

Otimização de Instalação de Waysides

Enrico Miranda^{1*}

¹ *Consultor Independente*

e-mail: enrico.s.miranda@gmail.com

Resumo Sistemas de detecção e sensoriamento estão se tornando cada vez mais importantes na gestão moderna de ferrovias. A disponibilidade de dados preditivos pode ser utilizada tanto para alarmes visando garantir a segurança ferroviária quanto para a execução de manutenções de forma mais assertiva [2]. Para monitoramento de material rodante, uma grande fonte de dados são os equipamentos chamados *waysides*. No entanto, estes equipamentos são usualmente caros, e portanto definir sua disposição de forma a obter o maior retorno possível do investimento é um problema estratégico. Este trabalho apresenta a definição de um modelo de otimização para instalação de waysides utilizado em uma ferrovia norte-americana, de forma a obter o maior retorno do investimento. A metodologia proposta mostrou-se capaz de O modelo apresenta resultados superiores à instalação apenas com base no tráfego esperado, sendo capaz de identificar trechos redundantes na tomada da melhor decisão de longo prazo

Palavras-Chaves: Otimização, waysides

1. INTRODUÇÃO

Uma ferrovia é tipicamente composta por dois ativos operacionais principais; a via permanente e o material rodante. No que tange o material rodante, as ferrovias buscam equilibrar as necessidades de inspeção, execução de manutenção em oficinas especializadas e a segurança operacional do material durante operação.

A realização de inspeções mais detalhadas exige equipamentos e conhecimento técnico, e nem sempre é viável a execução de inspeções mais detalhadas nos pontos comuns de passagem do vagão (pontos de carga ou descarga, por exemplo). As inspeções realizadas nestes locais normalmente se restringem a inspeções mais simples de componentes facilmente acessíveis, que não exijam desmontagem de nenhum tipo de peça / componente. Estas inspeções podem detectar alguns defeitos bastante aparentes, porém não conseguem detectar defeitos mais aprofundados. Este tipo de inspeção também não consegue gerar dados mais aprofundados e estruturados para utilização em plataformas de analytics e asset health management.

A movimentação dos vagões para oficinas especializadas também gera diversos impactos operacionais. O deslocamento dos vagões para a oficina e a execução de manutenções demanda uma certa quantidade de tempo, durante a qual o ativo está improdutivo. Além disso, devido ao tamanho da frota das ferrovias não é incomum que as oficinas possuam capacidade de absorver e tratar apenas uma parcela limitada da frota de cada vez.

Por fim, há a importância da segurança operacional dos ativos. A parada dos ativos para manutenção gera um impacto operacional; no entanto defeitos ou ocorrências ferroviárias geradas pelo desgaste dos ativos pode gerar interrupções de tráfego e longos prazos para recuperação do ativo. Neste caso, a perda de produção não se limita apenas ao ativo envolvido na ocorrência, mas também a todo o tráfego que passaria pela linha impactada.

Diante deste cenário, às ferrovias têm aumentado sua opção pela utilização de equipamentos de monitoramento de saúde de ativo, chamados *waysides*. Estes equipamentos eletrônicos possuem sensores

avançados que permitem que defeitos e falhas sejam inspecionadas de forma automatizada e padronizada, gerando um histórico de dados digitais sobre a saúde do ativo.

Os dados gerados pelos *waysides* podem ser usados inclusive em plataformas de Indústria 4.0 e IoT para determinação de planos de ação preventivos.

No entanto, a instalação de *waysides* normalmente possui um custo elevado. Este custo elevado se deve principalmente ao fato de serem equipamentos eletrônicos complexos e especializados que devem operar de forma autônoma em condições climáticas diversas.

Diante deste cenário, há a necessidade de determinação da melhor localização destes ativos – necessidade ressaltada em malhas complexas como as presentes nas ferrovias americanas de Classe I. O presente trabalho foi desenvolvido para um ferrovia americana de Classe I.

Este artigo está dividido da seguinte forma: A Seção 2 apresenta uma definição do problema, de como a malha ferroviária é modelada e das principais premissas e considerações. A Seção 3 apresenta uma proposta de rotina de pré-processamento visando reduzir a complexidade computacional do problema. A Seção 4 descreve a elaboração do modelo matemático. A Seção 5 descreve os resultados e experimentos computacionais realizados, e por fim a Seção 6 apresenta a conclusão e considerações a respeito do trabalho.

2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

O problema a ser tratado de alocação de uma nova tecnologia de *waysides* foi definido de acordo com um conjunto de regras. A malha ferroviária foi definida como um grafo não-direcionado definido por $G = (V, E)$ onde as linhas de circulação são as arestas do grafo (E) e os vértices em V são os nós da ferrovia que interligam os diversos segmentos da via.

Todos os segmentos de linha são candidatos à instalação do equipamento de *wayside*, e considera-se que todo vagão que passe por aquele segmento de linha será inspecionado.

Um exemplo pode ser visto na Figura 1. Nesta rede ferroviária, há 8 nós / estações (representados por círculos azuis com

números), 7 segmentos de linha (representados por linhas azuis com letras minúsculas).

Para inspeção, foram definidos fluxos de carga. Os fluxos de carga são definidos como $F = (O_f, D_f, C_f, S_{f,e} \in E)$ onde O representa o vértice de origem da carga, D representa o vértice de destino da carga e C a quantidade de vagões presentes neste fluxo. S representa o conjunto de arestas ou segmentos de linha pelos quais o fluxo transita para atingir seu destino. Na Figura 1 os fluxos foram definidos pelas setas verdes. Por exemplo, há um fluxo da estação 7 (Origem) para a estação 8 (Destino), passando pelos segmentos g e depois f.

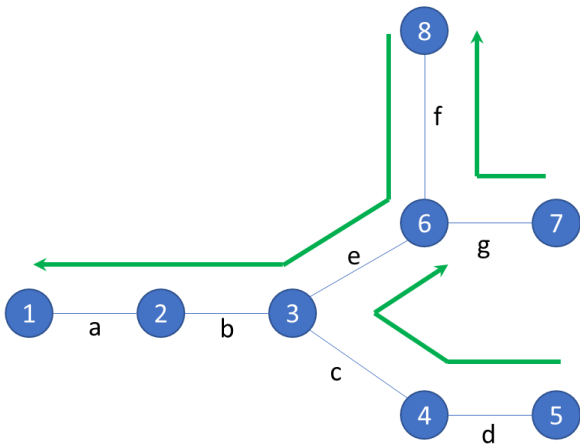


Figura 1 - Exemplo de malha ferroviária

Além disso, o problema em questão se tratava da instalação de waysides de uma nova tecnologia. Neste caso, não havia ainda waysides com este tipo de tecnologia nesta ferrovia. O custo de instalação seria diferente a depender do segmento de linha a ser instalado – em alguns segmentos em que já haja equipamentos de tecnologias existente é possível a utilização de uma grande quantidade de infra estrutura e de equipamentos de automação e comunicação, reduzindo significativamente os custos para instalação.

Visando reduzir o tamanho da complexidade computacional do problema de otimização, foram definidos algumas rotinas de pré-processamento de dados que pudessem reduzir o tamanho do problema a ser tratado.

3. PRÉ PROCESSAMENTO

Na ferrovia do caso prático tratado, a quantidade de segmentos de linha era da

ordem dos milhares, em uma topologia complexa. Desta forma, o problema ficava inviável para solução computacional.

No entanto, vários trechos ferroviários possuem o mesmo tráfego seguindo em diversos segmentos sequenciais sem alterações significativas.

De forma a reduzir o tamanho e a complexidade do problema, definiu-se uma metodologia para detecção de segmentos de linha dominantes.

Um segmento de linha $e_i \in E$ é dito dominante sobre um segmento de linha $e_j \in E$ se e somente se:

$$S_{f,e_i} \geq S_{f,e_j}, \forall f \in F \quad (1)$$

A equação (1) garante que o segmento e_i é dominante sobre e_j caso todo o tráfego que passe por e_i também passe por e_j . Diante desta definição, foi criada uma relação de todos os segmentos que dominavam outros e todos os segmentos que não eram dominados.

Todos os segmentos dominados foram absorvidos pelo segmento dominante, e um novo grafo foi gerado $G = (V', E')$ apenas com os vértices e arestas dominantes.

Um exemplo pode ser visto na Figura 2, que apresenta o resultado do pré-processamento da malha da Figura 1. Nesta figura, os segmentos de linha dominados estão em itálico e tracejado, e os segmentos não-dominados estão em negrito.

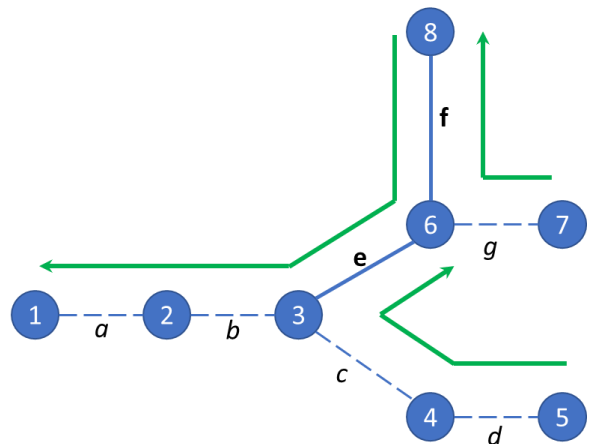


Figura 2 - Segmentos não-dominados

No caso em questão, temos que o segmento e domina os segmentos c e d, pois todo vagão que passa por e também passa por c e d. Desta forma, a instalação de waysides em e

cobre toda a frota coberta por c e d . De forma análoga, f é dominante sobre g , a e b .

Neste exemplo, é possível reduzir os segmentos de linha candidatos à instalação de 7 para 2. Este resultado demonstra a efetividade do pré-processamento em reduzir o tamanho do problema sem perda de características que influenciem na performance da solução proposta.

4. MODELAGEM MATEMÁTICA

Para elaboração da modelagem matemática, foi desenvolvido um modelo que abrangesse as premissas necessárias.

O modelo está descrito a seguir.

Conjuntos:

- V' : conjunto de segmentos de linha não-dominados conforme descrito na Seção 3.
- F : conjunto de fluxos de carga da ferrovia

Parâmetros:

- $c_{v \in V'}$: custo para instalação do wayside no vértice $v \in V'$. Este custo pode ser 0 (para waysides já instalados), ou um valor arbitrário de acordo com o custo de instalação naquele segmento de linha específico
- $p_{f \in F, v \in V'}$: parâmetro binário. Este valor representa a passagem do fluxo $f \in F$ no segmento de linha $v \in V'$. Os vagões deste fluxo serão inspecionados caso haja um equipamento instalado em v .
- $W_{f \in F}$: total de vagões no fluxo f . Esta é a quantidade de vagões que serão inspecionados do fluxo.
- b : limite financeiro de capacidade de instalação de waysides no período considerado

Variáveis de decisão:

- $x_{f \in F}$: variável numérica de quantidade de vagões que foram inspecionados no fluxo $f \in F$
- $y_{v \in V'}$: variável binária de decisão de instalação de wayside no ponto $v \in V'$

Maximizar:

$$\sum_{f \in F} x_f \quad (2)$$

Sujeito a:

$$\sum_{v \in V'} c_v * y_v \leq b \quad (3)$$

$$x_f \leq W_f \quad \forall f \in F \quad (4)$$

$$x_f \leq \sum_{v \in V'} y_v * p_{f,v} * W_f \quad \forall f \in F \quad (5)$$

A função objetivo na Equação 2 é bastante direta; temos como objetivo maximizar o número de vagões inspecionados em todos os fluxos considerados.

As restrição descrita na Equação 3 limita a quantidade de waysides a serem instalados. O total de instalações deve estar dentro do *budget* disponível para o projeto.

A restrição descrita na equação 4 limita o número de vagões inspecionados em um fluxo ao número total de vagões presente neste fluxo.

Por fim, a restrição descrita na Equação 5 restringe a inspeção de vagões em um fluxo. Os vagões apenas podem ser inspecionados caso ambas as condições sejam atendidas: que haja um wayside no segmento sendo avaliado e que o fluxo passe por esse vértice.

5. EXPERIMENTO COMPUTACIONAL

Para execução do modelo, foi utilizada toda a malha da ferrovia, bem como toda a frota e todos os fluxos (internos e de intercambio) determinados.

Com relação aos custos, utilizou-se como base $c = 1$ para instalação em locais sem necessidade de infraestrutura. Foram analisados 3 cenários, com o custo de novos locais variando até 2 vezes.

Além da variação de custo, foram desenhados diversos cenários de orçamentos diferentes; variando a verba disponível de uma a nove instalações, simulando diferentes planos de longo prazo.

Na avaliação da viabilidade e da quantidade ideal de equipamentos, é importante analisar o impacto esperado da redução de acidentes de acordo com a frota monitorada e compará-la com os custos de implantação.

Para efeito de comparação, serão analisados as instalações propostas pelo modelo com a

melhor instalação comparável nos locais onde já existem waysides. Esta avaliação permite inclusive analisar os efeitos de realocação de waysides existentes de acordo com a nova cobertura de frota proposta.

O pré processamento proposto na Seção 3 foi capaz de realizar uma redução significativa do tamanho da malha, reduzindo a complexidade de decisão. No caso real, foi possível reduzir em 76,1% a quantidade de segmentos de linha candidatos à instalação de equipamentos.

O pré-processamento foi realizado em Python 3. Os experimentos foram executados no CPLEX [3], em um laptop i7-5500U com 8GB de memória RAM.

5.1 Cenário sem custos adicionais

No primeiro cenário, com o custo de instalação igual em todos os locais, a curva de cobertura de frota inspecionada pode ser vista na Figura 3.

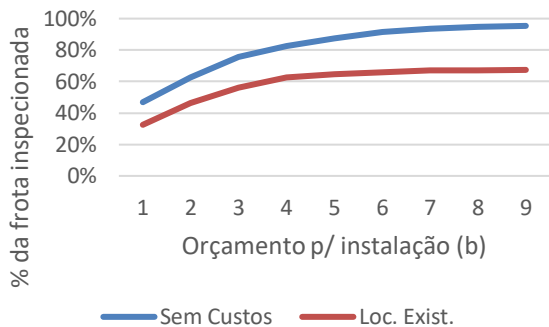


Figura 3 - Comparação de Instalação

Como pode ser percebido na Figura 3, a instalação pode ocorrer em locais que propiciam uma maior cobertura de frota. A partir de 4 waysides, não há mais praticamente nenhum ganho na instalação de novos equipamentos em locais com equipamentos já existentes. Com três waysides já é possível inspecionar 75% da frota; ao passo que com as instalações atuais é possível apenas inspecionar 67% da frota.

Este resultado sugere não só a recomendação de instalação da nova tecnologia de waysides em locais diferentes dos atuais, mas também que pode ser analisada a realocação dos equipamentos existentes – é possível aumentar em média 22,3% a frota inspecionada com a mesma quantidade de waysides, apenas realocando os equipamentos.

Outra observação interessante é a de que, como esperado, uma maior quantidade de equipamentos acaba não sendo capaz de inspecionar vagões diferentes devido à maioria da frota dos grandes fluxos já estarem inspecionados. Com esta curva é possível avaliar o melhor ponto para definição do plano de longo prazo da quantidade de equipamentos.

Uma breve análise dos locais de instalação sugere a sequência de instalação conforme pode ser vista na Tabela 1. É importante ressaltar que nenhum dos 5 locais prioritários para inspeção é um local que possui atualmente um wayside instalado.

Tabela 1 – Locais de instalação

Budget	A	B	C	D	E
b=1	x				
b=2	x	x			
b=3	x	x	x		
b=4	x	x	x	x	
b=5	x	x	x	x	x

5.2 Cenário com custos adicionais

No segundo cenário, o custo de instalação nos locais existentes se manteve o mesmo, porém a instalação em novos pontos incorria em um custo dobrado – devido a novas necessidades de locais de manutenção e de instalação de estrutura de automação e comunicação.

O resultado pode ser visto na Figura 4.

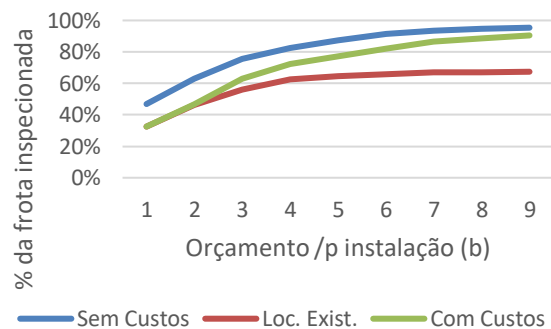


Figura 4 – Comparação de Instalação com Custos adicionais

Como pode ser percebido na Figura 4, a instalação inicia-se similar à instalação limitada aos locais existentes. No entanto, a partir de um orçamento de 3 equipamentos já há um descolamento da curva, e mesmo com os custos de instalação sendo o dobro ainda se torna interessante a instalação em novos pontos para obter a maior cobertura de frota.

Neste cenário, a partir de 4 equipamentos já é possível cobrir 72% da frota, quando comparado a 82% no cenário sem custos adicionais e um máximo de 67% da frota no cenário limitado aos locais existentes. Com uma quantidade maior de orçamento disponível para compra de equipamentos a distância do cenário 2 para o cenário 1 se reduz bastante, sendo ambos significativamente mais eficientes que o cenário base.

Este resultado novamente reforça a recomendação não apenas de instalação de novos equipamentos de wayside, mas a importância de se reavaliar a alocação dos equipamentos atualmente existentes.

Outra observação interessante é a de que, como esperado, uma maior quantidade de equipamentos acaba não sendo capaz de inspecionar vagões diferentes devido à maioria da frota dos grandes fluxos já estarem inspecionados. Com esta curva é possível avaliar a melhor quantidade para definição do plano de longo prazo da quantidade de equipamentos.

Uma breve análise dos locais de instalação sugere a sequência de instalação conforme pode ser vista na Tabela 2. Nesta tabela, os segmentos de linha numéricos (1, 2, 3, 4 e 5) são locais que já possuem equipamentos, e o local alfabético (A) é um local que não possui equipamentos hoje.

Tabela 2 – Locais de instalação

Budget	1	2	A	3	4	5
b=1	x					
b=2	x	x				
b=3	x		x			
b=4	x		x	x		
b=5	x		x		x	x

É interessante perceber que caso se opte por 2 equipamentos, estes serão instalados em locais com equipamentos existentes. A partir do orçamento para 3 equipamentos, torna-se importante a instalação no local A que também é o local prioritário do cenário 1.

Além disso, é interessante observar o comportamento do modelo, que foi capaz de identificar que há uma grande interseção entre os vagões inspecionados entre 3 e a dupla 4 e 5. Sendo possível optar por apenas um, é melhor optar por 3. Porém, caso se tenha orçamento para 5 equipamentos, o locais 4 e 5 conseguem cobrir toda a frota de

3 com uma cobertura de frota adicional.

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi ressaltado a importância de sensoriamento para execução de manutenção mais inteligente em ferrovias. Diante deste cenário, houve uma necessidade em uma ferrovia norte-americana de determinar os melhores locais para implantação de equipamento de wayside com uma nova tecnologia.

Para determinar o local ideal, foi definido um modelo matemático capaz de representar o problema de alocação de recursos de waysides. O modelo matemático é capaz de representar a expansão do parque de waysides de tecnologia existente, através da definição de custo 0 para os locais existentes. O modelo também consegue prever diferentes custos para cada local.

A utilização do modelo matemático em comparação à instalação dos equipamentos em locais que já possuem algum equipamento de wayside provou-se superior, mesmo no caso da instalação de wayside em novos pontos sendo o dobro dos custos de instalação em locais existentes.

Além da proposta de novas instalações, o modelo proposto conseguiu comprovar que é possível melhorar a inspeção em aproximadamente 20% mesmo utilizando a mesma quantidade de waysides existentes atualmente. Desta forma, é possível a utilização deste modelo para avaliar realocação de waysides.

Para trabalhos futuros, é possível estender o modelo para considerar diferentes categorias de wayside que inspecionam diferentes tipos de falhas, bem como diferentes tipos de vagões com diferentes taxas de falhas.

7. REFERÊNCIAS

- [1] Pace, Pietro, *Creating an Intelligent Railway System: from big data collection to information distribution*, Intelligent Rail Summit, 2016. Naples, Italy
- [2] Hagner, Steven, *The Role of Asset Health Platforms in Rail Asset Performance Management*, Intelligent Rail Summit, 2016. Naples, Italy
- [3] *CPLEX, I. L. O. G. 11.0 User's manual*. ILOG SA, Gentilly, France, v. 32, 2007.W