

Elaboração de itinerários turísticos

Abordagem heurística de um caso real

Susana Gueifão Colaço *

Margarida Vaz Pato †

* Escola Superior de Educação – Instituto Politécnico de Santarém
scolaco@eses.pt

† Departamento de Matemática \ ISEG – UTL
Centro de Investigação Operacional \ FC – UL
mpato@iseg.utl.pt

Abstract

The problem of Tourist Routes Design involves defining circuits for a tourist wishing to enjoy a several days visit, in a given region following his particular interests. From an Operations Research standpoint, this problem can be framed as a vehicle routing problem with time windows. Once the issue has been analysed, mathematical formulations are drawn up. The methodology proposed is based on a breakdown of the problem into three levels: the first involves determining single day routes (sub-routes), the second, built from the daily sub-routes, concerns a global route whose duration d is decided by the tourist and the third one is designed to obtain an improved global route of d days. For the first level, two constructive heuristics will be presented - a nearest neighbour heuristic and an insertion heuristic. For the second level, a constructive heuristic was created and, for the third, an improvement heuristic embedding diversification-intensification strategies. The algorithms developed were computationally implemented and tested by building tourist routes for the Santarém region.

Resumo

O problema da Elaboração de Itinerários Turísticos resulta da necessidade de apoiar a construção de um itinerário para um turista que pretende visitar, durante vários dias e de acordo com os seus interesses, uma determinada região e pode ser enquadrado, no âmbito da Investigação Operacional, como um problema de rotas de veículos com janelas temporais. Neste artigo é realizada uma análise do problema e são apresentadas formulações matemáticas. Seguidamente é proposto um método heurístico baseado na decomposição do problema em três níveis: um primeiro nível correspondente à determinação de itinerários com duração de um dia (subitinerários); um segundo nível para construção, a partir dos subitinerários, de vários itinerários diferentes com a duração de d dias; e um terceiro nível desenvolvido com o objectivo de obter um itinerário melhorado com duração de d dias. Serão apresentadas para o primeiro nível duas heurísticas construtivas, para o segundo

também uma heurística construtiva e para o terceiro uma melhorativa com estratégias de diversificação e intensificação. Os algoritmos desenvolvidos foram testados computacionalmente na elaboração de itinerários turísticos para a região de Santarém.

Keywords: Tourist Itineraries; Vehicle Routing Problem with Time Windows; Constructive Heuristics; Diversification and Intensification Strategies

Title: Tourist Routes Design. A Heuristic Approach to a Case Study

1 Introdução

A elaboração de itinerários turísticos, objecto deste artigo, surge como uma das componentes da política de turismo, nomeadamente como uma acção concreta de valorização dos recursos turísticos.

No âmbito dos modelos e técnicas de optimização, são escassas as aplicações ao sector turístico. Mediante a pesquisa que foi feita nesse sentido verificou-se que as aplicações são, na sua maioria, destinadas à avaliação e análise de recursos turísticos e não têm propriamente o objectivo de desenhar itinerários turísticos. Como exemplo temos o trabalho de Schifferl [1998] em que a autora construiu uma aplicação interactiva que, recorrendo a algoritmos genéticos, selecciona de acordo com os atributos do produto turístico (por exemplo, o preço, a dimensão e a localização) aquele que melhor se ajusta às necessidades do turista. Landany [1996] fez um trabalho na área da optimização da segmentação do mercado dos quartos de hotel utilizando uma função de procura não linear. O artigo de Hatzopoulos et al. [1993] parece estar mais próximo deste trabalho, em termos de objecto de estudo, possibilitando ao utilizador encontrar pontos turísticos nas várias áreas temáticas e possíveis itinerários turísticos recorrendo a aplicações multimédia. No entanto os potenciais itinerários turísticos assumem-se previamente definidos.

Na secção seguinte procede-se à descrição sumária do problema da Elaboração de Itinerários Turísticos (PIT) no contexto da optimização em redes e na terceira secção este é formalizado em programação binária mista. A quarta secção dedica-se em exclusivo à discussão das heurísticas adoptadas para a resolução do PIT, nomeadamente as heurísticas construtivas do Vizinho Mais Próximo e de Inserção, e a heurística de Diversificação e Intensificação. Na quinta secção apresenta-se a aplicação a um caso de estudo real, utilizando dados da região de Santarém e na sexta comentários finais.

2 Descrição do Problema

O PIT tem por solução um itinerário para um turista isolado, isto é um turista que não está integrado em nenhum grupo preferindo viajar num meio de transporte próprio, durante um número de dias por ele fixado e com objectivos/gostos particulares.

O itinerário admite-se vir a ser construído numa região previamente delimitada com duração de d dias, a iniciar-se em qualquer semana, com os objectivos de maximizar a utilidade e mi-

nimizar o custo do itinerário para o turista, tendo em conta os recursos turísticos, os locais de apoio para alimentação e dormida, bem como os respectivos horários de funcionamento nos diversos d dias dessa semana em que será realizado o passeio.

Sem perda de generalidade foi feita uma particularização do problema obrigando a que todos os itinerários tenham início à segunda-feira e uma duração, estabelecida à partida pelo turista, de $d \leq 7$ dias de uma determinada semana tipo. Na sequência outras particularizações serão introduzidas, tal como estas, para simplificar a apresentação do problema e a implementação computacional. A abordagem de um caso mais geral seguiria os mesmos passos.

O PIT pode ser estudado no âmbito dos problemas de rotas com janelas temporais, embora com algumas singularidades que o diferenciam das concepções mais frequentes na literatura. As características especiais são a não obrigatoriedade de visitar todos os nós da rede e a existência de dois objectivos, por um lado minimização do custo, por outro, maximização da utilidade.

Considere-se a rede orientada $G = (N, A)$ definida por um conjunto de nós N e um conjunto de arcos A . Segue-se a descrição dos nós e parâmetros que lhes estão associados, deixando para o final a apresentação dos arcos desta rede.

O conjunto N pode ser decomposto em quatro subconjuntos disjuntos, isto é, $N = T \cup D \cup R \cup OR$, sendo T representativo dos recursos turísticos a visitar, D dos locais de dormida, onde se assume existirem também restaurantes para jantar, R conjunto dos restaurantes onde poderá ser tomado o almoço e OR conjunto dos possíveis pontos de partida e chegada do itinerário de d dias. Cada elemento $i \in T$ é visitado no máximo uma vez, em contrapartida um j tal que $j \in R$ ou $j \in D$ pode ser visitado mais do que uma vez, mas qualquer um destes nós poderá nunca ser visitado. O conjunto OR representa os pontos de partida/chegada designados por nós origem/destino do itinerário, não sendo estes recursos visitados. Como tal, num determinado itinerário existe apenas um elemento $o \in OR$, o qual é escolhido pelo turista.

Procedeu-se à caracterização dos nós de forma a poder identificar os dias da semana em que cada um funciona e os respectivos horários de abertura, dado que o mesmo nó pode ter horários diferentes conforme o dia da semana. Tendo em conta o caso em estudo de um turista que começa a sua visita à segunda-feira, os nós de OR só “funcionam” à segunda-feira e no dia $d+1$, pois qualquer itinerário só pode ter início à segunda e término no dia $d+1$. Definem-se as redes $G^s = (N^s, A^s)$, subredes de G , correspondentes aos nós disponíveis em cada dia s , $\forall s \in S = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$. Relativamente a cada uma das subredes G^s (com $s \neq 1$ – segunda-feira) o conjunto de nós N^s ($\forall s \in S$) é constituído por todos os nós que funcionam no dia s da semana de planeamento, incluindo os locais de dormida, os restaurantes e os recursos turísticos. N^1 define-se da mesma forma com excepção de que neste caso $OR \subset N^1$. Os conjuntos N^s ($\forall s \in S$) não são disjuntos, porque o mesmo nó pode pertencer a vários conjuntos desde que funcione durante vários dias da semana. Em particular D está contido em qualquer N^s pois, por hipótese, todos os locais de dormida estão disponíveis durante toda a semana.

A cada nó $i \in N^s$ ($\forall s \in S$) está associado um período de funcionamento correspondente ao período em que é permitido o início da visita ao nó que neste contexto se define à custa de janelas temporais. Assim, para cada $i \in (OR \cup R \cup D) \cap N^s$, nós origem/destino e nós de apoio, existe apenas uma janela temporal relativa ao dia s . No caso dos nós de apoio a janela é igual para todos os dias da semana e quando $i \in OR \cap N^1$ a janela temporal marca a hora de começo do passeio. No caso dos restantes nós, ou seja, $i \in T \cap N^s$ existem uma ou várias

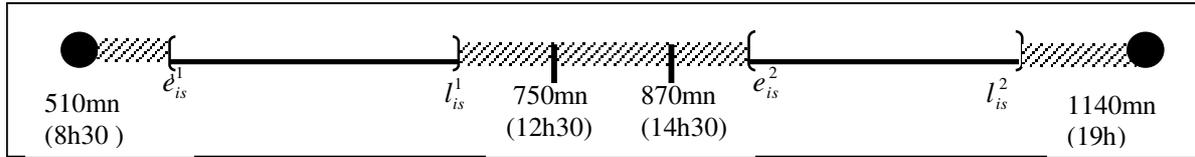


Figura 1: Exemplo de duas janelas temporais definidas para um nó i no dia s .

janelas temporais, correspondentes ao horário de abertura ao público do recurso turístico no dia s da semana. Seja J_{is} o número de janelas temporais do nó i para o dia s . A m -ésima janela temporal ($m = 1, 2, \dots, J_{is}$) é definida por um intervalo real $[e_{is}^m, l_{is}^m]$, representando e_{is}^m e l_{is}^m , respectivamente, os limites temporais inferior e superior entre os quais é possível iniciar a visita a i no dia s , onde $e_{is}^m < l_{is}^m$ e a unidade do tempo é o minuto do respectivo dia. Assim, se a visita a i no dia s se der na m -ésima janela, nunca poderá ser iniciada antes de e_{is}^m nem depois de l_{is}^m . Assume-se ainda, sem perda de generalidade, que as janelas temporais associadas a cada um dos nós i são disjuntas e estão ordenadas, isto é, $l_{is}^{m-1} < e_{is}^m$, $m = 2, \dots, J_{is}$. No PIT considerou-se que o número máximo de janelas temporais para qualquer nó turístico da rede é 2, logo $J_{is}=2, \forall i \in T \cap N^s$ (ver figura 1).

Note-se que as janelas temporais aqui usadas permitem a existência de tempo de espera para as visitas, isto significa que se o tempo de chegada a i for inferior a e_{is}^m então é permitido esperar para visitar esse nó, mas caso a chegada seja depois de l_{is}^m , então já não é permitida a visita na m -ésima janela do dia s , designando-se este tipo de janela por *hard time window* (Ball et al. [1995]). Pelo contrário, as *soft time windows* que não são contempladas no PIT são um pouco mais flexíveis, pois permitem uma visita mesmo que o tempo de chegada ultrapasse o limite superior, com um determinado custo pela violação da janela. Não é estabelecido um tempo máximo de espera para iniciar a visita a um determinado local, no entanto esse tempo nunca poderá ultrapassar meio-dia devido à obrigatoriedade de almoçar e de pernoitar.

Consideram-se ainda os seguintes parâmetros reais associados aos nós: dv_i corresponde à duração estimada da visita a i , estando definido para $i \in N \setminus OR$, u_i quantifica a utilidade ou o proveito que o turista atribui ao recurso i ($\forall i \in T$). Este último parâmetro é nulo para os elementos de R , D e OR , pois são nós de visita única ou obrigatória (diária) e se assumem da mesma categoria.

Os arcos de A representam os caminhos ou vias rodoviárias que ligam os diversos pares de locais turísticos ou de apoio, bem como as possíveis sequências de visitas. Um arco (i, j) pertence a A se o tempo que o turista demora a percorrer as vias que ligam o local i ao j , for inferior a um limite máximo aqui definido como sendo 1h30 e se i e j não representam pontos turísticos com características muito semelhantes, por exemplo duas igrejas. Nesta regra de construção dos arcos está também incluída a impossibilidade de ligação directa entre restaurantes, entre dormidas e entre nós de OR . Sabendo que cada uma das subredes G^s atrás mencionadas se destina a um dado dia s da semana, define-se A^s como o conjunto dos arcos permitidos para o dia da semana s , assim $A^s \subseteq (N^s \times (N^s \cup OR)) \cap A$.

Associada ao conjunto de arcos A encontra-se uma matriz de custos cujos elementos reais se representam por c_{ij} , custo em u.m. de viajar do nó i para o nó j , $\forall (i, j) \in A$. Por hipótese assume-se que este custo é directamente proporcional à distância, com excepção do caso em que $i \in D$ e $j \in OR$, sendo nesse caso $c_{ij}=0$. Para cada $(i, j) \in A$ existe também o parâmetro tempo, t_{ij} , que se define como sendo a duração em minutos da viagem de i para j .

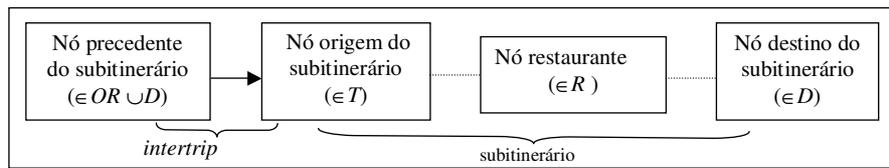


Figura 2: Esquema de uma *intertrip* e de um subitinerário.

Neste contexto, considere-se subitinerário uma sequência de nós turísticos e nós de apoio, tendo a duração de um dia e respeitando todas as janelas temporais. Este percurso deverá ter partida num nó origem do subitinerário – ponto turístico arbitrário correspondendo ao primeiro nó a ser visitado no dia – com almoço num nó de R e fim num nó destino do subitinerário pertencente a D – local de jantar e dormida. O custo do subitinerário corresponde à soma dos custos de viagem entre os nós que o constituem e a utilidade do subitinerário define-se como a soma das utilidades dos recursos turísticos deste. A viagem realizada entre o nó precedente do subitinerário – no caso de segunda-feira o nó de OR previamente fixado pela escolha do turista, seja o' , nó origem/destino do itinerário, ou nos outros dias um nó de D – e o acabado de definir nó origem do subitinerário designa-se por *intertrip* (ver figura 2).

Após a caracterização de subitinerário podemos apresentar um itinerário de d dias como um circuito não elementar na rede $G = (N, A)$, ou seja, uma sequência de subitinerários, um para cada um dos dias do período da visita e respectivas *intertrips* em que a primeira *intertrip* começa no nó origem/destino do itinerário, regressando no final depois da dormida do dia d , isto é, depois de terminar o d -ésimo subitinerário, ao mesmo nó o' com um custo nulo.

Associados a um itinerário determinam-se, com base nos seus d subitinerários e respectivas *intertrips*, dois valores: o custo do itinerário e a utilidade do itinerário. O custo do itinerário é aqui definido como a soma dos custos de deslocação do turista entre os pontos que o constituem, não sendo abrangidos nesta definição os custos inerentes à visita aos recursos turísticos nem as despesas com refeições e dormidas. A utilidade do itinerário é calculada pela soma das utilidades referentes aos recursos turísticos visitados no itinerário, sendo estas calculadas com base no tipo de turista e na avaliação do recurso efectuada pelos técnicos.

Finalmente, com os dados e nas condições expostas onde se inclui o nó origem/destino do itinerário o' (opção feita pelo turista de entre os que lhe são postos à disposição em OR) o PIT define-se como o problema cuja solução é um itinerário de d dias que comece e acabe em o' maximizando a utilidade e minimizando o custo.

Refira-se que usando este modelo está garantido um itinerário que visita em cada um dos d dias, pelo menos um ponto turístico de manhã, um restaurante e uma dormida nas condições estipuladas.

3 Formalização em Programação Binária Mista

O problema PIT, apresentado no contexto de uma rede na secção anterior, pode ser formulado em programação binária mista (Colaço [1999]).

São dois, os tipos de variáveis exigidas. Por um lado têm-se as variáveis:

$$X_{ij}^s = \begin{cases} 1 & \text{se o arco } (i, j) \text{ é utilizado no dia } s \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad \forall s \in \{1, 2, \dots, d\}, (i, j) \in A^s$$

e as variáveis também binárias $X_{io'}^{d+1}$ ($i \in D$) que definem o regresso ao ponto o' de origem/destino do itinerário depois da dormida no d -ésimo dia. Por outro lado, têm-se variáveis temporais, sendo cada uma T_i^s representante do instante em minutos em que é iniciada a visita a i no dia s da semana, $\forall s \in \{1, \dots, d\}$, $i \in N^s$. Só tem interesse a interpretação do valor que estas variáveis tomam em determinada solução do PIT quando o nó i é visitado no dia s .

Apresenta-se de seguida o conjunto de restrições do problema de programação binária mista, assim como a sua função objectivo. Note-se que os somatórios a usar na formalização só dizem respeito aos índices para os quais as variáveis estão definidas.

As restrições (3.1) asseguram que todos os pontos turísticos de T são incluídos no máximo uma vez num itinerário.

$$\sum_{s=1}^d \sum_{j \in TURUD} X_{ij}^s \leq 1 \quad \forall i \in T \quad (3.1)$$

A restrição (3.2) relaciona o número de dias do itinerário a construir, d , com o número de locais de dormida usados, independentemente de existirem repetições ou não.

$$\sum_{s=1}^d \sum_{i \in TUR} \sum_{j \in D} X_{ij}^s = d \quad (3.2)$$

As equações (3.3) traduzem também, agora para os restaurantes, a obrigatoriedade de usar d restaurantes no itinerário. Observe-se que, para os restaurantes, uma só equação idêntica à (3.2) não basta pois seria possível compensar a existência de um dia sem almoço com a visita a dois restaurantes num outro dia sem se ir directamente de um para outro, isto é, passando por um recurso turístico.

$$\sum_{i \in T} \sum_{j \in R} X_{ij}^s = 1 \quad \forall s \in \{1, \dots, d\} \quad (3.3)$$

A equação (3.4) diz respeito à origem do itinerário na segunda-feira. Como já foi referido atrás, existem vários locais em OR a partir dos quais se podia iniciar o itinerário, no entanto, apenas um, o' , foi escolhido pelo turista. Assume-se que o itinerário termina em o' no dia $d+1$ (3.5).

$$\sum_{j \in T} X_{o'j}^1 = 1 \quad (3.4)$$

$$\sum_{i \in D} X_{io'}^{d+1} = 1 \quad (3.5)$$

O grupo de restrições seguinte impõe a continuidade do itinerário.

$$\sum_{i \in N} X_{ij}^s - \sum_{k \in N} X_{jk}^s = 0 \quad \forall s \in \{1, \dots, d\}, \forall j \in T \cup R \quad (3.6)$$

$$\sum_{i \in N} X_{ij}^s - \sum_{k \in N} X_{jk}^{s+1} = 0 \quad \forall s \in \{1, \dots, d\}, \forall j \in D \quad (3.7)$$

Finalmente, as restrições (3.8), (3.9) e (3.10) estão directamente relacionadas com as janelas temporais deste problema traduzindo a admissibilidade de escalonamento temporal. Em particular, as inequações (3.9) garantem que o tempo de início de visita a j pela via (i, j) nunca poderá ser inferior à soma do tempo de início de visita a i com a duração da visita a esse nó mais o tempo que demora a chegar a j vindo de i . As inequações (3.10) têm interpretação similar às (3.9) mas agora para os arcos que traduzem a viagem de uma dormida para o nó origem do dia seguinte.

$$e_{is}^1 \leq T_i^s \leq l_{is}^1 \quad \vee \quad e_{is}^2 \leq T_i^s \leq l_{is}^2 \quad \forall s \in \{1, \dots, d\}, i \in N^s \quad (3.8)$$

$$X_{ij}^s (T_i^s + dv_i + t_{ij}^s - T_j^s) \leq 0 \quad \left((\forall s \in \{2, \dots, d\}, i \in T \cup R) \vee (s = 1 \wedge i \in N^1 \setminus D) \right), (i, j) \in A^s \quad (3.9)$$

$$X_{ij}^s (T_i^{s-1} + 720 - 1440 + t_{ij}^s - T_j^s) \leq 0 \quad \forall s \in \{2, \dots, d\}, i \in D, (i, j) \in A^s \quad (3.10)$$

Para simplificar (3.8) considera-se que $e_{is}^2 = e_{is}^1$ e $l_{is}^2 = l_{is}^1$ no caso em que um nó tem uma única janela temporal no dia s . Note-se, ainda, que o valor 1440 minutos (24 horas) apresentado nas últimas inequações traduz a inicialização das variáveis temporais no caso dos arcos representarem a viagem da dormida do dia anterior para o nó origem do dia seguinte.

As últimas restrições caracterizam as variáveis de itinerário e as temporais.

$$X_{ij}^s \in \{0, 1\} \quad \forall s \in \{1, \dots, d\}, (i, j) \in A^s \quad (3.11)$$

$$X_{io'}^{d+1} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in D \quad (3.12)$$

$$T_i^s \geq 0 \quad \forall s \in \{1, \dots, d\}, i \in N^s \quad (3.13)$$

Como se pretende com o PIT encontrar uma solução que concilie a minimização do custo com a maximização da utilidade, optou-se por uma função objectivo escalar linear, onde estes dois aspectos possam influenciar em simultâneo:

$$\text{Min} \quad \sum_{s=1}^d \left(\alpha \sum_{(i,j) \in A^s} c_{ij} X_{ij}^s - \beta \sum_{(i,j) \in A^s} u_j X_{ij}^s \right) \quad (3.14)$$

sendo α e β ponderadores das duas componentes de modo a reduzir a diferença de escalas entre custo e utilidade.

Relativamente à dimensão do problema (3.1) – (3.14) o número de restrições é da ordem de $o(d(\#N + \#A))$ e o número de variáveis é dado por $\#D + \sum_{s=1}^d (\#A^s + \#N^s)$. Se a zona em estudo for relativamente vasta este problema apresentará uma dimensão muito elevada. Como se verá, a formalização em programação binária mista está na base da construção das heurísticas.

4 Heurísticas para o PIT

O PIT foi apresentado na secção anterior em programação binária mista não linear, podendo ser linearizado (Colaço [1999]). Contudo a dimensão do problema linearizado resultante tornaria pouco eficiente a sua resolução exacta. Considera-se pois neste artigo uma abordagem heurística que funciona em três níveis.

O primeiro nível consiste em obter através de heurísticas construtivas, uma grande diversidade de subitinerários para cada um dos dias do período de visita, de tal modo que a reunião dos subitinerários para um determinado dia abranja, de preferência na sua totalidade, os pontos turísticos em funcionamento nesse dia. Todos os subitinerários têm um nó origem e um nó destino de subitinerário, no entanto ao construir-se um subitinerário para uma segunda-feira escolhe-se logo a *intertrip* realizada do nó origem/destino do itinerário (nó o' de OR , pré-determinado pelo turista) para o nó origem do subitinerário pertencente a T , enquanto que num subitinerário para um outro dia da semana a *intertrip* não é incluída. Na determinação de subitinerários para os vários dias da visita utilizam-se duas heurísticas construtivas sequenciais: a heurística do Vizinho Mais Próximo e a heurística de Inserção.

No segundo nível, obtêm-se vários itinerários de d dias com base nos subitinerários da fase anterior. A construção dos itinerários é feita por sucessivas aplicações de uma heurística aleatorizada de modo a garantir alguma diversidade. Note-se que na elaboração de cada itinerário são inseridas as *intertrips* definidas a partir do nó destino do dia anterior para um nó origem do dia seguinte.

Seguidamente, no terceiro nível, utiliza-se a heurística de Diversificação e Intensificação com a qual se pretende obter, a partir dos itinerários gerados para o PIT, um itinerário melhorado.

4.1 Determinação de Subitinerários

Pretende-se determinar subitinerários turísticos para todos os dias da semana, cada um deles com um custo baixo e permitindo ao utilizador visitas a muitos pontos turísticos, proporcionando assim uma utilidade elevada, e respeitando as restrições temporais. Não se entra directamente em linha de conta com a maximização da utilidade na construção de subitinerários mas, ao proporcionar visitas a um grande número de recursos turísticos, determinam-se subitinerários que seguramente terão um valor elevado de utilidade.

As heurísticas construtivas de subitinerários desenvolvidas no âmbito deste trabalho (fluxograma da figura 3) exigem a criação para cada nó de múltiplas cópias, dependendo do número de dias de abertura ao público desse nó de tal modo que cada cópia funcione apenas num determinado dia da semana. Esta replicação dos nós tem sido utilizada para a resolução de

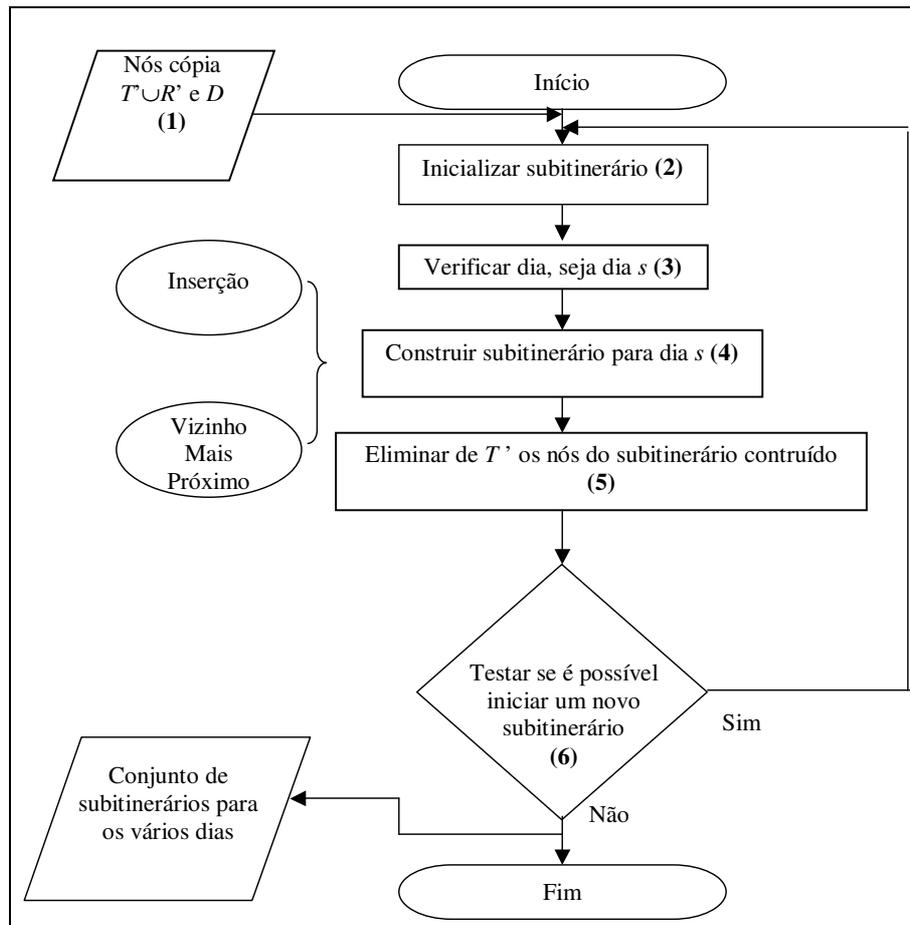


Figura 3: Fluxograma das heurísticas construtivas de subitinerários.

problemas de rotas envolvendo clientes a visitar nos vários dias da semana (Russel e Igo [1979]). No caso em estudo, o conjunto T é ampliado dando lugar ao conjunto T' , representante das cópias para cada dia da semana dos recursos turísticos, o mesmo acontecendo com o conjunto R que origina R' . Relativamente aos nós de D não é feita qualquer cópia pois se assume que as dormidas estão em funcionamento todos os dias da semana e com o mesmo horário.

Heurística do Vizinho Mais Próximo

A heurística do Vizinho Mais Próximo resulta de uma adaptação de uma heurística sequencial orientada para restrições temporais, explorada por Solomon [1987]. Começa-se por seleccionar o nó origem $i(k)$ para um subitinerário k e verificar o dia s de abertura ao público desse nó (caixas (2) e (3) na figura 3). Esse nó é escolhido aleatoriamente entre os pontos turísticos pertencentes a T' , ainda não visitados em outros subitinerários construídos no processo e que sejam admissíveis para origem. Tendo em conta que os nós com maior número de cópias são os mais fáceis de escalonar, a escolha aleatória atribui a cada $i(k)$ o peso probabilístico, $p_{i(k)} = \frac{1}{\#T'} \times \frac{1}{\text{n.º de cópias do original de } i(k)}$.

Quanto às condições de admissibilidade para origem, elas estão relacionadas com as janelas temporais, pois a visita à origem terá que começar entre as 8h30 e as 10h da manhã. No entanto, para um nó (cópia) que funciona a uma segunda-feira, terá que se verificar uma

restrição adicional, relativa à *intertrip*, pois este nó não poderá estar muito distante de o' .

A construção de um subitinerário inicia-se apenas com um nó de T' , tal como foi descrito nos parágrafos anteriores. Depois de iniciar o k -ésimo subitinerário que se verificou corresponder ao dia s , esta heurística vai, em cada iteração, pesquisar qual o nó adjacente admissível, de entre os passíveis de serem visitados no dia s (nós cópia do dia s ou nós de D), mais próximo relativamente ao último introduzido no subitinerário e que não pertença ainda a nenhum subitinerário, dos construídos para o dia s . A proximidade entre i e j , sugerida por Solomon [1987] para definir o vizinho mais próximo de um dado nó i , tem em conta a distância entre i e j , a urgência de j e o tempo de espera em j . Depois de escolhido o nó mais próximo, este é inserido na última posição do subitinerário corrente. O algoritmo termina um subitinerário logo após ter sido inserido o nó destino do subitinerário, ou seja, a dormida. Um novo subitinerário ($k = k+1$) é iniciado, a não ser que não haja mais nós em T' para visitar, ou que não haja nós em T' admissíveis para iniciar um novo subitinerário (caixa (6) da figura 3).

Heurística de Inserção

A heurística de Inserção, também ela inspirada nos trabalhos de Solomon [1987] para problemas de rotas com janelas temporais, tem por objectivo maximizar o benefício de inserir um nó, ainda não visitado, num subitinerário em construção, em vez de ter um subitinerário de ligação directa desse nó à origem, ideia muito semelhante à subjacente à heurística de Clarke e Wright [1964].

Tal como no caso anterior, os subitinerários serão construídos sequencialmente, embora com a possibilidade de inserção do nó escolhido em qualquer posição do subitinerário e não exclusivamente no fim. Sendo assim, depois de inicializado o subitinerário k com um nó origem de um dia s e também com um restaurante e com uma dormida, este método vai calcular, em cada iteração, para cada um dos nós cópia do dia s e ainda não visitados, seja o nó i , dois valores numéricos, $c_1(i)$ e $c_2(i)$. O inteiro $c_1(i)$ representa o melhor local de inserção de i no subitinerário k em elaboração. Entre todas as posições de inserção admissíveis (do ponto de vista das ligações e do tempo), o melhor local é seleccionado como sendo aquele a que corresponde o menor valor do custo e do tempo adicionais. O real $c_2(i)$ obtém-se calculando a diferença entre o custo de ter dois subitinerários, o corrente e outro com o nó i , os nós de apoio e o nó origem e o custo de inserir o nó i no subitinerário corrente na sua posição mais favorável (já determinada como sendo $c_1(i)$). Estes custos estão associados a uma componente geográfica e a uma componente temporal sendo, portanto, calculados em termos do custo adicional e do tempo adicional se concretizada a inserção. Em resumo, o nó escolhido para continuar o k -ésimo subitinerário, $i(k)$, corresponde ao $\max\{c_2(i)\}$ de entre todos os nós i avaliados.

Este processo é repetido enquanto se consegue encontrar uma posição admissível no subitinerário k para algum dos pontos turísticos ainda não inseridos (caixa (4) da figura 3). Caso contrário, volta-se a iniciar um novo subitinerário se possível (caixa (6) da figura 3).

4.2 Determinação e Melhoramento de Itinerários

Heurística Desenha Itinerário

A heurística construtiva de um itinerário turístico – Desenha Itinerário – tem por objectivo

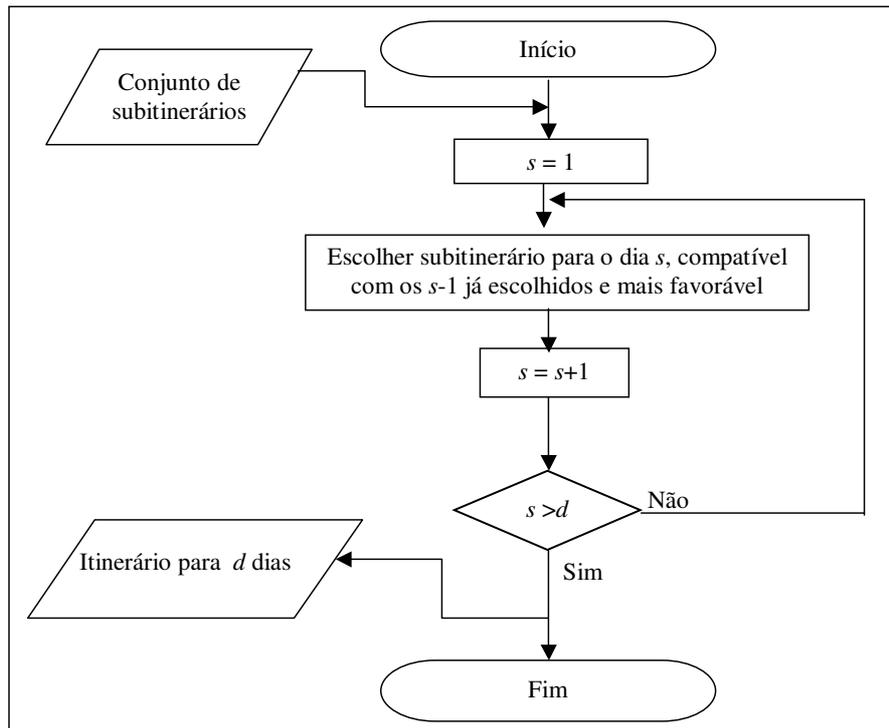


Figura 4: Fluxograma da heurística Desenha Itinerário.

determinar, a partir de diversos subitinerários, um itinerário com uma duração de d dias que deverá ser admissível, verificando todas as restrições do problema, bem como ter baixo custo e utilidade elevada (ver figura 4). Esta heurística foi inspirada nas desenvolvidas para os problemas de escalonamento de veículos e apresentadas em Bodin et al. [1983], não sendo no entanto tão complexa como estas.

Começa por seleccionar um subitinerário com a respectiva *intertrip* para o primeiro dia da visita que se supõe ser uma segunda-feira de uma dada semana. A escolha pode ser feita aleatoriamente ou em função do custo e utilidade. Depois, escolhe-se sequencialmente os subitinerários admissíveis (ou seja, constituídos por recursos turísticos ainda não visitados e apropriados a cada dia) de uma forma *greedy* relativamente ao valor da função objectivo (3.14), bem como as respectivas *intertrips* até serem atingidos os d dias necessários para o itinerário ou não existir mais nenhum subitinerário que satisfaça as condições acima referidas. Nesta última situação o algoritmo termina sem ter conseguido construir um itinerário para o turista em causa.

Heurística de Diversificação e Intensificação

A última heurística a descrever é do tipo melhorativo. Trata-se da heurística de Diversificação e Intensificação, devida a Rochat e Taillard [1995] que permite, por um lado, uma diversificação para exploração de soluções diferentes das anteriormente obtidas, por outro, uma intensificação da pesquisa em zonas mais favoráveis. Esta meta-heurística tem dado bons resultados em alguns problemas de rotas para veículos (Glover e Laguna [1997]) embora noutros casos não se tenha verificado grandes vantagens na sua aplicação (Martins e Pato [1998]).

A fase de diversificação na corrente aplicação ao PIT exige uma geração prévia de itinerários,

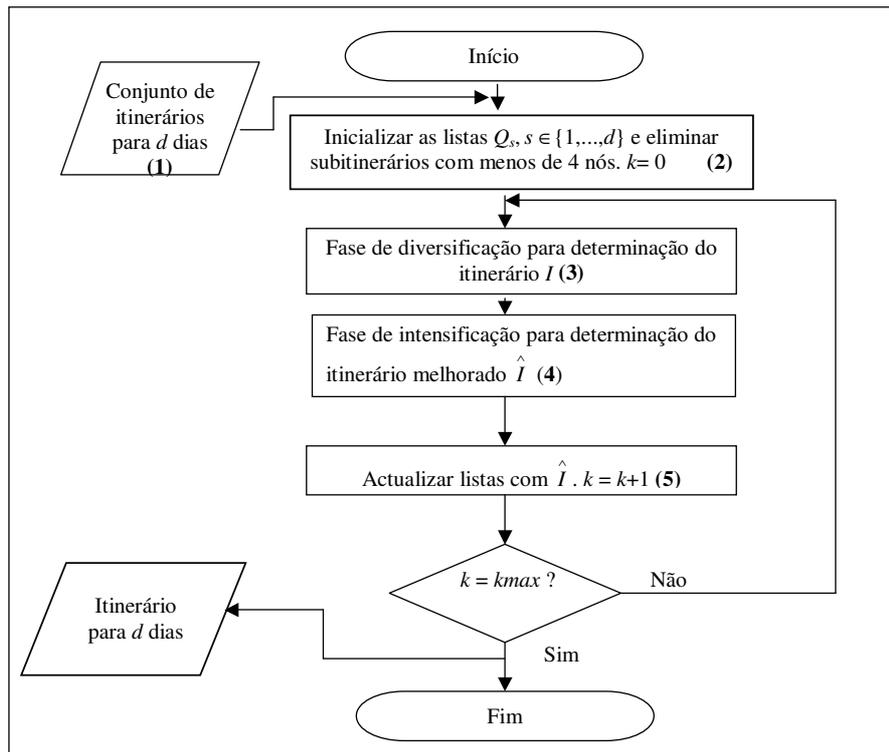


Figura 5: Fluxograma da heurística de Diversificação e Intensificação.

o mais variados possível que possuam a informação necessária para criar posteriormente itinerários diversificados. Os primeiros, os utilizados como *input*, são obtidos a partir da heurística *Desenha Itinerário* aplicada várias vezes. A inclusão de factores aleatórios na heurística construtiva torna-se pois bastante relevante de modo a garantir a variabilidade necessária para o bom funcionamento global desta meta-heurística.

De seguida os itinerários *input* são desdobrados nos subitinerários que os constituem e estes colocados em d listas Q_1, Q_2, \dots, Q_d consoante o dia para o qual foram planeados (ver caixa (2) na figura 5). A colocação nas listas é feita por ordem crescente do valor da função objectivo correspondente ao itinerário onde estavam inseridos. Para todo o $s=1, \dots, d$ é depois realizada uma extracção probabilística em Q_s dando maior peso aos primeiros subitinerários da lista Q_s , isto é aos que têm menor valor da função objectivo (3.14) – terminando assim a fase de diversificação. É de salientar que os subitinerários com menos de 4 nós são abandonados pois se optou por não aceitar itinerários com muitos tempos livres devido à sua baixa utilidade para o turista.

Este itinerário I , acabado de construir, é sujeito a uma pesquisa local melhorativa – fase de intensificação – para determinação de \hat{I} . Relativamente à estratégia utilizada, optou-se por uma simples reavaliação do nó restaurante em cada um dos subitinerários, verificando-se a existência ou não de uma troca admissível e mais proveitosa com outro restaurante. Tal procedimento corresponde de facto a uma pesquisa de tipo melhorativo de entre todos os itinerários da vizinhança do itinerário corrente, caracterizada esta vizinhança apenas pelas soluções que diferem nos restaurantes onde o turista almoça. Embora a cardinalidade da vizinhança seja baixa e por isso não se esperem melhorias significativas, o tempo computacional

exigido é muito pouco.

Os subitinerários de \hat{I} , se distintos dos anteriores, são inseridos nas listas acima mencionadas respeitando as regras já referidas (caixa (5) da figura 5). Como estas listas têm um tamanho fixo, ao fim de algumas iterações ter-se-á que retirar os últimos elementos, os correspondentes aos subitinerários menos interessantes do ponto de vista do objectivo estabelecido. Este processo repete-se durante um número fixo de iterações, $kmax$, retendo-se no final o melhor itinerário encontrado.

5 Aplicação ao Caso em Estudo

Os testes computacionais relativos às heurísticas foram efectuados com dados sobre a região de Santarém, envolvendo 21 municípios e cerca de 51 recursos turísticos, 13 locais de dormida e 16 restaurantes. Considerou-se um turista com preferências de carácter geral e que permanece em visita na região durante 3 dias. Dado que todos os itinerários têm início a uma segunda-feira, o que se pretendeu com este teste computacional foi obter um itinerário para um período de segunda-feira a quarta-feira. Os dados bem como todos os resultados desta experiência podem ser consultados em Colaço [1999]. Para α e β tomou-se o valor 1 e 35, respectivamente.

Foram testados três processos para gerar um conjunto de subitinerários, sendo o primeiro a aplicação por três vezes da heurística do Vizinho Mais Próximo; o segundo a aplicação por três vezes da heurística de Inserção e o terceiro processo, misto, com utilização combinada das duas heurísticas (duas vezes a do Vizinho Mais Próximo e outras duas a de Inserção). O processo que pareceu ser o mais equilibrado em termos de soluções foi o primeiro. Nos outros, embora se tenham obtido subitinerários bastante bons, também foram gerados alguns de fraca qualidade.

Seguidamente actuou sobre cada um destes conjuntos de subitinerários três vezes, de forma independente, a heurística Desenha Itinerário. Dos nove itinerários construídos, verificou-se que o segundo e o terceiro, assim como o sexto e o oitavo são iguais. Daí resulta que não foram encontrados nove itinerários, mas apenas sete distintos. A partir destas sete soluções admissíveis para o PIT aplicou-se a heurística de Diversificação e Intensificação efectuando duas iterações ($kmax=2$). O melhor itinerário encontrado está representado analiticamente no quadro 1, e geograficamente na figura 6.

Dado que a solução óptima é desconhecida não se pode referir o erro relativamente à solução determinada. No entanto, pode-se concluir que, em termos turísticos a solução é boa, embora o último dia do itinerário apresente menos visitas a pontos turísticos comparativamente com os anteriores. Isto deve-se, por um lado, ao facto do algoritmo construtivo de itinerários ser *greedy* e, por outro, à prolongada duração da visita nos locais escolhidos para esse dia.

6 Comentários Finais

Foi discutido neste artigo o desenho de itinerários turísticos. Baseado num trabalho de investigação aplicada, procedeu-se à identificação das características fundamentais do problema, sua formalização matemática e apresentação de técnicas heurísticas no âmbito da optimização

Quadro 1: Descrição do itinerário.

Segunda	Nó	52	7	1	8	2	4	5	22	56	21	19	17	14	20	-70
	Tempo	540	552	569	586	619	652	667	694	753	900	963	1046	1077	1140	1203
Terça	Nó	35	39	30	31	61	29	28	37	38	40	-80				
	Tempo	540	623	662	732	750	870	909	1012	1028	1062	1140				
Quarta	Nó	49	50	48	67	45	36	-75								
	Tempo	600	665	685	750	870	1016	1156								

utilidade itinerário: 98; custo itinerário: 3978; função objectivo: 548

Legenda:

Restaurante

Dormida

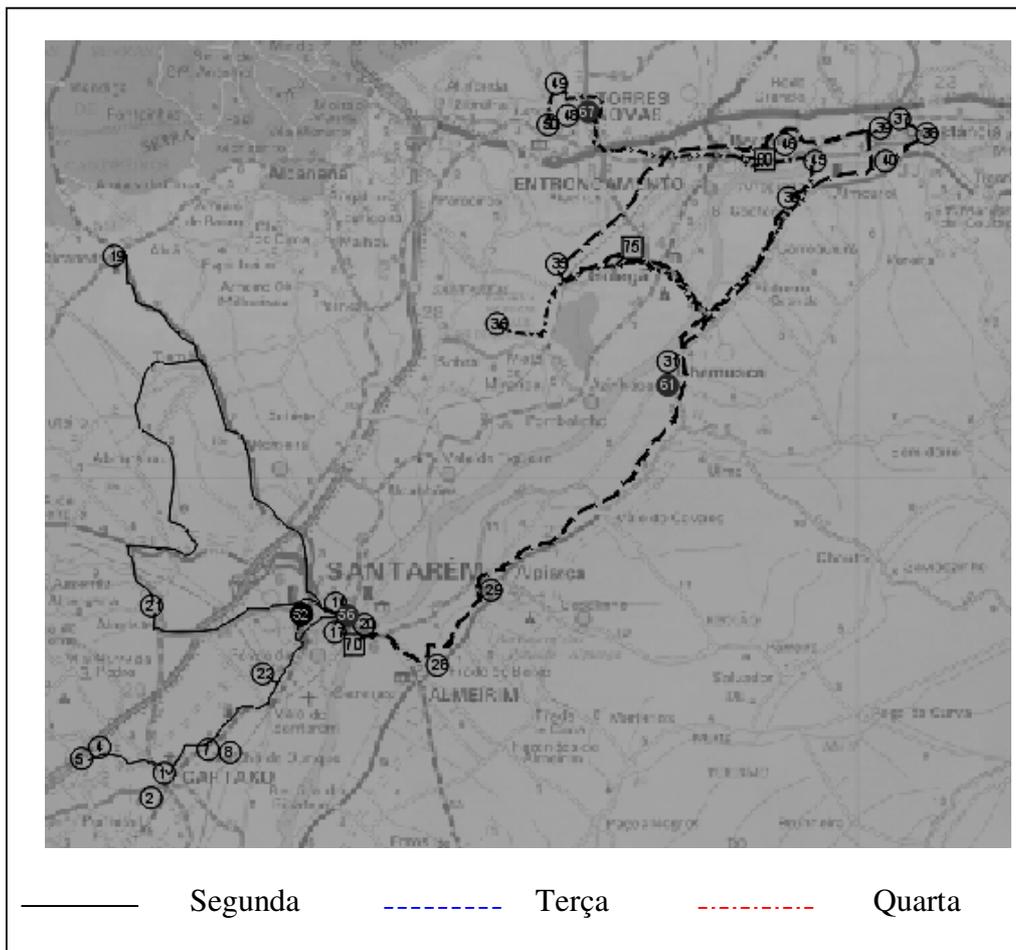


Figura 6: Representação geográfica do itinerário.

em redes especialmente adaptadas ao problema.

A análise dos resultados de aplicação do modelo a um caso de estudo real, a partir da implementação computacional das heurísticas, mostra que se trata de uma metodologia própria para o desenho de itinerários turísticos de boa qualidade em relação aos objectivos de maximizar a utilidade e minimizar o custo. No entanto, serão abusivas outras conclusões que se possam tirar desta experimentação reduzida.

Reconhecem-se desde já limitações nesta versão do modelo, e portanto, deverão vir a ser implementadas algumas alterações, nomeadamente a flexibilização de hipóteses simplificadoras características do problema resolvido, possibilitando o alargamento do âmbito de aplicação, por exemplo, ampliando o modelo para a consideração de redes de transporte não rodoviário (vias ferroviária, pedestre, ciclo-turística, equestre, entre outras possíveis).

Face à subjectividade dos parâmetros relativos à avaliação de um determinado itinerário turístico, poder-se-á utilizar a optimização interactiva de modo a permitir ao utilizador rever alguns parâmetros, ou ainda, tentar aplicar técnicas de optimização na avaliação dos recursos turísticos mediante as necessidades do utilizador, nomeadamente, na classificação da utilidade dos recursos turísticos (ver nesta matéria o trabalho de Schifferl [1998]). No que respeita ao desenvolvimento dos métodos heurísticos, poderão ser revistos alguns procedimentos.

Por outro lado, está actualmente a ser desenvolvido um trabalho de recolha e tratamento de dados da região de Santarém (Colaço [2000]). A implementação de um sistema de informação de apoio à decisão, com uma importante componente de Sistemas de Informação Geográfica, é sem dúvida uma das metas a atingir a médio prazo de forma a potenciar a recolha sistémica deste tipo de informação e também a disponibilização desta ferramenta para a construção de itinerários turísticos em quiosques multimédia distribuídos em locais estratégicos.

Referências Bibliográficas

- [1] Ball, M. O., Magnanti, T. L., Monna, C. L. e Nemhauser, G. L., *Network Routing*, Vol. 8, Handbooks in Operations Research and Management Science, Amsterdam: North Holland, (1995).
- [2] Bodin, L., Golden, B., Assad, A. e Ball, M., Routing and Scheduling of Vehicles and Crews: The State of the Art, *Computers & Operations Research*, 10, No. 2, (1983).
- [3] Clarke, G. e Wright, J., Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points, *Operations Research*, 12, (1964), 568-581.
- [4] Colaço, S. G., Desenho Optimizado de Itinerários Turísticos. Alguns Métodos Heurísticos, Dissertação de Mestrado em MAEG, Lisboa: ISEG, (1999).
- [5] Colaço, S. G., Projecto TecMedia. Regime de Apoio ao Desenvolvimento de Competências Tecnológicas: ADI, (2000).
- [6] Glover, F. e Laguna, M., *Tabu Search*, Kluwer Academic Publisher, Boston, (1997).
- [7] Hatzopoulos, M., Vazirgiannis, M. e Rizos, I., HADT: Hypermedia Application Development Tool for Tourist Applications, *European Journal of Information Systems*, 2, No. 2, (1993), 91-101.
- [8] Landany, S. P., Optimal Market Segmentation of Hotel Rooms – The Non Linear Case, *Omega*, 24, No. 1, (1996), 29-36.
- [9] Martins, C. L. e Pato, M.V., Search Strategies for the Feeder Bus Network Design Problem, *European Journal of Operational Research*, 106, (1998), 425-440.

- [10] Rochat, Y. e Semet, F., A Tabu Search Approach for Delivering Pet Food and Flour in Switzerland, *Journal of Operations Research Society*, 45, No. 11, (1994), 1233–1246.
- [11] Rochat, Y. e Taillard, E. D., Probabilistic Diversification in Local Search for Vehicle Routing, *Journal of Heuristics*, 1, (1995).
- [12] Russel, R. e Igo, W., An Assignment Routing Problem, *Networks*, 9, (1979), 1–17.
- [13] Schifferl, E., Genetic Algorithms for Tourism Product Optimization. Application of an Interactive GA for the Evaluation of Tourism Products, Institute for Tourism and Leisure Studies, University of Economics and B.A., Vienna, (1998).
- [14] Solomon, M. M., Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problem with Time Constraints, *Operations Research*, 35, (1987), 254–265.