentado o referencial teórico que sustenta esta dissertação, bem como uma revisão dos artigos publicados sobre o *Team Orienteering Problem* (TOP).

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Um dos problemas foco dos estudos da área de logística é o *Vehicle Routing Problem* (VRP), que é um dos problemas clássicos da área de gerenciamento de frota de veículos. No setor do comércio, os custos com transporte correspondem a grande parte do custo agregado ao produto. Segundo Toth e Vigo (2002), o uso de métodos computadorizados para solução de problemas de transporte podem representar uma economia de 5% a 20% no custo total de um produto.

A variação mais básica do VRP é o *Capacitated Vehicle Routing Problem* (CVRP), que foi introduzida por Dantzig e Ramser (1959) como o *Truck Dispatching Problem*. Ele pode ser descrito como um número determinado de clientes, todos com sua localização conhecida, e solicitando algum produto conhecido, devendo ser suprido por um único depósito por um único veículo de uma frota de veículos com capacidade conhecida. Os custos de viagem entre cada cliente e entre os clientes e o depósito são conhecidos. Cada cliente será atendido por um único veículo, sendo que este nunca deve exceder sua capacidade, tendo como objetivo a minimização do custo total da rota. Métodos exatos podem resolver instâncias relativamente pequenas (Cordeau *et al.*, 2005), enquanto métodos heurísticos ou meta-heurísticos possuem maior aplicabilidade prática, resolvendo instâncias maiores. Uma das primeiras e mais utilizadas heurísticas na solução desse tipo de problema é o algoritmo de economias de Clarke e Wright (Clarke e Wright, 1964).

Entre as diversas subclasses do VRP, têm-se duas as quais o problema estudado nessa dissertação se insere: o *Vehicle Routing Problem with Time Windows* (VRPTW) e o *Vehicle Routing Problem with Profits* (VRPP). Ambos os problemas serão detalhados nas seções seguintes.

3.1 VEHICLE ROUTING PROBLEM WITH TIME WINDOWS (VRPTW)

O VRPTW é uma extensão do CVRP onde, além da restrição de capacidade, para cada cliente i está associado um intervalo de tempo $[a_i, b_i]$, denominado janela de tempo (*Time Windows*). O tempo que o veículo deixa o depósito, o tempo viajado $t_{i,j}$ entre cada arco $(i,j) \in A$, e um tempo adicional de serviços s_i para cada cliente i são todos conhecidos *a priori*. O veículo deve chegar a cada cliente dentro da janela de tempo $[a_i, b_i]$ determinada para o mesmo, e deve permanecer lá por um tempo de visita s_i determinado. A soma do

tempo de chegada ao cliente i e do tempo de visita s_i deve ser menor ou igual ao fim da janela de tempo b_i de um cliente i . Caso o veículo chegue antes do início a_i ou termine os serviços depois do final b_i da janela de tempo de um cliente i , pode haver duas condições: 1) é permitido que o veículo comece a operar antes do tempo a_i ou continue a operar após o tempo b_i e 2) não é permitido a operar fora da janela de tempo. No primeiro caso, a janela de tempo é classificada como *soft time windows* e, caso contrário, é classificada como *hard time windows*.

Basicamente no caso de *soft time windows*, são toleradas violações da janela de tempo aceitas pelo cliente e, por isso, pode-se gerar algum tipo de penalidade (multa, custo adicional). No caso de *hard time windows*, não são permitidas violações da janela de tempo.

Em muitos casos práticos, as matrizes de custo e tempo de viagem coincidem e se assume que todos os veículos deixam o depósito no tempo 0 (zero). O VRPTW consiste em encontrar um conjunto de K rotas com o menor custo desde que:

- Cada rota comece e termine no depósito;
- Cada cliente seja atendido por apenas um veículo;
- A soma das demandas de todos os clientes de uma rota não pode exceder à capacidade do veículo;
- Para cada cliente i , o atendimento deve começar dentro de uma janela de tempo $[a_i, b_i]$ e o veículo deve permanecer no local por um tempo s_i .

Tan *et al.* (2001) descreveram um modelo matemático VRPTW com *soft time window* considerando uma frota heterogênea. Os autores definiram como sendo variáveis de decisão:

- t_i : hora de chegada ao cliente i ;
- w_i : tempo de espera no cliente i ;
- $x_{i,j,k}$: variável binária que, quando seu valor é igual a 1, indica que um veículo k esta usando um arco (i, j) ;

E definiram como dados de entrada:

- K : número total de veículos;
- n : número de clientes;
- $d_{i,j}$: distância euclidiana entre um cliente i e um cliente j ;
- $c_{i,j}$: custo incorrido no arco entre um cliente i e um cliente j ;
- $t_{i,j}$: tempo viagem entre um cliente i e um cliente j ;
- m_i : demanda de um cliente i ;
- q_k : capacidade de um veículo k ;

- e_i : início da janela de tempo de um cliente i ;
- l_i : final da janela de tempo de um cliente i ;
- f_i : tempo de serviço em um cliente i ;
- r_k : tempo máximo de rota permitido para um veículo k .

A seguir é apresentado o modelo proposto por Tan *et al.* (2001):

$$\text{Minimizar: } \sum_{i=0}^n \sum_{j=0; j \neq i}^n \sum_{k=1}^K c_{i,j} x_{i,j,k} \quad (3.1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^n x_{i,j,k} \leq 1 \quad \text{para } i = 0 \quad (3.2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{i,j,k} = \sum_{j=1}^n x_{j,i,k} \quad \text{para } i = 0 \text{ e } \forall k \in \{1, \dots, K\} \quad (3.3)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{j,i,k} \leq 1 \quad \text{para } i = 0 \text{ e } \forall k \in \{1, \dots, K\} \quad (3.4)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=0; j \neq i}^n x_{i,j,k} = 1 \quad , \quad \forall i \in \{1, \dots, n\} \quad (3.5)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=0; i \neq j}^n x_{i,j,k} = 1 \quad , \quad \forall j \in \{1, \dots, n\} \quad (3.6)$$

$$\sum_{i=1; i \neq j}^n m_i \left(\sum_{j=0; j \neq i}^n x_{i,j,k} \right) = 1 \quad , \quad \forall k \in \{1, \dots, K\} \quad (3.7)$$

$$\sum_{i=0; j=0; j \neq i}^n \sum_{j=0; j \neq i}^n x_{i,j,k} (t_{i,j} + f_i + w_i) \leq r_k \quad , \quad \forall k \in \{1, \dots, K\} \quad (3.8)$$

$$t_0 = w_0 = f_0 = 0 \quad (3.9)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=0; i \neq j}^n x_{i,j,k} (t_i + w_i + f_i + t_{i,j}) \leq t_j \quad , \quad \forall j \in \{1, \dots, n\} \quad (3.10)$$

$$e_i \leq (t_i + w_i) \leq 1 \quad , \quad \forall i \in \{1, \dots, n\} \quad (3.11)$$

$$x_{i,j,k} \in \{0,1\} \quad , \quad \forall i, j \in \{1, \dots, n\}, \forall k \in \{1, \dots, n\} \quad (3.12)$$

A função objetivo minimiza a soma dos custos incorridos no arco entre um cliente i e um cliente j que fazem parte da solução. A restrição (3.2) especifica que há no máximo K rotas saindo do depósito. As restrições (3.3) e (3.4) faz com que todas as rotas iniciem e terminem nos depósitos. As restrições (3.5) e (3.6) definem que todo cliente i pode ser visitado apenas uma vez. As restrições (3.7) e (3.8), respectivamente, impõem o limite da capacidade dos k veículos e o tempo máximo de viagem. As restrições (3.9), (3.10) e (3.11) asseguram que a janela de tempo do cliente i seja respeitada. Por fim, a restrição (3.12) garante que $x_{i,j,k}$ seja uma variável com valores 0 e 1.

3.2 VEHICLE ROUTING PROBLEM WITH PROFITS (VRPP)

O VRPP é uma generalização do VRP e sua principal característica é que o conjunto de clientes não precisa obrigatoriamente ser totalmente atendido, o que geralmente ocorre nos demais problemas da classe do VRP. Portanto, no VRPP duas decisões se tornam importantes ao problema: quais os clientes deverão ser atendidos e como ordená-los em uma ou mais rotas. Em geral, cada cliente i possui um lucro l_i pré-determinado o que torna o cliente mais ou menos lucrativo. Assim, as rotas podem ser quantificadas em termos de duração e de ganho. As duas medidas podem ser combinadas na função objetivo, ou uma delas pode ser delimitada por uma restrição no modelo. De acordo com Dejax *et al.*(2005), problemas envolvendo ganho podem ser divididos em três categorias:

- *Prize-Collecting Traveling Salesperson Problem* (Balas, 1989), onde o objetivo é determinar um circuito que minimiza os custos de viagem, de tal forma que o ganho obtido não seja menor que um valor definido previamente. Neste caso o ganho é delimitado por uma restrição;
- *Profitable Tour Problem* (Dell'Amico *et al.*, 1995), onde o objetivo é determinar um circuito que minimiza os custos de viagem subtraído do ganho obtido;

- *Orienteering Problem* (OP) (Golden *et al.*, 1987), onde o objetivo é maximizar o ganho, desde que a duração da rota não exceda um valor previamente determinado.

Vansteenwegen e Van Oudheusden (2007) utilizaram o OP para projetar viagens turísticas, maximizando a somatória dos valores previamente atribuídos aos atrativos turísticos visitados em um determinado período de tempo, mostrando que o OP é o que mais se adequa ao problema de geração de rotas turísticas.

Por definição, o OP gera apenas uma rota e, desse modo, o modelo matemático e a meta-heurística propostas nesta dissertação serão baseadas em uma extensão do OP, o *Team Orienteering Problem* (TOP), que considera a existência de múltiplas rotas e, portanto, a partir deste ponto os dois referidos problemas serão detalhados.

3.2.1 ORIENTEERING PROBLEM (OP)

Conforme descrito na seção anterior, o OP é uma variação do PRVP que se aproxima do problema desta dissertação, além de já ter sido utilizado em problemas de roteamento turístico (Vansteenwegen e Van Oudheusden, 2007).

O OP também é conhecido pelos nomes *Selective Travelling Salesperson Problem*, *Maximum Collection Problem* e de *Bank Robber Problem* (Souffriau, 2010). Ele foi estudado inicialmente por Tsiligirides (1984) e Golden *et al.* (1987) e seu nome é baseado no esporte de mesmo nome, o *Orienteering*. Neste jogo, durante uma competição é entregue aos competidores um mapa com uma série de pontos de controle que podem ser visitados apenas uma vez e para cada um é atribuído uma pontuação predefinida. Um competidor deve sair de um ponto de origem e visitar o maior número de pontos possíveis, retornando ao ponto de origem antes do fim do tempo definido para a competição. Vence o competidor que tiver obtido a maior soma da pontuação dos pontos de controle visitados por ele.

Vansteenwegen e Van Oudheusden (2007) apresentaram o modelo matemático que tem um conjunto de N pontos de controle i , onde o primeiro ponto é o início da rota e o ponto N é a chegada, cada um com uma pontuação S_i onde S_1 e $S_N = 0$. O tempo $t_{i,j}$ de viagem entre cada ponto de controle i até o ponto de controle j já é conhecido e nem todos os pontos de controle serão visitados devido ao tempo limite T_{max} . E, por fim, as variáveis: $x_{i,j}$, que é uma

variável binária. Quando seu valor é igual a 1 (um), indica que um arco (i, j) foi usado e zero caso contrário. u_i indica a posição de um ponto de controle i na rota.

Baseado nas definições expostas anteriormente, Vansteenwegen e Van Oudheusden (2007) apresentaram a seguinte formulação matemática do problema:

$$\text{Maximizar: } \sum_{i=2}^{N-1} \sum_{j=2}^N S_i x_{i,j} \quad (3.13)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=2}^N x_{1,j} = \sum_{i=1}^N x_{i,N} = 1 \quad , \quad (3.14)$$

$$\sum_{i=1}^N x_{i,k} = \sum_{j=2}^N x_{k,j} \leq 1 \quad , \quad \forall k \in \{2, \dots, N-1\} \quad (3.15)$$

$$\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=2}^N t_{i,j} x_{i,j} \leq T_{max} \quad (3.16)$$

$$2 \leq u_i \leq N \quad , \quad \forall i \in \{2, \dots, N\} \quad (3.17)$$

$$u_i - u_j + 1 \leq (N-1)(1 - x_{i,j}) \quad , \quad \forall i, j \in \{2, \dots, N\} \quad (3.18)$$

$$x_{i,j} \in \{0,1\} \quad , \quad \forall i, j \in \{1, \dots, N\} \quad (3.19)$$

A função objetivo maximiza a soma das pontuações coletadas. A restrição (3.14) garante que a rota começa em 1 (um) e termina em N . A restrição (3.15) garante que a rota esteja conectada e impede que um arco seja visitado mais de uma vez. A restrição (3.16) limita o tempo máximo da rota. As restrições (3.17) e (3.18) são necessárias para prevenir a existência de sub-rotas. Por fim, a restrição (3.19) garante que $x_{i,j}$ seja uma variável com valores 0 e 1.

3.2.2 TEAM ORIENTEERING PROBLEM

O *Team Orienteering Problem* (TOP) é uma extensão do OP que permite múltiplas rotas, cada uma delas limitada por um tempo predefinido. Seu nome faz relação a uma competição

de *Orienteering* em times. Assim como no OP, cada ponto de controle só pode ser visitado uma vez, tendo os membros do time que se organizar para obter a maior soma possível da pontuação dos pontos de controle visitados.

Golden *et al.*(1987) provaram que o OP é NP-difícil , o que significa que não é possível criar um algoritmo de complexidade polinomial para encontrar a solução ótima do problema. Por conseguinte, o TOP também é um problema NP-difícil.

Vansteenwegen e Van Oudheusden (2007) propuseram uma alteração no modelo do OP, exposto na seção anterior, para que o TOP pudesse ser formulado de maneira inteira, substituindo a variável $x_{i,j}$ por $x_{i,j,p}$, também binária, com valor igual a 1, caso seja utilizado um arco (i,j) em uma rota p , e u_{ip} indicando a posição de um ponto de controle i em uma rota p , sendo usado uma nova variável y_{ip} indicando que um ponto de controle i faz parte de uma rota p .

Baseado no modelo exposto para o OP na seção anterior e considerando as alterações expostas anteriormente, Vansteenwegen e Van Oudheusden (2007) apresentaram a seguinte formulação matemática para o TOP:

$$\text{Maximizar: } \sum_{p=1}^P \sum_{i=2}^{N-1} S_i y_{i,p} \quad (3.19)$$

Sujeito a:

$$\sum_{p=1}^P \sum_{j=2}^N x_{1,j,p} = \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^{N-1} x_{i,N,p} = P \quad , \quad (3.20)$$

$$\sum_{p=1}^P y_{k,p} \leq 1 \quad , \quad \forall k \in \{2, \dots, N-1\} \quad (3.21)$$

$$\sum_{i=1}^{N-1} x_{i,k,p} = \sum_{j=2}^N x_{k,j,p} = y_{k,p}; \quad , \quad \begin{matrix} \forall k \in \{2, \dots, N-1\}; \\ \forall p \in \{1, \dots, P\} \end{matrix} \quad (3.22)$$

$$\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=2}^N t_{i,j} x_{i,j,p} \leq T_{max} \quad , \quad \forall p \in \{1, \dots, P\} \quad (3.23)$$

$$2 \leq u_{i,p} \leq N \quad , \quad \forall i \in \{2, \dots, N\}; \forall p \in \{1, \dots, P\} \quad (3.24)$$

$$u_{i,p} - u_{j,p} + 1 \leq (N - 1)(1 - x_{i,j,p}) \quad , \quad \forall i, j \in \{2, \dots, N\}; \forall p \in \{1, \dots, P\} \quad (3.25)$$

$$x_{i,j,p}, y_{i,p} \in \{0,1\} \quad , \quad \forall i, j \in \{1, \dots, N\}; \forall p \in \{1, \dots, P\} \quad (3.26)$$

A função objetivo maximiza a soma das pontuações coletadas. A restrição (3.20) garante que a rota começará em 1 (um) e terminará em N . A restrição (3.21) impede que um arco seja visitado mais de uma vez e a restrição (3.22) garante que a rota esteja conectada. A restrição (3.23) limita o tempo máximo das rotas. As restrições (3.24) e (3.25) são necessárias para prevenir a existência de sub-rotas. Por fim, a restrição (3.26) garante que $x_{i,j,p}$, $y_{i,p}$ sejam variáveis com valores 0 e 1.

3.3 SIMULATED ANNEALING (SA)

A constatação de que o TOP é um problema NP-difícil (Golden *et al.*, 1987) levou a busca de uma meta-heurísticas para lidar com problemas reais que possuem dimensões muito grandes. Nesta dissertação, a meta-heurística proposta será baseada no *Simulated Annealing* (SA), que será detalhado a seguir.

Proposto originalmente por Gellat *et al.* (1983), o *Simulated Annealing* (SA) é um métodos de busca local que aceita movimentos de piora para escapar de ótimos locais. Inspirada em fenômenos físicos, leva esse nome por estar fundamentada numa analogia com a termodinâmica.

O termo *annealing*, na metalurgia, significa um tratamento térmico na qual um sólido cristalino é aquecido e, em seguida, deixado a arrefecer muito lentamente até atingir sua configuração de estrutura cristalina com o menor estado de energia e, portanto, livre de defeitos (Henderson *et al.*, 2003). Estando muito quente, as partículas possuem muita energia, podendo se locomover aleatoriamente sem restrições. A partir do momento que a temperatura vai esfriando, as moléculas tendem a se acomodar na estrutura cristalina natural do material em uso. (Lima *et al.*, 2013)

O SA é um método de melhoria iterativo, no qual uma solução inicial é repetidamente melhorada por meio de pequenas alterações locais até tais modificações produzirem uma solução melhor (Chiang e Russel, 1996). O SA realiza estas modificações no procedimento de busca local de forma aleatória, permitindo, inclusive em alguns casos, modificações que

pioram a solução atual, constituindo uma tentativa para reduzir a probabilidade de a solução ficar presa em uma solução ótima local, longe da solução ótima global (Lorena *et al.*, 2010). A Figura 2 apresenta o pseudocódigo do algoritmo *Simulated Annealing* descrito por Lorena *et al.* (2008).

Figura 2: Pseudocódigo do *Simulated Annealing*

```

1. DADO ( $\alpha$ , SMax, T0, TC e S) FAÇA
2.  $S^* \leftarrow S$ ;           {Melhor solução obtida até então}
3. IterT  $\leftarrow 0$ ;       {Número de iterações na temperatura T}
4. T  $\leftarrow T0$ ;        {Temperatura corrente}
5. ENQUANTO (T > TC) FAÇA
6.   ENQUANTO (IterT < SMax) FAÇA
7.     IterT  $\leftarrow$  IterT + 1;
8.     GERAR (um vizinho qualquer S' através de um dos movimentos);
9.      $\Delta \leftarrow f(S') - f(S)$ ;
10.    SE ( $\Delta < 0$ ) ENTÃO
11.      S  $\leftarrow S'$ ;
11.      SE ( $f(S') < f(S^*)$ ) ENTÃO
12.         $S^* \leftarrow S'$ ;
13.      FIM-SE
14.    SENÃO
15.      TOMAR ( $x \in [0,1]$ );
16.      SE ( $x < e^{-\Delta/T}$ ) ENTÃO
17.        S  $\leftarrow S'$ ;
18.      FIM-SE
19.    FIM-SE
20.  FIM-ENQUANTO
21.  T  $\leftarrow \alpha * T$ ;
22.  IterT  $\leftarrow 0$ ;
23. FIM-ENQUANTO
24. S  $\leftarrow S^*$ ;
25. RETORNAR (S);

```

Fonte: Lorena *et al.*, 2008.

O procedimento principal consiste em uma repetição que gera aleatoriamente, em cada iteração, um único vizinho S' da solução corrente S . Toda solução S' é considerada um vizinho, desde que possa ser obtida ao realizar pequenas modificações na solução corrente S . Ao conjunto com todas as soluções S' , possíveis de serem geradas a partir da solução corrente S pelo procedimento aleatório, dá-se o nome de vizinhança.

A cada geração de um vizinho S' de S , é testada a variação do valor da função objetivo. Se esta variação for menor que zero, a solução S' é aceita como nova solução corrente S . Se não, ainda há uma probabilidade proporcional à temperatura atual da solução S' ser aceita como S , seguindo a analogia de que quanto menor a temperatura, mais difícil de ocorrer modificações na estrutura cristalina natural do material.

3.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção tem por objetivo realizar uma revisão bibliográfica dos estudos e avanços relacionados à classe de problemas TOP que, conforme Souffriau e Vansteenwegen (2010), é a mais utilizada para resolução do TTDP. Deste modo, essa revisão focou em estudos mais recentes sobre TOP e qualquer uma de suas variações. Na Tabela 2 tem-se um resumo da revisão bibliográfica contendo data de publicação, autores, título do trabalho, número de citações, classe do problema, solução utilizada (meta-heurística, modelo matemático ou algoritmo exato) e área de aplicação que identifica se o trabalho buscou apenas a resolução teórica da classe do problema ou, do contrário, qual aplicação prática foi resolvida. O número de citações é proveniente da soma das citações não coincidentes encontradas em agosto de 2014 em quatro bases de dados distintas: na *Web of Science Citation Index*, na *Citation Index BIOSIS* e, na *SciELO Citation Index*.

Tabela 2. Revisão bibliográfica do TOP

<i>Data P.</i>	<i>Autor(es)</i>	<i>Título</i>	<i>Citações</i>	<i>Classe</i>	<i>Solução</i>	<i>Área de aplicação</i>
1996	Chao <i>et al.</i>	The team orienteering problem	79	TOP	CGW	resolução do problema
2005	Miller-Hooks e Tang	A Tabu Search heuristic for the team orienteering problem	61	TOP	TS+ AMP	resolução do problema
2007	Archetti <i>et al.</i>	Metaheuristics for the team orienteering problem	50	TOP	VNS	resolução do problema
2007	Boussier <i>et al.</i>	An exact algorithm for team orienteering problems	42	TOP	B&P	resolução do problema

<i>Data P.</i>	<i>Autor(es)</i>	<i>Título</i>	<i>Citações</i>	<i>Classe</i>	<i>Solução</i>	<i>Área de aplicação</i>
2007	Miller-Hooks <i>et al.</i>	Scheduling technicians for planned maintenance of geographically distributed equipment	12	TOP	TS+ AMP	escala de manutenção programada de equipamentos
2008	Archetti <i>et al.</i>	Ants can solve the team orienteering problem	44	TOP	ACO	resolução do problema
2009	Archetti <i>et al.</i>	The capacitated team orienteering and profitable tour problems	16	CTOP	B&P e TS	resolução do problema
2009	Dessouky <i>et al.</i>	A Two-Stage Vehicle Routing Model for Large-Scale Bioterrorism Emergencies	13	TOP	TS	criação de planos de distribuição de matérias e mantimentos em caso de Bioterrorismo em grande escala
2009	Souffriau <i>et al.</i>	A guided local search metaheuristic for the team orienteering problem	37	TOP	GLS	resolução do problema
2009	Souffriau <i>et al.</i>	Iterated local search for the team orienteering problem with time windows	36	TOPTW	ILS	resolução do problema
2010	Abbaspour e Samadzadegan	An Evolutionary Solution for Spatial Optimization of Personal Scheduling in Urban Multimodal Networks	0	TOP	GA	roteamento urbano
2010	Arbelaitz <i>et al.</i>	Personalized Tourist Route Generation	2	TDTOPTW	ILS	roteiros turísticos
2010	Archetti <i>et al.</i>	The undirected capacitated arc routing problem with profits	7	CTOP	VNS+TS	resolução do problema
2010	Calvo <i>et al.</i>	An Effective Hybrid Evolutionary Local Search for Orienteering and Team Orienteering Problems with Time Windows	2	TOPTW	GRASP+ELS	roteiros turísticos
2010	Doerner, <i>et al.</i>	Heuristics for the multi-period orienteering problem with multiple time windows	24	TOPTW	VNS	roteiros turísticos
2010	Souffriau <i>et al.</i>	A Path Relinking approach for the Team Orienteering Problem	29	TOP	GRASP+Path Relinking	resolução do problema
2011	Abbaspour e Samadzadegan	Time-dependent personal tour planning and scheduling in metropolises	4	TDTOPTW	GA	roteiros turísticos
2011	Aras <i>et al.</i>	Selective multi-depot vehicle routing problem with pricing	6	TOP	RN+TS	criação de rotas para empresa coletar produtos usados devolvidos as lojas
2012	Caballero <i>et al.</i>	Interactive design of personalised tourism routes	1	TOP	TS	roteiros turísticos
2012	Calvo <i>et al.</i>	The Team Orienteering Problem with Time Windows: An LP-based Granular Variable Neighborhood Search	10	TOPTW	GVNS	resolução do problema
2012	Cao <i>et al.</i>	On the tour planning problem	5	TOP	LS	roteiros turísticos

<i>Data P.</i>	<i>Autor(es)</i>	<i>Título</i>	<i>Citações</i>	<i>Classe</i>	<i>Solução</i>	<i>Área de aplicação</i>
2012	Chen e Miller-Hooks	Optimal team deployment in urban search and rescue	2	TOP	VNS	criação de rotas para distribuição de equipes de busca e resgate
2012	Doerner <i>et al.</i>	Adaptive large neighborhood search for service technician routing and scheduling problems	6	TOP	ALNS	escala de agendamento de serviços técnicos
2012	Dorn <i>et al.</i>	A Tabu Search approach for Multi Constrained Team Orienteering Problem and its application in touristic trip planning	0	TOP	TS	roteiros turísticos
2012	Gambardella <i>et al.</i>	Coupling ant colony systems with strong local searches	5	TOP	EACS	resolução do problema
2012	Hasuike <i>et al.</i>	Tour Route Planning Problem for Sightseeing with the Multiroute under Several Uncertain Conditions	2	TOP	Modelo Matemático	roteiros turísticos
2012	Mamasis <i>et al.</i>	Real-time management of vehicle breakdowns in urban freight distribution	1	CTOP	GA	redistribuição de cargas no caso da falha de algum veículo da frota
2013	Archetti <i>et al.</i>	Optimal solutions for routing problems with profits	3	CTOP	B&P	resolução do problema
2013	Archetti <i>et al.</i>	The capacitated team orienteering problem with incomplete service	0	CTOP-IS	B&P	
2013	Banaei-Kashani <i>et al.</i>	Users plan optimization for participatory urban texture documentation	0	TOP	GLS	um sistema de seleção das imagens coletadas por colaboradores para criação de maquetes urbanas num conceito próximo ao do google streetview
2013	Cattrysse <i>et al.</i>	A variable neighborhood search method for the orienteering problem with hotel selection	1	TOP	SVNS	roteiros turísticos
2013	Che <i>et al.</i>	A memetic algorithm for the multiperiod vehicle routing problem with profit	0	TOP	MA	resolução do problema
2013	Cheang, <i>et al.</i>	An adaptive ejection pool with toggle-rule diversification approach for the capacitated team orienteering problem	0	CTOP	AEPTD	resolução do problema
2013	Dang <i>et al.</i>	An effective PSO-inspired algorithm for the team orienteering problem	2	TOP	PSI	resolução do problema
2013	Dobrokhodov <i>et al.</i>	Planning for Opportunistic Surveillance with Multiple Robots	0	TOP	LS	rota para veículos aéreos não tripulados de vigilância
2013	Feng <i>et al.</i>	Periodic Re-optimization based Dynamic Branch and Price Algorithm for Dynamic Multi-UAV Path Planning	0	TOP	Dynamic B&P	rota para veículos aéreos não tripulados de vigilância com novo pontos adicionados em tempo real modificando a rota

<i>Data P.</i>	<i>Autor(es)</i>	<i>Título</i>	<i>Citações</i>	<i>Classe</i>	<i>Solução</i>	<i>Área de aplicação</i>
2013	Feng <i>et al.</i>	Proportion-based robust optimization and team orienteering problem with interval data	0	TOP	B&P+ESP	resolução do problema
2013	Garcia <i>et al.</i>	Integrating public transportation in personalised electronic tourist guides	4	TDTOPTW	ILS	roteiros turísticos
2013	Johnson <i>et al.</i>	An augmented large neighborhood search method for solving the team orienteering problem	0	TOP	<i>Augmented</i> LNS	resolução do problema
2013	Karabulut e Tasgetiren	A Discrete Artificial Bee Colony Algorithm for the Team Orienteering Problem with Time Windows	0	TOPTW	DABC	resolução do problema
2013	Repoussis <i>et al.</i>	The Capacitated Team Orienteering Problem: A Bi-level Filter-and-Fan method	1	CTOP	BLFFS	resolução do problema
2013	Souffriau <i>et al.</i>	The Multiconstraint Team Orienteering Problem with Multiple Time Windows	4	TOP	ILS+GRASP	roteiros turísticos
2014	Archetti <i>et al.</i>	The Split Delivery Capacitated Team Orienteering Problem	0	CTOP-SD	VNS+TS	resolução do problema
2014	Archetti <i>et al.</i>	Incomplete Service and Split Deliveries in a Routing Problem with Profits	0	CTOP-SD-IS	Modelo Matemático	resolução do problema
2014	Hu e Lim	An iterative three-component heuristic for the team orienteering problem with time windows	1	TOPTW	I3CH	resolução do problema
2014	Laporte <i>et al.</i>	The multi-district team orienteering problem	0	Multi-District TOP	ALNS	resolução do problema

Fonte: Próprio autor.

Embora o número de citações seja um bom indicativo da aceitação e relevância dos trabalhos, os mais antigos acabam tendo um número maior de citações. A seguir serão detalhadas as formulações iniciais do TOP com maior número de citações e os trabalhos abordando o uso do TOP para roteamento turístico.

Chao *et al.* (1996) foram pioneiros no estudo do TOP e desenvolveram uma heurística com 5 passos para o TOP, baseado no descrito no trabalho de Golden *et al.* (1987) para o OP, onde, partindo de uma solução inicial factível, tenta otimizar essa solução através de um procedimento chamado de *record-to-record*, testando movimentos de troca com todos os pontos da solução em busca de melhorias no resultado.

Miller-Hooks *et al.* (2005) fizeram uso de uma meta-heurística que utiliza *Tabu Search* (TS) combinado a um *adaptive memory procedure*. Eles afirmaram ter obtido melhores

resultados que Chao *et al.* (1996). Dois anos depois, em 2007, essa meta-heurística foi adaptada e aplicada à criação de escalas de manutenção programada de equipamentos da empresa United Technologies Corporation (Miller-Hooks *et al.*, 2007).

Já Archetti *et al.* (2007) desenvolveram uma meta-heurística *Variable Neighborhood Search* (VNS) fazendo uma busca de modo mais eficiente em uma vizinhança maior que a que pode ser obtida, através de um procedimento de busca local usado no TS. Eles afirmaram terem obtido resultado de forma mais rápida e, em alguns casos, melhores que os obtidos por Chao *et al.* (1996) e por Miller-Hooks *et al.* (2005).

A variação do TOP com janela de tempo, o TOPTW, foi tratada pela primeira vez por Souffriau *et al.* (2009b), que descreveram o problema e constataram que os procedimentos de busca local usados para resolução do TOP, até aquele momento, eram inúteis com a adição da janela de tempo, não podendo, então, essas soluções serem empregadas para solução do TOP de maneira eficiente. Assim, eles criaram uma meta-heurística *Iterated Local Search* para resolução do TOPTW e destacaram o problema de criação de roteiros turísticos como possível aplicação prática.

Arbelaitz *et al.* (2010) apresentaram um protótipo destinado ao uso de turistas para geração de roteiros turísticos personalizados, para permitir que no roteiro fosse levado em conta variações de tempo de percurso, frequentes em roteamento em zonas urbanas, como períodos de trânsito mais intenso e/ou distintas formas de transportes usadas. O protótipo foi desenvolvido com base em uma variação do TOPTW, o *Time Dependent TOPTW* (TDOPTW), onde o tempo de viagem entre um POI *a* para um POI *b* varia de acordo com o horário que o turista sai do POI *a*. Foi realizada uma adaptação da meta-heurística *Iterated Local Search* proposta por Souffriau *et al.* (2009b).

Abbaspour *et al.* (2011) propuseram um método de solução para o TDOPTW, visando a eficiência da geração de roteiros turísticos em zonas urbanas que levasse em consideração o uso de distintos meios de transporte onde o tempo de viagem entre um POI *a* para um POI *b* variasse de acordo com o horário que o turista sai do POI *a* e do meio de transporte que será usado para realizar o deslocamento. Usando dados reais coletados no Irã, mais especificamente da cidade de Tehran, o método consiste em dois algoritmos genéticos: o *Multimodal Shortest Path*, que é responsável por encontrar os melhores caminhos pelas ruas da cidade e determinando quais meios de transporte devem ser usados no percurso, e o *Tour*

Planning, baseado nos dados informados pelos turistas e as informações obtidas pelo o *Multimodal Shortest Path*, sugerindo um roteiro para o turista.

Para criação de roteiros turísticos de problemas turísticos utilizando dados e simulações de situação reais, Caballero *et al.*(2012) utilizaram o TS para resolução do TOPTW usando como dados informações da região de Andalusia, na Espanha. Arbelaitz *et al.*(2010) formularam uma solução para criação de roteiros turísticos apenas andando de transporte público no contexto da região de São Sebastião, no norte Espanha, usando a meta-heurística *Iterated Local Search* (ILS).

Problemas concebidos de modo teórico para resolver problemas envolvendo roteamento turístico usando o TOP foram tratados por Hasuike *et al.*(2012), que propuseram uma formulação matemática com uso de Fuzzy para levar em conta as incertezas de criar rotas turísticas.

Dorn *et al.*(2012) propuseram o uso do TS para *Multi-Constrained* TOPTW variação do TOPTW onde o uso de várias restrições permite abordar outros aspectos da criação de rotas turísticas, de modo semelhante tendo em vista as especificidade dos problema de roteamento turístico Souffriau *et al.*(2013) apresentaram uma meta-heurística híbrida entre o GRASP e ILS para um MCTOP *with Multiple Time Windows*.

4. METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia que pode ser dividida em sete partes: 1) Levantar dados junto ao projeto “Rede de Difusão do Desempenho do Turismo Capixaba”, 2) Definir as instâncias de teste com base em dados fictícios e nos dados reais, 3) Propor um modelo matemático para o TTDP baseado no TOPTW, 4) Propor uma meta-heurística SA para o TTDP baseado no TOPTW, 5) Executar o Modelo Matemático proposto no CPLEX 12.6 com as instâncias definidas, 6) Executar a meta-heurística proposta com as instâncias definidas, 7) Validar o resultado da meta-heurística, comparando com os resultados do modelo matemático.

Para validação e teste do modelo matemático e da meta-heurística foram criadas instâncias a partir de conjuntos de atrativos com seus atributos definidos aleatoriamente, combinados a perfis de turistas de teste como parâmetros. Foram criadas também instâncias utilizando atrativos reais e perfis de turistas de teste a fim de demonstrar a aplicabilidade prática da meta-heurística.

Os dados dos atrativos utilizados nas instâncias reais foram obtidos em etapas anteriores do projeto "Rede de Difusão do Desempenho do Turismo Capixaba" da SETUR e foram disponibilizados para que pudessem verificar como a meta-heurística se sairia em situações reais.

Sendo o resultado ótimo esperado para instâncias criadas desconhecido, foi criado um modelo matemático para solução do TOPTW com a mesma função objetivo (FO) da meta-heurística SA desenvolvida permitindo analisar a eficiência e a estabilidade da meta-heurística.

Para a execução e implementação do modelo optou-se pelo uso do *solver* IBM® CPLEX® 12.6, que é disponibilizada de forma gratuita para fins acadêmicos, utilizada para o desenvolvimento e implementação de modelos matemáticos.

A meta-heurística SA foi escrita na linguagem de programação C e foi compilada na forma de console para os testes e como biblioteca DLL para que pudesse ser entregue aos membros da equipe que cuidaram da próxima etapa do projeto, essa compilação foi feita a sua utilização em sistemas operacionais Windows 64x.

Nas seções a seguir serão apresentados o processo utilizado para criação das instâncias, o modelo matemático proposto e, por fim, a meta-heurística proposta.

4.1 PROCESSO UTILIZADO PARA CRIAÇÃO DAS INSTÂNCIAS

Esta seção tem por objetivo descrever o processo de criação das instâncias utilizadas nesta dissertação. As instâncias estão divididas em dois grupos maiores, instâncias de teste (T) com atrativos fictícios e as instâncias com atrativos reais (R), instâncias teste (T) com atrativos fictícios foram divididas em grupos pelo número de atrativos (a) sendo então cada instância de um subgrupo identificada pelo número de dias (d) que o turista teria disponível naquela instância. Dessa forma, uma instância nomeada de T5a3d é uma instância de teste (T) e possui obrigatoriamente 5 atrativos (5a) fictícios e 3 dias (3d) disponíveis para visita.

Para criação das instâncias usadas nos testes e validações da meta-heurística e do modelo matemático foi desenvolvido um aplicativo de suporte escrito na linguagem de programação C# para criação de instâncias aleatórias e para geração de uma representação gráfica dos atrativos e das rotas geradas. Este aplicativo recebe como entrada os seguintes parâmetros:

- n_{Atr} - Número de atrativos;
- n_{Tp} - Número de tipos de atrativos;
- r_{max} - Raio máximo de distancia dos atrativos ao ponto de partida das rotas;
- l_{max} - Nota máxima a ser atribuída a algum tipo de um atrativo;
- v_{med} - Velocidade média;
- t_{med} - Tempo médio de visita de cada atrativo;
- tp_{vis} - Tipos de atrativos a serem visitados;
- K - Número de dias da visita;
- jt_{kini} - Horário de saída do ponto de partida de cada dia;
- jt_{kfim} - Horário de retorno do ponto de partida de cada dia;
- c_k - Coordenadas do ponto de partida (uma para cada dia)

A Figura 3 mostra o pseudocódigo da rotina que gera instâncias.

Figura 3: Pseudocódigo do gerador de instâncias

```

DADO ( $n_{Atr}, n_{TpA}, r_{max}, l_{max}, v_{med} \cdot t_{med}, tp_{vis}, K, jt_{kini}, jt_{kfim}, c_k$ )
Repetir  $n_{Atr}$  vezes
    CRIAR (novo atrativo  $a_i$ )
    ATRIBUIR (para  $a_i$  coordenadas aleatórias entre o MENOR ( $c_k - r_{max}$ )
    e o MAIOR ( $c_k + r_{max}$ ))
    Faça
        SENDO ( $na_t$  uma lista de nota atribuídas a um tipo atrativo  $a_i$ )
        ATRIBUIR ( $n_{Tp}$  notas aleatórias entre 0 e  $l_{max}$  para  $na_t$ )
    Enquanto ( $\sum na_t \leq 0, \forall t \in tp_{vis}$ )
fim Repetir
GRAVAR (arquivo de dados para o modelo e para o SA)

```

Fonte: Próprio autor.

A partir desta rotina foram criados cinco grupos de instâncias cada um contendo um número diferente de atrativos fictícios. Instâncias do mesmo grupo possuem os mesmos atrativos diferindo apenas na quantidade de dias disponíveis para visita em cada instância, onde todos os atrativos atendem aos interesses do turista o que significa dizer que o GIT de todos os atrativos que compõem as instâncias é maior do que 0.

O primeiro grupo contendo apenas 5 atrativos que atende ao interesse do turista foi criado para validação já que em função da quantidade de atrativos é possível calcular o valor ótimo de modo manual. Nesse grupo foram criadas 3 instâncias T5a1d, T5a2d e 5a3d contendo 1, 2 e 3 dias respectivamente. As instâncias T5a1d e T5a2d tiveram suas janelas de tempo de disponibilidade para visita do turista definidas de modo a não permitir que 2 atrativos fossem visitados sem violação, já a instância T5a3d foi ajustada de modo que fosse possível visitar todos os 5 atrativos.

O segundo grupo com 15 atrativos possui 3 instâncias T15a1d, T15a2d e T15a3d contendo 1, 2 e 3 dias respectivamente e cada dia com 8 horas de passeio. O terceiro grupo com 30 atrativos também com 3 instâncias T30a1d, T30a3d e T30a7d contendo 1, 3 e 7 dias respectivamente todos os dias com 8 horas de passeio.

O segundo e o terceiro grupo foram criados de maneira mais aleatória quando comparado ao primeiro sendo apenas atribuídos manualmente os valores que em uma situação real seriam definidos pelo turista. Acredita-se que estes grupos de instâncias se aproximam mais da realidade já que significa dizer que existem 30 atrativos que atendem ao grau de interesse de um turista em uma única região.

O quarto grupo possui duas instâncias com 100 atrativos cada uma a T100a3d e a T100a7 com respectivamente 3 e 7 dias. Este grupo foi criado para verificar o comportamento do modelo e da meta-heurística com um número grande de atrativos com GIT maior que 0 e teve tempo disponível para passeio de cada dia atribuído aleatoriamente o que permitiu uma variedade de testes durante a elaboração do modelo e da meta-heurística quanto as violações de janelas de tempos dos dias e também da janela de tempo dos atrativo.

E, por fim, o quinto grupo de instâncias tem como objetivo avaliar a capacidade da meta-heurística de lidar com grande número de atrativos. Assim, foram criadas 3 instâncias contendo 300 atrativos, T300a1d, T300a3d e T300a7d contendo 1, 3 e 7 dias respectivamente, cada dia com um com 8 horas e 20 minutos de passeio. Considerando que dificilmente seria possível encontrar 300 atrativos com GIT maior que 0 em uma única região, esse número foi escolhido simplesmente com o objetivo de validar a robustez do modelo e da meta-heurística.

Para constatar a eficiência da meta-heurística em uma situação próxima da real foi criado um cenário onde um turista com interesses em arquitetura religiosa, monumentos e arquitetura histórica, estaria hospedado em um hotel no município de Guarapari e tendo horário livre para passeio das 08 horas até as 20 horas. O turista em questão estaria disposto a passar de um a três dias conhecendo locais que agradem seus interesses, mas precisa de sugestões para criar seu roteiro. Esta situação representa o que o aplicativo que a SETUR deseja disponibilizar para os turistas que venham ao Espírito Santo.

Para esse cenário foram utilizados os atrativos e hotéis coletados pelo projeto "Rede de Difusão do Desempenho do Turismo Capixaba" da SETUR-ES/FCAA/UFES que até o momento dos testes da meta-heurística haviam sido catalogados 294 atrativos os quais passaram por um pré-processamento levando em consideração o perfil do turista do cenário de teste que excluiu os atrativos com GIT igual a zero para os interesses definidos pelo turista. Após o pré-processamento restaram 29 atrativos com os quais foram criados 3 instâncias a R29a1d, R29a2d e a R29a3d cada uma com 1,2 e 3 dias para passeio respectivamente, em cada dia das instância o turista deixaria o hotel em Guarapari as 8 horas e deveria estar de volta no máximo as 20h num total de 12 horas de passeio por dia.

4.2 MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO

O modelo matemático proposto teve como base o modelo do TOP descrito na Seção 3.2 do Capítulo 3 combinando aspectos do modelo descrito para o VRPTW na seção 3.1 do

Capítulo 3. Além da janela de tempo o modelo foi criado visando especificidade do problema abordado, como:

- pontos de partida podem ser diferentes para cada dia (k) do passeio.
- cada dia do passeio possui seu próprio horário de saída e retorno ao ponto de partida, podendo ser diferentes.
- o cálculo do GIT de cada atrativo.

No modelo matemático proposto os seguintes conjuntos são definidos:

CL – conjunto que representa todos os atrativos variando de 1 até na atrativos, sendo na o número de atrativos do local a ser visitado;

$C0$ – conjunto auxiliar de CL variando de 0 até na ;

$C1$ – conjunto auxiliar de CL variando de 1 até $na + 1$;

CT – conjunto auxiliar de CL variando de 0 até $na + 1$;

R – conjunto que representa os dias que o turista poderá passar no local para visitar os atrativos, variando de 1 até nr dias;

YA – conjunto que representa os diversos tipos de atrativos, variando de 1 até ny tipos de atrativos;

S – conjunto que representa os tipos de atrativos que o turista deseja visitar, variando de 1 até nr tipos de atrativos, sendo $nr \leq ny$;

O modelo matemático possui os seguintes parâmetros:

$t_{i,j}$ - tempo para percorrer trajeto entre o atrativo i e o atrativo j ;

ta_i - tempo de visitação do atrativo i ;

twa_i - horário de abertura do atrativo i ;

twf_i - horário de fechamento do atrativo i ;

$qr_{i,y}$ - notas atribuídas ao atrativo turístico i por tipo de atrativo y ;

nd - número de dias que o turista passará no local para visitar os atrativos;

it_s - representa os interesses do turista em visitar atrativos do tipo s ;

HA_r - horário de saída cada turista do hotel cada dia de visita o r ;

T_r - limite de tempo de passeio de cada turista cada dia de visita o r ;

As variáveis utilizadas pelo modelo matemático são descritas a seguir:

$x_{r,i,j}$ - define se o turista viaja no dia r diretamente do atrativo i até o atrativo j , vale 1 se o turista viaja do atrativo i até o atrativo j , e zero caso contrário;

$tc_{r,i}$ – define o tempo de chegada do turista no atrativo.

A seguir são apresentadas a Função Objetivo e as restrições do modelo matemático proposto.

Função Objetivo

$$\text{Maximizar: } \sum_{r \in R} \sum_{i \in CL} \sum_{j \in C1} \sum_{s \in S} qr_{i,it_s} x_{r,i,j} \quad (4.1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{r \in R} \sum_{i \in CL} \sum_{j \in C1} \sum_{s \in S} x_{r,i,j} \geq 1, \quad (4.2)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{j \in C1} x_{r,i,j} \leq 1, \quad \forall i \in CL \quad (4.3)$$

$$tc_{r,i} \geq \sum_{j \in C1} x_{r,i,j} twa_i, \quad \forall r \in R, i \in CL \quad (4.4)$$

$$tc_{r,i} \leq \sum_{j \in C1} x_{r,i,j} (twf_i - ta_i), \quad \forall r \in R, i \in CL \quad (4.5)$$

$$\sum_{j \in C0} \sum_{j \in C1} (t_{i,j} + ta_i) x_{r,i,j} \leq T_r, \quad \forall r \in R \quad (4.6)$$

$$tc_{r,j} \geq tc_{r,i} + ta_i + t_{i,j} - (M(1 - x_{r,i,j})), \quad \forall r \in R, i \in C0, j \text{ in } C1 \quad (4.7)$$

$$tc_{r,(na+1)} = \sum_{i \in C0} \sum_{j \in C1} ((t_{i,j} + ta_i) x_{r,i,j}) + HA_r, \quad \forall r \in R \quad (4.8)$$

$$tc_{r,0} = HA_r, \quad \forall r \in R \quad (4.9)$$

$$tc_{r,i} \geq HA_r, \quad \forall r \in R, i \in CL \quad (4.10)$$

$$\sum_{s \in S} qr_{i,it_s} \sum_{j \in C1} x_{r,i,j} \geq 1 - (1 - \sum_{j \in C1} x_{r,i,j}), \quad \forall r \in R, i \in CL \quad (4.11)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{j \in CL} x_{r,0,j} \leq nd, \quad (4.12)$$

$$\sum_{i \in CT} x_{r,i,h} - \sum_{j \in CT} x_{r,h,j} = 0, \quad \forall h \in CL, r \in R \quad (4.13)$$

$$x_{r,i,0} = 0, \quad \forall r \in R, i \in CT \quad (4.14)$$

$$x_{r,(na+1),j} = 0, \quad \forall r \in R, j \in CT \quad (4.15)$$

$$x_{r,i,j} \in \{0,1\}, \quad \forall r \in R, i \in CT, j \text{ in } CT \quad (4.16)$$

A função objetivo maximiza a soma das pontuação de cada atrativo turístico em função do desejo do turista.

A restrição 4.2 garante que cada turista visita pelo menos um atrativo. As restrições 4.3 garantem um atrativo turístico possa ser visitado no máximo uma vez pelo turista.

As restrições 4.4 garantem que o turista chegue ao atrativo após a abertura do mesmo e analogamente as restrições 4.5 garantem o turista chegue ao atrativo antes do fechamento do atrativo menos o tempo de visitação do atrativo.

As restrições 4.6 garantem que a duração de cada dia de visita r não exceda ao tempo limite de visita no dia T estabelecido pelo turista.

As restrições 4.7 garantem que o turista chegue ao atrativo j depois de ter chegado ao atrativo i mais o tempo de visitação em i e o tempo de viagem entre o atrativo i e o atrativo j .

As restrições 4.8 garantem que a chegada do turista ao último atrativo, ou seja, o retorno ao hotel seja igual à soma de todos os tempos de viagem, mais os tempos de visitação, mais a hora de saída do hotel.

As restrições 4.9 garantem que o turista inicie sua visita a partir do hotel a partir do horário de saída estabelecido pelo turista ha_r para o dia visitação r . As restrições 4.10 garantem que o turista inicie sua visita a um atrativo i sempre num tempo maior que o horário de saída estabelecido pelo turista ha_r para o dia visitação r .

As restrições 4.11 garantem que o turista irá visitar em cada dia r pelo menos um atrativo i que esteja contido dentro dos seus interesses it_s .

A restrição 4.12 garante que o turista não irá visitar mais do que o número de dias nd que o turista deseja visitar o local.

As restrições 4.13 garantem o fluxo em rede. As restrições 4.14 garantem que nenhuma rota retorne para o nó zero do grafo. As restrições 4.15 garantem que nenhuma rota saia do nó virtual $na + 1$.

4.3 META-HEURÍSTICA *SIMULATED ANNEALING* PROPOSTA

A meta-heurística SA foi escrita na linguagem de programação C tem como base uma adaptação proposta por Lorena *et al.* (2008) ao SA, que se utiliza da técnica de “reaquecimento”, com o intuito de refinar o resultado. Esta técnica consiste em, após executar o SA, utilizar-se da melhor solução, obtida até então, como solução inicial da nova execução, deste modo o SA é executado quantas vezes forem possíveis durante um tempo máximo tim_{max} pré-determinado. O pseudocódigo da função principal da meta-heurística proposta é apresentado a seguir na Figura 4.

Figura 4: Pseudocódigo *Simulated Annealing* proposto

```

SELECIONAR(Atrativos com  $GIT > 0$ )
OBTEN (uma solução inicial  $S$  para o problema)
DEFINIR (temperatura inicial  $T_0$ , taxa de resfriamento  $\alpha$ , número de
iterações  $SA_{max}$ , temperatura de congelamento  $T_c$ , tempo máximo de
execução  $Tim_{max}$  )
Enquanto  $Tim_{max} > Tempo\ Execução$  faça
     $T \leftarrow T_0$ 
    Enquanto  $T > T_c$  faça
        Repetir  $SA_{max}$  vezes
            SELECIONAR (aleatoriamente um vizinho  $S'$  de  $S$ )
             $\Delta \leftarrow f(S') - f(S)$ ;  $\{f$ :função que retorna o valor da solução}
            se  $\Delta < 0$  então
                 $S \leftarrow S'$ 
            senão
                DEFINIR ( $S \leftarrow S'$  com probabilidade  $e^{-\Delta/T}$ )
            fim se
        fim repetir
         $T \leftarrow \alpha T$ 
    fim enquanto
fim enquanto
RETORNA ( $S$ )

```

Fonte: Próprio Autor.

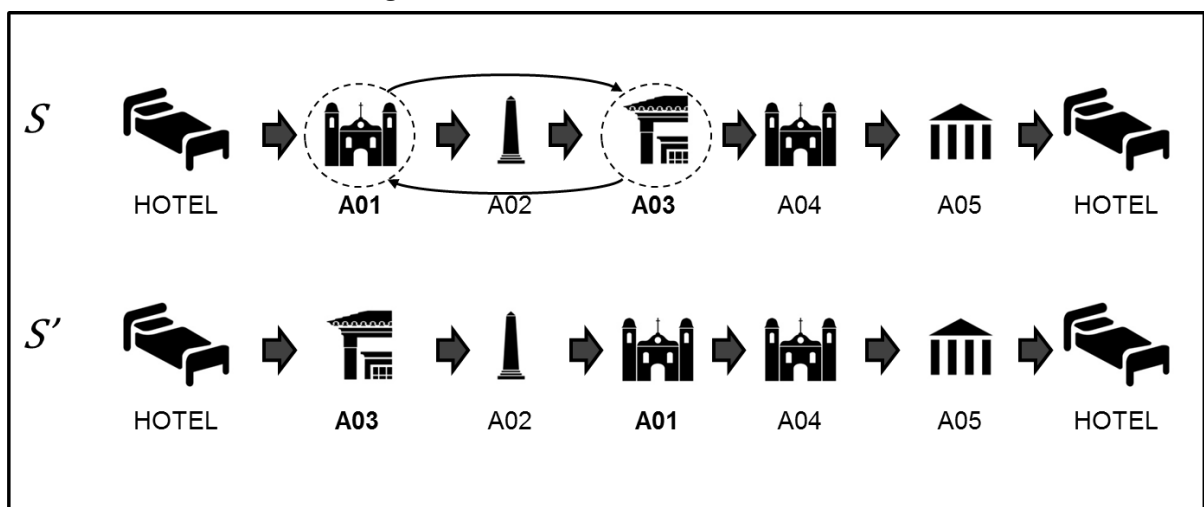
Primeiramente são excluídos todos os atrativos que não interessam ao turista, ou seja, com $GIT = 0$, uma solução inicial é gerada alocando aleatoriamente os atrativos restantes nos dias disponíveis para visitação que o turista determinou.

Para selecionar uma solução S' vizinha a solução S foram utilizados os três movimentos propostos por Lorena *et al.* (2008): reordenar atrativo, realocar atrativo e trocar atrativos. Embora movimentos de busca local possam ser usados para resolução do TOP, Souffriau *et al.* (2009b) afirmaram que apenas esses procedimentos não são capazes de resolver o TOPTW de forma eficiente sendo inúteis quando se considera janela de tempo. Ao invés de criar dias virtuais como em uma meta-heurística TOP comum, foi criado dentro da solução uma lista de atrativos não visitados que diferente dos dias virtuais não agrega todos os pontos fora da solução em uma única estrutura que não precisa respeitar nenhuma restrição. No intuito de acrescentar itens desta lista   vizinhança da solução S , dois novos movimentos foram acrescentados: remover atrativo da solução e levar para a lista de não visitado e acrescentar atrativo na solução removendo-o da lista de não visitado.

O sexto movimento prevê uma combinação do quarto e quinto movimento realizando a retirada de um atrativo da solução e levando-o para lista de não visitado e conjuntamente faz a retirada de um atrativo da lista de não visitado e o leva para a solução.

O movimento reordenar atrativo consiste em selecionar um dia qualquer pertencente à solução, selecionar um atrativo qualquer visitado nesse dia, e trocar a ordem que ele é visitado nesse dia. Esse movimento é ilustrado na Figura 5.

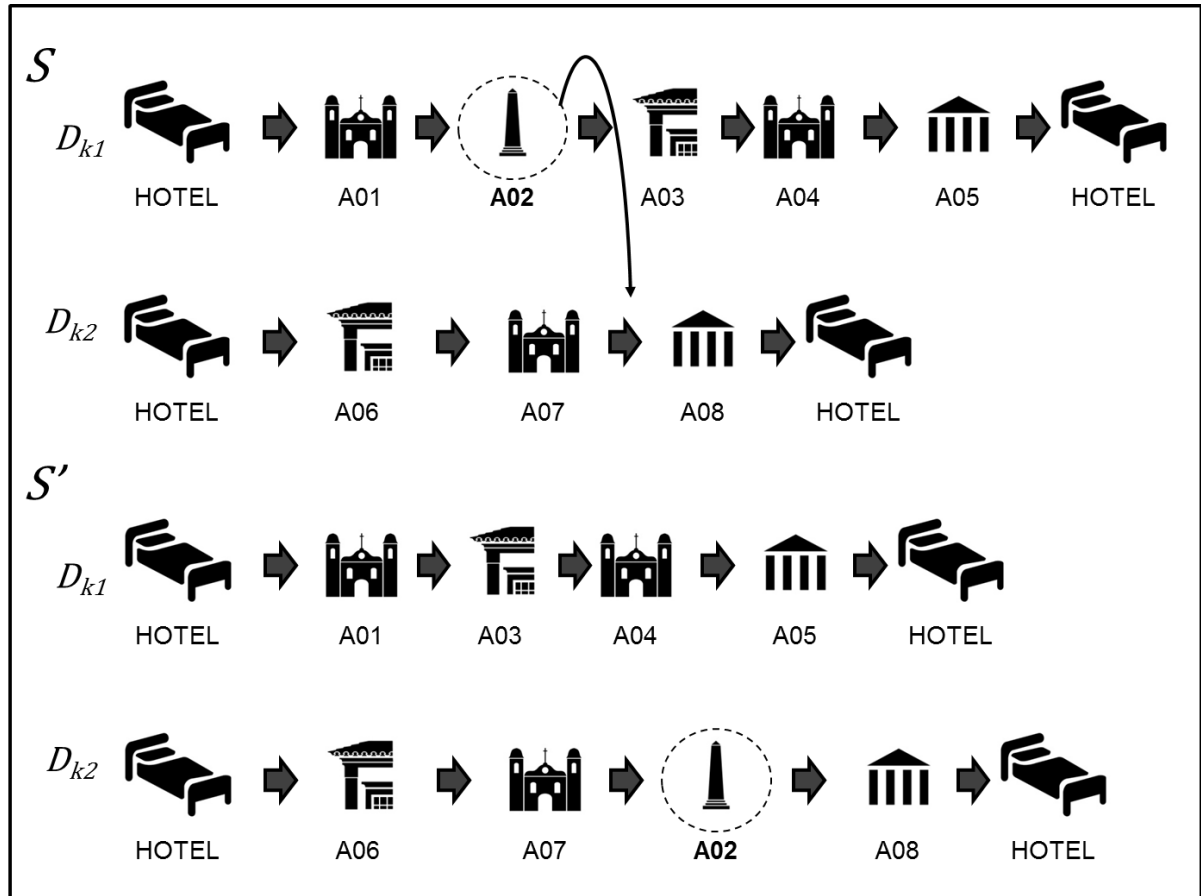
Figura 5: Movimento Reordenar atrativos



Fonte: Próprio autor.

O movimento realocar atrativo consiste em selecionar dois dias quaisquer pertencentes à solução (D_{k1} e D_{k2}), extrair um atrativo qualquer do dia D_{k1} e adicioná-lo no dia D_{k2} , em posição qualquer, selecionada aleatoriamente. Esse movimento é ilustrado na Figura 6.

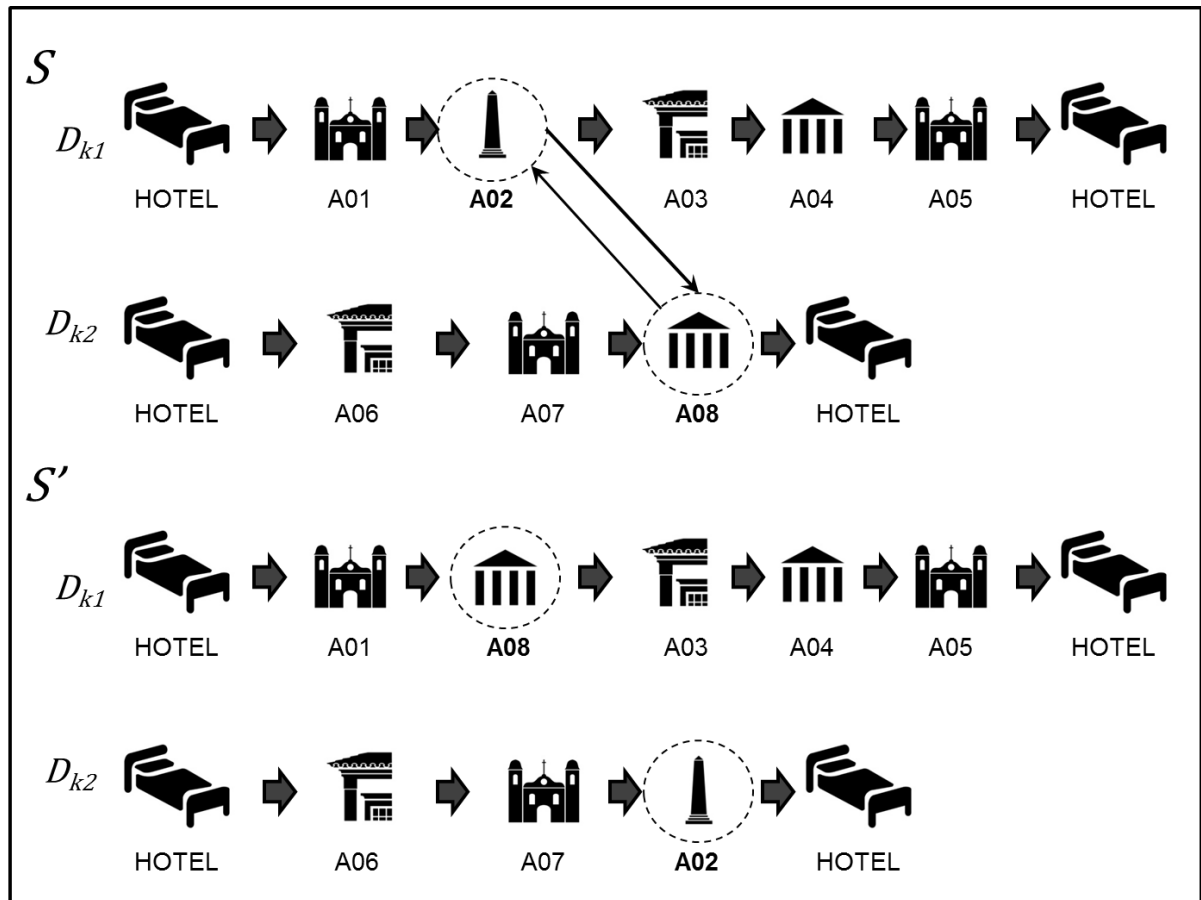
Figura 6: Movimento Realocar atrativos



Fonte: Próprio autor.

O movimento trocar atrativos consiste em selecionar dois dias quaisquer pertencentes à solução, selecionar um atrativo qualquer em cada um dos dois dias, e trocá-los. Esse movimento é ilustrado na Figura 7.

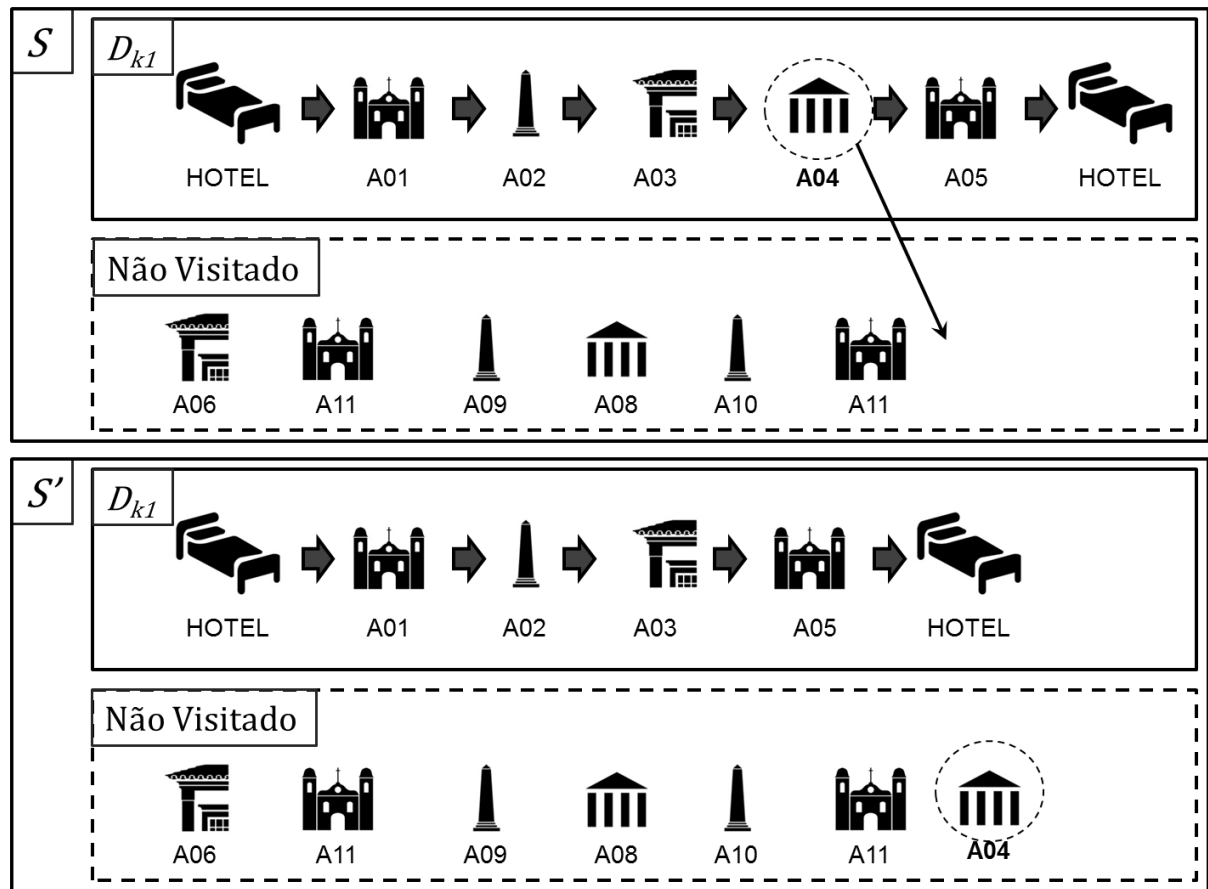
Figura 7: Movimento Trocar atrativos



Fonte: Próprio autor.

O movimento remover atrativo consiste em selecionar um dia qualquer pertencente à solução, extrair um atrativo qualquer do dia e adicioná-lo na lista de atrativos não visitados. Esse movimento é ilustrado na Figura 8.

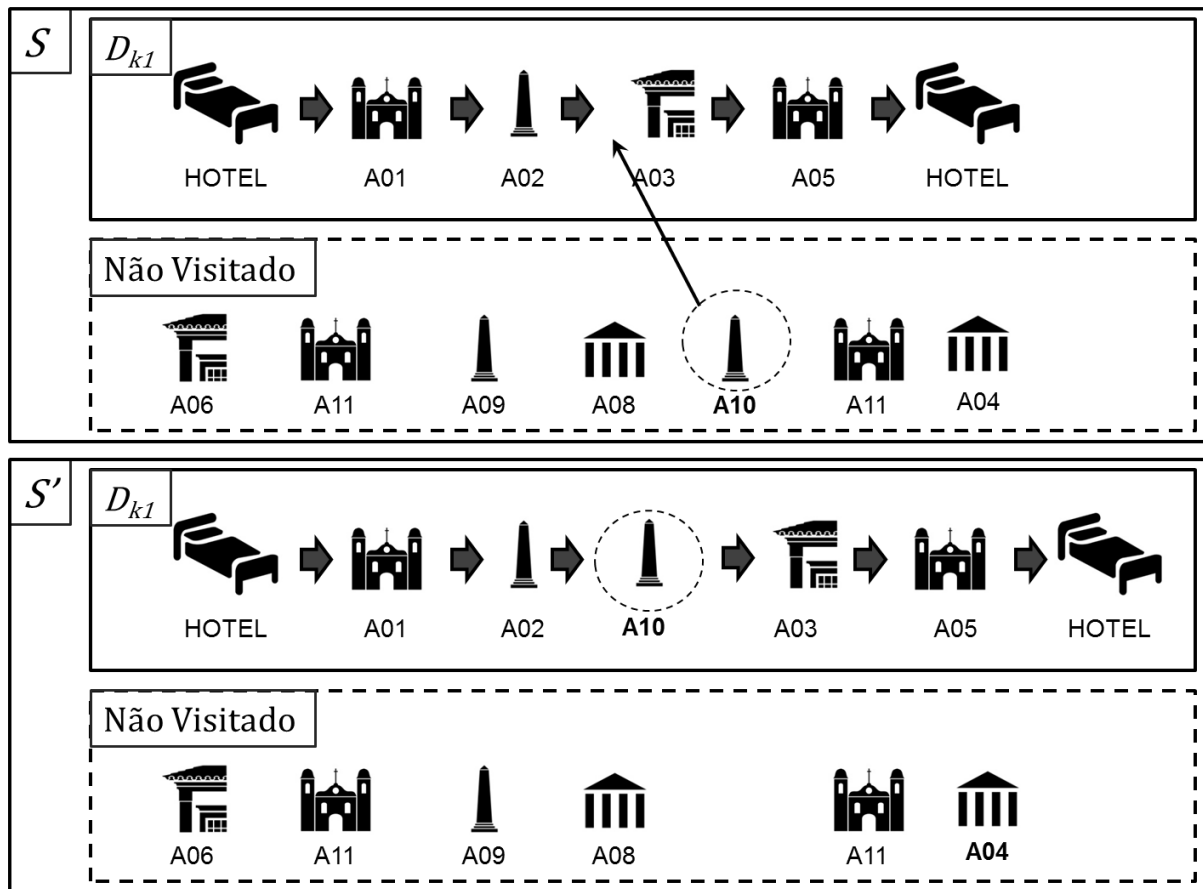
Figura 8: Movimento Remove atrativos



Fonte: Próprio autor.

O movimento acrescentar atrativo consiste em selecionar um atrativo na lista de atrativos não visitados e acrescentar a um dia qualquer pertencente à solução, em posição qualquer, selecionada aleatoriamente. Esse movimento é ilustrado na Figura 9.

Figura 9: Movimento Acrescentar atrativos



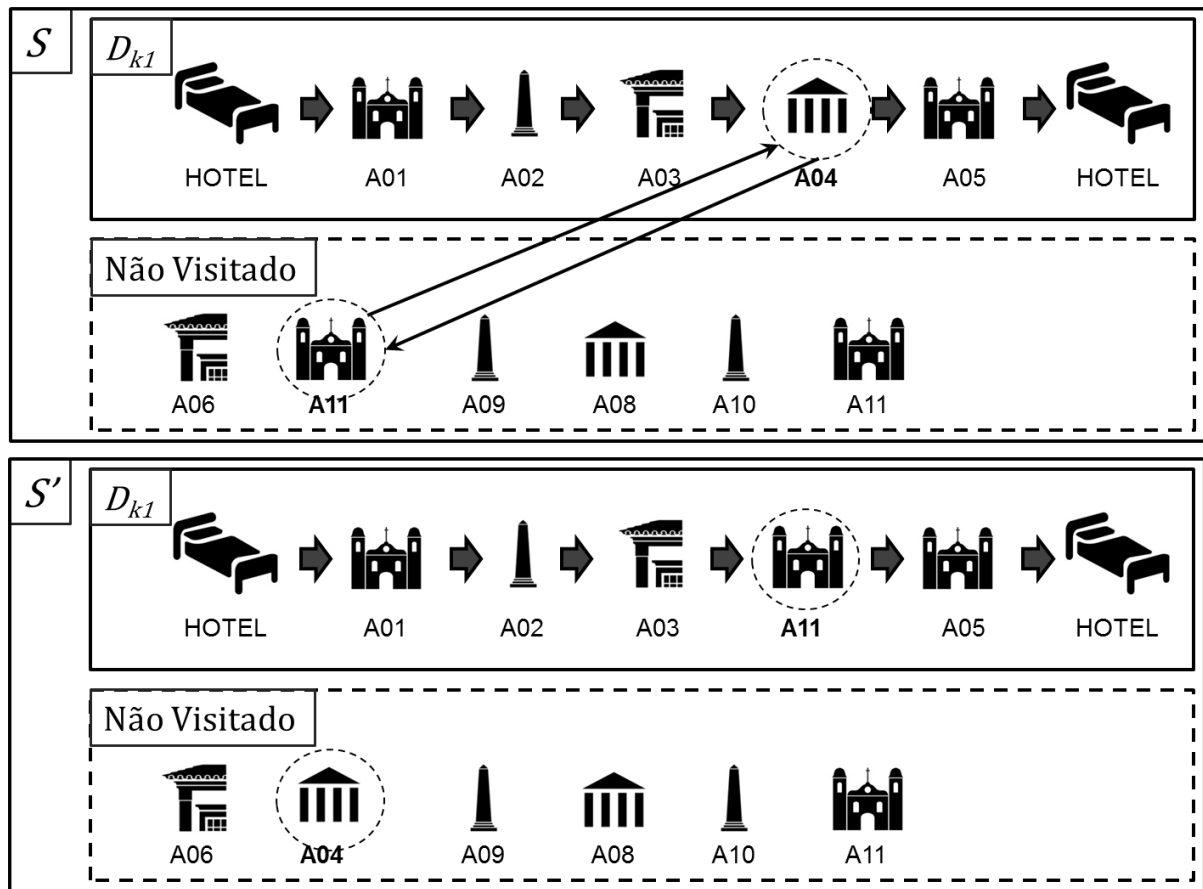
Fonte: Próprio autor.

Como será demonstrado no Capítulo 5, para as instâncias com um grande número de atrativos com apenas estes movimentos mesmo executando a meta-heurística por trinta minutos não era possível convergir a solução para o intervalo do resultado ótimo delimitado pelo modelo matemático.

Considerando que as poucas restrições impostas pelo TOPTW permitem grande quantidade de soluções viáveis, a alternativa mais comum quando a solução não converge para o ótimo é aumentar a temperatura inicial e o tempo de execução para aumentar a probabilidade de se escapar de falsos ótimos, porém dado à natureza da aplicação o aumento de tempo inviabilizaria seu uso prático.

Por essa razão foi proposto um sexto movimento que consiste em trocar um atrativo a_x visitado por outro atrativo a_z qualquer não visitado. Esse movimento é ilustrado na Figura 10.

Figura 10: Movimento Troca Atrativo Visitado por um Não Visitado



Fonte: Próprio autor.

A priori, trocar um atrativo a_x visitado por outro atrativo a_z não é muito diferente de remover atrativo a_x e no próximo movimento acrescentar o atrativo a_z e de fato nas instâncias de médio porte isso ocorreu de maneira natural no decorrer da execução do SA. Porém, uma vez que a solução fica mais próxima do ótimo normalmente remover um atrativo diminui o lucro e acrescentar um novo atrativo viola as janelas de tempo e/ou limite de viagem sendo um destes movimentos aceitos apenas se a temperatura atual for alta e não houver a certeza de que o próximo movimento será o que aproximara a solução para o ótimo e essa probabilidade diminui drasticamente de modo inversamente proporcional ao número de atrativos.

Como exemplo, considerando a solução ótima S_o como sendo uma rota nesta ordem $a_1, a_{30}, a_4, a_5, a_6$ e que a melhor solução atual S_{at} do SA seja a_1, a_2, a_4, a_5, a_6 apenas usando os cinco movimentos propostos inicialmente S_o não é vizinho S_{at} sendo necessários dois movimentos para solução S_{at} chegar em S_o . O sexto movimento além de tornar S_o vizinho S_{at} impede a existências de falsos ótimos surgidos apenas por conta da lista de atrativos não visitados.

Resultados e discussões

O *solver* CPLEX e a meta-heurística SA foram executadas em um computador com processador Intel Core i5 e 8GB de memória RAM, sistema operacional Windows 7 x64. Para a execução das instâncias de teste, o tempo limite de execução do modelo foi de 7200 segundos (2 horas), exceto para as instâncias T300a3d e T300a7d que tiveram seu tempo limite aumentado para 14400 segundos (4 horas) para tentar diminuir o *GAP*. Na Tabela 3, têm-se os resultados obtidos com a execução do modelo matemático.

A coluna Instâncias da Tabela 3 refere-se ao nome da instância que foi executada. A coluna FO representa o valor ótimo encontrado pelo CPLEX. A coluna LB e UB referem-se, respectivamente, ao *lower bound* (LB) e ao *upper bound* (UB) encontrado pelo CPLEX. A coluna GAP refere-se ao *GAP* encontrado pelo CPLEX que é calculado como $(UB - LB) / LB$. Por fim, a coluna Tempo de Execução representa o tempo que o CPLEX levou para alcançar o resultado ótimo ou parar pelo limite de execução explicado anteriormente.

Tabela 3. Resultados obtidos pelo CPLEX.

<i>Instâncias</i>	<i>FO</i>	<i>LB</i>	<i>UB</i>	<i>GAP (%)</i>	<i>Tempo Execução (s)</i>
T5a1d	8	-	-	0.00	0,03
T5a2d	8	-	-	0.00	0,06
T5a3d	13	-	-	0.00	0,02
T15a1d	31	-	-	0.00	0,17
T15a2d	55	-	-	0.00	10,45
T15a3d	60	-	-	0.00	329,61
T30a1d	38	-	-	0.00	39,95
T30a3d	-	98	119	21.61	7200
T30a7d	-	126	135	6.86	7200
T100a3d	-	177	236	33.43	7200
T100a7d	-	380	550	44.93	7200
T300a1d		59	81	38.01	7200
T300a3d		167	272	62.84	14400
T300a7d		326	632	94.15	14400

Fonte: Próprio autor.

Dado o tempo limite de execução, foram encontradas soluções ótimas para apenas 7 das 14 instâncias utilizadas. No caso do TOPTW, por ter poucas restrições e por não ter que atender todos os pontos, percebeu-se que quanto maior o número de atrativos e de dias, maior é o número de soluções factíveis e com o mesmo valor ótimo.

Conforme exposto na Seção 4.3, foram propostas duas variantes da meta-heurística SA, uma com 5 movimentos denominada SA-5M e a outra com 6 movimentos, denominada SA-6M.

Para definir os parâmetros do SA (T_0 , α , T_f , SA_{max} , tim_{max}), cada parâmetro recebeu vários valores enquanto os outros parâmetros eram mantidos fixos. Para cada conjunto de valores de parâmetro, o SA foi executado 10 vezes para as instâncias T5a1d, T5a2d, T5a3d, T100a3d, T100a7d. Foram escolhidos os parâmetros que apresentaram os melhores resultados.

Tabela 4. Parâmetros do SA.

<i>Parâmetro</i>	<i>Significado</i>	<i>Valor</i>
tim_{max}	Tempo de execução	120 Segundo
T_0	Temperatura inicial	1.000
α	Taxa de resfriamento	0.975
T_f	Temperatura de congelamento	0.01
SA_{max}	Numero de iterações	1.000

Fonte: Próprio autor.

Definidos os parâmetros, cada instância foi executada 10 vezes a fim de se medir o desvio, caso houvesse, entre as soluções encontradas. Como premissa apresentada anteriormente, apenas caso todas as soluções encontradas estivessem dentro intervalo do *lower bound* e *upper bound* definido pelo modelo matemático a meta-heurística poderia ser considerada válida.

A Tabela 5 contém os resultados obtidos ao executar o SA-5M por 120 segundos, temperatura inicial T_0 de 20.000, taxa de resfriamento α de 0,975 e com 5 movimentos.

Tabela 5. Resultado SA-5M $tim_{max}=120s$ e $T_0 = 20000$

<i>Instâncias</i>	<i>FO</i>	<i>LB</i>	<i>UB</i>	<i>SA-5M Melhor</i>	<i>SA-5M Media</i>	<i>Desvio</i>
T5a1d	8	-	-	8	8	0,00%
T5a2d	8	-	-	8	8	0,00%

<i>Instâncias</i>	<i>FO</i>	<i>LB</i>	<i>UB</i>	<i>SA-5M Melhor</i>	<i>SA-5M Media</i>	<i>Desvio</i>
T5a3d	13	-	-	13	13	0,00%
T15a1d	31	-	-	31	31	0,00%
T15a2d	55	-	-	55	55	0,00%
T15a3d	60	-	-	60	60	0,00%
T30a1d	38	-	-	38	38	0,00%
T30a3d	-	98	119	100	100	0,00%
T30a7d	-	126	135	126	126	0,00%
T100a3d	-	177	236	170	166,6	2,26%
T100a7d	-	380	550	405	395,8	2,32%
T300a1d	-	59	81	62	59,3	4,94%
T300a3d	-	167	272	154	149,2	3,59%
T300a7d	-	326	632	321	310	3,43%

Fonte: Próprio autor.

Os resultados da meta-heurística para as instâncias T100a3d, T300a1d, T300a3d, T300a7d ficaram fora do intervalo de solução ótima encontrado pelo modelo matemático, pois a média das 10 execuções ficou abaixo do valor do *lower bound* o que não é o adequado quando a função objetivo uma função de maximização.

Com 100 e 300 atrativos, o número de soluções factíveis para estas instâncias é muito grande e embora para realidade de um turista um desvio de 4% pode ser tratado como aceitável, esperar muito mais que dois minutos para receber uma sugestão de roteiro não é desejável para uma aplicação prática a ser utilizada pelo turista. Um turista normalmente não estaria disposto a esperar cerca 30 minutos toda vez que mudasse de opinião sobre o roteiro, porém a primeira alternativa para ficar dentro do intervalo de solução ótima foi aumentar o tempo máximo de execução de cada tentativa então foram feitos teste apenas com as instâncias T100a3d, T300a1d, T300a3d, T300a7d usando como tempo máximo de execução 900 segundos (15 minutos) e 1800 segundos (30 minutos) ainda que estes tempos inviabilizem o uso pratico. Os resultados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Resultado SA-5M $tim_{max}=120s$, $tim_{max}=900s$ e $tim_{max}=1800s$

<i>Instâncias</i>	<i>LB</i>	<i>UB</i>	<i>SA-5M Melhor (900s)</i>	<i>SA-5M Media (900s)</i>	<i>SA-5M Desvio (900s)</i>	<i>SA-5M Melhor (1800s)</i>	<i>SA-5M Media (1800s)</i>	<i>SA-5M Desvio (1800s)</i>
T100a3d	177	236	180	173,2	4,22%	175	174	0,88%
T300a1d	59	81	64	61,3	4,65%	643	62,3	3,09%
T300a3d	167	272	166	157,4	5,40%	164	161,5	2,00%

<i>Instâncias</i>	<i>LB</i>	<i>UB</i>	<i>SA-5M Melhor (900s)</i>	<i>SA-5M Media (900s)</i>	<i>SA-5M Desvio (900s)</i>	<i>SA-5M Melhor (1800s)</i>	<i>SA-5M Media (1800s)</i>	<i>SA-5M Desvio (1800s)</i>
T300a7d	326	632	332	324,7	2,44%	340	328,5	3,45%

Fonte: Próprio autor.

Conforme descrito na Tabela 5, embora o aumento no tempo tenha diminuído, o desvio das soluções, exceto pela instância T300a1d, todas as outras na média continuaram fora do intervalo de solução ótima encontrado pelo modelo matemático. Mais alguns testes foram realizados com a temperatura inicial T_0 em 40.000 e 1.000 porem não fizeram a solução convergir para o ótimo, ficando claro que seria necessário aumentar o tempo limite ou fazer alterações na meta-heurística.

Como aumentar a temperatura inicial e o tempo de execução para aumentar a probabilidade de se escapar de falsos ótimos não resolveu e os tempos usados nos testes inviabilizam o uso pratico da meta-heurística. Buscaram-se formas de tratar pela meta-heurística a grande quantidade de soluções viáveis gerada no TOPTW.

Os movimentos de remoção e inserção aumentam muito a vizinhança e com 300 atrativos e 3 dias pode se atender 20 dos 300 atrativos no máximo o que significa dizer que os 93,4% dos atrativos ficam na lista de não visitados. Poderia se sugerir um aumento dos dias disponíveis para visita o que diminuiria a vizinhança, porém isso sai do escopo do problema.

O fato e que algum destes 280 atrativos não visitados tem potencial de fazer parte da solução ótima em um dos 20 lugares disponíveis, mais com a estrutura de vizinhança criada pelo SA-5M ele depende que algum atrativo seja removido antes de entrar na solução, o que em baixa temperatura e num mínimo local é quase impossível.

Neste sentido a solução criada foi ampliar ainda mais a vizinhança adicionando o 6º movimento que permite que soluções que antes só seriam atingidas com dois movimento sejam alcançadas com apenas um, e sua principal função é permitir que atrativos não visitados sejam capazes de entrar na solução mesmo em baixas temperaturas no SA.

A Tabela 7 contem os resultados obtidos ao executar o SA-6M por 120 segundos e temperatura inicial T_0 de 20.000, taxa de resfriamento α de 0,975 com 6 movimentos.

Tabela 7. Resultado SA-6M $tim_{max}=120s$ e $T_0 = 20000$

<i>Instâncias</i>	<i>FO</i>	<i>LB</i>	<i>UB</i>	<i>SA-6M Melhor</i>	<i>SA-6M Media</i>	<i>SA-6M Desvio</i>
T5a1d	8	-	-	8	8	0,00%

<i>Instâncias</i>	<i>FO</i>	<i>LB</i>	<i>UB</i>	<i>SA-6M Melhor</i>	<i>SA-6M Media</i>	<i>SA-6M Desvio</i>
T5a2d	8	-	-	8	8	0,00%
T5a3d	13	-	-	13	13	0,00%
T15a1d	31	-	-	31	31	0,00%
T15a2d	55	-	-	55	55	0,00%
T15a3d	60	-	-	60	60	0,00%
T30a1d	38	-	-	38	38	0,00%
T30a3d	-	98	119	100	100	0,00%
T30a7d	-	126	135	126	126	0,00%
T100a3d	-	177	236	188	182,7	2,92%
T100a7d	-	380	550	431	426,9	0,99%
T300a1d	-	59	81	62	61	2,15%
T300a3d	-	167	272	171	167,9	2,21%
T300a7d	-	326	632	358	352,2	1,85%

Fonte: Próprio autor.

A implementação do sexto movimento melhorou a qualidade dos resultados e diminuiu o desvio das soluções da instância e com todos os resultados apresentados dentro do intervalo LB e UB encontrado pelo modelo matemático, validando, assim, a funcionalidade da meta-heurística.

Para constatar a eficiência do SA-6M em uma situação próxima da real foram testadas a instâncias R29a1d, R29a2d, R29a3d criadas a partir dos dados de atrativos e hotéis disponibilizados pelo projeto “Rede de Difusão do Desempenho do Turismo Capixaba” simulando um turista com interesses em arquitetura religiosa, monumentos e arquitetura histórica, hospedado em um hotel no município de Guarapari com horário livre para passeio das 08 horas até às 20 horas. A Tabela 8 contém os resultados obtidos ao executar o SA-6M por 30 segundos e temperatura inicial T_0 de 20.000, taxa de resfriamento α de 0,975 para as instâncias R29a1d, R29a2d, R29a3d sendo cada uma executada 10 vezes, a coluna Execução informa de qual execução veio o resultado e para cada instância foi atribuído 3 colunas a primeira chamada de Qt. Atrativos informa o total de atrativos visitados no roteiro gerado a coluna GIT Coletado informa o quanto de GIT se obteria visitando estes atrativos e por fim a coluna Tempo Ótimo traz qual foi o tempo necessário para obter o resultado ótimo dentro dos 30 segundos de execução delimitados.

Tabela 8. Resultados obtidos pelas instâncias R29a1d, R29a2d, R29a3d

<i>Execução</i>	<i>R29a1d Qt. Atrativos</i>	<i>R29a1d GIT Coletado</i>	<i>R29a1d Tempo Ótimo</i>	<i>R29a2d Qt. Atrativos</i>	<i>R29a2d GIT Coletado</i>	<i>R29a2d Tempo Ótimo</i>	<i>R29a3d Qt. Atrativos</i>	<i>R29a3d GIT Coletado</i>	<i>R29a3d: Tempo Ótimo</i>
1 ^a	18	90	14,44	29	145	11,42	29	145	0,00
2 ^a	18	90	16,61	29	145	10,7	29	145	0,00
3 ^a	18	90	12,7	29	145	10,77	29	145	0,06
4 ^a	18	90	12,28	29	145	11,59	29	145	0,89
5 ^a	18	90	14,17	29	145	9,81	29	145	0,09
6 ^a	18	90	12,88	29	145	11,23	29	145	0,00
7 ^a	18	90	17,03	29	145	11,3	29	145	0,28
8 ^a	18	90	15,34	29	145	12,66	29	145	0,00
9 ^a	18	90	13,11	29	145	12,17	29	145	0,19
10 ^a	18	90	13,58	29	145	11,66	29	145	0,00
Media	18	90	14,21	29	145	11,33	29	145	0,15

Fonte: Próprio autor.

O valor máximo de GIT possíveis de serem coletados nessas instâncias é 145. Não houve desvio em nenhuma instância e o tempo para se obter o valor ótimo foi em média de 14,21 segundos para R29a1d, 11, 33 segundos R29a2d e 0,15 segundos para R29a3d indicando que o tempo de execução pode ser diminuído ainda mais e contando com 12 horas por dia em dois dias já é possível visitar todos os 29 atrativos e mesmo que ocorram mudanças na ordem de visita, desde que essas não violem nenhuma das restrições, para o TOPTW não faz diferença. Visitar todos atrativos só foi possível porque foram usadas distâncias euclidianas entre os atrativos e considerado transito livre, para um teste mais preciso seriam necessários mais dados. Na medida em que o número de dias aumenta o tempo de execução diminui, pois é mais fácil achar uma solução que não viole as restrições e use todos os atrativos.

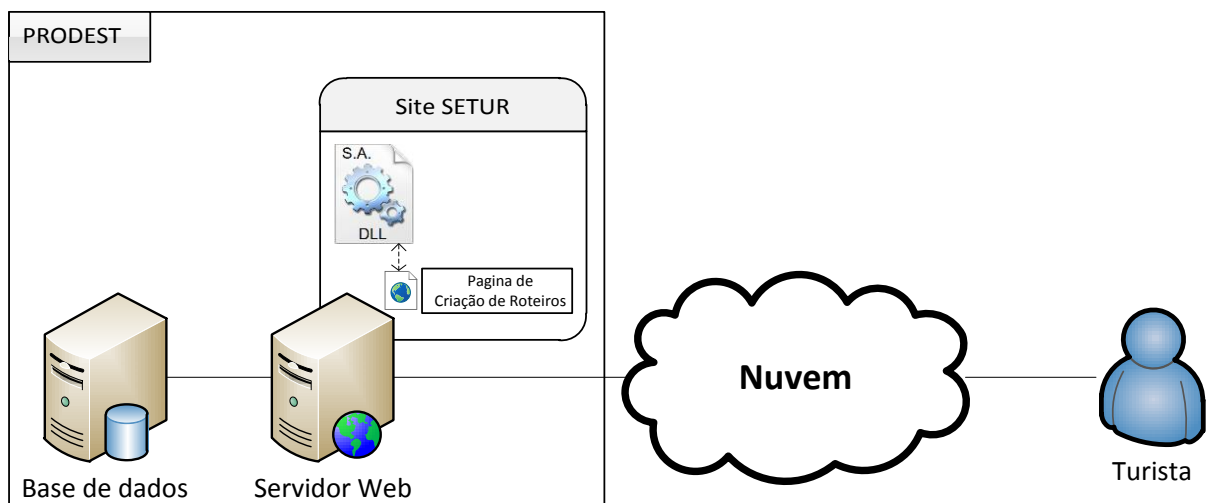
Assim sendo, após todos os testes apresentados anteriormente, pode-se então afirmar que o SA proposto pode ser usado como ferramenta de apoio ao turismo, propondo rotas que maximizam o GIT dos atrativos visitados em um tempo razoavelmente rápido. Por fim, esta ferramenta pode ser disponibilizada para os órgãos de fomento ao turismo para que seja disponibilizado ao publico geral esperando com isso atrair mais turistas.

5. PLANO DE IMPLANTAÇÃO

O Plano de Implantação tem como objetivo explicar como será feito a implantação da meta-heurística proposta nesta dissertação no contexto da SETUR.

A meta-heurística SA proposta será publicada na forma de uma DLL em C e será entregue para uma das equipes do projeto "Rede de Difusão do Desempenho do Turismo Capixaba" e será utilizada para geração de roteiros customizados para turistas como parte de um aplicativo Web que está sendo desenvolvido na linguagem de programação PHP e comporá o sítio da SETUR que encontra se publicado na estrutura da PRODEST empresa responsável pelos serviços de sistema de informação para o estado do Espírito Santo. Sendo uma aplicação cliente-servidor via internet basta o turista possuir um dispositivo com um navegador Web e acesso a internet para poder utilizar a aplicação. A Figura 10 traz o diagrama sintético da aplicação.

Figura 11: Diagrama da Aplicação



Fonte: Próprio autor.

Uma vez finalizado seu desenvolvimento, o aplicativo criado pela equipe do projeto será agregado ao sítio web da SETUR e pode ser vistos na Figura 10 como a pagina Criação de Roteiros Turísticos será disponibilizada para os turistas,

Toda vez que um turista acessar a pagina, ele deverá informar:

- Ponto de partida (hotel, aeroporto, rodoviária, etc.);
- Período do roteiro (data de inicio e data de fim);

- Horário do dia disponível para o passeio (hora de começo e hora de termino);
- Tipos de atrativos que deseja visitar.

Com base nos dados informados pelo turista o aplicativo em PHP, após verificar que as informações informadas são validas, fará uma consulta na base de dados obtendo um listagem com dados atualizado de todos os atrativos que possuírem GIT superior a 0, e havendo atrativos na lista, o aplicativo em PHP fará uma chamada às DLL com a meta-heurística passando como parâmetro além das informações informadas pelo turista, uma lista com os atrativos filtrados com GIT maior que 0.

Após o processamento, a função retorna uma lista contendo a ordem de visita dos atrativos para cada dia do roteiro com a qual a aplicação em PHP formatará e exibira o resultado de maneira simplificada para o turista que poderá controlar seu roteiro pelo sítio ou salva-lo em seu dispositivo móvel.

6. CONCLUSÃO

Esta dissertação propôs um modelo matemático com base no *Team Orienteering Problem with Time Windows* (TOPTW) e uma meta-heurística *Simulated Annealing* (SA) para o problema *Tourist Trip Design Problem* (TTDP) que foram aplicados a instâncias criadas com base em dados reais disponibilizados pela Secretaria de Turismo - SETUR – ES.

O modelo matemático e a meta-heurística propostos geram roteiros para os turistas que maximizam as somatórias dos Graus de Interesse (GIT) de cada atrativo visitado no período que o turista ficar na localidade, respeitando o horário que cada atrativo está disponível para ser aberto para visita e também o horário que o turista deseja sair do hotel e retornar ao hotel.

O modelo matemático obteve resultados para pequenas instâncias em um tempo computacional que pode dificultar o seu uso no dia a dia do turista e também ficar limitado a regiões com poucos atrativos.

Por esse motivo, optou-se por desenvolver a meta-heurística SA. A meta-heurística SA é capaz de resolver instâncias com até 300 atrativos e 7 dias de visita, o que representa uma região turística de grande vulto, em um tempo relativamente baixo, em média 15,0 segundos, mostrando, assim, ser uma ferramenta capaz de ser utilizada por um turista no planejamento de sua viagem, permitindo, também, por meio da mudança do grau de interesse do turista a geração de diversos cenários de visita.

Tendo em vista o potencial de ganho que o turismo pode trazer para o Estado do Espírito Santo, pode-se dizer que uma ferramenta computacional como a proposta nesta dissertação pode vir a ser um diferencial para atrair novos turistas e apoiar o desenvolvimento do setor que é o objetivo primeiro da SETUR-ES.

7.1 TRABALHOS FUTUROS

Ao decorrer dos estudos foram levantadas diversas especificidades do roteamento aplicado ao turismo que foram abordadas e sendo assim, este trabalho pode ser continuado de diversas formas, uma delas seria a criação de modelos que integrem a escolha do hotel à criação das rotas com o objeto de se conseguir visitar o maior número de atrativos pelo turista.

Também é possível a criação de rotas multimodais onde o turista poderia alternar entre uma série de meios de transporte ao longo das rotas, que poderiam ser realizada de modo

fossem o mais sustentáveis, mantendo o foco em *City Logistics* e na preservação algumas formas dar continuidade a essa dissertação seriam:

- a) Criação de rotas baseadas no *Two Echelon*–TOPTW, onde após ser realizado um agrupamento de diversos POIs de acordo com suas características, facilidade de acesso e principalmente distância entre os atrativos de forma que permitam ao turista percorre-los a pé ou de bicicleta, seria possível de um criar uma rota de dois níveis onde no primeiro nível a rota seria feita em um veículo automotor a escolha e no segundo nível a rota seria realizada preferivelmente a pé ou de bicicleta mantendo os atrativos turísticos preservados de poluição, danos estruturais devido às vibrações dos veículos e congestionamentos no entorno dos atrativos
- b) *Time-Dependent* TOPTW onde o tempo de viagem entre um POI *a* para um POI *b* varia de acordo com o horário que o turista sai do POI *a* permitindo criar rotas que na qual o turista faça parte do percurso utilizando transporte publico e em outros momentos a pé ou de taxi.

7. REFERÊNCIAS

- ABBASPOUR, Rahim; SAMADZADEGAN, Farhad. An Evolutionary Solution for Spatial Optimization of Personal Scheduling in Urban Multimodal Networks. **INFORMATION-AN INTERNATIONAL INTERDISCIPLINARY JOURNAL**, v. 13, n. 4, p. 1427-1447, 2010.
- ABBASPOUR, Rahim A.; SAMADZADEGAN, Farhad. Time-dependent personal tour planning and scheduling in metropolises. **Expert Systems with Applications**, v. 38, n. 10, p. 12439-12452, 2011.
- ARAS, Necati; AKSEN, Deniz; TUĞRUL TEKIN, Mehmet. Selective multi-depot vehicle routing problem with pricing. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 19, n. 5, p. 866-884, 2011.
- ARBELAITZ, Olatz *et al.* **Personalized tourist route generation**. Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- ARCHETTI, Claudia; HERTZ, Alain; SPERANZA, Maria Grazia. Metaheuristics for the team orienteering problem. **Journal of Heuristics**, v. 13, n. 1, p. 49-76, 2007.
- ARCHETTI, Claudia; FENG, Zuren; KE, Liangjun. Ants can solve the team orienteering problem. **Computers & Industrial Engineering**, v. 54, n. 3, p. 648-665, 2008.
- ARCHETTI, Claudia *et al.* The capacitated team orienteering and profitable tour problems. **Journal of the Operational Research Society**, v. 60, n. 6, p. 831-842, 2009.
- ARCHETTI, Claudia *et al.* The undirected capacitated arc routing problem with profits. **Computers & Operations Research**, v. 37, n. 11, p. 1860-1869, 2010.
- ARCHETTI, Claudia; BIANCHESSI, Nicola; SPERANZA, Maria Grazia. Optimal solutions for routing problems with profits. **Discrete Applied Mathematics**, v. 161, n. 4, p. 547-557, 2013.
- ARCHETTI, Claudia; BIANCHESSI, Nicola; SPERANZA, Maria Grazia. The capacitated team orienteering problem with incomplete service. **Optimization Letters**, v. 7, n. 7, p. 1405-1417, 2013.
- ARCHETTI, Claudia *et al.* The split delivery capacitated team orienteering problem. **Networks**, v. 63, n. 1, p. 16-33, 2014.
- ARCHETTI, Claudia *et al.* Incomplete service and split deliveries in a routing problem with profits. **Networks**, v. 63, n. 2, p. 135-145, 2014.
- BALAS, Egon. The prize collecting traveling salesman problem. **Networks**, v. 19, n. 6, p. 621-636, 1989.
- BANAEI-KASHANI, Farnoush; SHAHABI, Cyrus; SHIRANI-MEHR, Houtan. Users plan optimization for participatory urban texture documentation. **GeoInformatica**, v. 17, n. 1, p. 173-205, 2013.

BOUSSIER, Sylvain; FEILLET, Dominique; GENDREAU, Michel. An exact algorithm for team orienteering problems. **4or**, v. 5, n. 3, p. 211-230, 2007.

BRASIL. Ministério do Turismo. **Guia Brasileiro de Sinalização Turística**. Disponível em <http://www.turismo.gov.br/turismo/o_ministerio/publicacoes/cadernos_publicacoes/12manual_sinalizacao.html>. Acesso em: 28 mar. 2013.

CABALLERO, Rafael *et al.* Interactive design of personalised tourism routes. **Tourism Management**, v. 33, n. 4, p. 926-940, 2012.

CALVO, Roberto Wolfler; LABADI, Nacima; MELECHOVSKÝ, Jan. An effective hybrid evolutionary local search for orienteering and team orienteering problems with time windows. In: **Parallel Problem Solving from Nature, PPSN XI**. Springer Berlin Heidelberg, p. 219-228, 2010.

CALVO, Roberto Wolfler et al. The team orienteering problem with time windows: An lp-based granular variable neighborhood search. **European Journal of Operational Research**, v. 220, n. 1, p. 15-27, 2012.

CAO, Rongzeng et al. On the tour planning problem. **Annals of Operations Research**, v. 192, n. 1, p. 67-86, 2012.

CATTRYSSE, Dirk; DIVSALAR, Ali; VANSTEENWEGEN, Pieter. A variable neighborhood search method for the orienteering problem with hotel selection. **International Journal of Production Economics**, v. 145, n. 1, p. 150-160, 2013.

CHAO, I-Ming; GOLDEN, Bruce L.; WASIL, Edward A.. The team orienteering problem. **European journal of operational research**, v. 88, n. 3, p. 464-474, 1996

CHE, Oscar et al. A memetic algorithm for the multiperiod vehicle routing problem with profit. **European Journal of Operational Research**, v. 229, n. 3, p. 573-584, 2013.

CHEANG, Brenda et al. An adaptive ejection pool with toggle-rule diversification approach for the capacitated team orienteering problem. **European Journal of Operational Research**, v. 229, n. 3, p. 673-682, 2013.

CHEN, Lichun; MILLER-HOOKS, Elise. Optimal team deployment in urban search and rescue. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 46, n. 8, p. 984-999, 2012.

CHIANG, Wen-Chyuan; RUSSELL, Robert A. Simulated annealing metaheuristics for the vehicle routing problem with time windows. **Annals of Operations Research**, v. 63, n. 1, p. 3-27, 1996.

CLARKE, G.; WRIGHT, John W. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. **Operations research**, v. 12, n. 4, p. 568-581, 1964.

CORDEAU, Jean-François et al. **New heuristics for the vehicle routing problem**. Springer US, 2005.

DANG, Duc-Cuong; GUIBADJ, Rym Nesrine; MOUKRIM, Aziz. An effective PSO-inspired algorithm for the team orienteering problem. **European Journal of Operational Research**, v. 229, n. 2, p. 332-344, 2013.

DANTZIG, George B.; RAMSER, John H. The truck dispatching problem. **Management science**, v. 6, n. 1, p. 80-91, 1959.

DAVIES, Nigel et al. Using and determining location in a context-sensitive tour guide. **Computer**, v. 34, n. 8, p. 35-41, 2001.

DEJAX, Pierre; FEILLET, Dominique; GENDREAU, Michel. Traveling salesman problems with profits. **Transportation science**, v. 39, n. 2, p. 188-205, 2005

DELL'AMICO, Mauro; MAFFIOLI, Francesco; VÄRBRAND, Peter. On Prize-collecting Tours and the Asymmetric Travelling Salesman Problem. **International Transactions in Operational Research**, v. 2, n. 3, p. 297-308, 1995.

DESSOUKY, Maged M.; SHEN, Zhihong; ORDÓÑEZ, Fernando. A two-stage vehicle routing model for large-scale bioterrorism emergencies. **Networks**, v. 54, n. 4, p. 255-269, 2009.

DOBROKHODOV, Vladimir et al. Planning for opportunistic surveillance with multiple robots. In: **Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on**. IEEE, p. 5750-5757, 2013.

DOERNER, Karl F. *et al.* Adaptive large neighborhood search for service technician routing and scheduling problems. **Journal of scheduling**, v. 15, n. 5, p. 579-600, 2012.

DOERNER, Karl F. et al. Heuristics for the multi-period orienteering problem with multiple time windows. **Computers & Operations Research**, v. 37, n. 2, p. 351-367, 2010.

DORN, Jiirgen; MUSLIU, Nysret; SYLEJMANI, Kadri. A Tabu Search approach for Multi Constrained Team Orienteering Problem and its application in touristic trip planning. In: **HIS**. p. 300-305, 2012.

FENG, Zuren *et al.* Periodic re-optimization based dynamic branch and price algorithm for dynamic multi-UAV path planning. In: **Mechatronics and Automation (ICMA), 2013 IEEE International Conference on**. IEEE, p. 581-586, 2013

FENG, Zuren *et al.* Proportion-based robust optimization and team orienteering problem with interval data. **European Journal of Operational Research**, v. 226, n. 1, p. 19-31, 2013.

GAMBARDELLA, Luca Maria; MONTEMANNI, Roberto; WEYLAND, Dennis. Coupling ant colony systems with strong local searches. **European Journal of Operational Research**, v. 220, n. 3, p. 831-843, 2012.

GARCIA, Ander *et al.* Integrating public transportation in personalised electronic tourist guides. **Computers & Operations Research**, v. 40, n. 3, p. 758-774, 2013.

GELATT, Daniel C. *et al.* Optimization by simulated annealing. **science**, v. 220, n. 4598, p. 671-680, 1983.

GOLDEN, Bruce L.; LEVY, Larry; VOHRA, Rakesh. The orienteering problem. **Naval research logistics**, v. 34, n. 3, p. 307-318, 1987.

HASUIKE, Takashi et al. Tour route planning problem for sightseeing with the multiroute under several uncertain conditions. In: **Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2012 IEEE International Conference on**. IEEE, p. 715-720, 2012.

HENDERSON, Darrall; JACOBSON, Sheldon H.; JOHNSON, Alan W. The theory and practice of simulated annealing. In: **Handbook of metaheuristics**. Springer US, p. 287-319, 2003.

HU, Qian; LIM, Andrew. An iterative three-component heuristic for the team orienteering problem with time windows. **European Journal of Operational Research**, v. 232, n. 2, p. 276-286, 2014.

JOHNSON, Andrew L KIM, Byung-In; LI, Hong. An augmented large neighborhood search method for solving the team orienteering problem. **Expert Systems with Applications**, v. 40, n. 8, p. 3065-3072, 2013.

KARABULUT, Korhan; TASGETIREN, M. Fatih. A discrete artificial bee colony algorithm for the team orienteering problem with time windows. In: **Computational Intelligence In Production And Logistics Systems (CIPLS), 2013 IEEE Workshop on**. IEEE, p. 99-106, 2013.

LANGEVIN, André; LAPORTE, Gilbert; SALAZAR-AGUILAR, M. Angélica. The multi-district team orienteering problem. **Computers & Operations Research**, v. 41, p. 76-82, 2014.

LIMA, Milton Luiz Paiva de; MACHADO, Catia Maria dos Santos; RODRIGUES, Merhy Heli Paiva. Simulated annealing applied to the berth allocation problem. **Journal of Transport Literature**, v. 7, n. 3, p. 117-136, 2013.

MAURI, Geraldo Regis. Novas abordagens para representação e obtenção de limitantes e soluções para alguns problemas de otimização combinatória. Tese (Doutorado em Computação Aplicada), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. **São José dos Campos–SP**, 2008.

MAMASIS, Kostas; MINIS, Ioannis; ZEIMPEKIS, Vasileios. Real-time management of vehicle breakdowns in urban freight distribution. **Journal of Heuristics**, v. 18, n. 3, p. 375-400, 2012

MILLER-HOOKS, Elise; TANG, Hao. A tabu search heuristic for the team orienteering problem. **Computers & Operations Research**, v. 32, n. 6, p. 1379-1407, .

MILLER-HOOKS, Elise; TANG, Hao; TOMASTIK, Robert. Scheduling technicians for planned maintenance of geographically distributed equipment. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 43, n. 5, p. 591-609, 2007.

REPOUSSIS, Panagiotis P.; STAVROPOULOU, Foteini; TARANTILIS, Christos D.. The capacitated team orienteering problem: a bi-level filter-and-fan method. **European Journal of Operational Research**, v. 224, n. 1, p. 65-78, 2013.

SOUFFRIAU, Wouter *et al.* A guided local search metaheuristic for the team orienteering problem. **European journal of operational research**, v. 196, n. 1, p. 118-127, 2009

SOUFFRIAU, Wouter. **Automated Tourist Decision Support**. 2010. Tese de Doutorado. PhD thesis, Centre for Industrial Management, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium.

SOUFFRIAU, Wouter *et al.* A path relinking approach for the team orienteering problem. **Computers & Operations Research**, v. 37, n. 11, p. 1853-1859, 2010.

SOUFFRIAU, Wouter *et al.* The multiconstraint team orienteering problem with multiple time windows. **Transportation Science**, v. 47, n. 1, p. 53-63, 2013.

SOUFFRIAU, Wouter; VANSTEENWEGEN, Pieter. **Tourist trip planning functionalities: State-of-the-art and future**. Springer Berlin Heidelberg, 2010.

VANSTEENWEGEN, Pieter; VAN OUDHEUSDEN, Dirk. The mobile tourist guide: an OR opportunity. **OR Insight**, v. 20, n. 3, p. 21-27, 2007.

VANSTEENWEGEN, Pieter *et al.* Iterated local search for the team orienteering problem with time windows. **Computers & Operations Research**, v. 36, n. 12, p. 3281-3290, 2009.

TAN, Kay Chen *et al.* Heuristic methods for vehicle routing problem with time windows. **Artificial intelligence in Engineering**, v. 15, n. 3, p. 281-295, 2001.

TOTH, P.; VIGO, D. An overview of vehicle routing problem. In: **Toth, P., Vigo, D. (Eds.), The Vehicle Routing Problem**. Society for Industrial and Applied Mathematics, v. 9, p.1-51, 2002.

TSILIGIRIDES, Theodore. Heuristic methods applied to orienteering. **Journal of the Operational Research Society**, p. 797-809, 1984.