

Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP
Instituto de Ciências Exatas e Biológicas - ICEB
Departamento de Ciência da Computação - DECOM

**Algoritmos Exatos e Heurísticos para o Problema de
Planejamento Operacional de Pátios Ferroviários de
Classificação**

Bolsista: Thiago Araújo Santos de Oliveira

Orientador: Marco Antonio M. Carvalho – DECOM/UFOP

Nota: Relatório Final referente ao período de 17/12/2013 a 31/07/2014, apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto, como parte das exigências do programa de iniciação científica - ações afirmativas / CNPq.

Local: Ouro Preto - Minas Gerais - Brasil

Data: 18 de agosto de 2014

Título do Resumo

Assinatura do orientador(a): _____
Nome Completo do orientador(a)

Assinatura do co-orientador(a): _____
Nome Completo do co-orientador(a)

Assinatura do bolsista: _____
Nome Completo do bolsista

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Descrição do Problema	3
2	Objetivos	5
2.1	Objetivos Específicos	5
3	Fundamentos Teóricos e Revisão	6
4	Materiais e Métodos	8
4.1	Método Desenvolvido	8
4.1.1	Variáveis	8
4.1.2	Algoritmo Construtivo	9
4.1.3	Critério 1	9
4.1.4	Critério 2	9
4.1.5	Observações Sobre o Método Desenvolvido	10
5	Resultados e Discussões	11
6	Conclusão	13

Capítulo 1

Introdução

Segundo a Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários (www.antf.org.br), um pátio ferroviário pode ser classificado como sendo uma área de esplanada em que um conjunto de vias é preparado para formação de trens, manobras e estacionamento de veículos ferroviários, cruzamento entre trens e outros fins.

No transporte de carga ferroviário, as cargas são consolidadas em pontos intermediários da malha ferroviária para gerar um melhor aproveitamento do transporte de matéria prima, uma vez que seu custo associado pode se tornar alto. Os pátios ferroviários de classificação desempenham um papel importante como nós de consolidação nas redes de transporte ferroviário de cargas.

A necessidade da utilização de pátios é uma característica inerente ao transporte ferroviário, que é a de utilizar uma composição de veículos individuais (os vagões), provindos de diversas origens e com diversos destinos, em trens comuns, com o objetivo principal de economizar força motriz, combustível e pessoal envolvido na operação de transporte.

Segundo Wright et al. [1989], a principal função de um pátio de classificação é a de permitir a classificação dos vagões recebidos, a sua separação em blocos e a formação de trens, através de reagrupamento, para a distribuição da carga para os seus vários destinos.

Nos pátios de classificação, trens de entrada são desmembrados, ou seja, os vagões são desacoplados uns dos outros em uma seção de trilhos inclinada chamada *hump*, utilizada para distribuir os vagões em diferentes linhas de trilhos (ou simplesmente linhas) para montar novas composições. Por força da gravidade, os vagões são levados para o pátio de encaminhamento (ou área de formação de trens), onde serão novamente conectados, formando novas composições e despachados através de um sistema de trilhos e desvios, de maneira a suprir as demandas por composições de trens em determinados destinos. Através deste procedimento, os vagões são roteados em composições ao longo da malha ferroviária de maneira que cada par origem-destino é atendido minimizando as viagens diretas ponto-a-ponto que podem causar congestionamento na malha.

O complexo de um pátio pode ser geralmente dividido em três áreas principais, cada uma consistindo de um conjunto de trilhos paralelos:

Área de recepção de trens: área para onde os trens que adentram o pátio são desviados da linha principal e temporariamente armazenados antes de serem desmembrados e classificados. Nesse intervalo de tempo ocorre também a inspeção da composição, sendo que conforme a necessidade os vagões avariados são marcados para serem separados e então destinados ao conserto;

Área de classificação: área onde os vagões são separados e reagrupados em blocos segundo um destino comum, que pode ser o destino final da carga ou outro pátio subsequente;

Área de formação de trens: área onde os trens são formados e armazenados enquanto aguardam outras operações que irão permitir a sua partida, ou seja, o retorno para a linha principal. Entre essas operações estão a inspeção da composição para a partida, a preparação da documentação fiscal do transporte das cargas e o próprio licenciamento da movimentação pela linha principal.

Os vagões são levados para a área de recepção por locomotivas que chegam ao pátio e atravessam da área de recepção até a área de formação de trens, onde são buscados por outras locomotivas que partem do pátio. Como descrito anteriormente, os *humps* fazem uso da força da gravidade para classificar os vagões que descem da área de recepção para a área de formação de trens, de forma que não é necessária alguma locomotiva ou outra força motriz para movimentar os vagões, que são recombinaados em novas composições. A área de classificação é geralmente conectada à área de entrada por uma ou mais linhas de *humps*, o que permite que os vagões sejam classificados repetidamente.

A capacidade de armazenamento de vagões destas áreas é determinada principalmente pela quantidade de linhas disponíveis e pelo comprimento das mesmas. Devido ao espaço limitado e à escassez de outros recursos, os pátios são limitados em termos de:

1. O número de vagões que podem ser classificados;
2. O número de composições que podem ser montadas em um dado período de tempo;
3. O número de vagões que podem ser recebidos em um dado período de tempo;
4. O número de vagões que podem ser despachados em um dado período de tempo;
5. O tempo médio de permanência dos vagões.

As principais funções de um pátio ferroviário de classificação incluem:

1. Receber vagões;
2. Combinar vagões em diferentes composições;
3. Armazenar vagões até o momento de saída do trem correspondente;
4. Montagem dos trens que deixam o pátio.

Os processos de entrada e saída do pátio são os principais e podem ser descritos como a seguir:

- As composições chegam à área de recepção e aguardam pela classificação de seus vagões. Uma vez que apenas uma composição pode ser classificada por vez, a área de recepção deve garantir espaço suficiente para o armazenamento das demais composições que chegarem. Quando uma composição está pronta para classificação ou armazenamento, ela é puxada da área de recepção para o *hump*. Cada vagão ou bloco de vagões de uma composição passa pela linha de trilhos de classificação ao qual foi designado. Normalmente, as linhas da área de classificação já estão ocupadas anteriormente por outros vagões. Como resultado, os vagões que chegam depois são automaticamente conectados aos que já estavam na linha, formando um bloco de vagões.

- Os trens deixam o pátio pela área de formação de trens. Locomotivas puxam os blocos de vagões do final do *hump* para os trilhos adequados da área de formação de trens. Os blocos são montados de acordo com a sequência das estações de destino dos vagões, gerando as composições.

Durante o processo de classificação de um trem de entrada em particular, seus vagões podem ser redistribuídos em várias linhas de classificação, cada uma correspondente a uma estação de destino ou direção.

O posicionamento de vagões nas linhas de classificação é determinado por diferentes fatores, entre eles, a composição de saída determinada para o vagão, que é o maior determinante. Tipicamente, cada composição de saída é designada para uma linha de classificação específica. O posicionamento e movimentação dos vagões nas linhas da área de classificação sincronizam os processos de entrada e saída nesta área, de modo que o processo de classificação e montagem dos blocos de vagões são realizados continuamente entre o recebimento dos vagões e despacho das composições.

A operação deficiente dos pátios ocasionada em grande parte pelo seu congestionamento causa atrasos consideráveis na circulação dos trens e consequentes prejuízos para a empresa na medida em que os atrasos incorrem para a perda de faturamento pela imobilização desnecessária de ativos tais como blocos e vagões.

Segundo Edwards [1999], a tendência atual no meio ferroviário é a de reduzir o número de pátios para um pequeno número de pátios maiores e muito bem equipados e com processos mais automatizados.

1.1 Descrição do Problema

A otimização do planejamento operacional dos pátios ferroviários de classificação é muito importante para as companhias ferroviárias na medida em que auxilia a utilizar de maneira eficiente os recursos limitados da rede ferroviária disponível. As medidas típicas de eficiência de um pátio ferroviário podem ser: o número de trens recebidos/despachados, o número de blocos de vagões montados, o número de vagões manipulados ou o tempo médio do vagão no sistema. Uma lista de medidas de desempenho podem ser encontradas em Lin and Cheng [2009, 2011].

Para aumentar o rendimento do pátio, um planejamento otimizado é altamente desejável. Porém, realizar o planejamento operacional de um pátio ferroviário é um problema desafiador, por conter várias operações e decisão relacionadas entre si, tais como a sequência de desmembramento dos trens que chegam, a sequência de montagem dos trens despachados, sequenciamento de vagões no *hump*, atribuição de blocos de vagões aos trens nas linhas de classificação, etc.

Essencialmente, dados os tempos de chegada dos trens, o objetivo do problema é gerar uma programação de horários para utilização do *hump* e posterior programação de horário para despacho dos trens considerando as diferentes restrições operacionais do pátio. Especificamente, o tempo total de espera dos vagões no pátio deve ser minimizado, e o número total de vagões processados em um determinado período deve ser maximizado.

Um fator de extrema importância para se avaliar a eficiência da operação de um pátio ferroviário é o tempo de permanência dos vagões no mesmo, respeitadas as políticas de formação e programação de trens.

Segundo Gomes [1982], os tempos de permanência dos vagões em pátio podem ser classificados em permanência ativa e permanência passiva. O tempo de permanência ativa é entendido como sendo o intervalo de tempo sobre o qual os vagões encontram-se submetidos a alguma

operação e permanência passiva o intervalo de tempo em que os vagões estão aguardando a execução de alguma operação ou evento. Tanto o período de permanência ativa quanto o de permanência passiva podem se apresentar excessivos, dependendo das características físicas e operacionais do pátio em estudo.

Porém atenção especial deve ser dada a tempos de permanência passiva excessivos, na medida em que denotam, na maioria das vezes, ineficiência operacional. Ainda, segundo Gomes [1982], entre as principais causas de permanência passiva de vagões em pátios ferroviários está a deficiência operacional dos centros de controle operacional.

Capítulo 2

Objetivos

1. Elaborar heurísticas consistentes e robustas que possam ser utilizadas no contexto de problemas de planejamento de pátios ferroviários de classificação que permitam a obtenção rápida de soluções próximas da solução ótima sem que se perca a vantagem da busca sistemática – inicialmente considerando problemas específicos, mas com uma possibilidade de generalização;
2. Avaliar o comportamento heurístico de diferentes formulações para problemas de sequenciamento;
3. Pesquisar técnicas para melhoria fina de soluções obtidas por heurísticas usando programação linear inteira;
4. Ampliar o conjunto de problemas testes com soluções ótimas já conhecidas através da execução de testes sistemáticos usando formulações já desenvolvidas;
5. Será buscada ainda a aplicação prática dos métodos desenvolvidos em contextos reais, a fim de que também seja constituído um avanço para as indústrias nacionais;
6. Além dos objetivos principais, outros produtos deste projeto de pesquisa serão trabalhos publicados em periódicos e eventos nacionais e internacionais, os quais contribuem para a promoção dos centros de pesquisas nacionais e também da tecnologia.

2.1 Objetivos Específicos

1. Propor um modelo de otimização que contemple apropriadamente as especificidades de diferentes associações ferroviárias com os modelos descritos na literatura;
2. Implementação computacional de um software para planejamento de pátios ferroviários de classificação usando ferramentas de Inteligência Computacional, o que inclui a utilização de métodos heurísticos e algoritmos exatos;
3. Avaliação do software implementado considerando dados reais e também com problemas teste publicamente disponíveis;

Capítulo 3

Fundamentos Teóricos e Revisão

Esta seção apresenta os trabalhos mais relevantes da literatura dos problemas relacionados ao planejamento ferroviário. A literatura do Problema de Planejamento Operacional de Pátios Ferroviários de Classificação é escassa, já que poucos trabalhos nesta área são conhecidos.

Cordeau et al. [1998] faz uma revisão da literatura em *Routing Problem* e *Analytical Yard Models*. Para cada grupo de problema, o autor apresenta os modelos utilizados e descreve as características mais importantes em relação à estrutura e algoritmos abordados. Stahlbock and Voß [2008] analisam os trabalhos relacionados à pesquisa operacional em Terminais de Contêineres.

O *Blocking Problem* é modelado por Newton et al. [1998] em forma de rede, onde são aplicados os métodos de geração de colunas e *branch-and-bound* – os melhores caminhos são gerados resolvendo problemas de caminho mais curto. Este problema também é tratado por Ahuja et al. [2007], que aplica o algoritmo *A Very Large-Scale Neighborhood Search Algorithm* a uma solução inicial já existente. No estudo realizado por Lin et al. [2012], o problema do roteamento de trens é resolvido utilizando a metaheurística *Simulated Annealing* aplicada à instâncias reais, providas por companhias ferroviárias chinesas.

O Problema de Planejamento Operacional de Pátios Ferroviários de Classificação foi provado por Dahlhaus et al. [2000] ser da classe NP-difícil. Daganzo et al. [1983] propõe um método para a solução deste problema, chamado *Multistage Sorting Applied to the Triangular Strategy*, que é capaz de resolver casos onde há mais tipos de vagões do que linhas de classificação. Jacob et al. [2007] também trata este problema utilizando o mesmo método. Petersen [1977] faz um estudo dos diferentes tipos de operações realizadas em um pátio ferroviário e faz uma análise probabilística da distribuição dos trens no pátio ao longo do tempo, utilizando o que o autor chama de *Queuing Relations*. Os métodos *Sorting by Train* e *Triangular Sorting* são apresentados por Daganzo [1987a] e Daganzo [1987b], onde o número mínimo de trilhos necessários para classificar os trens é determinado. Daganzo [1986] também faz uma formulação matemática que descreve a quantidade de trilhos necessários para diferentes tipos de classificação, dada a quantidade de trilhos.

Eventualmente, pode ser necessário atribuir locomotivas para mover os vagões dentro dos pátios de classificação. Sabino et al. [2009] trata este problema através do método *Ant Colony Optimization*. O problema foi modelado como o *Multiple Pickup and Delivery Problem*.

Kristina et al. [2012] trata os problemas *Service Selection and Scheduling*, *Car Classification and Blocking*, *Train Make Up* and *Routing of Time-Dependent Customer Shipments* através do método *Slope-Scaling* aplicado em instâncias geradas aleatoriamente. Um apanhado geral sobre os problemas *Railroad Blocking Problem*, *Yard Location Problem*, *Train Scheduling Problem*, *The Locomotive Scheduling Problem*, *Train Dispatching Problem*, *Crew Scheduling*

Problem é feito por Ahuja and Cunha [2005] utilizando programação inteira e programação linear, fluxo em redes, otimização distra, heurísticas, e *Very Large-Scale Neighborhood (VLSN) Search*.

Por último, são apresentados nesta seção os trabalhos realizado pelos 3 primeiros colocados *RAS Problem Solving Competition*. Hai Wang [2013] trata o problema dos Pátios Ferroviários de Classificação utilizando um algoritmo guloso e programação inteira mista. A segunda apresenta bons resultados em 3600 segundos, enquanto a primeira apresenta resultados piores, porém em menos de 5 segundos. Wenliang Zhou [2013] utiliza um algoritmo genético, e o terceiro colocado na competição, cujo artigo não possui referências, optou por abordar o problema através do método de otimização baseado em simulação.

Capítulo 4

Materiais e Métodos

Foi realizada uma revisão sistemática da literatura a respeito do problema tratado e também dos problemas relacionados, conforme descrito no capítulo anterior. Todos os trabalhos foram classificados de acordo com o problema tratado, abordagem e data. Desta forma, foi traçado um panorama acurado do estado da arte da pesquisa relacionada aos pátios de classificação ferroviários. Especificamente, foram analisados profundamente os resultados do *RAS Problem Solving Competition*, uma competição internacional de modelos para solução do problema aqui tratado.

Foram coletadas instâncias e geradores de instâncias adotados pela comunidade acadêmica para o problema tratado, recursos estes que foram utilizados em fases subsequentes do projeto.

Todo o material gerado durante o período foi utilizado para desenvolver uma ferramenta de planejamento para pátios ferroviários de classificação. Esse *software* incorporou tecnologias estado-da-arte em otimização para a resolução de um modelo construído com base em experiências encontradas na literatura.

Após a validação dos resultados obtidos, foi realizada uma avaliação crítica a respeito do trabalho desenvolvido, abrangendo todas as estruturas e estratégias de solução empregadas, a fim de analisar o desempenho individual de cada uma.

Os resultados obtidos pelos métodos propostos foram comparados com resultados obtidos por métodos que compõem o estado da arte em relação a cada problema específico. Na comparação, foram analisados e discutidos a relação entre o desempenho dos métodos propostos e as propriedades de cada solução obtida.

4.1 Método Desenvolvido

Foi desenvolvido um método heurístico construtivo baseado em dois critérios gulosos para seleção do próximo trem a ser processado, todos descritos abaixo.

A implementação foi realizada na linguagem C++, utilizando recursos da *Standard Templates Library*. Por simplicidade, o algoritmo será apresentado em português.

4.1.1 Variáveis

t : instante de tempo atual;

T_{end} : horizonte de planejamento;

t_{hump} : tempo necessário para realizar um hump;

$t_{pullback}$: tempo necessário para realizar um pullback.

4.1.2 Algoritmo Construtivo

O princípio do algoritmo construtivo proposto é dividir o problema tratado em duas partes:

1. Dada a distribuição de todos os blocos de vagões nos trilhos de classificação, determinar a melhor composição de trem de saída que minimize o tempo de espera total dos vagões;
2. Determinar a sequência de humping para os trens de entrada. Esta decisão é baseada na configuração dos trilhos de classificação após o eventual humping de cada trem.

A seguir, o algoritmo é descrito.

```
1  enquanto  $t < T_{end}$ 
2      se um trem chegou ao pátio e há trilho de recepção disponível
3          Aloque este trem a um dos trilhos disponíveis;
4      se há trens esperando nos trilhos de recepção e há hump disponível
5          Escolha um hump e faça o hump de um dos trens (critério 2);
6          Os vagões deste trem chegam ao trilho de classificação no tempo  $t + T_{hump}$ ;
7          O trilho de recepção deste trem fica disponível no tempo  $t$ ;
8          O hump utilizado fica disponível no tempo  $t + T_{hump} + 10$ ;
9      se há um pullback disponível
10         para todas as combinações de trens de saída faça
11             se os vagões nos trilhos de classificação formam uma combinação de trem de
12             saída e respeitam o tamanho mínimo e máximo de um trem de saída
13                 marque esta combinação como viável;
14             Escolha e faça o pullback de um trem de uma das combinações viáveis
15             (critério 1)
16             O trem de saída chega à área de despacho no tempo  $t + T_{pullback}$ ;
17             O pullback utilizado fica disponível no tempo  $t + T_{pullback}$ ;
18         se o tempo desde o último trem despachado  $\geq 10$  e há trens esperando nos trilhos
19         de despacho
20             despache o maior trem que há nos trilhos de despacho.
```

4.1.3 Critério 1

O próximo trem é escolhido com base no valor v_j (exemplificado abaixo), que é uma aproximação do tempo de espera causado aos outros vagões caso escolhêssemos a combinação de trem de saída j . tp_j é o tempo de pullback para o trem de saída j , e nl_j é o número de vagões que permanecerão na área de classificação depois do pullback do trem j . Calculamos v_j da seguinte forma:

$$v_j = tp_j \times nl_j$$

4.1.4 Critério 2

Examine todos os trens que chegaram e estão esperando na área de recepção e faça o hump do maior trem. Outro critério a ser utilizado aqui seria calcular uma aproximação do tempo de espera extra que seria causado pelo hump de cada um dos trens da área de recepção, e escolher aquele que causasse a menor espera.

4.1.5 Observações Sobre o Método Desenvolvido

- Cada trilho da área de classificação só pode ser ocupada por um determinado bloco por vez;
- O tamanho do trem pode ser entre 25 e 150 vagões. Esta restrição é suave (i. e., pode ser violada), porém, haverá uma penalidade caso seja violada;
- Cada pullback pode aguentar até 140 vagões, não mais do que isso;
- Se o algoritmo não puder lidar com o horizonte de planejamento totalmente, uma solução com horizonte de planejamento menor (por exemplo, de 7 dias) pode ser aceita, no entanto, sofrerá uma penalização no final.

Capítulo 5

Resultados e Discussões

É apresentado o experimento computacional nos qual a qualidade das heurística proposta é analisada em contraposição aos métodos de literatura que compõem o estado-da-arte relacionado ao problema tratado neste projeto.

Todos os experimentos foram realizados em um computador Intel i5 Quad Core 3,2 GHz de frequência com 16 GB de memória RAM sob o sistema operacional Ubuntu 12.4.1.

A heurística proposta foi codificada em C++, compilada com gcc 4.4.1 sem opções de otimização. As comparações foram realizadas com os métodos vencedores da *RAS Problem Solving Competition*: o método de otimização por simulação *Team Beaver* e o Algoritmo Genético *Central South University*.

A organização do *RAS Problem Solving Competition* disponibilizou 5 instâncias reais advindas de pátios ferroviários localizados no Reino Unido, exceto pela primeira, uma instância de demonstração.

Os critérios de avaliação de solução são (i) a espera média por vagão, (ii) a espera máxima por vagão e (iii) tempo de execução.

A Tabela 5.1 apresenta a comparação dos métodos considerando as instâncias citadas acima. A primeira coluna da referida tabela apresenta o número de cada instância. Em seguida para o método proposto e para os métodos *Team Beaver* e *Central South University* há três colunas, indicando o tempo médio de execução, o tempo de espera média por um vagão e o tempo de espera máximo por um vagão. Todos os tempos são expressos em minutos.

Tabela 5.1: Comparação entre os métodos do *RAS Problem Solving Competition*.

Instância	Método Proposto			<i>Team Beaver</i>			<i>Central South University</i>		
	Tempo (min)	Espera Média (min)	Espera Máxima (min)	Tempo (min)	Espera Média (min)	Espera Máxima (min)	Tempo (min)	Espera Média (min)	Espera Máxima (min)
2	4,5	262	270	75	215,5	1143	60	264,8	910
3	5,8	348	356	146	267,1	4475	60	343,9	784
4	6,4	358	362	101	320,2	4524	60	370,1	1291
5	7,1	426	433	150	384,8	5498	60	380,2	1117

O método de otimização por simulação de *Team Beaver*, primeiro colocado do *RAS Problem Solving Competition* obteve os melhores resultados para espera média, exceto pela última instância, cujo melhor resultado foi obtido pelo algoritmo genético proposto pela equipe da *Central South University*. Entretanto, o método vencedor da competição possui uma exigência de esforço computacional, conforme descrito a seguir. Em duas instâncias (1 e 4), o método construtivo proposto obtém melhores soluções para a espera média quando comparado com o algoritmo genético.

Considerando o critério de tempo de espera máxima dos vagões, o método proposto obtém os melhores resultados. A diferença entre os resultados dos métodos chega a 12 vezes, como no caso das instâncias 2, 3 e 4 quando comparamos com o método de otimização por simulação de

Team Beaver. Embora a diferença seja menor, até 4 vezes, o algoritmo genético *Central South University* também possui soluções piores em todos os casos.

Comparando a espera média e máxima do método proposto, temos que a diferença entre os dois valores é pequena para todas as instâncias, o que indica um baixo desvio nos tempos de espera para todos os vagões, o que não ocorre com os outros dois métodos comparados. Cabe ressaltar que as instâncias chegam a milhares de vagões.

A heurística construtiva possui os melhores tempos de execução entre os métodos comparados, oscilando entre 4 e 7 minutos. O algoritmo genético proposto pela equipe da *Central South University* possui tempo de execução fixo para todas as entradas, uma vez que o tempo de 60 minutos é o próprio critério de parada para execução do algoritmo. O método de otimização por simulação de *Team Beaver* possui os maiores tempos de execução, com o mínimo de uma hora e quinze minutos para a menor instância e duas horas e meia para a maior instância.

De acordo com os valores apresentados, o método proposto pode passar por melhorias de maneira a aprimorar os valores para o critério de tempo médio de execução, uma vez que possui baixo tempo de execução. Ainda, ressalta-se novamente a robustez do algoritmo, que apresentou pequena variação entre resultados médios e máximos.

Capítulo 6

Conclusão

Este relatório final de iniciação científica relatou o trabalho de pesquisa realizado durante doze meses. Foi necessária a substituição do aluno bolsista devido à participação do mesmo no programa Ciência Sem Fronteiras do governo Federal após os primeiros quatro meses. Ainda assim, o cronograma do projeto foi cumprido rigorosamente, sendo gerada toda a base conceitual para o novo aluno que substituiu o primeiro bolsista.

Um relatório técnico foi gerado e será aproveitado em futuras publicações relacionadas ao tema ao longo da execução do projeto. Um artigo científico será submetido ao prêmio de iniciação científica promovido pela Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional. Como resultados adicionais esperados temos a participação em congressos e conferências onde os temas pesquisados serão discutidos com a comunidade científica.

Referências Bibliográficas

- Ravindra K. Ahuja and Claudio B. Cunha. Network Models in Railroad Planning and Scheduling. 2005.
- Ravindra K. Ahuja, Krishna C. Jha, and Jian Liu. Solving real-life railroad blocking problems. *Interfaces*, 37(5):404–419, 2007. doi: 10.1287/inte.1070.0295. URL <http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/inte.1070.0295>.
- Jean-Francois Cordeau, Paolo Toth, and Daniele Vigo. A survey of optimization models for train routing and scheduling. *Transportation Science*, 32(4):380–404, April 1998. ISSN 1526-5447. doi: 10.1287/trsc.32.4.380. URL <http://dx.doi.org/10.1287/trsc.32.4.380>.
- Carlos F. Daganzo. Static blocking at railyards: Sorting implications and track requirements. *Transportation Science*, 20(3):189–199, 1986. doi: 10.1287/trsc.20.3.189. URL <http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/trsc.20.3.189>.
- Carlos F. Daganzo. Dynamic blocking for railyards: Part i. homogeneous traffic. *Transportation Research Part B: Methodological*, 21(1):1 – 27, 1987a. ISSN 0191-2615. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0191-2615\(87\)90018-X](http://dx.doi.org/10.1016/0191-2615(87)90018-X). URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/019126158790018X>.
- Carlos F. Daganzo. Dynamic blocking for railyards: Part ii. heterogeneous traffic. *Transportation Research Part B: Methodological*, 21(1):29 – 40, 1987b. ISSN 0191-2615. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0191-2615\(87\)90019-1](http://dx.doi.org/10.1016/0191-2615(87)90019-1). URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0191261587900191>.
- Carlos F. Daganzo, Richard G. Dowling, and Randolph W. Hall. Railroad classification yard throughput: The case of multistage triangular sorting. *Transportation Research Part A: General*, 17(2):95 – 106, 1983. ISSN 0191-2607. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0191-2607\(83\)90063-8](http://dx.doi.org/10.1016/0191-2607(83)90063-8). URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0191260783900638>.
- Elias Dahlhaus, Peter Horak, Mirka Miller, and Joseph F. Ryan. The train marshalling problem. *Discrete Applied Mathematics*, 103(1–3):41 – 54, 2000. ISSN 0166-218X. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0166-218X\(99\)00219-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0166-218X(99)00219-X). URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166218X9900219X>.
- J.D. Edwards. *Transportation planning handbook*. Institute of Transportation Engineers, 1999. ISBN 9780935403336.
- C. M. N. Gomes. Análise do desempenho operacional de pátios ferroviários, 1982. Mestrado em Ciências em Transporte.

- Maokai Lin Hai Wang, Jiangang Jin. Solving the railway yard operation problem: Greedy heuristics, integer programming models, and waiting time approximations, 2013.
- Riko Jacob, Peter Marton, Jens Maue, and Marc Nunkesser. 11. multistage methods for freight train classification. In Christian Liebchen, Ravindra K. Ahuja, and Juan A. Mesa, editors, *ATMOS 2007 - 7th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modeling, Optimization, and Systems*, Dagstuhl, Germany, 2007. Internationales Begegnungs- und Forschungszentrum für Informatik (IBFI), Schloss Dagstuhl, Germany. ISBN 978-3-939897-04-0. URL <http://drops.dagstuhl.de/opus/volltexte/2007/1179>.
- Sharypova Kristina, Crainic Teodor Gabriel, van Woensel T., and Fransoo J.C. Scheduled service network design for freight rail transportation. *CIRRELT*, 2012.
- Bo-Liang Lin, Zhi-Mei Wang, Li-Jun Ji, Ya-Ming Tian, and Guo-Qing Zhou. Optimizing the freight train connection service network of a large-scale rail system. *Transportation Research Part B: Methodological*, 46(5):649 – 667, 2012. ISSN 0191-2615. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trb.2011.12.003>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191261511001913>.
- Edward Lin and Clark Cheng. Yardsim: A rail yard simulation framework and its implementation in a major railroad in the u.s. In Ann Dunkin, Ricki G. Ingalls, Enver Yücesan, Manuel D. Rossetti, Ray Hill, and Björn Johansson, editors, *Winter Simulation Conference*, pages 2532–2541. WSC, 2009. URL <http://dblp.uni-trier.de/db/conf/wsc/wsc2009.html#LinC09>.
- Edward Lin and Clark Cheng. Simulation and analysis of railroad hump yards in north america. In *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, WSC '11, pages 3715–3723. Winter Simulation Conference, 2011.
- Harry N. Newton, Cynthia Barnhart, and Pamela H. Vance. Constructing railroad blocking plans to minimize handling costs. *Transportation Science*, 32(4):330–345, April 1998. ISSN 1526-5447. doi: 10.1287/trsc.32.4.330. URL <http://dx.doi.org/10.1287/trsc.32.4.330>.
- E. R. Petersen. Railyard modeling: Part i. prediction of put-through time. *Transportation Science*, 11(1):37–49, 1977. doi: 10.1287/trsc.11.1.37. URL <http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/trsc.11.1.37>.
- Jodelson A. Sabino, José Eugênio Leal, Thomas Stützle, and Mauro Birattari. A multi-objective ant colony optimization method applied to switch engine scheduling in railroad yards, 2009.
- Robert Stahlbock and Stefan Voß. Operations research at container terminals: a literature update. *OR Spectrum*, 30(1):1–52, 2008. ISSN 0171-6468. doi: 10.1007/s00291-007-0100-9. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s00291-007-0100-9>.
- Zhao Zhou Wenliang Zhou, Lianbo Deng. Optimizing the operational plan in railway classification yard by combining genetic algorithm and sub-period rolling, 2013.
- Paul H. Wright, Norman. Ashford, and Radnor Joseph. Paquette. *Transportation engineering : planning and design / Paul H. Wright, Norman J. Ashford*. Wiley New York, 3rd ed. edition, 1989. ISBN 0471838748.