

# ALOCAÇÃO EFICIENTE DA TRIPULAÇÃO NOS TRENS DA MRS LOGÍSTICA

**Ricardo Saar Rodrigues**

Instituto Militar de Engenharia

## RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver uma forma mais eficiente e racional para indicar qual tripulação será indicada para a condução de qual trem da MRS Logística no trecho entre Juiz de Fora (MG) e Conselheiro Lafaiete (MG). Atualmente, essa alocação é realizada pelo método *first in first out*, porém, em um cenário de otimização de recursos, esse padrão se mostra insatisfatório. A busca por eficiência na alocação se baseia na redução de horas improdutivas de trabalho, análise do risco de estouro de jornada e risco de gerar falta de tripulação para a condução dos trens. Desta maneira, propõe-se a utilização de pesquisa operacional para solução desse problema via programação linear simplex.

**Palavras-chave:** operação ferroviária; aumento de produtividade da tripulação; programação linear simplex; solver

## ABSTRACT

The objective of this study is to develop a more efficient and rational technique to indicate which crew will be placed to drive a specific train of MRS Logística on the route between Juiz de Fora (MG) and Conselheiro Lafaiete (MG). Currently, this allocation is performed by the first in first out method, but in a resource optimization scenario, this pattern proves unsatisfactory. The search for efficiency in the allocation is based on the reduction of unproductive working hours, journey overflow risk analysis and lack of crew to drive the trains risk. On this way, is proposed the use of operational research to solve this problem using simplex linear programming.

## 1. INTRODUÇÃO

A MRS Logística é a concessionária de transporte ferroviário que atua no triângulo compreendido entre as cidades de Belo Horizonte (MG), Rio de Janeiro (RJ) e São Paulo (SP). O seu *mix* de carga é bem variado, compreendendo minério de ferro, que consiste em aproximadamente 75% do total transportado, cimento, areia, produtos siderúrgicos, container, soja, açúcar, enxofre, entre outros.

A circulação dos trens de minério de ferro não obedece qualquer grade horária, visto que a diretriz operacional para esses trens é circular o mais rápido possível, pois quanto mais rápido for o seu ciclo, maior será o volume transportado por uma mesma quantidade de recursos (locomotivas, vagões e tripulação). Dessa forma, apresenta-se um cenário em que os trens de minério de ferro não possuem um horário determinado para circular, ao mesmo tempo que não podem esperar pela tripulação, já que precisam circular o mais rápido possível. A tripulação desses trens, no entanto, possui um horário determinado para se apresentar.

Uma maneira que pode garantir a máxima eficiência na circulação dos trens é a programação do horário da apresentação da tripulação de forma que ela sempre espere os trens, formando assim uma fila de maquinistas para equipar os trens conforme eles passem pelo ponto de troca da tripulação. A principal restrição a esse modelo deve-se ao fato de que a fila de maquinistas deve ser a menor possível, pois quanto mais tempo o maquinista permanecer na fila, menor será o seu tempo disponível para a condução do trem, já que a jornada padrão da tripulação é de 8 horas, não podendo superar 12 horas de jornada segura, que é caracterizada pelo tempo entre a apresentação desse maquinista e o término da sua condução.

Dessa maneira, observa-se o problema clássico das organizações, isto é, o que pode ser melhor para uma das unidades frequentemente é prejudicial a outra, de forma que as unidades podem acabar trabalhando em direções e objetivos conflitantes (Hillier e Lieberman, 2006). O

presente trabalho teve como objetivo, portanto, definir a melhor alocação dos maquinistas de Juiz de Fora (MG) nos trens de modo que o desempenho de todo o sistema seja o melhor possível.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A operação ferroviária é extremamente peculiar em cada ferrovia, o que quase sempre inviabiliza a implantação da solução operacional encontrada em uma empresa por outra do mesmo setor. Essas diferenças entre as ferrovias estão relacionadas a vários pontos, entre eles pode-se destacar:

- Estrutura da via (linhas singelas ou duplas);
- Estrutura de pátios concentradores nas pontas do processo;
- Estratégia de ocupação dos terminais de carga e descarga;
- Quantidade de terminais de carga e descarga;
- Quantidade de clientes atendidos;
- Nível de ocupação/saturação da malha.

A MRS Logística possui apenas linhas singelas em quase todo o seu trecho de atendimento e ainda está implementando pátios concentradores para trens de minério de ferro nas pontas, de forma que, atualmente, apenas o pátio concentrador para descarga possui grande eficiência. A estratégia de ocupação dos terminais é definida pelos clientes e, atualmente, consiste em manter a maior regularidade possível nas minas e nos portos, mesmo que isso gere grandes transtornos para a operação ferroviária. Esses transtornos são gerados, em parte, porque há uma grande quantidade de terminais de carga e descarga. Outra característica peculiar é o altíssimo nível de ocupação da malha, visto que a MRS é responsável por aproximadamente 30% da produção nacional, porém possui apenas 1.643 km de linha (6% da estrutura nacional). Todas essas características fazem com que trabalhos já consagrados em outras ferrovias não sejam aplicáveis à MRS, forçando a busca de novas soluções.

A pesquisa operacional vem há muito tempo contribuindo para o desenvolvimento das organizações, visto que é caracterizada pelo uso de modelos matemáticos, estatística e algoritmos para ajudar na tomada de decisão, tipicamente com o objetivo de melhorar ou otimizar a performance. Conforme descrito por Hillier e Lieberman (2006) diversas empresas de transporte obtiveram excelentes resultados com essa técnica, merecendo destaque a Continental Airlines que aplicou em 2003 pesquisa operacional para otimizar a realocação de tripulações quando da ocorrência de desajustes nos horários de voo, garantindo assim uma economia anual de 40 milhões de dólares. Esse caso merece destaque porque é algo muito semelhante ao problema atual de alocação de tripulação em trens vivido pela MRS Logística, o que indica que a utilização de pesquisa operacional é um bom caminho a ser seguido.

Esse método é utilizado atualmente para solução de problemas até mais complexos do que o apresentado nesse estudo, como é o caso do método para criação da *timetable* apresentada por Nachtigall e Opitz (2008)

De acordo com Taha (2008) e Hillier e Lieberman (2006), um estudo típico de pesquisa operacional (PO) pode ser sintetizado nas seguintes fases:

1. Definir o problema de interesse;
2. Formular um modelo matemático para representa-lo;

3. Desenvolver um procedimento computacional a fim de derivar soluções para o problema a partir do modelo;
4. Testar o modelo e aprimorá-lo conforme necessário;
5. Preparar-se para a aplicação contínua do modelo conforme prescrito pela gerência;
6. Implementar o modelo.

Uma restrição imposta à aplicação na MRS Logística está associada aos itens 5 e 6, visto que a solução encontrada deverá ser implementada utilizando os recursos computacionais já disponíveis na companhia. A única ferramenta de otimização ao alcance desse estudo é o solver do *Microsoft Excel* o que limita muito a gama de soluções possíveis e direciona esse estudo para a utilização de programação linear. Apesar dessa restrição direcionar a escolha do método, ela não prejudica a sua utilização, já que o *Microsoft Excel* é uma ferramenta popular para analisar e resolver pequenos problemas de programação linear, devido ao fato de todos os seus parâmetros poderem ser facilmente introduzidos em uma planilha. Como descrito por Hillier e Lieberman (2006), grande parte do poder das planilhas reside em sua habilidade de revelar imediatamente os resultados de quaisquer alterações feitas na solução.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Programação linear (introdução ao método simplex)

A programação linear é extremamente versátil e pode ser utilizada para a solução de vários problemas, dos mais simples aos mais complexos (Belfiore e Fávero, 2013), fato que a fez ganhar grande espaço nas grandes e médias corporações, garantindo assim o uso mais consciente dos recursos disponíveis. A sua popularidade se deu principalmente a sua simplicidade em relação aos demais métodos existentes quando nos referimos à pesquisa operacional. A programação linear utiliza apenas funções matemáticas lineares para obter o melhor objetivo especificado (Hillier e Lieberman, 2006). Em função disso, o modelo matemático deve sempre ser expresso no seguinte formato:

$$\min \sum_{i \in M} \sum_{j \in N} c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

O modelo matemático acima apresentado é conhecido como função objetivo, sendo que as soluções para o problema devem sempre passar pela otimização, seja essa maximização ou minimização. Essa otimização sempre estará sujeita a algumas restrições (equações e inequações) que serão construídas para cada problema específico. Outra restrição comum a todos os modelos simplex, modelo empregado nesse estudo, é a não-negatividade em todas as variáveis.

O método simplex é um procedimento algébrico. Entretanto, seus conceitos subjacentes são geométricos (Hillier e Lieberman, 2006, p. 122).

Os conceitos geométricos desse método não foram explorados nesse estudo, visto que não é algo prático para ser empregado na resolução do problema já exposto.

De forma sucinta, a resolução de um problema de maximização através do método simplex se inicia atribuindo valores iguais a zero às variáveis (encontrando assim algo bem distante da solução). Em seguida, identifica-se a variável que tem maior interferência positiva no resultado da função objetiva ( $z^*$ ), sendo esta chamada de “variável ativa”. Essa identificação é bem simples, pois quanto maior o coeficiente, maior a sua interferência em  $z^*$  (funções matemáticas lineares). Conforme o valor dessa variável aumenta, o algoritmo testa todas as

restrições até que uma delas não seja satisfeita, sendo esta chamada de “restrição ativa”. Nesse momento passa a ser conhecido o valor máximo da variável ativa e o procedimento começa a se repetir com a próxima variável de maior coeficiente, mas sempre levando em consideração o máximo valor que a primeira variável pode atingir. O procedimento é repetido até que o incremento das variáveis apresente-se como um decréscimo da função objetiva. Nesse momento é interrompida a rotina desse método (Taha, 2008). O mecanismo é análogo para o problema de minimização.

Conforme apresentado por Beasley e Cao (1996), a programação linear de zero-um número inteiro (também conhecido como binário) é um método viável para o problema de programação de tripulação. Nesse caso, as variáveis assumem o valor zero quando a tripulação não foi associada ao trem e um quando essa associação foi verdadeira.

### 3.2. Formulação do problema matemático

O plano de alocação da tripulação nos trens precisa ser realizado de tempos em tempos. O espaçamento desses planos não pode ser curto demais de modo que impeça a tomada de melhores decisões nem longo demais de modo que se utilize um cenário ainda repleto de incertezas. O cenário adotado nesse trabalho será com o horizonte de oito horas, sendo utilizados para desenvolvimento do modelo um cenário controlado do dia 01 de abril de 2015 das 00:00 às 08:00.

#### 3.2.1. Definição das variáveis ( $x_{ij}$ )

A alocação da tripulação nos trens consiste em “encaixar” um maquinista para cada trem. Como o objetivo da programação linear é realizar a melhor alocação, deve-se testar todas as combinações e indicar qual maquinista ocupará qual trem. Desse modo, o modelo apresentará apenas variáveis binárias (programação linear de zero-um número inteiro) e a quantidade de variáveis será sempre dada pela quantidade de maquinistas multiplicada pela quantidade de trens.

	Maquinista 1	Maquinista 2	Maquinista 3
Trem A	1	0	0
Trem B	0	1	0
Trem C	0	0	1

Figura 1: Exemplo de alocação de maquinistas em trens

No exemplo acima temos nove variáveis das quais três apresentam o valor 1 (indicando a alocação da tripulação no trem) e seis apresentam valor zero (indicando a não alocação da tripulação no trem). No cenário hipotético utilizado no estudo a quantidade de maquinista é igual a 13 e a quantidade de trens é igual a 12, logo a quantidade de variáveis é igual a 156.

#### 3.2.2. Definição dos coeficientes ( $c_{ij}$ )

Os coeficientes das variáveis desse modelo devem ser tais que consigam transmitir o quão eficiente (ou ineficiente) seja a alocação de uma dada tripulação para um dado trem. Para isso, foram montados coeficientes que levam em conta os principais indicadores desse processo. Abaixo estão apresentados esses indicadores e posteriormente serão apresentados alguns ajustes necessários a esses valores.

- Tempo de prontidão da tripulação (aguardando a chegada do trem, isto é, fila).  
Esse indicador possui dois efeitos no sistema. O primeiro é aumentar o risco de estouro da jornada segura e o segundo é gerar custo para a companhia, visto que há um acréscimo no salário da tripulação quando ocorre esse evento. Caso o *transit time* real dos trens entre Juiz de Fora (MG) e Conselheiro Lafaiete (MG) fosse bem aderente ao *transit time* planejado, esse indicador poderia ser abandonado em detrimento da utilização apenas do tempo de jornada segura (engloba todo o tempo desde a apresentação do maquinista até a sua saída do trem), porém, como existem desvios entre o plano e o real, este indicador deverá ser incorporado ao coeficiente. Tempo de prontidão da tripulação apresenta o comportamento “quanto menor, melhor” e será tratada como IND\_PRO.

- Tempo de excesso de jornada segura da tripulação (saldo do momento em que entra de prontidão até o momento em que sai do trem em relação ao limite de 12 horas).  
Esse indicador é importantíssimo para o coeficiente, pois, por regra operacional, nenhum maquinista deve continuar a condução do trem após 12 horas de jornada segura. Caso algum maquinista atinja esse valor, a recomendação é que ele interrompa a viagem no próximo pátio e aguarde uma troca (tripulação com menos tempo de jornada segura). A necessidade dessa troca adicional exigirá mudar toda a alocação de tripulação para os trens feita anteriormente além gerar deslocamento de um carro até o ponto onde o trem com a tripulação “vencida” está parado para realizar essa troca. Tempo de jornada segura da tripulação apresenta o comportamento “quanto menor, melhor” e será tratada como IND\_SEG.

- THP202 (falta de tripulação).  
Em uma ferrovia de alta densidade de tráfego o atraso de um trem (por qualquer que seja o motivo) pode demorar dias e até semanas para ser recuperado. Logo esse indicador contrabalança a redução da prontidão (fila) da tripulação, pois quanto menor for a prontidão melhor será para a produtividade da tripulação, mas maior será o risco de THP202 nos trens. THP202 apresenta o comportamento “quanto menor, melhor” e será tratada como IND\_THP.

- Tempo de excesso de jornada total.  
Toda tripulação possui uma escala planejada na qual consta quanto tempo de jornada total de trabalho ela terá entre cada intervalo para descanso ou folga. Caso a jornada total da tripulação ultrapasse o tempo previsto, o descanso até a próxima jornada ficará menor do que o planejado e, nesse caso, o maquinista poderá solicitar a reprogramação da sua próxima apresentação a fim de garantir o tempo total de descanso programado. Isso ocorrendo, toda a escala programada desse maquinista necessitará de ajuste, gerando grandes transtornos para o processo. Esses transtornos são gerados principalmente porque o intervalo entre a apresentação de um maquinista e outro é sempre o mesmo (visto que não há horário definido para passagem dos trens) e, quando ocorre uma reprogramação, esse intervalo entre uma apresentação e outra passa a não ser mais o mesmo. Quando esse intervalo entre apresentações se encurta a consequência direta é maior prontidão. Já quando esse intervalo entre apresentações se distende a consequência é risco de THP202. Tempo de excesso de jornada total apresenta o comportamento “quanto menor, melhor” e será tratada como IND\_TOT.

Um ponto importante sobre os indicadores é que todos eles estão relacionados à escala programa da tripulação e a circulação planejada dos trens para as próximas horas. Estamos

falando, portanto, do futuro e, nesse caso sempre existem incertezas. As incertezas quanto às escalas programadas dos maquinistas são muito baixas, logo podem ser desconsideradas. Fato que não acontece com a circulação planejada dos trens. Sempre há percalços na circulação que fazem com que o *transit time* real fique diferente do planejado (maior ou menor). Como o objetivo desse trabalho é otimizar a alocação, mas sem potencializar os problemas gerados pelos desvios no processo (em grande parte por realização de um *transit time* acima do planejado), será somado um desvio padrão do tempo de circulação entre Juiz de Fora (MG) e Conselheiro Lafaiete (MG) em todos os indicadores que envolvam o tempo de circulação nesse trecho. Esses indicadores são: IND\_SEG e IND\_TOT. Dessa forma, a construção dos coeficientes do modelo ficaria da seguinte forma:

$$c_{ij} = \text{IND\_PRO} + (\text{IND\_SEG} + 1\sigma) + \text{IND\_THP} + (\text{IND\_TOT} + 1\sigma) \quad (2)$$

Para balancear a contribuição de cada indicador para a formação do coeficiente, de acordo com os interesses da MRS Logística, foram distribuídos 100 pontos entre os quatro indicadores através de um fator de multiplicação. A construção final dos coeficientes do modelo ficou da seguinte forma:

$$c_{ij} = 5 \times \text{IND\_PRO} + 20 \times (\text{IND\_SEG} + 1\sigma) + 25 \times \text{IND\_THP} + 50 \times (\text{IND\_TOT} + 1\sigma) \quad (3)$$

### 3.2.3. Definição do modelo matemático

Após concluir a definição das variáveis e dos coeficientes, a montagem do modelo matemático (função objetivo) se inicia com a definição dos seguintes dados de entrada:

- **M**: conjunto de maquinistas,  $M = \{1, 2, \dots, n\}$
- **N**: conjunto de trens,  $N = \{1, 2, \dots, n\}$
- **O<sub>i</sub>**: oferta de maquinistas *i*
- **D<sub>j</sub>**: demanda dos trens *j*
- **C<sub>ij</sub>**: coeficiente da alocação do maquinista *i* no trem *j*

A variável de decisão é a seguinte:

- **X<sub>ij</sub>**: quantidade de maquinista *i* alocados para o trem *j*

A função objetivo é:

$$\min \sum_{i \in M} \sum_{j \in N} c_{ij} x_{ij} \quad (4)$$

Sujeita a:

$$\sum_{j \in N} x_{ij} \leq 1 \quad \forall i \in M \quad (5)$$

$$\sum_{i \in M} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in N \quad (6)$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in M, \forall j \in N \quad (7)$$

$$x_{ij} = \text{inteiro}$$

(8)

Essa definição vale para qualquer combinação de oferta de maquinistas ( $O_i$ ) e demanda de trens ( $D_i$ ), desde que  $O_i \geq D_i$ . Caso não seja possível ofertar maquinistas para todos os trens, deve-se buscar meios de pelo menos igualar essa oferta e demanda antes de buscar a otimização.

### 3.3. Desenvolver um procedimento computacional a fim de derivar soluções

Existem atualmente inúmeras ferramentas que proporcionam um ambiente propício para o desenvolvimento das soluções de programação linear. Como já exposto anteriormente, o solver do *Microsoft Excel* foi o que melhor se encaixou nesse trabalho devido restrições, principalmente, de implantação na MRS Logística. Isso, porém, não gerou nenhum prejuízo para realização desse estudo, visto que essa é uma poderosa ferramenta para a solução de problemas como o proposto (alocação da tripulação no trem). A grande restrição do Solver está relacionada à capacidade de processamento de grandes modelos matemáticos, com muitas variáveis e restrições. Conforme exposto por Hillier e Lieberman (2006), quanto maior for a quantidade de variáveis e restrições, maior será a necessidade de capacidade de processamento. Segundo esse autor, de forma grosseira, ao dobrar a quantidade de restrições o tempo de processamento é multiplicado por oito e, ao dobrar a quantidade de variáveis o tempo de processamento, provavelmente, nem será dobrado. Nesse modelo pode-se dizer que a quantidade de variáveis é igual a 156 enquanto a quantidade de restrições é igual a 337, o que praticamente esbarra na capacidade de processamento do solver. Esse é um ponto importante para justificar que a alocação dos maquinistas será feita para as próximas 8 horas e não para um horizonte de tempo maior. Apenas para exemplificar, caso o horizonte de tempo para alocação fosse estendido de 8 horas para 12 horas, o tempo necessário de processamento seria aumentado em pelo menos 11 vezes.

Após a exposição desses pontos, deu-se início a construção desse modelo no *software* escolhido. O ponto inicial foi a montagem dos coeficientes de acordo com as regras já estabelecidas. Lembrando que o coeficiente  $c_{ij}$  pode ser entendido como o “custo” (em tempo) da alocação  $x_{ij}$ , o primeiro passo foi construir uma tabela com o “custo” de todas as 156 possíveis alocações. Para isso, foi necessário utilizar os valores estimados dos quatro indicadores (IND\_PRO, IND\_SEG +  $1\sigma$ , IND\_THP e IND\_TOT +  $1\sigma$ ) para cada par de alocação e os fatores de multiplicação arbitrados para cada indicador. A tabela construída tem o seguinte formato:

FATOR DE MULTIPLICAÇÃO		5	25	20	50				
CRUZAMENTO									
Trem	Matrícula	Prontidão	THP 202	J. Segura	Est. J. Segura	J. Total	J. Máxima	Est. J. Total	Coefficiente
KPE0157	xx016580	0,20	0,00	8,91	-3,09	9,23	12,00	-2,77	-199
KPE0157	xx020668	0,00	0,38	8,71	-3,29	9,03	14,00	-4,97	-305
KPE0157	xx019891	0,00	0,97	8,71	-3,29	9,03	16,00	-6,97	-390
KPE0157	xx020428	0,00	1,55	8,71	-3,29	9,03	13,00	-3,97	-225
KPE0157	xx019198	0,00	2,13	8,71	-3,29	9,03	14,00	-4,97	-261
KPE0157	xx017812	0,00	2,72	8,71	-3,29	9,03	16,00	-6,97	-346
KPE0157	xx019747	0,00	3,30	8,71	-3,29	9,03	15,00	-5,97	-282
KPE0157	xx024052	0,00	3,88	8,71	-3,29	9,03	13,00	-3,97	-167
KPE0157	xx015126	0,00	4,47	8,71	-3,29	9,03	14,00	-4,97	-203
KPE0157	xx016418	0,00	5,05	8,71	-3,29	9,03	16,00	-6,97	-288
KPE0157	xx018921	0,00	5,63	8,71	-3,29	9,03	12,00	-2,97	-73
KPE0157	xx018486	0,00	6,22	8,71	-3,29	9,03	15,00	-5,97	-209
KPE0157	xx020046	0,00	6,80	8,71	-3,29	9,03	13,00	-3,97	-94
NLE0359	xx016580	1,22	0,00	12,63	0,63	12,76	12,00	0,76	57
NLE0359	xx020668	0,63	0,00	12,04	0,04	12,18	14,00	-1,82	-87

\* a tabela continua até finalizar o 156º c

Figura 2: Definição dos coeficientes

Importante destacar que o valor do coeficiente representa o somatório das horas dos quatro indicadores multiplicados pelos seus respectivos fatores. A partir dessa tabela é possível, de forma rápida, descobrir a melhor alocação para cada trem. Tomando como exemplo o trem KPE0157 (ignorando a alocação para os demais trens). O melhor maquinista para esse trem seria o xx019891 (coeficiente de -390).

Apesar da tabela acima indicar todos os coeficientes, este não é o melhor *layout* para a construção do modelo, de forma que esta visão foi válida apenas para a construção dos coeficientes a partir dos indicadores operacionais.

### 3.3.1. Construção da matriz coeficientes e da função de otimização

Essa matriz deu suporte à matriz de variáveis (onde ocorre a alocação), logo o seu layout deve ser tal que facilite todas as interações na planilha. Importante destacar também que a função objetivo deve acompanhar todos esses padrões.

	xx016580	xx020668	xx019891	xx020428	xx019198	xx017812	xx019747	xx024052	xx015126	xx016418	xx018921	xx018486	xx020046
KPE0157	-199	-305	-390	-225	-261	-346	-282	-167	-203	-288	-73	-209	-94
NLE0359	57	-87	-231	-71	-107	-192	-128	-13	-48	-134	81	-55	60
NSF0359	-136	-280	-424	-318	-366	-452	-387	-273	-308	-393	-179	-314	-200
NGF0759	292	148	4	110	17	-80	-16	99	63	-22	193	57	172
NGF0659	242	98	-46	60	-33	-174	-109	5	-30	-116	99	-36	78
NYE0157	253	109	-35	71	-22	-166	-153	-39	-74	-159	55	-80	34
NLE0459	344	200	56	162	69	-75	-69	-13	-61	-147	68	-68	47
NGF0859	47	-97	-241	-135	-228	-372	-366	-310	-403	-511	-296	-431	-317
NLE0559	154	11	-133	-27	-121	-264	-258	-202	-296	-439	-245	-380	-266
NGF0959	321	177	33	139	46	-98	-92	-36	-129	-273	-117	-311	-198
NSF0459	238	94	-50	56	-37	-181	-175	-119	-212	-356	-200	-394	-322
NLE0659	635	491	348	454	360	216	223	279	185	41	198	4	60
minz	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 3: Matriz dos coeficientes



Observa-se que no eixo x da matriz está disposta a demanda de trens ( $\mathbf{D}_i$ ) enquanto no eixo y está disposta a oferta de tripulação ( $\mathbf{O}_i$ ). O cruzamento entre a linha e a coluna indica o coeficiente da alocação do maquinista no trem.

A linha destacada abaixo da tabela indica qual o coeficiente adotado para cada maquinista após a alocação otimizada pelo solver. Esse valor é encontrado através do somatório da multiplicação entre as variáveis  $x_{ij}$  e os coeficientes  $c_{ij}$ . A célula destacada em azul escuro indica o coeficiente do sistema como um todo, sendo, portanto, a célula otimizada pelo solver.

### 3.3.2. Construção da matriz de variáveis e restrições

O último passo para concluir a montagem do problema no solver foi a formulação da matriz de variáveis (que traz consigo as restrições). Seguindo o mesmo *layout* da matriz de coeficientes, tem-se a seguinte situação:

	xx016580	xx020668	xx019891	xx020428	xx019198	xx017812	xx019747	xx024052	xx015126	xx016418	xx018921	xx018486	xx020046			
KPE0157														0	=	1
NLE0359														0	=	1
NSFO359														0	=	1
NGFO759														0	=	1
NGFO659														0	=	1
NYE0157														0	=	1
NLE0459														0	=	1
NGFO859														0	=	1
NLE0559														0	=	1
NGFO959														0	=	1
NSFO459														0	=	1
NLE0659														0	=	1
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	≤	≤	≤	≤	≤	≤	≤	≤	≤	≤	≤	≤	≤			
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			

Figura 4: Matriz de variáveis e restrições

Cada célula em amarelo dessa matriz representa uma variável  $x_{ij}$ , sendo que o seu preenchimento deve ser binário, isto é: 0 (zero) para quando a alocação desse cruzamento não foi desejável e 1 (um) para quando ela foi desejável.

As células destacadas em azul do lado direito da matriz correspondem à soma de todas as variáveis da linha da matriz e as células em branco correspondem à restrição de alocar exatamente um maquinista para cada trem ( $\sum_{i \in M} x_{ij} = 1$ ), por isso esse modelo só funciona quando a oferta de maquinistas ( $\mathbf{O}_i$ ) for igual ou maior que a demanda de trens ( $\mathbf{D}_i$ ). Já as células destacadas em azul na parte inferior da matriz correspondem à soma de todas as variáveis da coluna da matriz e as células em branco correspondem à restrição de alocar cada maquinista em no máximo um trem ( $\sum_{j \in N} x_{ij} \leq 1$ ).

As demais restrições são as limitações dos valores assumidos pelas variáveis. Estas podem assumir apenas valores inteiros maiores ou iguais a 0 (zero). Dessa forma, concluiu-se toda modelagem no sistema onde a função objetivo foi otimizada.

## 4. RESULTADOS

Após a toda a montagem do modelo no solver, o procedimento de automatização se tornou rápido e a apresentação da resposta extremamente simples. O tempo de processamento em um

laptop com processador Intel Core I5 e 4 GB de memória RAM foi de aproximadamente dois segundos (um resultado muito satisfatório). O resultado da otimização pode ser visto abaixo:

	xx016580	xx020668	xx019891	xx020428	xx019198	xx017812	xx019747	xx024052	xx015126	xx016418	xx018921	xx018486	xx020046		
KPE0157	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	= 1
NLE0359	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	= 1
NSF0359	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	= 1
NGF0759	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	= 1
NGF0659	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	= 1
NVE0157	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	= 1
NLE0459	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	= 1
NGF0859	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	= 1
NLE0559	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	= 1
NGF0959	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	= 1
NSF0459	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	= 1
NLE0659	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	= 1
	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	

  

	xx016580	xx020668	xx019891	xx020428	xx019198	xx017812	xx019747	xx024052	xx015126	xx016418	xx018921	xx018486	xx020046	
KPE0157	-199	-305	-390	-225	-261	-346	-282	-167	-203	-288	-73	-209	-94	
NLE0359	57	-87	-231	-71	-107	-192	-128	-13	-48	-134	81	-55	60	
NSF0359	-136	-280	-424	-318	-366	-452	-387	-273	-308	-393	-179	-314	-200	
NGF0759	292	148	4	110	17	-80	-16	99	63	-22	193	57	172	
NGF0659	242	98	-46	60	-33	-174	-109	5	-30	-116	99	-36	78	
NVE0157	253	109	-35	71	-22	-166	-153	-39	-74	-159	55	-80	34	
NLE0459	344	200	56	162	69	-75	-69	-13	-61	-147	68	-68	47	
NGF0859	47	-97	-241	-135	-228	-372	-366	-310	-403	-511	-296	-431	-317	
NLE0559	154	11	-133	-27	-121	-264	-258	-202	-296	-439	-245	-380	-266	
NGF0959	321	177	33	139	46	-98	-92	-36	-129	-273	-117	-311	-198	
NSF0459	238	94	-50	56	-37	-181	-175	-119	-212	-356	-200	-394	-322	
NLE0659	635	491	348	454	360	216	223	279	185	41	198	4	60	
minz	-2469,3	0	-304,65	-230,88	-317,63	16,717	-173,87	-153,1	-12,567	-403,48	-439,47	-199,82	-310,68	60,1

Figura 5: Conjunto de matrizes com a solução otimizada

Observa-se que a regra *first in first out* adotada atualmente é uma boa solução para o problema de alocação, porém foram necessários ajustes para que esta se tornasse mais eficiente. No cenário apresentado foram realizados três ajustes dentro das treze alocações (23%). Comparando o resultado da alocação otimizada com a alocação padrão atual (FIFO), tem-se o seguinte cenário.

	Prontidão	THP 202	Est. J. Segura	Est. J. Total	
<b>FIFO</b>	Soma	8,93	0,00	-12,65	-35,66
	Média	0,74	0,00	-1,05	-2,97

  

	Prontidão	THP 202	Est. J. Segura	Est. J. Total	
<b>SOLVER</b>	Soma	2,42	0,48	-19,16	-43,18
	Média	0,20	0,04	-1,60	-3,60
		-73%	-	52%	21%

  

KPE0157	xx016580	0,20	0,00	-3,13	-2,82
NLE0359	xx020668	0,63	0,00	-0,03	-1,90
NSF0359	xx019891	0,72	0,00	-3,42	-7,27
NGF0759	xx020428	0,70	0,00	1,88	1,28
NGF0659	xx019198	0,55	0,00	0,61	-1,06
NYE0157	xx017812	0,52	0,00	0,03	-3,48
NLE0459	xx019747	0,72	0,00	1,03	-1,95
NGF0859	xx024052	0,80	0,00	-3,93	-4,77
NLE0559	xx015126	0,78	0,00	-3,13	-4,79
NGF0959	xx016418	1,18	0,00	-1,28	-5,16
NSF0459	xx018921	1,02	0,00	-3,29	-2,85
NLE0659	xx018486	1,12	0,00	2,00	-0,90

  

KPE0157	xx020668	0,00	0,38	-3,33	-5,02
NLE0359	xx019891	0,05	0,00	-0,61	-4,48
NSF0359	xx020428	0,13	0,00	-4,00	-4,85
NGF0759	xx019198	0,12	0,00	1,29	-0,31
NGF0659	xx017812	0,00	0,03	0,06	-3,61
NYE0157	xx019747	0,00	0,07	-0,48	-3,00
NLE0459	xx024052	0,13	0,00	0,45	-0,54
NGF0859	xx015126	0,22	0,00	-4,52	-6,35
NLE0559	xx016418	0,20	0,00	-3,71	-7,38
NGF0959	xx018486	0,02	0,00	-2,44	-5,33
NSF0459	xx018921	1,02	0,00	-3,29	-2,85
NLE0659	xx020046	0,53	0,00	1,42	0,52

**Figura 6:** Comparação do cenário padrão atual e do cenário otimizado

Analisando os resultados do sistema como um todo, tem-se que a alocação proposta pelo solver reduziu em 73% o tempo total de prontidão da tripulação (reduziu de 8,93 para 2,42 horas). Essa redução teve como custo o aumento do THP202, que no sistema passou de 0 para 0,48 hora. Detalhando esse indicador, percebe-se que 3 trens ficaram aguardando tripulação (os tempos de aguardo foram 2 minutos, 4 minutos e 23 minutos). Apenas o trem que aguardou 23 minutos apresenta impacto no sistema, porém, a análise da severidade desse impacto precisa ser estudada com um nível de detalhe muito maior do que o proposto neste trabalho, pois esse tempo pode ser absorvido em uma fila aguardando cliente ou mesmo no aguardo de horário de grade.

Já em relação à sobra de horas de jornada segura, percebe-se um aumento de 52% (o valor total do sistema para o método FIFO era de 12,65 horas enquanto no modelo otimizado é de 19,16 horas). No primeiro método 5 maquinistas estouravam o limite de 12 horas e no segundo método apenas 4 maquinistas estouram, sendo que esse estouro é menor. O mesmo fato é percebido no indicador de sobra de horas de jornada total, visto que o aumento foi de 21% (35,66 para 43,18 horas). Esse resultado não elimina a necessidade de reprogramação do único maquinista que apresentava esse problema no cenário FIFO, mas reduz o tempo de estouro que foi de 1,28 horas no primeiro método contra 0,52 hora no segundo método.

Percebe-se, portanto, que a solução proposta pelo solver realmente apresenta um cenário mais adequado à operação ferroviária do que a alocação exclusivamente *first in first out*.

## 5. CONCLUSÃO

A troca do método *first in first out* de alocação de tripulação para a otimização via programação linear no solver gerou ganho significativo para o processo. Esse ganho foi alavancado através de duas mudanças simples: a tripulação a ser dispensada foi escolhida de forma a maximizar o sistema e não após o tempo de prontidão do maquinista superar o limite hoje estabelecido; e a realização de uma inversão na alocação de maquinistas nos trens.

Assim, foi necessário 23% de mudança na alocação da tripulação nos trem para maximizar muito a utilização desse recurso, sendo essas mudanças calculadas em apenas dois segundos.

Esses pontos tornam a utilização do solver viável para otimizar a alocação de tripulação na MRS Logística.

#### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- BEASLEY, J. E. e CAO, B. (1996) A tree search algorithm for the crew scheduling problem. *European Journal of Operational Research* n. 94, p. 187-221
- FÁVERO, L. P. e BELFIORE, P. (2013) *Pesquisa operacional para cursos de engenharia*. Editora Elsevier, Rio de Janeiro, RJ
- HILLIER, F. S. e LIEBERMAN, G. J. (2006) *Introdução à pesquisa operacional*. Editora McGraw-Hill, São Paulo, SP
- NACHTIGALL, K. e OPITZ, J. (2008) Solving periodic timetable optimization problems by modulo simplex calculations. *8th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modeling, Optimization, and Systems* <http://drops.dagstuhl.de/opus/volltexte/2008/1588>
- TAHA, H. A. (2008) *Pesquisa operacional: uma visão geral*. Editora Pearson Prentice Hall, São Paulo, SP

MANUTÁ