

# MODELO DE ROTEIRIZAÇÃO BASEADA EM TEMPOS DINÂMICOS DE VIAGEM PARA ALOCAÇÃO DE VAGÕES VAZIOS COM FOCO NA REGULARIDADE DA MALHA

**Matheus da Silva Gravel**

Instituto Militar de Engenharia

## RESUMO

Em um sistema ferroviário, a implantação de ferramentas focadas em melhorias de processos e, sobretudo, focadas no nivelamento do desempenho operacional de cada parcela do sistema, contribui fortemente para a melhoria de sua produtividade. Em contrapartida, desvios inerentes ao sistema passam a ser cada vez mais visíveis e impactantes. Os responsáveis pela correção destes desvios devem analisar uma grande quantidade de indicadores em um curto espaço de tempo para tomar a decisão mais adequada e, sem o auxílio de ferramentas adequadas. O trabalho apresenta a evolução da regularidade na empresa e exemplifica dois modelos de otimização que atendem aos objetivos atuais do projeto de regularidade.

## ABSTRACT

In a railway system, implementation of tools focused on process improvement, especially focused on leveling the operational performance of the many portions of the system, has strongly contributed on productivity elevation. On the other hand, system deviations became more perceptible and impacting. The ones responsible for correcting these deviations must analyze a large amount of data in a short time in order to take the best decisions, and without the aid of adequate tools. This work presents an evolution regarding the company's regularity, exemplifying two optimization models to attend the objectives of the regularity project.

## 1. INTRODUÇÃO

Segundo Ohno (1997), um processo estável reduz a necessidade de estoques para compensar a variabilidade do sistema. Esta afirmação é facilmente percebida em processos industriais de produção. Uma empresa trabalhando em perfeita harmonia consegue, em tese, zerar seus estoques em processo, pois segundo os conceitos *do "just in time"*, processos clientes necessitarão da exata quantidade produzida pelo processo fornecedor antecessor e no exato momento da sua necessidade. O nível nulo de estoques é um conceito teórico de improvável obtenção, porém a busca pela regularidade do processo consegue reduzir sobremaneira os excessos de estoque, o que implica em redução de custo de armazenamento e da necessidade de ativos e mão-de-obra. Em linhas de produção em que o limite de atuação sobre a variabilidade dos processos se aproxima dos limites operacionais, a decisão mais acertada é que toda a linha trabalha no ritmo do processo mais lento para se evitar a geração de estoque em processo.

No universo dos transportes o conceito de regularidade age da mesma forma que nos demais processos produtivos, porém a visualização dos processos envolvidos e seus limites necessita de análise mais exaustiva que em processos de produto.

Dentro do ambiente de transportes as empresas ferroviárias se destacam por sua eficiência e pela quantidade de variáveis que limitam o bom desempenho do processo. As grandezas envolvidas são colossais e qualquer desvio pode significar a inversão do sucesso absoluto pelo fracasso da operação.

Uma empresa operadora ferroviária lida diariamente com diversas incertezas e desvios em seu processo produtivo que podem afetar sua produtividade. Imprevistos geram aumento de gargalos, maior tempo médio de deslocamento e, por consequência, aumento do ciclo de transporte, o que gera, segundo Siffert Filho, et al. (2015), uma necessidade de aumento de ativos para compensar os aumentos de tempo de giro.

Na empresa ferroviária em questão no cenário estático, o quantitativo de ativos atende com folga a demanda de produção. Porém, na prática, se o transporte não for bem programado, pode trazer aos atores o aspecto de falta de material rodante.

Em um cenário de múltiplos destinos com distâncias e tempos de carregamento diferentes, naturalmente, por mais que se busque um distanciamento entre os trens para evitar interferências entre os mesmos, ocorrerá a aproximação entre estes.

Além disso, a grande quantidade de interferências, relatadas nos próximos itens desse texto, provocam o atraso de determinadas composições impactadas por este.

Muitas vezes os trens geram filas pontuais que congestionam a malha em pontos específicos, o que acaba atrasando ainda mais os trens e aumentando os ciclos e, por consequência, causando um não atendimento das demandas. Ao se aumentar o ciclo, ocorre a necessidade de se colocar mais ativos no sistema e, com mais ativos no sistema os pontos de congestionamentos se tornam mais frequentes e mais impactantes. Esses impactos causam um aumento ainda maior do ciclo, o que gera, ao se analisar os números de desempenho dos trens, novamente, a necessidade de mais ativos. Então, acontece um efeito contínuo e vicioso que reduz cada vez mais a produtividade dos ativos.

Com mais ativos na malha e cada vez mais congestionados, ocorre aumento do número de paradas e do consumo de combustível, aumenta a necessidade de maquinistas e aumenta o tempo aguardando maquinista, para os trens que chegam muito juntos em locais de troca. O ciclo novamente aumenta.

Tendo supercapacidade de transporte, o grande desafio então, passa a ser o de fazer com que todo o sistema trabalhe em um ritmo contínuo de trabalho que atenda ao volume e ciclo dimensionado. O tempo de descarga deve ser o mesmo, os trens devem sair de cada local com um espaçamento padrão e devem cumprir velocidade que garantam a distância entre estes, devem então carregar no mesmo ritmo e devem, após carregar, chegar em um local comum da malha com o mesmo espaçamento. Dessa forma, a produção será atendida e os trens não vão impactar uns aos outros. Além disso, os maquinistas estarão programados de acordo com o espaçamento do sistema, de forma a não gerar falta nem sobra pontual de maquinistas.

## **2. DESAFIOS DA REGULARIDADE**

A ferrovia em questão vem gradativamente aumentando seus trabalhos com foco no cumprimento de tabelas de tempos com foco na regularização de sua malha. Foram definidas grades estáticas de atendimento das interfaces e os ganhos já são expressivos.

Porém, o ambiente ferroviário é composto por uma infinidade de variáveis de dispersão que constante ou pontualmente impactam no desempenho dos trens. Por citar algumas:

- Manutenções da via permanente
- Quebras de material rodante
- Falhas críticas de sinalização
- Interferências de comunidades
- Quebras de trilho
- Quebras de maquinário das minas
- Baixo desempenho do carregamento/produção de minério
- Baixo desempenho no porto
- Quebras do porto

Essas perdas são inerentes ao processo da ferrovia e tendem a não desaparecer. Deve-se buscar sua redução de sua frequência e a redução dos impactos das mesmas.

## 2.1. IMPACTO DE PERDAS E DESPERDÍCIOS DOS PROCESSOS PRODUTIVOS.

Toda empresa tem ou deveria ter como seu foco principal a busca pelo aumento de sua produtividade e redução de seus custos de forma a manter sua competitividade. Hoje esse é o maior foco da ferrovia em questão.

É de conhecimento no universo acadêmico e empresarial a existência de sete tipos de desperdícios, conforme confirmado por Guinato (2002). São eles:

– *Desperdício de Superprodução*: a perda de superprodução tem uma propriedade adicional em relação aos demais tipos de perdas, ele esconde as outras perdas e é mais difícil de ser eliminada.

– *Desperdício por Espera*: esse tipo de desperdício ocasiona a formação de filas que visam garantir a taxa de utilização de determinado processo ou equipamento.

– *Desperdício de Transporte*: O transporte em si, não agrega valor, deve ser encarado como uma perda que deve ser minimizada para um mesmo nível de produção.

– *Desperdício de Processamento*: esse desperdício é caracterizado pela produção de algo que não deveria ser produzido, pelo menos naquele momento. Sendo então importante a aplicação das metodologias de engenharia e análise de valor, que buscam simplificar ou reduzir o número de componentes ou operações para produzir.

– *Desperdício de Movimentação*: As perdas por movimentação relacionam-se aos movimentos desnecessários realizados pelos operadores na execução de uma operação. Este tipo de perda pode ser eliminado através de melhorias baseadas no estudo de tempos e movimento.

– *Desperdício por Defeitos*: esse tipo de defeito ocorre devido à geração de produtos fora da especificação de qualidade ou padrão estabelecido e que por esta razão não satisfaçam a requisitos de aplicação.

– *Desperdício de Estoque*: perda devido ao estoque de matéria-prima, material em processamento e produto acabado. Impactam diretamente no custo de oportunidade, armazenagem e manutenção.

Para atuar sobre esses desperdícios existem uma série de ferramentas, sendo uma delas de maior enfoque neste trabalho, o nivelamento da produção. Uma gama de ferramentas é utilizada em conjunto com o nivelamento da produção, porém serão apenas comentadas neste trabalho. Na tabela 1 consta qual a aplicabilidade das principais ferramentas dos conceitos dentro do “*just in time*” para atacar cada um dos tipos de desperdícios.

**Tabela 1:** tipo de problema e a aplicabilidade de cada ferramenta dentro do JIT

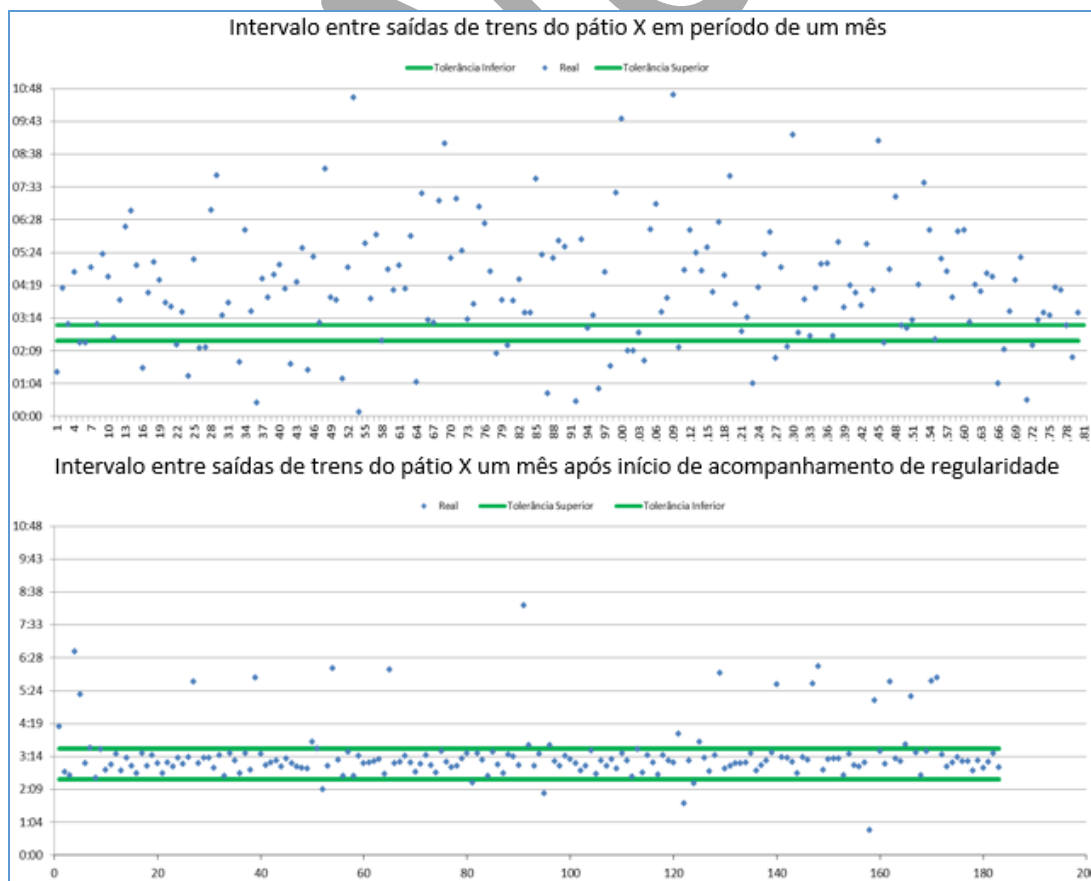
Prática/Desperdício	Superprodução	Espera	Transporte excessivo	Processos inadequados	Inventário desnecessário	Movimentação desnecessária	Produtos defeituosos
Arranjo físico celular	SIM	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM	SIM
<i>Kanban</i>	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NÃO
Produção Puxada	SIM	SIM	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NÃO
Produção Nivelada	SIM	TALVEZ	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NÃO

### 3. CENÁRIO ATUAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TRENS

A programação de carregamentos hoje é feita 24 horas por dia e por pessoal treinado, dependendo exclusivamente dos conhecimentos práticos de cada operador, que revezam em turno de 6 horas. Não existe para tanto uma metodologia com padrões, indicadores, e níveis de desempenho a ser analisado em cada tomada de decisão. O operador oferta trens para as minas de acordo com o seu conhecimento empírico dos tempos de deslocamento e desempenho das minas. O conhecimento prático é muitas vezes repleto de vícios e carregado de pré-julgamentos que influenciam negativamente no desempenho individual do operador. Ainda, por haver o revezamento de operadores, o modelo mental particular de cada um deles podem alterar bruscamente o tipo de distribuição dos trens. Um operador nesse cargo deve estar atento a diversas restrições e características do sistema:

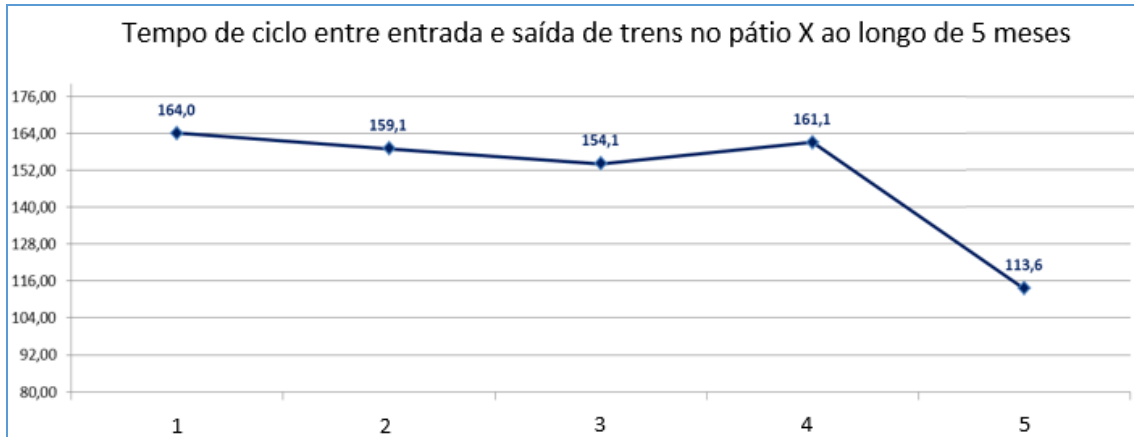
- A localização dos trens.
- Quantidade de vagões em cada trem.
- Tempo de deslocamento de cada trem até cada pátio de desmembramento.
- Tempo de deslocamento entre pátio de desmembramento e mina.
- Tempo de carregamento de cada mina.
- Tempo de deslocamento de cada mina até o pátio de formação.
- Tempo de formação.
- Demanda de carregamento de cada mina.

O cenário nas minas não é diferente, existe ainda baixa confiabilidade nas programações e quebras pontuais que impactam muito no atendimento dos carregamentos diários, apesar de haver um contínuo esforço para se mudar esse cenário, conforme mostrado nas figuras 1 e 2.



**Figura 1:** Comparativo do intervalo entre saídas de um pátio antes e depois da implantação de uma grade de atendimento.

Pode levantar suspeitas de que, para se manter a grade atendida, se penalizou o ciclo. Conforme mostra a figura 2, isso não aconteceu.



**Figura 2:** Tempo de ciclo dos trens no pátio X.

O esforço da ferrovia numa tentativa de mudança da forma a dar maior regularidade ao sistema MINA-FERROVIA-PORTO com a criação de grades de atendimento das interfaces tem sido válido.

O tempo de ciclo tem diminuído consideravelmente, assim como os atrasos nos processos, conforme mostrado na figura 3. Porém, conforme relatado, o processo de ajuste dessas grades, executado pelos operadores, ainda carece de melhorias significativas em relação ao atendimento dos indicadores adequados em cada momento e, principalmente, para garantir o atendimento das grades, prejudicado pela disposição geográfica das minas, conforme relatado no item [1].



**Figura 3:** Ciclo total de vagões do tipo Y (objeto deste estudo)

Quando uma interferência de algum tipo das citadas ocorre, a ferrovia precisa de um desempenho acima do que é hoje conseguido com os operadores de distribuição de trens vazios.

Uma ferramenta para auxílio na tomada de decisão deveria ser empregada para auxiliar os operadores na alocação de vagões vazios com foco na redução de perdas, evitando:

*Redução de Superprodução:* a ferrovia terá uma visão mais rápida do excesso da oferta de trens sem demanda de produção prevista e poderá reduzir essa quantidade, estacionando os trens excedentes. Produção sincronizada com a demanda.

*Redução de esperas:* com a chegada programada ao local de carregamento sendo cumprida, o aumento da produtividade de trens será aumentado. E falhas de distribuição do tipo falta em um local e sobra em outro será reduzido.

*Redução de Estoques:* de minério e de trens ao se atuar na melhoria da sincronia dos trens e na causa geradora de flutuações de demandas de alguns processos causada pela falta de cadência dos processos da ferrovia

*Redução de defeitos:* um defeito é um não atendimento à qualidade da produção. No ambiente logístico, considerando o atraso um defeito, este será minimizado. Pois será acordado o prazo suficiente e necessário para os atendimentos.

*Redução de transportes:* dentro do ambiente ferroviário, diversos processos logísticos estão sendo constantemente desenvolvidos para que o transporte de carga aconteça. A locomotiva deve estar no local correto, na hora correta, o maquinista da mesma forma, dentre outro. Com uma maior previsibilidade da circulação, os transportes desnecessários dos recursos serão minimizados. A tendência é que as interfaces ajustem sua programação de entrega de recursos, no local correto, no momento necessário.

O trabalho visa apresentar dois exemplos de modelagem que podem ser aplicados com um esforço um pouco menor na empresa e que visam:

- manter a regularidade do sistema;
- atender às demandas de carregamento das minas;
- reduzir espera e ociosidade nos pontos de carregamento;
- priorizar o ponto de carregamento;
- e, por último e mais importante, dar uma resposta otimizada em tempo hábil para tomada de decisão.

Modelos desse tipo são escassos ou de complexa adaptação para o cenário customizado da ferrovia em questão.

#### **4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Problemas de alocação de vagões vazios podem ser estudados como problemas de roteirização de veículos em que existem diversos destinos, um local de origem e diversas possibilidades de manobras de formação/desmembramento dos trens.

No caso das ferrovias, esse tipo de problema tem grande

Segundo Solomon (1987) e Assad (1988), a roteirização e a programação de veículos é um elemento chave para muitos sistemas de distribuição.

Os problemas de roteirização e distribuição de veículos se mostram de grande complexidade matemática (problema combinatório do tipo “NP-hard”), poucos problemas de roteirização de veículos são utilizados tempo polinomial devido à essa característica NP-hard (Lenstra e Ronnooy Kan, 1981).

A importância cada vez maior dos problemas de roteirização no contexto logístico tem causado um aumento ainda maior dessa complexidade, com novas restrições, novos desafios de custo e produtividade. Cunha (2003) afirma que se torna impossível a obtenção de soluções ótimas para exemplos próximos da realidade. Assim, a busca de novas heurísticas se mostra um grande desafio.

Existe hoje uma série de heurísticas que se propõe a solucionar os problemas de roteirização, porém, ainda não podem resolver esse tipo de problema.

Solomon (1987) compila e testa uma série de heurísticas para resolução de problemas de roteirização e programação de veículos com restrição de tempo (ou VRSPTW, do inglês “*vehicle routing and scheduling problem with time window constraint*”) que até aquele momento não havia sido explorado de forma abrangente. E consegue determinar uma boa solução para problemas de VRSPTW e ainda usada em diversos contextos, conforme aplicação de Potvin, et al. (2006).

Cordeau, et al. (2002) apresentam uma série de heurísticas e meta heurísticas atualizadas e as testam segundo o que chamam de os quatro atributos para uma boa heurística de roteirização de veículos. São eles: acurácia, velocidade, simplicidade e flexibilidade.

Uma solução alternativa, simplificada, de grande rapidez e aceitável nível de resposta, foi proposta por Ahuja, Magnanti e Orlin em 1993 e utilizada em um problema similar por Cunha (2003). Este tipo de solução se aplica hoje no ambiente em que se encontra a ferrovia fruto de estudo desse trabalho devido à sua simplicidade de visualização e interpretação dos resultados por qualquer pessoa razoavelmente treinada, sem a necessidade de utilização do corpo de engenheiros da empresa.

## **5. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO**

É apresentado a seguir um modelo desenhado por Potvin, et al. (2006) onde sua aplicação ao contexto da ferrovia será avaliada e um exemplo de aplicação da ferramenta de roteirização proposta por Cunha (2003). Posteriormente, são comparados e detalhados como se aplicariam ao contexto ferroviário.

### **5.1. Caso I**

Dentre as diversas técnicas para resolução de problemas de roteirização de veículos, os métodos que utilizam de heurísticas e meta-heurísticas se destacam devido à sua aplicabilidade e desempenho (Cordeau, et al., 2002).

Um exemplo de aplicação da heurística para resolução de problemas do tipo VRPTW é utilizada por Potvin, et al. (2006), onde os autores definem um problema presente no serviço internacional de correspondências do tipo muitos para um (*many to one*), onde existe um depósito e diversas possibilidades de destinos. No trabalho, os autores comparam e defendem a utilização de probabilidades na construção de roteirização para obtenção de melhores resultados ao se comparar com utilização determinística.

#### *5.1.1. Características do problema apresentado*

Apesar do foco do trabalho ser a defesa da aplicação de incertezas (probabilidades) à resolução de problemas de roteirização, o exemplo utilizado muito se assemelha ao ambiente ferroviário a ser trabalhado, com conceitos de desempenho semelhantes ao buscado pela empresa.

O problema se comporta segundo um conjunto de grafos com diversos nós, onde em um desses nós se encontra o depósito e nos demais, possíveis clientes. Após cada coleta em um cliente, o veículo pode voltar ao nó do depósito ou atender outro cliente diretamente, havendo tempo hábil. Só após fazer a entrega das encomendas no depósito é que o veículo estará novamente disponível para uma nova coleta.

Em cada cliente existe um intervalo de tolerância para chegada mais cedo e chegada mais tarde. Se o veículo chegar antes do horário mais cedo, este deverá esperar. Caso chegue após o horário mais tarde, este sofrerá uma penalidade devido ao atraso.

Da mesma forma que acontece nos clientes, no depósito também existe uma janela de atendimento para chegadas mais cedo e mais tarde.

Os veículos são idênticos, com a mesma capacidade cada um.

O objetivo do problema é minimizar uma ponderação entre a soma do tempo de viagem de cada veículo, soma dos atrasos nos clientes e a soma dos atrasos no depósito. Para tanto, o autor utiliza elementos dinâmicos, dentre eles, a inserção de novos clientes e tempo de viagem dinâmicos. Ao apresentar os métodos de trabalhar com os tempos de viagem o autor apresenta três elementos utilizados para definir o tempo de percurso entre dois locais:

- Previsão de longo prazo: tempos já conhecidos e documentados que variam apenas de acordo com o horário do dia (“*time-dependent*”).
- Previsão de curto prazo: antes de sair de um local, o tempo de viagem é modificado aleatoriamente. Isto implica em uma reprogramação da rota criando uma nova previsão baseada em uma nova informação disponível.
- Perturbação dinâmica: após isso, uma nova perturbação baseada em uma distribuição de probabilidade é imputada. Esta representa perturbações não previstas que podem ocorrer ao longo da viagem.

A similaridade da modelagem proposta com o ambiente descrito neste trabalho se mostra gigantesca. Fazendo-se os devidos ajustes e refinamentos, a heurística proposta poderia ser implantada na roteirização dos lotes vazios da ferrovia com um nível de fidelidade bastante adequada.

## 5.2. Caso II

O caso II, apresentado por Cunha (2003) se propõe a resolver um problema de sequenciamento e programação de visitas de gerentes de banco a seus clientes.

### 5.2.1. Características do problema apresentado

O estudo se aplica a uma instituição bancária visando maior aproximação de atuais clientes e captação de novos.

Os gerentes devem realizar visitas a clientes que são pré-agendadas via call center.

Os gerentes têm um horário para iniciar as visitas e para finalizá-las. Um estudo de roteirização com múltiplas bases e múltiplos destinos é aplicado com restrições de janelas de tempo (horário agendado com o cliente).

### 5.2.2. Modelagem do problema

O problema consiste na roteirização e na programação de eventos realizados diariamente por cada trem. Os eventos possíveis são de três tipos, deslocamento entre pontos, manobra de desmembramento e formação e carregamento, a serem detalhados mais à frente no trabalho.

*Cientes:* Sendo  $M$  o conjunto de minas a serem visitadas, para cada mina  $m \in M$  existe:

- Tempo de carregamento  $s_i \geq 0$ .

- A tolerância de chegada em  $M$  mais cedo e mais tarde, respectivamente, para cada trem é  $e_i$  e  $l_i$ , para  $e_i \leq l_i$ .

*Veículos:* Seja  $K$  o conjunto de trens disponíveis para atendimento de  $M$ . Para o cenário  $K \leq M$ , obrigatoriamente, cada trem em  $K$  deve atender ao menos uma mina em  $M$ . Quando  $K \geq M$ , a demanda de carregamento está abaixo da capacidade do sistema. Esse cenário aponta que uma quantidade de trens pode ser desviada em algum pátio para não impactar os demais trens, provendo maior capacidade para a malha (menos paradas, menor ciclo, etc.).

*Cliente intermediário:* Chamaremos de  $p \in P$  o pátio de manobra de forma que cada trem, havendo tempo hábil, pode manobrar em algum pátio para ser feito o desmembramento ou formação do trem. Trens vazios, fazem desmembramento e trens carregados fazem formação. Para cada pátio em  $P$  existe:

- Tempo de manobra  $s_i \geq 0$ .



Todos os trens partem do mesmo local  $b \in B$ , porém em instantes diferentes  $t_i$ . E retornam para o mesmo local de partida em instante também diferente  $t_i$ .

A tolerância de chegada em BR mais cedo e mais tarde, respectivamente, para cada trem é  $e_i$  e  $l_i$ , para  $e_i \leq l_i$  e  $[e_i, l_i] = [tik-1 + h, tik-1 + h + (li-ei)]$ .

O roteiro de cada trem  $k \in K$ :

- pode passar por um pátio de desmembramento  $pd \in Pd$ .
- deve passar por uma mina  $m \in M$  e
- pode passar por um pátio de formação  $pf \in Pf$ .

Desde que, respeitando o intervalo de chegada à  $BRk$  e  $M [e_i, l_i]$ .

O deslocamento de cada trem de um ponto  $i \in (B \cup BRk)$  até um ponto  $j \in (B \cup BRk)$  requer um tempo de viagem  $t_{ij}$ .

A variável de decisão do problema é então:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o ponto } j \in (B \cup BRk) \text{ é visitado após} \\ & \text{o ponto } i \in (B \cup BRk) \text{ pelo trem } k \in K. \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$T_c$  = horário de chegada do trem  $k \in K$  em BR e  $T_s$  é o horário de saída do trem do local de origem BR.

Nesse caso, o problema deve otimizar o tempo entre cada passagem de trens chegando ( $T_c$ ) em BR.

### 5.2.3. Estratégia de resolução

Segundo os conceitos propostos por Cunha (2003), existem características que permitem serem feitas afirmações que podem transformar o problema em questão.

- Os  $T_c$ , ou, horários de chegada dos trens ao pátio BR, podem ser pré-definidos para cada  $k \in K$ . Ainda, ao invés de ser considerado um intervalo de tolerância, passaremos a contar com um horário a ser atendido para o retorno do trem ( $T_c = e_i = l_i$ ). Para tanto, uma tabela de horário já otimizados deve ser construída para termos valores do tipo {9h, 10 h, 11 h, 12 h, 14 h, 15 h, 16 h, 17 h}, em vez de  $T_c$  poder assumir qualquer valor no intervalo  $[e_i, l_i]$  correspondente a uma janela de tempo.

- Devemos assumir também que os trens não têm diferenças entre eles. Apenas para o trabalho isso será considerado uma verdade, pois na realidade a formação de cada trem pode definir se ele pode ou não atender a uma mina ou pátio de formação e desmembramento específico. A frota de trens será considerada homogênea no problema de roteirização dos trens.

Dessa forma, são limitadas e simplificadas as particularidades do problema. Podendo então ser desenvolvido um método de resolução exato ao invés de um método heurístico. Podemos então alcançar uma solução ótima do problema proposto ao invés de uma aproximação obtida por heurística.

A estratégia de solução mais indicada nesse tipo de problema é a do fluxo em rede de custo mínimo. O problema se assemelha ao problema de transbordo em que é criada uma rede espaço-tempo para a modelagem do problema de fluxo de rede correspondente ao problema de roteirização,  $G = (N, A)$  onde  $N$  é o número de nós e  $A$  o número de arcos.

Cunha (2003) propõe a criação de dois tipos de nós, que aqui serão empregados de forma análoga e serão chamados de: Nós de trem (NK) e nós de pátios (NP) e nós de minas (NM).

- Para cada trem  $k \in K$  em um local de início  $b \in B$  é criado um nó  $bs$  e um nó  $bt$  que equivale à chegada no local BK com demanda e oferta iguais a um e pertencentes a NK.

- Em cada mina,  $m \in M$ , são definidos  $i1$  e  $i2 \in NM$ . Onde  $i1$  e  $i2$  correspondem, respectivamente, ao início e término do carregamento. Cada um dos nós  $i1$  e  $i2$  está associado a um horário de atendimento.

- Em cada pátio,  $p \in P$ , são criados dois nós  $p1$  e  $p2$ . Onde  $p1$  e  $p2$  correspondem, respectivamente, ao início e término da manobra. Cada um dos nós  $p1$  e  $p2$  está associado a um horário de atendimento.

São traçados então os arcos:

- Arcos de trem (*arctrem*): ligam o local de início  $bs$  ao primeiro pátio de possível atendimento ou diretamente a uma mina.

- Arcos de pátio (*arcpátio*): são arcos ligando os nós  $p1$  e  $p2$  de início e fim de manobra no pátio.

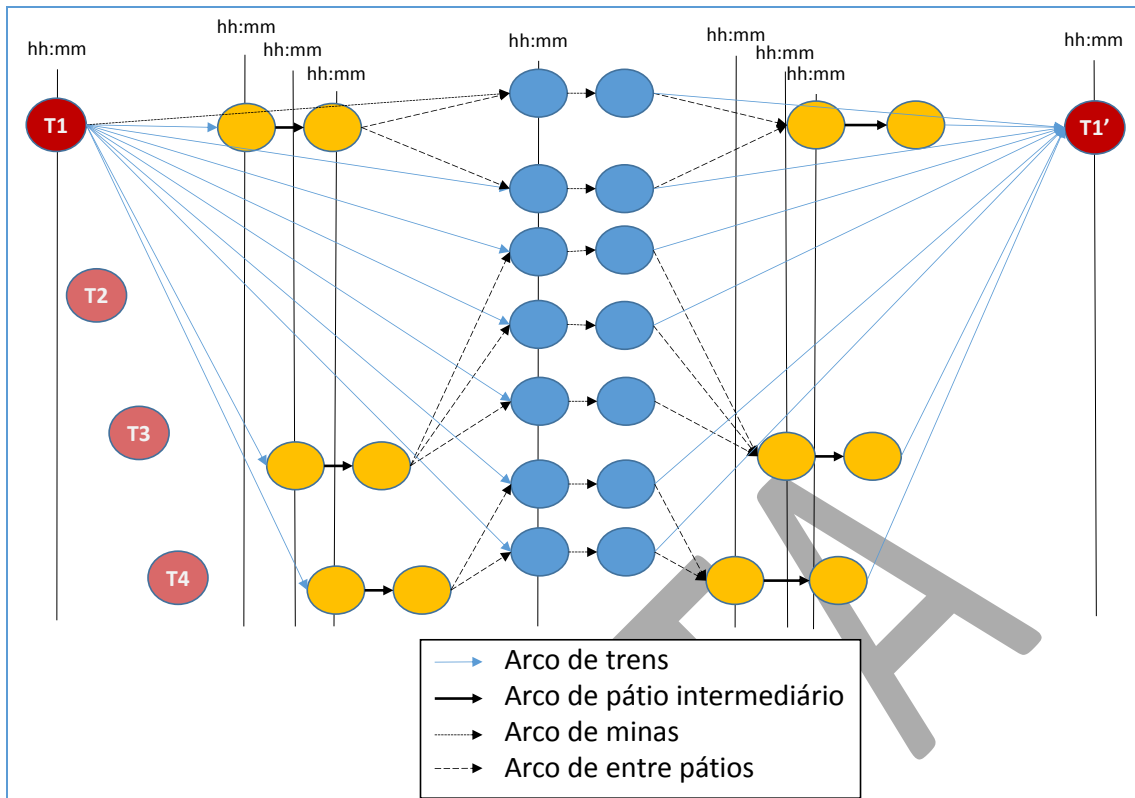
- Arcos de mina (*arcmina*): são arcos que ligam os nós  $i1$  e  $i2$  que correspondem ao início e final do carregamento.

- Arcos de deslocamento (*arcdesloc*): são arcos que ligando um pátio a uma mina, desde que haja tempo hábil para passagem do trem no pátio em questão, sem descumprir o horário de chegada à mina.

A rede  $G = (N, A)$  é formada pelo conjunto de nós  $N = (NK \cup NP \cup NM)$  e pelo conjunto de arcos  $A = (arctrem \cup arcpátio \cup arcmina \cup arcdesloc)$ .

A cada arco é incrementado o tempo do trem. O problema consiste então em encontrar o tempo mínimo total garantindo o atendimento dos tempos  $bt$ , de chegada dos trens ao pátio BK.

A construção da rede que representa o problema pode ser vista na Figura 4.



**Figura 4:** Representação espaço tempo proposta

Os grafos da figura 4 exemplificam quais os fluxos podem ser utilizados para se atender às minas. A criação desses fluxos deve ser feita para todas as possibilidades de atendimento dos pátios e minas. Observa-se que alguns pátios se interligam apenas com algumas minas devido às restrições geográficas.

Os grafos podem ser expandidos prevendo-se novas possibilidades de manobra e restrições de atendimento. O problema pode sofrer uma série de adaptações pequenas para servir inclusive como ferramenta de estudo de impactos de tomadas de decisão diferenciadas a partir da fixação de alguns valores.

## 6. CONCLUSÃO

A busca pela redução de perdas e desperdícios faz com que os processos sejam alterados e seus atores sejam contaminados pela busca de perdas do processo. Em contrapartida, a regularidade chega a um ponto em que seus ganhos são minimizados a cada melhoria dos processos e grandes ganhos começam a ser limitados por questões de complexa resolução, necessitando de estudos mais aprofundados ou de auxílio de tecnologias e lógicas mais complexas. Dessa forma entende-se que o próximo grande passo necessário para avançar nos processos atuais da ferrovia em questão é pela utilização de ferramentas de suporte à decisão à distribuição de trens vazios. A correção das interferências na circulação apesar de ser carregada de análises empíricas, não tem a robustez de uma solução computadorizada.

As ferramentas apresentadas dão um bom caminho para a implantação de modelos desse tipo na ferrovia. Porém, a literatura não nos permite tomar a decisão de implantação de modelos de otimização de redes e roteirização sem antes buscar uma meta-heurística que possa prover um melhor desempenho.

A união do poder de análise dos profissionais distribuidores, aliada à supervisão sistemática dos objetivos do processo por um sistema computadorizado, irá sem dúvidas potencializar ainda mais os ganhos de regularidade e a redução de desperdícios.

## 7. Referências

- Ahuja, R. K., Magnanti, T. L., & Orlin, J. B. (1993). *Network flows-Theory Algorithms and Applications*. New Jersey: Prentice Hall-USA.
- Assad, A. A. (1988). Modeling and implementation issues in vehicle routing. Em B. L. Golden, & A. Assad, *Vehicle Routing: Methods and Studies*. North Holland.
- Cordeau, J. F., Gendreau, M., Laporte, G., Potvin, J. Y., & Semet, F. (Maio de 2002). A Guide to Vehicle Heuristics. *The Journal of the Operational Research Society*, 53(5), pp. 512-522.
- Cunha, C. B. (Ago. de 2003). Problema de Sequenciamento e Programação de Visitas de Gerentes de Banco. *Gestão e Produção*, 10(n. 2), pp. 183-196.
- Guinato, P. (2002). *Lições Práticas para a Implementação da Produção Enxuta*. Caxias do Sul: Editora da Universidade de Caxias do Sul.
- Lenstra, J. K., & Ronnooy Kan, A. H. (1981). Complexity of Vehicle routing and Scheduling Problems. *Networks*, 11, pp. 221-227.
- Ohno, T. (1997). *O Sistema Toyota de Produção - Além da produção em larga escala*. Porto Alegre: Bookman.
- Potvin, J.-Y., Xu, Y., & Benyahia, I. (2006). Vehicle Routing and Scheduling With Dynamic Travel Times. *Computers & Operations Research*, 33, pp. 1129-1137.
- Siffert Filho, N. F., Marchetti, D. S., Martins, A. A., Zanette, A. L., Moreira, C. C., Dalto, E. J., . . . Tucci, N. (2015). O BNDES e a Questão Energética e Logística da Região Sudeste. Em P. BNDES. Fonte: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/4401>
- Solomon, M. M. (Mar.-Abr. de 1987). Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints. *Operations Research*, 35(2), pp. 254-265.