



Ezequiel Gibbon Gautério ^(a), Elaine Corrêa Pereira ^(b)

(a) Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brasil /ezequielgaut@hotmail.com

(b) Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brasil /elainepereira@prolic.furg.br

PROGRAMAÇÃO DE VEÍCULOS COM COLETA E ENTREGA APLICADA NA EDUCAÇÃO À DISTÂNCIA

RESUMO

Este estudo teve por objetivo desenvolver um aplicativo computacional que possibilitasse o planejamento operacional da frota de veículos de problemas de coleta e entrega minimizando os custos de transporte. Baseado em trabalhos da literatura foi elaborada a formulação matemática com restrições em que a função objetivo minimiza o custo de transporte incluindo a distância percorrida e tempos penalizados. Na implementação foi utilizado o Recozimento Simulado com heurísticas para a solução inicial e os movimentos de Reordenação, Realocação e Trocas para as soluções vizinhas. Para validar o aplicativo foram utilizados dados do problema de logística operacional dos veículos que transportam servidores desde a Universidade Federal do Rio Grande (FURG) localizada em Rio Grande no Rio Grande do Sul (RS) até os polos de apoio presencial em diferentes municípios do estado do RS. Realizou-se 15 testes considerando um cenário com 5 requisições, 5 veículos e parâmetros pré-definidos, onde os resultados encontrados mostraram que o aplicativo está adequado para o cenário analisado tendo a função objetivo minimizada em vários testes e algumas rotas resultantes viáveis. O teste computacional com melhor resultado comparado ao teste empírico apresentou solução melhor, pois reduziu o número de veículos em relação ao empírico. Considera-se este trabalho como mais uma contribuição para a literatura.

Palavras-chave: Roteamento; Programação de veículos; Educação a Distância; Recozimento Simulado.

SCHEDULING VEHICLES WITH PICKUP AND DELIVERY APPLIED IN DISTANCE EDUCATION

ABSTRACT

This study aimed to develop a computer application that would allow the operational planning of vehicle pickup and delivery problems minimizing transportation costs fleet. Based on works of literature was developed the mathematical formulation with constraints in the objective function minimizes the cost of transportation including the distance and penalized time. Implementation was used with the Simulated Annealing heuristic for the initial solution and the movements of reordering, Relocation and Exchanges to neighboring solutions. To validate the application, we used data of the problem of operational logistics vehicles carrying servers from the Federal University of Rio Grande (FURG) in Rio Grande to the poles of classroom support in different municipalities of Rio Grande do Sul. Was carried out 15 tests considering a scenario with 5 requests, 5 vehicles and pre-defined parameters where the results showed that the application is suitable for the scenario analyzed by the minimized in several tests and some viable routes resulting objective function. The computational test with better results compared to empirical test showed better solution, because it reduced the number of vehicles in relation to the empirical. Considered this work as another contribution to the literature.

Keywords: Routing; Vehicle of scheduling; Distance Education; Simulated Annealing

1. Introdução

Atualmente, dentre os diferentes Problemas de Roteamento de Veículos (PRV's) existentes na literatura o problema de coleta e entrega tem sido estudado por vários autores, tais como: Znamensky e Cunha (1999) que abordaram o problema de transporte de idosos e deficientes, Rodrigues (2007) que analisou o transporte de funcionários da Hidrelétrica de Itaipu Binacional em Foz do Iguaçu, Haidemann (2007) que apresentou um estudo sobre o transporte escolar na cidade de Joinville em Santa Catarina, Prata (2009) abordando o problema de roteirização no transporte escolar rural em São Carlos (São Paulo) e Faria *et al.* (2010) que apresentaram um estudo sobre o transporte de pessoas com deficiência em São José dos Campos. Todos estes autores buscaram encontrar soluções para a organização da logística operacional dos problemas reais citados.

O PRV com Coleta e Entrega trata o transporte de cargas entre clientes que solicitam pedidos de coleta e entrega. Basicamente, as entregas são realizadas a partir de um depósito e as coletas são transportadas desde os clientes até o depósito, ao final da rota. Num caso particular para o problema de coleta e entrega, tem-se o transporte de passageiros entre locais distintos, fazendo a entrega ou coleta destes passageiros.

O problema de roteamento de veículos aplicado na Educação a Distância (EaD) para tratar a organização da logística operacional dos veículos que transportam professores, tutores e/ou palestrantes desde a universidade até os polos de apoio presencial no Rio Grande do Sul foi apresentado por Gautério e Pereira (2010).

Os autores realizaram uma análise inicial utilizando o algoritmo de Dijkstra para determinar as rotas com menor distância percorrida e encontraram rotas viáveis, mas justificam a necessidade de avaliar o tempo de deslocamento entre os polos, bem como outras restrições.

Este mesmo problema foi apresentado também por Gautério e Pereira (2012) como uma aplicação de coleta e entrega *dial-a-ride* e que poderia ser tratado a partir de formulações matemáticas da literatura. Porém, os autores não encontraram um modelo matemático pronto adequado ao problema proposto e, por isso, deviam estudá-lo com mais detalhes considerando as características específicas e com restrições de janelas de tempo.

O presente trabalho teve por objetivo desenvolver um aplicativo que possibilitasse o planejamento operacional da frota de veículos de

problemas de coleta e entrega minimizando os custos de transporte, aplicado numa situação real. O aplicativo foi embasado no algoritmo do Recozimento Simulado e utiliza duas heurísticas desenvolvidas para este problema, a partir de propostas existentes na literatura. A formulação matemática apresentada foi idealizada com base nas formulações de Mauri e Lorena (2009) e Júnior *et al.* (2005) para considerar as janelas de tempo de embarque, desembarque e condições específicas do problema tratado.

O aplicativo desenvolvido possibilita analisar a minimização da função objetivo, considerando a distância total percorrida pelos veículos, os horários penalizados das requisições de embarque e o tempo máximo de viagem destes veículos. Neste artigo apresenta-se os resultados obtidos com a pesquisa, os dados da implementação computacional e os resultados dos testes realizados.

Assim, este trabalho surge para contribuir com a organização da logística das viagens aos polos da EaD que poderão ser realizadas com menor custo de transporte. Além disso, esta aplicação real do problema de coleta e entrega contribui para a literatura por se tratar de uma aplicação com características específicas.

2. Referencial Teórico

Segundo Bodin *et al.* (1983), existem diferentes tipos de PRV's classificados de acordo com certas características. Dentre eles, tem-se o Problema de Roteamento de Veículos com Coleta e Entrega (PRVCE) que trata as situações em que os veículos entregam e coletam demandas de mercadorias ou pessoas.

De acordo com Goldbarg e Luna (2000), os PRV's são aplicados na maioria das empresas de transporte, logística e distribuição, sendo também aplicado no tráfego aéreo e na rede rodoviária de grandes metrópoles. Um dos objetivos é determinar dentre as possíveis rotas, qual representa o menor custo, ou seja, a solução ótima.

Nos últimos anos, observa-se um considerável crescimento no estudo dos diversos problemas de roteamento de veículos, especialmente de coleta e entrega. Autores de diversos países têm pesquisado sobre roteamento, principalmente os que envolvem o transporte e logística de cargas e/ou pessoas, analisando as possibilidades de resolvê-los e desenvolvendo ferramentas computacionais para solucioná-los, a fim de minimizar os custos com transporte.

Brasileiro e Lacerda (2008) utilizaram o sistema de informação geográfica para

roteirização dos veículos que coletam resíduos domiciliares, onde o objetivo foi minimizar a distância total a ser percorrida pelos veículos coletores; Lu e Dessouky (2006) apresentaram uma heurística construtiva baseada em inserção aplicada ao problema de coleta e entrega com janela de tempo. Uma revisão do estado da arte sobre os problemas de roteamento de veículos pode ser encontrada em Costa (2005), Assis (2007) e mais detalhes em Gautério (2013).

Tratando-se do transporte de passageiros, segundo Mauri e Lorena (2009), deve-se levar em consideração diversos fatores que avaliam o conforto e segurança dos mesmos. Estes fatores tratam a qualidade do serviço prestado pelas empresas, o tempo de viagem dos passageiros, a pontualidade, entre outros que influenciam também no aumento dos custos para as empresas de transporte escolar, transportes intermunicipal e interestadual, por exemplo.

De forma geral, percebe-se o aumento gradativo nos custos com transporte tanto de produtos, quanto de passageiros nas diferentes regiões brasileiras. Com isto, é necessário planejar o percurso a ser realizado pelos veículos, de forma que possam atender as solicitações de entrega e/ou coleta no transporte de produtos, pessoas ou tarefas aleatórias das empresas reduzindo os custos com transporte. Este planejamento pode ser realizado manualmente por pessoas designadas para tal função ou através de ferramentas computacionais.

Em relação ao transporte de mercadorias ou produtos, existem muitos trabalhos na literatura que apresentam as características, os métodos de solução e as ferramentas computacionais desenvolvidas que auxiliam as empresas na obtenção de soluções para a organização da logística de distribuição dos produtos. Quanto ao transporte de pessoas, o PRV é classificado como problema "porta-a-porta" do inglês *dial-a-ride problem* (DARP) e, segundo Kaiser (2009), apesar de ser pouco conhecido, muitos pesquisadores têm concentrado esforços na resolução deste tipo de problema aplicando-o em situações reais.

A relevância de realizar estudos sobre os PRV's está no fato de que, tanto no transporte de mercadorias, quanto no transporte de pessoas, objetiva-se elaborar métodos de solução robustos e flexíveis que possibilitem organizar a logística das empresas envolvidas para minimizar custos.

É importante ressaltar que devido ao crescimento no transporte rodoviário de passageiros, surgiram novas empresas para realização de transporte logístico de funcionários

de setores importantes, especialmente com o crescimento de obras no setor naval e construção civil. Com isto, é necessário que se realize estudos relacionados ao transporte logístico, buscando desenvolver métodos que proporcionem a solução dos problemas.

2.1 Recozimento Simulado

O Recozimento Simulado é um método iterativo que combina técnicas de busca local e randomização que, aplicado num problema de otimização, aceita soluções de pior custo através de uma função probabilística para evitar a parada prematura em um ótimo local. A técnica de busca local consiste num processo iterativo que vai de uma solução para outra no espaço de soluções pesquisando aquela que é melhor através de movimentos predefinidos e que podem ser restritos por alguma condição. A cada iteração, o custo da nova solução vizinha gerada é avaliado em relação a melhor solução obtida anteriormente (IZQUIERDO, 2000).

Os parâmetros necessários para o recozimento são: a razão de resfriamento (α), o número máximo de iterações, a temperatura inicial e temperatura de congelamento. Além disso, esse método necessita de procedimentos para geração de uma solução inicial e das soluções vizinhas, bem como uma função de avaliação da solução.

3. Metodologia

Neste trabalho, inicialmente foi desenvolvida uma formulação matemática com a função objetivo que considera penalizações e restrições adequadas ao problema de coleta e entrega. Para utilização desta formulação e análise dos resultados implementou-se um aplicativo baseado no procedimento da meta heurística Recozimento Simulado. Posteriormente, foram realizados os testes computacionais utilizando um *notebook* com processador *Intel Pentium Dual* de 2.16 GHz e 2GB de RAM, com *Windows XP Professional* 2002, *Service Pack 3*.

Na implementação computacional foram utilizadas 2 heurísticas para a solução inicial e três movimentos para a estrutura de vizinhança (soluções vizinhas), bem como os dados reais do estudo de caso apresentado em Gautério (2013).

3.1. Formulação Matemática

A formulação matemática desenvolvida apresenta uma função objetivo (FO) que busca

minimizar o custo de transporte nas rotas, onde é o conjunto de locais de coleta e entrega e é o

conjunto de veículos da frota heterogênea. Então, a FO é dada por:

Minimizar:

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0, j \neq i}^n \sum_{k=1}^{\bar{k}} d_{ij} x_{ij}^k + \tag{1}$$

$$\sum_{1,3} \sum_{i=0}^n \sum_{j=0, j \neq i}^n (\varphi_1 |(HE_1)_i - (HP_1)_i| + \varphi_2 |(HE_2)_j - (HP_2)_j|) + \tag{2}$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0, j \neq i}^n \sum_{k=1}^{\bar{k}} t_{ij} x_{ij}^k + \varphi_3 \sum_{k=1}^{\bar{k}} (\max\{0, T_{vk} - T'_k\}) \tag{3}$$

Esta FO é definida como a soma de três expressões, sendo em (1) o somatório das distâncias percorridas pelos veículos, na (2) o somatório das diferenças entre horários estimados e programados penalizados e em (3) o somatório dos tempos de viagem entre os locais e a penalização do somatório do tempo total de viagem ocorrido em relação ao tempo máximo permitido para cada veículo.

Desta forma, na expressão (1), o parâmetro d_{ij} representa a distância percorrida entre dois locais i e j e a variável binária x_{ij}^k refere-se aos veículos, tal que $x_{ij}^k = 1$ se o veículo k faz o percurso entre i e j ou $x_{ij}^k = 0$, caso contrário. Em relação à expressão (2), tem-se que:

- $(HE_1)_i$ é o Horário Estimado INICIAL e significa o horário previsto da coleta de um passageiro num determinado local i e $(HE_2)_j$ é o Horário Estimado FINAL significando o horário previsto da entrega de um passageiro no local j ;
- $(HP_1)_i$ é o Horário Programado INICIAL e determina o horário definitivo em que o passageiro será coletado no local i e $(HP_2)_j$ é o Horário Programado FINAL que determina o horário definitivo em que o passageiro será entregue no local j .

Nesta expressão (2), a primeira parcela da soma verifica a diferença de tempo entre os

Horários Estimado e Programado num local de coleta e a segunda parcela calcula a diferença de tempo entre os Horários Estimado e Programado num local de entrega. Para que o horário previsto seja respeitado e próximo do horário programado, faz-se uma penalização conforme o tipo de requisição. Esta penalização é atribuída aos parâmetros φ_1 que penaliza os horários de coleta e φ_2 que penaliza os horários de entrega.

A expressão (3) apresenta na primeira parcela da soma o parâmetro t_{ij} que é o tempo de viagem entre dois locais i e j , bem como na segunda parcela a variável T_{vk} que representa o tempo total de viagem do veículo k e o parâmetro T'_k que indica o tempo máximo de viagem permitido para cada veículo. Esta segunda parcela possibilita determinar o tempo excedido em relação ao máximo permitido e para que esse tempo máximo de viagem seja obedecido, usa-se o parâmetro de penalização φ_3 .

A Função Objetivo apresentada anteriormente está sujeita as seguintes restrições:

- O veículo realizará a entrega de um passageiro num determinado local e poderá retornar a este local para realizar a coleta do mesmo. A capacidade de cada veículo deve ser respeitada, ou seja, a quantidade de passageiros que são entregues ou coletadas será menor que sua capacidade máxima, de acordo com a restrição (4).

$$(Q_i - qE_i + qC_i) \sum_{i=0}^n \sum_{j=0, j \neq i}^n x_{ij}^k \leq Q'_k \quad \forall i, j \in V, \forall k \in K \tag{4}$$

- Nesta restrição, qE_i representa a quantidade de passageiros que são entregues no local i , qC_i representa a quantidade de passageiros que são

coletados no local i , Q_i é a quantidade de assentos ocupados no veículo no local i e Q'_k representa a capacidade máxima de cada veículo k .

Além disso, têm-se janelas de tempo que devem ser respeitadas, onde o tempo máximo de viagem para cada veículo k é definido pela restrição (5).

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0; j \neq i}^n x_{ij}^k (t_{ij} + s_i) \leq T_k' \quad \forall i, j \in V, \forall k \in K \quad (5)$$

Esta restrição é utilizada somente numa programação inicial das rotas considerando apenas os tempos de viagem t_{ij} e a duração dos intervalos de tempo de coleta ou entrega s_i .

Após a programação inicial, utilizando a Heurística de Programação de Horários (HPH) que será descrita na próxima seção, considera-se os intervalos de tempo de parada dos veículos para refeição e pernoite de passageiros, a quantidade destas paradas em

cada rota e o tempo de espera do veículo necessário em cada coleta, para que os horários sejam atualizados adequadamente. Desta forma, a restrição (5) que limita o tempo máximo de viagem do veículo será redefinida pela restrição (6).

$$(Q_r^k d_r + Q_p^k d_p) + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0; j \neq i}^n x_{ij}^k (t_{ij} + s_i + \varphi_4 w_i) \leq T_k' \quad \forall k \in K \quad (6)$$

Nesta restrição (6), têm-se os seguintes parâmetros em relação à parada dos veículos: d_r que representa o tempo de duração da refeição dos passageiros, d_p que é o tempo de duração de pernoite dos passageiros.

Desta forma, é obtido através da equação (7) e é dado pela equação (8). Convém salientar que se deve considerar o valor inteiro dos resultados para e .

Além disso, tem-se w_i que é um tempo de espera do veículo (quando necessário) para realizar uma coleta num determinado local i . Isto ocorre quando o veículo chega ao local da coleta antes do horário e o passageiro ainda não está disponível para ser coletado. Para que este tempo de espera seja mínimo, utiliza-se uma penalização representada pelo parâmetro φ_4 .

Na equação (7) o parâmetro T_{vr} representa o tempo de viagem necessário para que ocorra uma parada do veículo para refeição dos passageiros e na equação (8) o parâmetro t_d representa a duração do tempo de viagem diária do veículo. Nestas duas equações, tem-se o tempo total de viagem T_{vk} do veículo k que é calculado como na equação (9):

$$Q_r^k = \frac{T_{vk}}{T_{vr}} \quad (7)$$

$$T_{vk} = (HP_2)_0 - (HP_1)_0 \quad (9)$$

$$Q_p^k = \frac{T_{vk}}{t_d} \quad (8)$$

Onde $(HP_1)_0$ é o Horário Programado INICIAL definitivo de saída do veículo da garagem e $(HP_2)_0$ é o Horário Programado FINAL definitivo em que este veículo chega novamente na garagem. Quanto aos horários de coleta e entrega dos passageiros, tem-se a equação (10) que determina E_i como sendo o horário de coleta do passageiro no local i , limitada pela restrição (11). A equação (12) determina F_j que é o horário da entrega num local j .

Para a restrição (6) também é necessário o valor de Q_r^k que representa a quantidade de paradas do veículo para refeições dos passageiros e o valor de Q_p^k representando a quantidade de paradas do veículo para pernoites.

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0; j \neq i}^n x_{ij}^k (F_j - t_{ij} - s_i) = E_i \quad \forall i, j \in V \quad (10)$$

$$E_i < F_j \quad (11)$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0; i \neq j}^n x_{ij}^k (E_i + s_i + t_{ij}) = F_j \quad \forall i, j \in V \quad (12)$$

Os horários, de coleta e entrega, são utilizados apenas numa programação inicial como um Horário Estimado INICIAL e um o Horário Estimado FINAL, respectivamente, que são atualizados pela Heurística de Programação de Horários (HPH). As equações para obter os valores de e e m em cada tipo de requisição (coleta, entregas com embarque na garagem e entregas com embarque fora da garagem) serão descritas a seguir.

Então, para uma requisição de ENTREGA com embarque na garagem tem-se a equação (13) que representa o horário previsto para o veículo estar no local da entrega e a equação (14) que é o horário previsto para embarque do passageiro na garagem. Considera-se s_0 como a duração do tempo de desembarque do passageiro na garagem.

$$(HE_2)_j = F_j - s_j \quad (13)$$

$$(HE_1)_i = (HE_2)_j - t_{0j} - s_0 \quad (14)$$

De outra forma, quando houver uma requisição de COLETA somente (sem entrega anterior), então a equação (15) representará o Horário Estimado INICIAL de coleta e a equação (16) representará o Horário Estimado FINAL de entrega na garagem.

$$(HE_1)_i = E_i \quad (15)$$

$$(HE_2)_0 = (HE_1)_i + s_i + t_{i0} + s_0 \quad (16)$$

Para o caso de uma requisição de COLETA de uma entrega anterior, então a equação (17) representa o Horário Estimado INICIAL que é o horário em que o passageiro pode ser coletado no local j , representado pelo parâmetro D_j e que deve ser informado na requisição de entrega + coleta. A equação (18) representa o Horário Estimado FINAL de entrega do passageiro coletado, na garagem.

$$(HE_1)_j = D_j \quad (17)$$

$$(HE_2)_0 = (HE_1)_j + s_j + t_{j0} + s_0 \quad (18)$$

Numa requisição de ENTREGA com EMBARQUE em local fora da garagem, tem-se a equação (19) que representa o Horário Estimado FINAL. Neste caso, o veículo sai da garagem para posterior embarque do passageiro e entrega num local, por isso o Horário Estimado FINAL a ser considerado é o próprio horário do embarque. Além disso, a equação (20) representa o Horário Estimado INICIAL, que será o horário previsto em que o veículo deve sair da garagem.

$$(HE_2)_j = E_j \quad (19)$$

$$(HE_1)_i = (HE_2)_j - t_{0i} - s_0 \quad (20)$$

3.2. Heurísticas implementadas

As heurísticas utilizadas na implementação computacional foram denominadas de Heurística de Construção das Rotas (HCR) e Heurística de Programação de Horários (HPH), descritas pelos algoritmos 1 e 2, respectivamente.

A primeira é responsável pela roteirização dos veículos formando os grupos de locais e pontos nas rotas e sequência de atendimento dos mesmos, sendo necessário definir um número fixo de rotas e uma lista de requisições com locais de embarque e desembarque, conforme descrito a seguir.

A segunda heurística realiza a programação dos horários nas rotas de forma a respeitar as restrições temporais do modelo matemático. O local de referência a ser selecionado na HPH serve como ponto de partida para a programação dos horários nas rotas.

Algoritmo 1: Heurística de Construção das Rotas

CRIAR (uma lista LR de requisições de transporte dos passageiros)
EXECUTAR (as 6 estruturas criadas com características diferentes)
PARA (cada estrutura) FAÇA
 CRIAR (m rotas vazias de acordo com as capacidades dos veículos escolhidos)
 PARA (cada rota) FAÇA
 SELECIONAR (aleatoriamente uma requisição de LR)
 PARA (cada requisição selecionada) FAÇA
 INSERIR (na rota, o local de referência conforme o tipo de requisição)
 FIM-PARA
 REMOVER (a requisição selecionada de LR)
 INSERIR (a garagem de origem e destino do veículo k)
 FIM-PARA
FIM-PARA

Algoritmo 2: Heurística de Programação de Horários

PARA (cada estrutura) FAÇA
PARA (cada rota) FAÇA
SELECIONAR (o local de referência)
PROGRAMAR (os horários antes e depois do horário do local de referência)
CALCULAR (a quantidade de refeições na rota)
ATUALIZAR (os horários antes e depois do horário do local de referência)
CALCULAR (a quantidade de pernoites na rota antes do local de referência)
ATUALIZAR (o horário de saída da garagem)
SE ($T_{vk} > t_d$) ENTÃO
REPROGRAMAR (para cada local)
INSERIR (refeição)
INSERIR (pernoite)
INSERIR (tempo de espera)
FIM-REPROGRAMAR
FIM-SE
FIM-PARA
FIM-PARA

3.3. Movimentos da Estrutura de Vizinhança

Para gerar as soluções vizinhas no recozimento simulado, foram implementados os movimentos Reordenar, Realocar e Trocar, representados pelos esquemas das figuras que seguem. O movimento Reordenar (Figura 1) consiste basicamente em trocar posições de locais que tenham requisições de entrega ou coleta numa rota, ou seja, sortear uma rota qualquer da solução, sortear um local com uma requisição nessa rota, sortear uma nova posição e trocar a posição deste local para a nova posição selecionada.

É relevante destacar que se o local da requisição selecionado na rota estiver na garagem, então o movimento sempre será proibido, pois a mesma é fixa em todas as rotas e sua posição não sofre alteração.

Nesta figura 1, na 1ª iteração foi sorteada uma rota inicial qualquer, onde na posição 3 tem-se um local com requisição de entrega sorteado (E1) e na 8, a posição sorteada, ambas aleatoriamente. Pelo procedimento da heurística, o local da requisição (E1) é transferido para a posição 8 e os demais locais são deslocadas para a esquerda, conforme ilustração da solução temporária desta 1ª iteração. Na 2ª iteração ocorre o mesmo procedimento, mas os locais são deslocados para a direita na sequência de locais de requisições da rota.

O movimento Realocar (Figura 2) consiste em sortear duas rotas quaisquer da solução inicial,

por exemplo, R1 e R2. Posteriormente, selecionar um local com uma requisição qualquer na rota R1, selecionar uma posição qualquer na rota R2 e realocar o local da requisição selecionada na rota R1 para a posição selecionada na rota R2.

Nesta iteração ilustrada na figura 2, os locais de requisições da rota R1 são diferentes da rota R2, pois o movimento exige rotas diferentes. Desta forma, o local com requisição de entrega E1 foi sorteado na rota R1, estando localizado na posição três e a nova posição para E1 foi sorteada na rota R2, sendo a posição cinco. Após realizar o movimento da realocação, tem-se a solução temporária para R1 e R2.

Estas soluções temporárias foram obtidas da seguinte forma: na R1 temporária os locais de requisições, que estão nas posições de três a oito, foram deslocados para a esquerda na rota original e ficaram numa posição anterior em relação à R1 original; na R2 temporária os locais que estão nas posições de seis a oito foram deslocados para a direita e ficaram localizados em posições posteriores em relação à rota R2 original.

Pode-se observar que na solução temporária da rota R2 há necessidade de inclusão de um local de coleta para o local de entrega da requisição E1.

O movimento Trocar (Figura 3) consiste em sortear duas rotas quaisquer R1 e R2, sortear um local com uma requisição em cada uma dessas rotas sorteadas e trocar estes locais entre as rotas, ou seja, o local de R1 é trocado para a posição do local de R2 e o local de R2 é inserido na posição da rota R1.

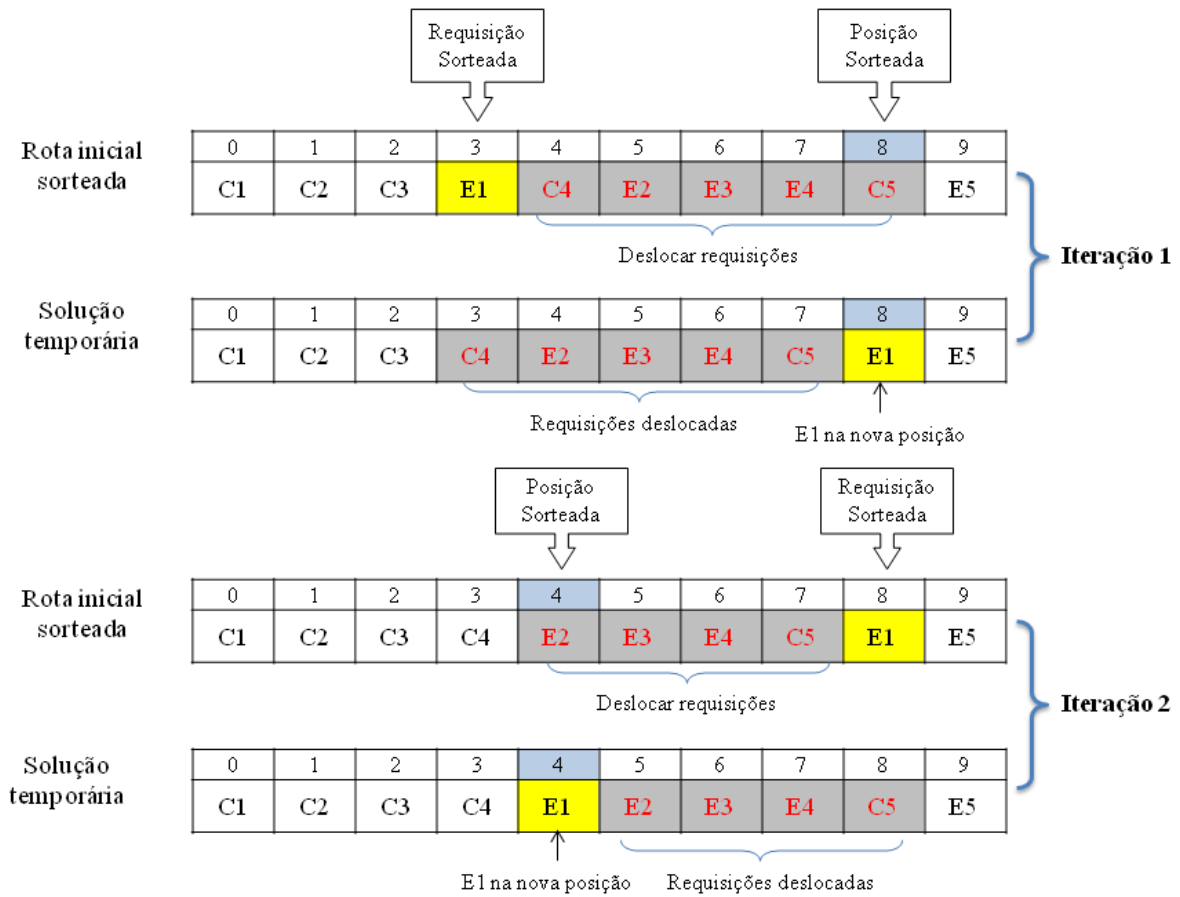


Figura 1 - Movimento Reordenar.
Fonte: Gautério, 2013.

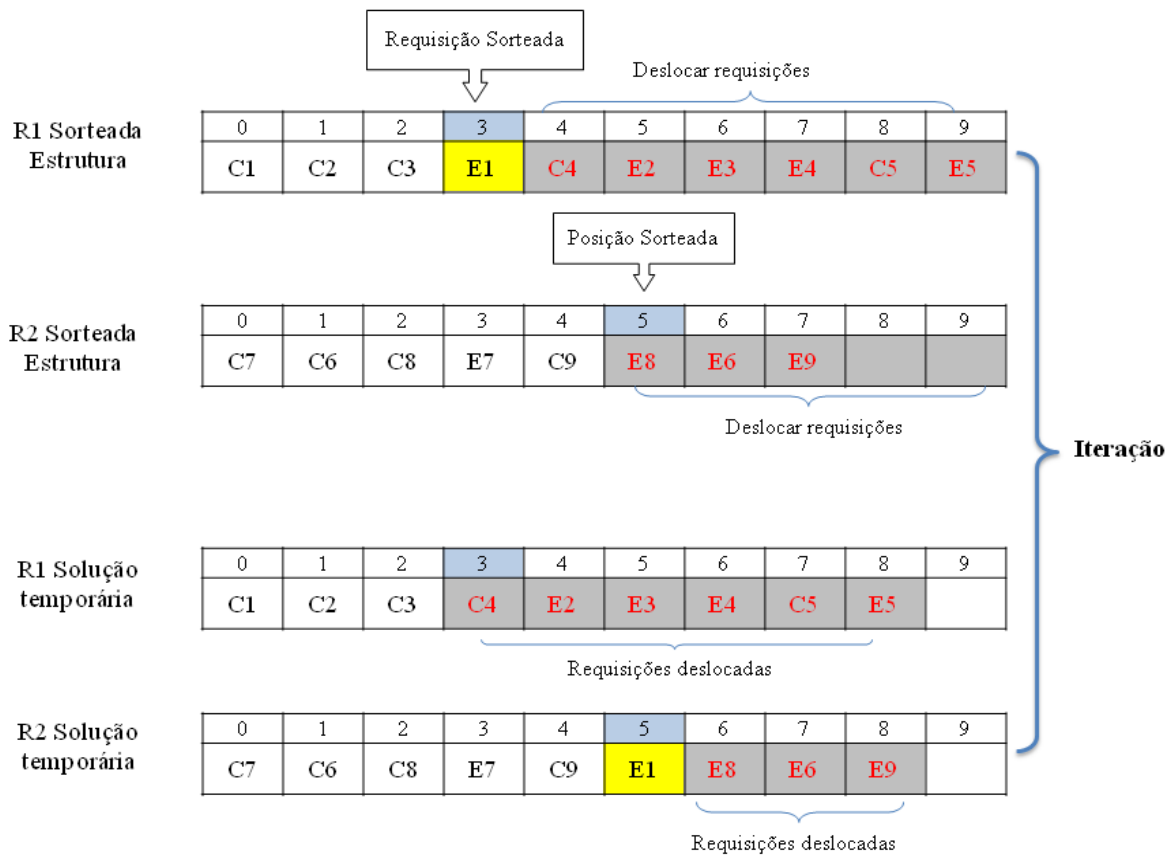


Figura 2 – Movimento Realocar.
Fonte: Gautério, 2013.

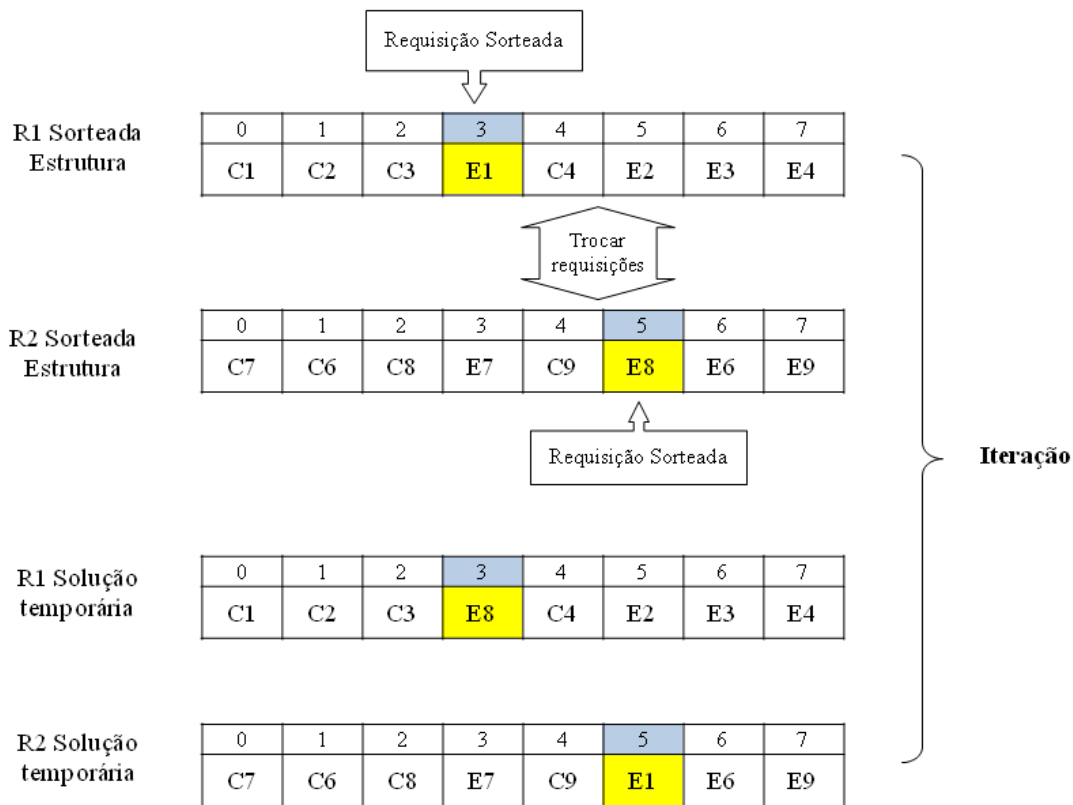


Figura 3 – Movimento Trocar.
 Fonte: Gautério, 2013

Nesta figura 3, tem-se a representação de uma iteração com as rotas R1 e R2 sorteadas aleatoriamente. Na R1 foi sorteado o local com requisição de entrega E1 que está na posição 3 e na R2 foi sorteado o local com requisição de entrega E8 que está na posição 5. Estes dois locais sorteados são trocados, sendo que o local que estava na posição 3 foi inserido na outra rota ocupando a posição 8 e o local que estava na posição 8 foi inserido na posição 3.

Nas três figuras de ilustração dos movimentos, considera-se a posição “0” que representa a garagem e as demais posições de 1 a 9 que representam a sequência de locais das requisições a serem atendidas, onde C1, C2, C3, C4 e C5 representam locais com requisições de coleta e E1, E2, E3, E4 e E5 representam os locais onde são feitas as entregas das requisições de coleta.

4. Implementação Computacional

O aplicativo foi desenvolvido em linguagem *Delphi*, pois possibilita incluir diversas facilidades em seu *layout* criando um *design* interativo. Sua interface com o usuário possibilita a visualização das simulações e dos resultados que vão sendo obtidos ao longo dos testes. O mesmo tem várias janelas de execução

e permite alterar informações do banco de dados conforme necessidade do usuário. Estes dados são carregados a partir da tela inicial do aplicativo (figura 4) através dos ícones Ler Mapa, Veículos, Servidores e Variáveis.

O ícone Ler Mapa carrega os arquivos no formato de planilhas *Excel* que armazenam as coordenadas geográficas (em graus decimais) dos locais para geração do mapa, bem como as distâncias (km) e tempos de viagem (minutos) entre estes.

O ícone Veículos carrega informações referentes aos tipos de veículos, sendo que nesta implementação foi utilizado como parâmetro um número máximo de 20 veículos cadastrados. Devem-se carregar informações tabeladas que contenham o modelo do veículo, a capacidade do veículo, a capacidade do tanque de combustível e consumo por quilômetro rodado, o tipo de combustível e o preço médio do combustível.

Quanto ao ícone Servidores serve para carregar os dados dos passageiros que poderão solicitar uma requisição de entrega ou coleta. O aplicativo aceita o número máximo de 50 passageiros a serem cadastrados e as informações necessárias são: nome, setor em que está vinculado numa empresa e um código de identificação.

Através do ícone Variáveis são inseridos os parâmetros utilizados nos testes. Este ícone exibe uma nova janela gráfica, onde primeiramente são inseridos os parâmetros relacionados às janelas de tempo e horários e, posteriormente, os do Recozimento Simulado, das penalizações e dos custos individuais por hora. Estes custos referem-se à refeição, pernoite e tempo de espera por passageiro.

Após a inserção dos parâmetros, devem-se inserir as requisições de transporte dos passageiros com o nome, os locais de embarque e desembarque, o horário e data do desembarque, a data e o horário que termina a permanência no local de desembarque do passageiro que solicita desembarque. A partir do horário e data do desembarque o aplicativo estima o horário e data do embarque.



Figura 4 – Tela inicial do aplicativo.
Fonte: Gautério, 2013

O aplicativo executa simultaneamente 6 estruturas de programação desenvolvidas com características diferentes na alocação dos veículos nas rotas de forma a atender à lista de requisições, a fim de comparar os resultados dos movimentos. Nestas estruturas, são geradas as soluções iniciais, as soluções vizinhas após os movimentos e as soluções finais obtidas com o término das iterações do Recozimento Simulado.

Em cada estrutura é possível identificar a quantidade de rotas geradas e qual veículo foi utilizado em cada rota. Além disso, tem-se o Tempo de Viagem total da estrutura, os resultados da Função Objetivo (FO) Inicial e Final, o valor percentual de melhora da FO Final em relação a FO inicial e a quantidade de Reordenações, Realocações e Trocas realizadas. O aplicativo apresenta também qual é a melhor estrutura, ou seja, aquela que obteve a melhor FO Final.

A fim de comparar os resultados e possibilitar uma tomada de decisão, optou-se em calcular separado da FO alguns custos nas rotas geradas. Assim, tem-se em cada estrutura os valores monetários dos custos finais totais de

Refeição, Pernoite, Tempo de Espera e Combustível de todas as rotas da estrutura. A soma destes quatro custos resulta no valor do Custo Total, de forma que se possa realizar uma análise baseada em custos monetários.

5. Resultados e Discussões

Neste trabalho, com a finalidade de testar e validar o aplicativo foram utilizados dados reais do problema apresentado em Gautério (2012). Alguns parâmetros foram fixados apenas para realização destes testes, mas podem ser alterados conforme necessidade ou características específicas de outra situação real.

Inicialmente, foram cadastrados os locais para entrega e coleta utilizando planilhas do *Excel* com informações das coordenadas geográficas em graus decimais destes locais, as distâncias reais aproximadas, bem como os tempos de viagem entre os mesmos, obtidos através do *Google Earth*. É importante ressaltar que a menor distância entre dois locais cadastrados foi calculada através do Algoritmo de *Floyd*.

Posteriormente, foram cadastrados 5 veículos que estão relacionados na tabela (1), onde a capacidade do veículo inclui passageiros e motorista. Para o consumo é considerada a quantidade de quilômetros rodados por litro de combustível consumido para cada veículo. Além

disso, os valores do preço médio do combustível foram obtidos através dos dados disponibilizados pela Agência Nacional do Petróleo (ANP, 2012), considerando os dados referentes ao município de Rio Grande, Rio Grande do Sul.

Tabela 1 - Veículos e características

| Carro | Capacidade | Tanque | Consumo | Combustível | Preço Médio |
|-----------------|------------|-----------|---------|-------------|-------------|
| Gol | 4 | 45 litros | 15 km | Gasolina | R\$ 2,95 |
| S10 | 5 | 80 litros | 12 km | Diesel | R\$ 2,20 |
| Ranger | 5 | 75 litros | 11 km | Diesel | R\$ 2,20 |
| Sprinter | 16 | 75 litros | 10 km | Diesel | R\$ 2,20 |
| Zafira | 5 | 58 litros | 12 km | Gasolina | R\$ 2,95 |

Fonte: Gautério, 2013.

Tabela 2 - Parâmetros dos Tempos e Horários

| Nome no aplicativo | Tempos e horários |
|-----------------------------------|-------------------|
| Tempo de Refeição | 15min |
| Tempo de Hospedagem | 08h |
| Tempo de Embarque | 05min |
| Tempo de Desembarque | 05min |
| Tempo de Viagem diário | 16h |
| Horário Mínimo Permitido de Saída | 06h |
| Horário de Parada para Pernoitar | 22h |
| Tempo de Viagem para Refeição | 03h |
| Máximo Tempo de Viagem | 36h |

Fonte: Gautério, 2013.

Tabela 3 - Parâmetros das penalizações dos 15 testes

| | Entregas | | | | Coletas | | | | Embarque Fora Garagem | | | | Outras |
|-----|----------|------|-----|-----|---------|-----|----|-----|-----------------------|------|-----|------|--------|
| | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P9 | P10 | P11 | P12 | P13 |
| T1 | 10 | 8 | 15 | 20 | 100 | 2 | 5 | 2 | 4 | 40 | 3 | 50 | 500 |
| T2 | 10 | 30 | 10 | 50 | 3000 | 2 | 2 | 5 | 10 | 30 | 10 | 60 | 6000 |
| T3 | 20 | 55 | 20 | 95 | 3000 | 5 | 2 | 10 | 20 | 55 | 20 | 115 | 6000 |
| T4 | 20 | 55 | 20 | 95 | 1000 | 5 | 2 | 10 | 20 | 55 | 20 | 115 | 3000 |
| T5 | 10 | 30 | 10 | 50 | 1000 | 2 | 2 | 5 | 10 | 30 | 10 | 60 | 3000 |
| T6 | 5 | 15 | 5 | 50 | 1000 | 2 | 2 | 5 | 5 | 15 | 5 | 60 | 3000 |
| T7 | 40 | 110 | 40 | 190 | 3000 | 10 | 5 | 20 | 40 | 110 | 40 | 230 | 6000 |
| T8 | 400 | 1100 | 400 | 190 | 3000 | 100 | 50 | 200 | 400 | 1100 | 400 | 2300 | 6000 |
| T9 | 85 | 80 | 75 | 150 | 2000 | 10 | 2 | 10 | 45 | 380 | 35 | 450 | 4000 |
| T10 | 95 | 85 | 75 | 190 | 2000 | 10 | 2 | 10 | 45 | 380 | 35 | 450 | 4000 |
| T11 | 90 | 80 | 75 | 160 | 2000 | 10 | 2 | 10 | 45 | 380 | 35 | 450 | 4000 |
| T12 | 90 | 85 | 75 | 160 | 2000 | 10 | 2 | 10 | 45 | 380 | 35 | 450 | 5000 |
| T13 | 2 | 2 | 1 | 200 | 500 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 5 | 2000 |
| T14 | 3 | 3 | 2 | 150 | 500 | 2 | 2 | 2 | 3 | 4 | 2 | 6 | 2000 |
| T15 | 5 | 4 | 7 | 120 | 800 | 2 | 2 | 2 | 4 | 8 | 4 | 5 | 2000 |

Fonte: Gautério, 2013.

Para os parâmetros de tempos e horários, foram utilizados os valores descritos na tabela (2) para todos os testes, sendo que estes valores estão de acordo com o problema real estudado.

Nesta tabela (2), alguns valores inseridos auxiliam na programação de paradas dos veículos para realização de serviços necessários para os passageiros, ou seja, paradas para refeições e pernoites quando necessárias.

Então, foi considerada a realização de parada do veículo a cada 3 h com duração de 15 minutos e que estes veículos devem circular a partir das 6 h e parar às 22 h para pernoite dos passageiros.

Para realização do embarque ou desembarque dos servidores, foi considerado o tempo de 5 minutos para cada serviço e um tempo máximo de viagem permitido de 36 h, compreendendo ida e volta.

Como parâmetros do Recozimento Simulado, baseado em resultados de Mauri e Lorena (2009), foram utilizados $\alpha = 0,97$, $S_{Amax} = 1000$, $T_o = 4000$, e $T_c = 0,01$. Para as penalizações apresentadas na formulação matemática, foram considerados os parâmetros descritos na tabela (3), onde de P1 a P13 representam as penalizações e de T1 a T15 os testes. Os valores de cada parâmetro foram sendo ajustados, conforme testes aleatórios e maiores informações sobre estas penalizações podem ser encontradas em Gautério (2013).

Na base de dados dos servidores foram cadastrados 20 passageiros identificados como Pessoa de 1 a 20. Para os testes foram escolhidas aleatoriamente cinco requisições, sendo utilizadas para o cenário analisado as requisições descritas na tabela (4).

Tabela 4 - Requisições do cenário analisado

| Nome | Embarque | Desembarque | | | Permanência | |
|------------------|-----------|---------------------------|--------|-------|-------------|---------|
| | Local | Local | Data | Hora | Data | Término |
| Pessoa 4 | Mostardas | Santo Antônio da Patrulha | Sábado | 13:00 | Sábado | 17:00 |
| Pessoa 10 | SEaD | Hulha Negra | Sábado | 10:00 | Sábado | 15:00 |
| Pessoa 13 | SEaD | Mostardas | Sábado | 12:00 | Sábado | 18:00 |
| Pessoa 14 | SEaD | Santa Vitória do Palmar | Sexta | 14:00 | Sexta | 18:00 |
| Pessoa 16 | SEaD | São Lourenço do Sul | Sábado | 09:00 | Sábado | 14:00 |

Fonte: Gautério, 2013.

Convém salientar que para as requisições nas tabelas, não foi atribuída uma data (com dia e mês) específico. No entanto, para a inserção destas requisições no aplicativo, foi necessário registrar essa data (dia e mês) para que o mesmo realizasse a simulação.

Para o cenário com 5 requisições foram realizados 15 testes utilizando apenas 5 veículos, pois foram poucas requisições. Na Tabela 5 estão os dados apenas do Teste 1 e na Tabela 6 estão os dados de todos os 15 testes realizados.

A análise dos resultados é feita em relação ao valor da FO Final que considera a parcela das distâncias e as parcelas dos tempos, ou seja, os horários estimados e programados penalizados, os tempos de viagem entre os locais e o tempo total de viagem penalizado em relação ao máximo permitido. Além disso, faz-se uma análise sobre a quantidade de movimentos gerados e rotas resultantes para as melhores FO Finais em cada teste para fins de comparação e possível tomada de decisão.

Tabela 5 - Resultados do Teste 1

| Estruturas | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----------------------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| Temp. Viagem | 87,27 | 111,02 | 109,4 | 87,15 | 78,15 | 88,45 |
| Reordenações | 526.834 | 533.110 | 11.358 | 11.623 | 116 | 3 |
| Realocações | 0 | 23.191 | 11.273 | 0 | 31 | 2 |
| Trocas | 0 | 31.526 | 11.257 | 0 | 23 | 2 |
| FO Inicial | 7.956,71 | 8.770,33 | 8.559,70 | 10.100,41 | 8.949,85 | 7.304,35 |
| FO Final | 5.209,29 | 8.224,39 | 8.559,70 | 6.786,13 | 5.147,95 | 7.304,35 |
| Quant. Rotas | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 |
| Percentual FO | 65,47% | 93,78% | 100% | 67,19% | 57,52% | 100% |
| Distância | 1.734 | 3.823,90 | 3.611,20 | 2.843,70 | 2.418,20 | 3.249,20 |

Fonte: Gautério, 2013.

Na tabela 5, cada coluna indica uma das 6 estruturas de programação do aplicativo com seus respectivos dados. A coluna do Temp. Viagem expressa o tempo total de viagem em horas (h) de todas as rotas geradas em cada estrutura, sendo que deve ser dividido pela quantidade de rotas para identificar o tempo de viagem aproximado de cada rota e a distância está expressa em quilômetros (km).

Analisando a Tabela 5 percebe-se que a melhor FO Final aparece na estrutura 5 com o valor de 5.147,95 unidades. Deste valor, tem-se 2.418,20 correspondente à distância percorrida e 2.729,75 correspondente à soma das parcelas dos tempos. A estrutura gerou 2 rotas para um tempo total de viagem da estrutura de 78,15 h e, além disso, houve uma redução do valor da FO Inicial a 57,52%. Comparando com as demais estruturas, apesar de ter a melhor FO Final, a distância total

de 2.418,20km percorrida pelos veículos é maior que a distância da estrutura 1, com 1.734km.

Observa-se que nas estruturas 3 e 6, apesar de ocorrerem movimentos nas iterações não houve alteração no valor da FO Inicial. Outro detalhe a ser observado é que nas estruturas 1 e 4, como foi construída apenas uma rota em cada estrutura, não houve movimentos de realocação ou troca, estando de acordo com as heurísticas implementadas.

Convém salientar que estes resultados do teste T1 foram obtidos utilizando os parâmetros descritos anteriormente na tabela (3) e que, conforme são alterados os parâmetros têm-se resultados diferentes. Isto pode ser comprovado analisando os resultados obtidos para todos os 15 testes descritos na tabela (6), onde são apresentados os dados das estruturas que geraram as melhores FO Finais obtidas em cada teste, significando diferentes estruturas na tabela.

Tabela 6 - Resultados dos 15 testes

| Testes | T. Viagem | Reordenar | Realocar | Trocar | FO Inicial | FO Final | Percentual | Distância | Rotas |
|--------|-----------|-----------|----------|--------|------------|----------|------------|-----------|-------|
| T1 | 78,15 | 116 | 31 | 23 | 8.949,85 | 5.147,95 | 57,52 | 2.418,20 | 2 |
| T2 | 48,03 | 938.906 | 216.931 | 65.906 | 30.822,21 | 5.257,66 | 17,06 | 2.459,30 | 2 |
| T3 | 51,05 | 937 | 294 | 205 | 31.357,35 | 9.796,89 | 31,24 | 2.765,40 | 2 |
| T4 | 79,88 | 1.130 | 392 | 230 | 13.506,61 | 9.188,46 | 68,03 | 3.201,40 | 2 |
| T5 | 63,57 | 782 | 229 | 141 | 15.545,70 | 6.025,24 | 38,76 | 2.302,20 | 2 |
| T6 | 48,68 | 909 | 349 | 214 | 13.623,83 | 4.734,17 | 34,75 | 2.302,20 | 2 |
| T7 | 70,23 | 1.315 | 413 | 250 | 36.638,38 | 8.472,33 | 23,12 | 3.257,30 | 2 |
| T8 | 54,48 | 467 | 171 | 100 | 36.141,65 | 9.137,83 | 25,28 | 2.821,30 | 2 |
| T9 | 64,42 | 402 | 150 | 80 | 22.067,01 | 6.378,57 | 28,91 | 2.996,50 | 2 |
| T10 | 50,87 | 4.091 | 3.845 | 3.861 | 26.107,84 | 6.973,91 | 26,71 | 3.201,40 | 2 |
| T11 | 63,18 | 3.946 | 3.615 | 3.500 | 29.527,74 | 6.284,25 | 21,28 | 2.738,20 | 2 |
| T12 | 63,27 | 229 | 52 | 40 | 23.438,90 | 6.307,97 | 26,91 | 3.147,80 | 2 |
| T13 | 73,43 | 341 | 131 | 86 | 13.638,75 | 6.695,27 | 49,09 | 3.257,30 | 2 |
| T14 | 65,35 | 290 | 72 | 48 | 12.120,21 | 6.250,49 | 51,57 | 2.201 | 2 |
| T15 | 74,18 | 184 | 58 | 21 | 7.862,59 | 7.247,17 | 92,17 | 3.257,30 | 2 |

Fonte: Gautério, 2013.

Observando a tabela (6) percebe-se que a melhor FO Final aparece no teste T6 que foi obtida pela estrutura 3 com o valor de 4.734,17 unidades, sendo 2.302,20 correspondente à distância percorrida e 2.431,97 à soma das parcelas de tempos. Houve uma redução da FO Inicial a 34,75% e foram construídas 2 rotas. Na Rota 1, foi escolhido o veículo do tipo S10 (5 passageiros) e na Rota 2 o veículo do tipo *Ranger* (5 passageiros). Os veículos percorrem 2.302,20 km em um Tempo de Viagem Total das duas rotas de 48,68 h.

Em relação aos demais testes do cenário, percebe-se que todos geraram duas rotas e que houve os três tipos de movimentos. Salienta-se que em algumas estruturas de cada teste, têm-se resultados que não precisaram de movimentos de reordenação, realocação ou trocas, por dois motivos: se for realizado o movimento, há um excesso na capacidade do veículo ou há um aumento no valor da FO Final.

Analisando a quantidade de movimentos na tabela (6) pode-se concluir, a priori, que para alguns testes com poucos movimentos (T1, T12,

T15) a FO Final não é tão boa considerando o percentual de melhora da FO Inicial e comparando com os demais testes. Porém, não é conclusivo afirmar que quanto maior o número de movimentos melhor será a FO Final, pois para testes com quantidade grande de movimentos (T2, T4, T10, T11) a FO Final pode não ter uma solução tão boa, como em T4 ou T10 em que a FO Final tem valor diferente e a distância percorrida é a mesma.

Os resultados do teste T6 foram comparados com os resultados do cálculo manual das rotas para as 5 requisições do cenário analisado, conforme é feito empiricamente para o problema real. Este cálculo foi feito utilizando os mesmos valores de distância e tempos aproximados utilizados no teste T6 e considerando a duração dos tempos de embarque e desembarque, o tempo de parada para refeição, o tempo de pernoite e a duração dos tempos em que o veículo fica parado nos locais da entrega aguardando a coleta dos servidores que foram entregues.

Utilizando as 5 requisições fez-se uma programação empírica dos veículos de acordo com informações fornecidas pelo tomador de decisão para o problema real. Assim, de acordo com os horários das requisições são programadas 4 rotas e utiliza-se 3 veículos, sendo 2 rotas para a *Ranger*, 1 rota para a *Zafira* e 1 rota para a *Sprinter*.

Nestas condições, foi obtida a distância total percorrida das 4 rotas, a soma dos tempos de viagem entre os locais e o valor do tempo total de viagem penalizado em relação ao tempo máximo permitido. Salienta-se que não foi considerado na FO Final deste cálculo empírico o valor dos tempos penalizados dos horários estimados e programados, pois na prática não são considerados. Assim, a FO Final resultou em 5.850,37 unidades, sendo 1.835,40 referente ao total da distância percorrida e 4.014,97 correspondente à soma dos tempos entre os locais e tempo máximo de viagem penalizado. Além disso, obteve-se como tempo total de viagem destas rotas o valor de 55,05 h. Para melhor entendimento, estes valores estão dispostos na tabela (7) onde são comparados aos valores do teste T6.

Nesta comparação da tabela 7, percebe-se que no cálculo empírico a FO Final tem o valor maior que no teste T6, mesmo não considerando os horários estimados e programados penalizados no cálculo empírico. Isto ocorre devido ao valor da parcela dos tempos na (FO), onde está incluído o valor penalizado do tempo total de viagem em relação ao máximo permitido.

Tabela 7 - Comparação de T6 com o resultado empírico

| Dados | T6 | Empírico |
|-------------------------|----------------|----------------|
| Temp. Viagem | 48,68 | 55,05 |
| FO Final | 4.734,17 | 5.850,37 |
| Distância | 2.302,20 | 1.835,40 |
| Parcela dos Tempos | 2.431,97 | 4.014,97 |
| Quant. Rotas (veículos) | 2 (2 veículos) | 4 (3 veículos) |

Fonte: Gautério, 2013.

Observa-se também nesta comparação que o tempo de viagem em T6 é menor e utiliza-se 2 veículos em 2 rotas, enquanto que para o cálculo empírico tem-se o tempo de viagem de 55,08h utilizando-se 3 veículos em 4 rotas. Além disso, tem-se um custo de Tempo de Espera de R\$ 380,00 no empírico, apesar do Custo Total ser próximo do encontrado no teste T6. Como em T6 utiliza-se apenas 2 veículos, a distância percorrida será maior para atender às requisições e o custo de combustível também, de acordo com o tipo de veículo utilizado.

6. Considerações Finais

Neste trabalho foi apresentada a formulação matemática, metodologia e características do aplicativo desenvolvido para análise da programação de veículos do problema de coleta e entrega aplicado na logística da EaD. A formulação matemática desenvolvida tem suas variáveis e parâmetros genéricos, de forma que podem ser utilizados para outras situações reais.

Foram apresentados os dados utilizados na simulação e os resultados dos 15 testes realizados com um cenário de 5 requisições para validar o aplicativo e formulação desenvolvida. Os resultados foram considerados satisfatórios para as restrições, parâmetros e requisições utilizadas nesta simulação, visto que foi possível obter rotas viáveis com custos de transporte minimizados. Conforme o teste T6, onde no problema real utiliza-se 3 veículos, ajustando as datas e horários das requisições é possível utilizar apenas 2 veículos. Porém, é necessário que o tomador de decisão (coordenador de logística) verifique qual a melhor opção de rota de acordo com a disponibilidade de recursos financeiros e veículos.

As heurísticas desenvolvidas foram importantes e proporcionaram um bom desempenho do algoritmo Recozimento Simulado. O aplicativo mostrou-se robusto e pode ser utilizado para a solução de outros problemas reais com adaptações na sua estrutura. O tempo computacional não foi o foco desta pesquisa, mas

pode ser melhorado ao longo dos testes a serem realizados e alterações nas estruturas programadas, bem como valores dos parâmetros utilizados.

Ainda, é possível considerar o acréscimo de outras restrições ao problema na implementação, tais como: flexibilizar o horário limite de pernoite, quantificar e limitar o tempo de permanência de uma pessoa no veículo e o tempo máximo de viagem de um motorista. Nesta primeira implementação, estas condições foram desconsideradas.

Acredita-se que este trabalho contribui para a pesquisa operacional, pois apresenta uma nova proposta de modelo matemático do problema de coleta e entrega que considera janelas de tempo com requisições de passageiros e que pode servir como referência para outros trabalhos ou continuidade dos estudos.

Como sugestão de trabalhos futuros, propõe-se a realização de novos testes com alteração nos valores dos parâmetros das janelas de tempos e nas penalizações. É possível também avaliar o modelo para outros problemas reais e alterar a forma de apresentação dos resultados no aplicativo, bem como outros métodos de execução.

7. Referências Bibliográficas

- ASSIS, L. P. **Algoritmos para o problema de roteamento de veículos com coleta e entrega simultâneas**. 2007. 85 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.
- BRASILEIRO, L. A.; LACERDA, M. G. Análise do uso de SIG no roteamento dos veículos de coleta de resíduos sólidos domiciliares. **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**, v.13, n° 4, p. 356-360, São Paulo, 2008.
- BODIN, L. D.; GOLDEN, B. L.; ASSAD, A.; BALL, M. *Routing and scheduling of vehicles and crews: The state of the art*. **An International Journal Computers and operations research**. v. 10, n° 2, p. 63-212, 1983.
- COSTA, C. E. S. **Aplicação de técnicas de pesquisa operacional na determinação de setores de atendimento de uma concessionária de energia**. 2005. 146 f. Dissertação (Métodos Numéricos em Engenharia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- FARIA, A.; YAMASHITA, M.; TOZI, L. A.; SOUZA, V. J.; BRITO JR, I. *Dial-a-ride Routing System: the study of mathematical approaches used in public transport of people with physical disabilities*. In: 12th WCTR, 2010, Lisboa, Portugal. **Anais do 12th WCTR**, Lisboa, Portugal, 2010.
- GAUTÉRIO, E. G.; HARTWIG, S. C.; PEREIRA, E. C.; MACHADO, C. M. S. **Análise de custos por roteamento em EaD**. In: 4^a CONFERÊNCIA SUL DE MODELAGEM COMPUTACIONAL E IX ENCONTRO REGIONAL DE MATEMÁTICA APLICADA E COMPUTACIONAL, 2010, Rio Grande. **Anais do 4^o MCSul e IX ERMAC**, Rio Grande, 2010.
- GAUTÉRIO, E. G.; PEREIRA, E. C. Logística da EaD: aplicação para o problema *dial-a-ride*. In: XV SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA, 2012, Rio de Janeiro. **Anais do XV SPOLM**, Rio de Janeiro, 2012.
- GAUTÉRIO, E. G. **Programação de veículos com coleta e entrega: metodologia heurística baseada no recozimento simulado**. 2013. 132 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) – Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2013.
- GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos**. Rio de Janeiro: Campus, 2000.
- HAIDEMANN, H. P. **O problema dial-a-ride estático: estudo de caso para o transporte escolar**. 2007. 148 f. Dissertação (Mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.
- IZQUIERDO, V. B. **Uma proposta de especificação formal e fundamentação teórica para Simulated Annealing**. 2000. 150 f. Dissertação (Mestrado em Computação) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- JÚNIOR, A. C. G.; SOUZA, M. J. F.; MARTINS, A. X. *Simulated Annealing* aplicado à resolução do problema de roteamento de veículos com janela de tempo. **Revista Transportes**, v. XIII, p. 5-20, 2005.
- KAISER, M. S. **Aplicação de meta-heurística híbrida na resolução do problema dial-a-ride**. 2009. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- LU, Q.; DESSOUKY, M. M. *A new insertion-based construction heuristic for solving the pickup and delivery problem with hard time windows*. **European Journal of Operational Research**. (175: 672-687), 2006.
- MAURI, G. R.; LORENA, L. A. N. Uma nova abordagem para o problema *dial-a-ride*. **Revista Produção**, v. 19, n° 1, p. 041-054, 2009.
- PRATA, P. A. **Proposta de um algoritmo para o problema de roteirização do transporte escolar rural**. 2009. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, 2009.
- RODRIGUES, S. B. **A meta-heurística colônia de formigas aplicada a um problema de roteamento de veículos: caso da Itaipu Binacional**. 2007. 98 f. Dissertação (Mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.
- ZNAMENSKY, A.; CUNHA, C. B. Um modelo para o problema de roteirização e programação do transporte de deficientes. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 1999, São Paulo. **ANPET**, p. 59-62, São Carlos, 1999.