

Marcos Medeiros Raimundo

UMA EXTENSÃO PARA O PROBLEMA DE ROTEAMENTO E
ESTOQUE

Campinas
2014

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Marcos Medeiros Raimundo

UMA EXTENSÃO PARA O PROBLEMA DE ROTEAMENTO E ESTOQUE

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Engenharia de Computação.

Orientador: Fernando José Von Zuben

Este exemplar corresponde à versão final da dissertação de mestrado do aluno Marcos Medeiros Raimundo, orientada pelo Prof. Dr. Fernando José Von Zuben

Campinas
2014

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

R133e Raimundo, Marcos Medeiros, 1988-
Uma extensão para o problema de roteamento e estoque / Marcos Medeiros
Raimundo. – Campinas, SP : [s.n.], 2014.

Orientador: Fernando José Von Zuben.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de
Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Controle de estoque. 2. Problema de roteamento de veículos. 3. Otimização
combinatória. 4. Cadeia de suprimentos. I. Von Zuben, Fernando José, 1968-. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: An extension to the inventory routing problem

Palavras-chave em inglês:

Inventory control

Vehicle routing problem

Combinatorial optimization

Supply chain

Área de concentração: Engenharia de Computação

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora:

Fernando José Von Zuben [Orientador]

Fábio Luiz Usberti

Paulo Augusto Valente Ferreira

Data de defesa: 22-08-2014

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidato: Marcos Medeiros Raimundo

Data da Defesa: 22 de agosto de 2014

Título da Tese: "Uma Extensão para o Problema de Roteamento e Estoque"

Prof. Dr. Fernando José Von Zuben (Presidente): Fernando José Von Zuben

Prof. Dr. Fábio Luiz Usberti: Fábio Luiz Usberti

Prof. Dr. Paulo Augusto Valente Ferreira: Paulo Augusto Valente Ferreira

Resumo

O gerenciamento de cadeias de suprimento no mundo corporativo é de grande relevância prática e uma de suas versões é conhecida como problema de roteamento e estoque. Este trabalho propõe uma formulação linear-inteira genérica e flexível para este problema de otimização, assim como uma metodologia de solução. Nesta nova formulação proposta, algumas peculiaridades da rede de suprimentos podem ser especificadas como parâmetros de entrada, permitindo assim que o usuário seja capaz de realizar modificações na estrutura, na hierarquia e no elenco de restrições da cadeia de suprimentos, sem precisar refazer a formulação matemática associada. Com isso, é possível resolver uma grande diversidade de configurações do problema, sem a necessidade de adaptações junto à metodologia de solução. A natureza genérica e flexível da formulação linear-inteira se deve às seguintes propriedades, todas elas passíveis de serem definidas como parâmetros de entrada: (1) Todo nó da rede pode produzir ou consumir produtos; (2) Todo nó da rede pode enviar e receber produtos; (3) Decorrente das propriedades (1) e (2), a hierarquia de entrega fica generalizada, com o produto podendo passar por vários nós antes de ser consumido; (4) Restrições presentes na formulação garantem consistência, por exemplo, entre quantidade de produto entregue pelos fornecedores e recebida pelos consumidores; (5) Restrições presentes na formulação estão associadas a especificações que podem ser ativadas, como intervalo de tempo entre entregas. Os resultados experimentais contemplam soluções para múltiplas configurações do problema, todas representáveis pela formulação proposta e, portanto, todas resolvidas pela mesma metodologia de solução. Essas múltiplas configurações trabalhadas nos experimentos evidenciam os benefícios do emprego de uma formulação estendida para o problema de roteamento e estoque. Além disso, visando comparação com propostas alternativas disponíveis na literatura, tomou-se uma configuração específica e bem-estabelecida do problema, para a qual existe uma formulação própria e uma metodologia de solução dedicada. Neste experimento comparativo, chegou-se às mesmas soluções quando a parametrização é idêntica e, nas parametrizações mais flexíveis, a soluções de melhor qualidade.

Palavras-chave: Controle de estoque. Problema de roteamento de veículos. Otimização Combinatória. Cadeia de Suprimentos.

Abstract

Managing supply chains in the corporate world is of great practical relevance and one of its versions is named inventory routing problem. This work proposes a more generic and flexible linear-integer formulation for this optimization problem, together with a solution methodology. In the novel formulation proposed here, some peculiarities of the supply network can be specified as input parameters, thus allowing the user to make modifications to the structure, the hierarchy and the set of constraints in the supply chain, without having to rebuild the associated mathematical formulation. Therefore, it is possible to solve a wide variety of configurations of the problem without the need for adjustments in the solution methodology. The generic and flexible nature of the linear-integer formulation is due to the following properties, all of them being definable as input parameters: (1) Every node of the network can produce or consume products; (2) Every node of the network can send and receive products; (3) Due to properties (1) and (2), the hierarchy of delivery is generalized, with the product being able to pass through several nodes before being consumed; (4) Some restrictions of the formulation ensure consistency, for example, between the amount of product delivered by the suppliers and received by the consumers; (5) Some restrictions of the formulation are associated with specifications that can be activated, as the time interval between deliveries. The experimental results include solutions for multiple configurations of the problem, all representable by the proposed formulation and, as a consequence, all able to be solved by the same solution methodology. Those multiple configurations considered in the experiments highlight the benefits of employing an extended formulation for the inventory routing problem. Aiming at comparing to alternative proposals available in the literature, it was considered a specific and well-established configuration of the problem, for which there are a proper formulation and a dedicated solution methodology. In this comparative experiment, we came to the same solutions for identical parametrizations and, for more flexible parameterizations, even better solutions were obtained.

Key-words: Inventory control. Vehicle routing problem. Combinatorial optimization. Supply chain.

Sumário

1	Introdução Geral	1
	Introdução Geral	1
1.1	Organização do Trabalho	2
2	O Problema de Roteamento e Estoque	3
3	Estoque Controlado pelo Fornecedor	8
3.1	Cadeia de Suprimentos Tradicional	8
3.2	O problema VMI	9
3.3	Classificação	10
3.4	Pesquisas Relacionadas	13
4	Conceitos vinculados ao problema de roteamento e estoque	14
4.1	Introdução	14
4.2	Classificação	14
4.3	Pesquisas Relacionadas	18
4.3.1	Dois Níveis de Agentes	18
4.3.2	Múltiplos Níveis	20
4.4	Considerações finais do capítulo	20
5	O Problema de Roteamento e Estoque Estendido	21
6	Experimentos	33
6.1	Formulação do Experimento	33
6.2	Resultados Obtidos	35
6.2.1	Experimento 1	35
6.2.2	Experimento 2	35
6.2.3	Experimento 3	37
6.2.4	Experimento 4	40
6.3	Análise dos Resultados Obtidos	41
6.3.1	Experimento 1	41

6.3.2	Experimento 2	41
6.3.3	Experimento 3	42
6.3.4	Experimento 4	42
7	Conclusões e Perspectivas Futuras	43
	Bibliografia	45
A	Branch-and-bound e inserção de restrições	48

A LUIZ, ELZA, MARINA, ANDRÉ E
CECÍLIA.

Agradecimentos

Agradeço,

aos meus pais e irmãos que deram amor, suporte e motivação ao longo de toda a minha vida e carreira. Esse trabalho é, acima de tudo, deles.

ao Prof. Fernando, pelos quase 3 anos de orientação, sendo compreensivo nos momentos de dificuldade e me oferecendo suporte tanto acadêmico quanto motivacional e pessoal, sendo fundamental para a proposição deste trabalho.

aos colegas de trabalho do LBiC, que me ajudaram a entender o que é pesquisa e o papel do pesquisador sem a necessidade de sisudez.

aos professores Christiano e Romis, que me inspiram a ser melhor, como pesquisador e principalmente como pessoa.

aos professores da FEEC e IC: Takaaki, Paulo Valente, Lee e Ivan Ricarte, pelos ótimos cursos oferecidos.

aos membros da banca examinadora, pelos comentários, sugestões e contribuições, que ajudaram a melhorar a qualidade e a redação final do manuscrito.

à agência CAPES, pelo apoio financeiro concedido durante todo o período de mestrado e pelo portal de periódicos eletrônicos, que permite o acesso rápido e eficiente ao conhecimento científico.

à FEEC/UNICAMP, pela ótima estrutura que oferece aos estudantes e pesquisadores.

a todos que, de alguma forma, contribuíram para o meu progresso como aluno e como pessoa.

Lista de Figuras

3.1	Fluxo de produtos e informações em uma cadeia de suprimentos tradicional (Disney & Towill, 2003)	9
3.2	Comportamento dos pedidos de produtos em efeito chicote	9
3.3	Fluxo de produtos e informações na cadeia VMI (Disney & Towill, 2003)	10
4.1	Ilustração das possíveis topologias da cadeia	17
5.1	Representação de uma cadeia de suprimento e rotas de entrega para três períodos do horizonte de planejamento	22

Lista de Tabelas

6.1	Características das instâncias executadas no experimento, tomados como parâmetros de entrada na formulação EIRP	35
6.2	Comparação de performance em relação ao custo no Experimento 2	36
6.3	Comparação de performance em relação ao tempo de execução no Experimento 2	36
6.4	Comparação de performance em relação ao custo no Experimento 2, considerando somente execuções com valor ótimo	37
6.5	Comparação de performance em relação ao tempo de execução no Experimento 2, considerando somente execuções com valor ótimo	37
6.6	Resultados das as instâncias para o custo de estoque e transporte, tempo de execução e gap (Parte 1).	38
6.7	Resultados das as instâncias para o custo de estoque e transporte, tempo de execução e gap (Parte 2).	39
6.8	Desempenho variando parâmetros de consistência de entrega no Experimento 3	40
6.9	Tempo em segundos variando parâmetros de consistência de entrega no Experimento 3	40
6.10	Desempenho variando parâmetros de janela de entrega no Experimento 4	41
6.11	Tempo em segundos variando parâmetros de janela de entrega no Experimento 4	41

Introdução Geral

De pequenas a grandes organizações e corporações, todas enfrentam níveis crescentes de competição global, aumento de demanda e número de consumidores, encurtamento dos ciclos de vida de produtos e queda do tempo de resposta (Singh, 2013). Visando ganhos de produtividade e de margem de lucro, companhias buscam melhorar o controle de sua cadeia de suprimentos, reduzindo custos operacionais e eliminando processos ineficientes (Moin & Salhi, 2006). Neste sentido, o mundo corporativo apresenta exemplos de iniciativas que foram tomadas, como a fusão da Nabisco com a Kraftfood INC, que apresentavam cadeias de suprimentos com etapas redundantes (Moin & Salhi, 2006). Outro exemplo é o das empresas WalMart e Proctor & Gamble, pioneiras em estratégias de estoque controlado pelo fornecedor (VMI, do inglês *vendor-managed inventory*), seguido por muitas companhias: GlaxoSmithKline, Electrolux Italia, Nestlé, Tesco, Boeing e Alcoa (Singh, 2013), (Moin & Salhi, 2006).

O estoque controlado pelo fornecedor visa centralizar as decisões de entrega de produtos no fornecedor, se utilizando principalmente do compartilhamento de informação de todos os agentes da cadeia de suprimentos (Govindan, 2013). A partir desse conhecimento, é possível criar estratégias para reduzir custos operacionais. Nesse sentido, realizou-se a proposição do problema de roteamento e estoque (IRP, do inglês *Inventory Routing Problem*), que consiste em: o fornecedor, tendo acesso à demanda de consumo e ao estoque atual do cliente (que vende para o consumidor final), controla quanto e quando entregar produtos aos clientes através dos transportadores (caminhões, carros) (Campbell, 2002).

Alguns estudos foram feitos visando formular o IRP. Em geral, a cadeia é formulada considerando dois tipos de agentes, fornecedores e clientes, geralmente um fornecedor e vários clientes (Archetti et al., 2007), (Coelho et al., 2012b), podendo haver uma garagem para os transportadores após as entregas (Moin et al., 2011). Em outras formulações, são considerados múltiplos armazéns (Bard & Huang, 1998), (Shuai et al., 2011) e até mesmo entrega entre clientes (Coelho et al., 2012a). Em todas as formulações, é considerado somente um produto e demanda determinística. A dificuldade desses trabalhos consiste na falta de generalidade do modelo, dificultando a sua aplicação a casos reais devido à grande heterogeneidade nas cadeias de produção. Esta heterogeneidade é abordada no trabalho de Andersson et al. (2010).

Visando superar as dificuldades citadas, são modeladas algumas características contidas somente neste trabalho de mestrado: (1) generalidade do nó: nesta formulação, produtor, cliente,

armazém e garagem não são definidos a priori, podendo ser modificados através de parâmetros de entrada; (2) refluxo de produtos: o fluxo de produtos não tem direção a priori (produtor \rightarrow cliente, por exemplo), podendo ser alterado através de parâmetros de entrada. Além dessas, foram adicionadas algumas características comuns em outros trabalhos: (3) tamanho da frota variável: definido pela entrada; (4) restrições de consistência (Coelho et al., 2012b): (4.1) quantidade mínima de estoque antes da entrega de produtos, (4.2) quantidade máxima de estoque após a entrega de produtos, (4.3) quantidade máxima no transportador antes do recebimento de produtos, (4.4) quantidade mínima no transportador após o recebimento de produtos, (4.5) janela de tempo mínima para entrega, (4.6) janela de tempo máxima para entrega, (4.7) restrições de preenchimento de estoque (Archetti et al., 2007).

Para mostrar essas características da formulação através de experimentos, foi implementada uma modelagem linear-inteira do problema, sendo que a técnica de solução aplicada foi através da biblioteca Gurobi (disponível em <http://www.gurobi.com>) de otimização linear-inteira para Linguagem Python (<https://www.python.org/>). Na biblioteca Gurobi, a técnica base de resolução é o algoritmo branch-and-bound proposto por Land & Doig (1960). A metodologia de solução se baseia em execuções seguidas de relaxação linear do problema linear-inteiro, conforme descrito no Apêndice A.

O objetivo principal deste trabalho de mestrado é permitir que o usuário seja capaz de alterar a estrutura da rede sem a necessidade de modificar a formulação matemática do problema. Com essa iniciativa, é possível avaliar o impacto de modificações na estrutura hierárquica da rede (possibilitando entregas partindo de clientes, garagens em nós distintos, dentre outras modificações), assim como analisar o impacto de restringir características de entrega, retirada e janela de tempo para entrega.

1.1 Organização do Trabalho

Os capítulos deste trabalho estão organizados da seguinte forma, sendo que a principal contribuição encontra-se no Capítulo 5. No **Capítulo 2**, é apresentada uma formulação simplificada do problema de roteamento e estoque. Essa apresentação inicial procura introduzir aspectos básicos do problema, visando compreender melhor os conceitos subsequentes. No **Capítulo 3**, é feita uma contextualização da cadeia de suprimentos, partindo da organização tradicional. Em seguida, são mostrados os conceitos de estoque controlado pelo fornecedor e, por fim, uma visão geral dos conceitos e formas de aplicação dessa técnica. No **Capítulo 4**, é apresentada uma visão geral do problema de roteamento e estoque, visando mostrar a heterogeneidade de formulações do problema. Na última seção desse capítulo, é feita a revisão bibliográfica deste trabalho. No **Capítulo 5**, é apresentado o problema de roteamento e estoque, com a formulação estendida e explicando cada componente e restrição do problema. No **Capítulo 6**, são apresentados os experimentos relacionados a este trabalho, incluindo uma análise dos resultados. E, por fim, no **Capítulo 7**, são apresentadas as considerações finais e perspectivas futuras da pesquisa. O Apêndice A descreve brevemente o algoritmo branch-and-bound empregado na resolução do problema linear-inteiro.

O Problema de Roteamento e Estoque

Quando uma unidade de venda deve ser abastecida?

Qual a quantidade de produto a ser entregue?

Como definir a rota de entrega, supondo múltiplas unidades a serem abastecidas?

Estas são as perguntas que abrem a discussão sobre o problema de roteamento e estoque (IRP, do inglês inventory routing problem) em Campbell (2002). Antes de abordar o escopo deste trabalho de mestrado, onde estes questionamentos são investigados buscando resolver formulações mais genéricas do problema de roteamento e estoque, será apresentada uma formulação simplificada e modificada de Archetti et al. (2007), com a finalidade de introduzir o problema e facilitar a compreensão de conceitos nos capítulos seguintes.

Segue uma introdução formal ao IRP. O problema é definido como um grafo $\mathcal{H} = (\mathcal{N}, \mathcal{A})$, onde $\mathcal{N} = \{0, 1, 2, \dots, N\}$ é o conjunto de nós do problema, e $\mathcal{A} = \{(i, j) : i, j \in \mathcal{N}\}$ é o conjunto de arcos. O nó 0 representa a entidade que cria/manufatura produtos. Esta entidade é chamada de produtor. Os nós de 1 a N representam entidades que consomem produtos. Estas entidades são chamadas de clientes (que vendem para o consumidor final). O transportador é responsável por levar os itens do produtor para os clientes, a cada período em um horizonte de planejamento $t \in \mathcal{T}$. Este transportador tem uma capacidade máxima de carga de itens de \bar{L} .

Na formulação matemática que segue, são apresentadas com mais clareza algumas características deste problema. A seguir, são definidos os índices das variáveis e parâmetros, assim como as variáveis e os parâmetros do problema:

- **Índices** - Índices específicos do problema.
 - $k, i, j \in \mathcal{N} = \{0, 1, 2, \dots, N\}$: **Índices de nós (clientes - produtores).**
 - $t \in \mathcal{T} = \{1, 2, \dots, H\}$: **Período do horizonte de planejamento.**
- **Variáveis:** São as variáveis de decisão e auxiliares usadas no problema.
 - $I_{k,t} \in \mathbb{R}^+ : k \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}$: **Nível do estoque no nó k no período t .**
 - $r_{k,t} \in \mathbb{R}^+, k \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}$: **Quantidade recebida pelo cliente k no período t .**
 - $s_{k,t} \in \mathbb{R}^+, k \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}$: **Quantidade enviada pelo fornecedor k no período t .**

- $y_{k,t} \in \{0, 1\}, k \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}$: Define se um nó k é visitado no período t do horizonte de planejamento.
- $x_{i,j}^t \in \{0, 1, 2\}, i \in \mathcal{N}, j \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}$: Define se existe uma transição entre dois nós distintos i e j no período t do horizonte de planejamento.

• **Parâmetros do problema.**

- $p_{k,t} \in \mathbb{R}, k \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}$: Quantidade produzida no nó k no período t .
- $d_{k,t} \in \mathbb{R}, k \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}$: Quantidade consumida no nó k no período t .
- $\bar{I}_k \in \mathbb{R}, k \in \mathcal{N}$: Nível máximo de estoque no nó k .
- $\underline{I}_k \in \mathbb{R}, k \in \mathcal{N}$: Nível mínimo de estoque no nó k .
- $c_{i,j} \in \mathbb{R} : i \in \mathcal{N}, j \in \mathcal{N}$: Custo de transição entre os nós i e j .
- $c_k \in \mathbb{R} : k \in \mathcal{N}$: Custo de armazenamento por unidade estocada no nó k .
- $\bar{L} \in \mathbb{R}$: Capacidade do veículo

A função-objetivo consiste em minimizar a soma do custo de estoque (primeiro termo) e do custo de transporte (segundo termo), ou seja, neste problema, o intuito é reduzir os custos operacionais de entrega e armazenamento:

$$\min \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{k \in \mathcal{N}} c_k I_{k,t} + \sum_{i \in \mathcal{N}} \sum_{j \in \mathcal{N}, i < j} \sum_{t \in \mathcal{T}} c_{i,j} x_{i,j}^t. \quad (2.1)$$

A seguir, são listadas as restrições do problema, garantindo que a solução contenha características desejadas pelo projetista, ou descarte eventos impossíveis de ocorrer:

1. **Definição do nível de estoque:** Dado um nó k , o nível de estoque em um período t é dado pela quantidade de estoque somada à quantidade produzida de itens e entregas feitas, subtraída da quantidade consumida e entregas feitas, todas referentes ao período anterior.

$$I_{k,t} = I_{k,t-1} + (p_{k,t-1} + r_{k,t-1}) - (d_{k,t-1} + s_{k,t-1}), k \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}. \quad (2.2)$$

Em Archetti et al. (2007), só há um produtor e, considerando que seu índice é 0, pode-se chegar às seguintes equações:

$$p_{k,t} = 0, k \neq 0; r_{k,t} = 0, k = 0; d_{k,t} = 0, k = 0; s_{k,t} = 0, k \neq 0. \quad (2.3)$$

Considera-se que o nível inicial $I_{k,t}, t = 0$, é fornecido como condição inicial do problema.

2. **Restrição de Preservação de Fluxo:** A quantidade de produto enviada pelo produtor deve ser igual à soma de produto recebida pelos clientes.

$$s_{0,t} = \sum_{k=1}^N r_{k,t}, t \in \mathcal{T}. \quad (2.4)$$

3. **Restrição de falta de estoque:** A quantidade de produto entregue, subtraída da quantidade consumida, deve atender as restrições de nível máximo e mínimo de estoque:

$$I_{k,t} \geq \underline{I}_k, k \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}; \quad (2.5)$$

$$I_{k,t} \leq \bar{I}_k, k \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}. \quad (2.6)$$

4. **Restrição de capacidade do veículo:** A quantidade entregue pelo fornecedor deve ser inferior à capacidade do veículo:

$$s_{0,t} \leq \bar{L}, t \in \mathcal{T}. \quad (2.7)$$

5. **Restrições de Roteamento:** Estas restrições impedem que a rota do veículo seja inconsistente, ou seja, faz com que em uma única rota ele visite todos os clientes que devem ser abastecidos, voltando ao fornecedor.

O fornecedor deve ser visitado se existe uma entrega naquele período t :

$$s_{0,t} \leq \bar{L}y_{0,t}, t \in \mathcal{T}; \quad (2.8)$$

$$y_{0,t} < 1 + s_{0,t}, t \in \mathcal{T}. \quad (2.9)$$

O cliente deve ser visitado se existe uma entrega naquele período t :

$$r_{k,t} \leq \bar{L}y_{k,t}, k \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}; \quad (2.10)$$

$$y_{k,t} < 1 + s_{k,t}, k \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}. \quad (2.11)$$

Toda rota que entra em um consumidor i deve ter uma saída deste mesmo consumidor:

$$\sum_{i \in \mathcal{N}, i < j} x_{i,j}^t + \sum_{i \in \mathcal{N}, i > j} x_{i,j}^t = 2y_{k,j}, i \in \mathcal{N}, j \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}. \quad (2.12)$$

6. **Restrição de eliminação de subrota:** Esta restrição impede que a solução tenha ciclos disjuntos. O conjunto \mathcal{L} é um subconjunto dos nós atendidos que pode gerar uma subrota, ou seja, todas as combinações de (2 a 2) até $(\sum_{k \in \mathcal{N}} y_{k,t} - 1$ a $\sum_{k \in \mathcal{N}} y_{k,t} - 1)$ nós dos $(\sum_{k \in \mathcal{N}} y_{k,t})$ nós atendidos em um certo período t podem criar uma subrota indesejável.

Para não ser necessário incluir a restrição para todas as subrotas possíveis, a restrição a seguir é incluída em cada ramo do algoritmo branch-and-bound, quando é encontrado um resultado inteiro e este apresenta uma subrota cujo número de nós é menor que o número de clientes visitados naquele período de planejamento. Entretanto, não se deseja que essa subrota seja eliminada em ramos do branch-and-bound cujo número de clientes atendidos seja menor ou igual ao número de clientes da subrota para aquele planejamento. Para isso, a restrição só é ativada graças ao segundo termo do lado direito da inequação, quando o

número de nós visitados naquele período de planejamento é superior ao número de nós da subrota.

$$\sum_{j \in \mathcal{L}} \sum_{i \in \mathcal{L}, i < j} x_{i,j}^t \leq \sum_{j \in \mathcal{L}} y_{j,t} + \frac{|\mathcal{L}| - \sum_{j=1}^N y_{j,t}}{N}, \forall \mathcal{L} \subset \mathcal{N}, \forall t \in \mathcal{T}. \quad (2.13)$$

No Apêndice A, será explicado como o algoritmo branch-and-bound é aplicado para resolver o problema.

7. **Restrições de não-negatividade:** As quantidades de produtos enviados ou recebidos não podem ser negativas.

$$s_{k,t}, r_{k,t} \geq 0, k \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}. \quad (2.14)$$

A partir dessa formulação, são definidos quais clientes o veículo irá atender a cada período t (que equivale a um intervalo de tempo suficiente para a execução de uma rota completa qualquer) e qual a quantidade entregue de modo a atender as restrições impostas e, ao mesmo tempo, minimizar a quantidade de itens no inventário (custo de estoque). Também é levado em conta qual a melhor sequência de clientes de forma a minimizar o custo da rota, ou seja, o problema do caixeiro viajante é um subproblema do IRP. Logo, o IRP consiste em um problema de interesse prático fruto da composição de múltiplos problemas de otimização intrinsecamente difíceis.

Para melhor identificar quais problemas estão embutidos, segue uma lista de problemas já contextualizados no problema IRP:

- **Gerenciamento de estoque:** Consiste em verificar periodicamente o estoque e repor produtos, de forma que a saída gradual de produtos nunca esvazie o estoque.
- **Escalonamento de recursos:** Consiste em alocar recursos finitos a clientes, de forma que todo cliente seja satisfeito antes de um certo prazo estipulado previamente. No contexto de IRP, consiste em dizer em qual dia um veículo irá entregar a quantidade demandada pelo Gerenciamento de Estoque, evitando que a demanda supere a quantidade estocada.
- **Problema da mochila:** Dada uma restrição de espaço e itens de diversos tamanhos com valores distintos, o objetivo é preencher a mochila de forma a maximizar o valor dos itens dentro dela. No contexto de IRP, não é necessário maximizar o valor, apenas alocar itens de diferentes dimensões em um veículo sem exceder a sua capacidade.
- **Problema do caixeiro viajante:** Consiste em, dado um número de cidades e distância entre elas, visitar todas as cidades com distância total mínima. No caso IRP: dados os clientes que serão atendidos por um certo veículo em um certo período t do planejamento, visitar todos os clientes a custo mínimo.
- **Problema de roteamento de veículos:** Dado um número de clientes que devem ser atendidos em um certo período t do planejamento, alocar múltiplos veículos de forma que todos os clientes sejam visitados a custo mínimo. Este problema engloba o problema do caixeiro viajante.

Estes problemas podem ser estudados de forma separada para que se tenha um melhor desempenho de solução, recorrendo a técnicas já bastante estudadas na literatura para esses problemas. Por exemplo, em Campbell (2002), a solução proposta é uma decomposição em alocação de entregas a cada período t e, em seguida, resolve-se um problema de roteamento de veículos. Além disso, a compreensão desses problemas ajuda no entendimento de formulações completas do problema de roteamento e estoque.

Estoque Controlado pelo Fornecedor

Para se chegar a uma melhor compreensão do problema de roteamento e estoque, é necessário entender o contexto em que ele está inserido. A Seção 3.1 tem a função de realizar uma descrição do funcionamento da cadeia de suprimentos tradicional, enquanto que as seções seguintes discutem de forma mais aprofundada a cadeia de suprimentos com o estoque controlado pelo fornecedor.

A Seção 3.2 apresenta o conceito de estoque controlado pelo fornecedor. A Seção 3.3 apresenta uma classificação do estoque controlado pelo fornecedor (VMI, do inglês *vendor-managed inventory*) mostrando vários aspectos de aplicação desta forma de organização da cadeia de suprimentos fornecendo um arcabouço de informações que motivaram e auxiliaram a formulação estendida proposta neste trabalho. Por fim, a Seção 3.4 apresenta trabalhos adicionais encontrados na literatura visando a contextualização da pesquisa.

3.1 Cadeia de Suprimentos Tradicional

Numa cadeia de suprimentos tradicional, cada entidade da cadeia é responsável por controlar seu próprio estoque e por manter reservas para abastecer os consumidores dele dependentes, mantendo robustez às variações de demanda (Disney & Towill, 2003).

A Figura 3.1 explicita a limitação de cada agente da cadeia de suprimentos, pois este possui apenas a informação dos agentes no nível imediatamente inferior na cadeia. Sendo assim, agentes com alta hierarquia, como o produtor, não têm o conhecimento exato da demanda do consumidor final (Disney & Towill, 2003).

Devido a essa limitação de acesso à informação, há uma dificuldade de otimizar o planejamento de produção e entrega. Além disso, o sistema fica sujeito a flutuações desnecessárias na produção e na quantidade de estoque armazenado. Devido ao atraso na propagação da informação, variações positivas na demanda podem ser sentidas como uma tendência, fazendo com que cada ente da cadeia de suprimentos mantenha um estoque maior que o necessário, causando o efeito chicote.

Efeito chicote é um termo que se refere ao cenário em que os pedidos para o fornecedor tendem a ser maiores que a flutuação de vendas. Este efeito se repete por toda a cadeia, amplificando este viés de demanda até o produtor. A principal causa, segundo Gavirneni (2006), está relacionada

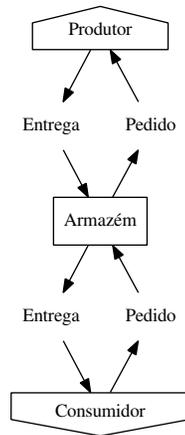


Figura 3.1: Fluxo de produtos e informações em uma cadeia de suprimentos tradicional (Disney & Towill, 2003)

às variações no preço e, além dessa, Disney & Towill (2003) apontam a variação de demanda e aspectos do processamento do pedido (lentidão, pedido em lotes) como causas secundárias. A diminuição desse efeito pode elevar os lucros de uma empresa, pois diminui a diferença entre a demanda percebida e a demanda real da cadeia, melhorando o planejamento da produção. Uma representação ilustrativa do efeito chicote pode ser vista na Figura 3.2.

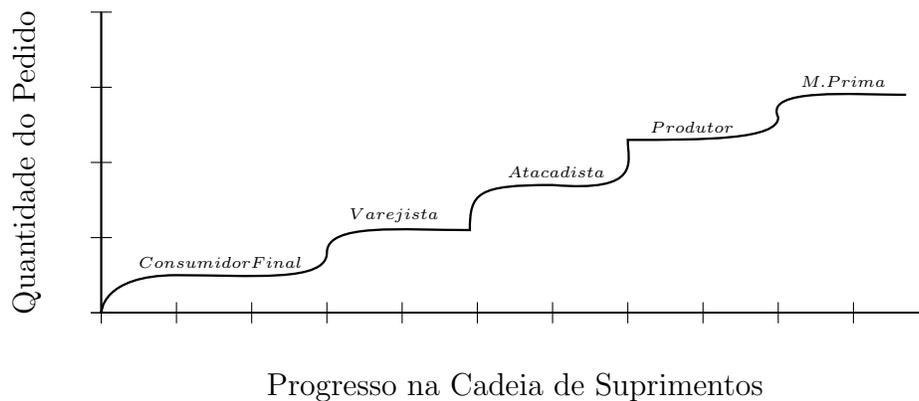


Figura 3.2: Comportamento dos pedidos de produtos em efeito chicote

O Estoque gerenciado pelo fornecedor é uma técnica interessante de controle do efeito chicote. Primeiro, existe a eliminação de uma camada de decisão, e um maior controle dos dados que fluem pela cadeia. Segundo, tem-se uma redução no atraso de propagação da informação.

3.2 O problema VMI

Estoque controlado pelo fornecedor (VMI, do inglês vendor-managed inventory) é um acordo colaborativo entre fornecedor e cliente na cadeia de suprimentos. Todo o gerenciamento do estoque e a escolha dos níveis apropriados de produção são feitos por um distribuidor, classicamente pelo fornecedor.

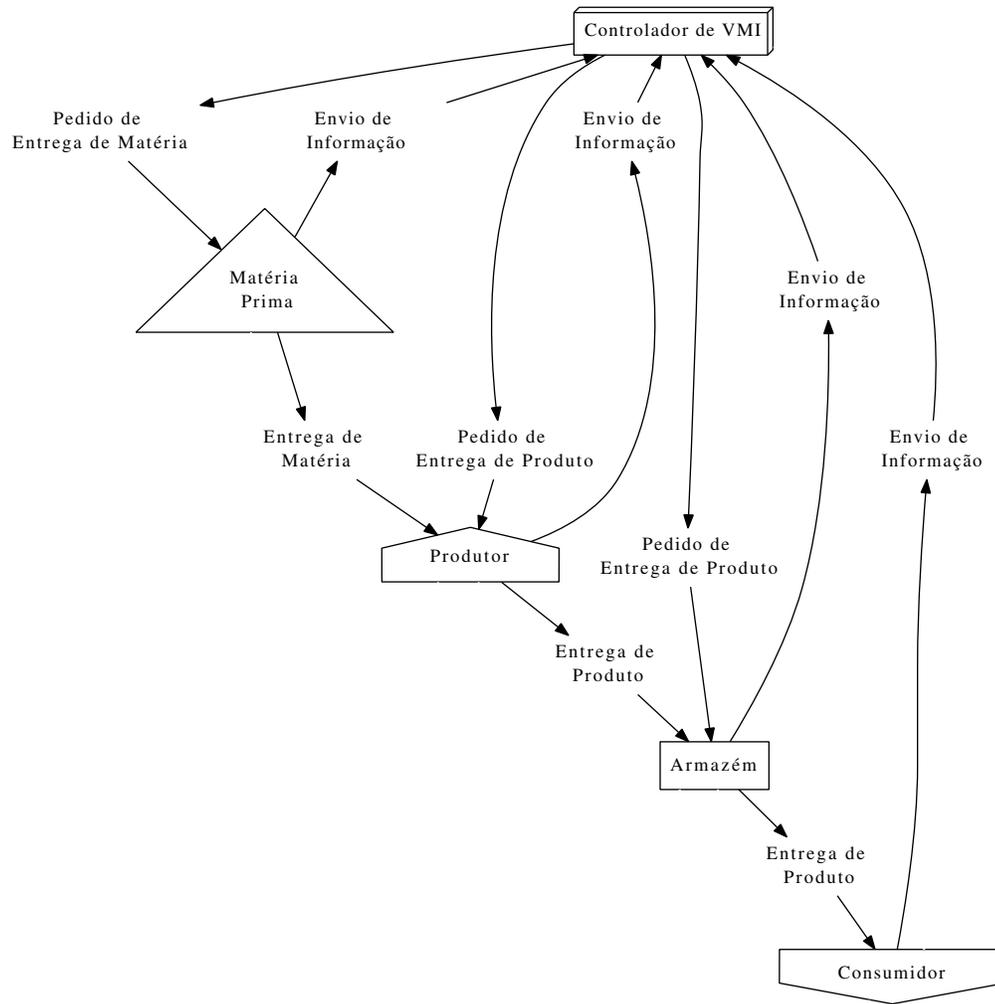


Figura 3.3: Fluxo de produtos e informações na cadeia VMI (Disney & Towill, 2003)

Para que este gerenciamento seja possível, é necessário o compartilhamento de informações sobre o estoque e demanda no cliente, como pode ser visto na Figura 3.3. Esta informação deve ser fornecida de forma rápida, completa e confiável (Singh, 2013).

O objetivo geral dessa interação é minimizar os custos operacionais (custo de transporte e estoque) e melhorar a disponibilidade dos produtos no consumidor. Govindan (2013) aponta, no entanto, o alto custo de manutenção do estoque pelo fornecedor, gerando vantagens somente para o cliente. Mesmo assim, algumas vantagens importantes do VMI são: melhor resposta do tempo de serviço, melhor renovação de estoque, redução das incidências de falta de estoque, decréscimo nos níveis de estoque de segurança e maior transparência no gerenciamento da cadeia de suprimentos (Singh, 2013).

3.3 Classificação

Existem várias formas de implementação de VMI. Por isso, em Sta et al. (2007) foi proposta uma análise estruturada para se formalizar e projetar a implementação deste sistema de gerenciamento da cadeia de suprimentos. Em Sta et al. (2007), realizaram-se entrevistas com

15 empresas, com a finalidade de, junto com uma pesquisa bibliográfica, encontrar formas de classificar o VMI em dimensões.

- Dimensões relacionadas ao estoque:
 - Localização do estoque: Essa dimensão trata da localização física do estoque.
 - * Localizado tanto no fornecedor quanto no cliente.
 - * Fornecedor entrega em um depósito do cliente, ou em um distribuidor terceirizado.
 - * Estoque entregue diretamente da linha de produção ao cliente, ou em depósitos locais.
 - Política de abastecimento: Diz como o estoque do cliente é abastecido. Mais especificamente, o fornecedor pode abastecer direto da sua produção ou do estoque.
 - * Entrega do estoque do produtor.
 - * Entrega direto da produção.
 - Propriedade do estoque: Em Govindan (2013), são apontadas formas de propriedade de estoque. O VMI consignado é quando o fornecedor é dono do estoque até que o cliente o consuma. Uma outra forma apontada em Govindan (2013) é quando existem dois preços fixados, um que é pago pelo cliente de forma antecipada, e outro que é usado para satisfazer demandas inesperadas.
 - * Produtor (Consignado) - A fatura é feita quando o produto é retirado do estoque.
 - * Cliente (pagamento a posteriori) - O cliente é dono do estoque a partir do momento em que este é entregue, mas paga somente quando os produtos são requeridos do estoque.
 - * Cliente (pagamento a priori) - O cliente assume a propriedade e efetua o pagamento quando o produto é entregue.
- Dimensões relacionadas à informação:
 - Visibilidade da Demanda: Diz respeito ao tipo da informação disponível para o fornecedor, a fim de que este controle o estoque.
 - * Somente informação histórica da demanda.
 - * Informações sobre necessidades futuras são adicionadas, além de planejamentos de entrega.
 - * Planejamento e alocação de demandas.
 - Acesso à informação: Diz respeito a como o fornecedor tem acesso à demanda do cliente e seu nível de estoque.
 - * Coleta direta/visual feita pelo próprio fornecedor.
 - * Através do conhecimento do sistema de gerência de estoque do cliente.

- * A informação é disponibilizada online para o fornecedor.
- Dimensões relacionadas à tomada de decisão:
 - Monitoramento e encomenda de reposição: Se refere à frequência com que o fornecedor monitora e inspeciona o estoque e a demanda futura do cliente.
 - * Continuamente revisado.
 - * Periodicamente com tempo arbitrário fixo.
 - * Baseado em visitas do fornecedor.
 - Limites de controle: Se refere a como o fornecedor controla os estoques. No sentido de janelas de fornecimento.
 - * Sem mínimo e máximo - o fornecedor só pode visitar quando há um acordo com o cliente.
 - * Somente com mínimo - o fornecedor só pode visitar após passados os dias determinados por essa janela mínima.
 - * Somente com máximo - o fornecedor se compromete a entregar com uma janela máxima de um certo tempo.
 - * Com máximo e mínimo.
 - Decisão de Reabastecimento: Se refere a quanto será entregue e quando o fornecedor fará a entrega.
 - * Fornecedor decide quando e quanto será entregue (dentro dos limites estabelecidos).
 - * Fornecedor só decide quando ou quanto será entregue.
 - * Cliente confirma se aceita a entrega.
 - * Cliente envia sugestões de pedidos.
- Dimensões referentes à integração dos sistemas.
 - Integração horizontal dos consumidores.
 - * Foco em um VMI/(cliente) de cada vez.
 - * Foco em todos os VMIs/(clientes) ao mesmo tempo.
 - * Foco em todos os clientes ao mesmo tempo (VMI ou não).
 - Integração Horizontal dos Itens.
 - * Foco em um item de cada vez.
 - * Todos os itens são resolvidos simultaneamente.
 - Integração Vertical da Cadeia: Se refere ao poder de gerência que o distribuidor tem.
 - * Somente sobre o estoque do cliente.
 - * Estoque do cliente e próprio estoque.
 - * Ambos os estoques e estoque de saída da produção.

3.4 Pesquisas Relacionadas

Esta seção tem como objetivo apresentar o espectro geral da literatura de VMI, complementando o que já foi visto anteriormente.

Em muitos artigos, são propostos modelos de otimização e, então, são avaliados alguns aspectos importantes dentro da cadeia de suprimentos.

Em Chen et al. (2009), é testado um modelo de otimização que verifica como as estratégias de entrega e o preço do produto final e da matéria-prima impactam no déficit de produtos, na produção e no lucro do produtor e do fornecedor. Já a proposta de trabalho em Hsieh & Laio (2010) consiste em testar otimização multiobjetivo evolutiva (empregando o algoritmo NSGA-II) para relacionar dados de quantidade entregue, quem efetua a entrega e quais armazéns serão abertos/usados em planejamento de entregas, objetivando minimizar custo e maximizar qualidade de serviço. E em Nachiappan & Jawahar (2007), é testado um algoritmo genético com modelagem de preço por demanda, custos de produção e custos de armazenamento para relacionar dados de vendedores e cliente em planejamento de entregas, objetivando maximizar o lucro.

Em uma outra frente de atuação, são modeladas as dinâmicas de VMI e, então, ao alterar alguns parâmetros, são avaliados os impactos em alguns aspectos da cadeia de suprimentos.

Em Disney & Towill (2003), é avaliado o impacto dos modelos tradicionais e VMI na cadeia de suprimentos. Para isso, é avaliado o comportamento do efeito-chicote e do lucro dentro dos dois modelos. Já a proposta de trabalho em Huang et al. (2005) consiste em testar um modelo de opressão sobre as pequenas empresas, num modelo de VMI que verifica o impacto do tempo de implementação e volume de pedidos sob o custo de implementar o VMI e fornecer desconto para o consumidor. A proposta de trabalho em Kuk (2004) consiste em, através da metodologia de VMI, verificar se algumas hipóteses são atendidas pelo sistema. Então, é testado se o tamanho das organizações interfere na redução de custos e na qualidade de serviço e se o tamanho da empresa influi no sucesso da aplicação de VMI. Também são medidos o impacto dos serviços a serem integrados ou a serem oferecidos por terceiros. Finalmente, Kuk (2004) também avaliou a diferença entre o que é esperado e o que é entregue pela aplicação de VMI. Em Wu et al. (2008), é avaliado o comportamento do consumidor final diante de múltiplas opções de produto, assim como a disponibilidade. Então é criada uma rede neural para capturar este comportamento através de dados já colhidos, visando melhorar a qualidade de serviço e lucros.

Devido à generalidade da formulação a ser proposta no Capítulo 5, é possível atuar nas duas frentes, tanto inserindo características desejáveis no sistema e executando uma simulação através do processo de otimização, quanto, através de uma parametrização de entrada, modelar a rede e extrair informações dos processos otimizados.

Conceitos vinculados ao problema de roteamento e estoque

4.1 Introdução

É possível constatar que não há uma uniformidade na literatura do problema de roteamento e estoque (IRP) quanto à sua formulação. Em Archetti et al. (2007), Bard & Huang (1998), Campbell & Clarke (1998), Coelho et al. (2012a) e Coelho et al. (2012b), são usadas formulações diferentes entre si, apontando uma diversidade de abordagens.

Já foi vista uma formulação simplificada no Capítulo 2. Porém, o foco deste trabalho é abordar esta questão de forma mais abrangente, cobrindo inúmeros aspectos mostrados na literatura.

Serão usadas como base a pesquisa e a categorização de Andersson et al. (2010), junto a qual serão adicionadas algumas outras características estudadas neste trabalho.

4.2 Classificação

Primeiramente, são apontadas e caracterizadas as unidades básicas do problema:

- **Funções dos Agentes** - Agentes são os componentes da cadeia de suprimentos que têm alguma ação no processo. Na classificação a seguir, um agente pode acumular mais de uma função.
 - **Cliente** - Cliente é uma entidade da cadeia de suprimentos cuja principal característica é ter uma demanda que consome uma certa quantidade de produto estocado. Comumente possui um estoque de entrada.
 - **Produtor** - Produtor é uma entidade da cadeia de suprimentos que tem como característica ser uma fonte de produtos. Comumente possui um estoque de saída de produtos, que também serve como margem de manobra de demanda dos clientes.
 - **Armazém** - Armazém é onde se mantém o estoque intermediário entre produtores e clientes.

- **Garagem** - Consiste no local de onde os transportadores devem sair no início de um período do horizonte de planejamento e para onde devem retornar. Qualquer uma das funções anteriores pode acumular a função de garagem, assim como ela pode existir de forma independente.
- **Produto** - É o componente alvo do problema. Ele deve ser produzido e levado até o cliente para ser consumido. Ele pode ter algumas características do ponto de vista logístico.
 - **Quanto à variedade** - Em um IRP estudado, pode existir um **único** produto, ou podem existir **múltiplos** produtos. Quando múltiplos, eles podem ser de tamanhos variados, com uma, duas ou três dimensões. Isso pode gerar problemas da mochila distintos.
 - **Quanto à perecibilidade ou obsolescência** - Na maior parte da literatura (Archetti et al., 2007), (Bertazzi et al., 2002), o produto foi considerado **não perecível ou não passível de ficar obsoleto**. Entretanto, considerar o produto **perecível ou passível de obsolescência**, apesar de gerar um nível a mais de complexidade, pode ser relevante do ponto de vista prático.
- **Transportadores** - Transportadores têm como função levar estoque de um agente para outro.
 - **Quanto ao tipo de terreno** - Pode ser **rodoviário, ferroviário, aeroviário, marítimo** ou **híbrido**.
 - **Quanto ao tipo de produto** - Pode ser **homogêneo** e pode carregar qualquer tipo de produto, ou pode ser **heterogêneo**, onde cada transportador pode carregar apenas alguns produtos específicos.

A partir dessas caracterizações, serão apontadas as categorias mostradas em Andersson et al. (2010):

- **Horizonte de planejamento** - O tempo que é considerado para o planejamento de entregas dentro do problema. Este pode ser tratado como **instante**, ou seja, o planejamento é feito somente para uma entrega. Pode ser tratado como **finito**, ou seja, é feito o planejamento para múltiplas entregas finitas posteriores. E **infinito**, considerando um certo comportamento geral do sistema, é feita uma estratégia de entrega supondo infinitas entregas regulares.
- **Demanda** - Comportamento da saída de produtos de um cliente.
 - **Natureza estatística** - O estudo pode ser feito considerando que a demanda é **determinística**, ou que a demanda tem uma distribuição **estocástica**.
 - **Natureza dinâmica** - Os parâmetros da demanda podem ser **fixos**, constantes no caso determinístico ou com distribuições de probabilidade constantes no caso estocástico. Ou podem ser **dinâmicos**, ou seja, os parâmetros acima citados variam com o tempo.

- **Produção** - Comportamento da fonte de produtos vinculada a um produtor.
 - **Natureza de decisão** - A produção pode ser considerada como uma **variável de decisão** (Bertazzi et al., 2005) de modo que a produção de um período futuro é decidida no período presente. Ou como um **parâmetro** (Archetti et al., 2007) cujas características são consideradas a seguir.
 - **Natureza estatística** - O estudo pode ser feito considerando que a produção é **determinística**, ou que a produção tem uma distribuição **estocástica**.
 - **Natureza dinâmica** - Os parâmetros da produção podem ser **fixos**, constante no caso determinístico ou com distribuições de probabilidade constantes no caso estocástico. Ou podem ser **dinâmicos**, ou seja, os parâmetros acima citados variam com o tempo.

- **Topologia da cadeia** - Indica como os agentes da cadeia de suprimentos estão interligados, no sentido de como a distribuição dos produtos é feita, desde o produtor até o cliente. Representações gráficas das possíveis topologias da cadeia são apresentadas na Figura 4.1.
 - **Um para um** - É a forma mais simples de IRP, abordada por Bertazzi et al. (2008): consiste em somente um produtor e um cliente.
 - **Um para muitos** - É o modelo mais usado: consiste em um produtor que é encarregado de distribuir para vários clientes.
 - **Muitos para um** - Pouco comum, pode ser visto como o sistema de recolhimento de lixo (Beltrami & Bodin, 1974), onde vários produtores enviam itens para um cliente.
 - **Muitos para muitos** - Consiste em vários produtores atendendo vários clientes.
 - **Multinível** - É o caso em que, na entrega entre o produtor e o cliente, o produto pode passar por um ou mais agentes.
 - * **Através de armazéns** - Nesta organização, existem armazéns que realizam uma retenção intermediária de produtos (Bard & Huang, 1998), (Shuai et al., 2011).
 - * **Através de entregas entre clientes** - Esta organização pode ser vista no trabalho de Coelho et al. (2012b), onde além das entregas do fornecedor, também podem existir entregas entre os clientes.
 - * **Generalização** - Nesta categoria, agentes intermediários, como armazéns e até mesmo clientes e produtores, podem servir como ponto de armazenamento, ou estoque intermediário para os clientes finais. Consiste em uma generalização da rede.

- **Roteamento** - Se refere ao comportamento de entrega de itens para os clientes, incluindo os pontos de partida e chegada.
 - **Direta** - O Transportador faz a entrega direta para somente um cliente e volta para o ponto de partida.

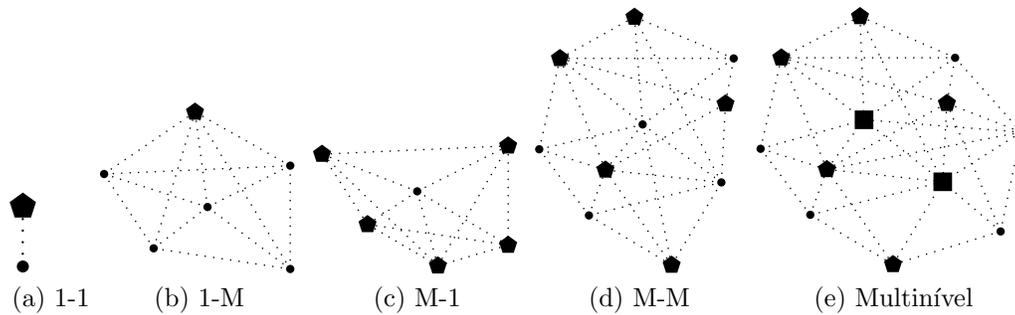


Figura 4.1: Ilustração das possíveis topologias da cadeia

- **Múltipla** - A entrega é feita para vários clientes em cada viagem do transportador e volta-se para o ponto de partida.
- **Contínua** - São feitas entregas para clientes e o ponto final da sequência de entregas do dia pode ser distinto do ponto inicial.
- **Estoque** - Como é tratado o comportamento do estoque pelo problema.
 - **Fixo** - Não é permitido que o estoque fique abaixo de um limiar inferior.
 - **Com esgotamento** - Quando ocorre um esgotamento, é feita uma entrega de emergência a um alto custo.
 - **Venda perdida** - O estoque vai para zero e a demanda não satisfeita é perdida, sem entregas de emergência ou venda postergada.
 - **Adiamento da demanda** - É quando a demanda que não é atendida em um período é repassada para o seguinte, levando a uma demanda acumulada.
- **Composição da Frota** - A frota pode ser **homogênea**, ou **heterogênea** na capacidade de carga.
- **Tamanho da Frota** - A frota pode ser composta por um **único** transportador, ou por **múltiplos** transportadores, ou pode ser **irrestrita**, ou seja, o número de transportadores é uma variável de decisão.
- **Limitação de Viagens** - Um problema IRP pode ser projetado para ter apenas viagem **única** do transportador, ou então ser limitado pelo **número de viagens**, pela **distância percorrida** ou pelo **tempo de viagem**.
- **Funções-objetivo** - Guiam a resolução do problema, ou seja, quais as propriedades que devem estar presentes na solução.
 - **Sem objetivo** - Neste caso, o que é desejado é apenas que restrições sejam satisfeitas, ou seja, que a entrega seja feita sem violar restrições.
 - **Transporte** - O que se deseja é que o custo das viagens do(s) Transportador(es) seja minimizado.

- **Estoque** - Um item guardado em um estoque tem um custo, tanto econômico (risco de obsolescência, custo de investimento) quanto logístico, pois o espaço ocupado poderia ter outra destinação.
- **Produção** - Quando a Produção é considerada como uma das variáveis de decisão, esta pode ser considerada como um dos objetivos.
- **Custos indiretos** - Também pode ser considerado como um dos objetivos minimizar o efeito chicote, assim como maximizar a flexibilidade (o quanto uma entrega pode ser alterada, o quanto a demanda pode variar, ou em que aspectos é possível alterar a rota).
- **Técnica de solução** - Devido à grande complexidade computacional do problema, existem muitas abordagens, buscando formas mais rápidas ou mais acuradas de se resolver.
 - **Técnicas Exatas** - Consistem em técnicas que, dada a formulação do problema, encontram o seu ótimo global. Em Campbell & Clarke (1998), é usada programação linear-inteira (PLI) e em Archetti et al. (2007), é usada PLI com desigualdades válidas. Em alguns casos a otimização é dividida em duas fases (Campbell, 2002), (Campbell & Savelsbergh, 2004).
 - **Heurísticas Específicas** - Devido ao grande custo computacional, em muitos trabalhos são usadas heurísticas para reduzir o custo. A grande maioria usa técnicas exatas para executar partes da heurística, como em Bard & Huang (1998), Bertazzi et al. (2002) e Dror et al. (1985).
 - **Meta-heurísticas** - Em alguns casos, são usadas heurísticas não específicas para um certo problema. Em Coelho et al. (2012a) e Coelho et al. (2012b), são usadas meta-heurísticas de busca em vizinhança, e em Moin et al. (2011) e (Aziz & Mom, 2007), são usados algoritmos genéticos.
 - **Otimização Multiobjetivo** - Como já dito anteriormente, pode não haver somente um objetivo nos problemas de IRP. Então, em Azuma et al. (2011) e Shuai et al. (2011) são abordados múltiplos objetivos.

4.3 Pesquisas Relacionadas

Esta revisão bibliográfica tem como objetivo mostrar características de cada trabalho, de acordo com a complexidade da cadeia formulada.

4.3.1 Dois Níveis de Agentes

A proposta de trabalho em Archetti et al. (2007) consiste em uma formulação simples com um veículo e um distribuidor alimentando vários clientes. São propostas desigualdades válidas para acelerar o algoritmo, a função-objetivo consiste na soma do custo de armazenamento de estoque (custo por unidade-dia acumulados) e do custo de transporte (custo acumulado das

transições entre nós atendidos). No próximo parágrafo, são descritos alguns trabalhos que utilizam formulações e métricas iguais ou similares às de Archetti et al. (2007).

Em Archetti et al. (2011), é proposta uma heurística mista que utiliza programação linear-inteira mista e elementos de Busca Tabu. Uma abordagem utilizando algoritmos genéticos multiobjetivo é vista em Azuma et al. (2011), onde os custos de armazenamento e estoque são otimizados separadamente e simultaneamente. No trabalho de Coelho et al. (2012b), são adicionadas restrições de consistência para promover melhora na qualidade do serviço de entrega, restringindo a quantidade entregue a certos intervalos proporcionais à demanda, intervalo entre entregas, o número de visitas a um cliente no mesmo espaço de tempo e a capacidade de carga do veículo. Além disso, em Coelho et al. (2012b) é utilizada a meta-heurística ALNS (do inglês *Adaptative Large Neighborhood Search*) como metodologia de solução.

Em Aziz & Mom (2007) e Moin et al. (2011) é proposta uma formulação com muitos produtores para um cliente atendido por múltiplos veículos. Esses trabalhos utilizam algoritmos genéticos como técnica de solução, e o desempenho da técnica foi medido pela soma dos custos de armazenamento e transporte.

Em Bertazzi et al. (2002), é considerada uma formulação simplificada do problema, e então é proposta uma heurística em duas fases: fase construtiva e uma busca local. É considerado e avaliado o impacto de formular a função-objetivo com somente custo de estoque, somente custo de transporte e os custos somados. Bertazzi et al. (2005) ampliam este trabalho subdividindo em problemas de distribuição e produção usando como método de solução uma heurística que utiliza programação linear-inteira para resolver subproblemas iterativamente. O subproblema de produção usa como função objetivo o custo de produção e estoque no produtor, e o subproblema de distribuição usa o custo de transporte e o custo de estoque nos clientes. Além disso, em Bertazzi et al. (2005), são avaliadas algumas políticas de VMI e, quando comparados à forma tradicional de cadeia de suprimentos, demonstram uma queda relevante nos custos.

Em Campbell (2002), é usada uma heurística em duas fases: Na primeira é criado um modelo PLI planejando a quantidade de produto a ser entregue para cada cliente. Neste modelo, não é calculada a rota exata, mas cada cliente é atribuído a rotas pré-estabelecidas e considerando o custo total da rota. Então, na segunda fase de Campbell (2002), é utilizada uma heurística para planejar a sequência de clientes a serem atendidos e a quantidade entregue, que pode diferir do planejado na primeira fase.

Em um dos trabalhos iniciais, Dror et al. (1985) organiza os clientes de acordo com a necessidade do cliente ser atendido no horizonte de planejamento atual. Então, são criados fatores relativos aos ganhos em adiantar uma entrega para o período atual de um cliente que não necessita ser atendido neste horizonte, e o custo de não atender no período atual um cliente que necessita ser atendido neste horizonte. Então, a resolução é feita dividindo o problema de duas formas: Atribuindo clientes aos dias e resolvendo o problema de roteamento de veículos, ou atribuindo clientes aos veículos em cada dia e resolvendo o problema do caixeiro viajante.

E a proposta de trabalho em Geiger et al. (2011) consiste em resolver o problema IRP através de uma busca local multiobjetivo que atualiza a lista de soluções não dominadas, variando a frequência de entrega. Os objetivos múltiplos consistem no custo de estoque e no custo de roteamento.

4.3.2 Múltiplos Níveis

As propostas em Múltiplos Níveis são muito distintas entre si.

Em Bard & Huang (1998) são abordadas meta-heurísticas para uma formulação com um depósito central, de onde partem os transportadores, clientes a serem atendidos e depósitos satélites, onde os transportadores podem recarregar para executarem mais entregas em um dado período.

A proposta de Shuai et al. (2011) consiste em resolver o problema IRP conjuntamente com alocação de depósitos centrais, usando algoritmos genéticos multiobjetivo para relacionar dados de estoque e demanda em planejamento de entregas, avaliados por métricas de desempenho de custos (estoque e transporte) e satisfação do cliente.

A proposta de trabalho em Coelho et al. (2012a) cria formulações por PLI baseadas na proposta de Archetti et al. (2007), possibilitando entregas diretas entre clientes e utilizando como método de solução a meta-heurística ALNS (do inglês *Adaptative Large Neighborhood Search*) avaliada pelos custos de transporte e roteamento somados.

E, por fim, em Coelho & Laporte (2013) é proposta uma metodologia *branch-and-cut* para encontrar soluções exatas para várias formulações do problema IRP com múltiplos veículos, inserindo buscas locais nas fases onde são encontradas soluções inteiras, acelerando o algoritmo devido à obtenção de limites superiores de melhor qualidade.

4.4 Considerações finais do capítulo

Em todos os trabalhos citados neste capítulo, todos os agentes da rede (produtores, fornecedores, armazéns, clientes e garagens) têm uma função específica concebida a priori na formulação. Isso faz com que uma pequena mudança na estrutura do problema da rede real faça com que toda a formulação deva ser alterada.

Para este fim, é proposta, no próximo capítulo, uma formulação mais genérica, que consiste na principal contribuição deste trabalho.

O Problema de Roteamento e Estoque Estendido

O problema de roteamento e estoque estendido (EIRP, do inglês Extended Inventory Routing Problem) é uma generalização do problema IRP. Essa generalização advém de não atribuir a priori uma função a cada nó do grafo/entidade da cadeia de suprimentos.

O problema é definido formalmente como um grafo $\mathcal{H} = (\mathcal{N}, \mathcal{A})$, onde $\mathcal{N} = \{0, 1, 2, \dots, N\}$ é o conjunto de nós do problema, e $\mathcal{A} = \{(i, j) : i, j \in \mathcal{N}\}$ é o conjunto de arcos. Cada nó possui parâmetros relacionados a taxa de produção, taxa de consumo, permissão de entrega de produtos, permissão de envio de produtos e se o dado nó é uma garagem. Através desses parâmetros de entrada, é possível atribuir a cada nó funções como: produtor, cliente, armazém e garagem. Uma frota de transportadores é responsável por levar os itens dos nós que realizam produção para os nós que realizam consumo, a cada período em um horizonte de planejamento $t \in \mathcal{T}$, e cada transportador tem uma capacidade máxima de carga de itens de \bar{L}^v . Uma representação pode ser vista na Figura 5.1, em que uma seta incidindo em um nó é produção de itens, e saindo de um nó é consumo de itens, a linha tracejada indica conexões entre os nós, e a linha em negrito representa um exemplo de rota de entrega possível nesta rede, para cada período do horizonte de planejamento.

As restrições são apresentadas com uma breve descrição. Para ajudar na compreensão, as restrições foram divididas em grupos relacionados com a sua característica: restrições de estoque, visita, transportador e rota são as restrições necessárias para que a solução seja factível. Restrições de consistência apresentam aspectos que contemplam características desejáveis em uma solução e podem ser definidas pelo projetista através de uma interface de entrada.

Na formulação proposta, cada um dos períodos t de tempo dentro da janela temporal é chamado de período no horizonte de planejamento. A sequência de nós visitados pelos transportadores é chamada de rota. A rota é definida pelos arcos visitados em cada período.

Também é considerado que entrega e produção são feitas como últimas atividades no período de planejamento, ou seja, se ocorre no período t , é considerada parte do estoque somente no período $t + 1$. O envio e consumo é feito como a primeira atividade do período, ou seja, o que ocorre no período t , é retirado do estoque no mesmo período t .

A seguir, são definidos os conjuntos relacionados ao problema, as variáveis, os índices das variáveis, os parâmetros do problema, dos nós e dos transportadores. Em seguida, são definidas as restrições e funções-objetivo.

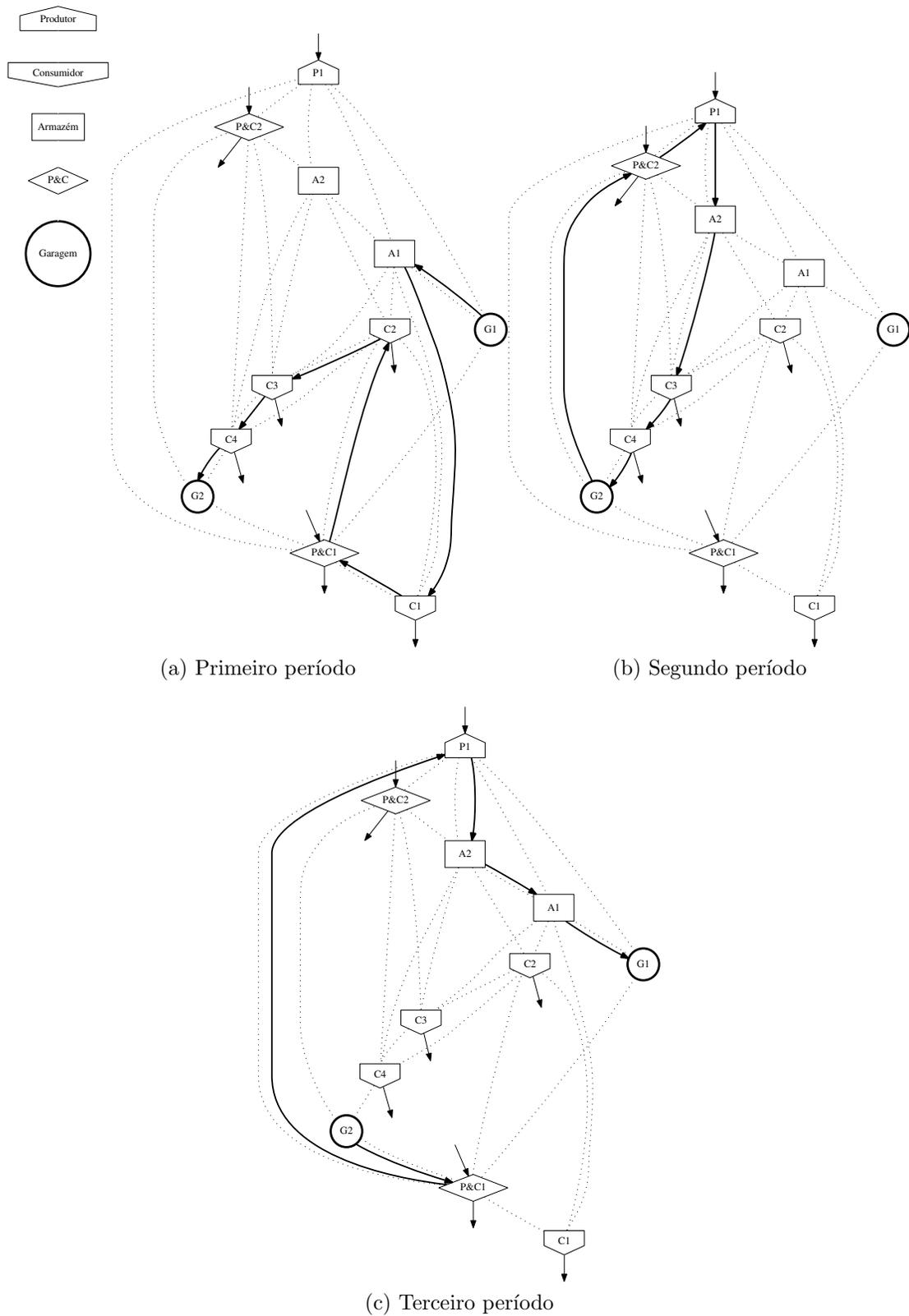


Figura 5.1: Representação de uma cadeia de suprimento e rotas de entrega para três períodos do horizonte de planejamento

- **Conjuntos** - Lista dos conjuntos usados no problema:
 - $\mathcal{N} = \{0, 1, 2, \dots, \bar{N}\}$: **Nós/agentes** - \bar{N} é o máximo de nós/agentes do problema.
 - $\mathcal{T} = \{1, 2, \dots, \bar{T}\}$: **Período do horizonte de planejamento** - \bar{T} é o máximo de períodos do problema.
 - $\mathcal{T}' = \mathcal{T} \cup \{\bar{T} + 1\}$: **Conjunto considerando um período após o término do horizonte de planejamento.**
 - $\mathcal{V} = \{1, 2, \dots, \bar{V}\}$: **Frota de transportadores** - \bar{V} é o tamanho máximo da frota do problema.
 - $\mathcal{G}^v \subset \mathcal{N}$: **Nós que podem ser garagem de um certo transportador.**
- **Índices** - Os índices específicos de cada tipo e que são usados em todo o problema são apresentados a seguir.
 - $k \in \mathcal{N}$: **Nós.**
 - $(i, j) \in \mathcal{N}$: **Transição de nós.**
 - $t \in \mathcal{T}$: **Período no horizonte de planejamento.**
 - $v \in \mathcal{V}$: **Transportador da frota de transportadores.**
- **Variáveis:** São as variáveis de decisão e auxiliares usadas no problema. As quatro primeiras variáveis são de decisão do problema. O restante são variáveis auxiliares usadas para satisfazer/formular restrições, ou facilitar/enfatizar cálculos.
 - $f_{k,t}^v \in \{0, 1\}, v \in \mathcal{V}, k \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}'$: **Define o nó inicial para o transportador v no período t .**
 - $r_{k,t}^v \in \mathbb{R} : k \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}, v \in \mathcal{V}$: **Quantidade recebida pelo nó k do transportador v em um período t .**
 - $s_{k,t}^v \in \mathbb{R} : k \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}, v \in \mathcal{V}$: **Quantidade enviada pelo nó k para um transportador v em um período t .**
 - $x_{i,j}^{v,t} = \{0, 1\} : i \in \mathcal{N}, j \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}, v \in \mathcal{V}$: **Transição de um transportador v de um nó i para outro nó j em um período t .**
 - $I_{k,t} \in \mathbb{R} : k \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}'$: **Nível de estoque no nó k em um período t .**
 - $l_{k,t}^v \in \mathbb{R} : k \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}, v \in \mathcal{V}$: **Carga do transportador v após passar em um cliente k (caso não passe, é nulo).**
 - $y_{k,t}^v = \{0, 1\} : k \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}, v \in \mathcal{V}$: **Indica visita de um transportador v a um nó k no período t .**
 - $u_{k,t}^v = \{0, 1\} : k \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}, v \in \mathcal{V}$: **Indica visita de um transportador v a um nó k no período t para recebimento.**
 - $w_{k,t}^v = \{0, 1\} : k \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}, v \in \mathcal{V}$: **Indica visita de um transportador v a um nó k no período t para retirada.**

-
- $o_{k,t} \in \mathbb{R} : k \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}$: Quantidade de itens obsoletos em um nó k no período t .
 - $a_{k,t} \in \mathbb{R} : k \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}$: Quantidade de demanda não atendida em um nó k no período t .
 - $b_{k,t} = \{0, 1\} : k \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}$: Existência de demanda não atendida em um nó k no período t .
- **Parâmetros do Problema** - Estes parâmetros dizem respeito a uma organização global do sistema, parâmetros organizadores de nós, transportadores e rotas.
 - $\bar{N} \in \mathbb{N}$: Número máximo de nós.
 - $\bar{V} \in \mathbb{N}$: Tamanho máximo da frota de transportadores - Número de transportadores disponíveis para entregar produtos.
 - $\bar{T} \in \mathbb{N}$: Comprimento máximo da janela de tempo - Diz respeito a quantos períodos serão considerados para o planejamento de entrega.
 - $f_{k,0}^v \in \{0, 1\}, v \in \mathcal{V}, k \in \mathcal{N}$: Define o nó inicial para o transportador v no primeiro período.
 - $d_{k,t} \in \mathbb{R}, k \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}$: Quantidade consumida pelo nó k no período t .
 - $p_{k,t} \in \mathbb{R} : k \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}$: Quantidade produzida pelo nó k no período t .
 - $c_{i,j} \in \mathbb{R} : i, j \in \mathcal{N}$: Custos de transição entre nós - É o custo que um transportador tem para se locomover de um nó i a um nó j na rede de entrega.
 - $OU = \{0, 1\}$: Toda entrega enche o estoque, 0 é não e 1 é sim. - Indica se cada entrega deve preencher ou não o estoque (Order-Up Level) (Archetti et al., 2007).
 - $POST = \{0, 1\}$: Demanda não atendida é postergada, 0 é não e 1 é sim.
 - $CONS = \{0, 1\}$: Se há restrições para delimitar a quantidade entregue, 0 é não e 1 é sim.
 - $WD = \{0, 1\}$: Se existe limite mínimo e máximo para a janela de entregas para um cliente, 0 é não e 1 é sim.
 - $OBS = \{0, 1\}$: Se o produto fica obsoleto, 0 é não e 1 é sim.
 - $c^{esg} \in \mathbb{R}$: Punição por haver esgotamento de estoque em um nó.
 - $c^{exc} \in \mathbb{R}$: Punição por item que ultrapassou o limite mínimo de estoque.
 - $c^{obs} \in \mathbb{R}$: Punição por obsolescência.
 - $O_k \in \mathbb{N}, k \in \mathcal{N}$: Tempo para um produto ficar obsoleto em um nó k .
 - $e_{i,j} \in \mathbb{R} : i, j \in \mathcal{N}$: Tempo de transição entre nós - É o tempo que um transportador gasta para se locomover de um nó i a um nó j na rede de entregas.
 - $e_k \in \mathbb{R} : k \in \mathcal{N}$: Tempo de carga ou descarga de produtos gasto por um transportador em um nó k .

- **Parâmetros dos Nós:** Lista de parâmetros referentes a características específicas de um nó.
 - $c_k \in \mathbb{R} : k \in \mathcal{N}$: **Custo de armazenamento no nó k .**
 - $I_{k,0} \in \mathbb{R} : k \in \mathcal{N}$ **Nível inicial do estoque no nó k .**
 - $\bar{I}_k \in \mathbb{R}, k \in \mathcal{N}$: **Nível máximo de estoque no nó k .**
 - $\underline{I}_k \in \mathbb{R}, k \in \mathcal{N}$: **Nível mínimo de estoque no nó k .**
 - $\bar{r}_k \in \mathbb{N}, k \in \mathcal{N}$: **Máximo de visitas para recebimento de produtos no nó k .**
 - $\bar{s}_k \in \mathbb{N}, k \in \mathcal{N}$: **Máximo de visitas para retirada de produtos no nó k .**
 - $\underline{W}_k \in \mathbb{N}, k \in \mathcal{N}$: **Tempo mínimo requerido por um nó k para que possa haver outra entrega.**
 - $\bar{W}_k \in \mathbb{N}, k \in \mathcal{N}$: **Tempo máximo permitido por um nó k para que ocorra outra entrega.**
 - $\bar{r}_k, k \in \mathcal{N}$: **Razão máxima em relação ao estoque máximo \bar{r} que pode ser entregue a um nó k .**
 - $\underline{r}_k, k \in \mathcal{N}$: **Razão mínima em relação ao estoque máximo \bar{r} que pode ser entregue a um nó k .**
- **Parâmetros do transportador:** Esses parâmetros dizem respeito a características específicas de cada transportador
 - $\bar{l}^v \in \mathbb{R}, v \in \mathcal{V}$: **Capacidade máxima do transportador v .**
 - $\mathcal{G}^v \subset \mathcal{N}, v \in \mathcal{V}$: **Conjunto de nós que podem ser garagem de um transportador v .**
 - $\bar{s}^v, v \in \mathcal{V}$: **Porcentagem máxima de carga em um transportador v em relação a sua carga máxima \bar{l}^v , quando ele chega para ser carregado.**
 - $\underline{s}^v, v \in \mathcal{V}$: **Porcentagem mínima de carga em um transportador v em relação a sua carga máxima \bar{l}^v , quando ele sai após ser carregado.**
 - $\overline{c^{perc}}^v \in \mathbb{R}, v \in \mathcal{V}$: **Limite máximo de distância percorrida em uma rota pelo transportador v .**
 - $\bar{e}^v \in \mathbb{R}, v \in \mathcal{V}$: **Limite máximo de tempo de rota pelo transportador v .**
- **Restrições de estoque**
 - **Nível de estoque** - Atualiza o nível de estoque considerando o estoque no período anterior o que é produzido e recebido no período anterior, a demanda e o envio de produtos no período anterior. Nesta formulação, o que é recebido/produzido em um período só pode ser consumido/entregue no período seguinte. Além disso, é considerado que a demanda que não é atendida no período anterior é suprida no

atual, e a demanda que não é suprida no período atual não é retirada do estoque. Os produtos que ficam obsoletos são descartados.

$$I_{k,t} = I_{k,t-1} + \left(p_{k,t-1} + \sum_{v=0}^{\bar{V}} r_{k,t-1}^v \right) - \left(d_{k,t-1} + \sum_{v=0}^{\bar{V}} s_{k,t-1}^v \right) - o_{k-1,t} + a_{k,t} - a_{k,t-1} \quad (5.1)$$

$$k \in \mathcal{N}, t \in \{2, \dots, \bar{T}, \bar{T} + 1\}$$

– **Estoque inicial** - O estoque inicial em $t = 1$ é definido por dados de entrada.

– **Limite mínimo para o nível de estoque:**

$$I_{o,t} \geq \underline{I}_k + \sum_{v=0}^{\bar{V}} s_{k,t}^v - d_{k,t} \quad (5.2)$$

$$\forall k \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}$$

– **Limite máximo para o nível de estoque:**

$$I_{o,t} \leq \bar{I}_k \quad (5.3)$$

$$\forall k \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}'$$

– **Conservação de massa:**

$$\sum_{k=1}^{\bar{N}} s_{k,t}^v = \sum_{k=1}^{\bar{N}} r_{k,t}^v \quad (5.4)$$

$$\forall v \in \mathcal{V}, t \in \mathcal{T}$$

• **Restrições de visita**

– **Um nó é visitado se e somente se há envio ou recebimento de produto ou se o nó é inicial do período atual ou seguinte:**

$$y_{k,t}^v \geq \frac{s_{k,t}^v}{\bar{l}^v} \quad (5.5)$$

$$y_{k,t}^v \geq \frac{r_{k,t}^v}{\bar{l}^v}$$

$$y_{k,t}^v \geq f_{k,t}^v$$

$$y_{k,t}^v \geq f_{k,t+1}^v$$

$$y_{k,t}^v < 1 + s_{k,t}^v + r_{k,t}^v + f_{k,t}^v + f_{k,t+1}^v$$

$$k \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}, v \in \mathcal{V}$$

– **Ao menos um nó é visitado:**

$$\sum_{k=1}^{\bar{N}} y_{k,t}^v \geq 1 \quad (5.6)$$

$$t \in \mathcal{T}, v \in \mathcal{V}$$

- **Um nó receptor é visitado se e somente se há recebimento de produto:** u é nulo se não há recebimentos, e é unitário caso contrário.

$$\begin{aligned} u_{k,t}^v &\geq \frac{r_{k,t}^v}{l^v} \\ u_{k,t}^v &< 1 + r_{k,t}^v \\ k \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}, v \in \mathcal{V} \end{aligned} \quad (5.7)$$

- **Um nó fornecedor é visitado se e somente se há envio de produto:** w é nulo se não há envios, e é unitário caso contrário.

$$\begin{aligned} w_{k,t}^v &\geq \frac{s_{k,t}^v}{l^v} \\ w_{k,t}^v &< 1 + s_{k,t}^v \\ k \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}, v \in \mathcal{V} \end{aligned} \quad (5.8)$$

- **Máximo de visitas de entrega a um nó k :**

$$\begin{aligned} \sum_{v=1}^{\bar{V}} w_{k,t}^v &\leq \bar{s}^k \\ \forall t \in \mathcal{T}, k \in \mathcal{N} \end{aligned} \quad (5.9)$$

- **Máximo de visitas de retirada de um nó k :**

$$\begin{aligned} \sum_{v=1}^{\bar{V}} u_{k,t}^v &\leq \bar{r}^k \\ \forall t \in \mathcal{T}, k \in \mathcal{N} \end{aligned} \quad (5.10)$$

- **Um nó não pode entregar e receber ao mesmo tempo:**

$$\begin{aligned} y_{k,t}^v &\geq u_{k,t}^v + w_{k,t}^v \\ k \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}, v \in \mathcal{V} \end{aligned} \quad (5.11)$$

• Restrições de Transportador

- **Limite das cargas do transportador:** Mantém a variável l dentro de limites fazendo com que a carga nunca passe do limite do transportador e que o transportador não forneça itens não existentes (Coelho et al., 2012a). Além disso, as restrições impedem que existam mais ciclos que fornecedores, o que auxilia nas restrições de subrotas (Coelho et al., 2012a). As restrições são criadas para ter as seguintes propriedades:

- * A carga do transportador após um nó corresponde à carga do nó anterior mais o que foi carregado menos o que foi entregue, se e somente se este nó não é o primeiro:

$$\begin{aligned} l_{j,t}^v &\leq l_{i,t}^v + (1 + f_{j,t}^v - x_{i,j}^{v,t}) \bar{l}^v + (s_{j,t}^v - r_{j,t}^v) \\ l_{j,t}^v &\geq l_{i,t}^v - (1 + f_{j,t}^v - x_{i,j}^{v,t}) \bar{l}^v + (s_{j,t}^v - r_{j,t}^v) \\ i, j \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}, v \in \mathcal{V} \end{aligned} \quad (5.12)$$

- * A carga após um nó corresponde apenas ao que foi carregado menos o que foi entregue, se e somente se este é o primeiro nó:

$$\begin{aligned} l_{j,t}^v &\geq - (1 - f_{j,t}^v) \bar{l}^v + (s_{j,t}^v - r_{j,t}^v) \\ l_{j,t}^v &\leq (1 - f_{j,t}^v) \bar{l}^v + (s_{j,t}^v - r_{j,t}^v) \end{aligned} \quad (5.13)$$

$$i \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}, v \in \mathcal{V}$$

- Capacidade do transportador:

$$0 \leq l_{k,t}^v \leq \bar{l}^v \quad (5.14)$$

$$\forall k \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}, v \in \mathcal{V}$$

- O primeiro nó da rota é uma garagem

$$\begin{aligned} \sum_{k \in \mathcal{G}^v} f_{k,t}^v &= 1 \\ \sum_{k \notin \mathcal{G}^v} f_{k,t}^v &= 0 \end{aligned} \quad (5.15)$$

$$t \in \mathcal{T}, v \in \mathcal{V}$$

• Restrições de rota

- Transições de um transportador de um nó para outro em um momento da rota: Se um nó i é visitado, há arco saindo do nó i (exceto quando o nó i é o último nó e não é o primeiro nó).

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{\bar{N}} x_{i,j}^{tv} &\leq y_{i,t}^v + f_{i,t}^v - f_{i,t+1}^v \\ \sum_{j=1}^{\bar{N}} x_{i,j}^{tv} &\geq y_{i,t}^v - f_{i,t+1}^v \\ \sum_{j=1}^{\bar{N}} x_{i,j}^{tv} &\geq f_{i,t}^v \end{aligned} \quad (5.16)$$

$$i \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}, v \in \mathcal{V}$$

- Transições de um transportador de um nó para outro em um momento da rota: Se um nó j é visitado, há arco chegando ao nó j (exceto quando o nó j é o primeiro nó e não é o último nó).

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{\bar{N}} x_{i,j}^{t,v} &\leq y_{j,t}^v + f_{j,t+1}^v - f_{j,t}^v \\ \sum_{i=1}^{\bar{N}} x_{i,j}^{t,v} &\geq y_{j,t}^v - f_{j,t}^v \\ \sum_{i=1}^{\bar{N}} x_{i,j}^{t,v} &\geq f_{j,t+1}^v \end{aligned} \quad (5.17)$$

$$j \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}, v \in \mathcal{V}$$

- Não há entregas se e somente se um nó é inicial ou final e existe um laço neste nó

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{\bar{N}} x_{j,j}^{t,v} &\leq 1 - \frac{\sum_{k=1}^{\bar{N}} y_{k,t}^v - 1}{\bar{N}} \\ \sum_{j=1}^{\bar{N}} x_{j,j}^{t,v} &\geq f_{j,t}^v + f_{j,t+1}^v - \sum_{k=1}^{\bar{N}} y_{k,t}^v \end{aligned} \quad (5.18)$$

$$t \in \mathcal{T}, v \in \mathcal{V}$$

- **Restrição de eliminação de subrota:** Esta restrição impede que a solução tenha ciclos disjuntos. O conjunto \mathcal{L} é um subconjunto dos nós atendidos que pode gerar uma subrota, ou seja, todas as combinações de $(2 \text{ a } 2)$ até $(\sum_{k \in \mathcal{N}} y_{k,t}^v - 1 \text{ a } \sum_{k \in \mathcal{N}} y_{k,t}^v - 1)$ nós dos $(\sum_{k \in \mathcal{N}} y_{k,t}^v)$ nós atendidos em um certo período t podem criar uma subrota indesejável.

Para não ser necessário incluir a restrição para todas as subrotas possíveis, a restrição a seguir é incluída em cada ramo do algoritmo branch-and-bound, quando é encontrado um resultado inteiro e este apresenta uma subrota cujo número de nós é menor que o número de clientes visitados naquele período de planejamento. Entretanto, não se deseja que essa subrota seja eliminada em ramos do branch-and-bound cujo número de clientes atendidos seja menor ou igual ao número de clientes da subrota para aquele planejamento. Para isso a restrição só é ativada graças ao segundo termo do lado direito da inequação, quando o número de nós visitados naquele período de planejamento é superior ao número de nós da subrota.

$$\sum_{j \in \mathcal{L}} \sum_{i \in \mathcal{L}, i < j} x_{i,j}^{v,t} \leq \sum_{j \in \mathcal{L}} y_{j,t}^v + \frac{|\mathcal{L}| - \sum_{j=1}^N y_{j,t}^v}{N}, \forall \mathcal{L} \subset \mathcal{N}, \forall t \in \mathcal{T}, \forall v \in \mathcal{V} \quad (5.19)$$

No Apêndice A, será explicado como o algoritmo branch-and-bound é aplicado para resolver o problema.

- **Restrições de consistência** - Estas restrições dão ao projetista o poder de alcançar especificidades desejadas na solução. Este tipo de restrição é apresentado em Coelho et al. (2012b).
 - **Restrições de preenchimento de estoque** - Estas restrições forçam toda entrega a preencher o estoque. Estas restrições só são adicionadas se OU for verdadeiro:

$$\begin{aligned} r_{k,t}^v &\geq \bar{I}_k y_{k,t}^v - I_{k,t} \\ r_{k,t}^v &\leq \bar{I}_k - I_{k,t} \\ r_{k,t}^v &\geq \bar{I}_k y_{k,t}^v \end{aligned} \quad (5.20)$$

$$\forall k \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}, v \in \mathcal{V}$$

- **Consistência de quantidade de recebimento** - A quantidade recebida r deve ser superior a uma quantidade mínima dada por um multiplicador do máximo de estoque \underline{r}^k e um multiplicador superior \overline{r}^k . Estas restrições só são adicionadas se $CONS$ for verdadeiro:

$$u_{k,t}^v \overline{r}^k \sum_{\kappa=1}^{\overline{T}-1} \frac{d_k^\kappa}{\mathcal{T}} \leq r_{k,t}^v \leq u_{k,t}^v \underline{r}^k \sum_{\kappa=1}^{\overline{T}-1} \frac{d_k^\kappa}{\mathcal{T}} \quad (5.21)$$

$$\forall k \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}, v \in \mathcal{V}$$

- **Consistência de quantidade de carga** - Quando um transportador chega a um nó para carga, ele deve estar com a sua carga abaixo de \underline{s}_v . Estas restrições só são adicionadas se $CONS$ for verdadeiro:

$$l_{i,t}^v \leq (2 - x_{i,j}^{v,t} + w_{j,t}^v) \overline{l}^v + \underline{s}_v \overline{l}^v \quad (5.22)$$

$$\forall i \in \mathcal{N}, j \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}, v \in \mathcal{V}$$

- **Consistência de quantidade de carga** - Quando um transportador sai de um nó para carga, ele deve estar com a sua carga acima de \overline{s}_v . Estas restrições só são adicionadas se $CONS$ for verdadeiro:

$$l_{i,t}^v \geq \overline{s}_v w_{i,t}^v \overline{l}^v \quad (5.23)$$

$$\forall i \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}, v \in \mathcal{V}$$

- **Espaçamento entre entregas**: O fornecedor deve voltar ao cliente no mínimo \underline{W}_k períodos de planejamento após a última entrega. Estas restrições só são adicionadas se WD for verdadeiro:

$$\sum_{t=\kappa}^{\kappa+\underline{W}_k} \sum_{v=1}^{\overline{V}} y_{k,t}^v \leq 1 \quad (5.24)$$

$$\forall k \in \mathcal{N}, \forall \kappa \in \{1, 2, \dots, \overline{H} - \underline{W}_k\}$$

- **Espaçamento entre entregas**: O fornecedor deve voltar ao cliente no máximo \overline{W}_k períodos de planejamento após a última entrega. Estas restrições só são adicionadas se WD for verdadeiro:

$$\sum_{t=\kappa}^{\kappa+\overline{W}_k} \sum_{f=1}^{\overline{V}} y_{k,t}^v \geq 1 \quad (5.25)$$

$$\forall k \in \mathcal{N}, \forall \kappa \in \{1, 2, \dots, \overline{H} - \overline{W}_k\}$$

- **Quantidade de itens obsoletos (item sem rotatividade desejada)**: Para que essas restrições sejam válidas, é necessário incorporar uma punição por obsolescência em alguma função-objetivo. Estas restrições só são adicionadas se OBS for verdadeiro:

$$o_{k,t} \geq I_{k,t-O_k} - \sum_{\lambda=t-O_k}^t \left(d_{k,\lambda}^v + \sum_{v=1}^{\overline{V}} s_{\lambda,t}^v \right) \quad (5.26)$$

$$o_{k,\lambda} \geq 0$$

$$k \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}$$

- **Quantidade de demanda não atendida:** $POST$ é nulo se a demanda não pode ser postergada, e é unitário se sim. Para que essas restrições sejam válidas, é necessário incorporar uma punição por demanda não atendida em alguma função-objetivo. Estas restrições só são adicionadas se $POST$ for verdadeiro:

$$\begin{aligned}
 a_{k,t} &\geq I_{k,t} - \sum_{v=1}^{\bar{V}} s_{k,t}^v - d_{k,t} \\
 a_{k,t} &\geq 0 \\
 a_{k,t} &\leq \bar{I}_k \\
 o &\in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}
 \end{aligned} \tag{5.27}$$

- **Existência de demanda não atendida:** Estas restrições só são adicionadas se $POST$ for verdadeiro:

$$\begin{aligned}
 b_{k,t} &\geq \frac{a_{k,t}}{\bar{I}_k} \\
 b_{k,t} &< 1 + a_{k,t} \\
 k &\in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}
 \end{aligned} \tag{5.28}$$

- **Limitação de viagens:** Dados os tempos de transição entre nós $e_{i,j}$ e o tempo de carga/descarga e_k , a restrição por tempo assume a forma:

$$\begin{aligned}
 \sum_{i=1}^{\bar{N}} \sum_{j=1}^{\bar{N}} x_{i,j}^{v,t} e_{i,j} + \sum_{k=1}^{\bar{N}} y_{k,t}^v e_k &\leq \bar{e}^v \\
 \forall t \in \mathcal{T}, v \in \mathcal{V}
 \end{aligned} \tag{5.29}$$

- **Limitação de viagens:** Dada a distância entre cidades $c_{i,j}$, a restrição por distância é dada por:

$$\begin{aligned}
 \sum_{i=1}^{\bar{N}} \sum_{j=0}^{\bar{N}} x_{i,j}^{v,t} c_{i,j} &\leq \bar{c}^{perc^v} \\
 \forall t \in \mathcal{T}, v \in \mathcal{V}
 \end{aligned} \tag{5.30}$$

• Funções-Objetivo

- **Custo de transporte**

$$\sum_{t=1}^{\bar{T}} \sum_{v=1}^{\bar{V}} \sum_{i=1}^{\bar{N}} \sum_{j=1}^{\bar{N}} c_{i,j} x_{i,j}^{v,t} \tag{5.31}$$

- **Custo de estoque**

$$\sum_{k=1}^{\bar{N}} \sum_{t=1}^{\bar{T}+1} c_k I_{k,t} \tag{5.32}$$

- **Punição por esgotamento**

$$\sum_{o=1}^{\bar{N}} \sum_{t=1}^{\bar{T}} c^{esg} b_{k,t} + c^{exc} a_{k,t} \tag{5.33}$$

– Punição por obsolescência

$$\sum_{k=1}^{\bar{N}} \sum_{t=1}^{\bar{T}} o_{k,t} c^{obs} \quad (5.34)$$

Experimentos

6.1 Formulação do Experimento

Experimentos foram concebidos para indicar as vantagens e desvantagens da proposta estendida para o problema de roteamento e estoque, apresentada no Capítulo 5 e que será denominada EIRP (do inglês Extended Inventory Routing Problem). A validação da formulação proposta consiste em vários experimentos:

1. Comprovar que a formulação de Archetti et al. (2007) é um caso particular da formulação proposta, ou seja, mostrar que, utilizando parâmetros de entrada adequados, é possível modelar o mesmo problema e chegar aos mesmos resultados.
2. Fazer uma comparação geral entre a formulação de Archetti et al. (2007) e a formulação proposta, explorando parâmetros de entrada distintos. Este experimento visa fazer comparações de performance em termos de tempo e qualidade da otimização (minimização de custo de transporte e estoque). Com a formulação estendida, ganha-se autonomia para flexibilizar requisitos do IRP e, em seguida, medir os seus efeitos sobre custo de transporte e estoque.
3. Analisar o comportamento das restrições de consistência referentes à quantidade de produtos na entrega, buscando entender as características relativas ao quanto deve ser entregue para um cliente e o quanto isso impacta na qualidade da solução. Este estudo fica bastante facilitado com o uso da formulação estendida proposta neste trabalho.
4. Analisar o comportamento das restrições de consistência referentes à janela entre as visitas de entrega, buscando entender as características relativas às janelas, entre uma visita de entrega e outra, e o quanto isso impacta na qualidade da solução. Este estudo fica bastante facilitado com o uso da formulação estendida proposta neste trabalho.

Todos os experimentos foram realizados através da biblioteca de otimização linear-inteira Gurobi (disponível em <http://www.gurobi.com>) para Linguagem Python (<https://www.python.org/>) com a parametrização padrão em um Intel(R) Core(TM) i7-4770K (8 hiperthreads/4 núcleos físicos), com 32 GB de memória RAM.

Os dados necessários para realizar os experimentos estão disponíveis em Archetti et al. (2007): são consideradas 140 instâncias criadas com número de clientes variando de 5 a 50, e horizontes de planejamento de 3 e 6 períodos. Como funções-objetivo foram considerados os custos de transporte e estoque, somados com o mesmo peso unitário.

Foi estabelecido um tempo de execução limitado a 600 segundos para cada instância, sendo que, caso seja atingido o limite de tempo, a biblioteca Gurobi retorna o melhor resultado encontrado.

Os experimentos específicos foram os seguintes:

1. Para verificar que a formulação proposta contempla a formulação em Archetti et al. (2007) como um caso particular, foram implementadas as duas formulações em Gurobi. Então ambas foram resolvidas utilizando os mesmos dados. Além disso, foram escolhidos os seguintes parâmetros:

- $\mathcal{G} = \{1\}$
- $\overline{(recV)}_1 = 0$
- $\overline{(recV)}_o = 1 \forall o \neq 1$
- $\overline{(senV)}_1 = 1$
- $\overline{(senV)}_o = 0 \forall o \neq 1$
- $(isOU) = True$

2. É comparada a performance tanto em tempo quanto em qualidade do resultado entre a formulação específica de Archetti et al. (2007) e outras cinco formulações alternativas, cujas parametrizações são mostradas na Tabela 6.1 e explicadas a seguir:

- archetti - formulação específica de Archetti et al. (2007).
- EIRP_OU - modelagem com clientes apenas recebendo, produtor somente enviando, garagem no produtor e toda entrega enche o estoque do cliente. Esta formulação é coincidente com a proposta em Archetti et al. (2007).
- EIRP - modelagem com clientes apenas recebendo, produtor somente enviando e garagem no produtor.
- EIRP_SR_all - modelagem com clientes e produtor recebendo e enviando e garagem no produtor.
- EIRP_G_all - modelagem com clientes apenas recebendo, produtores somente enviando e garagem em qualquer nó.
- EIRP_SRG_all - modelagem com clientes e produtor recebendo e enviando e garagem em qualquer nó.

Para avaliar se existe diferença estatística significativa entre as formulações/parametrizações, é feito o teste de Wilcoxon. Com isso, as formulações/parametrizações são comparadas duas a duas, com margem de confiança de 0,001.

	\mathcal{G}	\bar{F}	$\overline{(recV)}_1$	$\overline{(recV)}_o \forall o \neq 1$	$\overline{(senV)}_1$	$\overline{(senV)}_o \forall o \neq 1$	$isOU$
EIRP_OU	$\{1\}$	1	0	1	1	0	1
EIRP	$\{1\}$	1	0	1	1	0	0
EIRP_SR_all	$\{1\}$	1	1	1	1	1	0
EIRP_G_all	\mathcal{N}	1	0	1	1	0	0
EIRP_SRG_all	\mathcal{N}	1	1	1	1	1	0

Tabela 6.1: Características das instâncias executadas no experimento, tomados como parâmetros de entrada na formulação EIRP

3. Para mostrar o impacto das restrições de consistência de quantidade de entrega, é formulado o seguinte experimento - Os parâmetros de consistência de entrega, que vão de 0 a 1, são variados de 0,1 em 0,1, o problema correspondente é resolvido e são comparadas as soluções resultantes.
4. Para mostrar o impacto das restrições de consistência de espaçamento de visitas, é formulado o seguinte experimento - Os parâmetros de espaçamento de visitas, que vão de 1 ao tamanho da janela, são variados de 1 em 1, o problema correspondente é resolvido e são comparadas as soluções resultantes.

6.2 Resultados Obtidos

6.2.1 Experimento 1

Neste experimento, foram executadas 140 instâncias criadas em Archetti et al. (2007) com o objetivo de verificar se as formulações archetti e EIRP_OU são equivalentes, chegando ao seguinte resultado:

- 97 instâncias foram descartadas nesta análise específica de equivalência, pois os valores ótimos não foram alcançados dentro do limite de 600 segundos de execução, sendo que EIRP_OU foi a única das duas técnicas a sempre encontrar uma solução inteira, mesmo que ainda não ótima, neste intervalo de tempo de execução.
- 43 instâncias obtiveram soluções ótimas dentro do limite de tempo estabelecido e os valores encontrados por archetti e EIRP_OU, considerando a mesma instância, são idênticos.

6.2.2 Experimento 2

Este experimento foi feito visando mostrar comparações de performance entre algumas parametrizações mostradas na Tabela 6.1. As Tabelas 6.6 e 6.7 mostram todos os resultados de

simulação para cada uma das formulações/parametrizações, sendo apresentado o custo (transporte+estoque), o tempo de execução e o gap entre a melhor solução inteira \bar{F} e o limite inferior encontrado \underline{F} . O gap é definido como $gap = \frac{\bar{F} - \underline{F}}{\underline{F}}$. Quando é ultrapassado o limite de tempo de 600 segundos, é retornada a melhor solução encontrada e, quando não é encontrada nenhuma solução inteira, o símbolo ∞ é usado para representar esta situação. Para fazer uma análise mais precisa dos resultados das simulações, são exibidas: em relação ao custo (transporte+estoque) a Tabela 6.2, e em relação ao tempo a Tabela 6.3. Ambas as tabelas estão organizadas da seguinte forma: onde aparece o símbolo “-”, a técnica descrita na linha tem melhor performance (de custo ou de tempo), com margem estatística, em relação à técnica descrita na coluna, onde aparece o símbolo “+”, a técnica descrita na coluna tem melhor performance (de custo e de tempo), com margem estatística, em relação à técnica descrita na linha, e onde aparece um espaço em branco não há diferença estatística, com margem de 0,001, entre os dados gerados pelas duas técnicas.

	archetti	EIRP_OU	EIRP	EIRP_RS_all	EIRP_G_all	EIRP_RSG_all
archetti		-	+	+	+	+
EIRP_OU	+		+	+	+	
EIRP	-	-		+		
EIRP_RS_all	-	-				
EIRP_G_all	-	-	-			-
EIRP_RSG_all	-				+	

Tabela 6.2: Comparação de performance em relação ao custo no Experimento 2

	archetti	EIRP_OU	EIRP	EIRP_RS_all	EIRP_G_all	EIRP_RSG_all
archetti			+	+		
EIRP_OU					-	-
EIRP	-				-	-
EIRP_RS_all	-				-	-
EIRP_G_all		+	+	+		
EIRP_RSG_all		+	+	+		

Tabela 6.3: Comparação de performance em relação ao tempo de execução no Experimento 2

Visando comparar somente as execuções que obtiveram os valores ótimos para a formulação, nas Tabelas 6.4 e 6.5, são apresentadas as comparações entre as formulações, considerando somente as instâncias que alcançaram o valor ótimo para todas as formulações. São mostrados

os resultados das simulações de valores ótimos em relação ao custo (transporte+estoque) na Tabela 6.4 e em relação a tempo na Tabela 6.5. Ambas as tabelas estão organizadas da seguinte forma: onde aparece o símbolo “-”, a técnica descrita na linha tem melhor performance (de custo ou de tempo), com margem estatística, em relação à técnica descrita na coluna, onde aparece o símbolo “+”, a técnica descrita na coluna tem melhor performance (de custo ou de tempo), com margem estatística, em relação à técnica descrita na linha, e onde aparece um espaço em branco não há diferença estatística, com margem de 0,001, entre os dados gerados pelas duas técnicas.

	archetti	EIRP_OU	EIRP	EIRP_RS_all	EIRP_G_all	EIRP_RSG_all
archetti			+	+	+	+
EIRP_OU			+	+	+	+
EIRP	-	-			+	+
EIRP_RS_all	-	-			+	+
EIRP_G_all	-	-	-	-		
EIRP_RSG_all	-	-	-	-		

Tabela 6.4: Comparação de performance em relação ao custo no Experimento 2, considerando somente execuções com valor ótimo

	archetti	EIRP_OU	EIRP	EIRP_RS_all	EIRP_G_all	EIRP_RSG_all
archetti		-			-	-
EIRP_OU	+					
EIRP					-	-
EIRP_RS_all					-	-
EIRP_G_all	+		+	+		
EIRP_RSG_all	+		+	+		

Tabela 6.5: Comparação de performance em relação ao tempo de execução no Experimento 2, considerando somente execuções com valor ótimo

6.2.3 Experimento 3

Este experimento visa mostrar o impacto de restringir a entrega para níveis mínimos e máximos de estoque depois da entrega. A Tabela 6.8 mostra o desempenho em relação a custo (lembrando que é um problema de minimização). Quando é apresentado o símbolo “-”, o

	archetti			EIRP_OU			EIRP			EIRP_SR			EIRP_G			EIRP_SRG		
	custo	tempo	gap															
HH3abs1n05	2710,46	0,02	0	2710,46	0,05	0	2101,76	0,05	0	2101,76	0,06	0	1862,76	0,04	0	1862,76	0,03	0
HH3abs1n10	5305,06	0,08	0	5305,06	6,63	0	4491,24	0,21	0	4491,24	0,34	0	4444,24	0,8	0	4444,24	3,29	0
HH3abs1n15	6734,38	1,52	0	6734,38	20,14	0	5562,31	0,48	0	5562,31	0,66	0	5493,26	4,13	0	5493,26	7,91	0
HH3abs1n20	8398,08	132,53	0	8398,08	600	0,02	6851,34	7,03	0	6851,34	4,99	0	6690,34	26,94	0	6690,34	22,46	0
HH3abs1n25	9781,84	600,01	0,09	9672,6	600	0,04	8210,49	71,1	0	8210,49	131,49	0	7916,49	156	0	7916,49	142,7	0
HH3abs1n30	14259,43	600,08	0,08	13647,95	600	0,04	11974,18	600,04	0,02	11958,18	600	0,01	11757,18	280,86	0	11757,18	480,55	0
HH3abs1n35	∞	∞	∞	13262,05	600	0,02	11566,4	600	0,01	11566,4	600	0,01	11500,4	600,07	0,02	11538,4	600,01	0,03
HH3abs1n40	∞	∞	∞	15425,9	600,08	0,05	13423,67	600	0,02	13395,67	600,04	0,02	13134,67	600	0	13236,67	600,03	0,02
HH3abs1n45	∞	∞	∞	16120,03	600,03	0,01	14484,07	600	0,04	14300,83	600	0,02	14175,83	600,01	0,03	14232,83	600,01	0,03
HH3abs1n50	19189,77	600,08	0,17	16654,01	600,01	0,03	16428,9	600,12	0,13	14604,48	600,01	0,02	14579,48	600,01	0,03	14599,48	600,01	0,03
HH3abs2n05	2241,45	0,01	0	2241,45	0,04	0	1747,37	0,02	0	1747,37	0,03	0	1577,37	0,08	0	1577,37	0,1	0
HH3abs2n10	5252,89	0,33	0	5252,89	0,37	0	4510,27	0,18	0	4510,27	0,25	0	4329,02	1,85	0	4329,02	2,89	0
HH3abs2n15	6614,07	30,4	0	6614,07	50,52	0	5432,82	2,34	0	5432,82	5,26	0	5368,82	2,53	0	5368,82	45,29	0
HH3abs2n20	8081,11	600	0,05	8081,11	586,77	0	7097,04	11,23	0	7097,04	52,75	0	6901,21	196,88	0	6901,21	351,46	0
HH3abs2n25	10334,29	600,02	0,03	10308,29	600	0,03	8754,27	600	0	8754,27	600	0	8709,27	600	0,02	8741,27	600	0,03
HH3abs2n30	12378,63	600,02	0,04	12167,81	600	0	10901,39	94,84	0	10901,39	79,77	0	10808,39	600	0,01	10808,39	600	0,01
HH3abs2n35	∞	∞	∞	12039,38	600,07	0,01	10490,32	570,42	0	10490,32	600	0	10337,29	600,03	0,01	10359,89	600,01	0,02
HH3abs2n40	∞	∞	∞	12939,15	600	0,01	11855	600,06	0,07	11852,19	600,05	0,07	11305,76	600	0,05	11315,99	600,01	0,06
HH3abs2n45	17829,92	600,21	0,2	15038,04	600,07	0,02	13053,72	511,79	0	13053,72	466,54	0	12948,72	600,31	0,01	12948,72	600,08	0,01
HH3abs2n50	∞	∞	∞	16931,33	600,14	0,01	15149,75	600,03	0,03	15080,34	600,12	0,03	15145,31	600,01	0,05	14991,63	600,01	0,03
HH3abs3n05	3918,64	0	0	3918,64	0,06	0	3169,8	0,05	0	3169,8	0,06	0	3006,8	0,15	0	3006,8	0,14	0
HH3abs3n10	4791,11	0,26	0	4791,11	0,28	0	4032,3	0,22	0	4032,3	0,38	0	3759,3	0,32	0	3759,3	0,51	0
HH3abs3n15	7306,44	1,81	0	7306,44	6,57	0	6336,12	0,75	0	6336,12	0,58	0	6116,29	1,93	0	6116,29	9,33	0
HH3abs3n20	9248,64	600,03	0,08	9201,57	216,76	0	7354,76	3,95	0	7354,76	5,38	0	7121,76	5	0	7121,76	16,04	0
HH3abs3n25	11093,5	600,01	0,06	10993,89	600	0,02	9412,65	175,45	0	9412,65	205,84	0	9129,65	58,11	0	9129,65	72,59	0
HH3abs3n30	13550,89	600,01	0,04	13542,89	49,28	0	12087,66	149,65	0	12087,66	100,59	0	11909,66	182,23	0	11909,66	321,51	0
HH3abs3n35	15643,14	600,04	0,05	15485,23	600,01	0,03	13792,85	379	0	13792,85	409	0	13491,85	60,01	0	13491,85	125,52	0
HH3abs3n40	17697,82	600,02	0,19	15266	600,06	0,02	13650,7	600,03	0,01	13796,7	600,06	0,02	13611,7	600	0,02	13667,86	600,01	0,03
HH3abs3n45	∞	∞	∞	17167,74	600,08	0,02	15265,24	600,01	0,03	14895,24	600,01	0	14814,24	600,01	0,01	14841,24	600,01	0,01
HH3abs3n50	∞	∞	∞	17451,39	600,01	0,03	15396,99	600,03	0,02	15586,9	600,01	0,04	15241,45	600	0,03	15307,99	600,01	0,04
HH3abs4n05	2452,77	0	0	2452,77	0,02	0	1953,52	0,04	0	1953,52	0,05	0	1770,52	0,09	0	1770,52	0,07	0
HH3abs4n10	5262,37	0,04	0	5262,37	0,25	0	3890,09	0,12	0	3890,09	0,12	0	3854,09	0,28	0	3854,09	0,6	0
HH3abs4n15	6084,55	7,62	0	6084,55	176,2	0	4930,5	3,55	0	4930,5	3,98	0	4870,62	31,1	0	4870,62	47,72	0
HH3abs4n20	8339,02	227,34	0	8339,02	600	0,04	6892,61	600	0,03	6892,61	600	0,03	6609,61	178,06	0	6609,61	600,01	0,03
HH3abs4n25	10079,33	600,01	0,03	10075,78	8,33	0	8325,9	10,04	0	8325,9	32,62	0	8137,9	38,3	0	8137,9	32,74	0
HH3abs4n30	∞	∞	∞	10978,1	176,9	0	9555,58	338,62	0	9555,58	450,81	0	9443,22	600,02	0,02	9424,95	600,01	0,03
HH3abs4n35	∞	∞	∞	11983,99	600,02	0,01	10243,6	368,52	0	10243,6	523,37	0	10075,6	416,34	0	10075,6	579,75	0
HH3abs4n40	∞	∞	∞	13411,22	600,03	0,01	11190,82	400,16	0	11190,82	460,29	0	11094,82	600,1	0,02	11096,82	600,01	0,02
HH3abs4n45	∞	∞	∞	15247,35	600,01	0,02	13796,12	600	0,04	13745,2	600	0,04	13392,2	600,02	0,03	13451,3	600,01	0,03
HH3abs4n50	20731,2	600,02	0,14	18436,35	600,06	0	16555,67	600,06	0,01	16460,67	600,05	0	16321,67	600,01	0,01	16367,67	600,01	0,02
HH3abs5n05	2473,58	0,02	0	2473,58	0,04	0	2200,44	0,03	0	2200,44	0,03	0	1955,44	0,02	0	1955,44	0,03	0
HH3abs5n10	5677,54	0,22	0	5677,54	0,2	0	4785,66	0,26	0	4785,66	0,26	0	4593,64	0,42	0	4593,64	0,73	0
HH3abs5n15	5775,78	0,1	0	5775,78	0,33	0	4973,28	2,23	0	4973,28	0,89	0	4781,28	8,52	0	4781,28	12,77	0
HH3abs5n20	9246,9	351,4	0	9246,9	600	0,04	7951,94	248,77	0	7951,94	339,53	0	7859,94	600	0,01	7859,94	600	0,02
HH3abs5n25	11555,88	600	0,03	11471,66	600	0,02	10176,4	12,76	0	10176,4	20	0	9944,4	22,8	0	9944,4	47,31	0
HH3abs5n30	12612,49	600,02	0,14	11434,39	600,01	0,02	9807,84	106,65	0	9807,84	113,64	0	9678,84	141,09	0	9678,84	202	0
HH3abs5n35	15629,25	600,07	0,23	12876,62	600	0,02	10867,21	430,22	0	10867,21	182,51	0	10625,12	72,46	0	10625,12	86,99	0
HH3abs5n40	17238,5	600,03	0,19	14875,89	600,05	0,01	13070,34	562,18	0	13070,34	210,95	0	13038,24	600	0,01	13024,34	600	0,01
HH3abs5n45	∞	∞	∞	15622,38	600,08	0,04	13560,63	600,01	0,02	13604,27	600,07	0,02	13499,75	600	0,02	13626,55	600,01	0,04
HH3abs5n50	22325,65	600,1	0,25	18338,34	600,14	0,06	16392,81	600	0,07	16106,81	600	0,05	15662,46	600,01	0,03	15633,87	600,01	0,03
HH6abs1n05	6999,86	0,05	0	6999,86	0,45	0	5734,69	1,41	0	5734,69	1,18	0	5508,79	7,6	0	5508,79	10,18	0
HH6abs1n10	10221,11	0,52	0	10221,11	600	0,05	8459,01	600	0,03	8525,27	600	0,04	8355,08	600	0,08	8238,3	600	0,08
HH6abs1n15	14576,13	343,52	0	14576,13	600	0,02	11988,11	600	0,01	11990,11	600,01	0,02	11836,38	600	0,05	11976,13	600	0,08
HH6abs1n20	17389,02	600,01	0,02	17389,02	600	0,05	14300,54	600	0,06	14360,63	600	0,08	14779,72	600	0,14	14759,28	600,01	0,14
HH6abs1n25	∞	∞	∞	18781,08	600,01	0,07	16365,98	600,19	0,14	15736,2	600	0,12	15753,14	600	0,15	15809,41	600	0,16
HH6abs1n30	∞	∞	∞	27469,81	600,08	0,1	24695,37	600,11	0,13	25240,64	600,08	0,16	∞	∞	∞	∞	∞	∞
HH6abs2n05	5841,25	0,05	0	5841,25	0,65	0	4815,58	1,24	0	4815,58	1,4	0	4563	7,33	0	4563	13,22	0
HH6abs2n10	10223,72	0,57	0	10223,72	33,08	0	8401,64	41,83	0	8401,64	66,78	0	8105,79	600	0,09	8056,65	600	0,09
HH6abs2n15	14340,91	600	0,03	14448,73	600	0,03	11761,19	600,01	0,04	11750,02	600	0,06	11731,55	600,01	0,09	11987,6	600	0,15
HH6abs2n20	16715,35	600,01	0,1	16560,66	600	0,03	14432,81	600,01	0,06	14597,82	600,01	0,1	14650,05	600,08	0,16	14859,66	600	0,17
HH6abs2n25	20487,01	600,04	0,07	19910,74	600,01	0,05	17482	600,01	0,11	17497,7	600,01	0,13	16957,9	600,01	0,12	∞	∞	∞
HH6abs2n30	∞	∞	∞	23368,57	600,09	0,04	20120,63	600,02	0,04	20121,14	600	0,05	∞	∞	∞	∞	∞	∞
HH6abs3n05	8630,78	0	0	8630,78	0,9	0	6786,76	3,53	0	6786,76	3,96	0	6275,76	17,94	0	6275,76	31,83	0
HH6abs3n10	9895,65	2,03	0	9895,65														

	archetti			EIRP_OU			EIRP			EIRP_SR			EIRP_G			EIRP_SRG		
	custo	tempo	gap															
LH3abs1n05	4409,66	0,05	0	4409,66	0,95	0	3179,13	1,83	0	3179,13	2,12	0	2941,68	8,56	0	2941,68	11,57	0
LH3abs1n10	5860,13	1,18	0	5860,13	600	0,08	4134,37	600,01	0,09	4134,37	600	0,05	4040,71	600	0,17	4052,61	600	0,19
LH3abs1n15	7935,68	339,48	0	7950,32	600	0,03	5377	600	0,03	5457,21	600	0,06	5299,05	600	0,13	5658,91	600,03	0,19
LH3abs1n20	9204,22	600,01	0,04	9231,53	600	0,09	6120,64	600,02	0,13	6541,25	600,02	0,21	6217,45	600,08	0,27	6697,79	600,02	0,29
LH3abs1n25	∞	∞	∞	10482,79	600,09	0,14	7558,59	600,11	0,26	7948,99	600,06	0,29	7692,96	600,11	0,36	8224,17	600,06	0,43
LH3abs1n30	∞	∞	∞	12859,31	600,08	0,24	9160,21	600,03	0,24	9194,58	600,03	0,27	∞	∞	∞	∞	∞	∞
LH3abs2n05	3524,87	0,07	0	3524,87	3,29	0	2561,34	7,66	0	2561,34	7,11	0	2313,06	28,57	0	2313,06	32,67	0
LH3abs2n10	6877,52	1,12	0	6877,52	35,89	0	5051,6	35,37	0	5051,6	44,49	0	4752,07	600	0,14	4752,07	600,04	0,17
LH3abs2n15	7907,78	600,03	0,1	7911,52	600	0,03	5414,76	600	0,08	5439,29	600,03	0,12	5405,31	600,04	0,22	5729	600,05	0,31
LH3abs2n20	7994,9	600,01	0,22	7981,66	600,02	0,06	6194,68	600,03	0,18	6320,02	600	0,28	5842,78	600,2	0,34	6455,49	600,17	0,41
LH3abs2n25	∞	∞	∞	10648,15	600,04	0,1	8183,57	600,08	0,25	7799,04	600,04	0,22	∞	∞	∞	∞	∞	∞
LH3abs2n30	∞	∞	∞	10767,71	600,14	0,06	8493,04	600,51	0,18	8215,91	600,08	0,16	∞	∞	∞	10438,85	600,29	0,4
LH3abs3n05	6402,92	0,01	0	6402,92	15,97	0	4505,26	48,2	0	4505,26	59,56	0	3994,26	131,38	0	3994,26	119,91	0
LH3abs3n10	6016,57	3,04	0	6016,57	31,85	0	4515,56	55,42	0	4515,56	82,35	0	4287,92	600,1	0,05	4298,22	600,17	0,07
LH3abs3n15	7930,44	9,66	0	7930,44	289,12	0	6057,35	600,03	0,07	5928,16	600,17	0,07	5830,16	600,35	0,17	6136,85	600,02	0,22
LH3abs3n20	∞	∞	∞	10469,82	600,03	0,03	6834,39	600,07	0,12	6947,72	599,99	0,15	7462,16	600,07	0,32	7775,74	600,99	0,36
LH3abs3n25	∞	∞	∞	11434,34	600,26	0,17	8145,62	600,02	0,25	9629,67	607,2	0,39	10511,93	628,17	0,49	17066,25	601,9	0,68
LH3abs3n30	∞	∞	∞	16871,41	611,22	0,41	18949,16	680,26	0,65	16928,31	655,22	0,61	∞	∞	∞	∞	∞	∞
LH3abs4n05	4701,34	0	0	4701,34	5,01	0	3162,97	171,48	0	3162,97	245,15	0	2840,45	605,88	0,07	2840,45	603,74	0,09
LH3abs4n10	7600,41	0,14	0	7600,41	600,46	0,03	5785,71	606,07	0,31	5242,53	602,72	0,18	6040,93	603,9	0,37	6067,84	640,63	0,35
LH3abs4n15	7966,45	600	0,07	9899,36	608,71	0,32	9393,41	605,61	0,56	8739,16	605,47	0,53	9649,8	600,62	0,59	7261,65	605,75	0,47
LH3abs4n20	11121,19	600,01	0,11	15223,64	627,1	0,38	15984,23	631,81	0,66	12994,67	623,91	0,55	14052,8	602,9	0,61	13806,92	609,06	0,6
LH3abs4n25	∞	∞	∞	14927,46	616,41	0,29	21705,65	659,79	0,72	11983,8	600,37	0,47	10081,53	603,51	0,42	∞	∞	∞
LH3abs4n30	∞	∞	∞	11516,93	600,78	0,08	11091,34	601,97	0,44	9982,79	607,68	0,37	∞	∞	∞	∞	∞	∞
LH3abs5n05	2834,13	0,03	0	2834,13	11,42	0	2280,23	15,69	0	2280,23	16,86	0	2040,58	600,9	0,05	1980,2	587,55	0
LH3abs5n10	6790,01	20,23	0	6790,01	43,47	0	4571,46	159,26	0	4571,46	609,15	0,04	4414,44	610,62	0,17	4618,52	600,06	0,21
LH3abs5n15	7155,17	1,52	0	7155,17	4,31	0	5382,43	600,06	0,13	5241,7	609,29	0,11	5080,36	611,53	0,23	5841,39	601,67	0,32
LH3abs5n20	9936,68	600	0,08	12108,35	609,31	0,31	9428,34	606,15	0,45	12192,92	603,3	0,56	7855,43	613,02	0,37	10953,05	604,47	0,56
LH3abs5n25	∞	∞	∞	11808,64	615,3	0,23	16495,49	600,74	0,63	13835,08	619,35	0,56	8430,7	606,64	0,36	11486,24	600,34	0,53
LH3abs5n30	∞	∞	∞	18337,26	603,1	0,5	14494,71	600,66	0,6	20596,34	600,51	0,72	∞	∞	∞	∞	∞	∞
LH6abs1n05	4409,66	0,05	0	4409,66	0,49	0	3179,13	1,2	0	3179,13	1,44	0	2941,68	6,7	0	2941,68	10,53	0
LH6abs1n10	5860,13	1,16	0	6119,87	601,28	0,15	4585,03	604,1	0,26	4184,61	608,27	0,18	4921,66	600,79	0,42	4895,84	600,71	0,39
LH6abs1n15	7935,68	330,77	0	8359,69	605,73	0,13	6580,4	610,38	0,29	5878,39	613,35	0,17	5978,21	630,7	0,26	7405,06	634,42	0,49
LH6abs1n20	9204,22	600,01	0,04	14280,86	600,56	0,49	9290,2	600,31	0,48	8599,28	600,3	0,43	8008,78	615,61	0,44	9672,97	618,25	0,51
LH6abs1n25	∞	∞	∞	11383,62	602,52	0,23	10422,31	606,97	0,49	11320,68	610,14	0,54	13313,95	606,98	0,64	9227,32	612,01	0,49
LH6abs1n30	∞	∞	∞	17686,05	608,7	0,48	16447,93	606,98	0,61	16908,75	665,39	0,63	∞	∞	∞	∞	∞	∞
LH6abs2n05	3524,87	0,06	0	3524,87	47,21	0	2561,34	229,66	0	2561,34	212,18	0	2313,06	608,19	0,15	2340,96	601,06	0,2
LH6abs2n10	6877,52	1,11	0	6909,52	603,46	0,04	5354,45	634,29	0,17	5499,15	604,75	0,21	5085,07	605,73	0,33	6236,27	635,68	0,46
LH6abs2n15	7907,78	600,04	0,1	8998,78	601,19	0,18	7006,86	603,79	0,36	7726,73	600,36	0,47	7127,2	604,91	0,46	6723,03	602,53	0,43
LH6abs2n20	7994,9	600,03	0,22	8984,6	604,81	0,23	7944,72	604,42	0,44	11724,44	600,6	0,66	8853,14	611,63	0,57	∞	∞	∞
LH6abs2n25	∞	∞	∞	12762,37	608,55	0,26	16344,55	604,7	0,65	17468,93	650,38	0,67	∞	∞	∞	∞	∞	∞
LH6abs2n30	∞	∞	∞	22815,45	638,12	0,57	18246,99	617,46	0,64	16343,21	680,4	0,6	∞	∞	∞	14450,13	607,08	0,6
LH6abs3n05	6402,92	0	0	6402,92	478,58	0	4697,26	601,36	0,18	4568,26	606,59	0,16	4201,51	604,6	0,24	4029,8	603,89	0,22
LH6abs3n10	6016,57	3,06	0	6104,93	623,8	0,04	5441,97	614,68	0,3	5878,55	626,62	0,35	4813,92	610,13	0,34	6700,36	635,03	0,5
LH6abs3n15	7930,44	9,61	0	8884,36	611,32	0,16	10955,28	645,61	0,54	9413,95	611,47	0,46	8612,29	620,28	0,46	11921,06	612,59	0,67
LH6abs3n20	∞	∞	∞	14708,03	624,01	0,41	13244,42	634,31	0,6	15143,85	606,69	0,65	9093,87	607,7	0,45	∞	∞	∞
LH6abs3n25	∞	∞	∞	17484,04	602,69	0,51	20711,49	642,46	0,73	∞	∞	∞	10775,33	654,62	0,5	∞	∞	∞
LH6abs3n30	∞	∞	∞	16871,41	630,48	0,41	20168,1	603,14	0,67	16928,31	675,71	0,61	∞	∞	∞	∞	∞	∞
LH6abs4n05	4701,34	0	0	4701,34	8,86	0	3162,97	402	0	3162,97	495,24	0	2840,45	602,68	0,11	2840,45	609,64	0,12
LH6abs4n10	7600,41	0,13	0	7619,41	601,64	0,03	6496,49	610,92	0,38	7337,67	607,97	0,43	6040,93	618,69	0,37	6067,84	635,33	0,35
LH6abs4n15	7966,45	600	0,07	10291,45	613,82	0,34	9583,35	634,65	0,57	8739,16	617,56	0,53	9649,8	604,58	0,59	∞	∞	∞
LH6abs4n20	11121,19	600,01	0,11	15223,64	636,64	0,38	15984,23	608,19	0,66	12994,67	609,6	0,55	14052,8	604,96	0,61	13806,92	607,16	0,6
LH6abs4n25	∞	∞	∞	11274,4	604,5	0,01	9950,37	602,44	0,35	11441,83	611,86	0,44	8871,11	604,2	0,34	∞	∞	∞
LH6abs4n30	∞	∞	∞	11516,93	600,93	0,08	9690,41	611,49	0,36	12373,89	625,72	0,49	∞	∞	∞	∞	∞	∞
LH6abs5n05	2834,13	0,03	0	2834,13	24,87	0	2280,23	35,2	0	2280,23	44,04	0	2040,58	615,45	0,12	1980,2	611,22	0,09
LH6abs5n10	6790,01	20,14	0	6790,01	155,11	0	4571,46	615,43	0,11	5128,84	600,38	0,24	4830,96	619,69	0,29	5283,16	601,31	0,43
LH6abs5n15	7155,17	1,51	0	7155,17	50,58	0	9223,23	626,6	0,55	6169,89	602,94	0,3	6009,96	612,22	0,43	6893,53	609	0,43
LH6abs5n20	9936,68	600,01	0,08	15099,32	631,11	0,46	13838,3	630,01	0,63	14691,24	654,69	0,65	8083,43	602,85	0,39	∞	∞	∞
LH6abs5n25	∞	∞	∞	11808,64	610,23	0,23	16495,49	731,67	0,63	13835,08	704,01	0,56	10182,91	614,38	0,51	13072,49	604,85	0,59
LH6abs5n30	∞	∞	∞	18337,26	680,99	0,5	18779,34	626,99	0,69	20596,34	688,2	0,72	∞	∞	∞	∞	∞	∞

Tabela 6.7: Resultados das as instâncias para o custo de estoque e transporte, tempo de execução e gap (Parte 2).

problema é infactível para os parâmetros considerados. A Tabela 6.9 mostra o desempenho em relação a tempo de execução. Os parâmetros usados são os mesmos da Tabela 6.1, exceto pelos parâmetros de consistência.

A organização das Tabelas 6.8 e 6.9 consiste em: a coluna representa o nível mínimo de estoque após uma visita de Transportador e a linha representa o nível máximo admissível de estoque após uma visita de Transportador. Então, por exemplo, na terceira coluna e oitava linha, são apresentadas as performances para quando o nível mínimo de estoque admissível é de 20% e o máximo é de 80% após a visita.

Nível Máximo de Estoque \ Nível Mínimo de Estoque	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0,1	-									
0,2	-	-								
0,3	-	-	-							
0,4	-	-	-	-						
0,5	3404.75	3404.75	3404.75	3404.75	3405.18					
0,6	3404.08	3404.08	3404.08	3404.08	3405.00	3407.04				
0,7	2541.09	2541.09	2541.09	2541.09	2541.09	2541.09	2542.94			
0,8	2540.13	2540.13	2540.13	2540.13	2540.13	2540.13	2542.78	-		
0,9	2539.77	2539.77	2539.77	2539.77	2539.77	2539.77	2542.78	-	-	
1	2280.23	2280.23	2280.23	2280.23	2426.51	2427.07	2427.77	2710.21	-	-

Tabela 6.8: Desempenho variando parâmetros de consistência de entrega no Experimento 3

Nível Máximo de Estoque \ Nível Mínimo de Estoque	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0,1	0,000									
0,2	0,00	0,00								
0,3	0,00	0,00	0,00							
0,4	0,00	0,00	0,00	0,00						
0,5	1,56	1,47	1,84	1,76	1,61					
0,6	5,04	2,80	2,58	2,95	2,52	0,64				
0,7	0,75	0,70	0,77	1,12	0,78	0,74	0,21			
0,8	0,86	0,94	0,81	0,80	0,36	0,76	0,24	0,00		
0,9	1,11	0,86	0,97	0,39	0,87	0,22	0,24	0,00	0,00	
1	0,27	0,31	0,35	0,31	1,45	1,40	0,32	0,04	0,00	0,00

Tabela 6.9: Tempo em segundos variando parâmetros de consistência de entrega no Experimento 3

6.2.4 Experimento 4

Este experimento visa mostrar o impacto de restringir intervalo de visita, para níveis mínimos (não pode existir outra entrega naquela janela) e máximos (deve existir outra entrega nesta janela). A Tabela 6.10 mostra o desempenho em relação a custo (lembrando que é um problema de minimização) e quando é apresentado o símbolo “-”, o problema é infactível para os parâmetros considerados. A Tabela 6.11 mostra o desempenho em relação a tempo de execução. Os parâmetros usados foram os mesmos da Tabela 6.1, exceto pelos parâmetros de consistência.

A organização das Tabelas 6.10 e 6.11 consiste em: a coluna representa a quantidade de tempo, em períodos de planejamento, para o qual deve existir no máximo uma entrega para um dado cliente, e a linha representa a quantidade de tempo, em períodos de planejamento, para o qual deve existir no mínimo uma entrega para um dado cliente. Então, por exemplo, na terceira coluna e quinta linha são apresentadas as performances quando deve existir no máximo uma entrega a cada dois dias e no mínimo uma entrega a cada cinco dias.

Tempo para no mínimo uma entrega \ Tempo para no máximo uma entrega	0	1	2	3	4	5
1	5449,56					
2	3015,31	3015,31				
3	2285,58	2285,58	2518,40			
4	2280,23	2280,23	2428,79	-		
5	2280,23	2280,23	2428,79	-	-	
6	2280,23	2280,23	2428,79	-	-	-

Tabela 6.10: Desempenho variando parâmetros de janela de entrega no Experimento 4

Tempo para no mínimo uma entrega \ Tempo para no máximo uma entrega	0	1	2	3	4	5
1	0,34					
2	0,29	0,30				
3	0,26	0,31	0,15			
4	0,23	0,22	0,09	0,00		
5	0,20	0,20	0,12	0,00	0,00	
6	0,26	0,25	0,17	0,00	0,00	0,00

Tabela 6.11: Tempo em segundos variando parâmetros de janela de entrega no Experimento 4

6.3 Análise dos Resultados Obtidos

6.3.1 Experimento 1

Neste experimento, pode-se perceber que a formulação proposta generaliza a formulação de Archetti et al. (2007). Apesar de não ser possível verificar a contingência de algumas instâncias, pois estas não alcançaram o ótimo dentro do tempo estabelecido, para todas as instâncias nas quais o ótimo é alcançado, não existe diferença entre os resultados de archetti e EIRP_OU para uma mesma instância. Com isso, é possível mostrar que as formulações archetti e EIRP_OU levam a soluções equivalentes.

6.3.2 Experimento 2

Neste experimento, é possível constatar que a performance de custos é superior quanto mais generalista for o modelo. Isso é bastante evidente nas execuções que alcançam o custo ótimo, observado na Tabela 6.4, onde as formulações EIRP e EIRP_RS_all são superiores às abordagens

archetti e EIRP_OU, que forçam preenchimento. As abordagens que permitem que qualquer nó seja garagem possuem custo menor que as quatro formulações/parametrizações anteriores. Nas Tabelas 6.6 e 6.7, é possível perceber que as abordagens que decidem o nó inicial/final têm dificuldades para encontrar custos ótimos e, por isso, na Tabela 6.2 estas não conseguem ter performances da mesma qualidade da Tabela 6.4, que apenas apresenta os resultados para os quais foi atingido o ótimo.

Na questão de eficiência computacional, as Tabelas 6.3 e 6.5 mostram que as parametrizações mais generalistas levam a tempos computacionais piores que as mais específicas.

É possível notar que não existe uniformidade de performance nas Tabelas 6.6 e 6.7 quando comparado EIRP_OU e archetti. Isso é devido ao fato de EIRP_OU incluir as Restrições 5.12 e 5.13 que forçam a existência de somente uma subrota por fornecedor auxiliando na eliminação de subrotas, enquanto archetti somente inclui subrotas iterativamente durante o processo branch-and-bound. Estas formas diferentes de tratar a eliminação de subrotas explicam a variabilidade de desempenho de tempo de execução encontrada.

6.3.3 Experimento 3

Na Tabela 6.8, é possível observar que este problema é mais sensível ao limite superior de entrega que ao inferior. Ao reduzir o limite de 1 para 0,9, já existe perda de performance, enquanto que para o limite mínimo de entrega só há perda de performance de custo sensível a partir de 0,4. É interessante notar também que, quando não é possível encher todo o estoque (abaixo de 0,9) existe um grande grupo com custos muito próximos entre o limite mínimo de 0 a 0,6 e limite máximo entre 0,7 e 0,9, assim como existe outro agrupamento com limite mínimo entre 0 e 0,5 e máximo entre 0,5 e 0,6. Já a Tabela 6.9, referente a tempo de execução, mostra tempos de execução próximos, exceto para os modelos infactíveis.

6.3.4 Experimento 4

Na Tabela 6.10, é possível perceber que, quando há espaçamento de entregas, impedindo que existam visitas consecutivas (coluna maior que dois) o custo aumenta de forma considerável. Além disso, impedir que em três dias haja ao menos uma visita infactibiliza o planejamento. Por outro lado, forçar visitas dentro de um intervalo se mostra muito ineficiente, quando se obriga a existir uma visita por dia ou uma visita a cada dois dias. Conclui-se também que forçar a existência de entregas a cada 3 ou mais dias é praticamente indiferente para o planejamento. Já a Tabela 6.11, referente a tempo de execução, mostra tempos de execução próximos, exceto para os modelos infactíveis.

Conclusões e Perspectivas Futuras

Este trabalho propôs uma nova formulação para o Problema de Roteamento e Estoque visando estender certas características deste problema e ser mais abrangente no contexto da cadeia de suprimentos controlada pelo fornecedor. Cria-se, assim, a possibilidade de dar suporte a várias formulações distintas, como atribuindo características de produtor, consumidor, armazém ou garagem sem a necessidade de modificar o modelo, apenas modificando parâmetros de entrada. Cria-se, assim, uma ferramenta flexível para o planejamento de entregas, por ser capaz de lidar com uma grande margem de possibilidades de organização da cadeia de suprimentos. Com isso, viabilizam-se estudos de otimização de cadeias de suprimento já existentes, permitindo mensurar os efeitos vinculados a alterações de interesse e à criação de novas cadeias.

A formulação proposta se mostrou capaz de se adaptar a vários contextos do problema pela simples manipulação de parâmetros de entrada, o que mostra uma grande vantagem em termos práticos para o usuário do sistema. Possivelmente pelo fato de ser mais abrangente, a formulação não mostrou melhora em eficácia em tempo de execução, comparado com a proposta de Archetti et al. (2007). Entretanto, algumas parametrizações, como EIRP e EIRP_RS_all trouxeram melhores resultados de custo de transporte e estoque em geral e as parametrizações EIRP_G_all e EIRP_RSG_all se mostraram mais eficazes que as anteriores, mas somente em pequenas instâncias. Além disso, a formulação propostas se mostrou capaz de expandir as perspectivas de análise do comportamento da rede de suprimentos, conforme verificado nas análises de consistência de entrega.

A formulação proposta é bastante abrangente para considerar várias conformações das cadeias de suprimentos, tornando-se uma ferramenta eficaz para a promoção de planejamento de características e na análise de comportamentos da cadeia. Assim, é possível otimizar o planejamento de entrega e analisar o comportamento desses planejamentos para um conjunto de cadeias de suprimento com características flexíveis.

Perspectivas Futuras

Devido à maior abrangência e generalidade da formulação estendida para o IRP, ela requer a definição de um maior número de variáveis de decisão. Isso implica em um aumento de custo computacional para se chegar à solução e também requer um maior investimento por parte do

usuário na especificação da configuração dos requisitos do IRP.

Identificam-se os seguintes temas para trabalhos futuros: Investigação de formulações mais eficazes em tempo computacional; Heurísticas ou técnicas exatas especializadas para a formulação; Implementações multiobjetivo; Projeto e criação de experimentos mais aprimorados para a análise da cadeia de suprimentos, investigando alguns aspectos como, por exemplo, o efeito-chicote, obsolescência e perda de entrega; Criação, tanto no contexto determinístico quanto estocástico, de formulações com entregas periódicas, melhorando a análise do comportamento das entregas em regime permanente.

Bibliografia

- H. Andersson, A. Hoff, M. Christiansen, G. Hasle & A. Lø kketangen. Industrial aspects and literature survey: Combined inventory management and routing. *Computers & Operations Research*, 37(9):1515–1536, 2010.
- C. Archetti, L. Bertazzi, G. Laporte & M. G. Speranza. A Branch-and-Cut Algorithm for a Vendor-Managed Inventory-Routing Problem. *Transportation Science*, 41(3):382–391, 2007.
- C. Archetti, L. Bertazzi, A. Hertz & M. G. Speranza. A Hybrid Heuristic for an Inventory Routing Problem. *INFORMS Journal on Computing*, 24(1):101–116, 2011.
- N. A. B. Aziz & N. H. Mom. Genetic algorithm based approach for the multi product multi period inventory routing problem. *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, pages 1619–1623. IEEE, 2007.
- R. M. Azuma, G. P. Coelho & F. J. Von Zuben. Evolutionary multi-objective optimization for the vendor-managed inventory routing problem. *Proceedings of the 2011 IEEE Congress of Evolutionary Computation (CEC)*, pages 1457–1464, 2011.
- J. F. Bard & L. Huang. A decomposition approach to the inventory routing problem with satellite facilities. *Transportation Science*, pages 189–203, 1998.
- E. J. Beltrami & L. D. Bodin. Networks and vehicle routing for municipal waste collection. *Networks*, pages 65–94, 1974.
- L. Bertazzi, G. Paletta & M. G. Speranza. Deterministic Order-Up-To Level Policies in an Inventory Routing Problem. *Transportation Science*, 36(1):119–132, 2002.
- L. Bertazzi, G. Paletta & M. G. Speranza. Minimizing the Total Cost in an Integrated Vendor—Managed Inventory System. *Journal of Heuristics*, 11(5-6):393–419, 2005.
- L. Bertazzi, M. Savelsbergh & M. G. Speranza. *Inventory Routing*, volume 43 of *Operations Research/Computer Science Interfaces*. Springer, 2008.
- A Campbell. Inventory routing in practice. In *The vehicle routing problem*, pages 1–24. 2002.

- A. Campbell & L. Clarke. The inventory routing problem. *Fleet management and Logistics*, pages 95–113, 1998.
- A. Campbell & M. W. P. Savelsbergh. A Decomposition Approach for the Inventory-Routing Problem. *Transportation Science*, 38(4):488–502, 2004.
- J. Chen, Y. Zhang & C. Shi. The Application of Supply Chain Management Performance Model Based on VMI. *Proceedings of the 2009 International Conference on Management and Service Science*, pages 1–5. IEEE, 2009.
- L. C. Coelho, J. Cordeau & G. Laporte. The inventory-routing problem with transshipment. *Computers & Operations Research*, 39(11):2537–2548, 2012a.
- L. C. Coelho, J. Cordeau & G. Laporte. Consistency in multi-vehicle inventory-routing. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 24:270–287, 2012b.
- L. C. Coelho & G. Laporte. The exact solution of several classes of inventory-routing problems. *Computers & Operations Research*, 40(2):558–565, 2013.
- S.M. Disney & D.R. Towill. The effect of vendor managed inventory (VMI) dynamics on the Bullwhip Effect in supply chains. *International Journal of Production Economics*, 85(2): 199–215, 2003.
- M. Dror, M. Ball & B. Golden. A computational comparison of algorithms for the inventory routing problem. *Annals of Operations Research*, 4(1):1–23, 1985.
- S. Gavirneni. Price fluctuations, information sharing & supply chain performance. *European Journal of Operational Research*, 174(3):1651–1663, 2006.
- M. Geiger, M. Sevaux, J. Pahl, T. Reiners & S. Voß. The Biobjective Inventory Routing Problem – Problem Solution and Decision Support. Volume 6701 of the *Lecture Notes in Computer Science*, pages 365–378, Springer 2011.
- K. Govindan. Vendor managed inventory: A review based on dimensions. *International Journal of Production Research*, 51(13):3808–3835, 2013.
- C. Hsieh & S. Laio. A multiobjective evolutionary approach for an integrated location-inventory problem in vendor-managed inventory systems. *Proceedings of the 40th International Conference on Computers & Industrial Engineering*, pages 1–6. IEEE, 2010.
- X. Huang, L. Lin & Y. Xiong. Analysis of extra cost for small suppliers under VMI condition. In *Proceedings of the International Conference on Service Systems and Service Management*, pages 626–629 Vol. 1, 2005.
- G. Kuk. Effectiveness of vendor-managed inventory in the electronics industry: determinants and outcomes. *Information & Management*, 41(5):645–654, 2004.

- A. H. Land & A. G. Doig. An automatic method of solving discrete programming problems. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 28(3):497–520, 1960.
- N. H. Moin & S. Salhi. Inventory routing problems: a logistical overview. *Journal of the Operational Research*, 58(9):1185–1194, 2006.
- N. H. Moin, S. Salhi & N. A. B. Aziz. An efficient hybrid genetic algorithm for the multi-product multi-period inventory routing problem. *International Journal of Production Economics*, 133(1):334–343, 2011.
- S. P. Nachiappan & N. Jawahar. A genetic algorithm for optimal operating parameters of VMI system in a two-echelon supply chain. *European Journal of Operational Research*, 182(3):1433–1452, 2007.
- D. Shuai, L. Yanhui & Y. Lan. Combine cost and time satisfaction into a multi-objective programming for integrated logistics system. *Proceedings of the 2011 International Conference on Computer Science and Service System (CSSS)*, pages 283–287, 2011.
- R. K. Singh. Analyzing the Factors for VMI Implementation: A Framework. *Global Business Review*, 14(1):169–186, 2013.
- M. Sta, S. Sarpola & S. Mattsson. Framework for characterizing the design of VMI systems. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 37(10):782–798, 2007.
- P. Wu, K. Yang, Y. Hung & B. Huang. The Study of VMI Inventory Decision Support System Using Neural Network Technology. *Proceedings of the 2008 3rd International Conference on Innovative Computing Information and Control*, pages 323–323, 2008.

Branch-and-bound e inserção de restrições

O algoritmo branch-and-bound é empregado para a solução de problemas de programação matemática, foi proposto em Land & Doig (1960) e se baseia em resolver iterativamente relaxações dos problemas iniciais, gerando, a partir dessas relaxações, divisões no espaço de busca e promovendo posteriormente o descarte de regiões não promissoras. Para os problemas de programação linear-inteira, são resolvidas relaxações lineares do problema, que consistem na mesma formulação inteira, mas sem a exigência de que o valor seja inteiro, até que se encontre a melhor solução inteira.

Inicialização: Para facilitar a compreensão do algoritmo, este será concebido tendo uma fila de formulações e uma proposta de solução que vai corresponder à melhor solução encontrada. A fila é iniciada com a formulação da relaxação linear do problema, a proposta inicial para a melhor solução é vazia e o seu valor é considerado infinito.

Condição de Parada: Fila vazia.

Iteração: Uma formulação é desenfileirada e resolvida. **(1)** Se o valor da função-objetivo for superior ao valor da melhor solução ou o modelo for infactível: Descarte a solução (bound). **(2)** Se o valor de todas as variáveis for inteiro: Guarde essa solução como a melhor. **(3)** Se existir alguma variável com valor não inteiro: Escolha uma variável qualquer x não inteira de valor a e enfileire duas formulações: uma adicionando a restrição $x \geq \lceil a \rceil$ e outra adicionando a restrição $x \leq \lfloor a \rfloor$ (branch).

Finalização: Se existir uma solução, retorne como a melhor. Se não, o modelo é infactível.

A **inserção de restrições** consiste em adicionar uma condição no passo **(2)**, ou seja, se existe alguma característica não desejável na solução inteira encontrada, adicione restrições ao problema, e continue a partir daquele ponto. Por exemplo, caso seja encontrado um subciclo no problema do caixeiro viajante, menor que o tamanho total do ciclo, adicione uma restrição que elimine somente esse subciclo.