

NOVAS ABORDAGENS PARA O PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO E ESTOQUES COM MÚLTIPLOS VEÍCULOS

Thiago André Guimarães

Centro Universitário Franciscano do Paraná

thiandgui@gmail.com

Cassius Tadeu Scarpin

Departamento de Engenharia de Produção

Universidade Federal do Paraná

cassiusts@gmail.com

Maria Teresinha Arns Steiner

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas

Pontifícia Universidade Católica do Paraná

maria.steiner@pucpr.br

Em sistemas de gerenciamento de estoque pelo fornecedor (*Vendor Managed Inventory – VMI*), as decisões logísticas são centralizadas ao nível do vendedor, possibilitando uma redução simultânea dos custos de armazenagem e transporte. Sua operação requer a resolução de um complexo problema de otimização combinatória, denominado Problema de Roteirização e Estoques (PRE), que consiste no gerenciamento do estoque do cliente, no estabelecimento da frequência e quantidade de produto entregue, além do roteiro percorrido pelo veículo ao longo de um horizonte de planejamento. Este artigo propõe uma nova abordagem para a resolução do PRE considerando múltiplos veículos. Foi desenvolvida uma heurística de dois estágios que consiste, para cada período de planejamento, em agrupar os clientes conforme a programação das entregas para depois roteirizar os grupos formados. Foram avaliadas três diferentes políticas de distribuição: *order-up-to level*, *maximum level* e de lote econômico, sendo esta última proposta pelo trabalho. Elas foram comparadas de acordo com seus custos totais, além de critérios de desempenho propostos, sendo: taxa de ocupação dos veículos e taxas de estocagem dos clientes e fornecedor. Experimentos computacionais realizados sobre cenários gerados a partir de dados da literatura constatarem a efetividade da heurística proposta ao endereçamento da escolha da melhor política de distribuição em função dos custos de estocagem e de transporte.

Palavras-chave: Roteirização e Estoque; Múltiplos Veículos; Heurísticas.

In vendor-managed inventory systems, the logistics making process is centralized at the supplier's level, while reducing the costs of storage and distribution. Its operation requires solving a complex combinatorial optimization problem, called and Inventory Routing Problem (IRP), which is to determine the frequency and quantity delivered to the customer in addition the vehicle routing over a planning horizon. This paper proposes a new heuristic approach base in two stages. First, for each planning period, the customers are clustered according to the quantity to be delivered and the second stage builds the routes. About the quantity to be delivered, we evaluated three different distribution policies: *order-up-to level*, *maximum level* and economic order quantity (this latest proposal by this paper). Such policies were compared according to established performance criteria: vehicle filling rate, customer's storage rate and vendor's storage rate. Computational experiments performed with instances generated from literature data show the effectiveness of the proposed heuristic and allow to choose best distribution policy in relation to storage and delivery costs.

Keywords: Inventory Routing; Multi-vehicle; Heuristics.

1. INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, a cadeia de suprimentos cumpre um papel determinante no desempenho empresarial individual, condicionando o sucesso deste último à coordenação e efetividade do primeiro. Neste tocante, grande parte das organizações vem assimilando a noção de criação de valor ao cliente através da logística.

Entre os esforços responsáveis no sentido de elevar os ganhos da cadeia, destaca-se o *Vendor Managed Inventory (VMI)* ou Estoque Gerenciado pelo Fornecedor (EGF). Conforme apontado por Campbell *et al.* (1998), o *VMI* cria valor tanto para o fornecedor quanto para o cliente, em uma situação de ganha-ganha, representado pela redução de custos de distribuição e melhor gerenciamento das entregas de um lado, e pela eliminação da necessidade de controle de estoques do outro. A ideia básica do *VMI* envolve o monitoramento do estoque do cliente por parte do fornecedor, onde este assume a responsabilidade de reposição. Além disso, seu emprego demanda a elaboração de uma estratégia de distribuição capaz de minimizar os custos de transporte e ao mesmo tempo não permitir a ocorrência de rupturas no cliente. Neste contexto, a operacionalização do sistema requer a resolução de um complexo problema de otimização combinatória denominado *Inventory Routing Problem (IRP)* ou Problema de Roteirização e Estoques (PRE), combinando o gerenciamento de estoque com planejamento de transporte e roteirização de veículos (Kleywegt *et al.* (2002).

Por sua relevância prática, o PRE vem recebendo ampla atenção da literatura acadêmica nos últimos anos, desde que foi proposto por Bell *et al.* (1983) para um caso de distribuição de gás industrial. Tal praticidade pormenoriza o problema conforme alguns critérios de classificação, envolvendo horizonte de tempo, política de reposição, composição e tamanho da frota, disponibilidade de informação sobre a demanda, roteiros, entre outros. Com destaque, a política de reposição define as regras principais sobre a quantidade entregue aos clientes, impactando diretamente no custo total. Mais comumente, reporta-se na literatura a política *ML – maximum level*, que flexibiliza a quantidade entregue ao cliente, estando limitada à sua disponibilidade de armazenamento no período e *OU – order-up-to level*, que determina ao fornecedor entregar a máxima quantidade possível, sempre que um cliente for visitado.

Para o caso do PRE com veículo único, Bertazzi *et al.* (2002) apresentam uma heurística construtiva com refinamentos e resolve o PRE para a política de distribuição *order-up-to level* testando diferentes funções objetivos acerca do custo de transporte e de estocagem. Archetti *et al.* (2011) propõem uma heurística que combina busca tabu com modelos de programação inteira e compara as políticas *OU* e *ML*. Já Coelho *et al.* (2012) empregam a metaheurística *ALNS (Adaptative Large Neighborhood Search)* para resolver o PRE sob as políticas *OU* e *ML*, considerando a possibilidade de transbordo entre os clientes e do fornecedor para o cliente.

A abordagem do Problema de Roteirização e Estoques com Múltiplos Veículos (PREMV) é tratada em Coelho e Laporte (2012c) que propõe um algoritmo exato *branch-and-cut* considerando frota homogênea e heterogênea. Já Adulyasak e Cordeau (2012) propuseram diferentes formulações de modelos de programação linear inteiro misto para o Problema de Roteirização e Produção (PRP), em que o PREMV é uma das variações. Os autores apresentam também um algoritmo *branch-and-cut* em conjunto com técnicas *ALNS* para o cálculo do *upper-bound* inicial. O algoritmo foi capaz de resolver de forma exata o PREMV como variação do PRP. Coelho *et al.* (2012a) acopla o conceito de consistência para o PREMV, objetivando elevar a qualidade do serviço. Os autores adicionam restrições de quantidade e periodicidade de reabastecimento, ocupação e designação do veículo para os clientes, resolvendo o problema heurísticamente via *ALNS*. As políticas *ML* e *OU* são analisadas comparativamente, sendo esta última é tratada como uma consistência da quantidade de reabastecimento. Os resultados apontam para um aumento médio de 9% nos custos totais com a política *OU* em relação à política *ML*. De forma geral a política *OU* elevou os custos de estocagem em uma proporção maior à redução dos custos de transporte.

Diante deste *trade-off* entre custo de estocagem e custo de transporte nas políticas *ML* e *OU*, este artigo propõe uma nova política de distribuição para o PREMV através do cálculo de um lote econômico de entrega. O objetivo é encontrar um ponto de equilíbrio entre os custos de transporte e estocagem na direção de minimizar os custos totais.

Baseado em Coelho *et al.* (2012d) foi gerado um conjunto de problemas teste com demanda determinística, ao longo de um horizonte de planejamento. Para a resolução do problema, foi proposta uma heurística de dois estágios que consiste primeiramente em programar as entregas, formando grupos de atendimentos. A quantidade entregue para cada cliente é definida pelas políticas *ML*, *OU* e de Lote Econômico (LE). No segundo estágio do algoritmo, as rotas são construídas para os grupos de clientes formados no primeiro estágio. A performance de cada política de distribuição foi analisada com base no custo total, além de parâmetros de desempenho propostos, referentes à taxa média de ocupação do veículo e taxa média de estocagem (para clientes e fornecedores).

Para a programação das entregas, foi desenvolvido um algoritmo de agrupamento baseado na técnica estatística *k-means*, adaptado para o caso capacitado, enquanto que na segunda fase o problema da roteirização é resolvido pelo emprego da heurística construtiva de inserção mais econômica com refinamentos *2-opt*. A aplicação da heurística proposta em diferentes cenários acerca do número de clientes, número de períodos de planejamento e disponibilidade de frota, possibilitam avaliar o comportamento das políticas *ML*, *OU* e *LE* e indicar o seu melhor uso.

O restante do artigo está estruturado como segue: na seção 2 o PREMV é formalmente definido como um modelo de programação linear inteiro misto, de acordo com as políticas de distribuição *ML*, *OU* e LE. A seção 3 detalha a estratégia heurística desenvolvida. Na seção 4 os cenários gerados e os resultados obtidos são explanados, enquanto que a seção 5 tece as conclusões do estudo.

2. FORMALIZAÇÃO DO PROBLEMA

O PREMV é formulado sobre um grafo completo e não orientado $G=(V,A)$ onde $V=\{0,\dots,n\}$ é o conjunto de vértices e $A=\{(i,j) \in V, i \neq j\}$ o conjunto de arcos. O vértice 0 refere-se ao depósito, enquanto o conjunto $V'=V \setminus \{0\}$ representa os clientes. Cada arco $(i,j) \in V$, possui um custo não negativo c_{ij} . As decisões de planejamento são definidas em horizonte temporal $T=\{0,\dots,p\}$ sendo que, em cada período $t \in T$, todo cliente i demanda uma certa quantia conhecida d_i^t . Cada cliente i também possui um custo unitário de estocagem h_i e uma capacidade de armazenamento C_i , sendo $\min C_i$ a quantidade mínima que deve ser mantida no estoque, calculada como uma proporção da capacidade de armazenagem. No período $t=0$, é conhecido o nível inicial de estoque $I_i^0, \forall i \in V$ e o estoque do fornecedor disponível em cada período t é dado por I_0^t , sendo r^t a quantidade de produto recebida pelo depósito no período t . Assume-se que o fornecedor possui uma quantidade suficiente de produto para atender a demanda do conjunto de clientes durante o horizonte de planejamento.

O fornecedor também dispõe de uma frota homogênea de K veículos, $k=\{1,\dots,K\}$, com capacidade de carregamento Q_k . Cada veículo k realiza uma única rota em cada período t , limitado a um número máximo de clientes atendidos $\max N^t$. Devido às questões operacionais, assume-se que, caso o cliente i seja visitado no período t pelo veículo k , a quantidade entregue q_{ik}^t deve ser superior a um parâmetro não negativo $\min Q^t$, fixo para todo o conjunto de clientes. As variáveis de decisão são descritas a seguir:

- x_{ijk}^t : variável binária, que assume o valor 1 se o arco (i,j) é percorrido no período t pelo veículo k e 0 caso contrário.
- y_{ik}^t : variável binária, que assume o valor 1 se o cliente i é visitado pelo veículo k no período t e 0 caso contrário.

- I_i^t : nível de estoque do cliente i ao término do período t .
- q_{ik}^t : quantidade entregue ao cliente i no período t pelo veículo k .
- f_{ij}^t : fluxo de veículos que chega ao nó j a partir do nó i no período t .

O objetivo do PREMV é minimizar o custo total de distribuição e armazenamento, endereçado à política do *VMI*, atendendo às seguintes restrições adicionais:

- O nível de estoque I_i^t do cliente i não deve exceder sua capacidade C_i tampouco ser inferior ao mínimo requerido $\min C_i$.
- Cada veículo deve realizar apenas uma rota de entrega por período, devendo esta iniciar e terminar no depósito.
- A quantidade de rotas não deve exceder a disponibilidade da frota.
- O totalidade entregue pelo veículo k no período t não deve exceder sua capacidade Q_k .
- Cada cliente i deve ser atendido por um único veículo, não sendo permitidas entregas fracionadas.

Inicialmente, para a política de distribuição *maximum level*, o PREMV é definido como um modelo de programação linear inteira mista como segue:

$$\text{Minimizar} \quad \sum_{t=1}^p I_0^t h_0 + \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^p I_i^t h_i + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0, j \neq i}^n \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^p c_{ij} x_{ijk}^t \quad (1)$$

$$\text{Sujeito à:} \quad \min C_i \leq I_i^t \leq C_i \quad \forall t \in T, i \in V' \quad (2)$$

$$q_{ik}^t \leq C_i - I_i^t \quad \forall k \in K, t \in T, i \in V' \quad (3)$$

$$q_{ik}^t \geq \min Q^t y_{ik}^t \quad \forall k \in K, t \in T, i \in V' \quad (4)$$

$$I_i^t = I_i^{t-1} + \sum_{k=1}^K q_{ik}^t y_{ik}^t - d_i^t \quad \forall t \in T, i \in V' \quad (5)$$

$$I_0^t = I_0^{t-1} + r^t - \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^K q_{ik}^t \quad \forall t \in T \quad (6)$$

$$\sum_{i=0}^n q_{ik}^t y_{ik}^t \leq Q_k \quad \forall k \in K, t \in T \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n y_{ik}^t \leq \max N^t \quad \forall k \in K, t \in T \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^K y_{ik}^t = 1 \quad \forall i \in V', t \in T \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ijk}^t = 1 \quad \forall k \in K, t \in T, j \in V' | j \neq i \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{jik}^t = 1 \quad \forall k \in K, t \in T, j \in V' | j \neq i \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{0ik}^t = \sum_{i=1}^n x_{i0k}^t \quad \forall k \in K, t \in T \quad (12)$$

$$\sum_{k=1}^K y_{0k}^t \leq K \quad \forall t \in T \quad (13)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ijk}^t + \sum_{i=0}^n x_{jik}^t = 2y_{ik}^t \quad \forall k \in K, t \in T \quad (14)$$

$$\sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^K f_{jik}^t - \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^K f_{ijk}^t = \sum_{k=1}^K q_{ik}^t y_{ik}^t \quad \forall t \in T, i \in V' \quad (15)$$

$$f_{ijk}^t \leq Q_k y_{ik}^t \quad \forall k \in K, t \in T, i \in V, j \in V' \quad (16)$$

$$f_{ijk}^t \geq 0 \quad \forall k \in K, t \in T, i \in V, j \in V' \quad (17)$$

$$I_i^t \geq 0 \quad \forall t \in T, i \in V \quad (18)$$

$$q_{ik}^t \geq 0 \quad \forall k \in K, t \in T, i \in V' \quad (19)$$

$$d_i^t \geq 0 \quad \forall t \in T, i \in V' \quad (20)$$

$$x_{ijk}^t \in \{0, 1\} \quad \forall k \in K, t \in T, i \in V, j \in V' | j \neq i \quad (21)$$

$$y_{ik}^t \in \{0, 1\} \quad \forall k \in K, t \in T, i \in V \quad (22)$$

A equação (1) minimiza a função objetivo do problema, contemplando o custo de armazenagem do depósito, o custo de armazenagem do cliente e o custo total de distribuição. A restrição (2) limita o estoque do cliente i em cada período t entre um valor mínimo $minC_i$ e a sua respectiva capacidade de armazenamento C_i . Em (3), garante-se que a quantidade entregue ao cliente i não exceda sua capacidade disponível. A equação (4) requer que a quantidade entregue ao cliente i no período t seja superior ao parâmetro mínimo operacional. A restrição (5) calcula o estoque disponível do cliente i no período t como sendo o estoque disponível no período anterior $t-1$, mais a quantidade recebida q_{ik}^t menos a quantidade demandada d_i^t no período t . Em (6), o estoque do fornecedor é definido. A restrição (7) garante que a quantidade transportada por um veículo k não exceda sua capacidade de carregamento, enquanto que a restrição (8) limita a quantidade de clientes servidos pelo mesmo veículo não seja superior a um parâmetro pré-determinado. Em (9), garante-se que cada cliente i seja visitado por apenas um veículo k . As sete restrições seguintes modelam os requisitos para a não ocorrência de subciclos: em (10) e (11), o somatório de arcos que chegam e que saem a um determinado cliente i devem ser únicos. A restrição (12) certifica que a quantidade de arcos que chegam ao depósito deve ser igual à quantidade que dele sai. Em (13) é assegurando que existam no máximo K subrotas. Já a equação (14) garante a continuidade da rota sempre que o veículo passar por um ponto diferente do depósito. Em (15), o fluxo de produtos que passa por um ponto i , com exceção do depósito, subtraído do fluxo que sai desse mesmo nó, resulta na quantidade abastecida para o i -ésimo cliente. Já a restrição (16) limita o fluxo máximo que passa por um arco utilizado no percurso à capacidade do veículo. O conjunto de restrições (17) à (22) delimita o domínio das variáveis.

2.1. POLÍTICA ORDER-UP-TO LEVEL

A formulação do problema para a política *OU* implica em adicionar restrições acerca da quantidade entregue. Estendendo o modelo de Archetti *et al.* (2007) para o caso de múltiplos veículos, tem-se:

$$q_{ik}^t \geq C_i y_{ik}^t - I_i^t \quad \forall k \in K, t \in T, i \in V' \quad (23)$$

$$q_{ik}^t \leq C_i y_{ik}^t \quad \forall k \in K, t \in T, i \in V' \quad (24)$$

A restrição (23) assegura ao cliente i um carregamento igual à capacidade máxima de estocagem, dada por $C_i - I_i^t$, caso ele seja visitado pelo veículo k no período t ($y_{ik}^t = 1$) e zero caso contrário ($y_{ik}^t = 0$).

2.2. POLÍTICA DE LOTE ECONÔMICO

Na medida em que a política *ML* oportuna ao fornecedor realizar entregas em quantidades flexíveis dependendo do nível de estoque do cliente, estas tendem a ser mais frequentes, porém com abastecimentos em menor volume, reduzindo o custo de estocagem.

Em virtude da redução na quantidade entregue, o volume de estoque do fornecedor e o número de visitas acaba elevando-se, incrementando portanto o custo de estocagem no fornecedor e o custo de transporte. A política *OU* por sua vez eleva o nível de estoque dos clientes e conseqüentemente seu custo associado pelo fato das recargas alcançarem a capacidade de armazenamento. Contudo, as visitas menos frequentes e a maior quantidade entregue reduzem o custo de estocagem do fornecedor e o custo de transporte. Pela dicotomia exposta, uma política de lote econômico (LE) objetiva equilibrar os custos de transporte e de estocagem, através do cálculo de quantidades fixas.

Reportam-se na literatura algumas abordagens que empregam a estratégias semelhantes contexto do PRE. Birger e El-Houssaine (2008) apresentam uma formulação LE envolvendo quatro componentes de custo: custos fixos de operação do veículo, custos de transporte, custos de processamento do pedido e custos de estocagem. Os autores consideram um PRE para um único veículo, com a possibilidade de múltiplos roteiros em um mesmo período. Uma heurística de quatro estágios é proposta para a resolução do problema, envolvendo primeiramente uma partição do conjunto de clientes para construir posteriormente os múltiplos roteiros entre as partições formadas. O terceiro estágio determina a frequência dos roteiros e o último estágio a programação das rotas. Já Liu e Lee (2011) resolvem o PRE considerando restrições de janelas de tempo e demanda estocástica. O problema é resolvido empregando uma heurística construtiva com refinamentos por mecanismos de busca em vizinhança. Os autores consideram uma revisão para um modelo de LE contínuo, porém o trabalho não especifica quais parâmetros são considerados. Sindhuchao *et al.* (2005) tratam o PRE tradicional, com único veículo e demanda determinística. O estudo apresenta uma política de LE considerando custos de estocagem do cliente, custos de transporte e de processamento de pedido. O problema é resolvido pelo emprego de técnicas de geração de colunas em conjunto com a técnica *branch-and-price*. Uma heurística construtiva gulosa com refinamentos de busca em vizinhança também é proposta.

No presente artigo, a formulação para a política de lote econômico baseia-se em Sindhuchao *et al.* (2005), estendida para o caso de múltiplos veículos, e segue o modelo básico de cálculo que considera o custo total do sistema de reposição (C_S) conforme descrição à seguir:

$$C_S = C_C * D + C_P * \left(\frac{D}{Q}\right) + C_E * \left(\frac{Est}{2}\right) \quad (25)$$

Em (25) C_C é o custo de aquisição do produto, D é a demanda do cliente, C_P é o custo de processamento do pedido e C_E é o custo unitário de estocagem por período. A variável $Est/2$ refere-se ao estoque médio e Q e o lote econômico de pedido. Derivando a equação, igualando-a a zero e resolvendo para Q , temos o lote que minimiza o custo do sistema.

$$Q = \sqrt{\frac{2 * D * C_P}{C_E}} \quad (26)$$

Sem perda de generalidade, desconsidera-se neste trabalho o custo de aquisição do produto. Os demais parâmetros são definidos a seguir.

$$C_P = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ij}}{n} \quad (27); \quad C_E = h_i p \quad (28); \quad D = \sum_{i=1}^p d_i^t - I_i^0 + p * \min C_i \quad (29);$$

Em (27), o custo de processamento do pedido é uma *proxy* do deslocamento médio necessário para enviar um veículo até o cliente i , dada pela média da distância deste para todos os clientes do conjunto V . Em (28) O custo de estocagem é composto pelo custo unitário de estoque do cliente i , multiplicado pelo número de períodos do horizonte de planejamento. Por fim, na equação (29), D é calculada como sendo a demanda total do cliente i ao longo do horizonte p deduzido do estoque inicial e do montante necessário para a manutenção do estoque mínimo durante todo o horizonte p . Substituindo as três supracitadas equações em (26), obtêm-se o lote econômico do cliente i (LE_i), apresentado na equação (30).

$$LE_i = \sqrt{\frac{2 * \left(\sum_{t=1}^p d_i^t - I_i^0 + p * \min C_i \right) * \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ij}}{n * h_i * p^2}} \quad (30);$$

A política implica que sempre que se o cliente i for visitado pelo veículo k no período t , a quantidade recebida deve ser igual ou múltiplo do seu respectivo lote econômico limitado pela capacidade de armazenagem disponível. A formulação do modelo para o PREMV requer a adição da equação (31), modificando a equação (3) do modelo original., de forma que:

$$q_{ik}^t = \min \left(C_i - I_i^t, y_{ik}^t; \theta_i^t * LE_i \right), \quad \theta_i^t = \left\lceil \frac{d_i^t - I_i^t + \min C_i}{LE_i} \right\rceil \quad (31);$$

Onde θ_i^t é o maior valor inteiro (teto) da divisão entre a quantidade necessária a ser entregue ao cliente i (política ML) e o próprio lote econômico.

3. ESTRATÉGIA DE RESOLUÇÃO

O PREMV é considerado $NP-hard$ na medida em que generaliza o Problema de Roteirização de Veículos Capacitados (PRVC) (COELHO, CORDEAU e LAPORTE (2012a), impossibilitando o modelo proposto na seção 2 de resolver instâncias de grande porte. Por esta limitação, o PREMV é resolvido heurísticamente neste estudo.

Em Campbell e Savelsbergh (2004) o PRE clássico é solucionado para um único veículo via decomposição em duas fases. Na primeira delas as entregas aos clientes são programadas por técnicas de programação inteira, e na segunda fase o conjunto de rotas é construído através de heurísticas de roteirização e *scheduling*.

Neste trabalho a mesma estratégia de resolução através de decomposição é estendida ao PREMV. Primeiramente a programação das entregas é realizada através do agrupamento dos pontos de demanda empregando a técnica estatística *k-means*, onde o número de grupos é igual ao número de veículos disponíveis. São geradas inicialmente K sementes com coordenadas aleatórias e os clientes são agrupados de acordo com a proximidade, não havendo controle de capacidade de carregamento ou o número máximo de pontos por grupo. Definido um arranjo inicial, novas coordenadas são calculadas para os *K-centróides* e a designação dos clientes ao centroide mais próximo é feita de acordo com a quantidade programada de entrega, respeitando a limitação de carregamento do veículo e número máximo de clientes por grupo. O procedimento é repetido até que as novas coordenadas dos centroides converjam para um limite previamente estabelecido.

Definido os grupos de atendimento, as rotas iniciais são construídas pela heurística de inserção mais econômica. Conforme exposto em Steiner *et al.* (2000), o algoritmo consiste em, a partir de um arco (i,j) , encontrar um nó $k \in V$ que ainda não esteja na rota de maneira que $c_{ik} + c_{kj} - c_{ij}$ seja mínimo e formar a rota (i,k,j) até se ter um circuito Hamiltoniano. Após a formação do circuito, a solução é refinada pelo algoritmo de melhorias *2-opt*. Tal método atua na substituição de 2 pares de arcos no roteiro estabelecido anteriormente, por outros 2 arcos da mesma rota. Caso alguma melhoria seja detectada a troca é aceita e os novos arcos passa a compor a solução incumbente. Esta dinâmica se repete até que nenhuma troca resulte em melhoria. A figura 1 ilustra as trocas dos pares de arcos (2,7) e (3,6) pelos arcos (2,3) e (6,7).

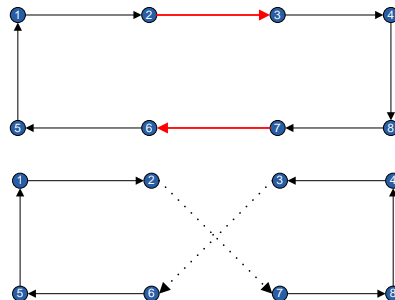


Figura 1 – Procedimento 2-opt. Fonte: Os Autores

A figura 2 apresenta a heurística proposta. O critério de parada utilizado foi limitado a um número máximo de iterações.

Heurística PREMV (Instância)

Ler Dados
Melhor Solução ← 1000^1000
Tempo ← *Tinício*
Para *i=1* até Número de Iterações
 Para *t=1* até T
 Para *k=1* até K
 Gerar sementes iniciais dos centróides
 Para *i=1* até *n*
 Agrupar clientes por proximidade
 Recalcular coordenadas dos centróides
 Agrupar clientes por quantidade a ser entregue (Conforme Política)
 Return(*Grupos*)
 Fim Para
 Roteirizar Inserção Mais Econômica (*Grupos*)
 Return(*RoteiroInicial*)
 Aplicar Melhoria 2-opt (*RoteiroInicial*)
 Return(*Solução Incumbente*)
 Se *Solução Incumbente* < *Melhor Solução*
 Melhor Solução = *Solução Incumbente*
 Tempo ← *Tfim-Tinício*
 Fim Se
 Fim Para
 Fim Para
Return(*Melhor Solução, Tempo*)

Figura 2 – Heurística proposta para o PREMV. Fonte: Os Autores

As métricas de desempenho buscam determinar parâmetros norteadores sobre a utilização da frota, determinada por uma taxa média de carregamento, bem como dos níveis médios de estoque dos clientes e dos fornecedores. Os critérios de comparação privilegiam uma maior taxa de ocupação dos veículos, de forma que a frota não trafegue com ociosidade, além de uma taxa de estocagem reduzida no fornecedor e nos clientes, para que o custo de estocagem seja minimizado.

Com relação a Taxa de Ocupação do Veículo (TxOcV), o cálculo é dado pela razão entre a quantidade total entregue pelos K veículos para os n clientes durante o horizonte p e a capacidade nominal da frota, dado pelo produto entre K e Q_k . Já a Taxa de Estocagem dos Clientes (TxEC) é calculada pelo razão entre a soma dos estoques do n clientes ao longo de p e a soma de suas respectivas capacidades de estocagem. Por fim, a Taxa de Estocagem do Fornecedor (TxEF) é o complemento da entrega total e a quantidade de produto recebido pelo depósito (taxa de recarga r^t) ao longo p . As equações (32), (33) e (34) apresentam a estrutura matemática dos três parâmetros supracitados, respectivamente.

$$\text{TxOcV} = \frac{\sum_{t=1}^p \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n q_{ik}^t}{K * Q_k} \quad (32); \quad \text{TxEC} = \frac{\sum_{t=0}^p \sum_{i=1}^n I_i^t}{\sum_{i=1}^n C_i} \quad (33); \quad \text{TxEF} = \left(1 - \frac{\sum_{t=1}^p \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n q_{ik}^t}{\sum_{t=1}^p r^t} \right) \quad (34);$$

4. DADOS GERADOS, RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os cenários gerados seguem os padrões adotados em Coelho *et al.* (2012d) a respeito da demanda dos clientes, níveis iniciais de estoque e localização geográfica dos vértices (clientes e depósito). O conjunto de instâncias seguem os parâmetros a seguir:

- Número de clientes (n): igual à 5,10,15,25,50,100,125,150 e 200.
- Número de veículos (K): 2 e 3 veículos.
- Horizonte (p): 5, 10 e 20 períodos.
- Demanda(d_i): variável uniforme contínua entre [10;100]
- Taxa de recarga do depósito (r): variável uniforme contínua entre [100n,140n] onde n é o número de clientes.

- Capacidade de Estocagem (C_i): variável uniforme contínua entre $[2,6 \mu_i ; 5,2 \mu_i]$, onde $\mu_i = \sum_{t=1}^p d_i^t / p$
- Percentual Mínimo de Estocagem ($\min C_i$): αC_i , onde α é uma variável uniforme contínua entre $[0,1 ; 0,2]$.
- Estoque Inicial no Depósito (I_0^0): $\sum_{i=1}^p C_i$.
- Estoque Inicial nos Clientes (I_i^0): $C_i - \left(\sum_{t=1}^p d_i^t / p \right)$.
- Custo de estocagem do fornecedor (h_0): 0,02.
- Custo de estocagem do cliente (h_i): variável uniforme contínua entre $[0,2;0,4]$.
- Penalidade pela ruptura: $200 * h_i$
- Número Máximo de Clientes por Rota ($\max N^t$): parte inteira de n/K
- Capacidade do Veículo (Q_k): $\left\lfloor \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{K} \right\rfloor$.
- Distância entre os arcos (i,j) (c_{ij}): $\sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2}$, onde (X_i, Y_i) são variáveis uniformes contínuas entre $[0;500]$.

Foram avaliadas ao todo 42 cenários com a quantidade com a seguinte configuração: pequenos (5, 10 e 15 clientes), médias (25, 50 e 75 clientes) e grandes (100, 125, 150 e 200 clientes). Os períodos variam entre 5, 10 e 20 e os veículos entre 2 e 3 unidades. Os experimentos computacionais foram realizados em um processador Intel Core i3™ de 32 bits, CPU de 3.10 GHz com 2GB de memória, sistema operacional Windows 7 Home, *Service Pack 1*. A heurística proposta foi implementada em linguagem Visual Basic 6.0.

A tabela 1 apresenta os resultados obtidos para os cenários pequenos. Da coluna da direita para a coluna da esquerda temos o nome da instância, o número de clientes, veículos e períodos, e os custos obtidos para cada uma das três políticas de distribuição (*ML*, *OU* e *LE*), sendo CTr o custo de transporte, CEStF o custo de estocagem do fornecedor e CEStC o custo de estocagem do cliente e por fim o tempo de processamento em segundos.

Tabela 1- Resultados para Cenários Pequenos

Instância	C	K	T	MAXIMUM LEVEL					ORDER-UP-TO LEVEL					LOTE ECONÔMICO				
				CTr	CEStF	CEStC	CT	t	CTr	CEStF	CEStC	CT	t	CTr	CEStF	CEStC	CT	t
C5-T5-K2	5	2	5	3559	168	517	4245	1.5	3188	139	966	4293	0.8	3383	148	823	4353	0.3
C10-T5-K2	10	2	5	6127	357	885	7368	3.7	3124	284	1941	5349	3.8	4349	305	1646	6300	6.1
C10-T5-K3	10	3	5	5491	290	921	6702	3.7	3521	229	1835	5585	3.7	4160	254	1437	5851	6.7
C15-T5-K2	15	2	5	5778	521	1334	7633	4	4467	420	2969	7856	6.8	5123	458	2337	7918	8.5
C5-T10-K2	5	2	10	8998	487	658	10143	7.2	6832	414	1978	9225	4.6	7016	442	1478	8936	6.3
C15-T5-K3	15	3	5	9579	486	1574	11639	6.1	7328	380	3080	10788	3.1	8368	414	2560	11342	3.9
C10-T10-K3	10	3	10	13809	1021	976	15806	8.7	9151	868	3330	13349	106	9768	928	2365	13061	4.5
C10-T10-K2	10	2	10	16687	1051	1745	19484	6.2	11211	879	4605	16695	5.2	13032	956	3334	17323	7.7
C15-T10-K2	15	2	10	20108	1671	2107	23886	2.9	13563	1471	5087	20120	8.7	16369	1514	4255	22138	9.5
C15-T10-K3	15	3	10	19176	1817	2766	23759	6	12646	1552	6922	21120	7.6	14161	1662	5157	20979	3.7
C10-T20-K3	10	3	20	32997	3096	3072	39165	4.1	16768	2752	8499	28019	6.3	24690	2920	5781	33391	3
C15-T20-K3	15	3	20	37660	5887	4246	47793	19.4	24213	5367	11900	41481	18	30786	5588	8252	44626	16.8
Média				14997	1404	1733	18135	6.12	9668	1230	4426	15323	15	11767	1299	3285	16352	6.42
GAP				55%	14%	-61%	18%	-58%						22%	6%	-26%	7%	-56%

Conforme apontado na tabela 1, o desempenho da política *OU* foi superior às demais para cenários com 5, 10 e 15 clientes. Com relação à média, o desvio da política *ML* foi 18% maior, e de 7% para a política *LE*. As soluções em negrito apontam para a melhor política para a instância da coluna 1. Em geral, a política *OU* foi mais eficiente nos cenários com 3

veículos disponíveis (instâncias C15-T20-K3, C10-T20-K3, C10-T5-K3 e C15-T5-K3), devido principalmente ao menor custo de transporte. Isso evidencia que, embora o custo de estocagem do fornecedor tenha sido substancialmente menor em *ML* (61% menor em relação à *OU*), a redução do custo de transporte foi proporcionalmente menor. Neste caso, a política *LE* teve um desempenho intermediário. Com relação ao tempo, as políticas *ML* e *LE* processaram o bloco de instâncias na mesma ordem de grandeza enquanto a política *OU* demandou quase o dobro do tempo médio.

A tabela 2 apresenta a análise do mesmo conjunto de instâncias com relação aos parâmetros de desempenho. Atendendo às expectativas, a política *ML* teve a menor taxa média de ocupação dos veículos (39%) e também de estocagem do depósito. Em contrapartida, devido ao menor volume entregue aos clientes, a taxa de estocagem do cliente foi a maior dentre as três políticas. Já em *OU*, a taxa média de ocupação sobe para (51%), bem como a taxa de estocagem dos clientes (57%). A política *LE* apresenta valores intermediários.

Tabela 2- Parâmetros de Desempenho para Cenários Pequenos

Instância	C	K	T	MAXIMUM LEVEL			ORDER-UP-TO LEVEL			LOTE ECONOMICO		
				TxOV	TxEC	TxED	TxOV	TxEC	TxED	TxOV	TxEC	TxED
C5-T5-K2	5	2	5	39%	31%	74%	51%	57%	57%	56%	49%	62%
C10-T5-K2	10	2	5	39%	28%	76%	74%	60%	66%	45%	51%	65%
C10-T5-K3	10	3	5	35%	24%	77%	55%	48%	58%	61%	38%	61%
C15-T5-K2	15	2	5	35%	24%	77%	47%	52%	61%	52%	41%	66%
C5-T10-K2	5	2	10	48%	17%	64%	58%	51%	52%	55%	38%	59%
C15-T5-K3	15	3	5	28%	31%	74%	46%	59%	56%	41%	49%	60%
C10-T10-K3	10	3	10	34%	15%	66%	53%	51%	59%	50%	37%	61%
C10-T10-K2	10	2	10	30%	23%	64%	46%	62%	63%	38%	45%	60%
C15-T10-K2	15	2	10	31%	24%	65%	39%	58%	57%	34%	49%	60%
C15-T10-K3	15	3	10	33%	25%	69%	51%	63%	61%	39%	47%	64%
C10-T20-K3	10	3	20	35%	22%	57%	55%	61%	55%	41%	42%	55%
C15-T20-K3	15	3	20	33%	22%	62%	44%	62%	59%	39%	43%	60%
Média				35%	24%	69%	51%	57%	59%	46%	44%	61%

O segundo bloco de cenários possui 20 e 50 clientes, alternando o horizonte de planejamento entre 5 e 20 períodos, e uma frota de 2 e 3 veículos. A tabela 3 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 3- Resultados para Cenários Médios

Instância	C	K	T	MAXIMUM LEVEL					ORDER-UP-TO LEVEL					LOTE ECONÔMICO				
				CTr	CEstF	CEstC	CT	t	CTr	CEstF	CEstC	CT	t	CTr	CEstF	CEstC	CT	t
C20-T10-K2	20	2	10	20206	2028	2173	24407	8.7	12739	1741	6620	21100	7.8	14617	1842	5033	21493	9.6
C20-T5-K2	20	2	5	6850	646	1376	8872	6	5144	538	2931	8614	8.5	5488	576	2400	8464	9.8
C20-T10-K3	20	3	10	21894	2174	2181	26250	5.6	14240	1877	6857	22975	10	17347	1992	5056	24395	11.8
C20-T20-K3	20	3	20	53083	6773	3504	63360	24.4	34558	6107	13577	54242	18	44175	6413	8947	59535	26.6
C20-T5-K3	20	3	5	9924	701	1621	12246	9.5	7406	582	3395	11383	1.7	7970	599	2908	11476	5.5
C50-T10-K2	50	2	10	27550	4757	5704	38012	33.4	19597	3988	17216	40801	37	22342	4309	12356	39007	25.8
C50-T5-K2	50	2	5	12135	1498	3354	16988	33	9703	1222	7471	18397	11	10391	1304	6255	17949	6.1
C50-T5-K3	50	3	5	11214	1487	3763	16464	8.6	9162	1196	8089	18447	15	9891	1304	6455	17650	19.5
C50-T10-K3	50	3	10	30871	4329	4952	40152	8.4	21223	3593	16009	40825	10	22922	3891	11451	38265	50.6
C50-T20-K3	50	3	20	70854	15722	13711	100287	106	47659	14116	38109	99885	10	56946	14806	27611	99363	19
Média				26458	4012	4234	34704	24.3	18143	3496	12027	33667	13	21209	3704	8847	33760	18.4
GAP				46%	15%	-65%	3%	89%						17%	6%	-26%	0.3%	43%

Pelo exposto o desempenho ainda superior da política *OU* se concentra nas instâncias com 20 clientes e 3 veículos. Com o aumento da quantidade de clientes, o custo de estocagem elevou-se em uma proporção maior que a redução do custo de transporte, de forma que o *gap* para a política *ML* fosse de 3% (contra 18% para os pequenos cenários). O desempenho em *ML* foi superior para cenários intermediários, conforme destaque em negrito. A política de

lote econômico teve performance muito semelhante em termos médios, com apenas 0,3% de desvio em relação à *OU* e produziu resultados superiores para os cenários de maior porte (C50-T10-K3, C50-T20-K3). O custo computacional médio ficou estável para a política *OU*, tendo sido incrementado para a política *ML* e *LE*. A tabela 4 apresenta os resultados para os parâmetros de desempenho.

Tabela 4- Parâmetros de Desempenho para Cenários Médios

Instância	C	K	T	MAXIMUM LEVEL			ORDER-UP-TO LEVEL			LOTE ECONOMICO		
				TxOV	TxEC	TxED	TxOV	TxEC	TxED	TxOV	TxEC	TxED
C20-T10-K2	20	2	10	27%	17%	67%	42%	51%	57%	34%	39%	62%
C20-T5-K2	20	2	5	24%	23%	78%	39%	50%	65%	33%	41%	70%
C20-T10-K3	20	3	10	31%	17%	67%	46%	53%	61%	37%	39%	63%
C20-T20-K3	20	3	20	32%	13%	61%	44%	51%	57%	38%	34%	58%
C20-T5-K3	20	3	5	29%	28%	75%	49%	59%	67%	43%	50%	63%
C50-T10-K2	50	2	10	25%	17%	64%	32%	52%	54%	28%	38%	60%
C50-T5-K2	50	2	5	18%	22%	75%	33%	49%	61%	27%	41%	64%
C50-T5-K3	50	3	5	26%	16%	63%	36%	52%	52%	33%	37%	58%
C50-T10-K3	50	3	10	28%	22%	57%	34%	61%	54%	30%	44%	55%
C50-T20-K3	50	3	20	28%	24%	77%	39%	51%	60%	34%	41%	65%
Média				27%	20%	68%	39%	53%	59%	34%	40%	62%

Nota-se uma redução em todos parâmetros de desempenho para as três políticas, em relação aos cenários menores. Isso se deve à própria estrutura de geração dos cenários que calcula a quantidade as capacidades do veículo e de estocagem do cliente a partir do número de períodos e de pontos de demanda. Contudo, novamente se verifica o desempenho intermediário da política de lote econômico em relação à política *OU* e *ML*. Por fim, a tabela 5 trata os cenários de grande porte, com 75, 100, 125, 150 e 200 clientes.

Tabela 5- Resultados para Cenários Grandes

Instância	C	K	T	MAXIMUM LEVEL					ORDER-UP-TO LEVEL					LOTE ECONÔMICO				
				CTr	CEstF	CEstC	CT	t	CTr	CEstF	CEstC	CT	t	CTr	CEstF	CEstC	CT	t
C75-T5-K2	75	2	5	13990	2258	5503	21750	8.3	11330	1786	11892	25009	11.3	11008	1939	9758	22706	12.3
C75-T5-K3	75	3	5	15510	2544	5425	23479	11.6	11922	2064	12442	26428	4.2	13291	2230	9959	25480	4.5
C75-T10-K2	75	2	10	35742	7871	7715	51328	13.2	27171	6794	24065	58030	11.4	30810	7179	17728	55716	8.9
C75-T10-K3	75	3	10	39292	7498	11395	58185	15.1	29764	6347	28860	64972	4	35106	6780	22179	64066	11.8
C100-T5-K2	100	2	5	17275	3755	9145	30175	28.4	13715	3125	18415	35255	10.3	14936	3380	13821	32137	6.6
C100-T5-K3	100	3	5	19889	3307	8478	31673	7.3	15385	2682	17647	35714	7.4	18744	2804	15241	36788	3.4
C100-T10-K3	100	3	10	40299	9361	10290	59951	29	30648	7849	33518	72014	13.1	35005	8424	24442	67872	20.5
C100-T10-K2	100	2	10	38229	11313	10888	60430	31.5	29368	9792	33004	72164	7.8	30190	11063	20601	61854	9.4
C125-T5-K2	125	2	5	19035	4139	9499	32673	14.1	16124	3603	17740	37467	3.7	15689	3874	14113	33676	4.4
C125-T5-K3	125	3	5	20854	4577	11133	36563	2.5	16350	3743	23794	43887	1.3	20354	3959	18967	43280	10.1
C125-T10-K2	125	2	10	42913	12787	12624	68323	7.9	34453	12114	32513	79080	36.1	31510	13494	21647	66651	3.5
C125-T10-K3	125	3	10	51770	15170	19210	86150	5.5	36866	13183	48311	98361	12.2	45502	14060	34652	94213	20.5
C150-T5-K2	150	2	5	19432	5311	11475	36218	22.2	14926	4874	18641	38442	10.1	15360	5153	14803	35317	8.8
C150-T5-K3	150	3	5	21931	5462	14570	41964	62.6	19793	4505	28916	53214	10.3	21295	4905	21854	48053	10.6
C150-T10-K2	150	2	10	47725	12131	16140	75996	110	31662	11878	35792	79331	14.3	31033	13348	24247	68628	22.3
C150-T10-K3	150	3	10	52646	12077	15460	80184	53.1	44434	9879	48141	102454	7	47431	11667	31291	90389	6.7
C200-T5-K2	200	2	5	21924	6626	14826	43377	109	15825	6390	20450	42665	17.2	15704	6608	17921	40233	5.8
C200-T5-K3	200	3	5	25747	6523	18123	50393	60.2	21172	5841	29454	56467	17.6	20716	6237	22240	49193	1.5
C200-T10-K2	200	2	10	57380	21030	31802	110212	95.3	34785	22652	43147	100584	24.9	34099	24253	28407	86759	19.7
C200-T10-K3	200	3	10	58168	21427	31751	111347	16.7	44302	20161	62330	126793	2.1	44242	22689	40666	107597	34
Média				32988	8758	13773	55519	35.2	25000	7963	29454	62417	11.32	26601	8702	21227	56530	11.3
GAP									-24%	-9%	114%	12%	-68%	-19%	-1%	54%	2%	-68%

Este último conjunto de 20 cenários aponta para um desempenho superior da política *ML* em relação às demais. Os resultados são sustentados pela grande elevação dos custos de estocagem do cliente na política *OU*, justamente pelo incremento no número de pontos de demanda. Ainda que a política *LE* não tenha superado as demais, sua performance foi 2%

mais custosa em termos médios que a política *ML*, com custo de transporte 19% menor e custo de estocagem do cliente 1% menor que esta política. Destaca-se a estabilidade do tempo de processamento para todos os cenários avaliados, que não ultrapassou 100 segundos para a execução de todas as iterações. Novamente observa-se que a política *LE* foi superior para as instâncias de maior porte (200 clientes) ao passo que a política *ML* produziu melhores resultados para instâncias de menor porte no bloco (75, 100 e 125 clientes). A tabela 6 apresenta os resultados para os parâmetros de desempenho.

Tabela 6- Parâmetros de Desempenho para Cenários Grandes

Instância	C	K	T	MAXIMUM LEVEL			ORDER-UP-TO LEVEL			LOTE ECONOMICO		
				TxOV	TxEC	TxED	TxOV	TxEC	TxED	TxOV	TxEC	TxED
C75-T5-K2	75	2	5	24%	16%	66%	30%	51%	58%	26%	39%	61%
C75-T5-K3	75	3	5	18%	22%	75%	27%	50%	57%	27%	41%	62%
C75-T10-K2	75	2	10	26%	24%	64%	35%	61%	55%	32%	47%	59%
C75-T10-K3	75	3	10	23%	22%	78%	38%	51%	64%	26%	41%	67%
C100-T5-K2	100	2	5	27%	17%	69%	29%	52%	60%	21%	38%	70%
C100-T5-K3	100	3	5	24%	28%	76%	28%	58%	63%	24%	49%	69%
C100-T10-K3	100	3	10	27%	16%	64%	31%	52%	53%	27%	38%	59%
C100-T10-K2	100	2	10	26%	28%	73%	33%	58%	62%	28%	51%	61%
C125-T5-K2	125	2	5	24%	16%	66%	24%	50%	65%	17%	39%	74%
C125-T5-K3	125	3	5	20%	23%	78%	22%	48%	68%	17%	42%	76%
C125-T10-K2	125	2	10	27%	25%	69%	32%	61%	61%	27%	47%	65%
C125-T10-K3	125	3	10	23%	27%	75%	30%	58%	64%	28%	50%	64%
C150-T5-K2	150	2	5	25%	17%	60%	21%	50%	63%	15%	39%	74%
C150-T5-K3	150	3	5	20%	23%	79%	20%	48%	73%	15%	42%	80%
C150-T10-K2	150	2	10	27%	16%	60%	29%	51%	49%	22%	39%	61%
C150-T10-K3	150	3	10	23%	29%	74%	31%	59%	62%	24%	50%	68%
C200-T5-K2	200	2	5	25%	24%	65%	16%	60%	76%	12%	48%	82%
C200-T5-K3	200	3	5	20%	23%	77%	14%	48%	79%	12%	43%	82%
C200-T10-K2	200	2	10	25%	24%	66%	24%	61%	65%	17%	48%	75%
C200-T10-K3	200	3	10	23%	28%	73%	23%	57%	67%	19%	50%	74%
Média				24%	22%	70%	27%	54%	63%	22%	44%	69%

Conforme observado, os parâmetros de desempenho apresentam certa deterioração com o incremento dos cenários analisados. Sugere-se portanto uma revisão no cálculo da capacidade de estocagem e de carregamento dos veículos de forma a se otimizar o uso da frota.

Como última análise, a tabela 7 apresenta os dados consolidados para os três blocos de cenários anteriormente discutidos. Em virtude do desempenho intermediário da política *LE* frente à *ML* e *OU*, o resultado agregado aponta para um custo médio inferior da primeira em relação às últimas.

Tabela 7- Resultado Síntese

	MAXIMUM LEVEL					ORDER-UP-TO LEVEL					LOTE ECONÔMICO				
	CTr	CEstF	CEstC	CT	t	CTr	CEstF	CEstC	CT	t	CTr	CEstF	CEstC	CT	t
Cenários Pequenos (Média)	14997	1404	1733	18135	6.12	9668	1230	4426	15323	14.54	11767	1299	3285	16352	6.42
Cenários Médios (Média)	26458	4012	4234	34704	24.31	18143	3496	12027	33667	12.87	21209	3704	8847	33760	18.43
Cenários Grandes (Média)	32988	8758	13773	55519	35.18	25000	7963	29454	62417	11.32	26601	8702	21227	56530	11.27
Média Global	24814	4725	6580	36119	21.87	17604	4230	15302	37136	12.91	19859	4568	11120	35547	12.04
GAP Global	25%	3%	-41%	2%	169,4%	-11%	-7%	38%	4%	7%					

Conforme previsto, a política de distribuição por lote econômico alcançou o equilíbrio entre o custo de transporte e o custo de estocagem. Em negrito, estão os menores valores médios para as variáveis das colunas. Verifica-se que a política de *Maximum Level* obteve os menores custos de armazenagem para os três blocos de cenários. Entretanto a política *Order-*

up-to Level teve melhor desempenho nos custos de armazenagem do depósito e nos custos de transporte. Ainda que a política *LE* não tenha sido superior em nenhum dos três parâmetros, seu desempenho médio global superou *ML* e *OU*. Nota-se também que o tempo médio de resolução foi ligeiramente menor na política *LE* em relação às demais.

5. CONCLUSÕES

O presente estudo abordou o Problema de Roteirização e Estoques com Múltiplos Veículos a partir da óptica da logística de distribuição baseada em sistemas de estoques gerenciados pelo fornecedor. A heurística proposta foi eficiente na resolução do conjunto de cenários testados em um tempo computacional bastante reduzido, não ultrapassando 100 segundos para as instâncias maiores. Com relação aos resultados, conseguiu-se demonstrar que o equilíbrio almejado pela política de distribuição *LE* foi alcançado, pois seu desempenho foi superior para a análise sintética do conjunto de cenários. Os experimentos computacionais apontaram ainda um endereçamento da política *Maximum Level* em problemas intermediários, onde o número de clientes situa-se entre 20 e 50, enquanto que a política *Order-up-to Level* acaba sendo mais eficiente para situações em que o número de clientes é menor (entre 5 e 15). A política de Lote Econômico apresentou-se bastante promissora para problemas de grande porte, quando a quantidade de pontos de demanda a serem atendidos ficam entre 100 e 200. Os parâmetros de desempenho propostos indicam uma deterioração das taxas de ocupação do veículo na medida em que o número de clientes aumenta. De forma geral, a política *LE* situou-se em uma posição intermediária entre *ML* e *OU*, tanto em relação às taxas de ocupação do veículo, quanto às taxas de estocagem (cliente e fornecedor).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADULYASAK, Y.; CORDEAU, JEAN-FRANCOIS. Formulations and Branch-and-Cut Algorithms for Multi-Vehicle Production and Inventory Routing Problems. ,2012. Technical Report - Centre Interuniversitaire de Recherche sur les Réseaux d'Entreprise, la Logistique et le Transport - Montreal.
- ARCHETTI, C.; BERTAZZI, L.; HERTZ, A.; SPERANZA, M. G. A Hybrid Heuristic for an Inventory Routing Problem. **INFORMS Journal on Computing**, v. 24, n. 1, p. 101-116, 2011.
- ARCHETTI, C.; BERTAZZI, L.; LAPORTE, G.; SPERANZA, M. G. A Branch-and-Cut Algorithm for a Vendor-Managed Inventory-Routing Problem. **Transportation Science**, v. 41, n. 3, p. 382-391, 2007.
- BELL, W. J.; DALBERTO, L. M.; FISHER, M. L. et al. Improving the distribution of industrial gases with an on-line computerized routing and scheduling optimizer. **Interfaces**, v. 13, n. December, p. 4-23, 1983.
- BERTAZZI, LUCA; PALETTA, G.; SPERANZA, M. GRAZIA. Deterministic Order-Up-To Level Policies in an Inventory Routing Problem. **Transportation Science**, v. 36, n. 1, p. 119-132, 2002.
- BIRGER, R.; EL-HOUSSAINE, A. Designing distribution patterns for long-term inventory routing with constant demand rates. **International Journal of Production Economics**, v. 112, n. 1, p. 255-263, 2008.
- CAMPBELL, A.; CLARKE, L.; KLEYWEGT, A. J.; SAVELSBERGH, M. The Inventory Routing Problem. In: T. G. Crainic; Gilbert Laporte (Eds.); **Fleet Management and Logistics**. p.95-113, 1998.
- CAMPBELL, A. M.; SAVELSBERGH, M. W. P. A Decomposition Approach for the Inventory-Routing Problem. **Transportation Science**, v. 38, n. 4, p. 488-502, 2004.
- COELHO, LEANDRO C.; CORDEAU, JEAN-FRANÇOIS; LAPORTE, GILBERT. Consistency in multi-vehicle inventory-routing. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 24, p. 270-287, 2012a.

COELHO, LEANDRO C.; CORDEAU, JEAN-FRANÇOIS; LAPORTE, GILBERT. The inventory-routing problem with transshipment. **Computers & Operations Research**, v. 39, n. 11, p. 2537-2548, 2012b.

COELHO, LEANDRO CALLEGARI; LAPORTE, GILBERT. The Exact Solution of Several Classes of Inventory-Routing Problems. ,2012c. Technical Report - CIRRELT 2012-22 - Centre Interuniversitaire de Recherche sur les Réseaux d'Entreprise, la Logistique et le Transport - Montreal.

COELHO, LEANDRO CALLEGARI; LAPORTE, GILBERT; CORDEAU, J. Dynamic and Stochastic Inventory-Routing. ,2012d. Technical Report CIRRELT - 2012-37 - Centre Interuniversitaire de Recherche sur les Réseaux d'Entreprise, la Logistique et le Transport - Montreal.

KLEYWEGT, A. J.; NORI, V. S.; SAVELSBERGH, M. W. P. The stochastic inventory routing problem with direct deliveries. **Transportation Science**, v. 36, p. 94-118, 2002.

LIU, S.-C.; LEE, W.-T. A heuristic method for the inventory routing problem with time windows. **Expert Systems with Applications**, v. 38, n. 10, p. 13223-13231, 2011. Elsevier Ltd.

SINDHUCHAO, S.; ROMEIJN, H. E.; AKÇALI, E.; BOONDISKULCHOK, R. An Integrated Inventory-Routing System for Multi-item Joint Replenishment with Limited Vehicle Capacity. **Journal of Global Optimization**, v. 32, n. 1, p. 93-118, 2005.

STEINER, M. T. A.; SILVA, L. V. DA; COSTA, D. B. DA; CARNIERI, C.; SILVA, A. C. L. DA. O Problema do Roteamento no Transporte Escolar. **Pesquisa Operacional**, v. 20, n. 1, p. 83-99, 2000.