O PROBLEMA DE FLUXO MULTIPRODUTO PARA ALOCAÇÃO DE FROTA HETEROGÊNEA EM FERROVIAS

Alan Teixeira dos Santos
Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET-RJ
alantds@yahoo.com.br

Lino Guimarães Marujo
lgmarujo@ufrj.br
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Resumo

Este artigo tem como tema central o Problema de Fluxo Multiproduto (PFM), um dos principais problemas de fluxos em redes. Sobre este tema, é proposta uma metodologia baseada em técnicas de Programação Inteira (PI) para resolução de um estudo de caso no setor ferroviário. O programa de investimentos e os projetos para infra-estrutura que o governo prevê para o setor motivaram esta pesquisa. Dentro da metodologia proposta, destaca-se o estudo das características, formulações e aplicações do PFM aplicado ao problema de alocação de vagões em ferrovias. Este problema é considerado multifluxo pelo fato de haver vários produtos que são carregados por uma frota de vagões heterogênea, onde também há requisitos de compatibilidade de produtos com determinados vagões. O objetivo principal é alocar a quantidade máxima de produtos nos seus respectivos vagões compatíveis, obedecendo a um grupo de restrições para se produzir um preço adequado ao serviço. No que tange os resultados, pode-se destacar a exposição da quantidade ótima de vagões discriminada por arcos da rede. Também é proposta uma metodologia para alocação de locomotivas em cada trecho, já que é praticamente conhecida a dimensão da composição ferroviária, bem como os custos envolvidos de utilização dos vagões e produtos.

Palavras-Chave: Problema de Fluxo Multiproduto; Fluxos em Redes; Branch-and-Bound

Abstract

This paper is focused on the Multicommodity Flow Problem (MFP) one of the main network flow problems. About this issue, it's proposed a methodology based on integer programming techniques (IP) to solve a case study in the railroad field. The investments program and the infrastructure projects that the government intends to this area motivated this research. Within the proposed methodology, we stand out the features, formulations and applications of MFP applied to the wagons scheduling problem. This problem is considered as a multicommodity because there are several commodities that are carried out by a heterogeneous fleet of wagons, where there are requirements of compatibility of commodities and wagons. The main objective is to allocate the maximum amount of commodities in their wagons compatible, according to a group of constraints to produce an appropriate price to the service. Regarding the results, we can stand out the exposure of the optimum amount of wagons for each arc of network. It is also proposed a methodology for allocation of locomotives on each route, since it is known the size of the railway transport composition, such as the costs involved in the utilization of wagons and commodities.

Keywords: Multicommodity Flow Prolem; Network Flows; Branch-and-Bound.

1. INTRODUÇÃO

Este artigo está centrado na área de otimização em redes, onde são utilizadas técnicas de Programação Inteira (PI) para resolução de um estudo de caso para o setor ferroviário. O estudo de caso em questão é formulado como um problema multifluxo para atendimento da demanda de determinados produtos para vários clientes. Além disso, estes produtos devem ser carregados por uma frota de vagões heterogênea, que possuem restrições de utilização. Conforme observado ao longo do artigo e no referido estudo de caso, a estrutura teórica proposta, motivada pela expansão e evidência do setor ferroviário no país, pode contribuir para o aprimoramento de operações logísticas em diversas situações.

O PFM é uma abordagem tradicional na disciplina de fluxos em redes, onde cada produto não é independente, e compartilha uma mesma estrutura (arcos), tornando-o mais complexo que um problema de fluxo comum. (AHUJA, 1993). Esta categoria de problemas em redes possui vasta aplicação em quase todos os setores de serviços, ciência ou tecnologia. Diversas aplicações deste problema vêm sendo estudadas ao longo dos anos com técnicas algorítmicas de resolução cada vez mais sofisticadas. Uma destas técnicas será utilizada para resolver o estudo de caso deste artigo, que é conhecido como o algoritmo Branch-and-Bound, ou o método de enumeração e avaliação progressiva.

Dentre os setores em que os problemas multifluxos possuem aplicação, destacam-se: Os setores de transportes, Telecomunicações, Computação, Genética, dentre outros. No entanto, o foco será apresentar solução para um problema real do setor ferroviário, tomando como base algumas aplicações bem sucedidas, que em sua maioria, produziram modelos matemáticos de minimização de custos de transportes, otimização de seqüenciamento da tripulação (funcionários) na malha ferroviária, minimização de tempo de operação e principalmente otimização no seqüenciamento de vagões e locomotivas, que é aplicação específica escolhida para ferrovias.

No setor ferroviário brasileiro, são previstos grandes investimentos nos próximos anos. Isto porque, as ferrovias brasileiras ainda encontram-se deficientes para atender a capacidade produtiva no país, de tal forma que o governo prevê investimentos de no mínimo R$ 40 bilhões e extensão de 10 mil quilômetros em relação à malha atual. Ainda são previstos investimentos não prioritários da ordem de R$59,4 bilhões. (O GLOBO, 2010)

Dentre os principais projetos federais, destacam-se as obras da Ferrovia Norte-Sul que ligará a região Norte ao Centro-Oeste, chegando até o Estado de São Paulo. (O GLOBO, 2010).

1.1. OBJETIVO

Desenvolver modelo matemático associado a redes ferroviárias que encontrem soluções viáveis para problemas de alocação de frotas heterogêneas de vagões, considerando somente restrições à um nível tático.

1.2. JUSTIFICATIVA

O PFM é de grande interesse prático, e para o setor de transportes tem tido significativa atuação. Portanto, conforme observado em trabalhos de autores estrangeiros e nacionais, a possibilidade de otimizar a utilização de recursos, os custos, o lucro e sobretudo o gerenciamento de operações de empresas do setor ferroviário justificaram o interesse no estudo de programação inteira, e especialmente do problema multifluxo para aplicação neste setor.

1.3. MOTIVAÇÃO

A principal motivação deste projeto está na aplicação da estrutura teórica aqui apresentada para contribuir com o setor ferroviário, que se encontra em expansão no país.

2. O PROBLEMA DE FLUXO MULTIPRODUTO (PFM)

O problema de Fluxo Multiproduto é um problema tradicional de fluxos em redes, e um dos principais deste segmento. Assim, antes de adentrar na definição e conceitos deste problema, faz-se necessário, uma breve introdução de autores que produziram aplicação deste problema ao longo de décadas, com o objetivo de demonstrar a relevância deste assunto.

2.1. ALGUMAS APLICAÇÕES RELEVANTES

Na década de 60, vários trabalhos surgiram abordando o PFM, sendo o pioneiro exposto por FULKERSON (1962) e HU (1963), de acordo com CHAGAS (2005). Desde então, muitos pesquisadores vem se interessando por este problema, que apesar de ser genérico, surge juntamente com instâncias grandes. Isto significa dizer, que mesmo quando os problemas surgem com redes relativamente pequenas, em geral produzem modelos matemáticos demasiadamente complexos. (CHAGAS, 2005)

CARVALHO *et al.*(2005) propuseram um modelo matemático para minimizar o custo logístico de transporte de soja para Estrada de Ferro Norte-Sul (EFNS). Foram estudados a capacidade da EFNS e os aspectos estratégicos da mesma, relatando inclusive que a capacidade de transporte ferroviário no Brasil está abaixo do necessário, tendo em vista a capacidade de produção. Neste trabalho foi proposto um modelo matemático de otimização, que é geralmente conhecido como Problema de Fluxo Multiproduto de Custo Mínimo (*Multicommodity Minimum Cost Flow Problem*). Os resultados deste modelo apontaram um total de 1,1 milhão de tonelada dos produtos: soja, farelo de soja e óleo de soja, com potencial para ser transportado através da ferrovia, ao considerar um custo de transporte de R$ 0,04/t.km.

FAJARDO (2006) discute técnicas para minimizar os custos de transporte de soja no estado do Mato Grosso para portos exportadores. A metodologia propõe um modelo matemático que integre e/ou utilizem da melhor forma possível os vários meios de transporte além do rodoviário, como o marítimo e o ferroviário.

AHUJA *et al.*,(2007) apresentaram solução viável para o problema de seqüenciamento da tripulação (*Crew Scheduling Problem* - CSP) em uma ferrovia Classe I Norte Americana. O artigo propôs um modelo matemático que minimiza os custos de salários e encargos da tripulação, além de diminuir custos de operação, hospedagem, atrasos entre outros. O enfoque do seqüenciamento da tripulação também é de cunho estratégico, possibilitando aos executivos de ferrovias negociarem com as organizações sindicais, após a exposição dos resultados computacionais, ou seja, pode-se propor um plano de ação para melhoria do setor. Este artigo mencionado é considerado como uma nobre contribuição para a área de otimização em redes, e especialmente em problemas do tipo multiproduto modelado para o problema de seqüenciamento de tripulações.

ALMEIDA e PIMENTEL (2009) produziram um modelo matemático para o problema do planejamento integrado de produção e transporte de minérios. Além disso, foi explorada a integração de diversos problemas estudados pela disciplina de Pesquisa Operacional (PO) para a indústria da mineração, que são tradicionalmente concentrados no planejamento e desenvolvimento de minas, alocação e despacho de caminhões e escavadeiras, programação de operações ferroviárias e programação de fila de navios em portos. A função objetivo do modelo buscava minimizar os custos de produção, transporte, estocagem e compras de terceiros ao longo de todo o horizonte de planejamento, bem como evitar penalidades por não atendimento à demanda do período.

2.2. DEFINIÇÃO E MODELO GENÉRICO

Os fluxos de redes podem ser simples ou múltiplos dependendo de cada caso. Denomina-se monoproduto, o fluxo de apenas 1 tipo de produto em uma rede, ou seja, um fluxo de produtos que não possuam características singulares que permitam restringir fluxo, ou associação de diferentes custos aos mesmos. Por outro lado, no fluxo multiproduto, ocorrem fluxos de diferentes produtos compartilhando um mesmo arco, e estes produtos podem possuir diferentes custos associados ou diferentes restrições que normalmente são complicantes no modelo matemático, podendo torná-los inclusive dependentes, ou seja, fazendo com que eles interajam entre si. Uma das restrições mais comuns é a de limite de capacidade nos arcos da rede, pois cada produto consumirá a capacidade do arco ao compartilharem, ou melhor dizendo, competirem pelo referido arco. Geralmente, problemas do tipo multiproduto encontram-se na classe de problemas NP-DIFÍCEIS, e configuram modelos matemáticos grandes e complexos.

Como foi dito, as diferenças entre estes dois modelos vão além das características mencionadas acima. Em geral, problemas multiprodutos demonstram que cada produto interage entre si, ou seja, eles são dependentes, o que torna o caso mais complexo, já que os produtos compartilham uma mesma estrutura. (AHUJA *et al.*, 1993).

Os problemas multifluxo, em geral, são mais complexos porque os produtos que fluem na rede têm características muito peculiares, e muitas destas características podem representar restrição ao modelo matemático, como por exemplo: volume, peso ou até mesmo em casos evidenciados em problemas de seqüenciamento de tripulação em ferrovias, onde o custo associado a cada tripulação específica pode variar e elas consequentemente são entendidas como produtos fluindo numa determinada rede. A seguir é apresentado o modelo genérico para este problema.

Assuma que x_{ij}^{k} seja o fluxo do produto k num arco pré-determinado *(i, j),* x^k e c^k sejam os fluxos do vetor e o custo por unidade, respectivamente para cada produto *k*. Assuma ainda, que cada arco possua uma capacidade u_{ij} que restrinja o fluxo total de cada produto no seu respectivo arco. Então, um modelo genérico pode ser formulado, conforme segue abaixo. (AHUJA *et al.*, 1993).

$$\text{Minimizar} \quad \sum_{1 \le k \le K} c^k x^k \tag{2.0}$$

Sujeito a:

$$\sum_{1 \le k \le K} x_{ij}^{k} \le u_{ij} \quad \forall (i, j) \in A, \tag{2.1}$$

$$N x^k = b^k \; para \ldots \; k = 1, 2 \ldots, K \tag{2.2}$$

$$0 \le x_{ij}^{k} \le u_{ij} \ldots \; para \; \ldots k = 1, 2 \ldots, \; K \; \forall (i, j) \in A \tag{2.3}$$

A função objetivo, representada pela Equação 2.0, minimiza o custo total dos produtos *k* que trafegam nos arcos. Repare que o fluxo é limitado pela primeira restrição representada pela Equação 2.1, garantindo que o fluxo total em cada arco seja menor ou igual à capacidade do mesmo. Cabe citar, que problemas que não ofereçam uma capacidade limitante para o arco, deverão ser tratados como problemas em que o arco possua uma capacidade infinita. A Equação 2.2 por sua vez, fornece balanceamento de fluxo, ou seja, ela afirma que o produto do tipo *k* multiplicado pela variável *N*, que denota o número de fluxos “origem-destino” deste produto na rede*,* será igual à demanda total de *k* no respectivo nó destino. A última equação garante a não-negatividade das variáveis.

Em alguns casos, é conveniente converter a desigualdade da equação 2.1 para uma igualdade, a fim de suprir ou descobrir a capacidade desperdiçada. Para tal, adiciona-se uma variável de folga, conforme segue abaixo na Equação 2.4 extraída de AHUJA *et al.*, (1993).

$$\sum_{1 \leq k \leq K} x_{ij}^{k} + s_{ij} = u_{ij}, \qquad \forall\, (i,j) \in A, \tag{2.4}$$

3. ESTUDO DE CASO

Neste capítulo será aplicada a metodologia proposta ao longo do trabalho, utilizando dados reais de um transporte multiproduto ocorrido no Estado do Paraná. As linhas férreas nesta área estão sob o domínio da empresa América Latina Logística (ALL).

3.1. REDE ESPAÇO-TEMPO

A Rede Espaço-Tempo tem por objetivo representar esquematicamente o problema em estudo, além de possibilitar melhor compreensão das restrições para formulação do modelo matemático. Também é importante frisar, que este tipo de rede permite compreender para onde ocorre a movimentação de fluxo de acordo com o tempo, além de poder representar diferentes fluxos e localidades contidas na situação em análise. Entretanto, antes de demonstrá-la, faz-se necessária apresentação do problema e representações do mapa de abrangência da região em que o transporte ocorre.

O transporte em estudo foi executado pela ALL, onde 7 produtos são transportados para diferentes clientes utilizando-se para tal 12 tipos de vagões especiais, sendo eles dos tipos: Gôndola (GTC e GTD), Graneleiro (FHD e HFE), Plataforma (PCC, PEC, PED e PPC) e Tanque (TCC, TCD, TSC e TSD).

Este transporte ocorre efetivamente entre 7 pátios ferroviários, onde 5 deles são somente origem e os 2 restantes são pátios de destino, todos representados na rede por nós. Estes nós representam as seguintes localidades e siglas de pátios respectivamente: Araucária (LAW), Rio Branco do Sul (LBR), Dom Pedro II (LDP), Desvio Ribas (LDV), Uvaranas (LUS), Guarapuava (LGP), Tatuí/SP (ZTY).

Os 7 produtos (cargas) transportados são: Produto Fictício 1, gasolina, óleo diesel, Produto Fictício 2, NP (tipo de fertilizante líquido), DAP (Fosfato Diamônico) e cimento. Cada produto possui uma demanda definida para diferentes clientes e as técnicas para garantir a quantidade demandada baseiam-se em equações que garantem a chegada na quantidade exata em função do peso em toneladas. Cabe citar, que nos dados disponíveis, havia dois produtos, (chamados produtos fictícios) com peculiaridades de tamanho, e como o modelo não considera dimensão, foi definido a utilização da quantidade deles supondo que eles sejam produtos de dimensão comum, como sacas de soja, feijão, ou até mesmo os outros produtos já citados, como cimento, fertilizantes ou combustíveis.

Os arcos da rede ocorrem no sentido do movimento, caracterizando uma rede direcionada, conforme andamento do tempo. Os fluxos nestes arcos são formados pela composição do transporte, ou seja, os vagões juntamente com as cargas, que fluem entre os nós até o seu destino final.

Após solução do modelo adotar-se-á um plano estratégico para alocação das locomotivas respeitando as regras de tonelagem máxima, detalhando o enfoque tático da metodologia desta pesquisa, que além de minimizar o preço final, otimiza a quantidade de vagões e possibilita alocar corretamente as locomotivas.

Apesar de haver uma quantidade considerável de vagões e produtos, tornando o problema relativamente robusto, os destinos finais são somente 2 e acontecem da seguinte forma:

- LDP, LBR, LAW e LUS enviam produtos para LGP, onde lá serão separados e organizados no galpão de cada cliente.

- ZTY envia sua carga para LDV.

A Figura 1 a seguir, representa a rede ilustrativa para este problema.

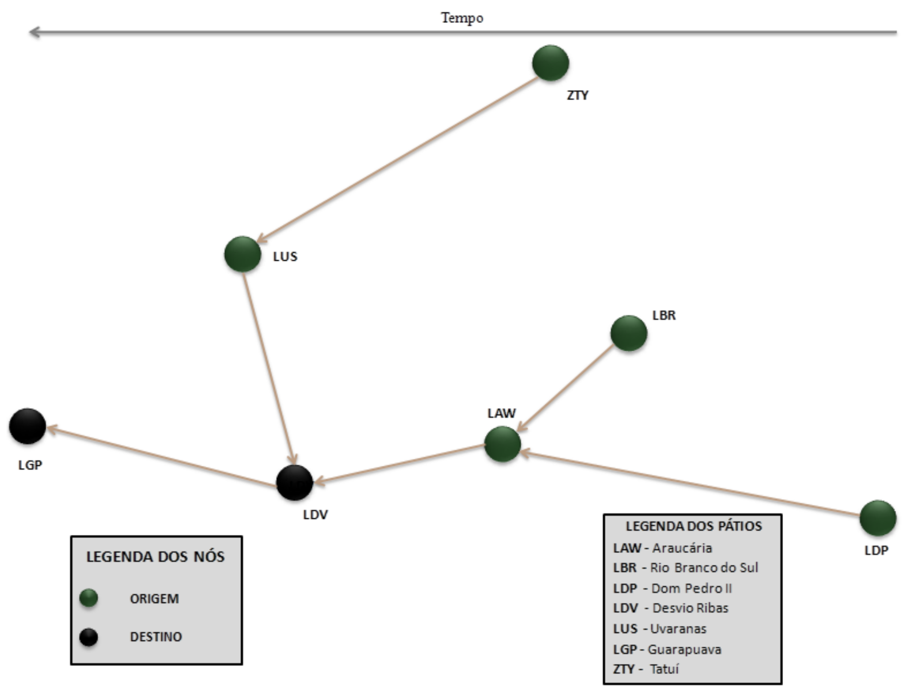

Figura 1: Rede Espaço-Tempo para o Problema Multiproduto de Alocação de Vagões

Outro detalhe importante é a compatibilidade entre os produtos e vagões. Ou seja, alguns produtos podem somente ser carregados por um grupo de vagões específicos. Assim, seguindo dados disponíveis para consulta pela ALL, esta restrição acontece da seguinte forma:

Produtos Químicos (NP e DAP) são compatíveis com os vagões: HFE, FHD, Gasolina com os vagões: TSD TSC, Óleo Diesel com os tipos TCC, TCD, TSD , TSC, PEC, o Produto Fictício 1 com PEC, PED, PPC, PCC Produto Fictício 2 com PEC, PED e finalmente Cimento com os vagões do tipo: FHD, PEC, PED, GTD, GTC, PPC, PCC.

3.2. MODELO MATEMÁTICO

O modelo aqui proposto, deve garantir o atendimento das seguintes restrições:

1. Garantir que os produtos sejam transportados pelos seus respectivos vagões compatíveis.
2. Garantir que o peso em toneladas do produto compatível transportado pelo seu (s) vagão(s) não seja superior à capacidade limite de transporte deste mesmo vagão(s).
3. Garantir que a quantidade utilizada de vagões (frota) não supere a quantidade disponível para cada tipo de vagão.
4. Garantir que a tração limite na linha (arco) seja respeitada.

5. Garantir atendimento a demanda de cada produto para cada cliente no respectivo destino.
6. Restrição de não-negatividade para variáveis de decisão.

A seguir são apresentadas as variáveis do modelo:

- N é o conjunto de nós da rede com $(i, j) \in N$
- A é o conjunto de arcos com $(i, j) \in A$
- K é o conjunto de produtos
- V *é o* conjunto de vagões.
- x_{ijk}^{v} Denota o fluxo de um vagão *v* (quantidade deste vagão em unidades) carregado com o produto *k* de um nó origem *i* até um nó destino *j*.
- W_{ijk}^{v} Denota a tarifa em Reais (frete por tonelada) de um vagão *v* carregar um dado produto *k* de um nó origem *i* até um nó destino *j*.
- z_{ijk}^{v} Denota a quantidade do produto *k* (em toneladas) carregada pelo vagão *v* de um arco origem *i* até um arco destino *j*.
- T_{v} Denota a Tara (peso) em toneladas de cada vagão vazio *v*.
- U_{ij} Denota a Tração (peso) limite em toneladas que a linha (arco) suporta.
- D_{ik} Denota a demanda de produtos *k* , em toneladas, para qualquer nó do tipo *i*.
- F_{v} Denota a frota disponível, em unidades, de cada tipo de vagão *v*.
- Q^{v} Denota a capacidade limite de transporte, em toneladas, de cada vagão *v*.
- C^{v} Denota o Custo unitário estimado em Reais para alocação de cada tipo de vagão *v*.
- R_{k}^{v} Matriz adjacência com 1 nos elementos onde há compatibilidade entre o produto e o vagão, e 0 caso contrário.

Vale ressaltar que devido à dificuldade em obter com precisão o custo de alocação e/ou depreciação de cada vagão vazio C^{v}, optou-se por adotar um valor estimado. Assim, o modelo matemático foi formulado da seguinte forma:

$$Min \sum_{(i,j)\in A} \sum_{k\in K} \sum_{v\in V} W_{ijk}^{v} z_{ijk}^{v} + \sum_{(i,j)\in A} \sum_{k\in K} \sum_{v\in V} C^{v} x_{ijk}^{v} \qquad (3.0)$$

$s.a$

$$\sum_{v\in V} \sum_{k\in K} (T^{v} x_{ijk}^{v} + z_{ijk}^{v} R_{k}^{v}) \leq U_{ij} \qquad \forall (i, j) \in A \qquad (3.1)$$

$$\sum_{(j)\in N} \sum_{v\in V} (z^{v}_{ijk} - z^{v}_{jik}) = D_{ik} \qquad \forall i \in N; k \in K \qquad (3.2)$$

$$\sum_{(i,j)\in A} \sum_{k\in K} x^{v}_{ijk} \leq F_{v} \qquad \forall v \in V \qquad (3.3)$$

$$x^{v}_{ijk} Q_{v} \geq z^{v}_{ijk} R^{v}_{k} \qquad \forall (ij) \in A; k \in K; v \in V \qquad (3.4)$$

$$x^{v}_{ijk} \geq 0$$

$$z^{v}_{ijk} \geq 0$$

$$x^{v}_{ijk} \in Z$$

$$z^{v}_{ijk} \in R$$

A Equação 3.0 é a função objetivo de minimização do preço total do serviço. A Equação 3.1 garante que a restrição de limite de tração na linha não seja violada, para todo o trecho origem destino. A Equação 3.2 garante balanceamento de fluxo e atendimento a demanda até o nó destino dos respectivos clientes. A Equação 3.3 garante que a quantidade total para cada tipo de vagão utilizado não supere a frota disponível do mesmo. A Equação 3.4 garante que a capacidade total (em toneladas) de toda a quantidade de um dado vagão, seja no mínimo igual à quantidade total (em toneladas) de cada produto compatível alocado neste dado vagão.

Concluindo este tópico, para formulação deste modelo, algumas premissas foram assumidas e devem ser consideradas, conforme a seguir:

- Assume-se que a quantidade de frotas disponível exposta pela ALL está presente em qualquer pátio sob o seu domínio e pronta para uso.

- Assume-se que a quantidade de envio e recebimento do nó na rede que representam os pátios é infinita, em função da rede não ser muito interligada, e possuir poucas rotas. Ou seja, o modelo considera somente limite de capacidade de transporte no arco.

- A variável tempo não está sendo considerada neste modelo.

- Assume-se que os fatores de decisão para alocar vagões dependem apenas da Tara, capacidade, custo de alocação e compatibilidade destes mesmos vagões com os respectivos produtos. Além disso, o modelo considera os vagões carregados que menor sobrecarregarão a linha.

- As tarifas das cargas nos respectivos vagões foram divididas para cada arco, já que os dados estão somente em toneladas. Assume-se também, que o fator distância já está alocado nestas tarifas. Isto se dá, para compor o fluxo em cada arco na rede, não prejudicando o valor global, já que as tarifas foram divididas proporcionalmente para quantidade de arcos que o vagão percorre.

- O custo de depreciação e/ou atribuição do vagão vazio foi estimado, já que não foi possível levantar este dado, principalmente por ser abstrato e variar de empresa para empresa.

4. RESULTADOS COMPUTACIONAIS

O modelo de otimização proposto foi resolvido na plataforma XPRESS-MP, O resultado produziu um preço mínimo total de serviço de R$ 695.396,00 e alocou os vagões conforme Quadro 1 abaixo. Esta tabela contém os trechos, indicando origem e destino na rede, e os respectivos vagões utilizados.

Quadro 1: Quantidade de Vagões alocados por trecho da rede

Rede			Gôndola		Graneleiro		Plataforma				Tanque				Total
Trecho	Origem	Destino	GTC	GTD	FHD	HFE	PCC	PEC	PED	PPC	TCC	TCD	TSC	TSD	
1	LDP	LAW				4			6						10
2	LBR	LAW			8										8
3	LAW	LDV			8	5		2	6			16		1	38
4	ZTY	LUS							1						1
5	LUS	LDV							1						1
6	LDV	LGP			8	5		2	6		1	14		1	37

O Quadro 1 demonstrou uma característica interessante do modelo. Esta característica é observada nos trechos 3 e 6 que são os gargalos deste transporte, ou seja, os trechos em que a linha está sendo mais sobrecarregada em toneladas. Conforme os pátios LAW no trecho 3 e LDV no trecho 6 recebem quase todos os fluxos advindos dos outros trechos, as quantidades dos respectivos produtos aumentam e mais produtos competem pela capacidade do vagão e consequentemente do arco. Assim, o modelo é capaz de realocar os produtos nos respectivos vagões respeitando as restrições já comentadas. Então, a quantidade de um tipo de vagão específico carregando um dado produto pode aumentar ou diminuir, dependendo do impacto disto na função objetivo. Vale ressaltar, que o nó 6 da rede representado pelo pátio LDV é transbordo e destino ao mesmo tempo, o que torna este caso um tanto quanto interessante.

Outro fator interessante é que os vagões GTC, GTD, PCC, PPC e TSC não foram utilizados.

Isto se deve ao fato de os outros vagões já possuírem capacidade suficiente para carregamento, e também aos custos estimados atribuídos a cada vagão. Caso esses custos mudassem, possivelmente este cenário também mudaria, ou seja, outros vagões diferentemente destes poderiam deixar de serem utilizados. Porém isto, não deprecia a metodologia e o escopo do modelo matemático exposto neste trabalho. Ou seja, conforme os dados mudem, o software XPRESS-MP recombinaria os vagões carregados e encontraria a solução que melhor atendesse a natureza deste problema.

O modelo apresentado pode ser entendido sob dois aspectos. O primeiro visto sob a óptica da empresa ferroviária, que obterá o mínimo preço do transporte, entretanto mantendo sua margem de lucro, já que a restrição de balanceamento para atendimento à demanda garante escoamento do fluxo no respectivo destino. Além disso, a função objetivo incorpora o custo de alocação e/ou depreciação do vagão para preço total do serviço, repassando este custo ao cliente final. Este último detalhe é mais um motivo que justifica o uso do melhor tipo de vagão para minimizar o preço total.

A idéia fundamental aqui seria permitir à ALL cobrar um preço competitivo no mercado, mantendo boa margem de lucro, pois a tarifa depende apenas da tonelagem da carga, que é atendida nos respectivos pontos de demandas. Porém, o modelo deve fazer com que os melhores vagões carreguem o máximo possível de produtos, otimizando o desempenho do serviço. Por outro lado, este modelo poderia servir para um cliente que quisesse orçar o melhor preço de um transporte, para então barganhar junto à empresa. Entretanto, a primeira situação seria mais realista.

Sobre este problema citado, também é importante enfatizar que há dois limitantes de capacidade para os produtos. Primeiro, eles competem pela capacidade máxima de transporte de cada vagão, sendo um único produto transportado por unidade de cada respectivo vagão compatível. Ou seja, vários produtos podem utilizar vagões do tipo HFE por exemplo. Todavia, não haverá cargas variadas dentro de um único vagão. Segundo, existe o limite imposto pelo arco da rede, que foi quantificado de acordo com o máximo aceito em operação, em função de não estar sendo considerado a variável tempo neste modelo.

Concluindo a análise de dados, o estudo de caso em questão demonstrou uma interessante aplicação do PFM, tentando ser fiel ao máximo a metodologia e sobretudo aos dados aqui expostos.

5. PLANO DE AÇÃO

Visto que não foram inclusas as locomotivas no modelo matemático, este plano de ação propõe uma metodologia de alocação de locomotivas conforme conceitos expostos em BRINA (1983), onde são analisados conceitos e equações que consideram uma série de variáveis, além das que o modelo matemático já expõe. Vale ressaltar, que este plano de ação é uma metodologia de aplicação após o resultado do estudo de caso.

Portanto, segundo BRINA (1983), o trem deve ser formulado de forma a apresentar um aproveitamento mais eficiente do material rodante (economicidade) e em condições que estejam dentro do limite de segurança. Logo para determinar a composição do trem, os gestores podem utilizar a seguinte equação abaixo:

$$N.E_{tl} = (N.\ P_l + n.P_v).(r_r + r_c) + N.P_l.r_{nl} + n.T_v.r_{nv} \tag{5.1}$$

N = número de locos no trem
E_{lt} = esforço trator de uma locomotiva (kgf)
P_l = peso da locomotiva (tf)
n = número de vagões
T_v = peso do vagão (tf)
r_r = resistência de rampa (kgf/t)
r_c = resistência de curva (kgf/t)
r_{nl} = resistência normal da loco p/ vel. dimensionante. (kgf/t)
r_{nv} = resistência normal do vagão p/ vel. dimensionante (kgf/t)

Repare que a quantidade e o peso de cada vagão foram expostos pelo modelo matemático deste trabalho. Os dados restantes com relação à locomotiva são facilmente encontrados no site da ALL. Demais informações sobre o trecho, também é comum a Empresa obter, obviamente quando o trecho faz parte das linhas sob seu domínio. Logo, o número de locomotivas por trecho pode ser calculado facilmente.

Uma forma mais simples e operacional de dimensionar o trem é a equação que utiliza o conceito de tração máxima na linha em toneladas brutas compensadas (TBC). Assim, observe a equação abaixo, adaptada de BRINA (1983).

6. CONCLUSÃO

Após o enfoque teórico e a aplicação aqui proposta, pôde-se observar como o PFM e os métodos de Programação Inteira podem contribuir de forma efetiva para o setor de transportes, possibilitando otimizar a utilização de recursos e consequentemente minimizar os diversos custos envolvidos. Os resultados do estudo de caso foram satisfatórios, considerando-se o limite de escopo, as premissas assumidas e a qualidade dos dados disponibilizados. O estudo de caso em questão alocou vagões e produtos seguindo critérios de quantidade de frota, capacidade de vagões, capacidade de limite na linha, custos envolvidos com o uso de produtos e de alocação dos vagões vazios, além da compatibilidade entre eles.

A principal contribuição deste estudo é possibilitar ao gestor de operação programar a composição ferroviária ao longo dos arcos em um nível tático, o que permite atender a demanda para clientes, utilizando os vagões adequados para cada tipo de produto. Isto permite utilizar da melhor forma possível a capacidade dos vagões, minimizando a subutilização dos mesmos, consequentemente custos excessivos de atribuição à frota e perda no custo de oportunidade, otimizando o preço final do serviço.

Concluindo, a experiência de lidar com métodos matemáticos, conceitos de otimização em redes especialmente para área de transportes, e as diversas pesquisas executadas sobre o setor ferroviário, foram extremamente enriquecedoras. Acredita-se que com possíveis melhorias propostas, esta metodologia possa ser aplicada para otimização em diversas empresas deste setor. Uma continuação deste estudo poderia propor maior abrangência do modelo matemático, para que este aloque automaticamente as locomotivas, além de inserir variáveis de tempo para que o itinerário dos trens seja executado com balanceamento e precisão de desempenho.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] AHUJA, R. K.; VAIDYANATHAN, B.; JHA, K. C. Multicommodity Network Flow Approach to the Railroad Crew-Scheduling Problem. “IBM Journal of Research and Development”, Vol.51, pp.325 à 344, 2007.

[2] AHUJA, R. K; MAGNATI, T. L.; ORLIN, J.B.. “Network Flows: Theory, Algorithms and Applications”. New Jersey, Prentice-Hall, 1993, cap. 2 e 17.

[3] ALMEIDA, F.P.; PIMENTEL, B.S.. Algoritmos para Planejamento Integrado de Produção e Transporte de Minérios, “ XLI SBPO - Pesquisa Operacional na Gestão do Conhecimento” pp. 1027 a 1038, Belo Horizonte, 2009.

[4] América Latina Logística (ALL), Estrutura “Frota”. Disponível em <http://www.all-logistica.com/port/index.htm>. Acesso em 03/05/2011.

[5] BRINA, H.L. “Estradas de Ferro", vol. 2, Rio de Janeiro,1983 , cap 6.

[6] CHAGAS, R .J.. “Uma aplicação de Métodos Aproximados à Problemas de Fluxo Multiproduto”, Belo Horizonte,Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2006.

[7] FAJARDO, A.P.C..“Uma Contribuição ao Estudo do Transporte Intermodal-Otimização da Expansão Dinâmica das Redes Intermodais do Transporte de Soja Produzida no Estado de Mato Grosso” , Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

[8] MARTINELLI, R.; ARAGÃO,M,P.; REIS,M.; “ Modelos Para o Planejamento Tático Para Ferrovias”, João Pessoa, XL Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (XL SBPO) A Pesquisa Operacional e o uso racional de recursos hídricos,Paraíba , 2008.

[9] MURGEL,L.M.S.F.;GUALDA,N.D.F.“Modelo para Formação de Composições Ferroviárias”, São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

[10] O GLOBO, Economia, ”Ferrovias Brasileiras Precisam de Investimentos”. Disponível em < http://oglobo.globo.com/economia/mat/2010/05/19/ferrovias-brasileiras-precisam-de- investimentos-40-bi-diz-estudo-do-ipea-916628070.asp >. Acesso em 15/10/2010.