

COMPETIÇÃO ENTRE COLÔNIAS DE FORMIGAS APLICADA À DESIGNAÇÃO DE LOCOMOTIVAS DE MANOBRAS EM PÁTIOS FERROVIÁRIOS

Jodelson Aguilar Sabino

Departamento de Informática
Universidade Federal do Espírito Santo

José Eugênio Leal

Departamento de Engenharia Industrial
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

RESUMO

Este artigo apresenta uma meta heurística baseada em sistemas de colônias de formigas, para resolver o problema de designação de locomotivas de manobras em pátios ferroviários. De acordo com a modelagem proposta, o problema aqui apresentado é similar ao conhecido na literatura como Full Truckload Pickup and Delivery Problem with Time Windows and Capacity Constraints (PDPTWC) e o objetivo é atender a um conjunto de pedidos de transporte com custo mínimo o qual é descrito como uma função multi-objetivo. São apresentadas as características específicas deste problema e é proposto o algoritmo RR-COMPETants, desenvolvido para apoio à decisão no processo de designação de locomotivas de manobras. A validação do modelo e a estimativa dos ganhos potenciais com a aplicação do algoritmo proposto são feitos com base em um estudo de caso.

ABSTRACT

This article proposes a meta-heuristic method based on a multiple ant colony system to solve the problem of switch engines assignment in a railroad yard. According to the proposed modeling, the problem presented here is similar to the one known in the literature as a Full Truckload Pickup and Delivery Problem with Time Windows and Capacity Constraints (PDPTWC) and our objective is to fulfill a set of transportation requests with minimal cost, which is described as a multi-objective function. The specific characteristics of this problem are presented and an algorithm named RR-COMPETants algorithm is proposed as a decision support tool for switch engine assignment. The model validation and an estimative of cost reduction with the implementation of the proposed algorithm are done based on a case study.

1. INTRODUÇÃO

Nas suas poucas décadas de existência, a Otimização Combinatória demonstrou avanços significativos não só no campo teórico, como também na aplicação das metodologias desenvolvidas para solução de problemas práticos. Este fato fica evidente se compararmos a abordagem feita em trabalhos como Assad (1980), Haghani (1987) e Cordeau, Toth e Vigo (1998). Enquanto os dois primeiros se referiam à aplicação de modelos de otimização em ferrovias como algo promissor, mas ainda pouco explorado, o terceiro estudo apresenta uma lista extensa de problemas modelados e tratados por vários métodos diferentes.

Este trabalho apresenta um estudo de Otimização Combinatória aplicado à área de Sistemas de Transportes. A sua principal motivação é a criação de vantagem competitiva para o processo operacional de grandes terminais ferroviários. Kumar e Rajan (2002) relatam que um sistema de transporte eficiente é a base de sustentação de qualquer cadeia de suprimentos. Os custos de transporte representam uma parte importante do custo total de logística e, portanto, influenciam o custo de venda dos produtos aos consumidores finais. Em complemento a esta observação, no âmbito dos sistemas de transportes ferroviários, Kraft (2002) afirma que a melhor forma de atrair novos negócios e melhorar a produtividade das ferrovias é prover serviços confiáveis com prazos de entrega garantidos, o que demanda melhorias na operação de pátios e terminais.

Neste contexto, o planejamento ferroviário, considerando os níveis estratégico, tático e operacional, tem sido objeto de estudo de muitas pesquisas como as de Haghani (1989) e Ferreira (1997), no entanto, é reduzido o número de trabalhos como o de He, Song e Chaudhry (2003), que tratam especificamente das operações de terminais. Mais reduzido ainda é o número de trabalhos que tratam das operações dos terminais sob o ponto de vista das locomotivas que executam as manobras. Em geral, como em Kraft (1998), o planejamento operacional é feito sob o ponto de vista dos movimentos dos vagões no terminal.

Até onde se tem conhecimento, a primeira referência conhecida ao problema de designação de locomotivas para execução de manobras em terminais ferroviários é o método, baseado em otimização discreta, apresentado por Charnes & Miller em 1956 (apud LUBBECKE, 2001, p. 2). Depois deste, o próximo trabalho identificado na literatura é o de Lubbecke (2001), que propõe uma modelagem baseada em multiple-vehicle pickup and delivery problem with time windows (m-PDPTW) e desenvolve uma solução para o problema de otimização matemática resultante desta modelagem, utilizando o método de geração de colunas. O presente trabalho se propõe a contribuir para esta linha de pesquisa, desenvolvendo uma solução baseada na metaheurística de Sistemas de Colônias de Formigas para resolver este problema. Os objetivos específicos são a minimização do número de locomotivas utilizadas e, simultaneamente, do tempo necessário para a execução de um conjunto de manobras previamente definidas.

É importante esclarecer que, como é característico dos métodos heurísticos, o algoritmo proposto não pretende encontrar a solução ótima para o problema em questão. O que se procura é uma boa solução em um determinado intervalo de tempo especificado. Este intervalo de tempo deve ser definido pela área responsável pelas operações do pátio ferroviário e deve ser tal que possibilite a utilização do plano proposto como informação de apoio à tarefa de planejamento de manobras. A qualidade da solução apresentada deve ser tal que, quando aplicado em um caso prático, seja capaz de produzir algum ganho em relação ao processo que esteja em uso.

O texto está organizado em seis capítulos, a começar pela presente introdução. O item 2 apresenta o problema de designação de locomotivas de manobra em pátios ferroviários. Primeiro de uma forma superficial e depois, após a definição dos elementos envolvidos, o mesmo problema é apresentado de uma maneira mais formal. O item 3 analisa as principais características do problema apresentado e na sequência, no item 4 é apresentado o método utilizado para a solução. O item 5 apresenta o resultado de um teste de aplicação da ferramenta computacional que implementa o algoritmo desenvolvido e é feita uma projeção da redução potencial dos custos operacionais baseada em dados reais de uma ferrovia nacional. O item 6 apresenta as conclusões do trabalho e o texto se encerra com as referências bibliográficas.

2. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Um terminal ferroviário pode ser modelado como uma rede de linhas férreas sobre a qual circulam locomotivas de manobras. As locomotivas de manobras atendem a uma sequência de requisições de transporte de vagões, conhecidas como ordens de manobras. Cada ordem de manobra requer a coleta de um conjunto de vagões em uma determinada linha de origem e que estes sejam entregues em uma linha de destino. Uma manobra, no contexto ferroviário, portanto, corresponde a uma operação de separação (ou corte) de um conjunto de um ou mais vagões, seguida do engate deste conjunto numa locomotiva e da movimentação da locomotiva mais os vagões de uma linha de origem para uma linha de destino. As decisões envolvidas no planejamento de manobras são, em geral, de responsabilidade dos supervisores de manobras, que fazem a designação baseados em intuição, experiência pessoal e nas informações disponíveis sobre a situação do pátio em um dado instante. Infelizmente, pode ser humanamente impossível tratar todas as informações disponíveis em tempo hábil para a tomada de decisão, principalmente nos horários de pico. Sendo assim, o processo de decisão pode ser extremamente difícil e, nestas circunstâncias, não é possível garantir o uso otimizado dos recursos envolvidos. Além disso, o processo gerenciado desta forma não garante regularidade do prazo de entrega do frete já que a produtividade deste processo é influenciada por fatores como o grau de congestionamento do pátio e número de ordens de manobras que chegam por intervalo de tempo. É exatamente neste ponto que surge o interesse em desenvolver uma ferramenta computacional para apoio à decisão, visando aumentar a eficiência do processo.

O problema de designação de locomotivas de manobra em pátios ferroviários consiste em definir a locomotiva que deve executar cada manobra e em que ordem as manobras associadas a cada locomotiva devem ser executadas de modo a minimizar os custos operacionais do pátio, sendo dada uma lista de ordens de manobra a serem executadas, o leiaute do pátio e a posição de cada locomotiva de manobra que se encontram nele. O enunciado mais preciso e formal deste problema requer a definição dos elementos envolvidos.

2.1. Definições

Seja R um conjunto de requisições de transporte, ou, mais especificamente, um conjunto de ordens de manobra. Associado a cada ordem de manobra $r \in R$, existe um conjunto de vagões de peso total $w_r \in \mathbb{Q}^+$ que deve ser transportado de uma linha lógica de origem r^+ até uma linha lógica de destino r^- , ambas localizadas no pátio. Como em Lubbecke (2001), o termo *linha lógica* identifica linhas que são distintas, ao contrário das linhas físicas de origem e destino, que podem coincidir para duas ordens de manobra quaisquer.

Seja então $R^+ = \{r^+ \mid r \in R\}$ o conjunto de origens e $R^- = \{r^- \mid r \in R\}$ o conjunto de destinos das ordens de manobra. Para cada requisição $r \in R$, está definido:

- Uma janela de tempo $[a_r, b_r]$ que determina o início mais cedo possível a_r e o término mais tarde permitido b_r para execução da referida manobra;
- Um tempo de serviço S_r , requerido na origem, para conexão dos vagões à locomotiva de manobra (e.g. carregar ou descarregar o sistema de ar comprimido e conectar ou desconectar os vagões à locomotiva)

Além disso, seja E o conjunto de veículos disponíveis para realização das requisições de transporte, ou seja, o conjunto de locomotivas de manobras disponíveis no pátio em um intervalo de tempo de duração h compreendido entre os horários h_i e h_f . O referido intervalo de tempo, assim como em Savelsbergh e Sol (1996, p. 25), é chamado de *horizonte de planejamento*.

A cada locomotiva de manobra $e \in E$ estão associados:

- Uma capacidade de tração $p_e \in \mathbb{Q}^+$;
- Uma linha lógica e^+ , onde esta locomotiva se encontra estacionada, inicialmente;
- Uma linha lógica de destino e^- , onde a mesma estará localizada ao final do horizonte de planejamento.

Seja o grafo direcionado com peso $G = (V, A)$, onde o conjunto de nós V compreende todas as linhas com relevância para as ordens de manobras ou locomotivas, ou seja:

$$V = \bigcup_{r \in R} \{r^+, r^-\} \cup \bigcup_{e \in E} \{e^+, e^-\} \quad (1)$$

E as arestas $(i,j) \in A$ com $i \neq j$ correspondem ao conjunto de pares i e j de nós de V cuja visita, nesta seqüência, é viável operacionalmente para alguma locomotiva de manobra $s \in E$.

Para cada aresta $(i,j) \in A$, considera-se cada locomotiva $e \in E$ que pode percorrer esta aresta e a esta tupla $((i,j), e)$ associa-se os valores t_{ij}^e , que corresponde ao tempo requerido para percorrer o caminho que vai da linha i até a linha j pela locomotiva e , e c_{ij}^e , que corresponde ao custo do deslocamento da linha i até a linha j pela locomotiva e .

Um caminho de coleta e entrega ou *pickup and delivery path* é um conjunto ordenado

$$O_e = \{e^+, i_1, i_2, \dots, i_n, e^-\} \subseteq V \quad (2)$$

representando um caminho simples e direcionado em G para uma locomotiva de manobras $e \in E$, satisfazendo as propriedades (3a) a (3e).

$$\{r^+, r^-\} \subset O_e \text{ ou } \{r^+, r^-\} \cap O_e = \emptyset \quad \forall r \in R \quad (3a)$$

$$\text{Se } i_{v1} = r^+ \text{ e } i_{v2} = r^- \text{ para um dado } r \in R, \text{ então } v_2 = v_1 + 1 \quad (3b)$$

$$w_r \leq p_e \quad \forall r \in R \mid r^+ \in O_e \quad (3c)$$

$$\text{Se } i_k = r^+, \text{ então } T_{r^-} \leq b_r \text{ e } T_{r^+} = \max\{a_r, T_{k-1} + t_{(k-1)(k)}^e\} \quad (3d)$$

$$T_{e^+} \leq h_f \text{ e } T_{e^-} \geq h_i \quad (3e)$$

onde T_i é o momento em que a locomotiva $e \in E$ chega ao nó $i \in V$.

A condição (3a) força o emparelhamento e a condição (3b) a seqüência entre os pontos de coleta e entrega de vagões no caminho de uma locomotiva s . A condição (3c) é a restrição de capacidade do problema. A condição (3d) indica que a locomotiva pode chegar ao local de coleta dos vagões antes do início da janela de tempo, porém, se isto ocorrer, a referida locomotiva tem que esperar até o tempo a_r . Finalmente, a condição (3e) especifica que as ordens de manobra devem ser executadas dentro do horizonte de tempo h .

Seja um conjunto

$$\Omega = \{O_e\}_{e \in E} \quad (4)$$

de caminhos de coleta e entrega tal que:

$$\bigcup_{e \in E} O_e = V \quad (5)$$

É importante observar que, eventualmente, para uma certa locomotiva $s \in E$ pode-se ter $O_s = \{s^+, s^-\}$. Este conjunto O_s com dois elementos apenas, representa a possibilidade da locomotiva $s \in E$ não ser usada, ou seja, sendo k_s o número de ordens de manobra executado pela locomotiva s no caminho O_s , pode-se ter $k_s = 0$.

Seja z_Ω o número de caminhos de coleta e entrega em Ω em que $k_e = 0$.

2.2. Enunciado

O problema de designação de locomotivas de manobra em pátios ferroviários consiste em encontrar o conjunto Ω_m , que satisfaz as condições (6a) e (6b) abaixo:

$$C = \sum_{e \in E} \sum_{k, k+1 \in O_e} c_{k, k+1}^e \text{ é mínimo} \quad (6a)$$

$$z_{\Omega_m} \text{ é máximo} \quad (6b)$$

Estas condições traduzem, em termos práticos, o objetivo de redução dos custos variáveis e fixos, respectivamente, associados ao conjunto Ω_m .

Vale notar que o conjunto Ω_m , assim como qualquer conjunto Ω , induz uma partição do conjunto de nós em $i \in V$ e também do conjunto de ordens de manobra $r \in R$.

Um problema semelhante a este é apresentado e modelado também como um grafo direcionado com pesos em Lubbecke (2001). Outros problemas semelhantes foram formulados matematicamente, conforme apresentado em Mitrovic-Minic (1998) e Sol (1994), como problemas de programação inteira não linear com três tipos de variáveis (i.e. variáveis de fluxo binário, variáveis de tempo e variáveis de carga), onde o objetivo é minimizar os custos envolvidos. Uma formulação

matemática para um problema genérico deste tipo é apresentada em Savelsbergh e Sol (1995), mas estas abordagens são mais convenientes para o desenvolvimento de métodos exatos de solução, o que, como veremos adiante, não é o objetivo deste trabalho.

Este problema pode ser formulado matematicamente, conforme apresentado em Mitrovic-Minic (1998) e Sol (1994), como um problema de programação inteira não linear com três tipos de variáveis (i.e variáveis de fluxo binário, variáveis de tempo e variáveis de carga), onde o objetivo é minimizar os custos envolvidos. Outra formulação matemática interessante é feita usando um grafo direcionado com pesos, conforme descrito em Lubbecke (2001). Estas abordagens são mais convenientes para o desenvolvimento de métodos exatos de solução.

3. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

O problema apresentado no item 2 acima pode ser interpretado como um problema de coleta e entrega, com janela de tempo, veículos capacitados, frota heterogênea e carga completa. Esta é um caso especial de um problema bem conhecido na literatura como PDP (Pickup and Delivery Problem), o qual, por sua vez, é um caso especial do VRP (Vehicle Routing Problem).

Um VRP típico é o problema de distribuir cargas para usuários finais (i.e. clientes) utilizando uma frota de veículos que se movimentam por uma malha rodoviária. Este é um problema freqüente na vida real. A distribuição de produtos tais como bebidas, pão, gasolina e produtos farmacêuticos bem como o transporte de encomendas e o serviço de rádio táxi urbano são exemplos imediatos de atendimentos feitos por uma frota de veículos cuja operação retrata exatamente o modelo do VRP. Segundo Bräysy (2000), além de ser reconhecido, na prática, como um dos casos de grande sucesso da Otimização Combinatória, o VRP é também um dos problemas mais difíceis de resolver. A tarefa de planejamento, requerida na solução deste problema, é de grande complexidade, mesmo para uma frota pequena de veículos e um número moderado de cargas a serem distribuídas.

A solução de um VRP requer a determinação de um conjunto de rotas, cada qual percorrida por um determinado veículo que a inicia e termina seu percurso em determinada localidade base. As rotas devem ser escolhidas de modo a satisfazer a um conjunto pré-definido de restrições e ao mesmo tempo minimizar os custos globais de transporte. Uma boa referência sobre classificação de VRPs, exemplos, modelagem e métodos de abordagem deste problema pode ser encontrada em Toth (2002). O VRP se torna um PDP, quando há uma restrição de precedência na ordem de visita dos clientes servidos por um veículo. O PDPTWC é um PDP em que cada veículo tem uma capacidade, a qual não pode ser excedida pelo peso total das cargas sendo transportadas e, além disso, há um intervalo de tempo dentro do qual cada pedido de coleta e entrega deve ser atendido. Em Mitrovic-Minic (1998) há uma referência completa sobre o PDPTWC, envolvendo a definição e formulação matemática do problema, histórico dos métodos de solução e a apresentação dos principais métodos exatos e heurísticas para solução deste problema. Finalmente, a expressão Carga completa ou Full Truckload se refere à restrição de que um veículo só pode apanhar uma nova carga se estiver vazio, ou seja, não é permitido o transporte compartilhado de carga em determinados trechos.

4. MÉTODO DE SOLUÇÃO

O PDPTW é um problema NP-hard, e problemas do mundo real, como o apresentado na sessão 3 envolvem dezenas ou centenas de ordens de manobra e dúzias de linhas de coleta e entrega. Devido a isto, não há muitas chances de se encontrar um algoritmo exato que uma vez implementado em um computador seja capaz de encontrar uma solução em um tempo aceitável. Esta é a principal razão pela qual algoritmos heurísticos vem sendo empregados para resolver esta família de problemas desde o início da década de 1970.

Segundo Mitrovic-Minic (2001), as heurísticas para resolver o problema de designação e definição de sequência resultante no processo de solução do PDPTW podem ser classificadas em dois grandes grupos:

- Métodos Heurísticos Clássicos, os quais constroem, por decomposição ou inserção, um conjunto de rotas viáveis a partir do zero ou procuram melhorar uma solução inicial através da aplicação de uma versão de algoritmo de busca local;
- Métodos Heurísticos Modernos, também chamados de Metaheurísticas, os quais são processos de geração iterativa que guiam uma heurística subordinada através da combinação de conceitos diferentes baseados em inteligência para buscar novas oportunidades e ao mesmo tempo explorar o histórico das soluções construídas no espaço solução.

O algoritmo proposto neste trabalho é uma variação do algoritmo COMPETants, apresentado em Doerner, Hartl e Reimann (2001), como solução para um problema típico de provedores de serviço de logística. A partir do algoritmo original foram feitas as modificações necessárias para adequá-lo para a resolução do problema específico da designação de locomotivas de manobra. O algoritmo proposto foi denominado RR-COMPETants, em alusão às iniciais do termo em inglês *rail road* e ao nome do algoritmo original. Ambos são métodos heurísticos modernos cuja característica principal é a presença de dois grupos de agentes que buscam cooperativamente, e em paralelo, dois objetivos diferentes. A técnica utilizada em ambos os algoritmos é conhecida na literatura como Otimização com Colônias de Formigas ou ACO, do termo equivalente em inglês *Ant Colony Optimization*. Antes de apresentar alguns detalhes desta técnica, serão abordadas as semelhanças e diferenças entre o algoritmo RR-COMPETants e o seu predecessor COMPETants.

4.1. COMPETants x RR-COMPETants

A diferença entre o COMPETants e o RR-COMPETants está nos objetos manipulados e nas restrições dos problemas tratados. Os objetos tratados no algoritmo COMPETants são um conjunto de depósitos dispostos numa rede rodoviária por onde circula uma frota de veículos. A cada veículo está associado um depósito para o qual o veículo deve retornar no final de um dado horizonte de tempo e a frota de veículos deve atender a uma lista de ordens de transporte que representam pedidos de deslocamento de carga entre depósitos. A frota de veículos é homogênea, isto é, todos os veículos têm a mesma capacidade (e.g. volume ou peso máximo suportado). No caso das manobras em um pátio ferroviário, as quais são tratadas pelo algoritmo RR-COMPETants, os veículos são as locomotivas de manobras e a frota é heterogênea, ou seja, as locomotivas podem ter capacidades de tração diferentes. Além disso, não há depósitos, porque cada locomotiva tem sua própria posição inicial (geralmente o local de entrega da última ordem de manobra executada por esta locomotiva) e não há necessidade de movimentações adicionais, depois de deixar os vagões no destino da última manobra executada. Em outras palavras, uma locomotiva nunca vai retornar ao seu ponto de partida depois de executar todas as manobras atribuídas a ela, a menos que o seu ponto de coleta do primeiro grupo de vagões coincida com o ponto de entrega da última ordem de manobra. O conjunto de vagões é o elemento sem tração própria que precisa ser movimentado, o que os faz similar às cargas ou pacotes em um problema de transporte. A malha rodoviária, neste caso, é substituída pelo conjunto de linhas do pátio, o qual define as localizações possíveis para a posição inicial das locomotivas e para os pontos de coleta e entrega da carga, que neste caso é um conjunto de vagões, carregados ou não. A restrição de capacidade de tração da locomotiva e a janela de tempo dentro da qual deve ser realizada a manobra completa a caracterização do problema como um PDPTWC. As linhas que constituem o terminal ferroviário definem a localização das locomotivas e dos vagões que circulam nelas. As manobras a serem executadas são ações que modificam a localização das locomotivas e dos vagões. A disposição física das linhas forma uma rede a que chamamos leiaute do pátio e que define, indiretamente, algumas regras de circulação dentro do terminal ferroviário. Por exemplo, se uma linha A não está diretamente conectada a uma linha B, então, não é possível locomover diretamente de A para B sem passar por outras linhas intermediárias entre A e B. Uma ordem de manobra é um pedido de transporte de um determinado conjunto de vagões de uma linha de origem para uma linha de destino. No caso do problema de transporte rodoviário tratado pelo algoritmo COMPETants, cada ordem de transporte contém uma janela de tempo definida pelo cliente a qual deve ser obedecida estritamente. No caso do problema de planejamento de manobras em pátios ferroviários, cada ordem de manobra está associada a um intervalo de tempo dentro do qual deve ser atendida, ou seja, existe um horário mais cedo possível no qual o conjunto de vagões deve ser coletado em sua linha inicial, conhecido como início do intervalo de tempo, e um horário mais tarde possível de entrega dos vagões em na linha de destino, chamado de final do intervalo de tempo. Este intervalo é análogo à janela de tempo do problema de transporte rodoviário. No caso do problema dos pátios ferroviários, os principais fatores que determinam este intervalo de tempo são o cronograma de formação de trens, (e.g. todas as ordens de manobra relacionadas à formação de um certo trem devem estar concluídas antes do horário de partida deste trem), os planos de manutenção e limpeza (e.g. a manobra de apanhar um vagão na oficina só pode iniciar depois que a manutenção estiver concluída) e o cronograma de chegada de trens (e.g. as manobras de desmembramento de um trem só podem iniciar depois da sua chegada). A locomotiva é o único elemento do pátio provido de tração e, por isso, é o executor da ordem de manobra. Além de sua posição inicial, cada locomotiva tem uma potência de tração que limita o peso do conjunto de vagões que ela é capaz de puxar ou empurrar. Esta restrição é análoga à restrição de capacidade de um veículo em um problema típico de transporte. Uma característica importante relacionada às locomotivas de manobra é a velocidade média de deslocamento da mesma carregada ou vazia. Esta velocidade é definida em função da capacidade de tração da locomotiva, da carga sendo transportada e das limitações impostas pela política de segurança do pátio.

Finalmente, o algoritmo RR-COMPETants diferencia-se de seu predecessor por considerar as características e restrições encontradas no contexto operacional do pátio, como, por exemplo: Distância entre linhas, natureza dinâmica da rotina dos pátios, vagões inacessíveis e as restrições de precedência, política operacional das ordens de manobra, ordens de manobra com deslocamento nulo, movimentação de vagões e locomotivas entre pátios, velocidade das locomotivas, linha ocupada, cálculo dos custos aproximados, tempo de serviço e tempo de espera e agrupamento de locomotivas.

4.2. Otimização com Colônia de Formigas

A idéia principal da Otimização com Colônia de Formigas, contida nos algoritmos COMPETants e RR-COMPETants é a busca, desenvolvida paralelamente em vários processos computacionais, baseada em uma estrutura de memória dinâmica onde são incorporadas informações sobre a qualidade dos resultados obtidos previamente. Uma formiga virtual é definida como sendo um agente computacional simples, que constrói, iterativamente, uma solução para o problema em questão usando um padrão comportamental inspirado no comportamento das formigas do mundo real. Soluções parciais para o problema são chamadas de estados. Cada formiga virtual muda de um estado anterior para o próximo estado, o qual corresponde a uma solução parcial mais completa, com o objetivo de chegar ao estado final que é a solução completa. Em cada passo da construção da solução, uma formiga virtual identifica o conjunto de expansões possíveis para a solução atual, ou seja, o conjunto de estados viáveis para o qual se pode passar a partir do estado atual. A mudança para um destes novos estados viáveis é feita de acordo com uma distribuição de probabilidade baseada num valor η correspondente a uma informação específica do problema e associada àquela mudança de estado (e.g. o custo ou a distância) e na quantidade de feromônio τ que indica o quão eficiente foi, no passado, a escolha daquele movimento.

O valor de τ é modificado em cada iteração do processo de busca de modo a aumentar os valores associados aos movimentos que resultaram em uma boa solução (similar ao caso real de uma formiga depositando feromônio em seu caminho) e diminuir todos os demais valores (similar à evaporação do feromônio que ocorre na vida real). A fórmula específica para definir a distribuição de probabilidade para cada movimento depende da variação do algoritmo ACO a ser utilizada, mas, um ponto comum a todas as fórmulas é a presença de uma lista tabuk que indica um conjunto de movimentos inviáveis, dependentes do problema, para a formiga k .

5. TESTES COMPUTACIONAIS

Os testes computacionais foram feitos utilizando dois conjuntos de dados. O primeiro conjunto, denominado RRCPA, foi gerado artificialmente com o objetivo de testar a eficiência do algoritmo e fazer um refinamento de parâmetros do programa. O segundo conjunto, denominado REALW foi constituído de dados reais, obtidos em amostragens diretas em um terminal ferroviário, com o objetivo de verificar os ganhos potenciais da aplicação do RR-COMPETants como ferramenta de apoio ao planejamento operacional. Os referidos ganhos foram estimados através da comparação do plano gerado pelo programa com as decisões tomadas em situações reais de planejamento de manobras em um pátio ferroviário de grande porte.

A métrica utilizada para comparação está baseada nos custos operacionais do pátio durante o intervalo de tempo de medida. Os custos operacionais estão divididos em custos fixos e custos variáveis. Os custos fixos estão associados ao tamanho da frota de locomotivas que atende as manobras do pátio. Nesta categoria estão incluídos, por exemplo, o valor do aluguel ou da prestação referente à sua compra e também o valor correspondente à depreciação das locomotivas. Os custos variáveis estão associados ao deslocamento das locomotivas e consideram, por exemplo, o salário e os encargos associados aos maquinistas e o custo do combustível gasto pelas locomotivas.

Os dados foram coletados a partir de um posto de trabalho montado dentro da sala do Centro de Controle de Terminal da Companhia Vale do Rio Doce, localizado no Terminal Ferroviário de Tubarão em Vitória, Espírito Santo, Brasil. A coleta de dados foi manual através do acompanhamento do trabalho dos supervisores que comandam todas as operações de manobra do terminal. Foram feitas 10 amostragens em horários de pico, durante o mês de setembro de 2002, em intervalos de tempo contínuos com duração variando de 60 a 240 minutos. Os dados foram registrados manualmente utilizando formulários definidos especialmente para este fim e em seguida transcritos para uma pasta de trabalho do Microsoft® Excel, onde eram preparados para entrada no programa RR-COMPETants.

Com base nos dados preparados, foram criados dez conjuntos de dados de entrada distintos para o programa RR-COMPETants, cada um deles referente a uma das amostragens feitas. Foram feitas 500 execuções do programa com cada um destes conjuntos de dados e o valor de referência foi considerando como a moda dos valores observados nas 500 execuções.

A lista de locomotivas disponíveis, bem como suas posições iniciais e capacidades de tração foram obtidas por verificação direta da situação do pátio, antes do início de cada amostragem. O número de manobras executadas e locomotivas disponíveis para cada coleta de dados variou de acordo com a região do pátio e do horizonte de tempo considerado.

De uma forma geral, a verificação da qualidade da solução proposta pelo programa em relação ao implementado na prática foi feita através da comparação dos custos operacionais de execução das manobras, considerando as informações obtidas nas amostragens com estes mesmos custos considerando a solução dada pelo programa. Para tanto, tomou-se aleatoriamente, como referência, uma das dez amostragens feitas, a qual continha uma sequência de 18 manobras executadas em um intervalo de tempo de 2h30m, utilizando-se 6 locomotivas para executar estas manobras. Depois de computado os tempos de locomotiva parada e em deslocamento para as duas soluções, foram desenvolvidos alguns cálculos, partindo do valor do custo de uma locomotiva por hora para se chegar a uma comparação dos custos das duas situações.

No caso da solução utilizando o algoritmo RR-COMPETants, considerou-se o custo fixo relativo às duas locomotivas utilizadas, ao passo que para o caso real, foi considerado o custo fixo das cinco locomotivas utilizadas. Multiplicando-se o valor do custo por hora da locomotiva nas condições *ligada parada* e *ligada se deslocando* pelos respectivos tempos para as duas situações, chegou-se ao custo variável para os dois casos.

A Tabela 1 mostra os custos, tempos e os valores intermediários utilizados até se chegar aos valores totais utilizados para comparação dos custos operacionais no caso da solução implementada na prática e a solução sugerida pelo algoritmo RR-COMPETants. Os valores de tempo são aproximações para os valores reais, porém, os valores de custo foram modificados para preservar a confidencialidade das informações econômicas da Cia. Vale do Rio Doce.

Tabela 1: Estimativa da redução de custos com o uso do RR-COMPETants

	RR-COMPETants	Caso real
CUSTO FIXO		
quantidade de locomotivas	2	5
custo por locomotiva por hora	R\$ 45,66	R\$ 45,66
Horizonte de tempo (horas)	2,5	2,5
TOTAL PARCIAL	R\$ 228,30	R\$ 570,75
CUSTO VARIÁVEL		
Tempo em deslocamento	3,14533	8,05
custo por locomotiva por hora	R\$ 108,45	R\$ 108,45
custo em deslocamento	R\$ 341,11	R\$ 873,02
Tempo parada	1,85	3,07
custo por locomotiva por hora	R\$ 91,44	R\$ 91,44
custo parada	R\$ 169,59	R\$ 280,42
TOTAL PARCIAL	R\$ 510,70	R\$ 1.153,44
TOTAL GERAL	R\$ 739,00	R\$ 1.724,19
REDUÇÃO DE CUSTOS		57,14%

No caso prático, considerando o tempo de operação das locomotivas e o número de locomotivas utilizadas na prática para a execução das manobras, uma comparação direta dos custos envolvidos conduziu à conclusão de que, caso fossem executadas as manobras conforme solução do programa RR-COMPETants, obter-se-ia uma redução média dos custos operacionais das manobras de 57,14% para o período amostrado.

6. CONCLUSÃO

O principal resultado deste trabalho foi a modelagem do problema de designação de locomotivas de manobras, a identificação de algoritmos utilizados para a solução de problemas similares e o desenvolvimento de um algoritmo, baseado no algoritmo COMPETants, para resolver este problema.

A aplicabilidade do algoritmo proposto foi validada através da implementação do mesmo como um programa de computador e a comparação do plano gerado pelo programa com as decisões tomadas em situações reais de planejamento de manobras em um pátio ferroviário de grande porte.

Sob o ponto de vista acadêmico, pode-se dizer que este trabalho consolida informações sobre uma linha de pesquisa específica e ainda muito pouco explorada, já que esta dissertação e suas pesquisas precursoras, Sabino (2002), Sabino et al. (2003) e Sabino e Leal (2003) compreendem as únicas referências conhecidas na literatura que tratam da aplicação de uma metaheurística baseada em sistemas de colônias de formigas no contexto do planejamento operacional de ferrovias.

Sob o ponto de vista prático, os resultados apresentados nesta dissertação preconizam um grande potencial de sucesso na aplicação prática do algoritmo RR-COMPETants. Além de trazer novas oportunidades de refinamento do algoritmo e de seus parâmetros, esta aplicação possibilitará a manifestação da essência da Ciência Aplicada que é a contribuição para a solução de um problema do mundo real.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Assad, A. A. (1981) Analysis of rail classification policies. Working paper N. 20742. College of Business and Management. University of Maryland at College Park.
- Bräysy, O.; Berger J.; Barkaoui, M. (2000) A New Hybrid Evolutionary Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Time Windows. In Route 2000 workshop, Skodsborg, Denmark.
- Cordeau, Jean-François; TOH, Paolo; VIGO, Daniele. (1998) A survey of Optimization Models for Train Routing and Scheduling. Transportation Science. V. 32, n. 4, p. 380-404.
- Doerner, K.; Hartl, R.F.; Reimann M. (1997) Are COMPETants more competets for problem solving? – the case of a multiple objective transportation problem. Technical Report: POM Working Paper 1/2001. Department of Production and Operations Management, Institute for Management Science, University of Vienna, Austria.
- Ferreira, L. (1997) Planning Australian Freight Rail Operations: An Overview. Transportation Research – A. v. 31, n. 4, p. 335-348.
- Haghani, Alli E. (1987) Rail freight transportation: A review of recent optimization models for train routing and empty car distribution, Journal of Advanced Transportation, v.21, p. 147-172.
- Haghani, Alli E. (1989) Formulation and Solution of a Combined Train Routing and Makeup and Empty Car Distribution Model, Transportation Research, v.23B, n. 6, p. 433-452..
- He, S.; Song, R.; Chaudhry S.S. (2003). An integrated dispatching model for rail yards operations. Computers & Operations research. N. 30. pp 939-966.
- Kraft, E. R. (1998) A Reservations-Based Railway Network Operations Management System. 244p. Tese (Doutorado) - Department of Systems Engineering, University of Pennsylvania, Philadelphia, PA, EUA.
- Kraft, E. R. (2002) Priority-Based Classification for Improving Connection Reliability in Railroad Yards. Journal of the Transportation Research Forum, Vol. 56, Issue 1, p. 93–119, Washington, D.C., EUA.
- Kumar, Shashi N.; Rajan, Vijav. (2002) An Analysis of the Intermodal Transport Choices for Pacific-RIM Imports to the U.S. North East. Journal of Transportation Management. v. 13.1. p. 19-17.
- Lubbecke, M. (2001). Engine Scheduling by Column Generation. Tese de Doutorado. Department of Mathematical Optimization, Braunschweig University of Technology, Braunschweig, Alemanha.
- Mitrovic-Minic, S. (1998). Pickup and Delivery Problem with Time Windows: A Survey. Technical report: SFU CMPT TR 1998-12 – School of Computing Science, Simon Fraser University, Burnaby, BC, Canada.
- Mitrovic-Minic, S. (2001). The Dynamic Pickup and Delivery Problem with Time Windows. Tese (Doutorado) School of Computing Science, Simon Fraser University, Burnaby, BC, Canada.

- Savelsbergh, M.W.P.; Sol, M. (1995) The General Pickup and Delivery Problem. *Transportation Research* 29, 17-29.
- Savelsbergh, Martin; Sol, Marc. (1996) DRIVE: Dynamic Routing of Independent Vehicles. Módulo de planejamento incorporado ao sistema de suporte à decisão da Van Gend & Loos BV.
- Sol, M. (1994). Column Generation Techniques for Pickup and Delivery Problems. Tese de Doutorado. Eindhoven University of Technology, Eindhoven, Holanda.
- Sabino, Jodelson A. (2002) Ant Colony Systems Applied to Switch Engine Assignment and Routing in a Railroad Yard, INFORMS Annual Meeting, San Jose, CA, USA.
- Sabino, Jodelson A.; LEAL, José E. (2003) O Planejamento de Manobras em Pátios Ferroviários Visto Como Um Problema de Coleta e Entrega, XVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Sabino, J.; Reimann, M.; Alvarenga A.; Ahonen H. (2003) Ant Systems Applied to Switch Engine Assignment and Routing in a Railroad Yard. In *Optimization Days 2003*, Montréal, Québec, Canada.
- Toth, P.; Vigo, D. (2002). *The Vehicle Routing Problem*. 1st. ed. Philadelphia, PA, EUA: SIAM.