



**Eduardo Mathiasi Chrispim**

**Aplicação do Problema de Estoques e  
Roteamento com Transbordo em um Cenário  
Multiproduto e Multiperíodo**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Logística do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Hugo Miguel Varela Repolho

Rio de Janeiro  
Março de 2016



**Eduardo Mathiasi Chrispim**

**Aplicação do Problema de Estoques e  
Roteamento com Transbordo em um Cenário  
Multiproduto e Multiperíodo**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Curso de Mestrado Profissional em Logística do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio. Aprovada pela comissão examinadora abaixo assinada.

**Prof. Hugo Miguel Varela Repolho**

Orientador

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

**Prof. Fernando Luiz Cyrino Oliveira**

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

**Prof. José Eugênio Leal**

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

**Prof. Marcio da Silveira Carvalho**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 16 de Março de 2016

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem a autorização do autor, do orientador e da universidade.

### **Eduardo Mathiasi Chripim**

Graduou-se em Engenharia de Produção na UFJF (Universidade Federal de Juiz de Fora) em 2007. Pós-graduado em Engenharia de Materiais e Metalurgia pela PUC-Rio em 2008. Atua como Gerente de *Supply Chain* na empresa *British American Tobacco* em Londres, Reino Unido.

#### Ficha Catalográfica

Chripim, Eduardo Mathiasi

Aplicação do Problema de Estoque e Roteamento com Transbordo em um Cenário Multiproduto e Multiperíodo / Eduardo Mathiasi Chripim; orientador: Hugo Miguel Varela Repolho. – 2015.

v., 60 f.: il.; 29,7 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, 2015.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Roteamento. 3. Cadeia de distribuição. I. Repolho, Hugo Miguel Varela. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. III. Título.

CDD: 658.5

## Agradecimentos

Aos meus pais, Eduardo e Rosely, por todo o incentivo, exemplo e paciência.

À Souza Cruz e ao grupo British American Tobacco, pelas horas de trabalho cedidas e por me oferecer tantas oportunidades de desenvolvimento profissional aplicando-se o conhecimento acadêmico adquirido nesta jornada.

Ao corpo acadêmico da PUC-Rio, e em especial ao meu professor orientador Hugo Repolho, por acreditarem no meu potencial e disciplina para conduzir esta pesquisa à distância.

## Resumo

Chrispim, Eduardo Mathiasi; Repolho, Hugo Miguel Varela (orientador). **Aplicação do Problema de Estoque e Roteamento com Transbordo em um Cenário Multiproduto e Multiperíodo**. Rio de Janeiro, 2015. 60p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho propõe uma melhoria para o sistema de abastecimento de uma empresa brasileira do segmento de tabaco através da aplicação do Problema de Estoque e Roteamento. O modelo engloba a rede de abastecimento dos fornecedores para a fábrica principal, buscando-se maximizar a eficiência na cadeia de fornecimento através de um processo de planejamento mais equilibrado e eficiente. O objetivo é minimizar os custos de estoque e transporte. Três sistemas de distribuição diferentes são analisados: ponto-a-ponto, muitos-para-um (roteamento de veículos) e roteamento de veículos com transbordo entre fornecedores. Os resultados obtidos evidenciam que os sistemas de distribuição de muitos-para-um reduzem consideravelmente os custos, ao mesmo tempo benefícios de transbordo são mais visíveis quando o número de períodos considerados na análise aumentam. Especificamente, a solução obtida para o cenário com transbordo e com quatro períodos de planejamento reduz os custos logísticos em 58,74% quando comparado com a presente solução.

## Palavras-chave

Planejamento de Distribuição; Estoque e Roteamento; Otimização; Inventory Routing Problem.

## Abstract

Chrispim, Eduardo Mathiasi; Repolho, Hugo Miguel Varela (advisor). **An Application of Inventory Routing Problem with Transshipment in a Multi-Product and Multi-Period Scenario**. Rio de Janeiro, 2015. 60p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This research proposes an improvement for the supply system of a Brazilian tobacco company, Souza Cruz, through the application of an Inventory Routing Problem Optimization Model. The model encompasses the supply network from suppliers to the main factory, seeking to maximize efficiency in supply chain through a more balanced and efficient planning process. The objective is to minimize inventory and transportation costs. We analyse three different distribution systems: point-to-point, many-to-one (vehicle routing), and vehicle routing with transshipment between suppliers. The results obtained evince that many-to-one distribution systems reduce costs considerably, while transshipment benefits are more visible when the number of periods considered in the analysis increase. Specifically, the solution obtained for the scenario with transshipment and considering four periods reduces logistic costs in 58.74% when compared to the present solution.

## Keywords

Distribution Planning; Inventory and Routing.

# Sumário

1. Introdução	11
1.1. Motivação	11
1.2. Objetivo do Trabalho	14
1.3. Delimitação do Escopo	16
1.4. Estrutura da Dissertação	17
2. Referencial Teórico	18
2.1. Gestão da Cadeia de Suprimentos (SCM, do inglês <i>Supply Chain Management</i> )	18
2.1.1. Colaboração em Supply Chain Management	19
2.2. Problema de Estoque e Roteirização em um contexto VMI	20
2.3. Problemas de Roteirização com Transbordo	21
2.4. Tipologia dos Problemas de IRP	22
2.4.1. Aplicação dos Problemas de IRP	25
2.4.2. Definição do IRP clássico	26
2.4.3. Definição do IRP em um cenário multiproduto e com transbordo	29
3. Aplicação Real	34
3.1. Introdução	34
3.1.1. O Mercado da Souza Cruz	34
3.2. A Logística da Souza Cruz	35
3.2.1. O Ciclo Produtivo	36
3.3. Escopo de Aplicação do Problema de IRP	38
3.3.1. Levantamento de Dados	39
4. Apresentação dos Resultados	43
4.1. Cenários Avaliados	43
4.2. Resultados obtidos	44
4.3. Definição das Rotas Ótimas	46

4.4. Resultados Financeiros	50
4.5. Resultados Não Financeiros	51
5. Conclusão	54
Referências Bibliográficas	57



## Lista de Figuras

Figura 1 - Decisões Logísticas (Adaptado de Xia, 2013)	13
Figura 2 – Modelos de Abastecimento	15
Figura 3 - Modelo de Abastecimento Roteirizado com Transbordo, onde os triângulos representam o estoque acumulado no respectivo nó	16
Figura 4 - Classificação dos IRPs	24
Figura 5 - Participação de Mercado	35
Figura 6 - Principais Unidades da Souza Cruz	38
Figura 7 - Rede Logística em Escopo	40
Figura 8 - Custos Totais	44
Figura 9 - Composição dos Custos: Média Semanal	46
Figura 10 - Distâncias Totais Percorridas (em quilômetros)	47
Figura 11 - Resultado Gráfico do Roteamento	48
Figura 12 - Resultado Gráfico do Roteamento com 4 Semanas	50
Figura 13 - Benefícios Financeiros	51

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Componentes do <i>Supply Chain</i> , adaptado de Bozarth & Handfield (2006).	19
Tabela 2 - Tipologia dos Problemas de IRP (Coelho et al., 2012)	23
Tabela 3 - Distâncias Rodoviárias	40
Tabela 4 – Demanda Semanal por Fornecedor	41
Tabela 5 - Dados da Frota de Veículos	41
Tabela 6 - Resultado Ótimo sem Transbordo	47
Tabela 7 - Resultado Ótimo com Transbordo	48
Tabela 8 - Resultado Ótimo com Transbordo e Horizonte de 4 Semanas	49

## Introdução

Ao longo dos anos, as técnicas de pesquisa operacional têm contribuído significativamente para reduzir os custos envolvidos nos sistemas logísticos de forma a maximizar a utilização dos recursos empregados. Dentre os problemas clássicos da literatura, encontra-se o Problema de Estoque e Roteamento, que busca integrar as decisões de estoque e transporte minimizando os custos totais envolvidos na cadeia.

O trabalho em questão trata da aplicação real do Problema de Estoque e Roteamento em uma empresa de bens de consumo, suportando a função de planejamento da mesma a tomar decisões mais assertivas embasadas pela otimização do sistema de abastecimento.

## Motivação

Os avanços tecnológicos e o aumento da competição global observados nas últimas décadas tem pressionado as empresas a buscarem alternativas que visam a maximização da satisfação de seus clientes ao menor custo possível. Neste contexto, a Gestão da Cadeia de Suprimentos – também denominada na literatura pelo termo em inglês *Supply Chain Management* – tem tido um papel de destaque, uma vez que abrange diversas funções das empresas. *Supply Chain Management* (SCM) envolve a gestão de material e fluxo de informação de um produto a partir do ponto de origem ao consumo final e posterior descarte. Engloba, portanto, “todos os processos e atividades necessárias para produzir um produto e torná-lo disponível para um cliente, como compra, transporte, armazenagem, fabricação, sequenciamento de processos etc.” (Harrison e van Hoek, 2002).

A disponibilidade máxima de produto nos pontos de venda e a eficiência e agilidade na entrega são considerados aspectos fundamentais para a maximização do nível de serviço dos clientes. Christopher (1998) identifica três questões fundamentais para a gestão eficiente de cadeias de suprimentos, sendo elas a capacidade de resposta, confiabilidade e relacionamentos:

- Capacidade de resposta: é a capacidade de atender as necessidades dos clientes no menor tempo possível.
- Confiabilidade: reduzir a incerteza através de visibilidade da demanda através dos elos da cadeia.
- Relacionamentos: é uma tendência emergente, que sugere que as metas da cadeia de suprimentos são mais facilmente alcançadas pela colaboração e relacionamentos de longo prazo.

A gestão eficiente de uma cadeia de suprimentos envolve diversas decisões no processo de negócio. Os fornecedores devem ser selecionados e qualificados. Os pedidos de clientes devem ser recebidos e contratos negociados com a melhor relação de custo e qualidade. Os materiais devem ser requisitados, recebidos, convertidos em produtos e enviados. Desta forma, a gestão da cadeia de suprimentos inclui decisões em diferentes níveis da hierarquia organizacional e através das fronteiras funcionais. Sob a ótica da logística e da movimentação de materiais na cadeia de suprimentos, Xia (2013) classifica as decisões como estratégicas (e.g., localização das instalações), táticas (métodos de abastecimento e políticas de controle de estoque), e operacionais (e.g., decisões de roteamento e de estocagem). Tais decisões inerentes à gestão logística são hoje em dia amplamente estudadas e classificadas em problemas clássicos, tais como:

- Problema de Localização de Instalações (FLP, do inglês *Facility Location Problem*)
- Problema de Roteirização de Veículos (VRP, do inglês *Vehicle Routing Problem*)
- Problema de Controle de Estoque (ICP, do inglês *Inventory Control Problem*)

A Figura 1 esquematiza os três níveis de planejamento existentes e dá exemplos de algumas decisões típicas de cada nível.

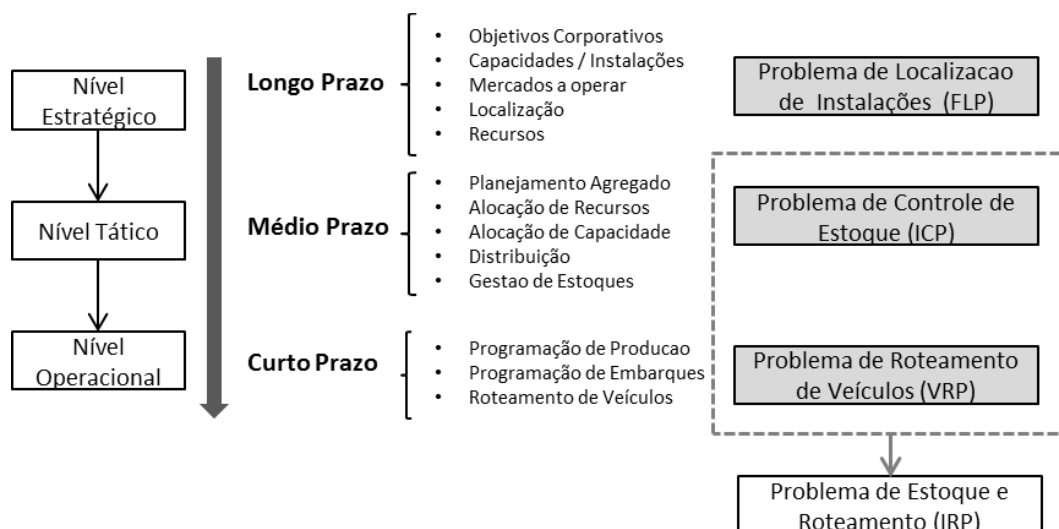


Figura 1 - Decisões Logísticas (Adaptado de Xia, 2013)

No nível estratégico, as decisões logísticas envolvem objetivos corporativos de longo prazo, como a definição de localização de instalações e mercados a operar. No nível tático, as decisões envolvem os objetivos de médio prazo, como o planejamento de recursos e capacidades para se suprir o mercado alvo. Em curto prazo, as decisões são mais operacionais, e envolvem programação do processo produtivo e da rede de distribuição.

Nos casos de aplicações reais, entretanto, os custos de estoque e de transporte devem ser considerados simultaneamente na solução dos problemas. O Problema de Estoque e Roteamento (IRP, do inglês *Inventory Routing Problem*), foco desta pesquisa, combina características do Problema de Roteirização de Veículos (VRP) com o Problema de Controle de Estoque (ICP), compreendendo três decisões: quais clientes atender, qual a quantidade a ser fornecida e qual a rota utilizar. De acordo com Shen e Qi (2007), “uma redução significativa de custos pode ser obtida com a aplicação do modelo integrado”, referindo-se à utilização do IRP em detrimento a aplicação sequencial de ICP e posterior VRP. O IRP é resultado das novas formas de modelagem e otimização da cadeia de suprimentos baseadas na ideia de integração dos diversos componentes logísticos (KLEYWEGT, NORI e SAVELSBERGH, 2004).

Baseado neste contexto, verificou-se a oportunidade de se aplicar o modelo de IRP como suporte à tomada de decisão de uma empresa de bens de consumo. As decisões de abastecimento de materiais para a fábrica principal são tomadas de

forma isolada pelos fornecedores com o foco principal em nível de serviço (disponibilidade de estoque para o cliente), e com isso os custos de transporte associados não são efetivamente minimizados ou considerados como fator de decisão.

O enfoque deste estudo é analisar o elo da cadeia de abastecimento de materiais de forma integrada entre fornecedores e transportadores de uma empresa de bens de consumo. Os fornecedores são empresas que operam de forma independente e são responsáveis por suprir materiais que são consumidos na linha de produção da empresa foco deste estudo através de um transportador contratado para esta operação específica. O modelo de operação atual é inteiramente desintegrado, ou seja, os fornecedores tomam a decisão de abastecimento com base na política de estoque definida para a fábrica, e os transportadores tem um papel apenas de execução, realizando a coleta e entrega dos materiais conforme o plano definido. A avaliação das variáveis de planejamento de forma integrada, com a consequente otimização das decisões de suprimento e transporte, pode trazer benefício para todas as partes envolvidas, uma vez que visa a redução dos custos globais da cadeia.

Desta forma, pretende-se adotar um modelo de otimização que auxilie os fornecedores a tomar a melhor decisão de abastecimento com base na demanda do período, e os transportadores a definirem a melhor rota com base no planejamento de estoque e coleta definido.

## **Objetivo do Trabalho**

O objetivo desta pesquisa é avaliar um caso real de planejamento de abastecimento e propor um modelo de otimização que auxilie nas decisões de estoque e transportes com minimização dos custos envolvidos.

Do ponto de vista dos fornecedores, pretende-se desenvolver uma metodologia para o planejamento do abastecimento que considere também o custo de transporte como variável de decisão, e que busque integrar os demais fornecedores em uma rede de distribuição, em despeito à abordagem tradicional de entrega ponto a ponto (origem – destino), conforme exemplificado na Figura 2.

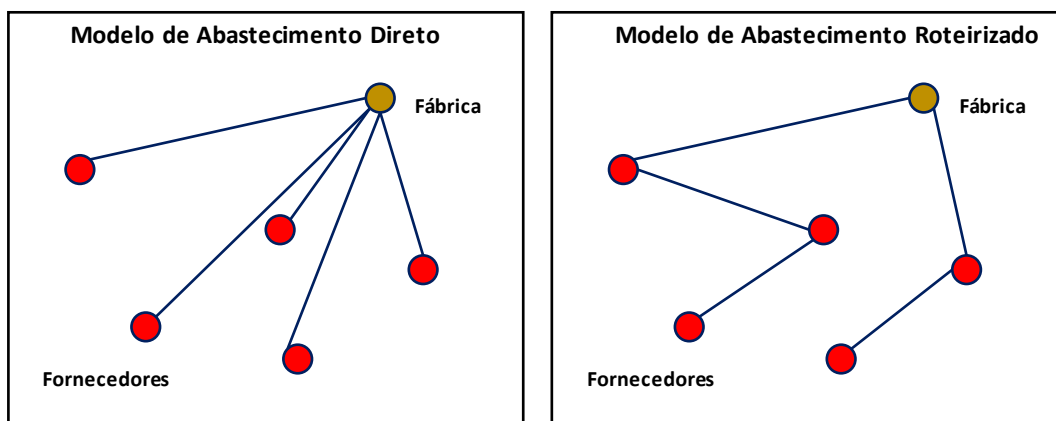


Figura 2 – Modelos de Abastecimento

Sob a ótica dos transportadores, pretende-se fornecer as alternativas ótimas de roteamento que minimizem o custo de frete, respeitando-se as políticas de estoque pré-estabelecidas. Com transportadores e fornecedores atuando de forma integrada, com visibilidade do planejamento integrado, e com planos ótimos e sincronizados, os custos de transportes são minimizados, gerando benefício para transportadora e para a empresa contratante, foco deste estudo. Além do benefício financeiro envolvido, a quantidade de veículos necessários à operação tende a reduzir em relação a uma operação não otimizada, o que gera um benefício adicional para a transportadora.

Com base no planejamento integrado que se pretende alcançar com o modelo objeto deste estudo, pretende-se criar uma rede de colaboração entre os elementos da cadeia com foco na eficiência e redução dos custos totais. A revisão do modelo de negócio e a implementação de centro de controle para o planejamento integrado é, portanto, um passo fundamental para o sucesso da aplicação em um caso real.

Além da análise do modelo operacional de coleta com roteamento em relação a entrega ponto a ponto, pretende-se ainda verificar potenciais ganhos adicionais através de transferências de produto entre fornecedores, processo também denominado como transbordo, permitindo-se avaliar a potencial redução no custo de transporte. A Figura 3 ilustra um caso de abastecimento roteirizado com transbordo. Nota-se que ao se habilitar a opção de transbordo, o estoque de produto é movimentado de um fornecedor ao outro em períodos anteriores ao da

demanda na Fábrica, gerando-se estoque em trânsito representado pelos triângulos.

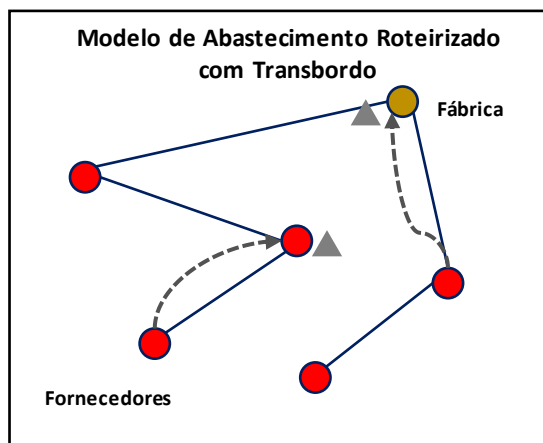


Figura 3 - Modelo de Abastecimento Roteirizado com Transbordo, onde os triângulos representam o estoque acumulado no respectivo nó

### Delimitação do Escopo

O trabalho de pesquisa foi orientado com vista à otimização dos processos de estoque e transporte de uma empresa brasileira de bens de consumo através da implementação de um modelo de IRP que visa otimizar o processo de abastecimento da mesma.

Considera-se como referenciais teóricos os modelos matemáticos apresentados por Coelho et al. (2012) e Mirsapour & Rekik (2014). O primeiro apresenta uma abordagem clássica do IRP, e é apresentado para fins didáticos por fornecer a estruturação matemática básica que fundamenta as demais vertentes estudadas na literatura. Já o segundo, apresentado por Mirsapour & Rekik (2014), é adotado como referência central do modelo adaptado, por tratar de uma variação ao modelo clássico em um cenário multiproduto e com a inserção do processo de transbordo como alternativa de redução do custo total.

Em um contexto similar ao caso apresentado por Mirsapour & Rekik (2014), o modelo apresentado neste trabalho abrange um cenário real multiproduto e Multiperíodo para o problema de IRP, onde veículos com diferentes capacidades distribuem produtos de múltiplos fornecedores para uma



única planta industrial de forma a atender a demanda prevista no horizonte de planejamento definido.

A adaptação e aplicação de um trabalho científico em um contexto real de uma grande empresa é, portanto, o foco central deste trabalho. As alternativas operacionais suportadas pela otimização do processo de planejamento podem gerar ganhos financeiros significativos, assim como indicar oportunidades futuras de revisão do processo atual. Pretende-se ainda que a aplicação real venha a constituir um benchmark na literatura de IRP para ser utilizada em estudos futuros de empresas com uma estrutura semelhante.

## **Estrutura da Dissertação**

Este trabalho possui a seguinte estrutura:

Capítulo 1: Apresentação da motivação para a pesquisa, objetivos e a delimitação do escopo da dissertação de modo a estabelecer uma ligação entre o referencial teórico e a aplicação prática.

Capítulo 2: Apresentação de referencial teórico referente ao gerenciamento da cadeia de suprimentos sob a ótica dos modelos de colaboração com ênfase no VMI (do inglês *Vendor-Managed Inventory*) ou Estoque Gerenciado pelo Fornecedor. São apresentadas ainda as definições e a tipologia do Problema de Estoque e Roteirização (*Inventory Routing Problem – IRP*). Um algoritmo clássico de solução é apresentado, de forma a servir como referência para a variação utilizada no problema real foco deste trabalho.

Capítulo 3: Apresentação da Aplicação, envolvendo a apresentação do contexto logístico em que o problema é posicionado, a apresentação dos dados e premissas adotados e a modelagem do mesmo em um problema clássico de estoque e roteamento.

Capítulo 4: Apresentação e análise crítica dos resultados sob diferentes cenários operacionais. Busca-se identificar o melhor modelo operacional em relação ao modelo vigente, e avaliar os ganhos financeiros relacionados a decisão ótima.

Capítulo 5: Conclusões da dissertação e recomendações.

## Referencial Teórico

### Gestão da Cadeia de Suprimentos (SCM, do inglês *Supply Chain Management*)

De acordo com Lambert et al. (1998), SCM é “a integração dos processos de negócio chave, desde o consumidor final até os fornecedores originais, que disponibilizam produtos, serviços e informações que agregam valor para os clientes”. O *Council of Supply Chain Management* apresenta uma extensa definição do termo, como “todas as atividades envolvidas em previsão, suprimentos, manufatura e todas as atividades de gerenciamento logístico. O conceito inclui ainda a coordenação e colaboração com parceiros, que podem ser fornecedores, distribuidores, prestadores de serviços (operadores logísticos) e clientes. Em resumo, o gerenciamento de cadeia de suprimentos integra a gestão de demanda e abastecimento entre as companhias que se relacionam” (*Council of Supply Chain Management Professionals*, 2015).

Dentro deste conceito, Chopra e Meindl (2007) apresentam dois componentes principais englobados pelo *Supply Chain Management*, a definição do projeto da rede de abastecimento (*Supply Chain Design*) e o controle do fluxo de suprimentos (*Supply Chain Control*):

- *Supply Chain Design*: inclui a construção de uma estrutura onde a localização, a função e as capacidades das instalações são determinadas. A instalação pode ser, em geral, uma unidade de produção, um armazém, um centro de inovação ou de uma instalação combinada. As decisões de estrutura devem ser relacionadas com a estratégia da cadeia de suprimentos, que inclui, por exemplo, decisões entre produzir ou terceirizar, decisões de fornecimento e decisões de colaboração. A estratégia da cadeia também deve ser alinhada com o mercado ou estratégia corporativa.
- *Supply Chain Control*: inclui planejamento e gerenciamento de materiais e fluxo de informações em nível tático e operacional. Planejamento tático inclui determinar os principais fluxos de material, e a gestão operacional refere-se às decisões de curto prazo.

A Tabela 1 apresenta a classificação das decisões típicas envolvidas em cada um dos componentes citados:

Tabela 1 - Componentes do *Supply Chain*, adaptado de Bozarth & Handfield (2006).

Supply Chain Management			
Supply Chain Design		Supply Chain Control	
Estratégia	Estrutura	Planejamento	Operação
<i>Fazer ou comprar, fornecimento, colaboração</i>	<i>Localização, função e capacidade das instalações.</i>	<i>Designar pontos de atendimento e alocar capacidade para suprir o mercado</i>	<i>Alocar capacidade ou estoque as ordens dos clientes</i>

As decisões relativas ao planejamento do abastecimento são consideradas decisões táticas, fazendo parte, portanto do segundo componente descrito. Estas decisões envolvem os problemas de estoque e roteamento de veículos, tema foco desta pesquisa.

### Colaboração em Supply Chain Management

A eficiência e competitividade de cada empresa dependem do desempenho da cadeia de suprimentos, fazendo com que o ganho individual esteja inter-relacionado com o ganho total da cadeia (KLINGENBERG e ANTUNES, 2002). Desta forma, iniciativas importantes visando elevar os ganhos totais da cadeia têm surgido nas indústrias, como o Movimento ECR (do inglês *Efficient Consumer Response*) ou Resposta Eficiente ao Consumidor. Wanke (2004) e Pires (2004) definem o ECR como um programa que visa um melhor atendimento das reais demandas dos clientes através de um sistema de reposição automática dos estoques consumidos nos pontos de venda. Trata-se de uma estratégia compartilhada entre indústria e varejo, baseada em cinco áreas principais:

- (i) Compartilhamento de informações em tempo real
- (ii) Gerenciamento de categorias
- (iii) Reposição contínua
- (iv) Custeio baseado em atividades
- (v) Padronização

O ECR consiste em uma série de princípios e estratégias que visam a introdução eficiente de novos produtos, a promoção eficiente, ao sortimento

eficiente e a reposição eficiente de mercadorias (KLINGENBERG e ANTUNES, 2002).

Uma das técnicas propostas pelo ECR é o VMI, Estoque Gerenciado pelo Fornecedor, que tem sido muito disseminada na indústria mundial. Trata-se de um modelo de gestão da cadeia de suprimentos onde o fornecedor monitora o nível de estoque dos clientes e toma decisões de abastecimento de acordo com as necessidades dos mesmos. O objetivo do VMI é a melhoria do nível de serviço através de um planejamento eficiente de estoques e distribuição alcançado através da coordenação de atividades inerentes à cadeia de suprimentos.

Campbell et al. (1998) e Campbell et al. (2002) definem o VMI como uma técnica na qual o fornecedor controla os níveis de estoque de seus clientes e decide quando e quanto entregar de mercadoria para cada cliente. Desta forma, o planejamento do abastecimento é realizado pelo fornecedor com base nos parâmetros fornecidos pelo cliente. Corrêa (2004) acrescenta que o que se pretende com o VMI é “uma redistribuição das atividades necessárias, dentro da cadeia de suprimentos, para elos com maior vocação/competência para fazê-las”. O autor destaca que melhorar a eficiência de uma cadeia é melhorar a eficiência de seus nós (ambiente interno das empresas) e de seus elos (interfaces entre duas empresas consecutivas na cadeia). Desta forma, o VMI permite que empresas que atuam em uma mesma cadeia podem se beneficiar conjuntamente deste modelo integrado.

Em muitas aplicações do VMI, o fornecedor, além de controlar os estoques dos clientes, também administra uma frota de veículos para transportar os produtos aos clientes. Este problema é chamado problema de estoque e roteamento (do inglês *Inventory Routing Problem* - IRP) (Bard et al. (1998)).

### **Problema de Estoque e Roteirização em um contexto VMI**

Em muitos casos práticos de aplicação do VMI, o fornecedor, além de gerenciar a disponibilidade dos estoques dos clientes, também gerencia uma frota de veículos para transportar os seus produtos aos clientes. O objetivo do fornecedor, portanto, não é apenas garantir o reabastecimento ótimo dos estoques, mas também a distribuição mais eficiente dos produtos. Este problema é chamado

problema de estoque e roteirização. O IRP integra gestão de estoques, roteamento de veículos e decisões de planejamento de distribuição. No VMI, o fornecedor toma as decisões com relação ao abastecimento baseado nas políticas de estoque e de suprimentos, caracterizando-se uma relação “ganha-ganha” com os clientes: os fornecedores economizam com os custos de produção e distribuição, uma vez que eles podem coordenar as remessas de envio e sincronizar com seu planejamento interno, enquanto que os clientes se beneficiam por não precisar alocar recursos com o gerenciamento de estoques.

No contexto do VMI, o fornecedor deve tomar as seguintes decisões – que caracterizam o problema geral do IRP:

- Quando enviar uma remessa ao cliente
- Quanto enviar em cada remessa
- Como combinar clientes em rotas de veículos

### **Problemas de Roteirização com Transbordo**

Na gestão logística, o transporte não pode ser considerado de maneira isolada. Além do custo de transporte, devem-se levar em consideração outros custos logísticos como as operações de carga e descarga e o impacto do estoque do produto em trânsito.

Ao considerar a variável estoque em conjunto com o custo do transporte, pode-se chegar, em alguns casos, à conclusão que, ao optar por um modal de menor custo e menor frequência, o estoque que ficará imobilizado por vários dias poderá tornar a operação menos competitiva do que se imaginava inicialmente, uma vez que o custo do estoque será mais representativo (Coyle et al., 2011). De acordo com Campbell (1998), a escolha das estações de transbordos, em termos de facilidades e capacidades oferecidas, é importante para o desempenho do sistema logístico da empresa.

A movimentação das mercadorias, desde a origem até o destino, pode ser realizada: (a) como um transporte único; (b) como um transporte multimodal de cargas, ou; (c) como um transporte segmentado ou intermodal. A principal diferença entre o transporte intermodal e o multimodal, segundo Silva (2008), diz respeito à responsabilidade do transportador. Enquanto no transporte segmentado

ou intermodal existe a emissão de um documento para cada uma das atividades relacionadas (exemplo: transporte rodoviário, transporte ferroviário, armazéns e transbordo); no transporte multimodal, existe o Operador do Transporte Multimodal, responsável por todo o transporte, da origem até o destino, sendo o único ponto de contato com o contratante dos serviços.

Na busca por soluções de custo mínimo, reduzindo o tempo da entrega e otimizando o processo de transbordo, são desenvolvidos algoritmos em que se consideram as estações de transbordos para as cargas e descargas como se fossem um nó e o trajeto (ligação entre os nós) como representando a função transporte. As fábricas e armazéns são considerados os pontos de origem e destino (Garg & Prakash, 1985).

Esta prática, conhecida também como “transbordo”, caracteriza-se pela transferência de produto de um fornecedor para armazenamento e posterior coleta no armazém de um outro fornecedor localizado ao longo da rota de entrega. O consumo ocorre em períodos anteriores ao período da demanda em si, gerando-se um estoque temporário até que seja coletado ou consumido. O que se pretende, portanto, é avaliar a potencial redução no custo de transporte de forma a justificar o acordo comercial para estocagem de produto de acordo com este modelo.

### **Tipologia dos Problemas de IRP**

Coelho et al. (2012) propõem uma classificação dos problemas de IRP em duas classes, sendo a primeira relacionada às variantes estruturais presentes, e a segunda relacionada à disponibilidade de informação de demanda. Os autores afirmam que muitas variantes do problema foram estudadas, mas que não há uma versão padrão estabelecida. Por esta razão, os problemas mais comuns e onde a maior parte da pesquisa está concentrada são tratados como “versões básicas” – apresentadas na Tabela 2, e os casos mais elaborados são considerados “extensões” das versões básicas. Elas podem ser classificadas de acordo com sete critérios: horizonte de tempo, estrutura de rede, roteamento, política de estoque, decisões de estoque, composição da frota e tamanho da frota, conforme classificado na Tabela 2:

Tabela 2 - Tipologia dos Problemas de IRP (Coelho et al., 2012)

<b>Critérios</b>	<b>Opções Possíveis</b>		
Horizonte de Tempo	Finito	Infinito	
Estrutura de Rede	Um para um	Um para muitos	Muitos para muitos
Roteamento	Direto	Múltiplo	Contínuo
Política de Estoque	Nível Máximo	Ordem Máxima	
Decisões de Estoque	Vendas Perdidas	Atendimento Retroativo	
Composição da Frota	Homogênea	Heterogênea	
Tamanho da Frota	Única	Múltipla	Irrestrita

O horizonte de tempo a ser levado em consideração pelo problema de IRP pode ser finito ou infinito. O número de fornecedores e clientes pode variar, e, portanto, a estrutura pode ser um para um quando há apenas um fornecedor e um cliente, um para muitos quando um fornecedor atende diversos clientes, ou muitos para muitos, quando há diversos fornecedores e diversos clientes. O roteamento pode ser direto quando há apenas um cliente por rota, múltiplo quando há diversos clientes na mesma rota, ou contínuo quando não há um depósito central. As políticas de estoque definem as regras de abastecimento dos clientes. As duas políticas mais comuns são a de nível máximo, em que a quantidade da ordem é flexível e limitada à capacidade máxima do cliente. A tamanho do lote, portanto, varia de acordo com a demanda, e usualmente utiliza-se veículos de carga fracionada. A política de ordem máxima visa fixar o tamanho do lote, usualmente lotes econômicos. Pode-se, portanto, utilizar veículos com carga consolidada. As decisões de estoque determinam como a gestão de estoques é modelada. Se é permitido que o estoque fique negativo, então o atendimento será feito de forma retroativa, e a demanda será atendida com atraso. Se não houver atendimento retroativo, então assume-se que haverá vendas perdidas. Em ambos os casos, pode-se incluir no modelo penalidades por falta de estoque. Por fim, os últimos dois critérios referem-se a composição e tamanho da frota, que pode ser homogênea ou heterogênea, e o número de veículos disponíveis pode ser fixado em um, vários ou irrestrito.

A segunda classificação se refere ao tempo em que a informação sobre a demanda se torna disponível. Se ela é inteiramente disponível no início do período de planejamento, o problema é classificado como determinístico. Se a distribuição de probabilidade é conhecida, classifica-se, portanto como Problema de Estoque e Roteamento Estocástico (SIRP – *Stochastic Inventory Routing Problem*). Problemas dinâmicos de IRP se caracterizam pelo fato de a demanda não ser totalmente conhecida de antemão, mas é gradualmente revelada com o tempo, ao contrário do que ocorre em um contexto estático. Neste caso, pode-se ainda aplicar uma distribuição de probabilidade no processo de solução, classificando-se como Problema de Estoque e Roteamento Estocástico e Dinâmico (DSIRP – *Dynamic and Stochastic Inventory Routing Problem*).

Znamenky e Cunha (2003) apresentam uma classificação mais sumarizada de acordo com as principais classes encontradas na literatura, sumarizadas na Figura 4.

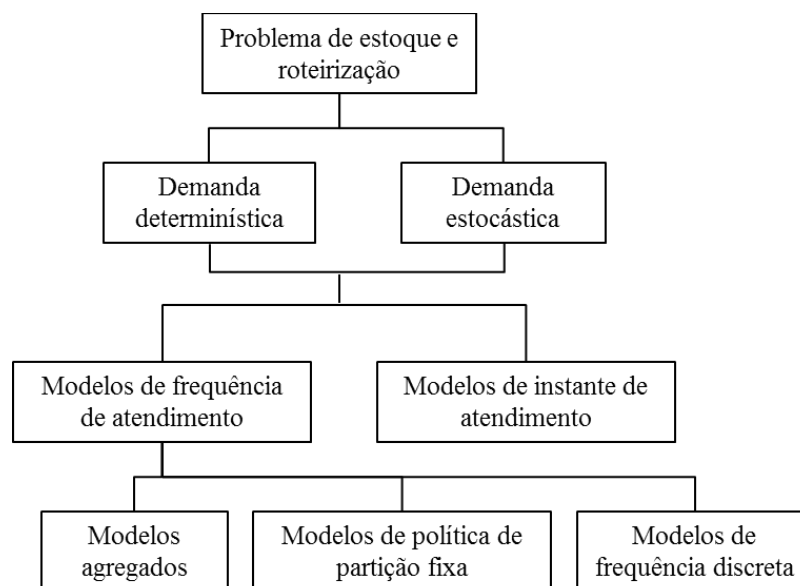


Figura 4 - Classificação dos IRPs

O tipo de demanda pode ser classificado como determinística ou estocástica. Os autores afirmam que “os modelos estocásticos, em geral, requerem grande quantidade de dados históricos e um tratamento estatístico adequado que nem sempre estão disponíveis. Por outro lado, os modelos com demanda determinística têm sido muito utilizados para resolução de problemas reais, introduzindo o



estoque de segurança e incorporando a sazonalidade a um modelo de previsão de demanda, para absorver o comportamento estocástico“ (ZNAMENSKY e CUNHA, 2003).

Com relação à categoria de decisão, os problemas de IRP podem ser classificados como frequência de atendimento ou instante de atendimento. No primeiro grupo, as decisões são tomadas em intervalos ou períodos regulares e o horizonte de planejamento é infinito. No segundo grupo, as variáveis de decisão são os instantes de entrega e o horizonte de planejamento é finito. Baita et al. (1998) dividem os modelos de frequência de atendimento em três grupos:

1. Modelos agregados: correspondem aos modelos analíticos, que desenvolvem ideias qualitativas para sua solução. São, portanto, mais fáceis de serem resolvidos e comunicados, devido ao menor rigor matemático. Nesta categoria encontram-se os modelos que avaliam as relações entre os custos envolvidos no processo de decisão.
2. Modelos de política de partição fixa: nesta estratégia os clientes são, a priori, divididos em regiões de atendimento. Cada vez que um veículo visita uma região de atendimento, todos os clientes deste grupo serão visitados.
3. Modelos de frequência discreta: ao invés de fracionários, os intervalos de atendimento são inteiros.

### **Aplicação dos Problemas de IRP**

Diversas aplicações dos problemas de IRP foram estudadas e documentadas. As aplicações mais básicas envolvem coleta ou distribuição de múltiplas origens para um determinado destino, com produto único e demanda determinística. Ronen (1993) e Christiansen et al. (2004) apresentam uma aplicação de IRP à logística marítima, com roteamento de navios e gestão de estoques. Bausch et al. (1998), Bertazzi e Speranza (2000) e Persson e Gothe-Lundgren (2005) apresentam modelos com múltiplos produtos, enquanto Qu et al. (1999), além de abordarem o cenário de múltiplos produtos, introduzem também o cenário de demanda de natureza estocástica.

Outras configurações mais complexas, tais como as de Song e Ukovich (1994) e Christiansen e Fagerholt (2002) envolvem a presença de janelas de tempo, seja no ponto de coleta ou no de entrega final. Problemas que envolvem capacidades de armazenagem, de produção e taxas de consumo variáveis foram estudados por Engineer et al. (2012), Gronhaug et al. (2010) e Uggen et al. (2011).

### Definição do IRP clássico

A versão básica do problema de IRP é definida por Coelho et al. (2012) como um grafo  $G = (V, A)$ , onde  $V = \{0, \dots, n\}$  é o conjunto de vértices, e  $A = \{(i, j) : i, j \in V, i \neq j\}$  é o conjunto dos arcos. O vértice 0 representa o fornecedor, e os vértices  $V' = V \setminus \{0\}$  representam os clientes. Tanto os fornecedores quanto os clientes incorrem em um custo unitário de carregamento de estoque  $h_i$  por período ( $i \in V$ ), e cada cliente possui uma capacidade de armazenagem  $C_i$ . A extensão do horizonte de planejamento é  $p$  e, em cada período de tempo  $t \in T = \{1, \dots, p\}$ , a quantidade de produto disponibilizada no fornecedor é  $r_t$ . Assume-se que o fornecedor possui disponibilidade de estoque suficiente para atender toda a demanda durante o horizonte de planejamento e que os estoques não podem ser negativos. As variáveis  $I_0^t$  e  $I_i^t$  são definidas como o nível de estoque no fim do período  $t$ , respectivamente no fornecedor e no cliente  $i$ . No início do período de planejamento, o tomador de decisão possui a informação de estoque no fornecedor e nos clientes ( $I_0^0$  e  $I_i^0$  para  $i \in V$ ), e tem total conhecimento da demanda  $d_i^t$  de cada cliente  $i$  para cada período  $t$ . Um conjunto  $K = \{1, \dots, K\}$  de veículos com capacidade  $Q_k$  está disponível. Cada veículo pode realizar uma rota por período para entregar produtos do fornecedor para o conjunto de clientes. Um custo de transporte  $c_{ij}$  é associado ao arco  $(i, j) \in A$ .

As variáveis de decisão são as seguintes:

$x_{ij}^t$ : variável binária que indica a utilização do arco  $(i, j)$  no período  $t$ .

$q_i^t$ : quantidade de produto entregue ao cliente  $i$  no período  $t$ .

$y_0^t$ : variável binária que determina se existe uma rota a ser utilizada no período  $t$ .

$y_i^t$ : variável binária que determina se o cliente  $i$  é servido no período  $t$ .

A função objetivo é definida por:

$$\text{Min} \sum_{i \in V} \sum_{t \in T} h_i I_i^t + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V, i < j} \sum_{t \in T} c_{ij} x_{ij}^t \quad (2.1)$$

Sujeito as seguintes restrições:

$$I_0^t = I_0^{t-1} + r^t - \sum_{i \in V'} q_i^t \quad t \in T \quad (2.1.1)$$

$$I_0^t \geq 0 \quad t \in T \quad (2.1.2)$$

$$I_0^t = I_0^{t-1} + q_i^t - d_i^t \quad i \in V', t \in T \quad (2.1.3)$$

$$I_i^t \geq 0 \quad i \in V', t \in T \quad (2.1.4)$$

$$q_i^t \geq c_i y_i^t - I_i^{t-1} \quad i \in V', t \in T \quad (2.1.5)$$

$$q_i^t \leq c_i - I_i^{t-1} \quad i \in V', t \in T \quad (2.1.6)$$

$$q_i^t \leq c_i y_i^t \quad i \in V', t \in T \quad (2.1.7)$$

$$\sum_{i \in V'} q_i^t \leq Q \quad t \in T \quad (2.1.8)$$

$$\sum_{i \in V} q_i^t \leq Q y_0^t \quad t \in T \quad (2.1.9)$$

$$\sum_{j \in V', i < j} x_{ij}^t + \sum_{j \in V', i > j} x_{ji}^t = 2y_i^t \quad i \in V', t \in T \quad (2.1.10)$$

$$\sum_{i \in S, i < j} \sum_{j \in S, i < j} x_{ij}^t \leq \sum_{i \in S} y_i^t - y_m^t \quad S \subseteq V, t \in T, m \in S \quad (2.1.11)$$

$$q_i^t \geq 0 \quad i \in V, t \in T \quad (2.1.12)$$

$$x_{ij}^t \in \{0,1\} \quad i, j \in V, i \neq j, t \in T \quad (2.1.13)$$

$$x_{io}^t \in \{0,1,2\} \quad i \in V, t \in T \quad (2.1.14)$$

$$y_i^t \in \{0,1\} \quad i \in V, t \in T \quad (2.1.15)$$

A restrição (2.1.1) define o nível de estoque no fornecedor no final do período  $t$  através do seu estoque final do período  $t-1$ , mais a quantidade  $r^t$  disponibilizada no período  $t$ , menos a quantidade total enviada para os clientes utilizando o veículo no período  $t$ . A restrição (2.1.2) impossibilita a falta de estoque no fornecedor impondo que este não pode ser negativo. Restrições (2.1.3)

e (2.1.4) são similares e se aplicam aos clientes. Restrições (2.1.5) a (2.1.7) definem as quantidades entregues. Se o cliente  $i$  não é visitado, então a restrição 8 indica que a quantidade entregue será zero. Caso contrário, se o cliente é visitado no período  $t$ , então a restrição (2.1.7) delimita a quantidade a ser entregue considerando-se o limite de capacidade do cliente. A restrição (2.1.8) constata que a capacidade do veículo não pode ser excedida. As restrições (2.1.9) a (2.1.11) garantem que uma rota viável é determinada para visitar todos os clientes servidos no período  $t$ . Por fim, as restrições (2.1.12) a (2.1.15) reforçam as condições de integralidade e não negatividade das variáveis.

O objetivo do problema é, portanto, minimizar o custo total de estoque e distribuição de forma a atender a demanda prevista para cada cliente. O plano de abastecimento está sujeito as seguintes restrições:

- O nível de estoque em cada fornecedor não pode ultrapassar a capacidade máxima;
- Os níveis de estoque não podem ser negativos;
- Os veículos dos fornecedores podem realizar um máximo de uma rota por período de tempo, que começam e terminam no próprio fornecedor.
- A capacidade dos veículos não pode ser excedida.

A solução do problema determina quais clientes serão atendidos em cada período de tempo, quais veículos utilizar, quanto de produto entregar para cada cliente visitado, assim como as rotas de entregas. O problema básico de IRP é definido como determinístico e estático, uma vez que as taxas de consumo são fixas e conhecidas. Trata-se de um problema NP-hard, onde o tempo de solução cresce exponencialmente em relação ao número de variáveis, uma vez que é uma variação do problema clássico de roteamento de veículos (VRP). Apesar do caráter NP-hard do problema, na aplicação apresentada nesta dissertação não houve necessidade de recorrer a um método de resolução heurística em virtude do problema ter dimensões reduzidas e ser possível a resolução exata.

### Definição do IRP em um cenário multiproduto e com transbordo

A versão clássica do problema de IRP apresentada no trabalho de Coelho et al. (2012) e citada na seção 2.4.2 considera um cenário básico de otimização de estoque e transporte em uma rede logística com um único produto.

Esta versão fornece o substancial teórico para as demais variantes dos problemas de IRP, já que a estruturação da função objetivo e das restrições segue racional semelhante, porém com os ajustes necessários para se refletir o cenário alternativo a ser estudado.

Mirsapour & Rekik (2014) apresentam em seu trabalho uma variação do problema clássico, com a introdução do processo de transferência entre os nós na rede de forma a permitir a otimização do custo total. Estas transferências são denominadas transbordo ou *transshipment*. Além disso, os autores consideram uma rede de abastecimento de fornecedores para uma planta de fabricação, diferentemente do caso clássico de distribuição de uma unidade produtiva para uma rede de depósitos ou clientes. Neste cenário, cada fornecedor produz exclusivamente o seu respectivo produto, diferentes tipos de veículos são disponibilizados e o objetivo final é o abastecimento da demanda multiproduto da fábrica ao menor custo de estoque e transporte.

A aplicação real apresentada neste trabalho foi feita justamente com base na adaptação do algoritmo apresentado no trabalho de Mirsapour & Rekik (2014). Os autores apresentam um modelo para solução de problemas de estoque e roteamento com transbordo sob uma ótica sustentável, em que se limita a emissão de gases a um determinado valor por período de planejamento. Na adaptação do problema ao caso prático em questão, esta restrição foi relaxada por não ser relevante para o caso estudado. Alguns ajustes foram feitos para melhor refletir o cenário, tais como a inclusão de novos pontos de demanda, variação no conjunto de veículos e a opção de habilitação ou relaxamento da opção de transbordo.

Assume-se uma rede composta por uma fábrica ( $F$ ) e um conjunto de fornecedores  $\{1, 2, 3, \dots, N\}$ . Cada fornecedor fornece um tipo de produto para a fábrica  $F$ . O Transportador transporta produtos dos fornecedores para a fábrica em cada período. Esta transportadora possui diferentes tipos de veículos, cada um com uma respectiva capacidade, custo fixo e variável.

O objetivo do problema é encontrar a melhor configuração de tipos de veículos, rotas, coletas, entregas e transferências em cada período, de forma a minimizar o custo total da cadeia, considerando o custo de armazenagem e o custo de transporte. Além disso, considera-se a possibilidade de fazer transferência ou transbordo de estoque entre fornecedores (*Transshipment*), tratando-se esta opção como alternativa operacional a ser avaliada pelo modelo.

Conjuntos:

$\Omega = \{0, 1, \dots, N + 1\}$  conjunto com todos os nós

$\omega = \{1, 2, \dots, N\}$  conjunto de fornecedores

$O = \{0\}$  Base do Transportador

$F = \{N + 1\}$  Fábrica

Parâmetros:

$D_{pt}$ : demanda pelo produto  $p$  ( $1, 2, \dots, P$ ) no período  $t$  ( $1, 2, \dots, T$ )

$v_k$ : custo variável de transporte por unidade de distância para o veículo tipo  $k$  ( $1, 2, \dots, K$ )

$u_k$ : custo fixo de transporte para o veículo  $k$  por viagem

$NT_{kt}$ : número de veículos  $k$  disponíveis no período  $t$

$cap_k$ : capacidade do veículo tipo  $k$

$h_{ip}$ : custo de armazenagem no nó  $i$  para o produto tipo  $p$  por unidade de produto por período

$c_{ij}$ : comprimento do arco  $(i, j)$

$I_{ip0}$ : estoque inicial do produto  $p$  no nó  $i$

Variáveis de decisão:

$I_{ipt}$ : nível de estoque do produto tipo  $p$  no fornecedor  $i$  ( $i \in \omega$ ) ou na fábrica ( $i \in F$ ) no final do período  $t$

$x_{ijkt}$ : variável binária que determina se o arco  $(i, j)$  vai ser visitado pelo veículo  $k$  no período  $t$

$y_{ikt}$ : variável binária que determina se o fornecedor  $i$  vai ser visitado pelo veículo tipo  $k$  no período  $t$

$Q_{ijpkt}$ : quantidade de produto tipo  $p$  transportado pelo veículo tipo  $k$  através do arco  $(i,j)$  no período  $t$

$a_{ipt}$ : quantidade de produto tipo  $p$  coletado no fornecedor  $i$  no período  $t$

$b_{ipt}$ : quantidade de produto tipo  $p$  transferida para o fornecedor  $i$  no período  $t$

#### Formulação Matemática:

$$\text{Min } Z = \sum_{(i,j) \in \Omega} \sum_{k,t} v_k c_{ij} x_{ijkt} + \sum_{i \in \omega \cup F, p, t} h_{ip} I_{ipt} + \sum_{i \in \omega, k, t} u_k x_{0ikt} \quad (2.2)$$

$$I_{ipt} = I_{ip(t-1)} + b_{ipt} - a_{ipt} \quad \forall i \in \omega, p \neq i, t \quad (2.2.1)$$

$$I_{(N+1)pt} = I_{(N+1)p(t-1)} + \sum_{i \in \omega, k} Q_{i(N+1)pkt} - D_{pt} \quad \forall p, t \quad (2.2.2)$$

$$\sum_{j \in \Omega} x_{ijkt} = \sum_{j \in \Omega} x_{jikt} = y_{ikt} \quad \forall i \in \omega, k, t \quad (2.2.3)$$

$$\sum_k y_{ikt} \leq 1 \quad \forall i \in \omega, t \quad (2.2.4)$$

$$\sum_{j \in \omega \cup 0, k} Q_{jipkt} + a_{ipt} - b_{ipt} = \sum_{j \in \omega \cup F, k} Q_{ijpkt} \quad \forall i \in \omega, p, t \quad (2.2.5)$$

$$\sum_p Q_{ijpkt} \leq \text{cap}_k x_{ijkt} \quad \forall (i,j) \in \Omega, k, t \quad (2.2.6)$$

$$a_{ipt} \leq I_{ip(t-1)} \quad \forall i \in \omega, p \neq i, t \quad (2.2.7)$$

$$\sum_{i \in \omega} x_{0ikt} \leq NT_{kt} \quad \forall k, t \quad (2.2.8)$$

$$\sum_{i \in \omega, k} x_{0ikt} \geq 1 \quad \forall t \quad (2.2.9)$$

$$\sum_{i \in \omega, k} x_{ijkt} \geq 1 \quad \forall t \quad (2.2.10)$$

$$x_{i0kt} = 0 \quad \forall i \in \omega, k, t \quad (2.2.11)$$

$$x_{(N+1)ikt} = 0 \quad \forall i \in \omega, k, t \quad (2.2.12)$$

$$x_{iikt} = 0 \quad \forall i \in \Omega, k, t \quad (2.2.13)$$

$$x_{0(N+1)kt} = 0 \quad \forall k, t \quad (2.2.14)$$

$$Q_{0ipkt} = 0 \quad \forall i \in \omega, p, k, t \quad (2.2.15)$$

$$y_{ikt}, x_{ijkt} \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in \Omega, k, t \quad (2.2.16)$$

$$Q_{ijpkt}, a_{ipt}, b_{ipt} \geq 0, \text{ inteiro} \quad (2.2.17)$$

A equação (2.2) é a função objetivo, que busca minimizar o custo total da cadeia, incluindo o custo de armazenagem e os custos de transporte.

As demais equações são as restrições do problema. Restrição (2.2.1) é a equação de balanceamento de estoque nos fornecedores. O estoque do produto  $p$  no fornecedor  $i$  no período  $t$  é igual ao estoque no período anterior ( $t - 1$ ), mais a quantidade de estoque recebido por transferência menos a quantidade coletada no período  $t$ . A restrição (2.2.2) é a equação de balanceamento de estoque na fábrica. O estoque do produto  $p$  no período  $t$  é igual ao estoque no período anterior ( $t - 1$ ), mais a quantidade de estoque recebido nos veículos menos a demanda do período atual. As restrições (2.2.3) e (2.2.4) garantem que cada fornecedor não deve ser visitado mais de uma vez por período. A restrição (2.2.5) é uma equação de balanceamento de estoque no nó  $i$  visitado durante o período  $t$ , e assegura que a quantidade de produto  $p$  enviado pelo fornecedor  $i$  no período  $t$  é igual à quantidade de produto enviado para este fornecedor mais a quantidade de produto coletada pelo veículo menos a quantidade transferida para este fornecedor no período atual. Restrição (2.2.6) garante que a capacidade do veículo não deve ser excedida. Também garante que a quantidade de produto  $p$  transportada pelo veículo tipo  $k$  através do arco  $(i, j)$  no período  $t$  ( $Q_{ijpkt}$ ) pode ser positivo somente se o arco  $(i, j)$  é visitado por este veículo neste período ( $x_{ijkt} = 1$ ). Restrição (2.2.7) garante que os veículos não podem coletar em fornecedores que não produzem o produto  $p$ , uma quantidade de produtos maior que a transferida para eles em períodos anteriores. Restrição (2.2.8) limita o número de veículos tipo  $k$  disponíveis no período  $t$  a uma certa quantidade definida. Restrições (2.2.9) e (2.2.10) eliminam circuitos fechados, garantindo que uma viagem começa no transportador (nó 0) e termina na fábrica (nó  $N + 1$ ). Restrições (2.2.11) a (2.2.14) restringem os arcos impossíveis. A restrição (2.2.15) especifica que os veículos não devem retornar nenhuma quantidade ao transportador (nó 0) e a (2.2.16) define os tipos de variáveis.

Na versão original do artigo Mirsapour & Rekik (2014), a Restrição (2.2.10) é apresentada de forma incorreta, e foi corrigida para se permitir a integralidade



da solução. O intervalo do somatório deve considerar os conjuntos  $\omega$  e  $k$ , e na versão do autor é apresentado apenas o conjunto  $\omega$ .

## **Aplicação Real**

### **Introdução**

A empresa a ser estudada é a Souza Cruz, uma produtora de cigarros líder do mercado nacional que possui seis das dez marcas mais vendidas no Brasil, produzindo cerca de 80 bilhões de cigarros por ano. No primeiro semestre de 2012, a participação da Souza Cruz foi de 60,1% do mercado total brasileiro.

Atuando em todo o ciclo do produto, desde a produção e processamento de fumo até a fabricação e distribuição de cigarros, a Souza Cruz atende diretamente a cerca de 300 mil varejos em todo o País, além de chegar a quase cinco mil municípios, sendo referência em sua capilaridade na distribuição e atendimento.

Na produção de fumo, são 30 mil produtores rurais integrados, que recebem assistência técnica da companhia. Além do processamento de fumo para a fabricação própria de cigarros, destinada ao mercado nacional, o sistema de produção integrada da Souza Cruz produz mais de 120 mil toneladas de fumo para exportação, atendendo a mais de 40 países nos cinco continentes.

### **O Mercado da Souza Cruz**

A indústria de cigarros produz no mundo cerca de 5,5 trilhões de cigarros por ano. O maior mercado é a China, que corresponde a 40% do volume vendido. O Brasil é o maior mercado latino-americano de cigarros e, embora sua população represente 34% da região, seu consumo de cigarros corresponde a 42% do total vendido na América Latina, conforme os últimos dados consolidados disponíveis.

No primeiro semestre de 2012, a participação da Souza Cruz no mercado de cigarros atingiu 60,1%, com um volume de 33,4 bilhões de cigarros comercializados. Segundo dados da Secretaria da Receita Federal do Brasil, o mercado ilegal de cigarros no Brasil, compreendido pelo contrabando, pela falsificação, e pela comercialização sem o pagamento de todos os tributos, ainda representa cerca de 29% do mercado brasileiro de cigarros.

A forte carga tributária sobre a produção e venda de cigarros continua sendo o principal fator de incentivo à comercialização informal do produto no Brasil. Nos últimos anos o Governo Federal vem tomando diversas medidas de combate a essas atividades ilegais, tais como maior fiscalização, a implantação da nota fiscal

eletrônica e a adoção do Sistema de Controle e Rastreamento da Produção de Cigarros (Scorpions). Estimativas da Secretaria da Receita Federal do Brasil mostram que a perda de arrecadação no setor é superior a R\$ 2 bilhões por ano. (Fonte: Anuário Brasileiro do Tabaco 2011).

A Figura 5 ilustra a participação de mercado formal da companhia, que atingiu o patamar de 77% em 2013. A Souza Cruz atingiu o volume de 60,1 bilhões de cigarros comercializados em 2013, 9,8% inferior aos 66,6 bilhões vendidos no ano de 2012. Tal redução está principalmente associada ao aumento de IPI no início do ano, seguido de um aumento de preços de cigarros ao consumidor que teve como consequência a aceleração do crescimento do mercado ilegal de cigarros, que tem se beneficiado permanentemente da elevação da carga tributária da indústria.

Evolução do % de participação no mercado e do volume de vendas (em bilhões de unidades):

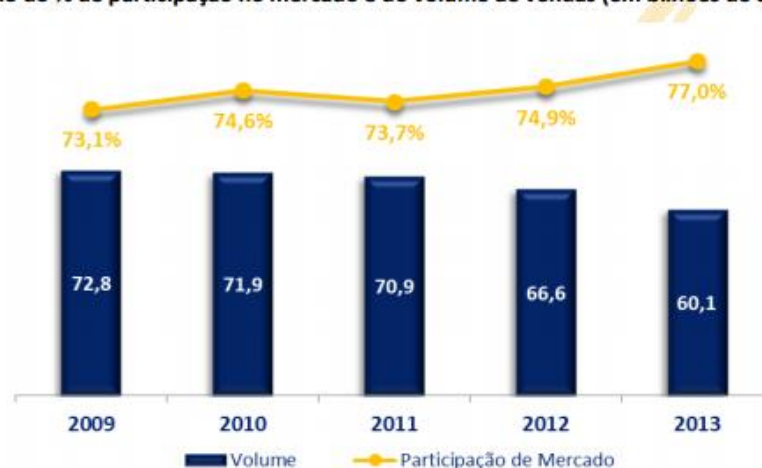


Figura 5 - Participação de Mercado

## A Logística da Souza Cruz

A Souza Cruz possui uma complexa rede de distribuição que atende diretamente a 300 mil varejos. O abastecimento dos pontos de venda atendidos pela Souza Cruz é realizado através de cerca de 2.500 veículos de venda e distribuição. Mais de dois mil colaboradores estão envolvidos nesta operação nacional, entre vendedores, motoristas e auxiliares.

A empresa é reconhecida como fornecedora modelo de um mercado cada vez mais organizado e mais exigente como o varejo de cigarros, sendo

considerada pela COPPEAD (Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Administração da Universidade Federal do Rio de Janeiro) como referência internacional de operação logística para produtos de consumo de massa, com base no modelo da *Michigan State University*. De acordo com a metodologia da MEMRB *Custom Research Worldwide*, a Companhia também foi reconhecida como um fornecedor padrão entre as empresas de bens de consumo de massa pelos varejistas por ela atendidos.

A estrutura de distribuição da Souza Cruz conta com seis Centrais Integradas de Distribuição (as CIDs), localizadas no Rio de Janeiro, São Paulo, Contagem, Curitiba, Porto Alegre e Recife, 24 Centros de Distribuição e 80 Postos de Abastecimento, que são locais próprios ou terceirizados, estrategicamente localizados. O projeto das Centrais Integradas de Distribuição segue uma tendência mundial em que a empresa, ao reunir operações de atendimento ao mercado antes dispersas, ganha dinamismo, flexibilidade e controle. Através do moderno informatizado de roteirização e com um monitoramento da frota por rádio, satélite e GSM (celular), a Souza Cruz garante, em 80% do volume vendido, um intervalo de até 24 horas entre o pedido do varejo e a entrega do produto.

Atualmente, a Souza Cruz opera com três modalidades de vendas: *telemarketing*, EDI (*Electronic Data Interchange*) e o vendedor. O ciclo do pedido começa com a visita aos varejos durante o dia. No ponto de venda, o vendedor está sempre atento à comunicação e à exposição dos produtos. Além de vender, a equipe de *Trade Marketing* e Distribuição é responsável por manter um bom relacionamento com o varejo, agregando serviços e alimentando a Companhia de informações que possibilitem um melhor atendimento aos consumidores.

## **O Ciclo Produtivo**

O ciclo produtivo e a cadeia logística da Souza Cruz têm início com a produção das sementes. Isto ocorre no Centro de Melhoramento de Fumo (CMF), em Rio Negro, no Paraná, onde também funciona uma das Usinas de Processamento de Fumo da Companhia.

Depois de colhido e curado pelos agricultores, o fumo é processado antes de ser encaminhado às fábricas para a produção de cigarros ou exportado para mais de 180 países. A Souza Cruz conta com Usinas de Processamento nas principais regiões produtoras de tabaco, em Santa Cruz do Sul (RS), Blumenau (SC), Rio Negro (PR) e Patos (PB).

As fábricas da Companhia estão situadas em Uberlândia (MG) e em Cachoeirinha (RS), onde também se localizam o *Regional Product Centre* (Centro Regional de Produto – RPC), responsável pelo desenvolvimento de produtos e análises químicas e físicas de tabaco e cigarros, e o Parque Gráfico, que produz as embalagens de cigarro dentro do mais alto padrão de excelência.

O cigarro chega aos 300 mil pontos de venda a partir da atuação de seis Centrais Integradas de Distribuição (CID), localizadas no Rio de Janeiro, São Paulo, Belo Horizonte, Recife, Curitiba e Porto Alegre, 32 Centros Operacionais de Distribuição e mais de 60 Postos de Abastecimento.

As unidades descritas são apresentadas na Figura 6.

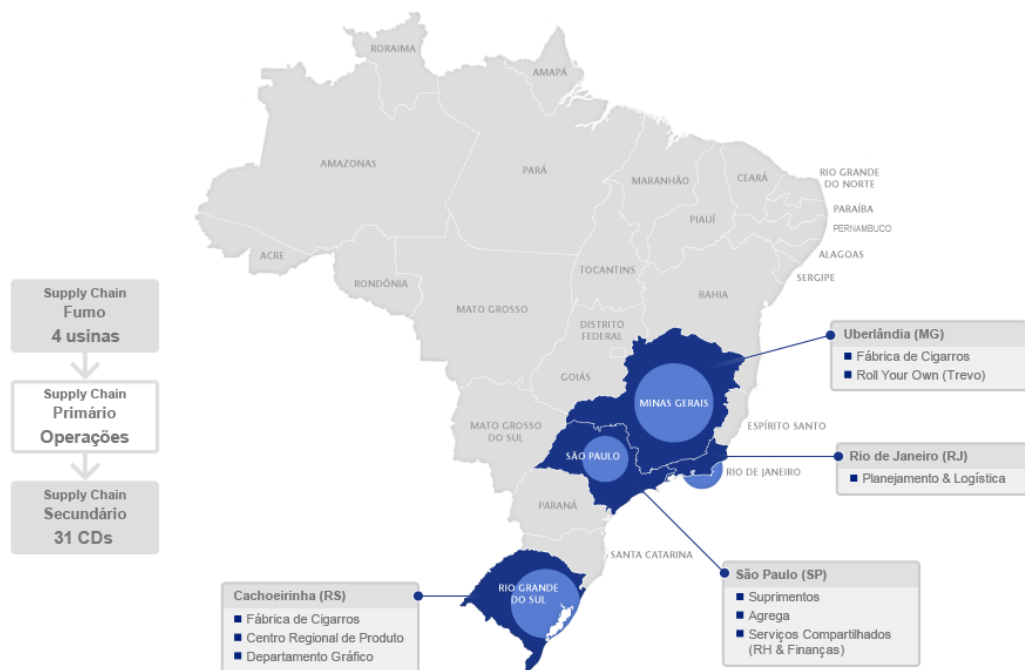


Figura 6 - Principais Unidades da Souza Cruz

## Escopo de Aplicação do Problema de IRP

No trabalho em questão, a aplicação do modelo de IRP será delimitada a logística do abastecimento da fábrica de Uberlândia-MG, por ser a unidade com maior variedade de produtos produzidos e maior capacidade de produção, o que traz maior complexidade para o planejamento de materiais.

A fábrica deve receber os produtos para atender o seu planejamento de produção. Apesar de se ter alta variabilidade e sazonalidade na demanda de vendas, o plano de produção da fábrica é bastante estável e com ciclos fixos predefinidos por família de produto. O acordo de nível de serviço com os fornecedores preza por falta zero, e para viabilizar este modelo, os planos de produção são compartilhados com antecedência, e os estoques são dimensionados de forma a suportar uma eventual falha no transporte. Assume-se, portanto, que a demanda é determinística. Variações do problema com demanda estocástica poderão ser avaliadas em pesquisas futuras.

Diversos fornecedores localizados em diferentes cidades do país proveem produtos específicos, necessários para a produção de cigarros na fábrica. Considera-se para o escopo deste trabalho a rede de abastecimento de materiais a partir de sete fornecedores localizados nas Regiões Sul e Sudeste do país. Cada

fornecedor produz um produto específico e deve atender a demanda prevista para cada período.

A Souza Cruz possui contrato com um transportador que realiza o atendimento desses produtos para a fábrica. Dois tipos básicos de veículos são disponibilizados por este transportador, que variam entre si com relação à capacidade e custo operacional fixo e variável: caminhões comuns tipo *truck* e carretas tipo *sider*.

O modelo de planejamento adotado pelos fornecedores é independente, ou seja, não há interação entre os fornecedores para se definir a melhor política de transporte (frequência e rotas), e o planejamento de estoque na fábrica, apesar de seguir o modelo VMI, é realizado de forma também independente, sem considerar a variável transporte como um fator de decisão. O que se pretende com o IRP, portanto, é adotar um modelo de planejamento integrado que visa a otimização dos custos de transporte e estoque de forma integrada.

### **Levantamento de Dados**

Os dados coletados para esta pesquisa referem-se ao período de 2014 e 2015, onde o modelo apresentado já estava vigente. A capacidade de transporte relacionada ao tamanho da frota disponível é flexível, uma vez que o transportador pode alocar mais ou menos veículos a esta operação conforme a necessidade. Entretanto, espera-se que o planejamento seja o mais eficiente possível, de forma a minimizar a necessidade de veículos.

Os pontos de localização considerados no modelo são a fábrica de cigarros, localizada na cidade de Uberlândia, os fornecedores, localizados nas cidades de Santa Cruz do Sul-RS, Itajaí-SC, Rio Negro-PR, Curitiba-PR, Santo André-SP, Pirai-RJ, Porto Alegre-RS, e o transportador, que também possui sua base na cidade de Porto Alegre-RS. A Figura 7 contextualiza os pontos da rede de distribuição em um mapa da área em escopo.

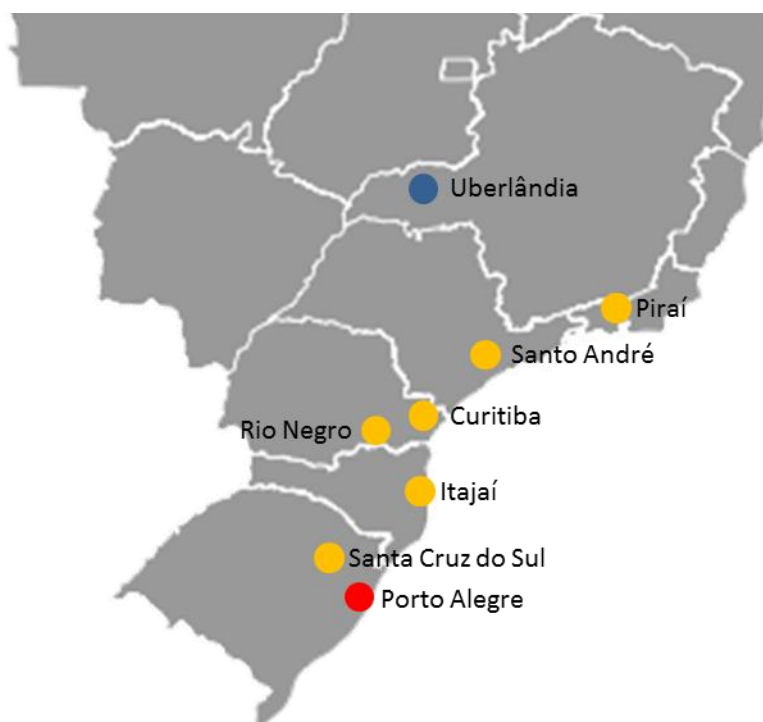


Figura 7 - Rede Logística em Escopo

As distâncias rodoviárias entre fábrica e fornecedores são apresentadas na Tabela 3, em quilômetros, e foram obtidas através do sistema de informação gerencial do transportador, representado a melhor rota rodoviária adotada para cada origem e destino.

Tabela 3 - Distâncias Rodoviárias

	Porto Alegre	Itajaí	Porto Alegre	Santa Cruz do Sul	Curitiba	Santo André	Pirai	Rio Negro	Uberlândia
Porto Alegre	0	535	0	153	741	1167	1472	609	1698
Itajaí	535	0	535	674	213	639	944	239	1169
Porto Alegre	0	535	0	153	741	1167	1472	609	1698
Santa Cruz do Sul	153	674	153	0	878	1304	1609	663	1631
Curitiba	741	213	741	878	0	441	745	109	971
Santo André	1167	639	1167	1304	441	0	372	551	609
Pirai	1472	944	1472	1609	745	372	0	859	895
Rio Negro	609	239	609	663	109	551	859	0	1082
Uberlândia	1698	1169	1698	1631	971	609	895	1082	0



Cada fornecedor produz um respectivo tipo de produto diferente, denominados como  $p = \{1, \dots, 7\}$ . O horizonte de planejamento adotado é de 2 semanas, o que reflete o ciclo de planejamento adotado pela empresa. Os seguintes valores de demanda são referentes a um mês típico de produção. Para fins de unificação de unidades de medida, todos os dados de demanda foram convertidos para quilogramas (kg), sendo os dados da Tabela 4 representados como toneladas por período:

Tabela 4 – Demanda Semanal por Fornecedor

Fornecedor	Produto tipo p	Período t=1	Período t=2
Itajaí	1	4	2
Porto Alegre	2	14	14
Santa Cruz do Sul	3	4	6
Curitiba	4	16	18
Santo André	5	8	8
Pirai	6	2	4
Rio Negro	7	2	2

O transportador possui em sua frota dois tipos de veículos que podem ser alocados para esta operação: caminhões tradicionais tipo *truck* e carretas tipo *sider*. Cada veículo possui uma capacidade específica e um custo associado, e a melhor decisão de alocação está relacionada às demais variáveis do problema, bem como à disponibilidade da frota em cada período de planejamento.

Os veículos menores, tipo *truck*, possuem menor capacidade, e consequentemente menor consumo de combustível, o que faz com que o custo variável seja mais baixo. Por outro lado, os veículos *double-trailers* possuem a capacidade máxima da frota, com eficiente custo variável, entretanto o custo fixo é mais alto, pelo fato de demandar motoristas mais capacitados. Para cada tipo de veículo, os dados relacionados a custos e capacidades são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Dados da Frota de Veículos

Descrição	Tipo de veículo	Custo variável de transporte por unidade de distância para o veículo tipo k (R\$)	Custo fixo de transporte para o veículo k por viagem (R\$)	Número de veículos k disponíveis no período t (unidades)	Capacidade do veículo tipo k (kg)
Truck	1	3.97	950	10	20000
Sider	2	4.05	1150	30	35000

Assume-se no modelo a possibilidade de transbordo ou transferência. Esta operação consiste em transferir produtos de um local para o outro no decorrer do percurso da operação de entrega. Esta operação é realizada apenas pontualmente pela empresa e pretende-se expandir esta opção desde que os benefícios justifiquem os custos. Para transferir-se um produto de um fornecedor para o outro, é necessário que haja um acordo comercial que permita a estocagem de produto de um terceiro nas dependências deste fornecedor. Por outro lado, ao se consolidar as cargas em pontos comuns, as distâncias percorridas no roteamento do próximo ciclo podem ser reduzidas, reduzindo-se, por consequência, os custos de transporte.

## Apresentação dos Resultados

### Cenários Avaliados

Utilizando-se os dados coletados para o sistema de abastecimento em estudo, observou-se que a adoção de um modelo de coleta com roteamento e transbordo pode trazer ganhos significativos para a empresa. A gestão do sistema sob uma ótica integrada, onde todos os dados de demanda de todos os fornecedores envolvidos são disponíveis e avaliados conjuntamente, permite uma tomada decisão ótima considerando-se as variáveis de transporte e estoque.

Foram adotados na análise quatro cenários operacionais distintos, que são analisados de forma comparativa sob diferentes aspectos. São eles:

- Cenário 1: trata-se do modelo operacional vigente. Consiste em um sistema de distribuição direta, onde o fornecedor se encarrega do transporte a partir de sua unidade diretamente para a fábrica da Souza Cruz localizada em Uberlândia. O horizonte de planejamento de entregas é de duas semanas.
- Cenário 2: trata-se de um modelo otimizado baseado em coleta com roteamento, onde um transportador único dedica parte de sua frota para esta operação. Considera-se um horizonte de planejamento de duas semanas, e não é permitida a realização de transbordo de um fornecedor para o outro. A antecipação de envio de produto para a Fábrica, entretanto, é permitida, gerando-se um custo adicional de estoque.
- Cenário 3: similar ao cenário 2, porém com a opção de transbordo entre fornecedores ativada. Mantém-se o horizonte de planejamento de duas semanas.
- Cenário 4: engloba a operação com transbordo assim como no cenário 3, diferenciando-se pela extensão do horizonte de planejamento de duas para quatro semanas.

## Resultados obtidos

O modelo de otimização em questão foi desenvolvido utilizando-se o software de modelagem matemática FICO Xpress 7.8 em um processador Intel Core i7 2.60 GHz 8.00 GB RAM com o sistema operacional Windows 10.

Inicialmente, roda-se o modelo de acordo com o Cenário 2, com a restrição de transbordo restrita à fábrica, impedindo que a solução contemple transferência de estoque de um fornecedor a outro. Na sequência, esta restrição foi ajustada para refletir o Cenário 3, permitindo-se o transbordo em qualquer um dos fornecedores e fábricas. Por fim, testou-se o Cenário 3, com ampliação do horizonte de planejamento de 2 para 4 semanas, replicando-se o cenário de demanda para os períodos seguintes.

Com base nos resultados de custos apresentados na Figura 8, nota-se que a implementação de um modelo operacional com roteamento em comparação ao modelo vigente de distribuição direta proporciona redução de aproximadamente 57% no custo logístico global.

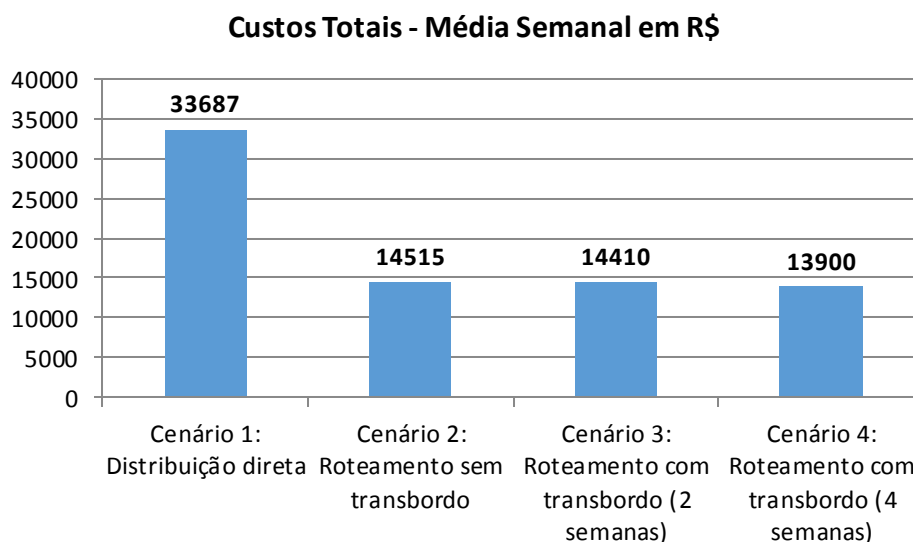


Figura 8 - Custos Totais

A análise dos cenários avaliados sugere que há um ganho significativo ao se comparar os Cenários 2, 3 e 4 com o modelo de operação atual, representado pelo cenário 1. A adoção de uma política de abastecimento roteirizada gera uma redução de custos de aproximadamente 50%.

Habilitando-se a opção de transbordo e mantendo-se o horizonte de planejamento em duas semanas, a redução do custo total é pouco significativa, sendo menor que 1% em relação ao custo total sem transbordo. Apesar de se tratarem de custos totais, já se considerando o custo de armazenagem de estoque em terceiros em função de transbordo, o benefício anual estimado é pouco atraente, estimado em apenas R\$ 6 mil.

Por esta razão, o Cenário 4 foi incorporado ao trabalho como proposta de extensão do horizonte de planejamento para captura de mais benefícios financeiros. Deve-se considerar que a operação de transbordo se caracteriza pela antecipação do envio da mercadoria para um determinado ponto da rota de distribuição para futura coleta. É fundamental, portanto, que haja visibilidade da demanda futura para que a tomada de decisão seja mais assertiva. Assumindo-se o mesmo comportamento de demanda nas duas semanas que foram adicionadas, pode-se, portanto, comparar o modelo de planejamento de 2 semanas sendo replicado para o ciclo seguinte, com o modelo otimizado para as 4 semanas.

Os resultados obtidos são expressivos: a ampliação do horizonte de planejamento traz uma redução significativa nos custos de transporte se comparado ao modelo com dois períodos, graças a movimentação antecipada dos estoques para localidades ótimas, o que compensa o acréscimo do custo de estoque. Ao se ampliar o horizonte para quatro semanas, há um benefício adicional de 4.2% em relação a opção sem transbordo.

A Figura 9 ilustra a composição dos custos em cada um dos cenários. Quando o transbordo entre fornecedores não é permitido, o custo de estoque é zero. Quando se habilita esta opção com dois períodos de planejamento, há uma antecipação de envio para um determinado fornecedor, gerando-se um custo de estoque adicional. No modelo com quatro períodos, o custo de estoque é ainda maior, mas é superado pela redução obtida no custo de transporte e por consequência no custo total da cadeia.

Em todos os cenários avaliados, o veículo tipo carreta *sider* foi selecionado como opção mais econômica, o que valida a decisão operacional vigente de se utilizar um veículo com menor custo unitário.

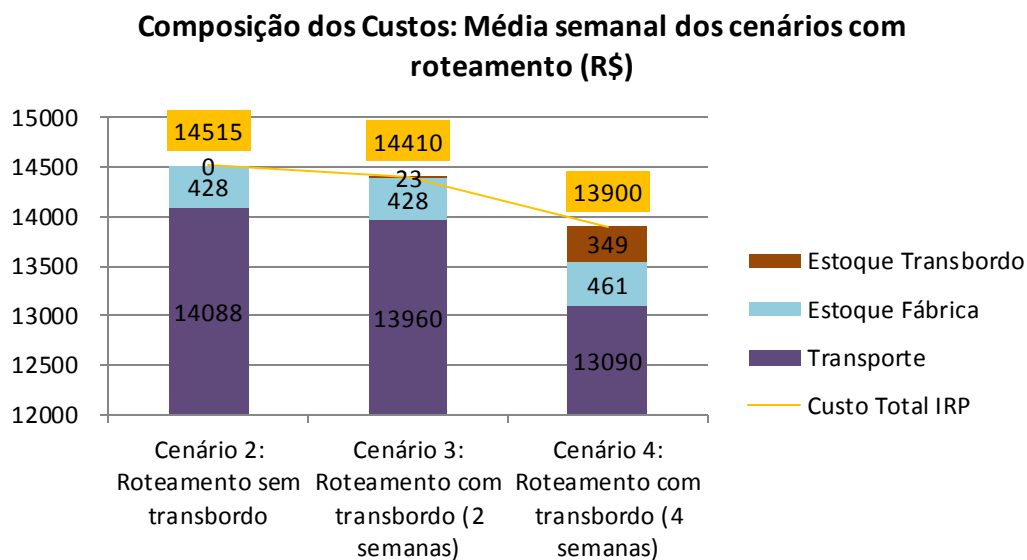


Figura 9 - Composição dos Custos: Média Semanal

### Definição das Rotas Ótimas

Com base nos dados avaliados, a principal variável de custo do sistema de distribuição é o custo de transporte. Este custo é diretamente relacionado com as distâncias percorridas nas rotas de distribuição e o tipo de veículo utilizado.

As distâncias totais na distribuição direta são bem mais expressivas, apesar de não se incorrer com os custos de estoque. Já nos modelos roteirizados, as distâncias variam de acordo com o nível de transbordo planejado em cada período. Tais diferenças podem ser notadas na Figura 10, que apresenta a distância total percorrida para cada um dos cenários.

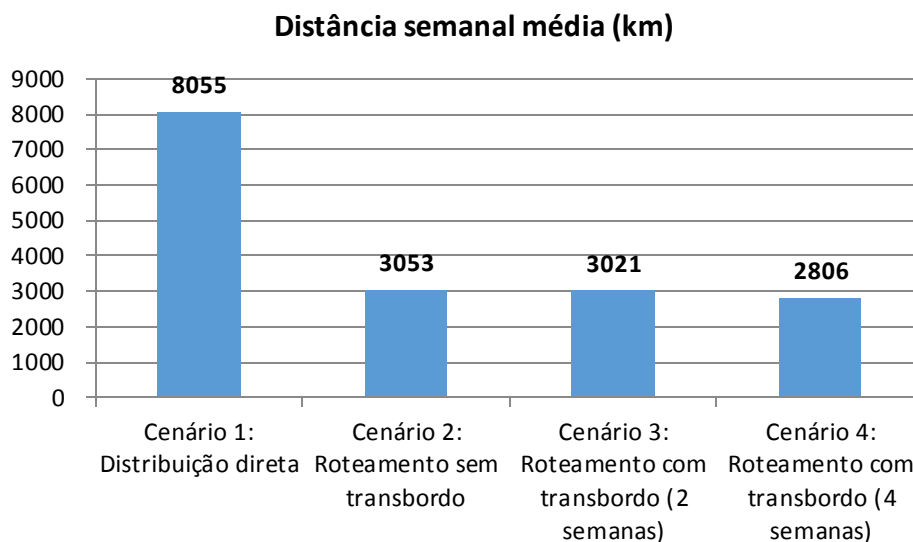


Figura 10 - Distâncias Totais Percorridas (em quilômetros)

O modelo de otimização para o Cenário 2, consistindo no horizonte de duas semanas sem a opção de transbordo entre fornecedores, apresentou os resultados ótimos ilustrados na Tabela 6. O formato da rota ótima apresentada é sequencial para cada nó  $i$  a ser visitado.

Tabela 6 - Resultado Ótimo sem Transbordo

Período	Tipo Veículo	Rota Ótima
1	2	0-2-1-5-6-8
1	2	0-3-7-4-8
2	2	0-2-7-4-5-8

Ao se habilitar a opção de transferência de produto de um fornecedor para o outro (Cenário 3), o sistema passa a incorrer em um custo adicional referente à armazenagem de produto em terceiros. Esta alternativa gera, entretanto, economia no custo total através da redução do custo de transporte. A solução ótima relativa a este cenário é apresentada na Tabela 7.

De acordo com os resultados, nota-se que a solução ótima consiste na transferência de 4 unidades de produto do fornecedor 1, localizado em Itajaí, para armazenamento no fornecedor 4, localizado em Curitiba, até que este seja coletado no período 2. Desta forma, o fornecedor localizado em Itajaí não precisa

ser visitado novamente no período 2, gerando-se redução na distância total percorrida e consequente redução do custo de transporte.

Tabela 7 - Resultado Ótimo com Transbordo

Período	Tipo Veículo	Rota Ótima
1	2	0-2-1-4-8
1	2	0-3-7-5-6-8
2	2	0-2-7-4-8

O resultado gráfico do roteamento obtido para cada um dos períodos após a rodada de otimização do modelo pode ser observado na Figura 11:

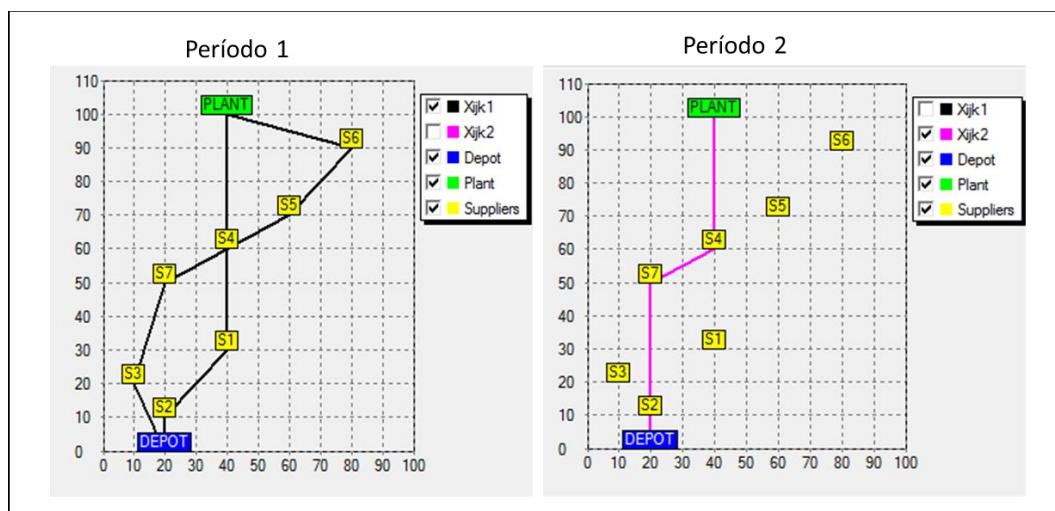


Figura 11 - Resultado Gráfico do Roteamento

A operação com transbordo gera um benefício de aproximadamente R\$ 7 mil, pequeno quando comparado ao gasto total com transporte.

Ao se adicionar mais duas semanas no horizonte de planejamento, a alternativa de se realizar transbordo torna-se mais atraente, trazendo-se benefícios incrementais. Nota-se portanto, que quanto maior o horizonte de planejamento disponível, maior é o benefício capturado em função do transbordo. A disponibilidade de informação de demanda de forma antecipada deve ser avaliada pela empresa como alternativa de redução de custos.

A Tabela 8 apresenta o plano ótimo para cada um dos períodos, com a rota e o veículo a ser utilizado.



Tabela 8 - Resultado Ótimo com Transbordo e Horizonte de 4 Semanas

Período	Tipo Veículo	Rota Ótima
1	2	0-1-2-4-8
1	2	0-3-7-5-8
2	2	0-2-7-4-8
3	2	0-1-5-8
3	2	0-2-7-4-8
3	2	0-2-7-4-8

Nota-se que a solução ótima consiste na transferência de 25 unidades de produto dos fornecedores 1, 3 e 6 para coletas posteriores em períodos distintos. Mais uma vez, obtém-se redução na distância total percorrida e consequente redução do custo de transporte.

O resultado gráfico do roteamento obtido para cada um dos períodos após a rodada de otimização do modelo pode ser observado na Figura 12.

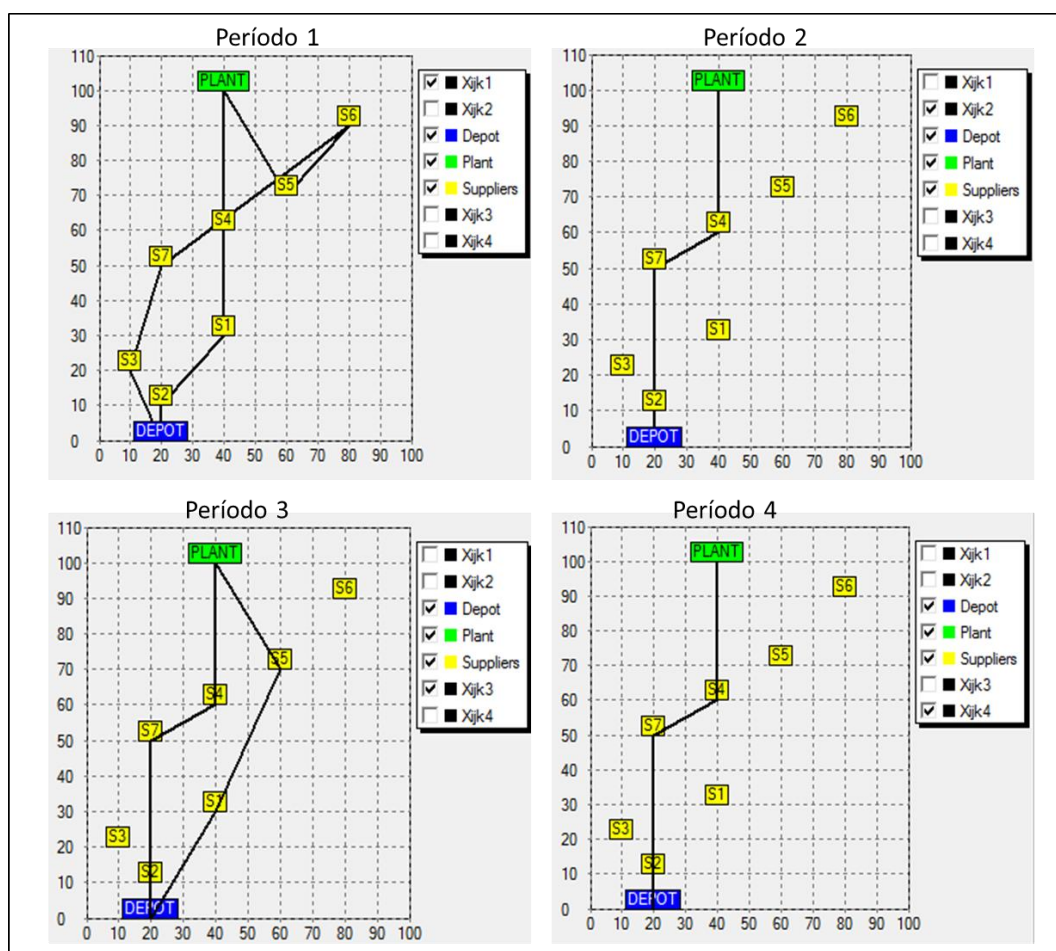


Figura 12 - Resultado Gráfico do Roteamento com 4 Semanas

## Resultados Financeiros

Considerando as opções avaliadas no modelo, o cenário ótimo traz um benefício anual estimado em R\$ 1.068.000, referente à redução de custos com a alteração do modelo operacional para a coleta com roteamento (R\$ 1.035.000), e benefício adicional de R\$ 33.000 através da redução do custo e transporte com transbordos. A Figura 13 apresenta os componentes de redução de custo e os benefícios financeiros obtidos.

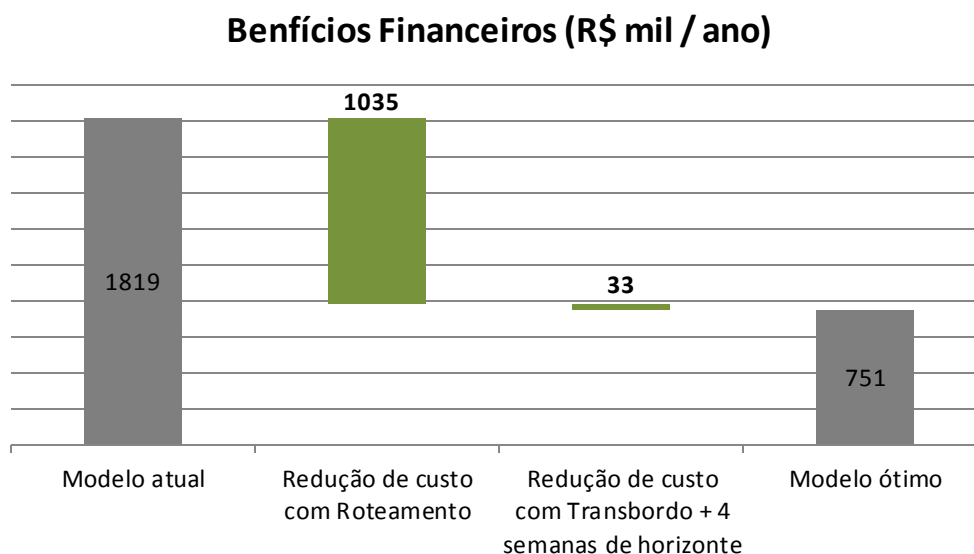


Figura 13 - Benefícios Financeiros

Estes valores são sensíveis à demanda e ao ciclo de planejamento previamente apresentado, podendo-se ter um acréscimo caso o horizonte de planejamento se amplie ainda mais. Além disso, os custos de transporte e armazenagem foram baseados no modelo atual, podendo ser desafiados em próximas negociações comerciais com base nas seguintes premissas:

- Podem-se desenvolver acordos comerciais de colaboração entre fornecedores para que o custo de armazenagem de transbordo seja reduzido;
- A especificação de veículos pode ser revista de forma a se balancear ainda mais a natureza da demanda prevista (capacidade versus custos variáveis).

## Resultados Não Financeiros

Além dos benefícios financeiros mapeados, outros aspectos foram considerados positivos na implementação do modelo na Souza Cruz. Dentre eles, destacam-se:

- A redução das distâncias percorridas gera por consequência a redução da emissão de gases danosos ao meio ambiente, o que está alinhado à estratégia de sustentabilidade da empresa;

- Validação através de um estudo científico de que a operação de transbordo, já testada pontualmente, é uma alternativa eficaz para a redução de custos logísticos, podendo-se ser replicada em outros casos;
- Um modelo operacional concentrado em um único transportador possibilita maior controle das variáveis de decisão, permitindo-se a obtenção de eficiência global;
- Análise da operação atual sob a ótica acadêmica, como forma de se desafiar o modelo operacional vigente e buscar inovação de processos.
- Possibilidade de replicação das técnicas de otimização estudadas em outros casos reais;
- A redução das distâncias percorridas com um menor número de viagens gera menor exposição dos veículos a eventuais furtos e roubos de carga.

Por se tratar de um modelo de otimização que envolve uma cadeia de suprimentos composta por fornecedores e o transportador, estes também devem capturar benefícios obtidos com a implementação do cenário ótimo.

Do ponto de vista do transportador, a concentração da demanda em seu escopo representa uma oportunidade adicional de negócios. Este transportador não necessariamente seria selecionado pelos fornecedores para as entregas diretas, e com o modelo roteirizado ele passa ter uma certa garantia a previsibilidade da demanda, além do volume de negócio incremental. Por se tratar de um modelo otimizado, a necessidade de alocação de veículos para o atendimento da demanda é mínima, enquanto que se operando em condições normais de mercado a margem de segurança adotada é sempre maior. Os custos internos, por consequência, tendem a ser reduzidos.

Sob a ótica dos fornecedores, a colaboração entre os elos da cadeia gera maior confiabilidade na entrega. A responsabilidade de execução do plano é mútua, e faz com que medidas contingenciais de atendimento sejam alinhadas e acordadas entre todos, a despeito das duras penalidades por falha de atendimento nas entregas diretas. Além disso, a possibilidade de se realizar o transbordo gera

um novo campo de oportunidades para balanceamento de estoque e redução do tempo de resposta. Fornecedores podem colaborar entre si compartilhando capacidades de armazenagem de acordo com suas respectivas sazonalidades, e podem ser alternativas mais baratas que o aluguel de um armazém como forma de se avançar o estoque.

## Conclusão

A principal motivação deste trabalho foi a possibilidade de aplicação real de um problema que envolve a otimização de estoque e roteamento. Diversas são as pesquisas e aplicações práticas de problemas de roteamento, e o estágio de maturidade da Souza Cruz em relação à adoção destas técnicas é bastante avançado no que tange a distribuição direta ao varejo, sendo uma empresa referência nos processos de logística.

A oportunidade de poder conciliar duas funções conflitantes – transporte e estoque – no processo de abastecimento a partir de fornecedores para a fábrica, envolvendo transportadores e fornecedores, torna a aplicação mais inovadora em relação aos projetos já realizados na empresa, e indiscutivelmente contribui para a integração e otimização da cadeia de abastecimento como um todo.

A necessidade das empresas de manterem relações integradas e adotarem estratégias coletivas é fator determinante para garantir o desenvolvimento de uma cadeia de suprimentos. Entretanto, apesar de tais discussões estarem bastantes evoluídas quando se trata de empresas de grande porte, a implementação prática entre empresas dos mais diversos níveis de maturidade depende de acordos comerciais que visem o compartilhamento de ganhos e sistemas adequados para compartilhamento de dados, o que não é tão trivial para as demais empresas envolvidas no modelo em questão. Neste contexto, este trabalho propõe que as decisões individuais de abastecimento de cada fornecedor sejam compartilhadas com o transportador, de forma a se obter o ótimo global, e os benefícios serão percebidos por todos os envolvidos.

A análise da diversidade de soluções obtidas permitiu observar que as soluções com maior período de planejamento possuem menor custo total, uma vez que o transbordo de cargas é uma alternativa viável para a redução de custo de transportes. O transbordo de cargas é uma prática comumente adotada em terminais de cargas, onde contêineres transitam entre diferentes terminais até que sejam entregues ao seu destino final. A adoção de um modelo de abastecimento com transbordo em transporte puramente rodoviário é também algo inovador para a Souza Cruz. Algumas experiências já foram realizadas pontualmente, mas a implementação desta alternativa como operação padrão é vista de forma bastante

positiva como uma quebra de paradigma, uma vez que depende de análise quantitativa que comprovem os benefícios e acordos comerciais com fornecedores.

Além do benefício adquirido com o transbordo, o roteamento por si só traz um ganho financeiro bastante significativo. A roteirização permite determinar o conjunto de rotas de menor custo que atenda às necessidades dos nós, respeitando restrições operacionais, tais como capacidade dos veículos e custos inerentes ao carregamento de estoque. A implementação de um sistema de despacho na empresa analisada pode ser considerada um passo além do modelo tradicional de planejamento.

O potencial benefício financeiro da otimização do processo de abastecimento em questão é na ordem de R\$ 1,1 milhão por ano, representando uma redução de custos de aproximadamente 60%. Além do benefício tangível, a Souza Cruz entende que a análise e diagnóstico de sua operação logística com a ótica acadêmica é algo bastante promissor, e a replicação de estudos similares pode ser esperada, como benefício adicional ao mapeado neste trabalho.

Apesar da Souza Cruz possuir duas fábricas e inúmeros fornecedores, na modelagem em questão apenas uma fábrica é considerada. O escopo do problema engloba o centro de gravidade da empresa em volume e frequência de fluxos, envolvendo os principais fornecedores da região Sul e Sudeste e sua maior fábrica localizada em Uberlândia. Extensões do problema podem ser aplicadas em outros cenários seja na rede de abastecimento ou não de distribuição. Apesar do algoritmo poder ser aplicado diretamente em problemas com configurações distintas, existe a necessidade de conhecimento em técnicas de modelagem e otimização para que cenários futuros sejam modelados e avaliados pela empresa.

Outra extensão natural a esta pesquisa é a análise do problema com demanda estocástica. Os resultados computacionais demonstram que as rotas ótimas são diretamente afetadas pela natureza da demanda. Portanto, uma recomendação para pesquisas futuras é a inclusão de variabilidade na demanda e a definição do estoque de segurança necessário para absorver a taxa de variação definida, e como as rotas ótimas podem variar de acordo com esta taxa.

O modelo de otimização apresentado no trabalho de Mirsapour & Reik (2014) usado como referência para adaptação do caso da Souza Cruz possui uma

vertente ligada a sustentabilidade, buscando-se uma solução que atende aos limites de emissão de carbono pré-estabelecidos. Esta também é uma abordagem interessante para aplicações futuras, uma vez que práticas de sustentabilidade voltadas para a logística têm sido tratadas como instrumento de redução dos impactos ambientais provocados pelas atividades empresariais.



## Referências Bibliográficas

AZUMA, R. **Otimização multiobjetivo em problema de estoque e roteamento gerenciados pelo fornecedor**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, 2011.

BARD, J., HUANG, L., JAILLET, P., & DROR, M. 1998. ***A decomposition approach to the inventory routing problem with satellite facilities***. Transportation science, 189–203.

BAUSCH, D.O., BROWN, G.G., RONEN, D. (1998). ***Scheduling short-term marine transport of bulk products***. Maritime Policy & Management, 25(4):335-348

BELFIORE, P.; COSTA, O.; FAVERO, L. P. **Problema de Estoque e Roteirização: revisão bibliográfica**. Produção, v.16, n.3, 2006, pp. 442-454.

BERTAZZI, L. SPERANZA, M.G. ***Continuous and Discrete Shipping Strategies for the Single Link Problem***. Transportation Science, 2000, Vol. 36, No. 3, p. 314-325.

CAMPBELL, A.; CLARKE, L.; KLEYWEGT, A.; SAVELSBERGH, M. W. P. ***The Inventory Routing Problem***. In: Fleet Management and Logistics, GRAINIC, T. G., LAPORTE, G. (eds), Kluwer Academic Publishers, p.95-113, 1998.

CAMPBELL, A.; CLARKE, L.; SAVELSBERGH, M.W.P. ***Inventory Routing in Practice***. In: The Vehicle Routing Problem, TOTH, P., VIGO, D. (eds), SIAM monographs on discrete mathematics and applications, p. 309-330, 2002.

CHRISTIANSEN, M., FAGERHOLT, K. (2002). ***Robust ship scheduling with multiple time windows***. Naval Research Logistics, 49(6):611-625,

CHRISTIANSEN, M., FAGERHOLT, K., RONEN, D. (2004). ***Ship routing and scheduling: Status and perspectives***. Transportation Science, 38(1):1-15.

CHRISTOPHER, M. ***Logistics and supply chain management, strategies for reducing cost and improving service***, 2nd ed. Pearson Education, 1998

COELHO, L. C., CORDEAU, J.F., LAPORTE, G. ***The inventory-routing problem with transshipment***, Computers and Operations Research, v.39 n.11, p.2537-2548, November, 2012

COELHO, L. C., CORDEAU, J.F., LAPORTE, G. ***Thirty Years of Inventory Routing***. Transportation Science, 48(1):1-19, 2014.

COUNCIL OF SUPPLY CHAIN MANAGEMENT PROFESSIONALS. ***Supply Chain Management/Logistics Management Definitions***. Disponível:

<http://cscmp.org/Website/AboutCSCMP/Definitions/Definitions.asp>.

Acesso em 09 out. 2015.

COYLE, J. J., BARDI, E. J., & LANGLEY, C. J., Jr. (2003). ***The management of business logistics – a supply chain perspective***. Mason: South-Western.

ENGINEER, F. G., FURMAN, K. C., NEMHAUSER, G. L. (2012). ***A branch-and-price-and-cut algorithm for single-product maritime inventory routing***. Operations Research, 60(1):106-122.

GARG, R., & PRAKASH, S. (1985). ***Time minimizing transshipment problem***. Indian Journal of Pure and Applied Mathematics, 16(5), 449-460

GROUNHAUG, R., CHRISTIANSEN, M., DESAULNIERS, G., DESROSIERS, J. (2010). ***A branch-and-price method for a liquefied natural gas inventory routing problem***. Transportation Science, 44(3):400-415

HARRISON, A. & VAN HOEK, R. ***Logistics management and strategy***, Pearson Education, Prentice Hall, 2002

KLEYWEGT, A. J.; NORI, V. S.; Savelsbergh, W.P. ***The Stochastic Inventory Routing Problem with Direct Deliveries***. Transportation Science, v. 36, n. 1, p. 94-118, 2002

KLINGENBERG, C. O.; ANTUNES, J. A. V. J. **Construção de um modelo orientativo para a implantação do VMI em empresas da indústria supermercadista brasileira**. In: XXXVII Assembleia do Conselho Latino-Americano de Escolas de Administração, 2002.

MIRSAPOUR, S., & REKIK, Y. (2014). ***Multi-product multi-period Inventory Routing Problem with a transshipment option: A green approach***. Int. J.ProductionEconomics, 80–88.

PERSSON, J. A., GOTHE-LUNDGREN, M. (2005). ***Shipment planning at oil refineries using column generation and valid inequalities***. European Journal of Operational Research, 163(3):631-652

PIRES, S.R.I. **Gestão da Cadeia de Suprimentos (Supply Chain Management)**. Ed. Atlas, 2004.

QU, W. W., BOOKBINDER, J. H., YOGUN, P. (1999). ***An integrated inventory-transportation system with modified periodic policy for multiple products***. European Journal of Operational Research, 115(2):254-269

RONEN, D. (1993). ***Ship scheduling: The last decade***. European Journal of Operational Research, 71(3):325-333.

SILVA, L. A. T. (2008). **Logística no comércio exterior**. São Paulo: Edições aduaneiras Ltda.

SONG, J. H., FURMAN, K. C. (2012). ***A maritime inventory routing problem: Practical approach***. Computers & Operations Research. doi: 10.1016/j.cor.2010.10.031

UGGEN, K. T., FODSTAD, M., NORSTEBØ, V. S. (2011). ***Using and extending fix-and-relax to solve maritime inventory routing problems***. TOP, Forthcoming, doi:10.1007/s11750-011-0174-z.

WANKE, P. **Uma Revisão dos Programas de Resposta Rápida: ECR, CRP, VMI, CPFR, JIT II**. [Online] Disponível na Internet via <http://www.cel.coppead.ufrj.br/fs-public.htm>. Consultado em Maio 2015, 2004

XIA, Mingjun. ***Integrated Supply Chain Network Design: Location, Transportation, Routing and Inventory Decisions***. 2013. 150p. Tese (PhD) – Arizona State University, Tempe, Arizona, April 2013.

ZNAMENKY, A.; CUNHA, C. B. **O problema de estoque-roteirização com demanda determinística**. Revista Transportes, v. XI, p. 31-40, dezembro 2003.