

APLICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE UMA HEURÍSTICA PARA O PLANEJAMENTO DA GRADE DE TRENS

Guilherme S. Ferreira

MRS Logística S.A.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a heurística proposta por Cai e Goh (1993), para a grade de trens de Carga Geral da MRS Logística S.A., no trecho do Vale do Paraíba. Atualmente, essa grade horária não é realizada sobre nenhum método de otimização, e não há processos definidos para a tomada de decisão dos conflitos de circulação durante a fase de planejamento. Buscando uma circulação de trens mais eficiente, este trabalho propõe a construção de uma grade planejada através de regras decisórias e a avaliação dessa em um modelo de simulação.

Palavras-chave: grade de trens, heurística, simulação de eventos discretos, ferrovia

ABSTRACT

This study purpose evaluate the heuristic proposed by Cai and Goh (1993) for the timetable trains at MRS Logística S.A., in the Vale do Paraíba region. Currently, this timetable is not developed using any optimization method, and there is no defined process for decision-making to solve the circulation conflict in the planning stage. To improve the planning, seeking better transit times, this paper proposes the construction of a planning through the decision rules of Cai and Goh (1993) and the evaluation of the timetable by simulation model.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente na MRS Logística existem dois modelos operacionais de trens que circulam na malha ferroviária, os trens de ciclo e os trens de grade. O primeiro modelo geralmente é utilizado para o transporte de mercadorias de baixo valor de mercado e alto volume. Na maioria das vezes são produtos extraídos da natureza e foram pouco beneficiados até o seu transporte. Os trens que circulam seguindo uma grade de trens, possuem cargas com características opostas, ou seja, cargas que passaram por algum tipo de processamento, o que aumenta o valor da mercadoria, porém representam um menor volume. O trabalho será desenvolvido com base nesse segundo modelo.

Estudos passados realizados pela companhia identificaram a necessidade de consolidação das cargas a fim de gerar ganhos de capacidade para clientes que possuam baixo volume de transporte, reduzindo assim a quantidade de composição em circulação e a quantidade de ativos alocados. Com o objetivo de organizar a circulação desses trens mistos, foi estabelecida uma grade horária que determina a partida, as consecutivas paradas e a chegada dos trens ao percorrer um determinado segmento da malha ferroviária. Essa ferramenta foi a chave para melhorar a circulação e o atendimento aos pátios que realizam fronteiras com os terminais de carga e descarga ao longo da ferrovia.

Para garantir o incremento de capacidade e a correta circulação dos trens, é necessário trabalhar a confiabilidade para garantir que os trens cheguem no horário estipulado e assegurar a robustez da grade de trens, procurando permitir que todos os distúrbios sejam tratados sem que haja perda de sua estrutura. Tão importante quanto essas características é o tempo que os vagões levam para completar um ciclo, motivo que originou trabalhos nas últimas quatro décadas com algoritmos e soluções matemáticas para buscar as melhores formas de otimizar o despacho de trem (Zhou e Zhong, 2007; Oliveira, 2001).

O problema de licenciamento dos trens é conhecido como um problema NP-difícil (Cai e Goh, 1993; Higgins *et al*, 1996), que significa que a busca por uma solução global ótima pode

não ser encontrada em tempo polinomial, sugerindo a utilização de heurísticas para encontrar boas soluções factíveis. O trabalho busca avaliar a heurística proposta por Cai e Goh (1993) através de um modelo de simulação para o trecho específico da malha ferroviária, verificando o atributo dos trens como tempo de transito e a aderência a grade.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. O Problema De Decisão Durante O Despacho De Trens

Durante o planejamento ou o despacho de trens numa linha singela podem ocorrer conflitos entre trens que circulam em sentidos opostos, conforme mostrado na Figura 1. Para continuar a movimentação do trem deve-se escolher qual trem deve aguardar num pátio, enquanto o outro deve continuar a sua movimentação para realizar o cruzamento, de acordo com a Figura 2. Essa tomada de decisão, que é recorrente na elaboração dos planos de circulação da ferrovia e durante a atividade de um controlador de tráfego ferroviário, acarreta em maiores tempos de circulação e pode originar outros cruzamentos no decorrer do trecho.

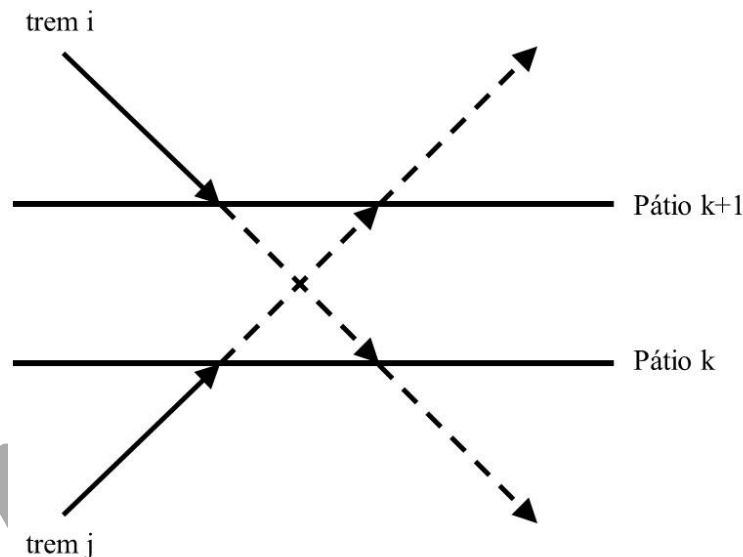


Figura 1: Demonstração de conflito de circulação

Para a tentativa de otimizar o despacho de trens podemos considerar a utilização de técnicas de *scheduling*. Essa técnica busca minimizar tempos ou custos de produção, através do correto sequenciamento das atividades. A modelagem de um problema de *scheduling* é feita através da definição de *jobs* (trens), que devem ser executados em uma certa ordem para cada uma das máquinas (segmento de trecho). Essas máquinas dependem de um certo tempo para executar os *jobs* (Pinedo, 2008). Para o trabalho pode-se dizer que cada trem demora um determinado tempo para atravessar um segmento de trecho, e o modelo tentará resolver qual a melhor sequência de trens para reduzir o tempo de transito total.

Os primeiros trabalhos ligados ao *job-shop scheduling* na ferrovia ocorreram há quarenta anos, com o objetivo de reduzir os atrasos gerado por esses conflitos utilizando técnicas *branch and bound* e em alguns casos aplicação da técnica de *lower bound*, para otimizar a programação (Higgins *et al*, 1996). No entanto, estes algoritmos possuem um elevado tempo de processamento e oferece boas respostas para sistemas restritos (Oliveira 2001). Quando o tempo de solução passa a ser mais importante do que a solução ótima, são utilizados métodos

heurísticos, abandonando a busca de uma solução ótima e procurando uma boa solução (Taha, 2008).

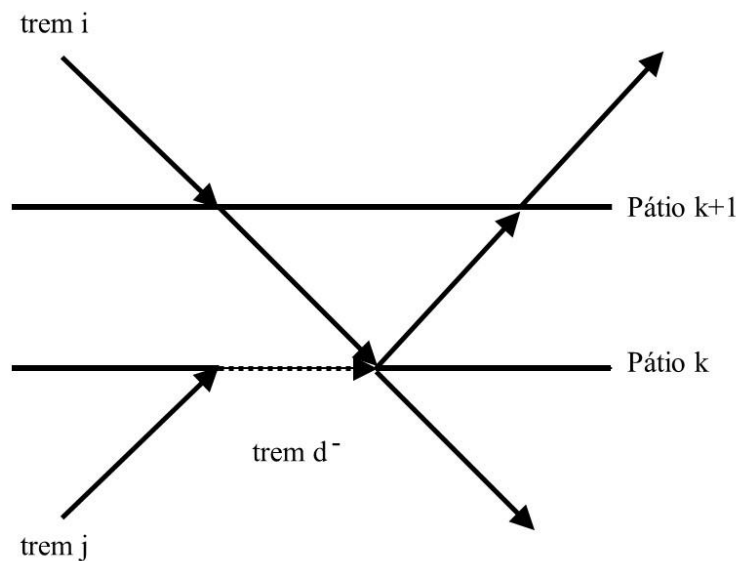


Figura 2: Demonstração da resolução de conflito de circulação

Um dos métodos para buscar a solução dos problemas é a *Greedy Heuristic* no qual cada interação deve escolher qual trem aguardará a passagem do outro, seguindo uma linha de critérios. A heurística recebe este nome, porque define que a primeira decisão não será alterada por quaisquer outras decisões tomadas ou eventos que ocorrerem posteriormente, isto é, uma vez determinado como será o cruzamento entre dois trens, esse não será alterado independente da quantidade de cruzamentos que formar depois. (Moura, 2012)

2.2. Simulação de Eventos Discretos

A simulação é utilizada para analisar sistemas gerando e registrando de maneira aleatória diversos eventos que ocorreriam em um sistema real (Hillier and Lieberman, 2012). Lobato *et al.*, (2008) reforça que os modelos de simulação são comumente utilizados para avaliação do desempenho de um sistema real que não existe ou que deseja-se conhecer o seu comportamento futuro. Quando é necessário estudar e realizar experimentações em sistemas complexos, ou mesmo avaliar novos modelos operacionais antes de sua implementação, pode-se utilizar simulação (Banks *et al.*, 2005).

Segundo Hillier and Lieberman (2012), na construção de modelos de simulação complexos deve-se utilizar diversos blocos construtivos básicos:

1. Definição do estado do sistema
2. Identificar os possíveis estados do sistema que podem ocorrer
3. Identificar os possíveis eventos que mudariam os estados do sistema
4. Um relógio simulado para registrar a passagem do tempo
5. Um método para gerar eventos aleatórios de diversos tipos
6. Uma equação para identificar as transições de estado que são geradas pelos diversos tipos de eventos

O uso de simuladores para avaliação da grade de trens (*timetable*) foi empregado no trabalho de Hooghiemstra & Teunisse (1998), no qual apresentaram um simulador cujo objetivo era avaliar e testar a grade de trens junto ao impacto em outras operações na malha holandesa, também com foco na pontualidade dos trens.

3. METODOLOGIA

3.1. O Vale do Paraíba

Um dos mais importantes trechos na circulação dos trens de carga geral na MRS Logística é o Vale do Paraíba. Esse trecho liga o estado do Rio de Janeiro ao estado de São Paulo, e possui como pátios ferroviários limítrofes o pátio de Pombal e o de Manoel Feio respectivamente.

Como característica do corredor, o transporte de carga geral possui maior relevância frente a outros trechos, existindo então maior circulação de trens que consolidam cargas ao longo do caminho, maior variedade de produtos e menor volume.

O Vale do Paraíba, que pode ser identificado na Figura 3, possui características de linha singela com aproximadamente 298 km de extensão (ANTT, 2015).



Figura 3: Representação do Vale do Paraíba na malha ferroviária da MRS Logística

Fonte: <https://www.mrs.com.br/empresa/ferrovia-frota/> acesso em: 05/07/2015

A circulação dos trens no trecho avaliado é impactada pela circulação em ambos sentidos e também pelas paradas dos trens para anexar e desanexar vagões nos pátios ferroviários. Essas características aumentam o tempo de trânsito dos trens, deixando o modal ferroviário menos competitivo.

3.2. Aplicação Da Heurística Na Grade De Trens

O modelo de Cai e Goh (1993) utiliza como premissa uma malha ferroviária de linha singela com N trens, sendo os trens subdivididos em dois grupos, os trens com sentido Pombal (I) e

os trens com sentido Manoel Feio (J), onde $|I|+|J|=N$.

Os K pátios ferroviários estão ordenados ao longo da extensão do Vale do Paraíba y_1, y_2, \dots, y_k , sendo $y_k < y_{k+1}$. Durante a elaboração da grade de trens, o objetivo da resolução dos conflitos é minimizar o tempo de circulação dos trens ou o custo do trem parado, que pode ser escrito através da seguinte função objetivo:

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K d_{ik} \quad (1)$$

Onde d_{ik} o tempo que o trem i aguarda um cruzamento no pátio k .

Para o modelo foi assumido que o tempo T de circulação dos trens entre dois pátios sequenciais é sempre o mesmo, independente da formação do trem e a velocidade que esse possa desempenhar, definido como $t_{k,k+1}$. Os tempos de entrada dos trens no segmento do trecho estudado, foram previamente programados e fixados.

Um conflito de trem ocorre quando o trem i com sentido decrescente de circulação alcança o pátio $k+1$ no tempo $t_{i,k+1}$ e um trem j com sentido crescente de circulação chega no pátio k , no tempo $t_{j,k}$.

Pode-se determinar o tempo mínimo de atraso entre dois trens através das seguintes equações:

$$d^+ = t_{j,k} + t_{k,k+1} - t_{i,k+1} \quad (2)$$

$$d^- = t_{i,k+1} + t_{k,k+1} - t_{j,k} \quad (3)$$

Se $d^+ < d^-$, o trem i aguardará no pátio $k+1$ a passagem do trem j , caso contrário o trem j aguardará a passagem do trem i no pátio k .

Se $d_{ik} \leq 0$, o trem i atravessa o pátio k sem parar.

As seguintes premissas foram adotadas para aplicação do modelo:

- Nenhum trem é autorizado a reverter o sentido, ou seja, eles são estritamente obrigados a seguir Manoel Feio ou sentido Pombal. Dessa forma cruzamento só é possível por dois trens em sentidos opostos.
- Nenhum trem é autorizado a ultrapassar outro trem no mesmo sentido. Essa premissa foi adotada, porque o Vale do Paraíba possui trecho não sinalizado, o que dificulta o processo de passagem de trens. Como exceção, a regra foi permitida somente na ultrapassagem do KDP11 sobre o KPS01, admissão concedida em função do horário de partida e características dos trens. Para toda vez que um trem estiver aguardando outro à frente, esse deve aguardar no pátio anterior e ser licenciado somente quando o outro desocupar o pátio a frente.
- Não foram considerados cruzamentos dinâmicos, com o intuito de facilitar a tomada da decisão utilizando somente a Equação 2 e a Equação 3.
- Para o algoritmo apresentado, não foram considerados os tamanhos dos trens, logo não há restrição em função de tamanho.
- Não foram considerados trens prioritários, por isso a variável custo foi omitida na Equação 1.
- Não foram avaliados os intervalos de manutenção.
- Não foram considerados o tamanho do trem ou uma margem de segurança, visto que a

grade de trens possui caráter de planejamento e não retrata com exatidão a circulação.

- Foi considerado um cenário estático, ou seja, as mudanças foram limitadas apenas a região do Vale do Paraíba.

3.3. Simulação do Trecho Ferroviário do Vale do Paraíba

Segundo Hillier and Lieberman (2012), são utilizados os seguintes passos, comuns a outras técnicas de pesquisa operacional, para a construção do modelo de simulação:

1. Formular o problema e planejar o estudo.
2. Coletar os dados e formular o modelo de simulação.
3. Verificar a precisão do modelo de simulação.
4. Selecionar o *software* e construir um programa de computador.
5. Testar a validade do modelo de simulação.
6. Planejar as simulações a ser realizadas.
7. Realizar as execuções de simulação e analisar os resultados.
8. Apresentar recomendações à administração.

Para o estudo de simulação será utilizado o Software Arena® - versão 14.0, com o objetivo de validar os resultados da grade de trens encontrado pela metodologia.

Para fins de simulação do Vale do Paraíba, o trecho foi segmentado em 64 seções de bloqueio, já inclusos os 26 pátios ferroviários. Para esses trechos foram informados ainda os locais que possuem sinalização, o tamanho dos pátios, e o tempo de circulação através das seções de bloqueio.

No modelo foram utilizados 13 trens pertencentes à grade de carga geral e outros 5 trens foram adicionados para simular a circulação das demais composições. A frequência de chegada dos trens no sistema está disposta na Tabela 1.

Tabela 1: Frequência de trens utilizada no modelo de simulação

| Trem | Frequência (trens/dia) | Trem | Frequência (trens/dia) |
|-------|---------------------------|-------|---------------------------|
| FVP01 | 1 | KPE01 | 1 |
| KCP01 | 1 | KPS01 | 1 |
| KFP01 | 1 | KDP01 | 1 |
| KFP11 | 1 | KDP11 | 1 |
| KRP01 | 1 | XUP11 | 0,3 |
| KPM01 | 1 | BUP11 | 0,3 |
| KPD01 | 1 | TOD | 1,2 |
| FPV01 | 1 | NEY | 1,8 |
| FPC01 | 1 | XPU11 | 0,3 |

O modelo de circulação dos trens de Carga Geral difere do modelo de circulação dos trens de ciclo, principalmente pela característica de anexar e retirar vagões de diferentes clientes durante o circuito percorrido.

Como informação de entrada do sistema foram utilizados os tempos de Paradas de Atividade

de Trens (PAT) padrão, que estão descritas na Tabela 2. Essas atividades compõem a Grade de Carga Geral e suas durações dependem do trem e do pátio onde ocorrem, tendo seu tempo planejado em função da composição do trem e da quantidade de movimentações necessárias.

Tabela 2: Atividades Padrão de Trens

| Cód. | Atividade |
|------|-------------------------------------|
| 1 | Anexar/Retirar vagão |
| 2 | Trocar Equipagem |
| 3 | Abastecer |
| 4 | Anexar/Retirar Auxílio |
| 5 | Inspeção |
| 6 | Reposicionar Veículos na Composição |
| 7 | Anexar/Retirar locomotiva |
| 8 | Aguardar Faixa de Outra Ferrovia |
| 9 | Pesar Composição |

Os trens de Carga Geral, quando adiantados, devem esperar o horário correto de chegada para o próximo pátio, diferente do que ocorre com os trens de ciclo, que devem circular conforme ocorre a liberação dos recursos. Tais características podem ser observadas na Figura 4 e na Figura 5, que apresentam o modelo conceitual de circulação.

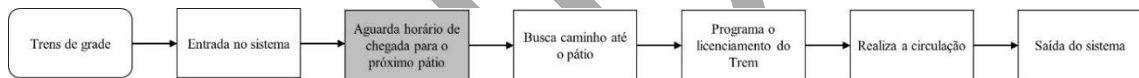


Figura 4: Modelo conceitual de circulação dos trens de grade

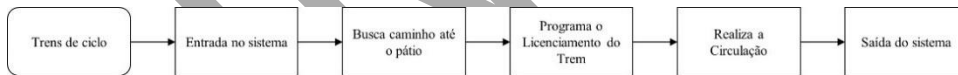


Figura 5: Modelo conceitual de circulação dos trens de ciclo

Conforme apresentado pelo modelo conceitual da Figura 4 foi elaborado a lógica para aguardar o horário de chegada ao próximo pátio no modelo de simulação do Vale do Paraíba, representada no Arena® na Figura 6.

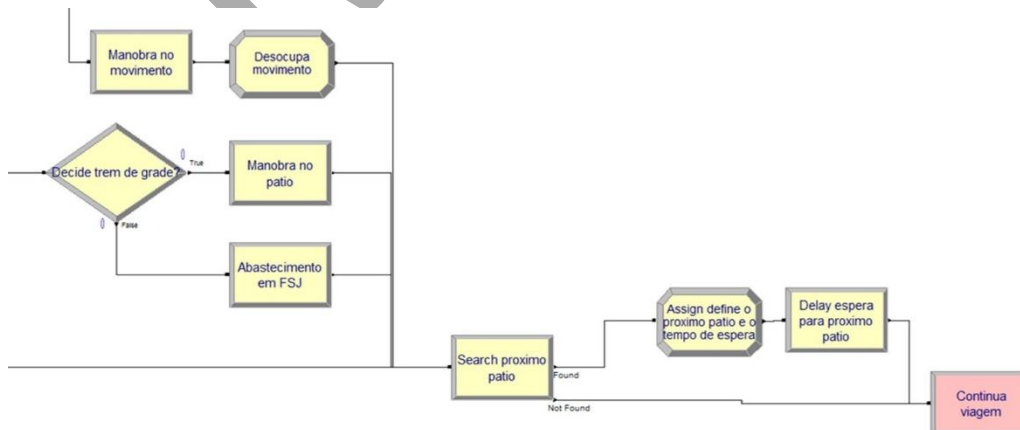


Figura 6: Aplicação do conceito de grade no Arena®

O tempo de circulação dos trens ao percorrer o Vale do Paraíba foi mensurado como forma de validação do modelo. A aderência encontrada em relação ao tempo foi de 89,6% no sentido de circulação de Pombal a Manoel Feio, e 100,2% no sentido de Manoel Feio a Pombal, considerado o modelo satisfatório.

4. RESULTADOS

Ao longo do processo de aplicação da heurística avaliada, ocorreram 33 conflitos durante a circulação dos trens de carga geral. “Trem 1”, “Hora 1” e “Pátio 1” são informações dos trens que circulam com destino a Manoel Feio. “Trem 2”, “Hora 2” e “Pátio 2” são informações dos trens que circulam com destino a Pombal. A Tabela 3 apresenta os conflitos e qual a resolução encontrada pelas regras de decisão.

Tabela 3: Conflitos solucionados pela heurística

| Conflito | Trem 1 | Hora 1 | Pátio 1 | Trem 2 | Hora 2 | Pátio 2 | Trem que aguardou | Tempo de aguardo (m) |
|----------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|-------------------|----------------------|
| 1 | KCP01 | 09:37 | FTA | KDP11 | 09:55 | FCA | KDP11 | 00:17 |
| 2 | KCP01 | 10:20 | FEA | KPS01 | 10:25 | FEM | KPS01 | 00:20 |
| 3 | KCP01 | 10:45 | FEA | FPV01 | 10:45 | FEM | FPV01 | 00:20 |
| 4 | FVP01 | 12:30 | FTA | KPS01 | 12:15 | FCA | FVP01 | 00:15 |
| 5 | FVP01 | 12:45 | FPG | FPV01 | 13:10 | FTA | FPV01 | 00:05 |
| 6 | KFP01 | 14:05 | FLR | KPS01 | 14:05 | FEN | KPS01 | 00:15 |
| 7 | KFP01 | 14:40 | FEN | FPV01 | 14:40 | FAD | FPV01 | 00:15 |
| 8 | KRP01 | 14:30 | FCP | KPS01 | 14:20 | FLR | KRP01 | 00:05 |
| 9 | KRP01 | 14:55 | FLR | FPV01 | 15:00 | FEN | FPV01 | 00:10 |
| 10 | KFP11 | 15:10 | FQU | KPS01 | 15:15 | FCP | KPS01 | 00:35 |
| 11 | KFP11 | 16:10 | FCP | FPV01 | 16:00 | FLR | KFP11 | 00:10 |
| 12 | KCP01 | 16:25 | FST | FPC01 | 16:45 | FPI | FPC01 | 00:05 |
| 13 | FVP01 | 17:35 | FIP | FPC01 | 17:15 | FST | FPC01 | 00:40 |
| 14 | FVP01 | 17:55 | FST | KPE01 | 18:00 | FPI | FVP01 | 00:40 |
| 15 | FVP01 | 18:30 | FST | KDP01 | 18:30 | FPI | FVP01 | 01:00 |
| 16 | KPD01 | 19:50 | FPA | FPC01 | 19:50 | FRE | FPC01 | 00:25 |
| 17 | KPD01 | 20:15 | FRE | KPE01 | 20:10 | FIP | KPD01 | 00:20 |
| 18 | KPD01 | 20:40 | FIP | KDP01 | 20:30 | FST | KPD01 | 00:15 |
| 19 | KFP01 | 20:30 | FSJ | FPC01 | 20:40 | FPA | FPC01 | 00:10 |
| 20 | KFP01 | 20:50 | FPA | KPE01 | 20:35 | FRE | KFP01 | 00:10 |
| 21 | KFP01 | 21:25 | FRE | KDP01 | 21:05 | FIP | KFP01 | 00:05 |
| 22 | KRP01 | 21:55 | FSJ | FPC01 | 21:30 | FPA | KRP01 | 00:00 |
| 23 | KRP01 | 22:20 | FPA | KPE01 | 21:55 | FRE | KRP01 | 00:00 |
| 24 | KRP01 | 22:15 | FPA | KDP01 | 22:15 | FRE | FPC01 | 00:25 |
| 25 | KFP11 | 00:00 | FEM | KDP01 | 00:00 | FSJ | KDP01 | 00:15 |
| 26 | KFP11 | 05:35 | FPI | KPS01 | 05:00 | IEF | KFP11 | 00:00 |
| 27 | KFP11 | 05:35 | FPI | KDP11 | 05:30 | IEF | KFP11 | 00:10 |
| 28 | KPM01 | 22:00 | FSJ | KPE01 | 22:45 | FPA | KPM01 | 00:25 |
| 29 | FVP01 | 08:00 | FQU | FPC01 | 07:50 | FVQ | FVP01 | 00:25 |

| | | | | | | | | |
|----|-------|-------|-----|-------|-------|-----|-------|-------|
| 30 | KFP01 | 09:45 | FFL | FPC01 | 09:25 | FAN | KFP01 | 00:20 |
| 31 | KFP01 | 11:15 | FEP | KPE01 | 11:00 | FQU | KFP01 | 00:20 |
| 32 | KRP01 | 11:35 | FIA | KPE01 | 11:20 | FEP | KPE01 | 00:25 |
| 33 | KFP11 | 12:30 | FPB | KPE01 | 12:30 | FFL | KPE01 | 00:30 |

Nota-se que para a resolução dos conflitos foram admitidos alguns resultados com aguardo de tempo igual a zero minutos. Para o modelo esse resultado foi considerado admissível, visto que representa uma situação na qual os dois trens chegaram no mesmo pátio, no mesmo instante de tempo.

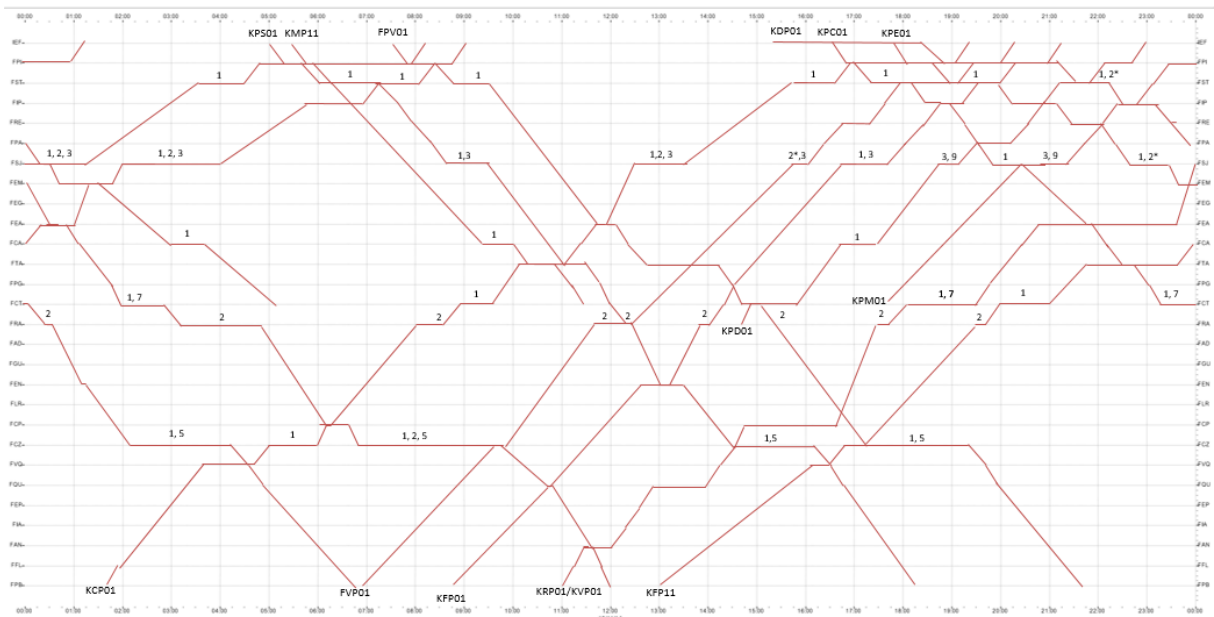


Figura 7: GHT Vale do Paraíba Grade Atual

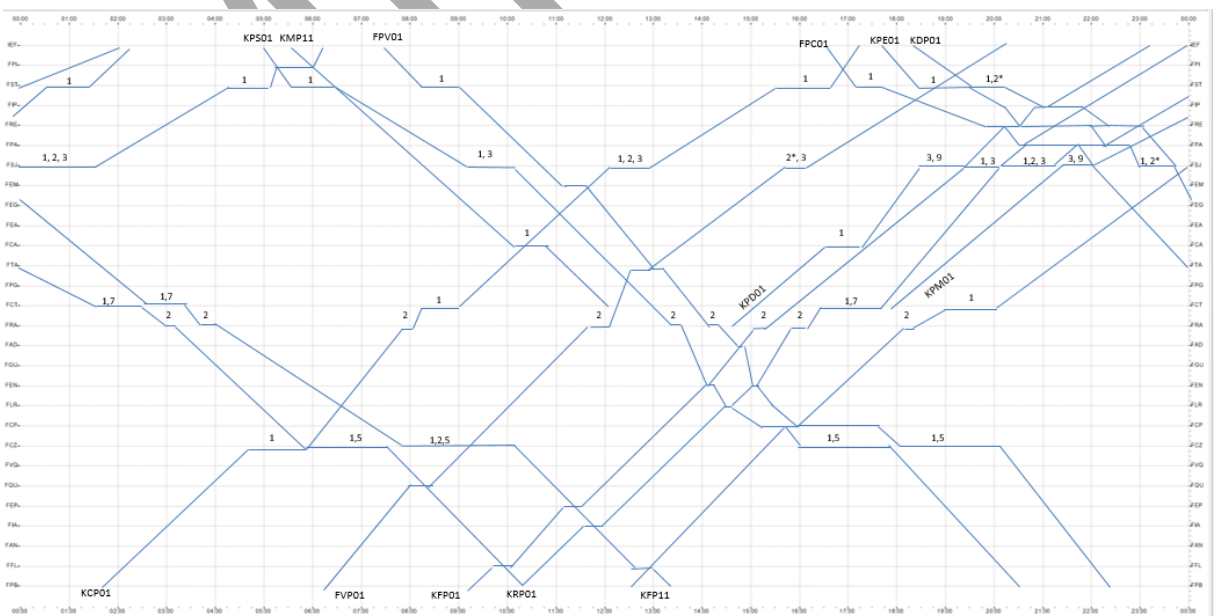


Figura 8: GHT Vale do Paraíba Grade Desenvolvida

Tabela 6: Aderência dos trens pátio a pátio – Grade Carga Geral Desenvolvida

| Pátio | FVP01 | KCP01 | KFP01 | KFP11 | KRP01 | KPM01 | KPD01 | FPV01 | FPC01 | KPE01 | KPS01 | KDP01 | KDP11 | Aderência Estação |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------------|
| FCZ | - | 89,33% | - | - | - | - | - | 85,50% | 91,50% | 78,17% | 86,83% | - | - | 86,27% |
| FCT | - | 89,17% | - | 82,67% | 53,83% | - | - | - | 96,33% | 90,00% | - | 94,50% | 97,50% | 86,29% |
| FCA | - | - | - | - | - | - | 66,50% | - | - | - | - | 73,00% | 96,33% | 78,61% |
| FSJ | 61,67% | 93,50% | 72,83% | 78,67% | - | 56,67% | 85,83% | - | 84,67% | 80,33% | 89,83% | - | - | 78,22% |
| FST | - | 91,00% | - | 89,50% | 69,83% | - | - | 90,33% | 91,00% | 77,67% | 85,17% | 53,33% | - | 80,98% |
| IEF | 69,50% | 94,33% | 79,00% | 99,67% | 79,33% | 93,83% | 83,50% | - | - | - | - | - | - | 85,60% |

Como pode ser observado os resultados obtidos pela heurística mantiveram a aderência média dos trens de grade, passando de 82,48% na Grade de Trens Atual para 82,66% na Grade de Trens Desenvolvida.

5. CONCLUSÃO

Os resultados apresentados pela heurística de Cai e Goh (1993) melhoraram o tempo de circulação total da grade de trens em 3%, resultado que foi considerado pouco vantajoso. No entanto, percebe-se que alguns trens tiveram seu tempo de trânsito reduzido para 73,86%, mostrando que essa heurística pode ser eficiente quando houver alguma forma de priorização dos trens. A priorização pode ser obtida inserindo a variável custo na função objetivo do problema como demonstrado na Equação (4). Dessa forma, espera-se obter os melhores tempos de circulação dependente do custo ou prioridade do trem.

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K c_{ik} d_{ik} \quad (4)$$

Onde c_{ik} , é o custo do trem i parar no pátio k .

Uma outra consideração é que essa heurística não avalia se um trem irá manobrar, o que para a maior parte das composições do Vale do Paraíba faz uso da linha de movimento, e com isso impede a movimentação dos trens por um tempo maior que d_{ik} .

A aderência à Grade de Trens obtida através do modelo de simulação, demonstrou que a Grade de Carga Geral Desenvolvida oferece o mesmo nível de serviço que a Grade de Carga Geral Atual. Porém, como o modelo possui simplificações do sistema real, é necessário que outros testes sejam realizados para validação da Grade de Carga Geral Desenvolvida. Por fim, sugere-se que em trabalhos futuros as premissas sejam flexibilizadas para aproximar os resultados do cenário real.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANTT (2015), *Declaração de rede 2015 - MRS Logística*. Agência Nacional de Transportes Terrestres. Ministério dos Transportes, Brasília, DF.
- BANKS, J.; CARSON II, J. S.; NELSON, B. L. e NICOL, D. M. (2005) *Discrete-event system simulation*. Editora Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA.
- CAI, X. e GOH, C. J. (1993) A fast heuristic for the train scheduling problem. *Computers Ops Res*, v. 21, n. 5, p. 499-510.
- FIORINI, M. M. (2008) *Simulação em ciclo fechado de malhas ferroviárias e suas aplicações no Brasil: Avaliação de alternativas para o direcionamento de composições*. Tese (Doutorado em Engenharia) Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
- HIGGINS, A.; FERREIRA, L. e KOZAN, E. (1996) Optimisation of train schedules to achieve minimum transit times and maximum reliability. *Proceedings of the 13th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, 589-614.
- HILLIER, F. S. e LIEBERMAN, G. J. (2012) *Introdução à pesquisa operacional*. Editora McGraw-Hill, São Paulo, SP.

- HOOGHMSTRA, J. S. e TEUNISSE, M. J. G. (1998) The use of simulation in the planning of the dutch railway services. *Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference*. Dec. 13-16, Washington, DC, USA.
- MOURA, V. C. (2012) Programação de frota de embarcações de lançamento de dutos. *Dissertação de mestrado*.
- OLIVEIRA, E. S. (2001) *Solving Single-Track Railway Scheduling Problem Using Constraint Programming*. Tese (Doctor of Philosophy in Computing) University of Leeds, Leeds, UK.
- PINEDO, M. L. (2008) *Scheduling Theory, Algorithms, and Systems*. Editora Springer, New York, NY, USA.
- TAHA, H. A. (2008) *Pesquisa operacional: uma visão geral*. Editora Pearson Prentice Hall, São Paulo, SP.
- ZHOU, X. e ZHONG, M. (2007) Single-track train timetabling with guaranteed optimality: Branch-and-bound algorithms with enhanced lower bounds. *Transportation Research Part B*. v. 41 p. 320-341.

MANUATA