

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO

MARCEL YOUZEN KIKUCHI BRUNELLO

Modelagem e otimização de custos logísticos

São Paulo

2005

MARCEL YOUZEN KIKUCHI BRUNELLO

Modelagem e otimização de custos logísticos

Dissertação apresentada ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, para obtenção do título de Mestre em Processos Industriais.

Área de Concentração: Desenvolvimento e otimização de processos industriais

Orientador:

Profa. Dra. Solange Aparecida Machado

São Paulo

2005

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Centro de Informação Tecnológica do IPT

B894m Brunello, Marcel Youzen Kikuchi

Modelagem e otimização de custos logísticos. / Marcel Youzen Kikuchi Brunello.
São Paulo, 2005.
89p.

Dissertação (Mestrado em Processos Industriais) - Instituto de Pesquisas
Tecnológicas do Estado de São Paulo. Área de concentração: Desenvolvimento e
otimização de processos industriais.

Orientador: Prof. Dra. Solange Aparecida Machado.

1. Logística 2. Transporte ferroviário 3. Produto siderúrgico 4. Modelagem de
custo 5. Custo logístico 6. Programação linear 7. Siderurgia 8. Tese I. Instituto de
Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Centro de Aperfeiçoamento
Tecnológico II. Título

para Renata

Agradecimentos

A professora Solange Machado, sempre atenciosa e prestativa, contribuiu com varias idéias e orientações ao longo dessa jornada. Gostaria de agradecer também a todos os professores do mestrado. Os conselhos e experiências compartilhadas durante esses anos foram tão importantes quanto as teorias transmitidas em sala de aula. Gostaria de agradecer ao professor Agenor Fleury pelas suas sugestões e soluções sempre inteligentes e criativas. E o professor Marco Giulietti que vem realizando um excepcional trabalho no desenvolvimento e na coordenação dos cursos de mestrado oferecidos pelo IPT. Gostaria de agradecer à Edna Gubitoso e à Ester Santos pelo auxílio com a bibliografia, referências e revisão do texto. Agradeço também ao Adilson Feliciano pelo auxílio e pró-atividade na secretaria do IPT.

Gostaria de agradecer aos professores do departamento de Engenharia de Produção da POLI que tiveram contribuição direta ou indireta na realização desse trabalho. Agradeço aos meus colegas da turma de Engenharia de Produção de 1998 que até hoje me acompanham e servem de modelo para meu aperfeiçoamento profissional e pessoal.

Gostaria de agradecer ao Marcelo Turri, da empresa AçoForte (AF), que contribuiu muito com idéias, conceitos e experiências. Muitas das modelagens utilizadas no trabalho foram decorrência de idéias para solução de problemas diários encontrados na AF.

Principalmente agradeço aos meus pais Airton e Natalícia e ao meu irmão Alex por todos os momentos de paciência, apoio e compreensão.

RESUMO

O trabalho analisa a viabilidade da utilização do modal ferroviário em algumas operações logísticas da empresa AçoForte (AF). Busca-se o aproveitamento da utilização do modal ferroviário em locais onde existe disponibilidade de infra-estrutura ferroviária e rodoviária. Foi identificada uma usina da empresa para ser utilizada como piloto no modelo. Apesar de existir uma malha ferroviária disponível para utilização, essa usina realiza o transporte de produtos acabados através de rodovias. A partir desse caso, é desenvolvido um modelo com objetivo de analisar a viabilidade da utilização da estrutura ferroviária no local. O modelo do estudo leva em consideração diversas variáveis, sendo as principais, os custos de estoque e frete. Através da interpretação e exploração dos resultados do modelo, a empresa consegue potencializar as reduções de custo de estoque e frete através da otimização da escolha do seu *mix* de transporte. Somente no caso piloto da usina AçoNordeste, a AF economiza anualmente mais de 105 mil reais em custos de frete e estoques. A solução ótima do sistema indica que o modal ferroviário deve ser implementado em 100% da operação. No entanto, observa-se que a solução ótima é relativamente sensível a variações no frete ferroviário e na cotação do aço. Verifica-se, na prática, a importância das parcerias públicas privadas. Através dessas parcerias, haveria aumento na oferta e disponibilidade de rotas ferroviárias. Além disso, esse investimento aceleraria ganhos de produtividade que poderiam provocar maiores reduções nos fretes ferroviários.

Palavras-chave: Programação Linear; Logística; Transportes; Ferrovia.

ABSTRACT

This work analyses the viability of using railroad modal in some logistics operations of a steel company here called AçoForte (AF). The main goal is to optimize the use of that modal on places where both railroad and highway infrastructures are available. A plant was identified to be used as the first test to the implementation of the model. Despite the fact that this plant has railroad infrastructure available, all goods are transported through highways. Base on that case, it is developed a model that analyses the viability of the use of railroad transportation. The model takes in consideration many variables, nevertheless, the main ones are stock and freight costs. Through the analyses and interpretation of model's results, the company is able to minimize stock and freight costs. The model focuses on the optimization of transportation's mix. Based on the first case study, the company makes more than R\$ 105.000,00 of annual freight and stock cost savings. The best solution to the model indicates that 100% of the operation should be done using railroads. However, it is stated that this solution is very sensitive to variations on freights and steel prices. This work states the importance of public private partnerships. Those former partnerships, could improve the offer and availability of railroads rotes. Besides this, those investments could accelerate the productivity profits which could trigger bigger freight reductions.

Key-words: Linear Programming; Logistics; Transportation; Railroad.

Lista de Figuras

Figura 1 – Produção mundial de aço. Fonte:www.ibs.org.br.....	10
Figura 2 – Produção brasileira de aço. Fonte:www.ibs.org.br	11
Figura 3 – Inbounding e Outbounding. Adaptado de Garrido & Miranda (2003)	17
Figura 4 – Logística e outras áreas da empresa. Fonte: Slack et al. (1995)	17
Figura 5 – Estoque. Fonte: Slack et al. (1995)	24
Figura 6 – Variação na quantidade demandada. Fonte: Slack et al. (1995).....	25
Figura 7 – Variação no LT. Fonte: Slack et al. (1995).....	26
Figura 8 – Distribuição Normal Padronizada. Adaptado de Costa Neto (2002).....	28
Figura 9 – FS em função do NS.....	29
Figura 10 – Sistema com ES. Fonte: Slack et al. (1995)	30
Figura 11 – Logística e áreas corporativas. Fonte: Copacino et al., (1985).	31
Figura 12 – Mapa das principais ferrovias. Fonte: www.geipot.gov.br	37
Figura 13 – Mapa das principais hidrovias. Fonte: www.antaq.gov.br	42
Figura 14 – Volume de carga nos portos. Fonte:www.antaq.gov.br	43
Figura 15 – Desafio de Fermat.....	44
Figura 16 – Fluxo de materiais pela rede logística.	49
Figura 17 – Distribuição esquemática da rede logística pelo país	50
Figura 18 – Custos em função do modal.....	52
Figura 19 – Fluxos da modelagem. Adaptado: Garrido & Miranda, (2003)	54
Figura 20 – Comparação dos Cenários	73

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Produção mundial de Aço. <i>Fonte: www.iisi.org</i>	11
Tabela 2 – Produção de mundial de Aço. <i>Fonte: www.ibs.org.br</i>	12
Tabela 3 – Valores tabelados do FS. <i>Fonte: Giansesi et al.(2001)</i>	27
Tabela 4 – Comparação entre modais. <i>Fonte: Ballou (1999)</i>	33
Tabela 5 – Utilização dos modais no Brasil. <i>Fonte: www.geipot.gov.br</i>	34
Tabela 6 – Extensão da malha rodoviária. <i>Fonte: www.dnit.gov.br</i>	35
Tabela 7 – Distribuição da frota brasileira. <i>Fonte: www.dnit.gov.br</i>	35
Tabela 8 – Malha ferroviária por bitola 2001. <i>Fonte: www.geipot.gov.br</i>	36
Tabela 9 – Produtos movimentados por ferrovia 2001. <i>Fonte:www.geipot.gov.br</i> .	38
Tabela 10 – Malha ferroviária por UF 2001. <i>Fonte: www.geipot.gov.br</i>	38
Tabela 11 – Malha ferroviária por ferrovia 2001. <i>Fonte: www.geipot.gov.br</i>	39
Tabela 12 – Volume transportado por ferrovia 2001. <i>Fonte: www.geipot.gov.br</i> ...	39
Tabela 13 – Grau de utilização por ferrovia 2001. <i>Fonte: www.geipot.gov.br</i>	40
Tabela 14 – Movimentação por hidrovía. <i>Fonte: www.antaq.gov.br</i>	41
Tabela 15 – Movimentação de carga nos portos. <i>Fonte: www.antaq.gov.br</i>	43
Tabela 16 – Consumo mensal nos CDs atendidos pela AN. <i>Fonte: AF</i>	55
Tabela 17 – Frete entre a AN e os CDs. <i>Fonte: AF</i>	56
Tabela 18 – Valor contábil (v) dos produtos da AF nos CDs.....	60
Tabela 19 –NS e FS dos produtos da AF nos CDs.	61
Tabela 20 – LTs ferroviário e rodoviário entre a AN e os CDs	61
Tabela 21 – LTs Cenário 6.....	72
Tabela 22 – Malha ferroviária por bitola. <i>Fonte: www.geipot.gov.br</i>	83
Tabela 23 – Movimentação nos portos do Brasil. <i>Fonte: www.antaq.gov.br</i>	84

Lista de Abreviaturas e Siglas

aa – ao ano

AF – AçoForte

am – ao mês

AN – AçoNordeste

ANTAQ – Agência Nacional de Transportes Aquaviários

DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes

IBS – Instituto Brasileiro de Siderurgia

IISI – International Iron and Steel Institute

GEIPOT – Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes

LT – Lead Time (dias)

NS – Nível de Serviço

PR – Ponto de Ressuprimento (t)

RESUMO

ABSTRACT

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Abreviaturas e Siglas

1 Introdução	10
2 Revisão Bibliográfica	15
2.1 Logística	16
2.1.1 Estoque	19
2.1.2 Lead Time	21
2.1.3 Nível de Serviço	22
2.1.4 Equações de Estoque	24
2.1.5 Atuação da Logística	31
2.2 Modais	33
2.2.1 Rodoviário	35
2.2.2 Ferroviário	36
2.2.3 Aquaviário	41
2.3 Modelos de Otimização	44
2.3.1 Aplicação	46
3 Metodologia Proposta	48
3.1 Definição do Problema	49
3.2 Modelagem	53
3.2.1 Modelo do Custo do Frete	57
3.2.2 Modelo do Custo de Estoque	60
3.2.3 Modelo Completo	66
4 Resultado	68
4.1 Cenários	70
4.2 Análise de Sensibilidade	74
5 Conclusão	76
6 Bibliografia	80
7 Anexos	83

1 Introdução

A proposta desse trabalho é avaliar e modelar o processo de distribuição de produtos de uma grande empresa do setor siderúrgico. A partir dessa avaliação, é feito um modelo que procura representar e simular diversas condições no processo de distribuição.

O processo de distribuição de produtos siderúrgicos vem observando rápidos aumentos nos volumes transportados. Esse cenário não é exclusivo da realidade brasileira. O mercado de aço mundial está fortemente aquecido devido a uma grande elevação na demanda internacional, principalmente da China.

Figura 1 – Produção mundial de aço. *Fonte:www.ibs.org.br*

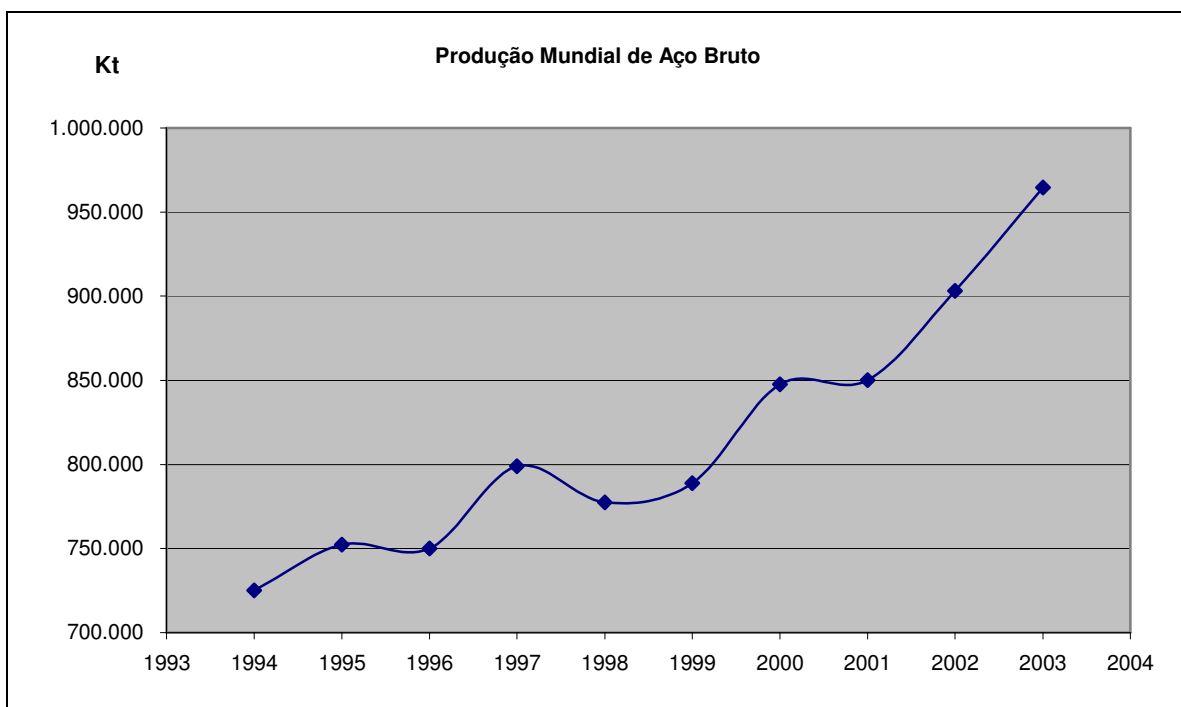
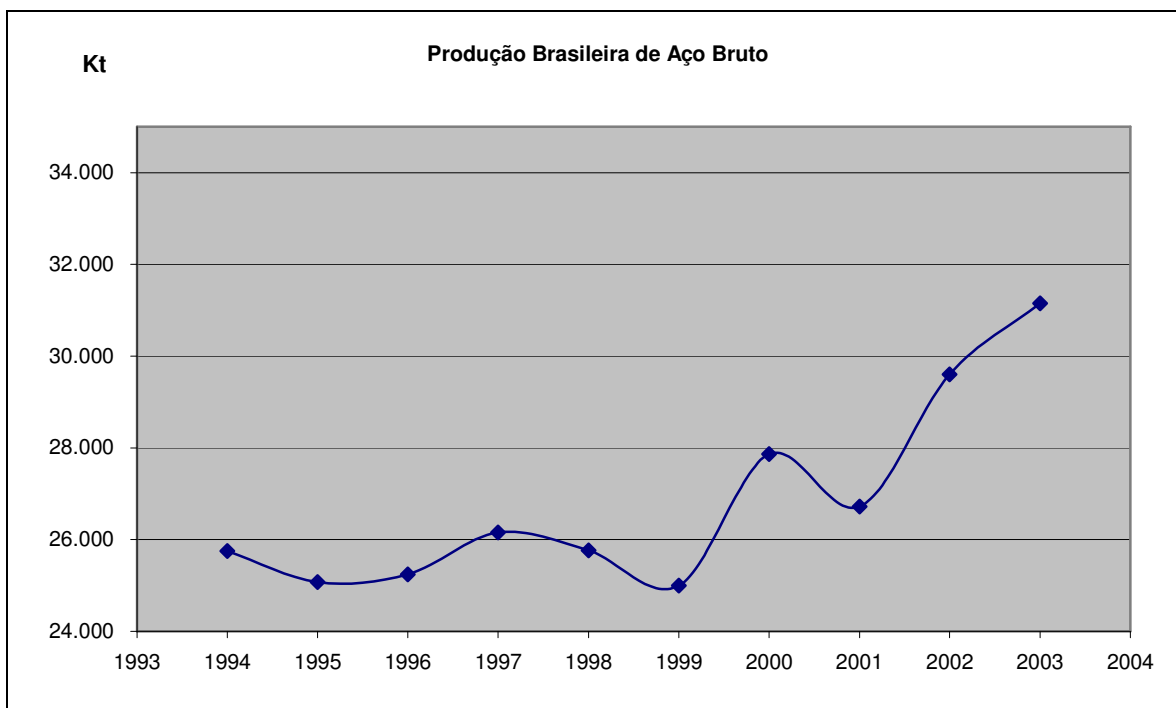


Tabela 1 – Produção mundial de Aço. *Fonte: www.iisi.org*

Produção Anual de Aço Bruto (kt)		
	Ranking 2003	
1o	China	220.100
2o	Japão	110.500
3o	EUA	90.400
4o	Rússia	62.700
5o	Coréia do	46.300
6o	Alemanha	44.800
7o	Ucrânia	36.900
8o	Índia	31.800
9o	Brasil	31.100
10o	Itália	26.700

O mercado brasileiro está sendo fortemente influenciado por essa alta na demanda internacional. Segundo José Armando Figueiredo Campos - Presidente do Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS) - "A produção brasileira de aço bruto em 2003 alcançou 31,1 milhões de toneladas, um recorde histórico que representa 5,2% de acréscimo sobre 2002" (IBS, 2003).

Figura 2 – Produção brasileira de aço. *Fonte:www.ibs.org.br*

Para atender a essa demanda crescente, estão sendo feitos altos investimentos no aumento da capacidade produtiva brasileira. Segundo o IBS, nos próximos cinco anos serão feitos investimentos na ordem de U\$S 7,4 bilhões para aumentar a capacidade produtiva siderúrgica brasileira, o que resultará num aumento de 30% na capacidade de produção de aço.

Tabela 2 – Produção de mundial de Aço. *Fonte: www.ibs.org.br*

Capacidade Instalada de Produção de Aço Bruto (Kt)									
1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
28.200	28.300	29.550	29.897	30.557	28.928	29.889	32.876	33.303	34.074

Para sustentar esses aumentos na demanda, volumes produzidos, transportados e armazenados, foram intensificados os investimentos na infraestrutura logística. Esse rápido crescimento gerou um enorme campo de trabalho para projetos de otimização e melhorias logísticas.

A siderurgia é um setor onde os custos logísticos têm uma importância significativa no seu modelo de negócio. Além de lidar com itens de baixo valor agregado, o setor siderúrgico tem diversas particularidades, que o torna muito sensível ao custo logístico. Normalmente, existem grandes distâncias separando as áreas produtoras e os centros consumidores. Os volumes transportados são muito altos, da ordem de dezenas de milhões de toneladas por ano.

Diante deste cenário de rápido crescimento e da grande importância da logística no negócio do aço, pode-se ter uma dimensão dos investimentos que foram feitos para aumentar a capacidade logística das usinas brasileiras.

Numerosos estudos utilizando técnicas de pesquisa operacional já foram realizados com o objetivo de projetar a localização de fábricas, centros de distribuição e depósitos. Autores como Magee (1967), Ballou (1999), Bowersox *et al.* (1986) e Winston (1995) tiveram grande importância no processo de desenvolvimento, difusão e aplicação das técnicas de programação linear para a resolução de problemas de otimização logísticos.

A maioria das empresas que realiza análises com técnicas de otimização e programação linear, utiliza modelos propostos por estes autores clássicos cuja eficiência já é largamente conhecida.

Uma necessidade que está constantemente presente no dia a dia das organizações é justamente a adaptação dos modelos clássicos às realidades e particularidades de cada empresa e região.

Essa necessidade da indústria foi identificada e recentemente têm sido feitos muitos estudos e pesquisas nessa linha de atuação.

Miranda e Garrido (2003) desenvolveram um modelo que otimiza simultaneamente a localização da malha logística e alguns parâmetros de gestão de estoque como estoque de segurança e ponto de ressuprimento.

Dessa maneira, os autores evoluíram da abordagem clássica e chegaram num modelo mais completo. Com um modelo mais próximo da realidade, a otimização se torna mais correta e precisa. Essa evolução representa uma grande economia de tempo e dinheiro para a empresa.

Dentro do mercado de distribuição de aço, existem diversas otimizações e estudos que precisam ser feitos para redução de custos e otimização da utilização da infra-estrutura existente.

Uma dessas oportunidades é o estudo da viabilidade da utilização de diferentes formas de transporte de produtos acabados. Grande parte dos recentes avanços na infra-estrutura brasileira não foi levada em consideração nos primeiros estudos e otimizações realizadas pelas empresas. A situação da malha ferroviária é um exemplo evidente deste fato.

De acordo com Gitman (1997), o modal ferroviário possui um custo de frete aproximadamente 40% inferior ao rodoviário. No entanto, por se tratar de um modal com maior tempo de entrega, haverá necessidade de se manter maiores níveis de estoque para compensar o maior tempo de entrega. Portanto, pode-se dizer que a adoção do modal ferroviário implica em uma redução dos custos de frete (C_f), mas em contrapartida, há um aumento nos custos de estoque (C_e).

Segundo Ballou (1999), o problema básico da logística é o gerenciamento dos custos conflitantes. Esse é justamente o ponto central do modelo de otimização.

Caso o transporte de produtos acabados seja feito inteiramente através do modal rodoviário, o C_e provavelmente será baixo e o C_f correspondente será alto.

De maneira inversa, se 100% do volume for movimentado através do ferroviário, o C_f será menor e o C_e maior. É necessário um modelo que minimize os custos totais (C_t).

O modelo deve balancear o conflito entre o custo do frete e o custo de estoque. Através de algumas simulações, espera-se determinar um cenário ótimo de utilização dos modais onde os custos totais da operação são minimizados. Esse custo então é comparado com o custo atual da operação logística da empresa. A partir dessa comparação é determinada a viabilidade ou não da adoção do modal ferroviário no processo.

O trabalho está estruturado em quatro capítulos, além da introdução: revisão bibliográfica, definição e modelagem do problema, resultado e conclusão.

Na revisão bibliográfica, são levantados os principais aspectos da logística, dos modais e dos modelos de otimização relacionados com o problema estudado. Na etapa seguinte, são enumeradas as condições e restrições práticas do caso da empresa estudada, de maneira a definir e enunciar totalmente o problema. Nas etapas seguintes são apresentados e discutidos os resultados, análise de sensibilidade e a conclusão da modelagem.

2 Revisão Bibliográfica

Grande parte dos conceitos elementares, relacionamentos e equações de gestão de estoque utilizados no estudo derivam dos grandes mestres que ergueram os pilares do conhecimento logístico. Autores como Ballou, Bowersox, Magee e outros são referência obrigatória nessa área do conhecimento.

Além da logística, outro ponto fundamental para o trabalho proposto é a estrutura dos modais no Brasil. Ballou (1999) e Bowersox et al. (1986) definem, explicam, comparam e classificam os diversos modais existentes. No entanto, para dar um foco prático e atualizado ao estudo, é fundamental que sejam pesquisados dados e características recentes da estrutura de transportes no Brasil. Por esse motivo, se faz necessário a utilização de outros recursos de pesquisa como levantamento de dados em relatórios governamentais e setoriais.

Junto com a logística e os modais, o terceiro aspecto importante para a compreensão do trabalho, é a análise das principais técnicas para resolução dos modelos de otimização. Essas técnicas são as ferramentas básicas para resolução das complexas equações de estoque e projeto de sistemas logísticos.

Dessa forma, este capítulo é dividido em três temas principais:

- Logística;
- Modais e
- Modelos de otimização.

2.1 Logística

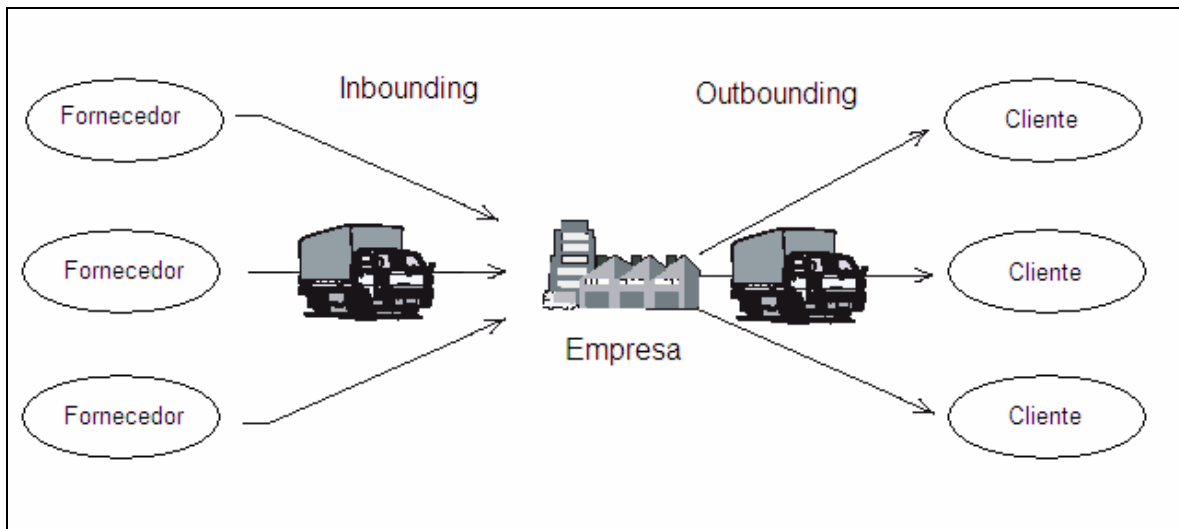
Segundo Ballou (1999) a missão da logística é disponibilizar os produtos ou serviços corretos, no lugar, na hora e nas condições desejadas. Pode-se dizer que a logística é a integração de diversas atividades com o objetivo de controlar um fluxo eficiente de matérias primas, produtos semi-acabados e produtos acabados, do local de origem ao local de consumo. Copacino et al. (1985) define logística como sendo a arte de gerenciar o fluxo de materiais e produtos desde a fábrica até o cliente.

As atividades logísticas incluem, entre outras, a previsão da demanda, a informação ligada à distribuição, o controle dos estoques, a manutenção dos materiais, o tratamento das encomendas, o serviço pós-venda, a escolha da localização das fábricas e entrepostos, as compras, a embalagem, o tratamento das mercadorias devolvidas, a negociação de elementos recuperáveis ou destinados à sucata, a organização dos transportes e o transporte efetivo das mercadorias, assim como o armazenamento e a formação de estoques.

Porter (1986) define dois processos muito importantes na logística de qualquer empresa: *inbounding* e *outbounding*. O *inbounding* é definido como conjunto de atividades associadas ao recebimento de insumos necessários para o processo produtivo da empresa. Essas atividades normalmente envolvem o manuseio do material, armazenagem, controle de estoque, programação de fretes e devolução para os fornecedores. Para o autor, *outbounding* é um conceito análogo relacionado com o processo de movimentação, armazenamento e distribuição de produtos acabados para os clientes.

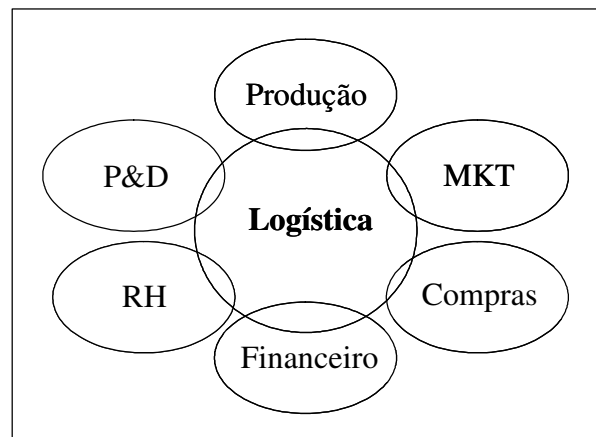
Do ponto de vista estratégico, Porter (1986) classifica as atividades associadas ao *inbounding* e ao *outbounding* como sendo as mais importantes para uma empresa do setor de distribuição.

Figura 3 – *Inbounding* e *Outbounding*. Adaptado de Garrido & Miranda (2003)



As atividades logísticas não podem ser definidas nem mesmo compreendidas se não forem levados em consideração as interações da logística com os outros departamentos e setores da empresa. Slack et al. (1995) aponta algumas dessas intersecções que podem ser usualmente encontradas nas empresas:

Figura 4 – Logística e outras áreas da empresa. Fonte: Slack et al. (1995)



Essas interações nem sempre são harmoniosas. Podem existir objetivos e metas conflitantes entre as áreas. De acordo com Ballou (1999) um dos problemas básicos da logística é o gerenciamento de objetivos conflitantes.

Para melhor compreensão dos detalhes e nuances dessas intersecções, é importante que sejam expostos alguns conceitos básicos referentes à logística e as suas principais atividades.

2.1.1 Estoque

Ballou (1999) define estoques como sendo acúmulos de materiais ao longo da linha de produção ou nos canais de distribuição. Esse “acúmulo” pode ser fruto do acaso, da falta de planejamento ou mesmo da definição de uma política de estoques adequada para as estratégias da empresa.

Segundo Bowersox et al. (1986), a definição da política de estoques é a decisão mais arriscada entre todas as decisões que envolvem o gerenciamento logístico em uma empresa. Para melhor compreender as decisões e estratégias que podem ser estruturadas a partir do estoque o autor destaca três funções básicas desse parâmetro logístico:

- a) Ganhos de Escala;
- b) Balanceamento entre oferta e demanda e
- c) Estoque de segurança.

A primeira função do estoque é proporcionar o melhor rendimento da linha de produção, a partir do aumento da escala. Se fossem definidos lotes de produção maiores, seria possível reduzir os tempos de *setup* das máquinas e aumentar o rendimento da linha. Mas esse aumento na escala implica em um aumento dos níveis de estoque ao longo da cadeia produtiva e uma eventual diminuição do *mix* de produtos na fábrica.

A abordagem de otimização do nível de estoque requer um estudo que quantifique qual é o ponto ótimo que equilibra os ganhos de escala com os aumentos de níveis de estoque e redução do *mix*.

Através de uma política de estoques, a empresa consegue suprir diferenças entre a oferta e a demanda sem ter que fazer investimentos extras em maquinário. Em uma fábrica de brinquedos, por exemplo, há uma necessidade de estocar produtos acabados ao longo de vários meses do ano para antecipar picos de demanda sazonais conhecidos, como o Natal, por exemplo.

Mesmo a empresa tendo feito o planejamento do estoque para suprir as diferenças entre a oferta e a demanda, ainda há um fator de incerteza nessa abordagem. Podem ocorrer variações não planejadas na demanda ou mesmo na disponibilidade da fábrica em ofertar seus produtos ao mercado. Para suprir essas necessidades existe o estoque de segurança. Segundo Copacino et al. (1985) o estoque de segurança é necessário para proteção contra variações inesperadas na demanda ou no ressuprimento. Caso não houvesse um estoque de segurança, um cliente que subitamente aumenta seu consumo, não seria atendido pela empresa. Na ausência de estoques de segurança, uma parada inesperada na linha de montagem, um atraso na entrega ou qualquer outro imprevisto na cadeia produtiva, pode resultar no não atendimento do cliente porque a empresa não tem produtos na quantidade suficiente. Ballou (1999), compara o planejamento do estoque de segurança com a compra de um seguro pela empresa.

2.1.2 Lead Time

O tempo transcorrido entre o pedido do material e a sua efetiva entrega é conhecido como *Lead Time (LT)*. Esse é um conceito muito importante no projeto e na gestão de sistemas logísticos. Variações no LT podem implicar em atrasos de matéria-prima para a produção ou ainda atrasos nas entregas de produtos acabados para os clientes.

Na cadeia logística de produtos perecíveis, como frutas e flores, por exemplo, o estudo dos Lead Times é feito com maior profundidade e nível de detalhe. O projeto do sistema logístico pode envolver inclusive modais especialmente desenhados para atender às necessidades e particularidades de cada produto.

Um conceito diretamente relacionado com os LTs é o ponto de ressuprimento (PR). O PR é nível de estoque abaixo do qual será feito pedido de material. Esse momento da colocação do pedido é justamente o momento que marca o início da contagem do LT.

2.1.3 Nível de Serviço

Ballou (1999) considera o termo “nível de serviço” (NS) muito amplo, podendo incluir desde a qualidade e a disponibilidade até os serviços de pós-venda do produto. Sob a perspectiva da logística, o NS pode ser entendido como um índice que mede o desempenho da cadeia logística. Para o autor, o projeto de todo o sistema logístico deve ser feito em função do NS que se deseja manter: “O nível de serviço é o resultado de todas as atividades logísticas”.

Segundo Bowersox et al. (1986) o NS de uma cadeia logística pode ser determinado basicamente por três fatores:

- a) Disponibilidade de produtos;
- b) Performance das entregas e
- c) Consistência.

O primeiro aspecto que envolve o NS diz respeito à disponibilidade de produtos para os clientes. Caso a empresa garanta que sempre que houver uma demanda por algum de seus produtos ela terá estoque para entregar. Pode-se dizer que, sob esse aspecto, o NS do sistema é de 100%.

Se for analisada a performance das entregas, está se falando sobre os LTs da operação. Para garantir um bom NS, a empresa precisa garantir o cumprimento rígido dos LTs evitando ao máximo os atrasos.

O terceiro aspecto destacado por Bowersox et al. (1986) está relacionado com a consistência entre o que a empresa está se propondo a fazer e o que realmente está sendo feito pelo cliente. Este aspecto envolve também alguns fatores relativamente intangíveis como satisfação e fidelidade dos clientes.

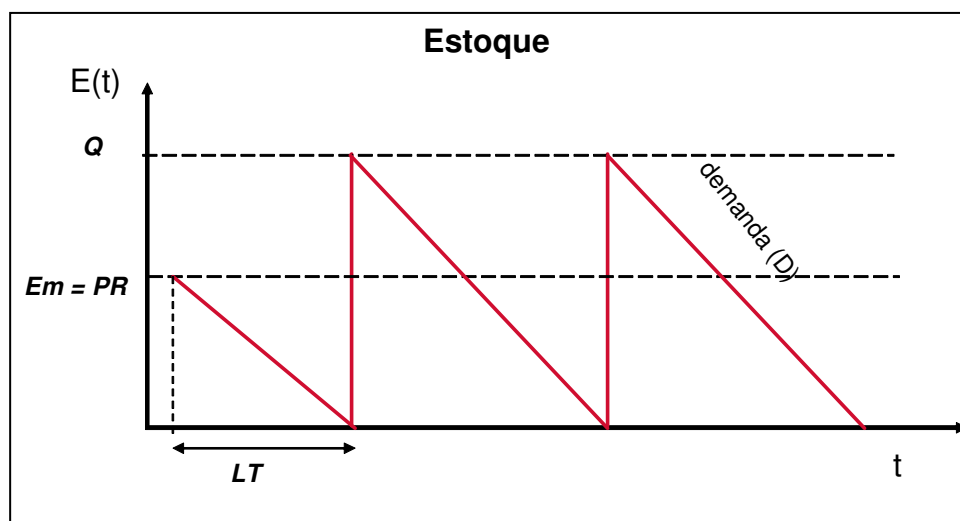
Observando-se esses três aspectos, pode-se concluir que é praticamente impossível e economicamente inviável para uma empresa trabalhar com um nível de serviço de 100%. O que se verifica na prática, é a definição de NS's específicos para linhas de produtos e segmentos de mercado determinados. Por exemplo,

pode-se querer garantir um NS maior para um tipo de produto que tenha uma margem de lucro maior. Em uma estratégia de conquista de novos mercados, pode-se também optar por garantir um NS mais elevado que o concorrente. Ou seja, “a escolha dos padrões de NS a serem adotados é um ponto crítico na política gerencial da empresa” Bowersox et al. (1986).

2.1.4 Equações de Estoque

Considera-se a quantidade demandada (D) constante, obtida pela taxa média de consumo por unidade de tempo e os LTs fixos e conhecidos. Pode-se construir o gráfico do nível do estoque em função do tempo. Nesse gráfico, a variável D pode ser visualizada como sendo a inclinação da reta.

Figura 5 – Estoque. Fonte: Slack et al. (1995)



O parâmetro quantidade (Q) é o tamanho do pedido feito quando o estoque cai abaixo do PR. Nesse caso, o valor de Q corresponde numericamente ao valor do nível de estoque máximo (Emax) do sistema. O cálculo da quantidade deve obedecer a seguinte equação:

$$Q = 2 * D * LT \quad (\text{MAGEE, 1967}) \text{ equação 1}$$

Nessa análise, considera-se que se o nível de estoque cair abaixo da metade de Emax, será feito um novo pedido. Portanto, pode-se definir:

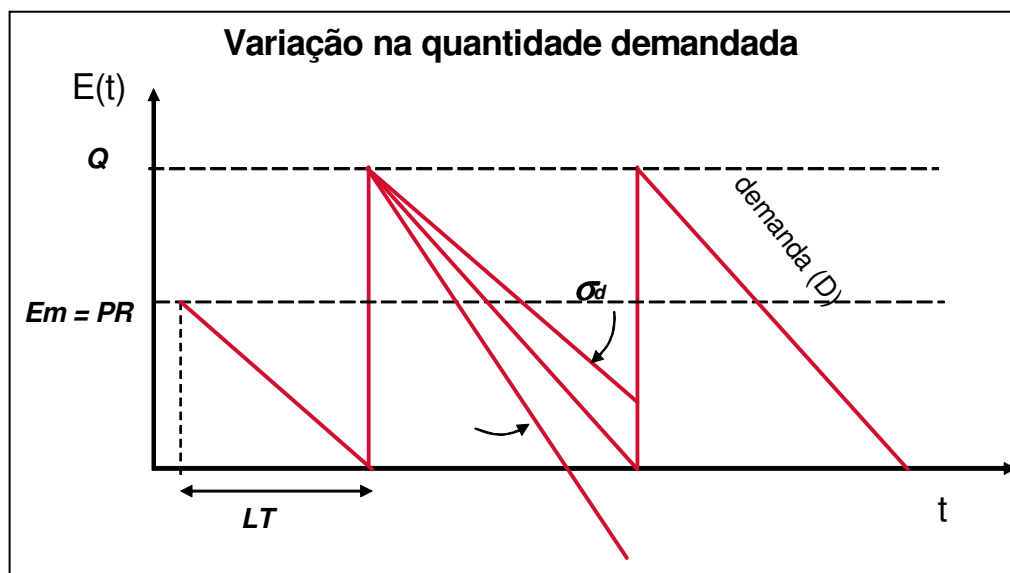
$$PR = \frac{Q}{2} \quad (\text{GITMAN, 1997}) \text{ equação 2}$$

Essa consideração permite que, nesse caso em particular, o estoque médio ao longo do período (E_m) seja numericamente igual ao PR. Portanto, pode-se obter a partir das equações 1 e 2:

$$E_m = \frac{2 * D * LT}{2} = D * LT \quad (\text{BALLOU, 1999}) \quad \text{equação 3}$$

Pode-se fazer agora outras análises flexibilizando as condições iniciais adotadas. O objetivo dessa flexibilização é justamente possibilitar uma representação mais fiel da realidade. Inicialmente, será admitida a possibilidade de variações na quantidade demandada (σ_d), considerada anteriormente constante ao longo do tempo.

Figura 6 – Variação na quantidade demandada. *Fonte: Slack et al. (1995)*

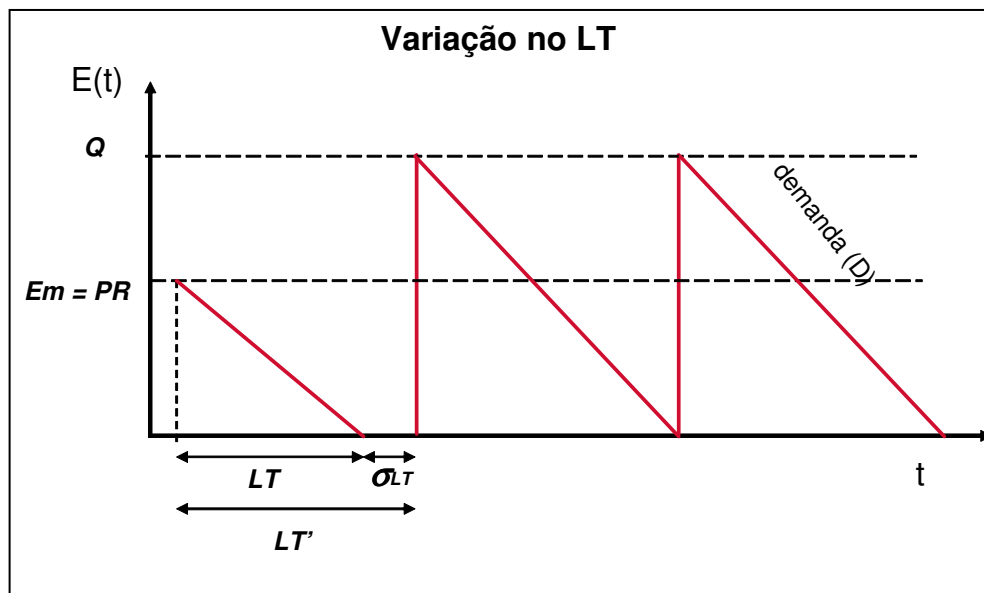


O gráfico mostra que pequenas variações na quantidade demandada implicam na possibilidade de falta de material.

Vale ressaltar que essas variações são muito comuns e acontecem freqüentemente no cotidiano. Na prática, não se trabalha sem um modelo que considere possíveis variações na quantidade demandada, pois o risco de ocorrerem faltas é muito alto.

Outra consideração inicial que pode ser flexibilizada é a respeito dos LTs. Se considerarmos que podem ocorrer atrasos, isto é, a possibilidade de variação nos LTs (σ_{LT}), pode-se construir o seguinte gráfico:

Figura 7 – Variação no LT. Fonte: Slack et al. (1995)



Neste gráfico, verifica-se que em caso de um atraso ($LT' > LT$) fatalmente haverá ocorrência de falta de estoque.

Para que o sistema seja capaz de absorver essas possíveis variações na quantidade demandada e no LT, surge a necessidade de estudo do Estoque de Segurança. O projeto e a análise do Es é um dos aspectos que tem maior influência nos níveis de estoque de uma empresa. Segundo Bowersox et al. (1986) altos níveis de estoque geralmente são resultados de planejamento de estoque de segurança feitos incorretamente.

O Es pode ser calculado pela seguinte fórmula:

$$Es = FS * \sigma * \sqrt{LT} \quad (\text{GIANESI et al., 2001}) \text{ equação 4}$$

O σ corresponde ao desvio padrão na quantidade demandada e no LT. Já o FS é um fator de segurança definido probabilisticamente em função do nível de serviço desejado (NS). Para o projeto do ES, costuma-se utilizar freqüentemente valores tabelados dos FS em relação ao NS desejado.

Tabela 3 – Valores tabelados do FS. *Fonte: Giansi et al.(2001)*

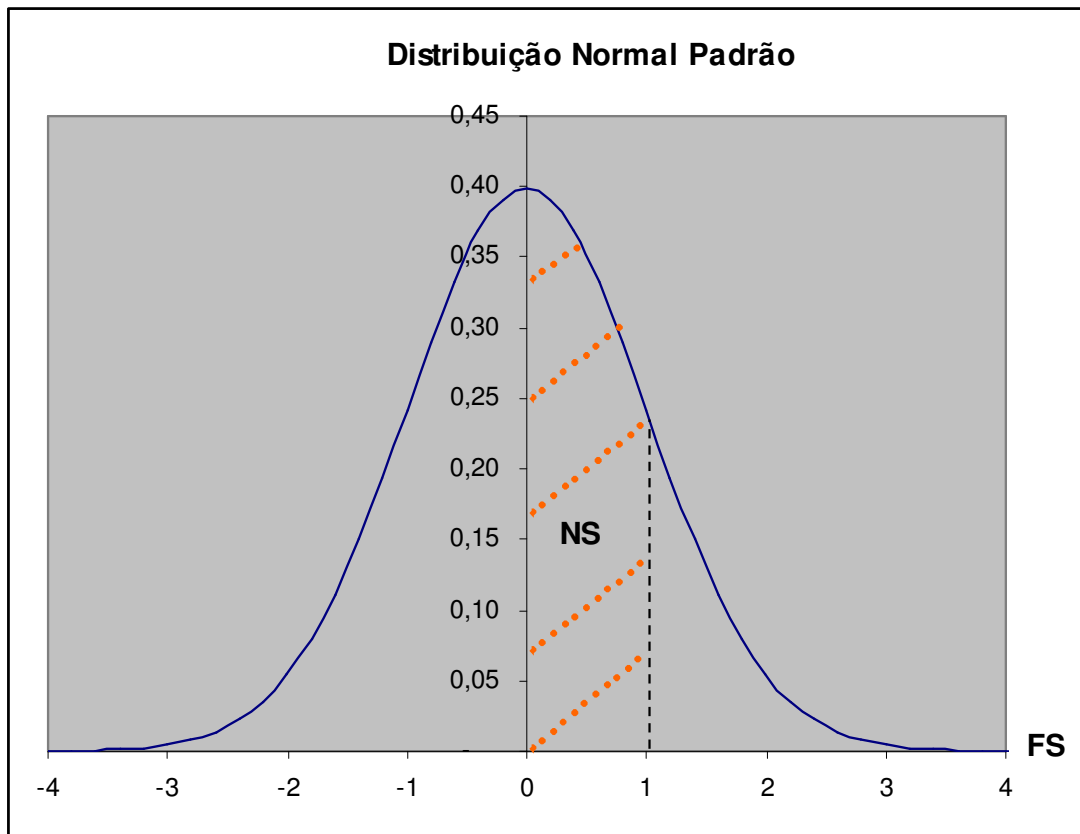
NS	FS
50,0%	0,00
60,0%	0,25
70,0%	0,52
80,0%	0,84
85,0%	1,04
90,0%	1,28
95,0%	1,64
96,0%	1,75
97,0%	1,88
98,0%	2,05
99,0%	2,33
99,9%	3,09

Para realizar o cálculo do FS, considera-se que as possíveis variações na quantidade demandada e no LT seguem uma distribuição normal. De acordo com Costa Neto (2002), a distribuição normal é definida pela função densidade de probabilidade $f(x)$:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (\text{COSTA NETO, 2002})$$

A função $f(x)$ é formalmente caracterizada se forem conhecidos os valores de μ (média da distribuição) e σ (desvio padrão da distribuição). A distribuição normal padrão, utilizada para obtenção do FS, é uma caso particular da normal onde μ é igual a 1 e σ é zero.

Figura 8 – Distribuição Normal Padronizada. *Adaptado de Costa Neto (2002)*



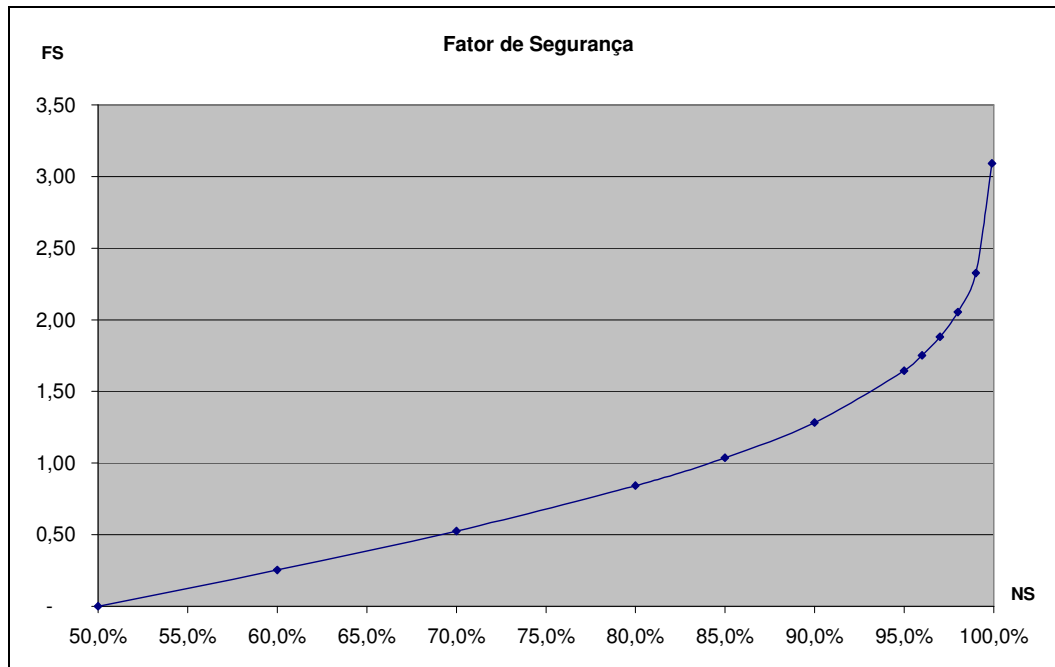
No gráfico, define-se o NS como a área entre o gráfico da distribuição e o eixo das abscissas do ponto zero até o FS correspondente. Pode-se escrever analiticamente:

$$\int_0^{FS} f(x)dx = NS$$

No MS Excel (Versão 7.0 em português), pode-se facilmente fazer esse cálculo utilizando a função `inv.nomp(x)`. Basta fornecer o NS desejado, que o aplicativo calcula por um processo iterativo o valor do FS. Pode-se traçar então

um gráfico que mostra o comportamento do FS em função do NS desejado para o sistema.

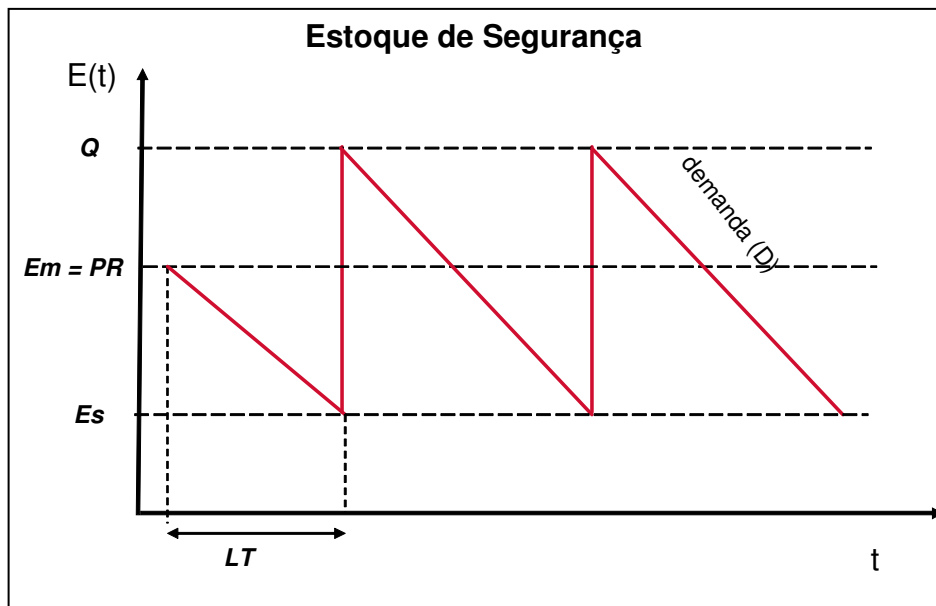
Figura 9 – FS em função do NS



Observa-se o comportamento não linear entre o FS e o NS. Verifica-se que pequenos aumentos no nível de serviço desejado podem provocar fortes e diretas implicações no tamanho do ES.

No gráfico da Figura 10 pode-se observar como é o comportamento do nível de estoque em um sistema onde E_s está dimensionado adequadamente.

Figura 10 – Sistema com ES. *Fonte: Slack et al. (1995)*



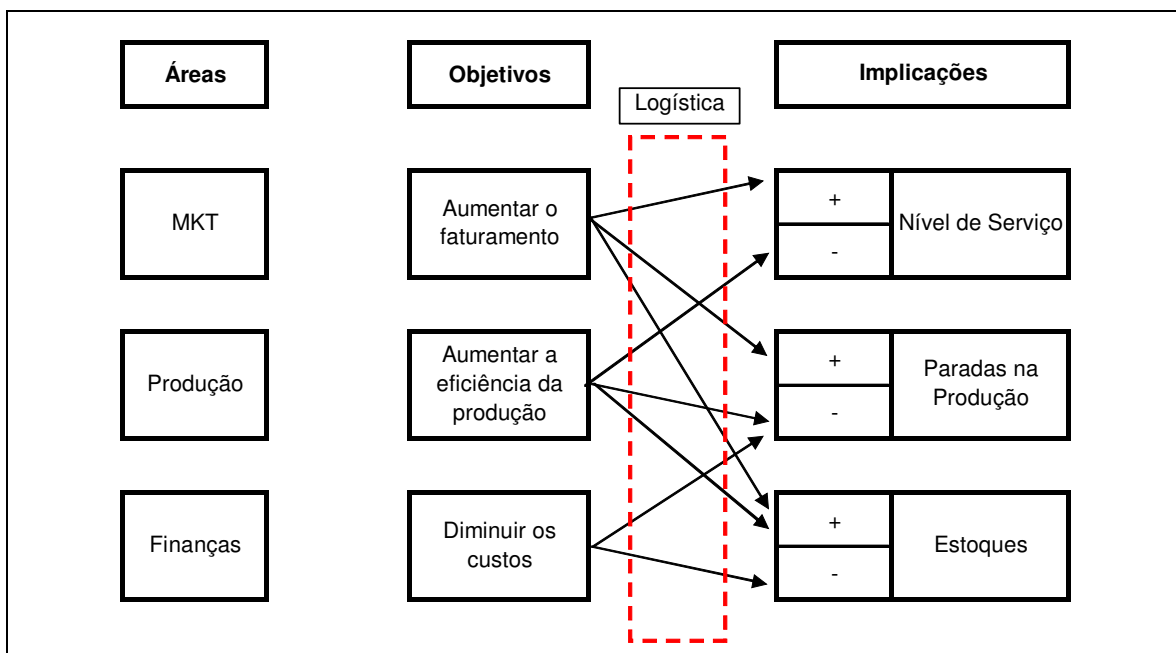
Analisando esse caso mais completo e elaborado, pode-se obter o Em no sistema:

$$Em = E_s + D * LT \quad (\text{BALLOU, 1999) equação 5}$$

2.1.5 Atuação da Logística

Uma vez definidos e discutidos os principais conceitos logísticos, pode-se fazer uma análise mais completa das principais interações existentes entre a logística e as demais áreas da empresa. A Figura 11 mostra o papel da logística na estrutura organizacional da empresa.

Figura 11 – Logística e áreas corporativas. *Fonte: Copacino et al., (1985).*



A área de *marketing* gostaria de proporcionar sempre o melhor nível de serviço possível aos seus clientes. Para tanto, seria necessário, entre outras coisas, uma diminuição das faltas de produtos e um aumento do mix de produtos disponíveis. Esses objetivos somente poderiam ser atingidos se houver um aumento no nível de estoque e maiores paradas da produção. O que entra em conflito direto com as áreas financeira e de produção respectivamente.

Pode-se fazer raciocínio análogo para cada uma das três áreas mostradas na Figura 11. Serão sempre identificados pontos de atrito entre as áreas. São

justamente nesses pontos onde se delimitam as áreas de atuação da logística dentro da empresa. Sob esse aspecto, Ballou (1999) comenta que o problema básico da logística pode ser resumido como o gerenciamento de objetivos conflitantes.

2.2 Modais

Nesse capítulo são feitos estudos comparativos dos modais mais utilizados no Brasil, com dois objetivos principais:

- a) conhecer a importância de cada modal para o país e
- b) estabelecer relações de comparação entre os modais hierarquizando a importância e as características principais de cada um.

Ballou (1999) apresenta um estudo comparativo entre os principais modais disponíveis para transporte comercial de mercadorias nos Estados Unidos. Através desse estudo o autor mostra que há uma relação inversamente proporcional entre os custos característicos do modal e o Lead Time da operação. Essa relação obtida pode ser verificada na prática. O modal aéreo é o que apresenta maior rapidez no prazo de entrega (LT) mas em contrapartida é o modal que tem o maior custo.

Tabela 4 – Comparação entre modais. *Fonte: Ballou (1999)*

Modais	Custo	LT
Aéreo	\$\$\$\$	1o
Rodovia	\$\$\$	2o
Ferrovia	\$\$	3o
Hidrovia	\$	4o

A abordagem de Ballou estabelece uma relação entre custos e LT para os modais utilizados nos Estados Unidos. A tabela 5 consolida o perfil da distribuição de toda a carga transportada no Brasil. Pode-se verificar que, durante o período analisado, o modal rodoviário foi o mais utilizado e o aéreo teve menor utilização.

Tabela 5 – Utilização dos modais no Brasil. *Fonte: www.geipot.gov.br*

Composição percentual da carga transportada no Brasil					
Modal	1996	1997	1998	1999	2000
Rodoviário	63,7%	62,9%	62,6%	62,3%	60,5%
Ferroviário	20,7%	20,7%	20,0%	19,6%	20,9%
Aquaviário	11,5%	11,6%	12,7%	13,2%	13,9%
Dutoviário	3,8%	4,6%	4,4%	4,6%	4,5%
Aéreo	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%
TOTAL	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Pelos dados da tabela 5 pode-se observar que mais de 90% do volume transportado no Brasil está concentrado nos modais rodoviário, ferroviário e aquaviário. Nos próximos itens será feita uma análise de cada modal, suas características e sua importância estratégica para o país. Será dado um foco no modal ferroviário por este ser um dos objetos de estudo do trabalho.

2.2.1 Rodoviário

O modal rodoviário tem sido historicamente o mais utilizado para transporte de mercadorias no Brasil. Existem diversos fatores sociais, econômicos e até mesmo políticos que explicam a concentração nesse modal.

No ano de 2001, foram movimentadas mais de 906 milhões de toneladas de mercadorias por esse modal. Segundo o Departamento Nacional da Infra Estrutura, a extensão da malha rodoviária brasileira em 2001 era de mais de 1.600.000 quilômetros de rodovias pavimentadas. Existe uma forte concentração regional na malha rodoviária. As regiões Sudeste e Sul concentram mais de 60% do total das rodovias pavimentadas no país.

Tabela 6 – Extensão da malha rodoviária. *Fonte: www.dnit.gov.br*

Região	Extensão (Km)	%
Sudeste	512.496	32%
Sul	476.122	29%
Nordeste	405.390	25%
Centro-oeste	227.825	14%
Norte	103.096	6%
Total	1.621.833	100%

A distribuição da frota também está concentrada. Observando-se a Tabela 6, pode-se concluir que 75% da frota nacional está licenciada nas regiões Sul e Sudeste.

Tabela 7 – Distribuição da frota brasileira. *Fonte: www.dnit.gov.br*

Região	# Veículos	%
Sudeste	911.891	50%
Sul	465.840	25%
Nordeste	237.984	13%
Centro-oeste	149.947	8%
Norte	70.541	4%
Total	1.836.203	100%

2.2.2 Ferroviário

Historicamente, pode-se dizer que a utilização da ferrovia data de 1845, com a inauguração de um trecho de aproximadamente 15km, interligando a Praia de Mauá a Guia de Pacobaíba, no atual município de Magé, ao fundo da baía da Guanabara, no Estado do Rio de Janeiro. Esse ousado empreendimento foi feito por iniciativa de Irineu Evangelista de Souza, também conhecido como Barão de Mauá.

O desenvolvimento da malha ferroviária brasileira foi feito de maneira descontínua e descentralizada ao longo das décadas. Esse é um dos motivos que explicam as peculiaridades e diferenças regionais encontradas na malha ferroviária brasileira. A questão da bitola é um dos maiores exemplos disto.

Bitola é o nome dado à distância entre as faces internas dos trilhos de uma via. Os veículos ferroviários são projetados para trafegar exclusivamente em uma bitola. O Brasil hoje possui dois tipos principais de bitola: a larga (1,60m) e a métrica (1,0m).

Tabela 8 – Malha ferroviária por bitola 2001. *Fonte: www.geipot.gov.br*

Bitola (m)	Extensão (Km)	%
1,000	23.460	80%
1,600	5.624	19%
1,435	199	1%
Total	29.283	100%

Essas características geram grandes perdas e ineficiências no aproveitamento do modal. Para migrar de uma bitola para outra é necessário que sejam feitos transbordos e trocas de composições o que gera inevitáveis atrasos e aumentos de custos. Uma ferrovia que deseja operar com dois tipos diferentes de bitola deverá possuir duas frotas distintas de trens e também veículos de manutenção da via especializados em cada tipo de bitola, reduzindo as eventuais economias de escala que um único tipo de frota proporciona, em termos operacionais e de manutenção.

Figura 12 – Mapa das principais ferrovias. Fonte: www.geipot.gov.br



O modal ferroviário transporta anualmente mais de 20% de todo o volume movimentado no país. A carga é dominada predominantemente por produtos com baixo valor agregado. Pode-se observar na tabela 9 que mais de 60% do volume transportado é de minério de ferro.

Tabela 9 – Produtos movimentados por ferrovia 2001. *Fonte:www.geipot.gov.br*

Principais Produtos	Vol (Kt)	%
Minério de ferro	183.760	61,2%
Bauxita	13.470	4,5%
Produtos siderúrgicos	13.020	4,3%
Carvão mineral	11.320	3,8%
Soja	10.860	3,6%
Calcário	7.020	2,3%
Derivados de petróleo	6.050	2,0%
Farelos	5.980	2,0%
Cimento	5.790	1,9%
Ferro-gusa	5.650	1,9%
Outros	37.410	12,5%
Total	300.330	100,0%

Em 2001, a malha ferroviária brasileira tinha uma extensão de aproximadamente 29.000 Km. Pode-se fazer uma análise preliminar agregando a quilometragem dos trechos ferroviários por região do país. Nessa abordagem chega-se à conclusão que a região Sudeste é a que possui maior malha ferroviária do país.

Tabela 10 – Malha ferroviária por UF 2001. *Fonte: www.geipot.gov.br*

Região	Extensão (Km)	%
Sudeste	12.138	41%
Nordeste	7.295	25%
Sul	6.980	24%
Centro-Oeste	2.419	8%
Norte	451	2%
Total	29.283	100%

Para se aprofundar na análise do modal, deve-se observar a malha ferroviária sob a perspectiva das estradas de ferro que a compõem. A Tabela 11 indica que, em termos de extensão, as três maiores estradas concentram mais de 80% da malha ferroviária brasileira.

Tabela 11 – Malha ferroviária por ferrovia 2001. *Fonte: www.geipot.gov.br*

ESTRADA	Extensão (Km)	%
Ferrovia Centro-Atlântica S.A. - FCA	7.080	24,2%
América Latina Logística do Brasil S.A. - ALL (ex FSA)	6.534	22,3%
Companhia Ferroviária do Nordeste S.A.-CFN	4.238	14,5%
Ferrovias Bandeirantes S.A. - FERROBAN (ex FEPASA)	4.235	14,5%
MRS Logística S.A.	1.674	5,7%
Ferrovia Novoeste S.A.	1.626	5,6%
Estrada de Ferro Vitória a Minas	905	3,1%
Estrada de Ferro Carajás	892	3,0%
Ferrovias Norte do Brasil - FERRONORTE	463	1,6%
Ferrovia Tereza Cristina S.A. - FTC	164	0,6%
Estrada de Ferro da Mineração Rio do Norte	35	0,1%
Outras	1.437	4,9%
Total	29.283	100,0%

Entretanto, se forem observados os volumes carregados por trechos, verifica-se que as estradas de ferro Vitória Minas e a MRS foram responsáveis por mais de 50% do volume transportado no país.

Tabela 12 – Volume transportado por ferrovia 2001. *Fonte: www.geipot.gov.br*

ESTRADA	Vol (Kt)	%
Estrada de Ferro Vitória a Minas	111.790	37,0%
MRS Logística S.A.	66.070	21,8%
Estrada de Ferro Carajás	51.920	17,2%
Ferrovia Centro-Atlântica S.A. - FCA	19.620	6,5%
América Latina Logística do Brasil S.A. - ALL (ex FSA)	17.510	5,8%
Ferrovias Bandeirantes S.A. - FERROBAN (ex FEPASA)	11.700	3,9%
Estrada de Ferro da Mineração Rio do Norte	11.300	3,7%
Ferrovia Tereza Cristina S.A. - FTC	3.650	1,2%
Ferrovia Novoeste S.A.	2.660	0,9%
Ferrovias Norte do Brasil - FERRONORTE	1.470	0,5%
Companhia Ferroviária do Nordeste S.A.-CFN	1.370	0,5%
Outras	3.381	1,1%
Total	302.441	100,0%

Agregando as duas análises propostas nas tabelas 11 e 12 pode-se chegar a um indicador do grau de utilização de cada trecho ferroviário. Esse indicador mostra a quantidade de material transportado por quilometro da estrada de ferro analisada. Quanto maior o valor do indicador, maior a intensidade do uso da estrada de ferro. A unidade desse indicador será Kt/Km. Através dessa análise,

pode-se observar quais os trechos estão sendo intensivamente utilizados e quais estradas estão sendo sub utilizadas. Essas últimas, são as que possuem maior potencial de expansão e crescimento nos próximos anos.

Tabela 13 – Grau de utilização por ferrovia 2001. *Fonte: www.geipot.gov.br*

ESTRADA	Vol (Kt)	%	Extensão (Km)	%	Kt/Km
Estrada de Ferro da Mineração Rio do Norte	11.300	3,7%	35	0,1%	322,9
Estrada de Ferro Vitória a Minas	111.790	37,0%	905	3,1%	123,5
Estrada de Ferro Carajás	51.920	17,2%	892	3,0%	58,2
MRS Logística S.A.	66.070	21,8%	1.674	5,7%	39,5
Ferrovia Tereza Cristina S.A. - FTC	3.650	1,2%	164	0,6%	22,3
Ferrovias Norte do Brasil - FERRONORTE	1.470	0,5%	463	1,6%	3,2
Ferrovia Centro-Atlântica S.A. - FCA	19.620	6,5%	7.080	24,2%	2,8
Ferrovias Bandeirantes S.A. - FERROBAN (ex FEPASA)	11.700	3,9%	4.235	14,5%	2,8
América Latina Logística do Brasil S.A. - ALL (ex FSA)	17.510	5,8%	6.534	22,3%	2,7
Ferrovia Novoeste S.A.	2.660	0,9%	1.626	5,6%	1,6
Companhia Ferroviária do Nordeste S.A.-CFN	1.370	0,5%	4.238	14,5%	0,3
Outras	3.381	1,1%	1.437	4,9%	2,4
Total	302.441	100,0%	29.283	100,0%	10,3

2.2.3 Aquaviário

Segundo a Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ), o Brasil possui uma rede de hidrovias navegáveis de mais de 8.500 Km. Foram movimentadas em 2001 aproximadamente 23 milhões de toneladas. A ANTAQ sugere uma classificação dessas hidrovias de acordo com as diversas características de navegação existentes no país. Três dessas classificações são muito utilizadas no cotidiano logístico:

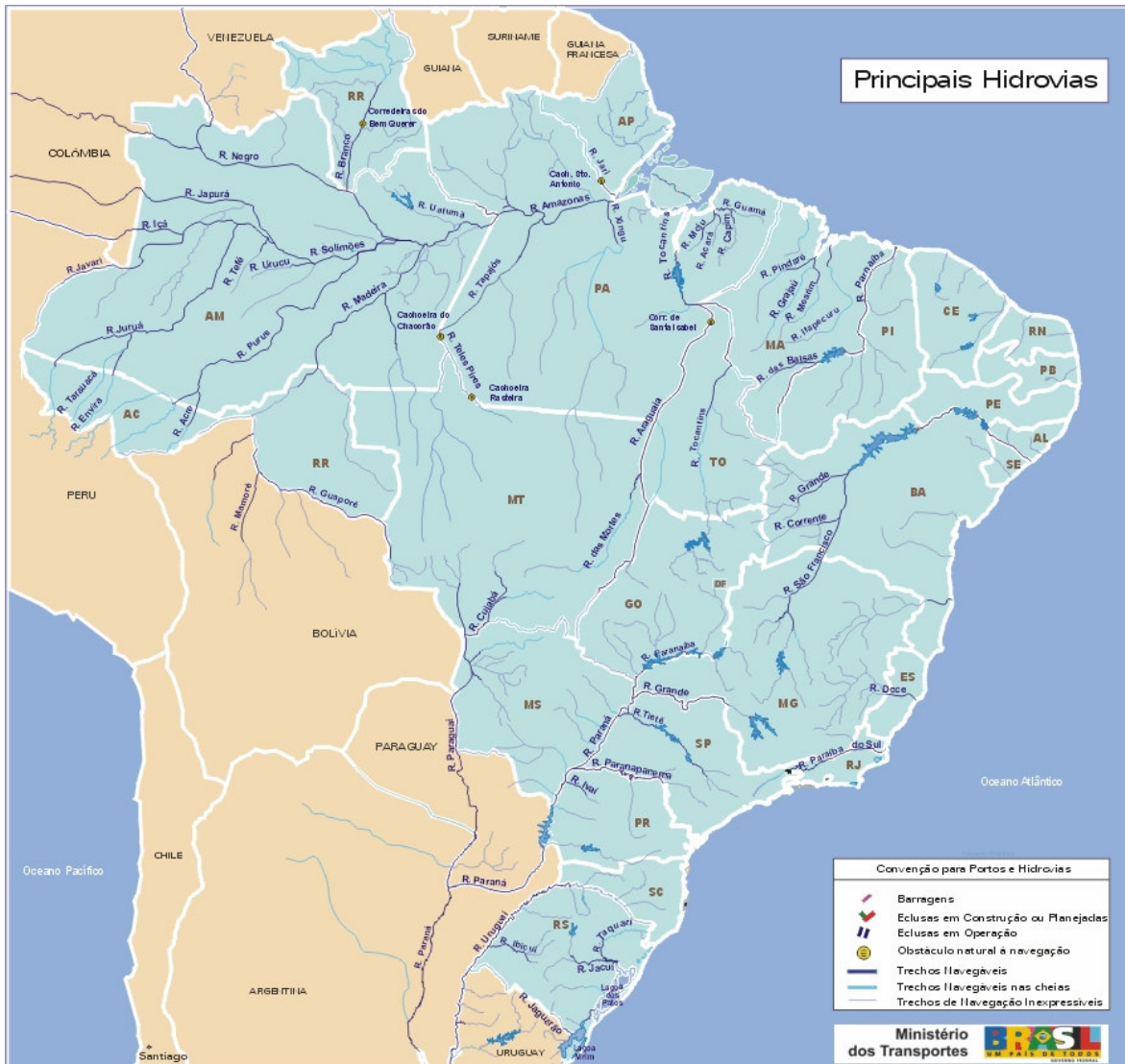
1. Navegação de cabotagem: realizada entre os portos do território brasileiro, utilizando exclusivamente a via marítima ou a combinação da via marítima com as vias interiores.
2. Navegação de longo curso: realizada entre portos brasileiros e portos estrangeiros utilizando a via marítima ou as vias navegáveis interiores.
3. Navegação interior: navegação ao longo de canais, rios, lagoas, enseadas, baías e angras.

As principais hidrovias do Brasil foram agrupadas em função das bacias hidrográficas correspondentes. O corredor da hidrovia do Amazonas é o mais utilizado, correspondendo a mais de 58% do volume movimentado em 2001.

Tabela 14 – Movimentação por hidrovia. *Fonte: www.antaq.gov.br*

Bacia	Hidrovia	1999 (Kt)	2000 (Kt)	2001 (Kt)
Amazônia Ocidental	Madeira	1.418	1.955	2.063
	Solimões	1.630	2.291	2.715
Amazônia Oriental	Amazonas	14.839	12.998	14.668
	Guamá Capim	540	721	1.312
Nordeste	Parnaíba	0	45	43
	Rios Estaduais	0	142	168
São Francisco	São Francisco Grande	66	59	61
Tocantins Araguaia	Araguaia Mortes Tocantins	2	2	0
Paraguai	Paraguai	2.053	1.911	1.633
Tietê Paraná	Tietê Paraná	1.740	1.532	1.992
Sudeste	Jacuí Taquari L. dos Patos	503	407	639
Total		22.792	22.064	25.293

Figura 13 – Mapa das principais hidrovias. Fonte: www.antaq.gov.br



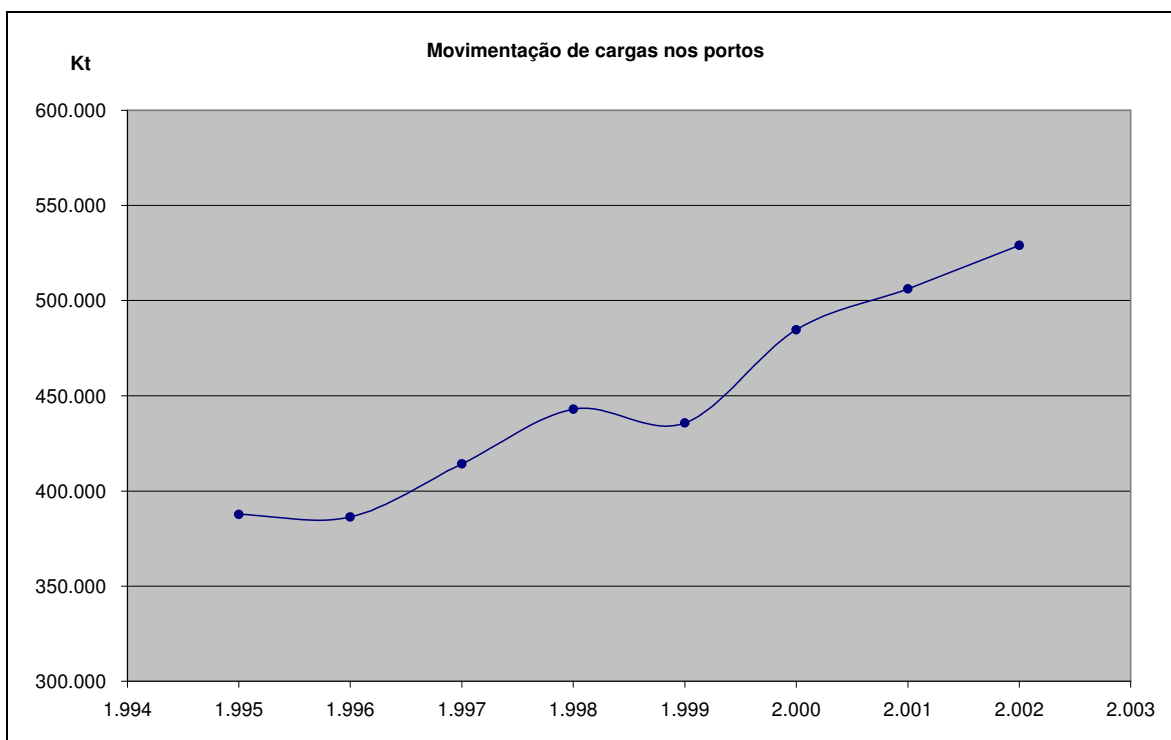
A estrutura portuária brasileira conta com quarenta e seis portos, sendo trinta e sete públicos e nove privados. A movimentação nos portos brasileiros vem crescendo sistematicamente ao longo dos últimos anos. Como mostram os dados da tabela 15, no período de 1995 até 2002, houve um aumento de cerca de 36% no volume de cargas movimentado por ano. Os portos da região sudeste movimentaram em 2002 mais de 56% do total movimentado no país. O porto de

Tubarão, no estado do Espírito Santo, foi o porto que mais toneladas movimentou em 2002 , aproximadamente 75 milhões de toneladas.

Tabela 15 – Movimentação de carga nos portos. *Fonte: www.antaq.gov.br*

Região	1995 (Kt)	1996 (Kt)	1997 (Kt)	1998 (Kt)	1999 (Kt)	2000 (Kt)	2001 (Kt)	2002 (Kt)
Sudeste	225.807	222.027	240.208	253.212	253.036	276.636	277.060	299.705
Nordeste	92.115	91.116	94.787	99.553	93.919	106.999	113.955	115.393
Sul	48.364	48.863	51.590	56.879	55.813	65.023	75.693	76.540
Norte	20.148	22.945	25.671	31.205	30.889	34.089	37.867	35.189
Centro-Oeste	1.255	1.434	1.985	2.156	2.053	1.913	1.632	2.179
Total	387.689	386.384	414.240	443.005	435.710	484.661	506.207	529.005

Figura 14 – Volume de carga nos portos. *Fonte:www.antaq.gov.br*

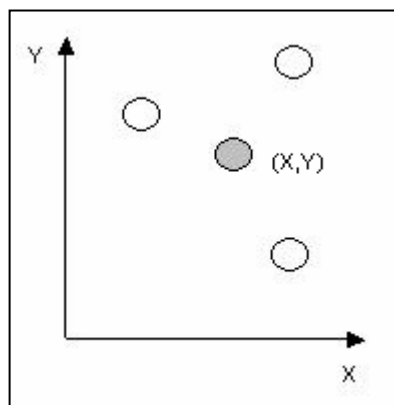


2.3 Modelos de Otimização

Os modelos de otimização têm sido utilizados há muitos anos para resolverem problemas logísticos. Love et al. (1988), apontam o desafio de Fermat como um dos mais antigos registros de problemas de otimização logísticos encontrados.

Na primeira metade do século XVII, o famoso advogado que tinha a matemática como *hobbie*, propôs o seguinte desafio: “Dados três pontos em um mesmo plano, encontre o quarto ponto de maneira que a somatória das distâncias até os outros três pontos seja mínima” (Fermat *apud* Love, 1988).

Figura 15 – Desafio de Fermat



Pode-se escrever analiticamente o desafio através da seguinte fórmula:

$$\min \sum_{i=1}^m \sqrt{(x_i - X)^2 + (y_i - Y)^2}$$

O modelo gravitacional de Ballou (1999) é um claro desdobramento do desafio de Fermat. Esse modelo busca a otimização da localização de um armazém que deve atender “*m*” localidades distintas. Esse problema é resolvido basicamente através da minimização da equação de Fermat, sendo cada termo ponderado pela quantidade demandada no local “*m*”.

Aproximadamente 100 anos depois de Fermat, Von Thünen iniciou os primeiros estudos envolvendo os custos do *inbounding* e *outbounding* que se tem registro.

No ano de 1875, o economista Von Thünen (*apud* Bowersox et al. 1986) publicou um estudo onde se encontram diversas análises que buscavam otimizar a localização de uma fábrica. Nesse estudo, o autor busca minimizar os custos de transporte de matéria-prima para a fábrica e os custos de transporte de produtos acabados para os clientes.

No início do século XX, começaram a ser desenvolvidos diversos modelos de otimização logísticos. Esses novos modelos trouxeram grande evolução em relação aos modelos anteriores. Em 1929, Weber (*apud* Ballou, 1999) avaliou o papel desempenhado pelas matérias primas no processo produtivo e como ela afeta a localização ótima da fábrica. Já é possível notar um refinamento e aprofundamento em relação aos modelos de Von Thünen e Fermat.

A partir da segunda metade do século XX, com a popularização dos computadores, ocorreu um desenvolvimento acelerado de novos modelos logísticos. Autores como Magee (1967), Ballou (1999), Bowersox et al. (1986) e Winston (1995) desenvolveram modelos mais robustos e detalhados. Esses modelos não poderiam ter sido resolvidos nem mesmo concebidos com as técnicas de resolução e conceitos logísticos precedentes.

As análises de otimização logísticas normalmente demandam uma capacidade computacional muito elevada. Dependendo do *mix* de produtos e da malha logística da empresa, os modelos podem envolver dezenas ou centenas de produtos diferentes sendo entregues em dezenas de lugares.

Diversos modelos de otimização são utilizados para o projeto de sistemas logísticos. Nesses modelos, busca-se a redução de custos com manutenção do nível de serviço. A função principal do modelo, no entanto, dependerá da estratégia da empresa. De acordo com Ballou (1999), a estratégia logística da empresa normalmente é projetada para atender os seguintes objetivos: redução de custos, redução de estoque e melhoria do NS.

2.3.1 Aplicação

Dado um sistema com “ n ” fábricas e “ m ” pontos de venda, busca-se determinar a distribuição da capacidade produtiva da empresa que minimize os custos de frete entre as fábricas e os pontos de venda.

São dados:

c_{ij} - frete entre a fábrica i e o ponto de venda j (R\$/t)

P_i - volume de produção na fábrica i (t)

D_j - quantidade demandada no ponto de venda j (t)

n - número de fábricas

m - número de pontos de venda

Busca-se:

x_{ij} - volume movimentado entre a fábrica i e o ponto de venda j (t)

A função objetivo do modelo pode ser escrita como:

$$f(x) = \text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} * x_{ij}$$

Submetida às seguintes restrições:

$$1) \sum_{i=1}^n x_{ij} = D_j \text{ para } j = 1, \dots, m$$

Essa restrição garante que a quantidade demandada em cada ponto de venda é atendida.

$$2) \sum_{j=1}^m x_{ij} \leq P_i \text{ para } i = 1, \dots, n$$

Essa restrição indica a limitação da capacidade de produção de cada fábrica.

$$3) x_{ij} \geq 0$$

Essa restrição indica que o volume transferido é sempre positivo.

Ao solucionar o modelo espera-se encontrar os volumes que devem ser produzidos em cada fábrica. Esses volumes minimizam o custo total de transporte entre as fábricas e os pontos de venda. Esse tipo de estudo pode servir como base para decisões de ampliação, redução ou mesmo fechamento de fábricas da empresa.

De acordo com Bowersox *et al.* (1986), o desafio maior para a empresa é encontrar o balanço entre o desempenho logístico e os custos. Esse equilíbrio resultará em um alinhamento dos objetivos logísticos com os da empresa.

3 Metodologia Proposta

O objetivo do trabalho é modelar o processo de distribuição de produtos de uma empresa do setor siderúrgico, buscando otimizar simultaneamente a utilização de dois modais: rodoviário e ferroviário.

Uma vez introduzidos os conceitos necessários para a compreensão do estudo, pode-se iniciar o detalhamento e análise do problema propriamente dito. Essa etapa está dividida em duas partes.

A primeira parte trata da definição do escopo do problema. É preciso que haja uma atenção especial nessa fase para evitar erros de compreensão na fase da modelagem.

A outra parte está relacionada com a modelagem dos custos de estoque e de frete. Para tanto, são aplicados conceitos logísticos em conjunto com as técnicas de otimização exibidos na revisão bibliográfica.

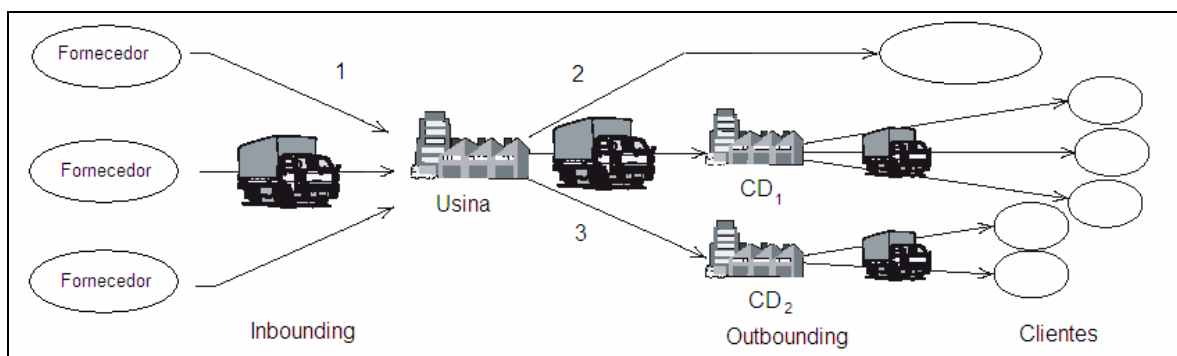
3.1 Definição do Problema

A proposta de estudo está centralizada na modelagem da malha de distribuição de uma grande empresa do setor siderúrgico brasileiro. Para garantir o sigilo dos dados e informações, é adotado o nome fictício de AçoForte (AF) para a empresa estudada. Além disso, todos os dados utilizados na modelagem estão multiplicados por uma constante K de maneira que representam uma função $F(x)=Kx$ dos dados reais.

Devido ao restrito número de empresas siderúrgicas atuantes no mercado nacional do aço, será evitada uma descrição detalhada da AF. São apresentados exclusivamente aspectos relevantes ao modelo analisado.

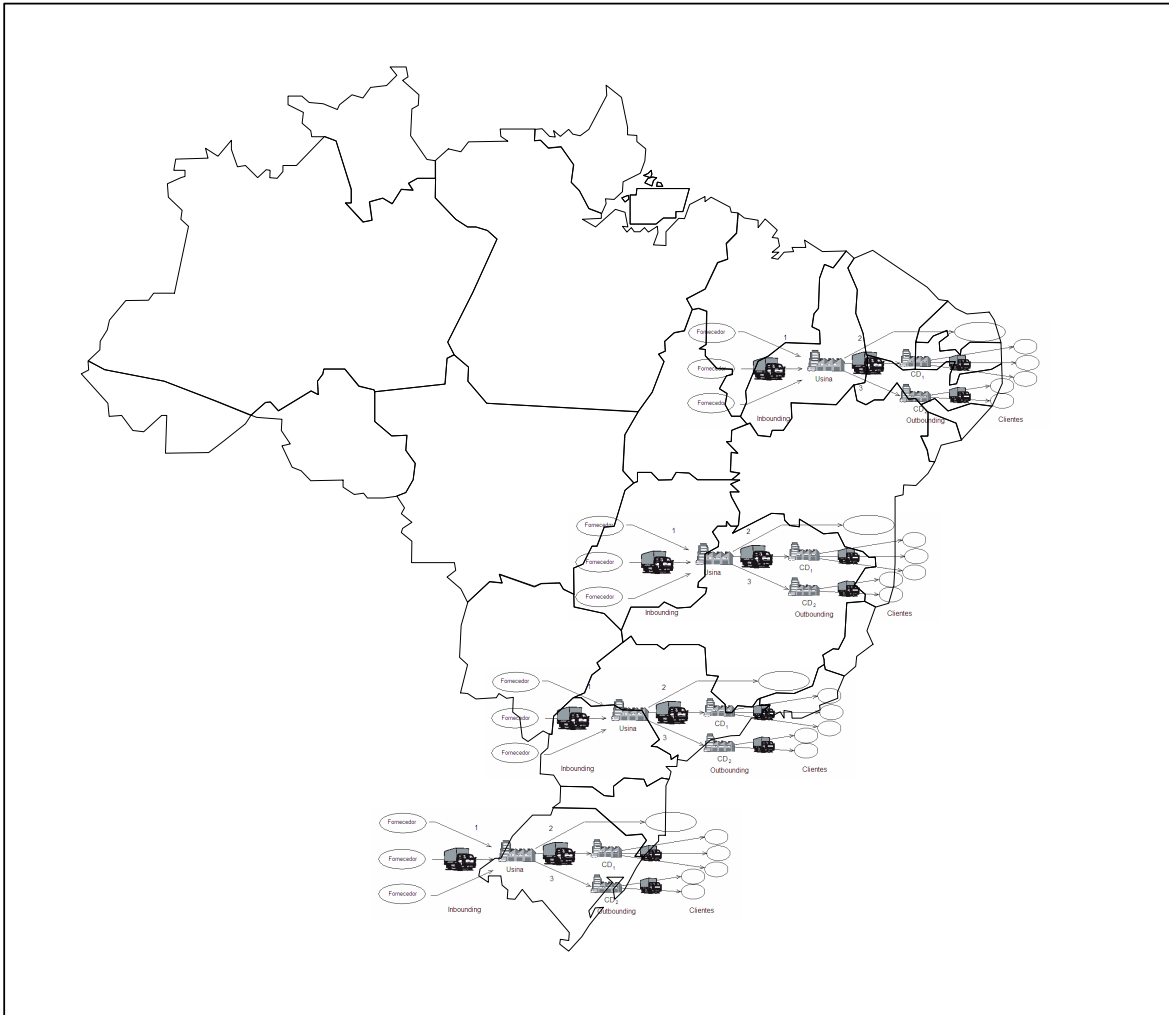
A estrutura da rede logística da AF engloba diversos fornecedores, usinas, centros de distribuição (CDs) e clientes espalhados por todo o país. Os fluxos de *inbounding* e *outbounding* podem ser descritos esquematicamente pela Figura 16.

Figura 16 – Fluxo de materiais pela rede logística.



A Figura 17 mostra o posicionamento da malha logística da AF pelo território nacional. A AF já realizou um estudo de otimização preliminar, de maneira que a localização das plantas, da capacidade produtiva e da malha logística já se encontram otimizados. A contribuição deste trabalho é incluir os estoques e os fretes na otimização.

Figura 17 – Distribuição esquemática da rede logística pelo país



Pela Figuras 16 e 17 pode-se observar a complexidade que existe na modelagem do sistema como um todo. A AF possui diversas usinas, dezenas de CDs e centenas de clientes espalhados pelo no país.

Verifica-se, na prática, que a maior parte das usinas da AF está localizada próxima das fontes de matéria prima: sucata, minério e coque. Nos casos onde há distância relevante entre a matéria prima e a usina, foram feitas adaptações como construção de terminais ferroviários ou portos para contornar a situação. Portanto, pode-se dizer que o processo de alimentação das fábricas não é um fluxo problemático na cadeia logística da AF.

A parte do *outbounding* pode ser dividida em dois fluxos: a saída de material das usinas para os grandes clientes e para os CDs.

A expedição de material para os grandes clientes, envolve grandes volumes e relativamente menor variedade no *mix* de produtos. Essa expedição das usinas está adequadamente dimensionada, contando também com uma boa infraestrutura logística, incluindo terminais ferroviários e marítimos próprios.

Já o *outbounding* para os CDs, envolve volumes menores e maior *mix* de produtos. É justamente nesse fluxo da cadeia logística que se identifica um forte potencial para melhoria. Atualmente, grande parte dessa movimentação entre as usinas e os CDs é feita utilizando o modal rodoviário.

Como o frete rodoviário é mais caro do que o ferroviário, a adoção de modal ferroviário nesse fluxo, provocaria uma redução imediata dos custos de frete (Cf). Essa redução é de fácil e direta medição. No entanto, a adoção desse tipo de modal, provoca também um aumento nos níveis de estoque. Isso se deve aos maiores LTs da ferrovia em relação à rodovia.

Esse aumento tem um custo para a empresa conhecido como custo de estoque (Ce). Esse custo é o custo de oportunidade do capital que está imobilizado em estoques. Costuma-se utilizar a taxa básica de juros dos títulos públicos do governo brasileiro (taxa Selic) como referência para calcular o Ce. Pode-se observar a fórmula para o cálculo do Ce.

$$Ce = \text{Capital Imobilizado} * \text{Tx Selic}$$

$$Ce = CI * S \text{ equação 6}$$

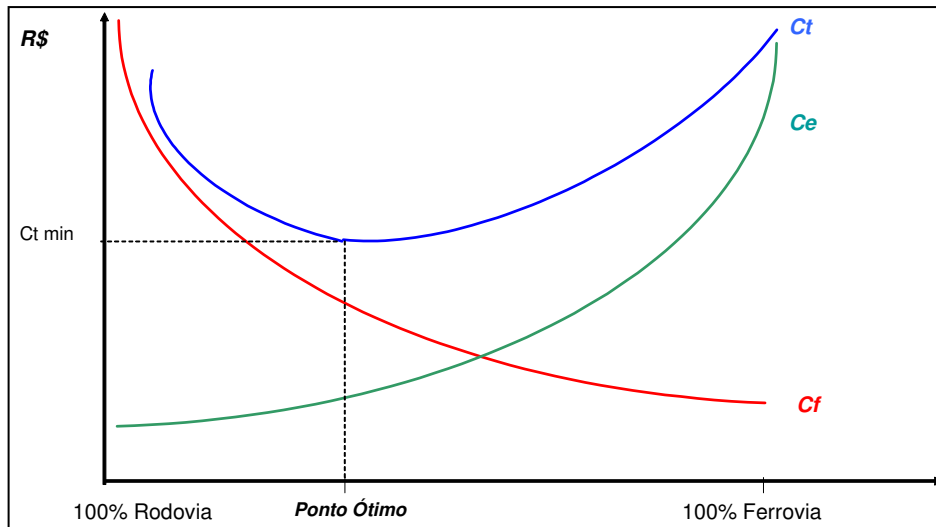
A proposta do modelo é quantificar esse aumento de custo de estoque e compará-lo com a redução no custo do frete.

Dessa comparação, espera-se encontrar um ponto ótimo onde o custo total (Ct) da operação logística seja minimizado.

$$Ct = Ce + Cf \text{ equação 7}$$

No gráfico da Figura 18 pode-se observar o comportamento teórico dos custos em função do modal empregado.

Figura 18 – Custos em função do modal



Bowersox *et al.* (1986) apontam os custos de transporte e estoque como os fatores críticos no projeto de qualquer sistema logístico.

A proposta deste estudo será focada em um caso piloto de uma planta localizada na região nordeste do país. Essa região apresenta um consumo e uma estrutura ferroviária suficientemente desenvolvidos. A usina estudada será chamada de AçoNordeste (AN). A AN é responsável pelo atendimento de três CDs na região. A AN é bom exemplo pois representa bem as características presentes nas demais usinas da AF. Esse fato pode auxiliar numa etapa futura de expansão do estudo para as demais usinas da AF.

3.2 Modelagem

Conforme observado no item anterior, a AF já possui a alocação da sua capacidade produtiva otimizada. Portanto, do ponto de vista da modelagem, pode-se partir da premissa que foi feita uma otimização conforme a função objetivo:

$$f(x) = \text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} * x_{ij}$$

onde são dados:

c_{ij} - frete entre a usina i e o CD j (R\$/t)

P_i - volume de produção na Usina i (t)

D_j - quantidade demandada no CD j (t)

n - número de fábricas

m - número de pontos de venda

determina-se:

x_{ij} - volume movimentado entre a usina i e o CD j (t)

com as seguintes restrições:

$$1) \sum_{i=1}^n x_{ij} = D_j \text{ para } j = 1, \dots, m$$

Garante que a quantidade demandada em cada CD é atendida.

$$2) \sum_{i=1}^m x_{ij} \leq P_i \text{ para } i = 1, \dots, n$$

Limita a capacidade de produção de cada usina.

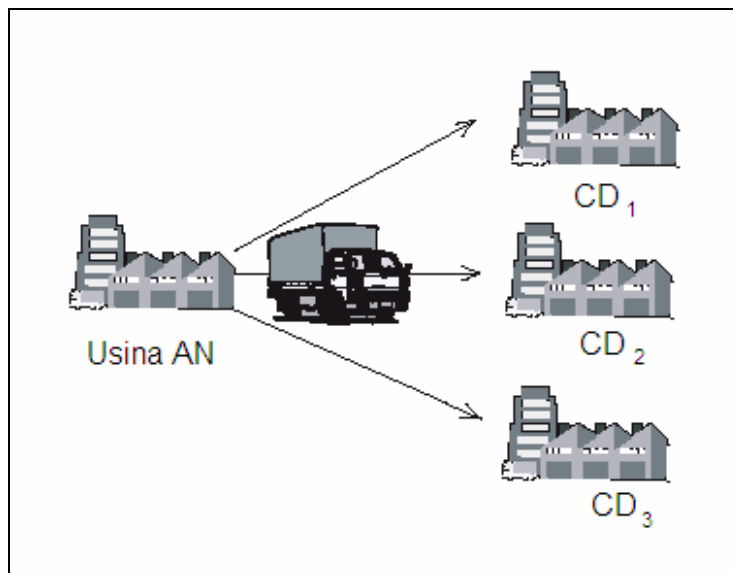
$$3) x_{ij} > 0$$

Limita os valores das variáveis do modelo.

O modelo assegura que cada usina da AF está com a sua capacidade de produção adequada de maneira que os custos de fretes da usina até os CDs estão minimizados.

Lembrando que o modelo será focado na Usina AN e nos três CDs atendidos por ela, pode-se desenhar um diagrama que representa os fluxos de movimentações estudados.

Figura 19 – Fluxos da modelagem. *Adaptado: Garrido & Miranda, (2003)*



Para efeitos didáticos, o problema será inicialmente dividido em duas partes, uma relacionada com o custo do frete e outra com o custo dos estoques.

Os dados utilizados nos modelos e nas análises são reais coletados na AF no período de Janeiro a Dezembro de 2003. Para efeito de sigilo de informações na empresa, todos os dados foram tratados matematicamente, de maneira que os números estão apresentados como uma função $F(x) = Kx$ dos dados reais. Para

efeitos acadêmicos, esse artifício não tem influência alguma nos resultados e conclusões obtidos.

A AF possui uma vasta gama de produtos siderúrgicos. Esses produtos podem ser divididos em 6 grupos com características similares. Foi feito então um levantamento da quantidade desses grupos demandada mensalmente em cada um dos três CDs atendidos pela AN.

Na tabela 16, pode-se observar a quantidade demandada média mensal e o desvio padrão de cada grupo de produto em cada um dos três CDs atendidos pela usina. Verifica-se que o Grupo de produto A é o que possui maior quantidade demandada mensalmente.

Tabela 16 – Consumo mensal nos CDs atendidos pela AN. Fonte: AF

CD	Grupo de Produto	D média mensal (t)	σ_d	Variação %
CD1	A	234	58	25%
	B	7	2	27%
	C	32	9	26%
	D	9	1	16%
	E	10	3	32%
	F	1	0	21%
	SUB TOT	293		
CD2	A	74	18	24%
	B	6	3	58%
	C	18	7	39%
	D	4	2	51%
	E	6	4	62%
	F	2	1	50%
	SUB TOT	109		
CD3	A	300	83	28%
	B	38	7	18%
	C	73	10	14%
	D	9	2	27%
	E	14	6	42%
	F	4	1	30%
	SUB TOT	438		
TOTAL	840			

Outra informação importante para a análise é o valor dos fretes rodoviários e ferroviários entre a usina e os CDs:

Tabela 17 – Frete entre a AN e os CDs. Fonte: AF

	Frete rod (R\$/t)	Frete fer (R\$/t)
CD1	71,33	42,38
CD2	55,67	34,74
CD3	34,00	23,55

3.2.1 Modelo do Custo do Frete

Com os dados levantados, pode-se começar a definir a estrutura do modelo de custos do frete. Inicialmente, são nomeadas as variáveis do modelo.

c_{ij}^{rod} - frete entre a Usina i e o CD j utilizando o modal rodoviário (R\$/t)

c_{ij}^{fer} - frete entre a Usina i e o CD j utilizando o modal ferroviário (R\$/t)

x_{ijk}^{rod} - quantidade de produtos do grupo k movimentados entre a Usina i e o CD j , utilizando o modal rodoviário (t)

x_{ijk}^{fer} - quantidade de produtos do grupo k movimentados entre a Usina i e o CD j , utilizando o modal ferroviário (t)

P_{ik} - volume de produção dos produtos do grupo k na Usina i (t)

D_{jk} - quantidade mensal dos produtos do grupo k demandada no CD j (t)

As seguintes variáveis são importantes para garantir a formatação da carga no modal correspondente:

L_{ij}^{rod} - número de carretas transportadas entre a Usina i e o CD j

L_{ij}^{fer} - número de vagões transportados entre a Usina i e o CD j

F_{ij}^{rod} - fração do lote transportado entre a Usina i e o CD j utilizando o modal rodoviário (t)

F_{ij}^{fer} - fração do lote transportado entre a Usina i e o CD j utilizando o modal ferroviário (t)

n - número de fábricas

m - número de pontos de venda

p - número de grupos de produtos

A função objetivo f_1 minimiza os gastos mensais que a AF tem com fretes:

$$f_1(x) = \text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij}^{rod} * x_{ijk}^{rod} + c_{ij}^{fer} * x_{ijk}^{fer}$$

onde são dados:

$$c_{ij}^{rod} \text{ (R\$/t)}$$

$$c_{ij}^{fer} \text{ (R\$/t)}$$

$$P_{ik} \text{ (t)}$$

$$n = 1$$

$$m = 3$$

$$p = 6$$

determina-se:

$$x_{ijk}^{rod} \text{ (t)}$$

$$x_{ijk}^{fer} \text{ (t)}$$

$$L_{ij}^{rod} \text{ (t)}$$

$$L_{ij}^{fer} \text{ (t)}$$

$$F_{ij}^{rod} \text{ (t)}$$

$$F_{ij}^{fer} \text{ (t)}$$

com as seguintes restrições:

$$1) \sum_{k=1}^p x_{ijk}^{rod} + x_{ijk}^{fer} \geq D_{jk} \text{ para } i = 1, \dots, n \text{ e } j = 1, \dots, m$$

Essa restrição garante que a quantidade demandada de cada grupo de produto k é atendida em cada um dos três CDs. Pode ocorrer o caso em que o

volume transferido é ligeiramente maior do que a quantidade demandada para atender as restrições 3) e 4) de formatação de carga.

$$2) \sum_{k=1}^p x_{ijk}^{rod} + x_{ijk}^{fer} \leq P_i \text{ para } i = 1, \dots, n \text{ e } j = 1, \dots, m$$

Essa restrição garante que a Usina i não irá expedir mais material que a sua capacidade de produção do produto k . Visto que o consumo dos CDs é muito menor que a capacidade de produção da Usina AN, essa restrição estará sempre satisfeita.

$$3) \sum_{k=1}^p x_{ijk}^{fer} = 45 * L_{ij}^{fer} + F_{ij}^{fer} \text{ para } i = 1, \dots, n \text{ e } j = 1, \dots, m$$

$$4) F_{ij}^{fer} \leq 5 \text{ para } i = 1, \dots, n \text{ e } j = 1, \dots, m$$

As restrições 3) e 4) garantem um volume mínimo a ser transportado pelo modal ferroviário. O tipo de vagão utilizado nessa operação necessita pelo menos de 45t de material para formatar uma carga. A restrição 4) garante respeito a capacidade máxima desse vagão de 50 t.

$$5) \sum_{k=1}^p x_{ijk}^{rod} = 20 * L_{ij}^{rod} + F_{ij}^{rod} \text{ para } i = 1, \dots, n \text{ e } j = 1, \dots, m$$

$$6) F_{ij}^{rod} \leq 5 \text{ para } i = 1, \dots, n \text{ e } j = 1, \dots, m$$

As restrições 5) e 6) garantem um volume mínimo a ser transportado pelo modal rodoviário. O modal utilizado será a carreta, necessitando de pelo menos de 20t de material para formatar uma carga. A restrição 6) garante respeito a capacidade máxima dessa carreta de 25 t.

$$7) L_{ij}^{fer}; F_{ij}^{fer}; L_{ij}^{rod}; F_{ij}^{rod} \in \mathbb{Z}^+$$

As variáveis de formatação de carga devem ser inteiras positivas. Justamente devido a essas variáveis trata-se de um problema de otimização mista. Pois há tanto variáveis inteiras como variáveis reais 8).

$$8) x_{ijk}^{rod}; x_{ijk}^{fer} \geq 0$$

Essas variáveis devem ser números reais positivos.

3.2.2 Modelo do Custo de Estoque

A modelagem dos custos de estoque é mais complexa do que a modelagem dos fretes. São diversos conceitos e variáveis que são avaliadas simultaneamente. No modelo proposto, não serão estudados custos relacionados com a movimentação, armazenagem, seguros e manutenção de estoques.

O foco do estudo do custo de estoque está no custo de oportunidade mensal do capital imobilizado (CI) em estoques. Esse valor representa o quanto a AF deixou de ganhar caso tivesse aplicado o CI no mercado financeiro.

Para a modelagem, são necessários alguns dados dos produtos. Primeiramente é necessário saber o valor contábil (v) de cada grupo de produtos. Pela definição exposta, pode-se escrever:

$$CI = Em * v \text{ equação 8}$$

Tabela 18 – Valor contábil (v) dos produtos da AF nos CDs.

Grupo de Produto	v (R\$/t)
A	11.207,50
B	11.248,50
C	12.511,83
D	17.353,83
E	19.859,00
F	21.878,50

Outro dado importante é nível de serviço (NS) desejado para cada grupo de produtos em cada CD. A partir do NS, determina-se o FS associado para o cálculo do Es. Observa-se, na prática, que o dimensionamento ideal do estoque é fortemente influenciado pelo NS.

Tabela 19 –NS e FS dos produtos da AF nos CDs.

CD	Grupo de Produto	NS	FS
CD1	A	95%	1,64
	B	90%	1,28
	C	90%	1,28
	D	90%	1,28
	E	90%	1,28
	F	90%	1,28
	SUB TOT		
CD2	A	95%	1,64
	B	90%	1,28
	C	90%	1,28
	D	90%	1,28
	E	90%	1,28
	F	90%	1,28
	SUB TOT		
CD3	A	95%	1,64
	B	90%	1,28
	C	90%	1,28
	D	90%	1,28
	E	90%	1,28
	F	90%	1,28
	SUB TOT		
TOTAL			

Na tabela 19 verifica-se como as estratégias da empresa podem ter implicações diretas na logística. A AF deseja manter um NS 5% mais alto para grupo de produtos A . Esse NS, corresponde a um aumento de 28% no FS (1,28 para 1,64). Como o FS é um fator multiplicativo na fórmula do cálculo do Es, conclui-se que para proporcionar um aumento de 5% no NS do grupo A, é necessário aumentar em 28% os níveis de Es.

Além desses dados dos produtos, também serão necessários os LTs da operação ferroviária e rodoviária entre a AN e os três CDs.

Tabela 20 – LTs ferroviário e rodoviário entre a AN e os CDs

	LT rod (dias)	LT fer (dias)
CD1	4	6
CD2	3	4
CD3	2	3

O custo do estoque (C_e) estudado no modelo, pode ser obtido através das equações 6 e 8.

$$C_e = C_I * S \text{ equação 6}$$

$$C_I = E_m * v \text{ equação 8}$$

Onde, $S = 1,23\%$ am

Portanto, pode-se escrever:

$$C_e = E_m * v * S \text{ equação 9}$$

Lembrando que :

$$E_m = E_s + D * LT \text{ equação 5}$$

Pode-se escrever:

$$C_e = (E_s + D * LT) * v * S \text{ equação 10}$$

Sabendo que:

$$E_s = FS * \sigma * \sqrt{LT} \text{ equação 4}$$

A partir das equações 10 e 4, temos:

$$C_e = (FS * \sigma * \sqrt{LT} + D * LT) * v * S \text{ equação 11}$$

A AF trabalha com empresas transportadoras de primeira linha que asseguram os cumprimentos com os LTs acertados. Portanto, a variação no LT será considerada desprezível. Será considerada apenas a variação nas quantidades demandadas, estas sim, de grande influência no sistema logístico da AF.

Visto que a quantidade demandada e sua respectiva variação são calculadas mensalmente e os LT são dados em dias, é necessário dividir o LT por 30 para adequar a fórmula. Portanto:

$$Ce = (FS * \sigma_D * \sqrt{\frac{LT}{30}} + D * \frac{LT}{30}) * v * S \text{ equação 12}$$

Sendo definidas as variáveis da modelagem:

x_{ijk}^{rod} - volume de produtos do grupo k transportado entre os pontos i e j utilizando o modal rodoviário (t)

x_{ijk}^{fer} - volume de produtos do grupo k transportado entre os pontos i e j utilizando o modal ferroviário (t)

FS_{jk} - fator de segurança calculado para os produtos do grupo k no local j

σ_{jk} - variação da quantidade mensal demandada dos produtos do grupo k (t) no local j

Lt_{ij}^{rod} - lead time de entrega dos produtos do grupo k (t) entre os pontos i e j utilizando o modal rodoviário (dias)

Lt_{ij}^{fer} - lead time de entrega dos produtos do grupo k (t) entre os pontos i e j utilizando o modal ferroviário (dias)

D_{jk} - quantidade mensal dos produtos do grupo k demandada no CD j (t)

v_k - valor médio do estoque de produtos do grupo k armazenados (R\$/t)

S - Custo de oportunidade mensal do estoque parado - Taxa Selic (% am)

n - número de fábricas

m - número de pontos de venda

p - número de grupos de produtos

$$f_2(x) = \text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^p (FS_{jk} * \sigma_{Djk} * \sqrt{\frac{LT_{ij}^{rod} * x_{ijk}^{rod} + LT_{ij}^{fer} * x_{ijk}^{fer}}{30 * (x_{ijk}^{rod} + x_{ijk}^{fer})}} + D_{jk} * \frac{LT_{ij}^{rod} * x_{ijk}^{rod} + LT_{ij}^{fer} * x_{ijk}^{fer}}{30 * (x_{ijk}^{rod} + x_{ijk}^{fer})}) * v_k * S$$

Essa função é oriunda da fórmula do cálculo do Ce. A diferença está na parte dos LTs. Como a fórmula original do Ce não prevê diferentes modais, foi feita uma média ponderada do LTs pelos volumes movimentados de cada modal.

onde são dados:

$$\sigma_{jk} \text{ (t)}$$

$$L_{ij}^{rod} \text{ (dias)}$$

$$L_{ij}^{fer} \text{ (dias)}$$

$$D_{jk} \text{ (t)}$$

$$v_k \text{ (R\$/t)}$$

$$S \text{ (\%)}$$

$$FS_{jk}$$

$$n = 1$$

$$m = 3$$

$$p = 6$$

determina-se:

$$x_{ijk}^{rod} \text{ (t)}$$

$$x_{ijk}^{fer} \text{ (t)}$$

$$L_{ij}^{rod} \text{ (t)}$$

$$L_{ij}^{fer} \text{ (t)}$$

$$F_{ij}^{rod} \text{ (t)}$$

$$F_{ij}^{fer} \text{ (t)}$$

com as seguintes restrições:

$$1) \sum_{k=1}^p x_{ijk}^{rod} + x_{ijk}^{fer} \geq D_{jk} \text{ para } i = 1, \dots, n \text{ e } j = 1, \dots, m$$

$$2) \sum_{k=1}^p x_{ijk}^{rod} + x_{ijk}^{fer} \leq P_i \text{ para } i = 1, \dots, n \text{ e } j = 1, \dots, m$$

$$3) \sum_{k=1}^p x_{ijk}^{fer} = 45 * L_{ij}^{fer} + F_{ij}^{fer} \text{ para } i = 1, \dots, n \text{ e } j = 1, \dots, m$$

$$4) F_{ij}^{fer} \leq 5 \text{ para } i = 1, \dots, n \text{ e } j = 1, \dots, m$$

$$5) \sum_{k=1}^p x_{ijk}^{rod} = 20 * L_{ij}^{rod} + F_{ij}^{rod} \text{ para } i = 1, \dots, n \text{ e } j = 1, \dots, m$$

$$6) F_{ij}^{rod} \leq 5 \text{ para } i = 1, \dots, n \text{ e } j = 1, \dots, m$$

$$7) L_{ij}^{fer}; F_{ij}^{fer}; L_{ij}^{rod}; F_{ij}^{rod} \in \mathbb{Z}^+$$

$$8) x_{ijk}^{rod}; x_{ijk}^{fer} \geq 0$$

3.2.3 Modelo Completo

O modelo completo de otimização de estoque e de fretes tem função objetivo f_3 dada pela soma das funções objetivos do custo de estoque e do custo do frete calculadas anteriormente.

$$f_3(x) = \text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij}^{rod} * x_{ijk}^{rod} + c_{ij}^{fer} * x_{ijk}^{fer} +$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^p (FS_{jk} * \sigma_{Djk} * \sqrt{\frac{LT_{ij}^{rod} * x_{ijk}^{rod} + LT_{ij}^{fer} * x_{ijk}^{fer}}{30 * (x_{ijk}^{rod} + x_{ijk}^{fer})}} + D_{jk} * \frac{LT_{ij}^{rod} * x_{ijk}^{rod} + LT_{ij}^{fer} * x_{ijk}^{fer}}{30 * (x_{ijk}^{rod} + x_{ijk}^{fer})}) * v_k * S$$

Sendo as variáveis e as restrições as mesmas dos modelos de frete e estoque.

são dados:

$$\sigma_{jk} \text{ (t)}$$

$$L_{ij}^{rod} \text{ (dias)}$$

$$L_{ij}^{fer} \text{ (dias)}$$

$$D_{jk} \text{ (t)}$$

$$v_k \text{ (R\$/t)}$$

$$S \text{ (\%)}$$

$$FS_{jk}$$

$$n = 1$$

$$m = 3$$

$$p = 6$$

determina-se:

$$x_{ijk}^{rod} \quad (t)$$

$$x_{ijk}^{fer} \quad (t)$$

$$L_{ij}^{rod} \quad (t)$$

$$L_{ij}^{fer} \quad (t)$$

$$F_{ij}^{rod} \quad (t)$$

$$F_{ij}^{fer} \quad (t)$$

restrições:

$$1) \sum_{k=1}^p x_{ijk}^{rod} + x_{ijk}^{fer} \geq D_{jk} \quad \text{para } i = 1, \dots, n \text{ e } j = 1, \dots, m$$

$$2) \sum_{k=1}^p x_{ijk}^{rod} + x_{ijk}^{fer} \leq P_i \quad \text{para } i = 1, \dots, n \text{ e } j = 1, \dots, m$$

$$3) \sum_{k=1}^p x_{ijk}^{fer} = 45 * L_{ij}^{fer} + F_{ij}^{fer} \quad \text{para } i = 1, \dots, n \text{ e } j = 1, \dots, m$$

$$4) F_{ij}^{fer} \leq 5 \quad \text{para } i = 1, \dots, n \text{ e } j = 1, \dots, m$$

$$5) \sum_{k=1}^p x_{ijk}^{rod} = 20 * L_{ij}^{rod} + F_{ij}^{rod} \quad \text{para } i = 1, \dots, n \text{ e } j = 1, \dots, m$$

$$6) F_{ij}^{rod} \leq 5 \quad \text{para } i = 1, \dots, n \text{ e } j = 1, \dots, m$$

$$7) L_{ij}^{fer}; F_{ij}^{fer}; L_{ij}^{rod}; F_{ij}^{rod} \in \mathbb{Z}^+$$

$$8) x_{ijk}^{rod}; x_{ijk}^{fer} \geq 0$$

4 Resultado

O modelo estudado classifica-se como programação não linear mista. Não linear porque as relações entre as variáveis na função objetivo são não lineares. Mista porque envolve tanto variáveis inteiras como reais.

O modelo completo de estoque e frete foi simulado e resolvido com ajuda do software LINGO. Esse aplicativo foi projetado para resolução de modelos de otimização não lineares e é amplamente empregado na resolução de problemas logísticos. Miranda e Garrido (2003) desenvolveram um modelo que otimiza simultaneamente a localização da malha logística e alguns parâmetros de gestão de estoque como estoque de segurança e ponto de ressuprimento. Para resolução desse modelo não linear os autores identificaram no LINGO excelentes características como tempo de processamento e convergência do sistema.

Pesquisas e estudos acadêmicos são estimulados pelos desenvolvedores do LINGO que disponibilizam o *software* gratuitamente na *internet*. A versão disponibilizada possui os mesmos métodos de busca, resolução e convergência da versão comercializada. A única limitação prática feita está no número de variáveis de decisão permitidas. Na versão gratuita, são permitidas até 300 variáveis. Esse número é suficiente para o modelo acadêmico desenvolvido nesse trabalho. Mas no caso de uma eventual aplicação na empresa ou adição de novas variáveis, será necessário aquisição da licença junto ao fabricante.

No anexo 6.3. pode-se observar as equações do modelo digitadas no *layout* do LINGO. Para a resolução do problema, o programa identificou o método Branch-and-Bound como o de convergência mais rápida. Esse método é fortemente indicado para problemas de otimização que possuam variáveis inteiras. Foi encontrada uma solução ótima em aproximadamente 2 segundos. Nesse breve período, foram desenvolvidas 894 iterações de tal forma que foi encontrado um valor mínimo local para a função objetivo de R\$ 46.430,00.

Esse valor de R\$ 46.430,00 encontrado corresponde ao valor mensal que a AF deverá desembolsar com fretes e o custo do carregamento do estoque. O custo total encontrado pelo modelo é 15,9% menor do que os R\$ 55.182,10 atualmente gastos mensalmente pela AF nessa operação. Essa diferença representa uma economia anual de R\$ 105.025,00.

Atualmente a AF utiliza apenas o modal rodoviário nas suas transferências. No entanto, o resultado do modelo (anexo 6.4.) indica que sejam transferidos mensalmente 7 vagões para o CD1, 3 vagões para o CD2 e 10 vagões para o CD3.

O modelo indica que a AF deve utilizar 100% do modal ferroviário nessa operação. Portanto, verifica-se que os maiores LT e custos com estoque da ferrovia são compensados pelos fretes mais baratos em relação à rodovia. Pode-se resumir o resultado do modelo da seguinte forma:

Solução Modelo: 100% transporte ferroviário.

Valor da função objetivo: 46.430,00 reais

Número de iterações: 894

CD1 – 7 vagões

CD2 – 3 vagões

CD3 – 10 vagões

4.1 Cenários

Uma das grandes vantagens de se ter um modelo matemático é justamente a facilidade que se encontra em simular e antecipar diferentes situações e cenários. Através do modelo, pode-se ter uma razoável idéia dos impactos, vantagens e desvantagens da adoção de determinada ação no sistema.

São analisados seis grupos de produtos para cada um dos três CDs. Esse nível de detalhe na análise permite que o modelo seja facilmente adaptado para novas situações. Com esse modelo pode-se facilmente criar cenários e simular o comportamento do sistema em cada um deles.

Cenário 1: Todo o transporte rodoviário.

Esse é o cenário atual utilizado na AF.

Valor da função objetivo: 55.182,10 reais

Número de iterações: 619

CD1 – 15 carretas

CD2 – 6 carretas

CD3 – 22 carretas

Cenário 2: Sem restrições de formatação de carga.

Nesse cenário estão sendo desconsideradas as restrições de formatação de carga rodoviária e ferroviária. Nesse caso é esperado que o sistema fique mais rápido, pois são retiradas as variáveis inteiras que dificultam a resolução do modelo. Além disso, é esperado que o Ct seja menor devido à inexistência de peso “morto” transportado nas carretas e vagões nesse cenário. Visto que nesse cenário não existem restrições de formatação de carga, a solução sugere apenas o modal adequado, sem formatar a carga.

Valor da função objetivo: 44.346,50 reais

Número de iterações: 22

CD1 – somente vagões, sem formatação de carga

CD2 – somente vagões, sem formatação de carga

CD3 – somente vagões, sem formatação de carga

Cenário 3: Aumento de 30% no preço do aço.

Nesse cenário é esperado que ocorra um aumento na participação do transporte rodoviário na solução ótima do sistema. Isso deve ocorrer devido ao impacto do aumento nos custos de estoque ferroviário.

Valor da função objetivo: 57.233,30 reais

Número de iterações: 3528

CD1 – 15 carretas

CD2 – 6 carretas

CD3 – 2 carretas e 9 vagões

Cenário 4: Aumento 10% nos fretes rodoviário e ferroviário.

Nesse cenário procura-se simular as condições de operação do sistema no caso de ambos os fretes rodoviário e ferroviário subirem 10%.

Valor da função objetivo: 49.293,68 reais

Número de iterações: 1092

CD1 – 7 vagões

CD2 – 3 vagões

CD3 – 10 vagões

Cenário 5: Aumento de 10% no frete ferroviário.

Nesse cenário procura-se verificar a sensibilidade do sistema a um aumento do custo do frete ferroviário.

Valor da função objetivo: 47.598,90 reais

Número de iterações: 9660

CD1 – 6 vagões e 1 carreta

CD2 – 2 vagões e 1 carreta

CD3 – 8 vagões e 4 carretas

Cenário 6: Redução dos LTs ferroviários.

Nesse cenário procura-se verificar a sensibilidade do sistema a uma eventual redução nos *Lead Times* ferroviários. Nesse contexto é simulado uma redução de um dia em cada um dos LTs ferroviários e manutenção nos LTs rodoviários.

Tabela 21 – LTs Cenário 6

	LT rod (dias)	LT fer (dias)
CD1	4	5
CD2	3	3
CD3	2	2

Valor da função objetivo: 42.226,30 reais

Número de iterações: 606

CD1 – 7 vagões

CD2 – 3 vagões

CD3 – 10 vagões

Cenário 7: Redução da Taxa Selic.

Nesse cenário verifica-se como o sistema se comporta numa eventual diminuição da taxa de juros do governo. Essa taxa tem impacto direto no custo do estoque (C_e). Nos cálculos do modelo, foi utilizada uma taxa de 1,23% am que corresponde a 15,80% aa. Nesse cenário, será considerada que a Selic anual foi reduzida em 5 pontos percentuais, para 10,80% aa, o que corresponde a uma taxa mensal de 0,86% am. Portanto, é esperada uma redução no valor ótimo da função objetivo.

Valor da função objetivo: 46.364,90 reais

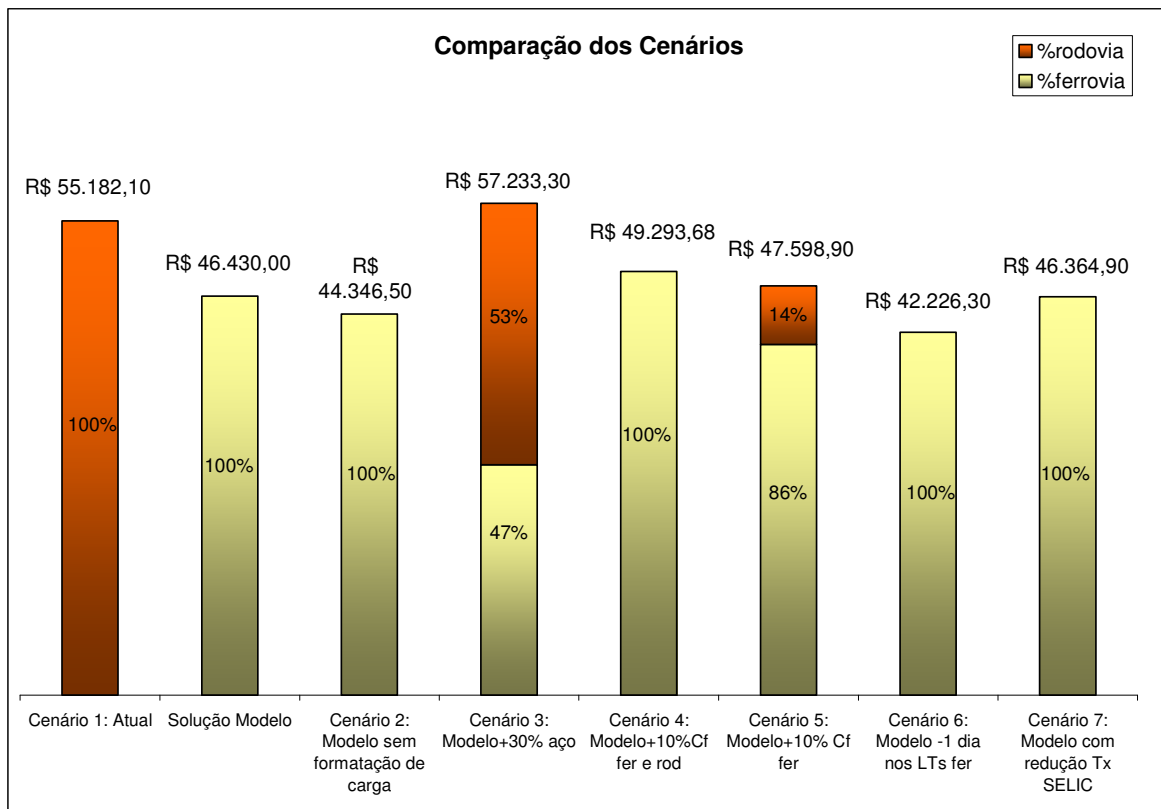
Número de iterações: 1060

CD1 – 7 vagões

CD2 – 3 vagões

CD3 – 10 vagões

Figura 20 – Comparação dos Cenários



4.2 Análise de Sensibilidade

No anexo 6.4. pode-se observar o relatório de resultados gerado pelo *software*. Algumas informações podem ser obtidas facilmente através de simples observação. Outras, no entanto, requerem uma análise um pouco mais profunda.

Pode-se verificar à primeira vista que foram desenvolvidas 894 iterações para chegar a um ótimo local igual a R\$ 46.430,00.

A seguir, o *software* mostra o valor de cada variável no ponto ótimo local do sistema. Cada variável de decisão do modelo possui um *reduced cost* associado. Esse valor pode ser entendido como o custo marginal do sistema. No caso do modelo analisado, essa coluna é uma “penalidade” que deve ser “paga” para incluir uma unidade da variável na solução. Por exemplo, a variável Lf13 tem um *reduced cost* de 1.059,75. Pode-se entender a partir desse número, que se for “adicionado” um vagão para o CD3, a função objetivo ficará 1.059,75 unidades acima do valor ótimo. Portanto, para incluir mais um vagão mensal para o CD3, a empresa AF terá que arcar com um gasto extra no sistema de R\$ 1.059,75 por mês.

Diferentemente do *reduced cost*, a coluna *slack or surplus* não está diretamente relacionada com o valor das variáveis, mas sim com as restrições do modelo. Cada restrição está indicada como uma *row*, numerada de acordo com a ordem que a restrição foi digitada no modelo. Essa variável pode ser considerada como uma variável de “folga” no modelo. A coluna *slack or surplus* informa, para cada uma das restrições, qual a diferença para que a ela satisfaça uma igualdade. Portanto, se a restrição já é uma igualdade, seu valor de *slack or surplus* será zero.

A coluna *dual price*, também conhecida como “preço-sombra”, mostra a influência do acréscimo de uma unidade no lado direito de cada restrição no valor ótimo da função objetivo. Essa coluna pode ser considerada como um relaxamento da restrição do modelo. Por exemplo, considerando o acréscimo de uma unidade na vigésima restrição do modelo, a função objetivo teria uma redução de 42,38.

$$XfA11+XfB11+XfC11+XfD11+XfE11+XfF11=45*Lf11+@if(Lf11 \#eq# 0,0, Ff11) +1$$

Essa restrição está relacionada com a formatação da carga no vagão. Em termos práticos, a adoção de mais uma unidade no lado direito da equação significa adotar um vagão que caiba uma tonelada a mais de carga. Considerando que seja possível selecionar esse tipo de vagão sem custo extra, a AF economizará mensalmente 42,38 reais na sua operação.

Esses mesmos tipos de análises e interpretações servem para todas as variáveis e restrições do modelo e podem direcionar possíveis melhorias e ajustes no processo logístico da AF.

5 Conclusão

O estudo propõe a realização de uma abordagem científica de maneira a analisar a viabilidade da utilização do modal ferroviário em algumas operações logísticas da AF. Busca-se o aproveitamento da utilização do modal ferroviário nos locais onde existe disponibilidade de infra-estrutura ferroviária e rodoviária. A usina AçoNordeste, utilizada como piloto no modelo, realiza o seu transporte de produtos acabados via rodoviária. No entanto, a sua área de atuação logística apresenta uma malha ferroviária disponível para utilização. Partindo dessas premissas, foi realizado um estudo de modelagem do problema com objetivo de validar a utilização da estrutura ferroviária no local.

A modelagem do processo de distribuição de produtos da AF mostra-se muito útil e proveitosa para a empresa. Através da interpretação e exploração dos resultados do modelo, a empresa consegue potencializar as reduções de custo de estoque e frete através da otimização da escolha do seu *mix* de transporte.

Somente no caso piloto da usina AçoNordeste, a AF poderá economizar anualmente mais de 105 mil reais em custos de frete e estoques.

A solução ótima do sistema indica que o modal ferroviário deve ser implementado em 100% da operação da AF na Usina AçoNordeste. No entanto, observa-se que a solução ótima é relativamente sensível à variação de alguns parâmetros do sistema.

Para avaliar essas sensibilidades, foram construídos diversos cenários no modelo. No cenário três, por exemplo, verifica-se que um aumento em 30% na cotação do aço implicaria migração de 50% da operação da AN para o modal rodoviário. No caso dessa alta do aço, a economia no frete ferroviário não compensaria o aumento nos custos de estoques.

Nos últimos tempos, tem-se observado uma grande oscilação na cotação internacional do aço. Essas oscilações têm impacto direto na escolha do modal a ser utilizado para o transporte. O cenário 3 comprova que a ferrovia é um modal altamente indicado para produtos com baixo valor agregado.

Outro parâmetro de sensibilidade do sistema é o custo dos fretes. Supondo que haja um aumento de 10% nos fretes rodoviário e ferroviário, o perfil de transportes será o mesmo da solução original, ou seja, 100% do transporte ferroviário. No entanto, o cenário cinco mostra uma situação hipotética onde ocorre um aumento de 10% apenas no frete ferroviário. Esse aumento provoca a migração de quase 15% dos produtos da AçoNordeste para o modal rodoviário. A primeira vista, pode parecer que esse cenário é de pouca probabilidade de realização. Na prática, verifica-se que esse cenário é factível.

O cenário 7 quantifica o impacto na operação da AF no caso de uma redução na taxa do juros básicos. Dentro desse cenário, os custos de carregamento do estoque são reduzidos e o custo total da operação é reduzido em aproximadamente 0,1%.

Outro ponto de análise é a qualidade da malha ferroviária brasileira. Espera-se que a estrutura da malha ferroviária melhore nos próximos anos. Essa melhoria provocaria ganhos de produtividade e eficiência nas entregas. O cenário 6 quantifica o impacto no sistema de tal melhoria. Para simular essas condições, os LTs ferroviários foram diminuídos em um dia. O custo da operação nesse cenário ficou 4,5% abaixo da solução ótima. Isso indica que a empresa AF se beneficiaria caso houvesse uma melhoria nas condições da malha ferroviária.

Os constantes aumentos nos combustíveis no ano de 2004 influenciaram diretamente os custos dos fretes. No entanto, muitos dos aumentos nos fretes rodoviários podem ser negociados, pois existe uma grande diversidade de operadores rodoviários. Muitas vezes, temendo perda do cliente para o concorrente, a transportadora apresenta-se flexível para negociação de fretes.

No caso das concessionárias ferroviárias, a situação é um pouco diferente. Existem poucas concessionárias operando comercialmente no Brasil. Além disso, estrutura disponível não está sendo aproveitada de maneira eficiente. Muitos trechos operam com ineficiências operacionais, provocando maiores perdas de produtividade e evitando reduções de frete.

Essa situação que as concessionárias ferroviárias atravessam, ocasionam diversos aumentos nos fretes além dos provocados pelos derivados do petróleo.

São justamente esses aumentos, que podem inviabilizar a adoção do modal ferroviário na operação da siderúrgica (cenário cinco).

Verifica-se, na prática, a importância das parcerias público-privadas. Através dessas parcerias, haveria aumento na oferta e disponibilidade de rotas ferroviárias. Além disso, esse investimento aceleraria ganhos de produtividade que poderiam provocar maiores reduções nos fretes ferroviários.

Atualmente, a empresa AF está negociando com a concessionária que opera na região da usina AçoNordeste para avaliar as condições para implantação da solução proposta pelo modelo.

O objetivo do modelo de balancear o conflito entre o custo do frete e o custo de estoque de acordo com o *mix* de transportes utilizado foi atingido. As análises de sensibilidades e dos cenários obtidos sugerem os pontos de atuação para melhorias e as possíveis vulnerabilidades da solução ótima.

Verifica-se, nesse trabalho acadêmico aplicado, a validação da concepção de Ballou (1999), segundo a qual o problema básico da logística é justamente o gerenciamento de custos conflitantes. A partir do estudo realizado nessa dissertação, pode-se propor algumas opções para aprofundamento. Considera-se que alguns pontos do trabalho poderiam ser detalhados:

- a) Implantação da modelagem para as demais Usinas da empresa AF.
- b) Estudo da viabilidade econômica da construção de um terminal ferroviário diretamente na filial de venda. Neste caso poderia ser desenvolvido um estudo comparativo entre o volume de vendas, custo de implantação e manutenção do terminal ferroviário.
- c) Estudo detalhado da formatação de cargas. No modelo desenvolvido, foi otimizado o volume e o mix de produtos necessários para a formatar uma carga. Não foram levadas em consideração nenhum tipo de restrições tais como empilhamento e volume máximo.
- d) Estudo da viabilidade de utilização de outros modais, como o hidroviário, por exemplo. Poderia ser utilizado um modelo análogo ao desenvolvido. Seriam necessárias atualizações nos LTs e nos Fretes.

e) Inclusão no modelo dos custos associados com a operação de transbordo e carregamento rodoviário dos produtos do terminal ferroviário até o CD.

f) Inclusão no modelo dos σ_{LT} para analisar e quantificar o impacto do aumento ou diminuição na variabilidade dos LTs ferroviários na solução ótima.

g) Estudo detalhado da análise de sensibilidade para direcionar possíveis melhorias pontuais e ajustes no processo logístico da AF.

6 Bibliografia

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS. **Anuário estatístico da navegação marítima 2002**. Disponível em: <<http://www.antaq.gov.br>> Acesso em: 15 jun. 2004.

BALLOU, R. H. **Business logistics management**.. New Jersey: Prentice Hall, 1999.

BANCO CENTRAL. **Séries temporais**. Disponível em: <<http://www.bc.gov.br>> Acesso em: 10 jul. 2004.

BOWERSOX, D.; CLOSS, D.; HELFERICH, O. **Logistical management – a systems integration of physical distribution, manufacturing support and materials procurement**. 4.ed. Michigan: Macmilan, 1986.

CAON, M.; CORRÊA, H.; GIANESI, I. **Planejamento, programação e controle da produção**. 4.ed. São Paulo: Atlas , 2001.

CHOPRA, S.; MEINDL, P. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos**. Tradução Cláudia Freire. São Paulo: Prentice Hall, 2003.

COPACINO, W.; MAGEE, J.; ROSENFELD, D. **Modern logistics management – integrating marketing, manufacturing and physical distribution**. Massachusetts: Wiley, 1985.

COSTA NETO, P. **Estatística**. 2.ed São Paulo: Edgard Blücher, 2002.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA E TRANSPORTES.

Planejamento rodoviário 2002. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br>> Acesso em: 02 jun. 2004.

EMPRESA BRASILEIRA DE PLANEJAMENTO DE TRANSPORTES. **Anuário estatístico dos transportes 1996-2002.** Disponível em:

<<http://www.geipot.gov.br>> Acesso em: 10 ago. 2004.

GITMAN, L. **Princípios de administração financeira.** Tradução Jean Jacques Salim e João Carlos Dovat. 7.ed. São Paulo: Harbra, 1997.

INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA. **Anuário estatístico IBS 2003.**

Disponível em: <<http://www.ibs.gov.br>> Acesso em: 27 jul. 2004.

INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE. **Steel statistical yearbook**

2003. Disponível em: <<http://www.iisi.org>> Acesso em: 05 ago. 2004.

LINGO. **Download LINGO 9.0.** Disponível em: <<http://www.lindo.com>> Acesso em: 02 jun. 2004.

LOVE, R.; MORIS, J.; WESOLOWSKY, G. **Facilities location - models & methods.** Massachusetts: North-Holland, 1988.

MAGEE, J. **Planejamento da produção e controle de estoques.** Tradução Ernesto D`Orsi. São Paulo: Pioneira, 1967.

MIRANDA, P.; GARRIDO, R. **Incorporating inventory control decisions into a strategic distribution network desing model with stochastic demand.**

Santiago: Pontíficia Universidad de Chile / Department of Transport Engineering, 2003.

PORTER, M. **Vantagem competitiva.** Tradução Elizabeth Braga. 7.ed. S.I.: Campus, 1986.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; HARLAND, C. **Operation management.** London: Pitman Publishing, 1995.

WINSTON, W. L. **Introduction to mathematical programming.** 2.ed. California: Duxbury Press, 1995.

7 Anexos

7.1 Tabela da extensão da malha ferroviária por bitola

Tabela 22 – Malha ferroviária por bitola. *Fonte: www.geipot.gov.br*

ESTRADA	1,000m	1,435m	1,600m	TOTAL
Ferrovia Centro-Atlântica S.A. - FCA	6.920	-	160	7.080
América Latina Logística do Brasil S.A. - ALL (ex FSA)	6.529	5	-	6.534
Companhia Ferroviária do Nordeste S.A.-CFN	4.238	-	-	4.238
Ferrovias Bandeirantes S.A. - FERROBAN (ex FEPASA)	2.432	-	1.803	4.235
MRS Logística S.A.	-	-	1.674	1.674
Ferrovia Novoeste S.A.	1.617	-	9	1.626
Estrada de Ferro Vitória a Minas	882	-	23	905
Estrada de Ferro Carajás	-	-	892	892
Ferrovias Norte do Brasil - FERRONORTE	-	-	463	463
Companhia Paulista de Trens Metropolitanos - CPTM	18	-	256	274
Companhia Brasileira de Trens Urbanos - CBTU	209	-	42	251
Ferrovia Paraná - FERROPAR	248	-	-	248
Ferrovia Norte - Sul	-	-	200	200
Estrada de Ferro do Amapá	-	194	-	194
Ferrovia Tereza Cristina S.A. - FTC	164	-	-	164
Companhia Fluminense de Trens Urbanos - FLUMITRENS	121	-	-	121
Estrada de Ferro do Jari	-	-	68	68
Estrada de Ferro Campos do Jordão	47	-	-	47
Estrada de Ferro da Mineração Rio do Norte	35	-	-	35
Empresa de Trens Urbanos de Porto Alegre-TRENSURB	-	-	34	34
Total	23.460	199	5.624	29.283

7.2 Tabela de referência de movimentação em todos os portos do Brasil

Tabela 23 – Movimentação nos portos do Brasil. *Fonte: www.antaq.gov.br*

PORTO	1995 (Kt)	1996 (Kt)	1997 (Kt)	1998 (Kt)	1999 (Kt)	2000 (Kt)	2001 (Kt)	2002 (Kt)
Tubarão-ES	62.452	64.203	72.713	73.391	67.069	72.611	68.233	75.192
Itaqui-MA	50.843	49.469	51.271	52.303	46.996	58.552	63.599	64.942
Santos-SP	35.111	36.339	38.472	39.940	42.676	43.084	48.162	53.474
São Sebastião-SP	35.636	37.140	41.990	45.004	41.562	45.695	46.937	52.774
Sepetiba-RJ	25.254	23.910	26.575	26.869	29.813	39.831	39.132	42.805
Paranaguá-PR	17.157	17.635	18.935	19.572	19.265	21.108	28.262	27.860
Aratu-BA	13.527	14.873	15.895	18.527	18.964	18.944	20.588	21.046
Praia Mole-ES	16.029	16.351	16.302	15.823	16.268	19.710	18.956	20.233
Rio Grande-RS	11.032	9.683	11.435	13.875	12.084	13.872	17.569	16.754
Ponta do Ubu-ES	9.754	9.785	9.740	11.089	12.937	15.067	10.924	15.075
S. Francisco do Sul-SC	9.207	11.144	11.685	12.094	14.175	14.405	13.976	15.024
Angra dos Reis-RJ	14.746	12.479	12.898	18.779	18.438	16.283	18.182	14.739
Rio de Janeiro-RJ	18.763	13.487	12.809	12.093	14.578	13.639	15.518	13.394
Belém-PA	12.151	12.220	12.413	13.308	13.897	13.957	13.364	13.319
Manaus-AM	3.250	4.365	4.804	8.225	6.866	8.810	9.434	10.846
Porto Alegre-RS	6.573	5.796	5.316	6.812	6.010	11.056	10.305	10.340
Vila do Conde-PA	1.964	3.270	5.137	6.211	6.947	8.162	11.408	7.946
Vitória-ES	5.134	4.956	5.214	5.573	5.415	6.337	5.576	6.062
Natal-RN	4.599	5.109	5.721	5.818	5.805	5.323	4.800	4.756
Areia Branca-RN	4.044	4.151	3.893	3.930	4.273	4.929	5.003	4.434
Suape-PE	3.139	3.224	3.773	4.075	3.723	3.900	4.918	4.226
Fortaleza-CE	3.057	3.091	3.140	3.427	3.263	3.632	3.457	4.000
Itajaí-SC	1.942	2.209	1.856	1.784	1.933	2.236	2.871	3.802
Maceió-AL	3.681	3.526	3.338	3.037	2.904	3.009	3.362	3.656
Sergipe-SE*	2.500	2.371	2.616	2.813	2.683	2.757	2.694	2.887
B. do Riacho-ES	1.405	1.860	2.060	2.152	2.122	2.205	2.257	2.417
Porto Velho-RO	1.032	1.365	1.657	2.216	2.187	2.079	2.682	2.355
Salvador-BA	1.603	1.635	1.573	1.402	1.789	1.992	1.939	2.335
Corumbá/Ladário-MS	1.241	1.411	1.915	2.048	1.860	1.801	1.542	2.021
Recife-PE	3.173	2.231	2.139	2.617	2.160	2.357	2.079	1.530
Pres. Epitácio-SP	56	102	136	90	786	912	1.257	1.404
Regência-ES	450	398	402	425	478	546	1.056	1.356
Imbituba-SC	1.185	385	576	n/d	1.088	1.156	1.049	968
Cabedelo-PB	1.134	1.014	993	823	871	854	736	930
Estrela-RS	555	626	496	639	608	505	666	687
Ilhéus-BA	814	422	435	782	488	749	779	652
Antonina-PR	43	721	755	570	36	247	538	636
Forno-RJ	622	764	629	470	644	531	529	520
Macapá-AP	1.488	1.456	1.332	968	758	812	701	476
Pelotas-RS	346	293	212	266	262	239	285	297
Santarém-PA	263	269	328	276	234	268	279	246
Niterói-RJ	165	127	136	147	112	143	145	173
Charqueadas-RS	326	371	324	293	351	199	171	173
Cáceres-MT	14	23	70	107	193	112	90	158
Pirapora-MG	9	48	21	25	17	-	59	77
Panorama-SP	220	76	111	1.342	122	42	136	9
TOTAL	387.689	386.384	414.240	443.005	435.710	484.661	506.207	529.005

7.3 Modelo do custo do frete e estoque

MODEL:

! Variáveis que precisam ser declaradas como inteiras;

@GIN(Lf11); @GIN(Lf12); @GIN(Lf13); @GIN(Lr11); @GIN(Lr12); @GIN(Lr13);
@GIN(Ff11); @GIN(Ff12);

@GIN(Ff13); @GIN(Fr11); @GIN(Fr12); @GIN(Fr13);

! Função objetivo que precisa ser minimizada;

! No primeiro bloco está a modelagem do Custo de Frete;

! No segundo bloco está a modelagem do Custo do Estoque de Segurança;

! No terceiro bloco está a modelagem do Custo do Estoque de Ciclo;

MIN =

((71.33*(XrA11+XrB11+XrC11+XrD11+XrE11+XrF11)+55.67*(XrA12+XrB12+
XrC12+XrD12+XrE12+XrF12)+ 34*(XrA13+XrB13+XrC13+XrD13+XrE13+
XrF13))+42.38*(XfA11+XfB11+XfC11+XfD11+XfE11+XfF11)+ 34.74*(XfA12+
XfB12+XfC12+XfD12+XfE12+XfF12)+23.55*(XfA13+XfB13+XfC13+XfD13+
XfE13+XfF13)))+

((440.97*((4*XrA11+6*XfA11)/(30*(XrA11+XfA11)))^0.5+11.33*((4*XrB11+
6*XfB11)/(30*(XrB11+XfB11)))^0.5+55.92*((4*XrC11+6*XfC11)/(30*(XrC11+
XfC11)))^0.5+12.64*((4*XrD11+6*XfD11)/(30*(XrD11+XfD11)))^0.5+
33.16*((4*XrE11+6*XfE11)/(30*(XrE11+XfE11)))^0.5+2.2*((4*XrF11+
6*XfF11)/(30*(XrF11+XfF11)))^0.5+134.08*((3*XrA12+4*XfA12)/(30*(XrA12+
XfA12)))^0.5+19.6*((3*XrB12+4*XfB12)/(30*(XrB12+XfB12)))^0.5+
46.6*((3*XrC12+4*XfC12)/(30*(XrC12+XfC12)))^0.5+18.9*((3*XrD12+
4*XfD12)/(30*(XrD12+XfD12)))^0.5+41.24*((3*XrE12+4*XfE12)/(30*(XrE12+
XfE12)))^0.5+9.33*((3*XrF12+4*XfF12)/(30*(XrF12+XfF12)))^0.5+
628.51*((2*XrA13+3*XfA13)/(30*(XrA13+XfA13)))^0.5+41.11*((2*XrB13+

$$3 * XfB13) / (30 * (XrB13 + XfB13)) ^ 0.5 + 66.68 * ((2 * XrC13 + 3 * XfC13) / (30 * (XrC13 + XfC13))) ^ 0.5 + 22.42 * ((2 * XrD13 + 3 * XfD13) / (30 * (XrD13 + XfD13))) ^ 0.5 + 61.86 * ((2 * XrE13 + 3 * XfE13) / (30 * (XrE13 + XfE13))) ^ 0.5 + 15.19 * ((2 * XrF13 + 3 * XfF13) / (30 * (XrF13 + XfF13))) ^ 0.5 +$$

$$(1073.11 * ((4 * XrA11 + 6 * XfA11) / (XrA11 + XfA11)) + 32.36 * ((4 * XrB11 + 6 * XfB11) / (XrB11 + XfB11)) + 166.46 * ((4 * XrC11 + 6 * XfC11) / (XrC11 + XfC11)) + 62.66 * ((4 * XrD11 + 6 * XfD11) / (XrD11 + XfD11)) + 79.63 * ((4 * XrE11 + 6 * XfE11) / (XrE11 + XfE11)) + 8.34 * ((4 * XrF11 + 6 * XfF11) / (XrF11 + XfF11)) + 338.1 * ((3 * XrA12 + 4 * XfA12) / (XrA12 + XfA12)) + 26.41 * ((3 * XrB12 + 4 * XfB12) / (XrB12 + XfB12)) + 92.50 * ((3 * XrC12 + 4 * XfC12) / (XrC12 + XfC12)) + 29.11 * ((3 * XrD12 + 4 * XfD12) / (XrD12 + XfD12)) + 52.14 * ((3 * XrE12 + 4 * XfE12) / (XrE12 + XfE12)) + 14.61 * ((3 * XrF12 + 4 * XfF12) / (XrF12 + XfF12)) + 1377.54 * ((2 * XrA13 + 3 * XfA13) / (XrA13 + XfA13)) + 174.39 * ((2 * XrB13 + 3 * XfB13) / (XrB13 + XfB13)) + 372.9 * ((2 * XrC13 + 3 * XfC13) / (XrC13 + XfC13)) + 65.81 * ((2 * XrD13 + 3 * XfD13) / (XrD13 + XfD13)) + 114.23 * ((2 * XrE13 + 3 * XfE13) / (XrE13 + XfE13)) + 39.96 * ((2 * XrF13 + 3 * XfF13) / (XrF13 + XfF13))));$$

! Restrições para garantir atendimento da quantidade mensal demandada de cada linha de produto em cada CD;

$$XrA11 + XfA11 \geq 234;$$

$$XrA12 + XfA12 \geq 74;$$

$$XrA13 + XfA13 \geq 300;$$

$$XrB11 + XfB11 \geq 7;$$

$$XrB12 + XfB12 \geq 6;$$

$$XrB13 + XfB13 \geq 38;$$

$$XrC11 + XfC11 \geq 32;$$

$$XrC12 + XfC12 \geq 18;$$

$$XrC13 + XfC13 \geq 73;$$

$$XrD11 + XfD11 \geq 9;$$

$XrD12+XfD12 \geq 4;$
 $XrD13+XfD13 \geq 9;$
 $XrE11+XfE11 \geq 10;$
 $XrE12+XfE12 \geq 6;$
 $XrE13+XfE13 \geq 14;$
 $XrF11+XfF11 \geq 1;$
 $XrF12+XfF12 \geq 2;$
 $XrF13+XfF13 \geq 4;$

! Restrições de formatação de carga para garantir o Lote Mínimo, Máximo e o Arredondamento da carga;

! Formatação de carga para o ferroviário: Lote Mínimo 45 t, Máximo 50t no vagão;

$XfA11+XfB11+XfC11+XfD11+XfE11+XfF11=45*Lf11+@if(Lf11 \#eq\# 0,0, Ff11);$
 $XfA12+XfB12+XfC12+XfD12+XfE12+XfF12=45*Lf12+@if(Lf12 \#eq\# 0,0, Ff12);$
 $XfA13+XfB13+XfC13+XfD13+XfE13+XfF13=45*Lf13+@if(Lf13 \#eq\# 0,0, Ff13);$
 $Ff11 \leq 5;$
 $Ff12 \leq 5;$
 $Ff13 \leq 5;$

! Formatação de carga para o rodoviário - Lote Mínimo 20 t, Máximo 25t na carreta;

$XrA11+XrB11+XrC11+XrD11+XrE11+XrF11=20*Lr11+@if(Lr11 \#eq\# 0,0, Fr11);$
 $XrA12+XrB12+XrC12+XrD12+XrE12+XrF12=20*Lr12+@if(Lr12 \#eq\# 0,0, Fr12);$
 $XrA13+XrB13+XrC13+XrD13+XrE13+XrF13=20*Lr13+@if(Lr13 \#eq\# 0,0, Fr13);$
 $Fr11 \leq 5;$
 $Fr12 \leq 5;$
 $Fr13 \leq 5;$

END

7.4 Resultado do modelo

Local optimal solution found at iteration: 894
 Objective value: 46429.97

Variable	Value	Reduced Cost
LF11	7.000000	1907.100
LF12	3.000000	1563.300
LF13	10.00000	1059.750
LR11	0.000000	1111.379
LR12	0.000000	992.5687
LR13	0.000000	531.4039
FF11	0.000000	42.37999
FF12	0.000000	34.74001
FF13	0.000000	23.54999
FR11	0.000000	0.000000
FR12	0.000000	0.000000
FR13	0.000000	0.000000
XRA11	0.000000	6.448827
XRB11	0.000000	6.394694
XRC11	0.000000	8.787320
XRD11	0.000000	6.654882
XRE11	0.000000	0.000000
XRF11	0.000000	4.774194
XRA12	0.000000	1.443840
XRB12	0.000000	3.325257
XRC12	0.000000	0.7846379
XRD12	0.000000	0.000000
XRE12	0.000000	2.880259
XRF12	0.000000	4.542962
XRA13	0.000000	2.786838
XRB13	0.000000	2.783636
XRC13	0.000000	2.273591
XRD13	0.000000	2.530142
XRE13	0.000000	0.000000
XRF13	0.000000	0.2601876
XFA11	255.9999	0.000000
XFB11	7.000000	0.000000
XFC11	32.00000	0.000000
XFD11	9.000000	0.000000
XFE11	10.00010	0.000000
XFF11	1.000000	0.000000
XFA12	74.00000	0.000000
XFB12	6.000000	0.000000

XFC12	18.00000	0.000000
XFD12	29.00000	0.000000
XFE12	6.000000	0.000000
XFF12	2.000000	0.000000
XFA13	312.0000	0.000000
XFB13	38.00000	0.000000
XFC13	73.00000	0.000000
XFD13	9.000000	0.000000
XFE13	14.00000	0.000000
XFF13	4.000000	0.000000

Row	Slack or Surplus	Dual Price
1	46429.97	-1.000000
2	21.99990	0.000000
3	0.000000	0.000000
4	12.00000	0.000000
5	0.000000	0.000000
6	0.000000	0.000000
7	0.000000	0.000000
8	0.000000	0.000000
9	0.000000	0.000000
10	0.000000	0.000000
11	0.000000	0.000000
12	25.00000	0.000000
13	0.000000	0.000000
14	0.9604264E-04	0.000000
15	0.000000	0.000000
16	0.000000	0.000000
17	0.000000	0.000000
18	0.000000	0.000000
19	0.000000	0.000000
20	0.000000	-42.38000
21	0.000000	-34.74000
22	0.000000	-23.55000
23	5.000000	0.000000
24	5.000000	0.000000
25	5.000000	0.000000
26	0.000000	-55.56896
27	0.000000	-49.62843
28	0.000000	-26.57020
29	5.000000	0.000000
30	5.000000	0.000000
31	5.000000	0.000000