

# **MODELO DE DECISÃO PARA O PLANEJAMENTO DA MOVIMENTAÇÃO DE CONTÊINERES VAZIOS**

**Nathalia de Castro Zambuzi**

**Claudio Barbieri da Cunha**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Logísticos

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

## **RESUMO**

Este artigo trata do planejamento da movimentação de contêineres vazios ao longo de uma cadeia de portos, buscando o balanceamento entre as demandas e ofertas dos mesmos em todos os portos ao menor custo, e considerando as restrições de capacidade dos modais de transporte envolvidos. Para isso será adotado um modelo de fluxo em rede multi-produto para representar o sistema de movimentação de vazios e que servirá de base para o desenvolvimento de uma formulação matemática, a qual implementada através de uma ferramenta computacional de otimização, determina os fluxos de vazios ao longo da cadeia logística. O termo “movimentação de vazios” será adotado para representar o transporte de um porto a outro por qualquer modal considerado, o carregamento e o descarregamento dos navios, o aluguel e o armazenamento no porto ou no navio atracado.

## **ABSTRACT**

This article deals with the empty containers movement planning throughout a chain of ports, aiming the balancing between the demands and supplies in all the ports at minimal cost, and considering the capacity constraints of the transport modes considered. A multi-commodity network flow model will be adopted to represent the empty containers movement system. This model supports the development of a mathematical formulation, which through a computational optimization tool, determines the flows of empty containers throughout the logistic chain. The term “empty containers movement” will be adopted to represent the transportation between ports by any transport mode considered, the load and unload movements of the ships, the leasing and the storage at a port or at a brought alongside ship.

## **1. INTRODUÇÃO**

Desde a introdução do contêiner no sistema de transporte marítimo, em 1960, o volume de cargas transportadas nessa “caixa de metal” cresceu a ponto de se tornar a parcela mais significativa do tráfego de mercadorias. Pode-se dizer que o contêiner foi o instrumento que revolucionou o transporte marítimo de cargas.

A containerização de cargas apresenta inúmeras vantagens competitivas que simplificam e agilizam o processo de movimentação em cada ponto de transferência (navio, caminhão ou trem), como exemplo: mobilidade em diferentes modais de transportes, menor manuseio da carga e transferência intermodal rápida e segura. No entanto, as maiores vantagens da utilização de contêineres no transporte marítimo de cargas devem-se ao fato do mesmo ser unitizado e modular, o que permite um melhor aproveitamento dos espaços nos navios e a padronização e automação de todas as operações envolvidas em sua movimentação. O resultado é um aumento da eficiência nos pontos de transferências e nos terminais e armazéns de contêineres, proporcionando a toda a cadeia logística uma economia de tempo e uma redução de custos.

Existe, no entanto, um desequilíbrio na cadeia devido à natureza comercial de algumas áreas ou regiões, ou seja, algumas são predominantemente de exportação e outras, de importação. Este desequilíbrio cria certos desafios logísticos no gerenciamento de contêineres vazios, uma vez que existem, na cadeia, locais com excesso de oferta, onde contêineres vazios que são devolvidos não são totalmente aproveitados para novas cargas, e outros locais em que a demanda de vazios supera a oferta.

Além disso, o contêiner é um instrumento dispendioso e não descartável, de forma que sucessivas reutilizações dentro da cadeia logística são necessárias e precisam ser determinadas de forma que os custos das operações envolvidas sejam os menores possíveis, uma vez que a movimentação de um contêiner vazio não representa nenhum tipo de receita adicional para a companhia de navegação; pelo contrário, muitas vezes a sua movimentação nos navios pode ocupar o espaço de um contêiner carregado, o qual gera receita.

Logo, uma política de gerenciamento adequada, que garanta o atendimento aos clientes em face do menor custo, torna-se imprescindível para que exista competitividade entre as companhias de navegação. Trata-se de garantir o atendimento dos pontos de demanda através do reposicionamento de vazios provenientes dos pontos com excesso de oferta, considerando a possibilidade de aluguel quando os vazios disponíveis na cadeia logística não forem suficientes.

Nesse sentido, esse artigo aborda o problema de otimização da movimentação de contêineres vazios. É proposta uma estratégia de solução na qual o problema é tratado como um problema de fluxo multi-produto ("*multi-commodity flow problem*"), com restrições adicionais, em uma rede espaço-tempo ("*space-time network*"), onde cada tipo de contêiner representa um produto ("*commodity*"). Baseada neste modelo, será apresentada uma formulação matemática que represente adequadamente esse problema, permitindo sua implementação através de uma ferramenta computacional de otimização que possa efetivamente ser utilizada e contribuir para o aumento da eficiência e para a redução de custos das operações logísticas envolvidas na movimentação de vazios.

De forma a garantir a robustez do modelo adotado, a estratégia de solução é aplicada a um problema de movimentação de vazios já abordado na literatura e a cenários reduzidos. Os resultados obtidos podem ser comparados com a solução publicada, no primeiro caso, e com as soluções obtidas manualmente, no segundo.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Diversos trabalhos tratam da problemática da movimentação de contêineres vazios, com diferentes abordagens para as modelagens e os métodos de solução empregados. Os principais dentre eles estão relacionados a seguir.

White (1972) elaborou um dos primeiros trabalhos que abordam a movimentação de contêineres vazios através da utilização de modelos de rede, tratando-a como um problema de transbordo dinâmico. São conhecidos onde, quando e quantos contêineres vazios estão disponíveis no sistema, assim como a rota e o destino dos mesmos dentro dos movimentos associados à rede. Desta forma, o autor otimizou o fluxo de contêineres vazios através de uma função linear de custo.

Crainic et al. (1990) apresentam a descrição de um sistema de apoio à tomada de decisão que aborda o problema do transporte marítimo de vazios em dois aspectos: a movimentação de contêineres vazios, tratado como um modelo dinâmico estocástico; e a determinação das rotas para contêineres vazios, tratado como um modelo de localização. Em 1993, os autores dão continuidade ao seu trabalho e fornecem uma formulação matemática para o problema de movimentação de contêineres por terra para atender rotas marítimas de navios porta-contêineres, considerando que os dados de demanda e oferta são de natureza estocástica.

Shen e Khoong (1995) desenvolveram um sistema de suporte à decisão para resolver um problema de planejamento de grande escala abrangendo a movimentação multi-período de contêineres vazios. O sistema proposto utiliza modelos de otimização de redes, considerando apenas um tipo de contêiner e capacidade fixa para alocação de vazios nos navios.

Lai et al. (1995) estudaram os problemas da movimentação de contêineres e utilizaram técnicas de simulação e heurística para determinar as políticas logísticas adequadas, de forma a reduzir os custos operacionais e prevenir a perda de transações devido à falta de contêineres vazios disponíveis para atender às demandas.

No cenário brasileiro, Barco (1998) fornece um modelo de reposicionamento de vazios baseado no modelo matemático proposto por Crainic, Dejax e Gendreau (1993). O modelo particular apresentado pelo autor considera os portos como pontos de armazenamento de vazios e vários tipos de contêineres. Outra diferença em relação ao modelo no qual se baseia é o fato de que as passagens dos navios não são atreladas ao tempo e sim ao espaço (portos).

Cheung e Chen (1998) focaram no transporte marítimo de contêineres e apresentaram um modelo de rede estocástico em dois estágios para o problema dinâmico de alocação de vazios apresentado por Crainic et al. (1993). No primeiro estágio, todos os parâmetros são considerados determinísticos, enquanto que no segundo estágio alguns parâmetros são considerados estocásticos. A solução para a rede é obtida através de um método de linearização estocástica. No modelo adotado, uma vez que um contêiner é utilizado para atender a um ponto de demanda, ele é retirado da rede e volta, aleatoriamente, no futuro, como uma unidade de oferta.

Choong et al. (2002) apresentam em seu trabalho um análise sobre os efeitos do tamanho dos horizontes de planejamento adotados no gerenciamento da rede de transporte intermodal de contêineres vazios. O modelo tem como estrutura base uma adaptação do modelo de Crainic et al. (1993), considerando, no entanto, o transporte intermodal e um limite de capacidade para os estoques e para os modais.

Rezende (2003) elaborou um trabalho a partir do estudo de Barco (1998), no entanto com uma nova abordagem para o problema da logística do contêiner vazio. A metodologia de solução, por meio da modelagem matemática linear, proposta por Rezende, difere do modelo de Barco na questão do tratamento da capacidade do navio, nos navios com dupla passagem pelos portos, no estabelecimento de estoque mínimo nos portos e na inserção de uma janela de entrega do contêiner vazio nos portos.

Wang e Wang (2007) utilizaram programação inteira para analisar a reposição de contêineres vazios usando diferentes modais de transporte em terra, considerando limitações de capacidade de armazenamento em portos e de carregamento nos modais, além do atendimento das demandas. O objetivo do modelo é minimizar o custo do transporte de vazios em suas várias trajetórias: do porto/depósito terrestre para outro porto/depósito terrestre, do porto/depósito terrestre para os clientes e dos fornecedores para o porto/depósito terrestre.

Lam et al. (2007) analisaram a realocação de contêineres vazios em problemas simplificados (dois portos e duas viagens), propondo uma heurística baseada em um modelo dinâmico estocástico, cujas soluções aproximadas são efetivas em relação às ótimas exatas. Os autores adotam como finitas as quantidades de vazios disponíveis para aluguel, assim como a capacidade de transporte marítimo, sendo este o único modal considerado. Diferente da

maioria dos trabalhos citados até então, assume-se que a capacidade de armazenamento nos portos é suficientemente grande para manter o número máximo de contêineres existentes no sistema.

A análise dos trabalhos comentados mostra as diferentes abordagens do problema da movimentação de contêineres vazios desde a concepção do modelo de base para o estudo até a consideração de diferentes restrições e aleatoriedades.

A utilização de modelos de rede para representar o sistema dinâmico de movimentação de vazios mostrou-se comum. Tal constatação não é surpreendente uma vez que modelos de rede proporcionam uma clarificação do problema estudado tanto no que diz respeito ao entendimento visual das interações entre as entidades envolvidas e seus comportamentos no espaço-tempo, quanto ao desenvolvimento da formulação matemática que representará estas interações. White (1972), Shen e Khoong (1995) e Cheung e Chen (1998) são exemplos de trabalhos que utilizam esta modelagem.

### 3. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

A formulação matemática a ser apresentada para o problema da movimentação de vazios determina o fluxo de vazios no sistema, respeitando as restrições de capacidade de transporte nos modais e de armazenamento nos portos. As decisões envolvidas na resolução do problema são inter-relacionadas e podem ser explicitadas como segue:

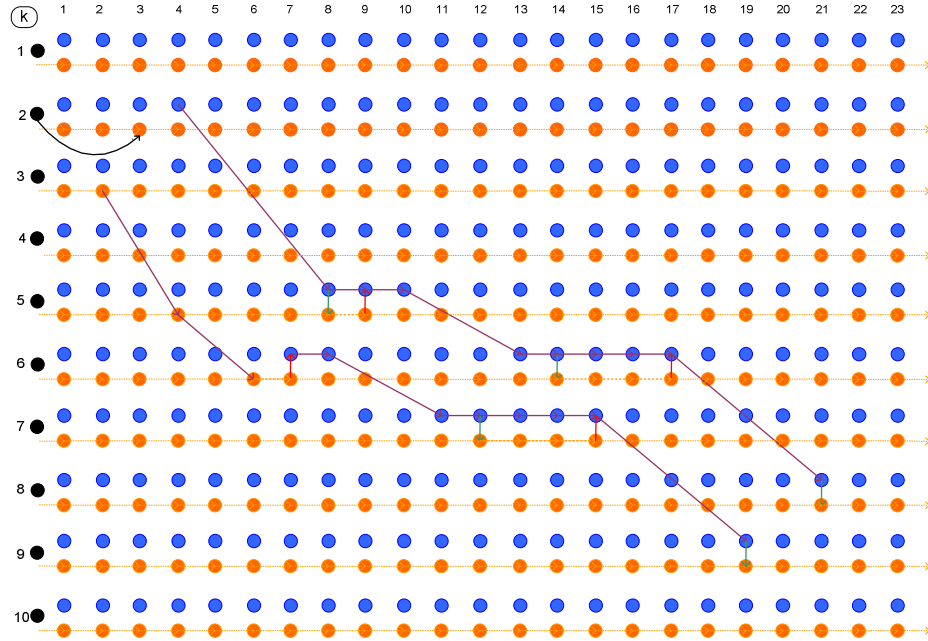
- distribuição dos vazios disponíveis no sistema, de forma a garantir o atendimento da demanda de todos os portos em todas as data (determinação do modal de transporte, do porto e da data de origem do fluxo de vazios e da quantidade transportada);
- requerimento de vazios alugados das companhias de *leasing* (determinação do local e da data do aluguel e da quantidade de vazios alugados que serão disponibilizados ao sistema).

#### 3.1 Representação da Rede

Denota-se  $G = (N, A)$  a rede espaço-tempo, onde  $N$  e  $A$  indicam os conjuntos de nós e arcos, respectivamente.

Para a rede apresentada na Figura 1, são definidos os conjuntos:  $P = (1, 2, 3, \dots, |P|)$ , o conjunto de portos de interesse no sentido Norte-Sul, na ordem em que estes aparecem;  $T = (1, 2, 3, \dots, |T|)$ , o conjunto dos períodos ao longo do horizonte de planejamento, sendo que cada período  $t \in T$  pode representar o tempo que se queira: uma semana, um dia, doze horas, uma hora, etc; e  $K = (1, 2, 3, \dots, |K|)$  o conjunto dos tipos de contêineres vazios considerados no estudo.

Os contêineres vazios do tipo  $k \in K$  podem ser transportados através de qualquer modal entre dois portos  $p_1$  e  $p_2 \in P$  ( $p_1 \neq p_2$ ) durante um determinado período de tempo  $t_1$  e  $t_2 \in T$  com  $t_2 > t_1$ , contanto que exista o arco de transporte  $(i, j) \in A$  ligando os nós da rede correspondentes a  $p_1$  no período  $t_1$  e  $p_2$  no período  $t_2$ . Além disso, pode existir o fluxo de vazios em um mesmo porto  $p \in P$  durante o período de tempo  $t_1$  e  $t_2 \in T$  ( $t_2 = t_1 + 1$ ), representando o armazenamento de vazios tanto no porto, quando existir o arco de armazenamento  $(i, j) \in A$  ligando dois nós terrestres, como no navio atracado, quando existir o arco de armazenamento  $(i, j) \in A$  ligando dois nós marítimos.



**Figura 1:** Rede espaço-tempo que representa o problema de movimentação de vazios



**Figura 2:** Legenda da rede espaço-tempo

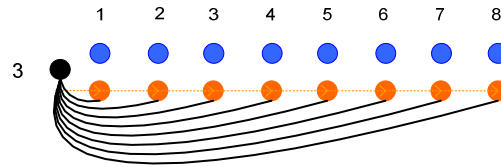
Definem-se, ainda, três tipos de subconjuntos de nós  $\in N$ :

*NoTer*: indica o subconjunto de nós terrestres. Representam o lado terrestre de cada porto em cada um dos períodos de tempo ao longo do horizonte de planejamento. Existe um nó terrestre para cada porto  $p \in P$  em cada período  $t \in T$ . A demanda/oferta de vazios do tipo  $k \in K$  em um porto  $p \in P$  no período  $t \in T$  é um atributo associado ao nó terrestre, sendo representada por  $b_i^k$ ,  $i \in NoTer$ . Este valor será positivo quando o nó terrestre possuir oferta de vazios e negativo quando o mesmo possuir demanda por vazios.

*NoMar*: indica o subconjunto de nós marítimos. Representam o lado marítimo de cada porto em cada um dos períodos de tempo ao longo do horizonte de planejamento e estão associados às rotas dos navios que transportam os contêineres vazios, seja em curso de navegação, ou quando os navios estão parados no porto. Assim como para um nó terrestre, existe um nó marítimo para cada porto  $p \in P$  em cada período  $t \in T$ . Os nós marítimos também possuem o atributo  $b_i^k$ ,  $i \in NoMar$ , que sempre será igual a zero, já que não há oferta ou demanda de vazios em território marítimo.

*NoAlu*: indica o subconjunto de nós de fonte de aluguel. Representam a disponibilidade de contêineres vazios de cada tipo  $k \in K$  que podem ser alugados a partir da fonte existente em

cada porto. Para cada porto  $p \in P$  existe apenas um nó fonte de aluguel de vazios, o qual tem associado a ele um arco de saída de contêineres alugados (arco de aluguel de contêiner) para cada um dos nós terrestres existentes para seu porto  $p \in P$ .



**Figura 3:** Arcos de aluguel de contêineres vazios

*NoSor*: indica o subconjunto dos nós sorvedouros fictícios, criados para permitir o balanceamento dos nós fonte de aluguel. Para cada nó fonte de aluguel é criado um nó fictício, o qual receberá toda a oferta de vazios em excesso proveniente do seu nó fonte de aluguel correspondente.

Os nós terrestres podem, ainda, ter associados a eles os seguintes arcos:

- Arcos de transporte (entrada /saída), que representam a chegada/partida no porto de um modal terrestre (trem ou caminhão);
- Arcos de carregamento/descarregamento de vazios (ligados, necessariamente, a um nó marítimo);
- Arcos de armazenamento no porto (entrada/saída);
- Arcos de aluguel de contêineres vazios (somente entrada e ligados, necessariamente, um nó fonte de aluguel do porto ao qual pertence o nó terrestre).

Da mesma forma, para os nós marítimos, têm-se associados os seguintes arcos:

- Arcos de transporte (entrada /saída), que representam a chegada/partida no porto de um navio em curso de navegação (quando ligados entre nós marítimos de dois portos diferentes) ou o navio atracado no porto (quando ligados entre nós marítimos de um mesmo porto);
- Arcos de carregamento/descarregamento de vazios (ligados, necessariamente, a um nó terrestre).

O conjunto dos arcos  $A$  é composto de cinco subconjuntos  $\in A$ :

*ArcArmaz*: indica o subconjunto dos arcos de armazenamento terrestres. Representam o armazenamento de contêineres vazios em um porto  $p \in P$  entre qualquer período  $t$  e  $t+1$ ,  $t \in T$ .

*ArcTransp*: indica o subconjunto dos arcos de transporte de contêineres vazios. Representam um modal no qual os contêineres vazios podem ser transportados e são pré-estabelecidos para cada problema, ou seja, sabem-se quais são os arcos  $(i, j)$  existentes. Se *ArcTransp* estiver ligando dois nós marítimos, então este arco representa o modal marítimo, se *ArcTransp* estiver ligando dois nós terrestres, representa o modal rodoviário ou ferroviário.

*ArcCar*: indica o subconjunto dos arcos de carregamento do navio. Representam o carregamento de contêineres vazios no navio e, necessariamente, ligam um nó terrestre a um nó marítimo.

*ArcDesc*: indica o subconjunto dos arcos de descarregamento do navio. Representam o descarregamento de contêineres vazios do navio e, necessariamente, ligam um nó marítimo a um nó terrestre.

*ArcAlu*: indica o subconjunto dos arcos de aluguel de contêineres vazios. Representam o fornecimento de contêineres vazios alugados a partir do nó fonte de aluguel pertencente a um porto  $p \in P$  para um nó terrestre deste mesmo porto. O modelo não considera o retorno de vazios alugados à suas fontes. Assume-se que o período vigente para o aluguel não expira dentro do horizonte de planejamento, desta forma os vazios alugados podem ser reutilizados no sistema quantas vezes forem necessárias e/ou possíveis.

Para cada arco  $(i, j) \in A$  são estabelecidos os seguintes atributos:

- Nó de origem e de destino sejam eles nós terrestres, marítimos ou de aluguel;
- Custo  $c_{ij}^k$ , que representa o custo unitário associado ao fluxo de vazios do tipo  $k \in K$  no arco  $(i, j) \in A$ , sendo que este custo pode ser de armazenamento no porto, de transporte no modal, de carregamento, de descarregamento ou de aluguel de vazios.
- Capacidade global do arco  $U_{ij}$ , que representa o fluxo máximo admissível de todos os tipos de contêineres vazios no arco  $(i, j) \in A$ ;
- Capacidade do arco  $u_{ij}^k$ , que representa o fluxo máximo admissível de cada tipo  $k \in K$  de contêiner no arco  $(i, j) \in A$ ;
- Limite inferior  $l_{ij}^k$ , que representa o fluxo mínimo desejado de cada tipo  $k \in K$  de contêiner que deve ser atribuído ao arco  $(i, j) \in A$ .

As capacidades e o limite inferior definidos podem ser atribuídos ao fluxo de vazios em qualquer arco  $(i, j) \in A$ , seja ele de armazenamento no porto, transporte no modal, carregamento, descarregamento ou fornecimento de vazios alugados.

Para cada arco  $(i, j) \in A$  definido, pode-se atribuir capacidade infinita, definindo-se valores muito grandes para  $U_{ij}$  e  $u_{ij}^k$  e limite inferior nulo, quando esta imposição não existir para  $l_{ij}^k$ .

### 3.2 Modelo Matemático

Definem-se as variáveis de decisão  $x_{ij}^k$ , indicando o fluxo de vazios do tipo  $k \in K$  nos arcos  $(i, j) \in A$ , ou seja, a quantidade de vazios a ser transportada, alugada, armazenada, carregada ou descarregada, dependendo do tipo de arco que  $(i, j)$  representa.

Assim, o modelo matemático pode ser formulado como:

$$\text{Minimizar} \quad z = \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij}^k x_{ij}^k \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{(i,j) \in A} x_{ij}^k - \sum_{(j,i) \in A} x_{ji}^k = b_i^k \quad \forall i \in N \text{ e } \forall k \in K \quad (2)$$

$$x_{ij}^k \leq u_{ij}^k \quad \forall (i, j) \in A \text{ e } \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ij}^k \leq U_{ij} \quad \forall (i, j) \in A \quad (4)$$

$$x_{ij}^k \geq l_{ij}^k \quad \forall (i, j) \in A \text{ e } \forall k \in K \quad (5)$$

$$x_{ij}^k \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall (i, j) \in A \quad (6)$$

A função objetivo (1) busca minimizar todos os custos envolvidos no fluxo de vazios nos arcos  $(i, j) \in A$ , ou seja, no transporte, no armazenamento, no carregamento, no descarregamento e no aluguel de contêineres vazios. A restrição (2) representa o balanceamento dos nós, considerando que todos os fluxos nos arcos de saída menos os fluxos nos arcos de entrada destes nós sejam iguais à demanda/oferta de vazios nos mesmos. Já a restrição (3) impõe que os fluxos de vazios de cada tipo  $k \in K$  nos arcos  $(i, j) \in A$  não ultrapassem a capacidade máxima por tipo de contêiner,  $u_{ij}^k$ . Da mesma forma, a restrição (4) também é restritiva quanto à capacidade, porém considera a capacidade global,  $U_{ij}$ , dos arcos  $(i, j) \in A$ , ou seja, a soma de todos os tipos de contêineres. Adicionalmente, a restrição (5) impõe um fluxo mínimo de vazios,  $l_{ij}^k$ , por tipo de contêiner, nos arcos  $(i, j) \in A$  (geralmente, mas não necessariamente igual à zero, principalmente nos arcos de estoque nos portos) enquanto a restrição (6) assegura a integralidade das variáveis de decisão.

#### 4. EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

Para a resolução do modelo proposto, foi utilizado o programa Microsoft® Excel, para conter a base de dados, em interação com o software de otimização What'sBest!® 9.0.

##### 4.1 Dados de Entrada e Configuração da Planilha

Para que a construção da planilha em Excel seja possível, todos os nós terrestres e marítimos da rede precisam estar numerados em ordem crescente. Os nós fontes de aluguel também são numerados, a partir do último nó terrestre da rede. O preenchimento dos dados de entrada na planilha de base de dados está dividido em duas partes: arcos e nós.

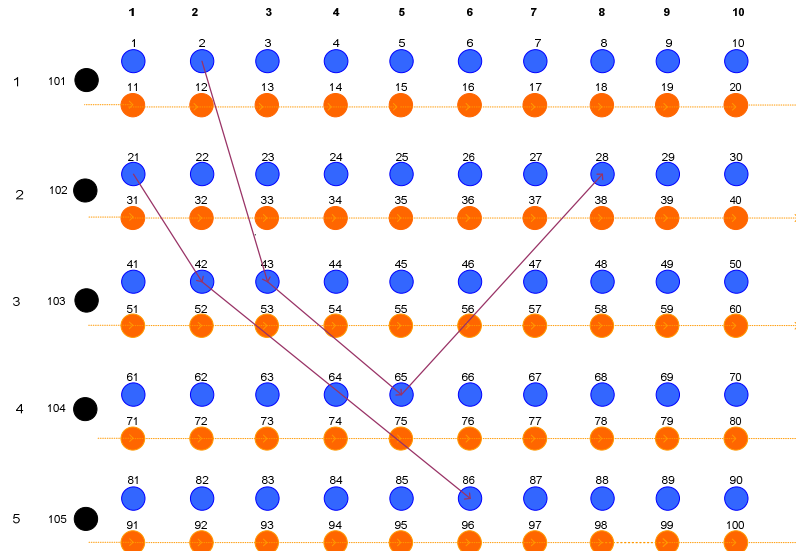
A fim de facilitar a entrada de dados na planilha, os arcos existentes na rede terão atribuídos a eles as seguintes siglas: arcos de armazenamento terrestres (AAT); arcos de transporte marítimo (ATM); arcos de transporte terrestre (ATT); arcos de carregamento do navio (AC); arcos de descarregamento do navio (AD); arcos de aluguel (AA).

Para cada arco existente na rede espaço-tempo, seus respectivos atributos (nós de origem  $(i)$  e de destino  $(j)$ ), capacidade por tipo de contêiner ( $u_{ij}^k$ ), capacidade global ( $U_{ij}$ ), limite inferior por tipo de contêiner ( $l_{ij}^k$ ) e custo unitário do fluxo de vazios ( $c_{ij}^k$ ) serão preenchidos na planilha de base de dados. A Figura 5 ilustra o preenchimento de algumas linhas desta planilha, para a rede de exemplo mostrada na Figura 4, a qual considera apenas 2 tipos de contêineres vazios, 5 portos e 10 períodos.

Os limites inferiores dos arcos ( $l_{ij}^k$ ), neste exemplo, foram considerados nulos. Nota-se ainda que além das colunas referentes aos atributos dos arcos existem também as colunas denominadas “Fluxo de vazios”, “Restrição  $\leq$ ”, “Custo de movimentação de vazios no arco” e “Fluxo de vazios global”. As colunas “Fluxo de vazios” representam as variáveis de decisão do modelo matemático, logo são classificados pelo software de otimização como ajustáveis e são, inicialmente, preenchidas com valores nulos. As colunas denominadas de “Restrição  $\leq$ ” são classificadas pelo software como restrições de menor ou igual ( $\leq$ ). Os valores das



colunas denominadas “Custos de Movimentação no Arco” são obtidos através do produto entre o custo unitário de movimentação no arco e o fluxo de vazios no mesmo. Igualmente, os valores da coluna “Fluxo de Vazios Global” representam a somatória dos fluxos de vazios de todos os tipos de contêineres considerados.



**Figura 4:** Rede espaço-tempo de exemplo para construção da planilha em Excel

Arcos (i,j)			Tipo de Contêiner k=1					Tipo de Contêiner k=2					Tipo de Contêiner k=1,2		
Tipo de Arco	i	j	Custos unitários (c)	Fluxo de vazios	Restrição ≤	Capacidade do arco (u)	Custo de movimentação de vazios no arco	Custos unitários (c)	Fluxo de vazios	Restrição ≤	Capacidade do arco (u)	Custo de movimentação de vazios no arco	Fluxo de vazios global	Restrição ≤	Capacidade Global do Arco (U)
ATM	2	43	500	0	<=	1000	0	600	15	<=	1500	9000	15	<=	1000
ATM	43	65	500	0	<=	1000	0	600	0	<=	1500	0	0	<=	1000
ATM	65	28	500	40	<=	1000	20000	600	0	<=	1500	0	40	<=	1000
ATM	21	42	500	0	<=	1000	0	600	0	<=	1500	0	0	<=	1000
ATM	42	86	500	0	<=	1000	0	600	0	<=	1500	0	0	<=	1000
AC	12	2	10	0	<=	100	0	20	15	<=	1500	300	15	<=	1000
AD	2	12	10	0	<=	100	0	20	0	<=	1500	0	0	<=	1000
AC	53	43	10	0	<=	100	0	20	0	<=	1500	0	0	<=	1000
AD	43	53	10	0	<=	100	0	20	15	<=	1500	300	15	<=	1000
ATT	11	32	1000	0	<=	500	0	900	5	<=	650	4500	5	<=	1200
ATT	12	33	1000	0	<=	500	0	900	0	<=	650	0	0	<=	1200
ATT	13	34	1000	0	<=	500	0	900	0	<=	650	0	0	<=	1200
ATT	14	35	1000	0	<=	500	0	900	0	<=	650	0	0	<=	1200
ATT	15	36	1000	0	<=	500	0	900	0	<=	650	0	0	<=	1200
ATI	16	37	1000	0	<=	500	0	900	0	<=	650	0	0	<=	1200
ATT	17	38	1000	0	<=	500	0	900	0	<=	650	0	0	<=	1200
ATT	18	39	1000	0	<=	500	0	900	0	<=	650	0	0	<=	1200
AAT	0	11	50	0	<=	800	0	70	0	<=	700	0	0	<=	1500
AAT	11	12	50	0	<=	800	0	70	15	<=	700	1050	15	<=	1500
AAT	12	13	50	0	<=	800	0	70	0	<=	700	0	0	<=	1500
AAT	13	14	50	0	<=	800	0	70	0	<=	700	0	0	<=	1500
AAT	14	15	50	0	<=	800	0	70	0	<=	700	0	0	<=	1500
AAT	15	16	50	0	<=	800	0	70	0	<=	700	0	0	<=	1500
AAT	16	17	50	0	<=	800	0	70	0	<=	700	0	0	<=	1500
AAT	17	18	50	0	<=	800	0	70	0	<=	700	0	0	<=	1500
AA	102	31	1500	18	<=	150	27000	2000	0	<=	100	0	18	<=	200
AA	102	32	1500	0	<=	150	0	2000	20	<=	100	40000	20	<=	200
AA	102	33	1500	0	<=	150	0	2000	0	<=	100	0	0	<=	200
AA	102	34	1500	0	<=	150	0	2000	0	<=	100	0	0	<=	200
AA	102	35	1500	0	<=	150	0	2000	0	<=	100	0	0	<=	200
AA	102	36	1500	0	<=	150	0	2000	0	<=	100	0	0	<=	200
AA	102	37	1500	0	<=	150	0	2000	0	<=	100	0	0	<=	200
AA	102	38	1500	40	<=	150	60000	2000	0	<=	100	0	40	<=	200
AA	102	39	1500	0	<=	150	0	2000	90	<=	100	180000	90	<=	200
AA	102	40	1500	0	<=	150	0	2000	0	<=	100	0	0	<=	200

**Figura 5:** Exemplo da planilha de base de dados (atributos dos arcos)

Em seguida, para cada nó ( $i$ ) da rede espaço-tempo, para cada tipo de contêiner ( $k$ ), deve-se preencher na planilha de base de dados as demandas e ofertas ( $b_i^k$ ) de contêineres vazios. Aos nós marítimos e terrestres, serão atribuídas as siglas NM e NT, respectivamente, apenas para facilitar a entrada de dados na planilha, apresentada na Figura 6.

Nós (i)		Tipo de Contêiner k=1					Tipo de Contêiner k=2				
Tipo de Nó	Nós (i)	Fluxo total que sai	Fluxo total que entra	balanceamento dos nós	Restrição =	bi	Fluxo total que sai	Fluxo total que entra	balanceamento dos nós	Restrição =	bi
NM	1	0	0	0	=	0	0	0	0	=	0
NM	2	0	0	0	=	0	15	15	0	=	0
NM	3	0	0	0	=	0	0	0	0	=	0
NM	4	0	0	0	=	0	0	0	0	=	0
NM	5	0	0	0	=	0	0	0	0	=	0
NM	6	0	0	0	=	0	0	0	0	=	0
NM	7	0	0	0	=	0	0	0	0	=	0
NM	8	0	0	0	=	0	0	0	0	=	0
NM	9	0	0	0	=	0	0	0	0	=	0
NM	10	0	0	0	=	0	0	0	0	=	0
NT	11	0	0	0	=	0	20	0	20	=	20
NT	12	0	30	-30	=	-30	15	15	0	=	0
NT	13	0	0	0	=	0	0	0	0	=	0
NT	14	0	0	0	=	0	0	0	0	=	0
NT	15	0	0	0	=	0	0	0	0	=	0
NT	16	0	0	0	=	0	0	0	0	=	0
NT	17	0	0	0	=	0	0	0	0	=	0
NT	18	0	0	0	=	0	0	0	0	=	0
NT	19	0	0	0	=	0	0	0	0	=	0
NT	20	0	0	0	=	0	0	0	0	=	0

**Figura 6:** Exemplo da planilha de base de dados (atributos dos nós)

As colunas denominadas “Fluxo total que sai” e “Fluxo total que entra” representam, respectivamente, a somatória de todos os fluxos de vazios que “saem” e “entram” em cada nó correspondente, através dos arcos ligados a estes nós. A coluna “Balanceamento dos nós”, por sua vez, representa o saldo, positivo ou negativo, de contêineres vazios em cada nó, ou seja, o fluxo total de vazios que “sai” deste nó menos o fluxo total de vazios que “entra” no mesmo. Este balanceamento deve ser igual à demanda ou oferta deste mesmo nó, respeitando a restrição de equilíbrio já apresentada. Sendo assim, a coluna “Restrição =” é classificada pelo software de otimização como restrição de igualdade (=).

O próximo passo do preenchimento da planilha de base de dados consiste na determinação da célula Função Objetivo (Figura 7), a qual representará a somatória de todos os custos de movimentação de vazios nos arcos e que será classificada pelo software de otimização como uma célula objetivo de minimização.

CUSTO TOTAL DE MOVIMENTAÇÃO
462100

**Figura 7:** Exemplo da planilha de base de dados (Célula da função objetivo)

Após o preenchimento da planilha de base de dados e sua configuração, é possível rodar o software What’sBest!® 9.0, o qual proverá a solução de menor custo para a rede apresentada. Isto é, os valores das colunas “Fluxo de vazios”, inicialmente nulos, serão substituídos pelas quantidades de vazios que deverão ser transportadas em cada arco existente, conforme mostrado anteriormente na Figura 5, de forma a atender as demandas nos nós, mantendo o equilíbrio da rede, ao menor custo possível.

Sobrepondo os resultados obtidos para a rede espaço-tempo, é possível ter uma visão mais clara dos fluxos de vazios no sistema. Os valores em negrito representam os dados de entrada, como os estoques iniciais e as demandas/ofertas. Os valores adjacentes aos arcos representam os fluxos de vazios nos mesmos, ou seja, o transporte marítimo, o transporte terrestre, o aluguel ou o armazenamento, no porto, de vazios.



Rezende (2003). Estes resultados indicam que o modelo adotado por Rezende (2003) não forneceu a solução ótima para o problema abordado, e sugerem que o modelo proposto por este trabalho e a utilização do software de otimização What'sBest!® 9.0 são mais adequados e confiáveis em relação à obtenção de soluções de menores custos para o problema da movimentação de contêineres vazios.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho propôs uma estratégia de solução para o problema da movimentação de contêineres vazios, na qual o mesmo foi tratado como um problema de fluxo em rede multi-produto. Baseada nesta rede foi apresentada uma formulação matemática, a qual garante o atendimento das demandas de vazios em diferentes portos ao menor custo possível, respeitando as restrições de equilíbrio do sistema e capacidades de transporte dos modais e armazenamento nos portos.

Os experimentos computacionais realizados contaram com a utilização do programa Microsoft® Excel, para conter a base de dados, em interação com o software de otimização What'sBest!® 9.0. Estes experimentos comprovaram a correta implementação do modelo proposto através de testes em cenários reduzidos e a adequação e confiabilidade do mesmo em relação à obtenção de soluções de menores custos, uma vez que obteve, para um cenário já estudado na literatura, um custo total menor em relação aos resultados publicados. Além disso, o modelo mostrou maior flexibilidade na modelagem de restrições de diferentes tipos.

Uma possível extensão para este trabalho seria a incorporação de incertezas nas chegadas e partidas dos navios, de forma a observar os impactos de atrasos nos cronogramas de viagem nos custos finais da movimentação de vazios.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barco, B.L. A Logística do Contêiner Vazio. Tese de Mestrado. Departamento de Engenharia Naval da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.
- Choong, S. T., Cole, M. H., Kutanoglu, E. Empty Container Management for Intermodal Transportation Networks. *Transportation Research part E* 38(6), 423-438, 2002.
- Cheung, R.K., Chen, C.Y. A Two-Stage Stochastic Network Model and Solution Methods for the Dynamic Empty Container Allocation Problem. *Transportation Science* 32(2), 142-162, 1998.
- Crainic, T.G., Dejax, P., Gendreau, M. Modelling the Container Fleet Management Problem Using a Stochastic Dynamic Approach. *Centre de recherche sur les transports – Publication #685*, Feb, 1990.
- Crainic, T.G., Gendreau, M., Dejax, P. Dynamic and Stochastic Models for the Allocation of Empty Containers. *Operations Research* 41(1), 102-126, 1993.
- Lai, K. K., Lam, K., Cham, W. K. Shipping Container Logistics and Allocation. *Journal of the Operational Research Society*, 46(6), 687-697, 1995.
- Lam, S. W., Lee, L. H., Tang, L. C. An Approximate Dynamic Programming Approach for the Empty Container Allocation Problem. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 15(4), 265-277, 2007.
- Rezende, L. B. A Logística do Contêiner Vazio, Uma Nova Abordagem. Tese de Mestrado. Departamento de Engenharia Naval. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003
- Shen, W.S., Khoong, C.M. A DSS for Empty Container Distribution Planning. *Decision Support Systems* 15, 75-82, 1995.
- Wang, B., Wang, Z. Research on the Optimization of Intermodal Empty Container Reposition of Land-carriage. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology* 7(3), 29-33, 2007.
- White, W.W. Dynamic Transshipment Networks: an Algorithm and its Application to the Distribution of Empty Containers. *Networks* 2(3), 211-236, 1972.

### *Endereço dos Autores:*

*Nathalia de Castro Zambuzi*  
Departamento de Engenharia de Transportes  
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Email : nath\_pink@yahoo.com

*Claudio Barbieri da Cunha*  
Departamento de Engenharia de Transportes  
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Email: cbcunha@usp.br