

## FORMULAÇÃO INTEIRA MISTA PARA O PROBLEMA DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO CONSIDERANDO ICMS

**Felipe Allevato Bernardo**

Programa de Engenharia de Produção – COPPE / UFRJ  
Ilha do Fundão, Cidade Universitária, Centro de Tecnologia, Bloco F, Sala 103  
CEP 21941-972 – Rio de Janeiro – RJ – Brasil  
felipe.allevato@gmail.com

**Laura Silvia Bahiense da Silva Leite**

Programa de Engenharia de Produção – COPPE / UFRJ  
Ilha do Fundão, Cidade Universitária, Centro de Tecnologia, Bloco F, Sala 103  
CEP 21941-972 – Rio de Janeiro – RJ – Brasil  
laura@pep.ufrj.br

### RESUMO

O presente trabalho estuda a influência que o Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) pode exercer sobre a escolha da localização de centros de distribuição. Para tal, foi desenvolvido um modelo matemático utilizando programação linear inteira mista para avaliar possíveis cenários de redes logísticas considerando o ICMS, geração de crédito morto e benefícios fiscais. A modelagem foi testada sobre um caso real de uma empresa brasileira prestadora de serviços técnicos no ramo de infraestrutura de telecomunicações, considerando-se três instâncias distintas, cada uma com diversos cenários.

**PALAVRAS CHAVE.** Projeto de Rede, ICMS, Crédito Morto.

**Área principal.** Logística e Transporte, Programação Matemática.

### ABSTRACT

This research studies how the current Brazilian state sales tax for internal and interstate transportation operations can influence the decision of the location of distribution networks for warehouses. To determine this influence, a mixed integer linear programming model has been developed to evaluate logistic network scenarios with varying factors including taxes, worthless-credit and fiscal benefits. The mathematical model has been tested over a real case study based on a technical service provider Brazilian enterprise, considering three distinct scenarios, each one with different varying factors.

**KEYWORDS.** Network Design, ICMS, Worthless-Credit.

**Main area.** Logistic and Transportation, Mathematical Programming.

## 1. Introdução

O presente trabalho é baseado no problema conhecido na literatura como Projeto de Rede ou *Facility Location Problem*. Consiste na definição da localização e quantidade de Centros de Distribuição (CDs) dada uma malha de fornecedores e consumidores para determinados produtos. Genericamente o problema busca minimizar os custos logísticos da operação: transporte e armazenagem. Para tal, o problema é normalmente formulado como um modelo de programação linear inteira mista (PLIM).

O diferencial deste trabalho consiste no estudo do impacto da consideração de um imposto brasileiro que incide nas operações de transferência de produtos, o Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS). Este imposto possui como característica ser estadual e com alíquotas diferentes dependendo do par origem-destino, incidindo sobre uma das operações logísticas, de transporte, e tendo seu valor baseado no valor transportado.

## 2. Descrição do Problema Estudado

O problema estudado é conhecido na literatura como Projeto de Rede Logística, porém neste trabalho leva-se em consideração outro aspecto que não apenas o logístico: o Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS).

De acordo com BALLOU (2006), o problema do projeto de rede consiste na especificação da estrutura na qual os produtos são transportados desde os centros fornecedores até seus consumidores finais, passando ou não por centros de distribuição (CDs) intermediários. Para tal, são necessárias as definições da quantidade e das localizações desses CDs, dos fluxos de produtos a partir dos fornecedores e para a distribuição aos clientes, e dos níveis de estoque a serem mantidos em cada uma das instalações.

Ainda segundo o mesmo autor, para o planejamento de rede é necessário o levantamento de uma série de dados a respeito do negócio, donde se destacam:

- Localização dos fornecedores de cada produto;
- Localização dos clientes;
- Demanda de cada produto por cada cliente;
- Tempos de transportes;
- Custos de transportes;
- Custos de compra/produção;
- Custo de capital;
- Custo de processamento dos pedidos;
- Custos das instalações;
- Níveis de estoque por produto;
- Metas de serviços aos clientes.

É importante ressaltar que por cliente pode-se entender lojas de varejo, muitas vezes pertencentes à mesma empresa de distribuição. Nelas, os produtos são vendidos aos verdadeiros clientes finais, porém estes se deslocam até as lojas para efetuar as compras.

Quem melhor descreve detalhadamente o problema é BALLOU (2006): “*Encontrar o número, o tamanho e as localizações dos armazéns numa rede de cadeia de suprimentos, que venham a minimizar os custos fixos e variáveis lineares do transporte de todos os produtos ao longo da rede escolhida, sujeitos às seguintes condições:*

1. *O suprimento disponível das fábricas não pode ser excedido para cada produto;*
2. *A demanda de todos os produtos deve ser atendida;*
3. *O processamento de cada armazém não pode exceder sua capacidade;*

4. *Um processamento mínimo de armazéns deve ser atingido antes que ele entre em atividade;*
5. *Todos os produtos de um mesmo cliente devem ser supridos a partir de um mesmo armazém”.*

É importante ressaltar que o último tópico da descrição proposta acima não foi considerado na modelagem matemática proposta neste trabalho. Considera-se que um cliente pode ser suprido por diferentes armazéns, inclusive para o mesmo produto, pois uma pode existir uma limitação na produção por parte de um dos fornecedores.

Uma referência mais recente é MELO et. al. (2009), que realiza uma revisão sobre modelos de redes logísticas. De acordo com os autores, o modelo mais simples é o caso em que um determinado número de armazéns deve ser aberto, minimizando a distância ou custos médios ponderados. Este é o problema da p-mediana e pressupõe que os custos fixos de cada instalação sejam iguais. Nos casos em que esta premissa não é válida, o problema é conhecido como *Uncapacitated Facility Location Problem* (UFLP). O desdobramento mais relevante deste último modelo é o *Capacitated Facility Location Problem* (CFLP), implicando que não necessariamente o atendimento de um determinado cliente será realizado pelo armazém mais próximo. Algumas características são comuns a todos esses modelos, dentre elas o fato de ser um período único de planejamento, parâmetros determinísticos, um único produto e um único tipo de CD.

Ainda segundo os autores, as evoluções destes casos, com o intuito de deixá-los mais aplicáveis a situações reais, buscam modelagens que consideram multi-períodos com variações nos parâmetros entre eles, a inclusão de parâmetros estocásticos geralmente devido à incertezas com relação às demandas e custos futuros. Outro aspecto importante é a necessidade de considerar o fluxo de mais de um produto na modelagem. Maiores referências da evolução dos modelos de rede, assim como o comparativo entre as principais formulações podem ser encontradas em MELO et. al. (2009), onde cada problema estudado é classificado com relação à quantidade de produtos, períodos e se são estocásticos ou determinísticos.

Somado a tudo isso, se deve considerar, ainda, a função de custos tributários. O ICMS é um imposto, que conforme MELO (2008), incide sobre operações relativas à circulação de mercadorias. Seu fato gerador é, portanto, a movimentação de produtos entre estabelecimentos, o que interfere diretamente em um projeto de rede logística localizado em território nacional.

Para um entendimento do tema ICMS é preciso compreender alguns aspectos, apresentados aqui de maneira muito resumida:

- Fato Gerador: É a movimentação de mercadorias entre estabelecimentos ainda que de mesmo titular;
- Sujeito Passivo: O contribuinte é, segundo a Lei Kandir, a pessoa jurídica que realizar operações de circulação de mercadorias ou prestação de serviços de transportes;
- Alíquotas: As alíquotas vigentes para o cálculo do ICMS para operações intraestaduais são de 17%, 18% (MG, PR, SP) ou 19% (RJ). Para operações interestaduais, originadas nos estados do Sul ou Sudeste, excluindo o ES têm-se valores de 7%. Para movimentações originadas nos demais estados a alíquota é de 12%. Além das diferentes alíquotas para cada par origem-destino outra particularidade do ICMS é o “cálculo por dentro”. A fórmula de cálculo para impostos desta categoria é a seguinte:

$$\text{ICMS} = \frac{\text{Valor do Produto} - \text{Valor do Produto}}{(1 - \text{Alíquota})}$$

- Base de Cálculo: No caso do ICMS é calculado sobre o valor da mercadoria na saída do estabelecimento de origem ou no caso de prestação de serviços de transporte sobre o preço do serviço (Lei Complementar 87/1996, artigo 13);
- Princípio da Não-Cumulatividade: Os artigos 19 e 20 da Lei Complementar 87/1996 anteriormente citados neste documento discorrem a respeito da não-cumulatividade do ICMS. Para garantir tal princípio existe um sistema de débitos e créditos que possibilitam que o pagamento seja realizado apenas sobre o valor agregado em cada operação (SILVA, 2007).

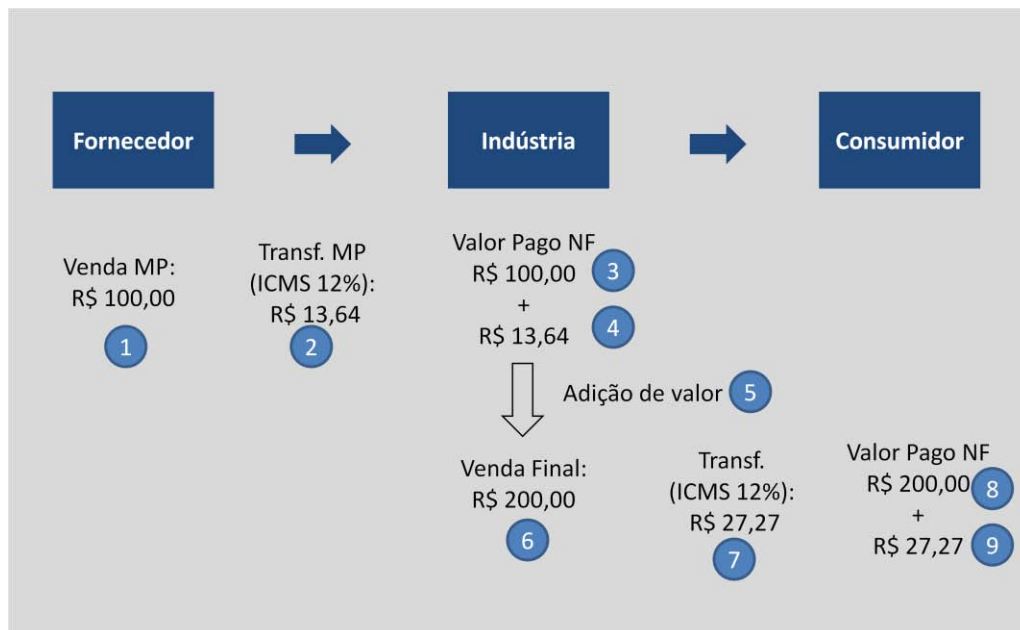


Figura 1 – Fluxo de financeiro e de mercadorias  
Fonte: Autoria própria

Supondo a cadeia produtiva apresentada na Figura 1, constituída por 3 elos (fornecedor, indústria e consumidor) tem-se o seguinte fluxo físico e financeiro:

O fornecedor vende a matéria prima para o processo produtivo na indústria por R\$ 100,00 (1). A transferência deste produto acarreta o recolhimento de R\$ 13,64 de ICMS (2) supondo uma alíquota de 12%. A indústria paga ao seu fornecedor a quantia de R\$ 113,64 conforme nota fiscal, sendo que deste valor R\$ 100,00 (3) são para o pagamento da matéria prima e R\$ 13,64 (4) para o pagamento do imposto. A indústria adiciona valor à matéria prima (5) e vende o novo produto ao consumidor final pelo valor de R\$ 200,00 (6). A movimentação deste produto acarreta um imposto de R\$ 27,27 (7) supondo alíquota de 12%. O consumidor final paga na nota fiscal a quantia de R\$ 227,27 referentes a R\$ 200,00 (8) pelo produto e R\$ 27,27 (9) pelo ICMS.

Da maneira como está estruturado o fluxo, percebe-se que o elo que efetivamente está desembolsando o valor do ICMS é sempre o elo que recebe a mercadoria, quando a lei estabelece que o contribuinte seja o que envia o produto. É o sistema de débitos e créditos que regulariza esta questão. A indústria ao comprar sua matéria prima fica credora em (4), assim como ao vender seu produto, fica devedora em (9). O correto seria pagar ao Fisco o valor (9) correspondente à transferência do material, porém, como já pagou (4) pela operação anterior, pagará apenas o saldo de (9) – (4).

Esta sistemática aliada ao cálculo do imposto apenas sobre o valor do produto, sem considerar os impostos já pagos, garante o princípio da não-cumulatividade.

Os incentivos fiscais são genericamente classificados como:

- Fiscais: isenções ou reduções do imposto;
- Financeiras: financiamento do pagamento do imposto e aquisição de ativos;
- Estímulo para infraestrutura: doação ou venda de terrenos a preços reduzidos.

Com esta possibilidade de isenções fiscais dá-se início ao que é conhecido como guerra fiscal, onde os diversos estados do país fornecem incentivos fiscais a fim de atrair indústrias para seus territórios.

### 2.1. ICMS e o projeto de rede de distribuição

Com o exposto nos itens anteriores sobre as diferentes alíquotas, uma análise pouco aprofundada pode gerar conclusões equivocadas, pois pode parecer que, dependendo do local de escolha de uma instalação, podem-se pagar menos impostos, devido a alíquota menor, o que influenciaria diretamente na modelagem da rede de distribuição.

Para exemplificar esta questão, criou-se o seguinte da Figura 2 a seguir, baseado em SILVA (2007).

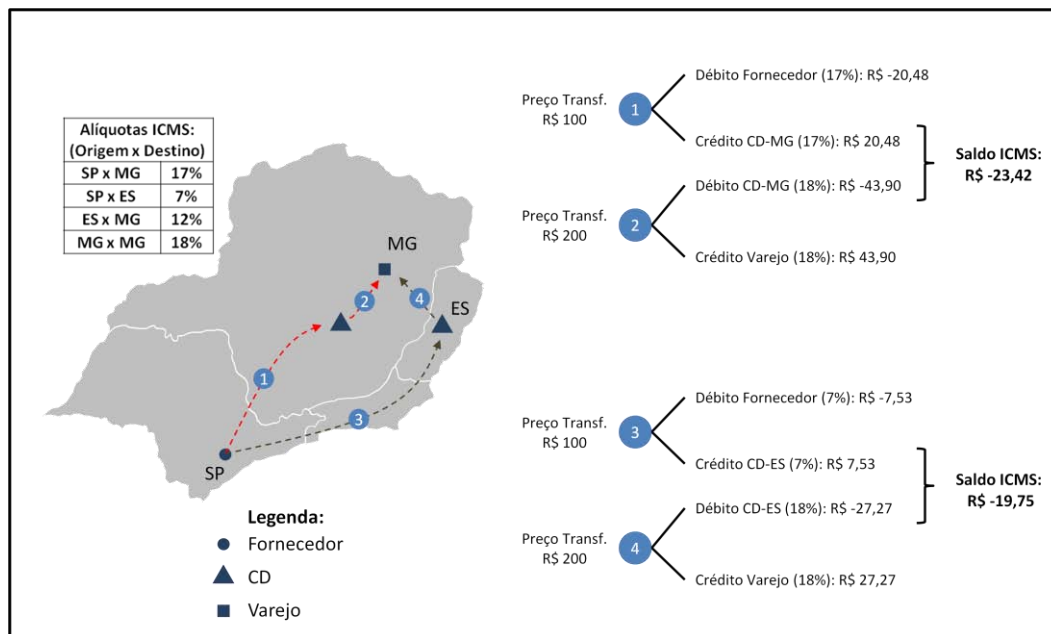


Figura 2 – Saldo de ICMS com Variação da Localidade do CD

Fonte: Autoria própria

No exemplo da Figura 2 é necessário entregar uma mercadoria em Minas Gerais onde o fornecedor está localizado em São Paulo. O preço de compra do produto no fornecedor é de R\$ 100,00 e o preço de revenda ao cliente final (varejo) é de R\$ 200,00. Para tal, uma transportadora possui duas opções onde localizar seu CD: Espírito Santo ou Minas Gerais. Como o objetivo é o entendimento do impacto das tributações de ICMS, são desconsiderados outros custos como o de transporte ou da instalação do CD.

No caso da localização do CD no estado de Minas Gerais, o fluxo é composto das transferências (1) e (2). Em (1), gera-se um débito no fornecedor de R\$ -20,48 e o CD fica credor em R\$ 20,48. Em seguida, em (2), o CD distribui para o cliente final agora ao valor de R\$ 200,00, e se debita em R\$ -43,90 por esta operação. Seu saldo devedor ao Fisco é dado pelos seus créditos subtraídos de seus débitos, ou seja,  $20,48 - 43,90 = -23,42$ .

Caso o CD seja instalado no Espírito Santo as alíquotas são diferentes (e no caso mais baixas que do cenário anterior). No fluxo (3), o crédito no CD é de R\$ 7,53. Na transferência final para o varejo, o débito no CD é de R\$ -27,27, sendo o saldo final devedor de R\$ 7,53 – R\$ 27,27 = R\$ -19,75.

Seguindo este raciocínio conclui-se que com a simples escolha da localização é possível uma economia de quase 16% em relação ao ICMS pago ao Fisco. Entretanto, esta abordagem considera apenas os custos com tributos, não contabilizando a margem do produto em cada caso. No primeiro caso (1) consegue-se um crédito maior, porém este provém de uma compra de maior valor, pois a nota fiscal será de R\$ 120,48. Já no segundo caso (3), o valor total da compra é de R\$ 107,53. Se, em vez de focalizar as análises apenas no valor pago de ICMS, a margem da operação também for verificada, percebe-se que, na realidade, ambas alternativas tiveram o mesmo desempenho. É a chamada *margem da operação*, ilustrada na Figura 3 a seguir.

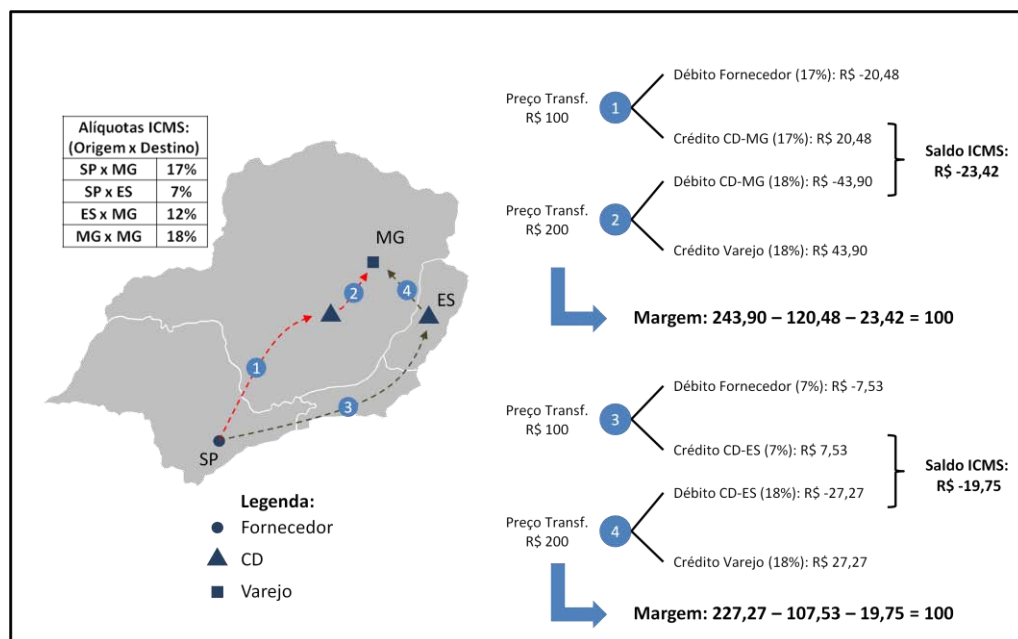


Figura 3 – Margem da Operação com Variação da Localidade do CD  
Fonte: Autoria própria

### 3. Revisão Bibliográfica

Muito já foi estudado sobre o *facility location problem* (FLP) ou modelos de localização. As formulações iniciais do problema consistiam em achar localidades que minimizassem o custo de transporte e custo da mão de obra local. É possível encontrar uma revisão detalhada da literatura desta natureza de problemas em BRANDEAU e CHIU (1989, apud YOSHIZAKI, 2002) ou MARTOS (2000, apud YOSHIZAKI, 2002).

Com relação ao tema otimização de redes logísticas considerando a incidência do ICMS, este assunto foi primeiramente abordado por YOSHIZAKI (2002). Utilizando programação linear inteira mista, o autor estudou oportunidades de ganhos tributários no caso de estabelecimentos que realizam sonegação fiscal e com diferentes tamanhos de CDs. Sua formulação matemática foi baseada no modelo de Geoffrion e Graves, relaxando as restrições de atendimento de um cliente por apenas um CD e a variável binária  $y$ . Segundo o autor, pode ser conveniente abastecer um mesmo mercado por CDs diferentes dependendo do uso que este cliente faz dos créditos de ICMS. Com isso pode-se tratar os fluxos fábrica-CD independente dos fluxos CD-cliente.



PANTALENA (2004) estudou um caso do *trade-off* logística x ICMS para a indústria química considerando o ICMS como um custo absorvido pela indústria e portanto capaz de gerar situações de crédito morto em determinados estados. Apenas em São Paulo é liberada a geração deste crédito, pois no caso estudado o crédito poderia ser negociado então não deveria ser tratado como prejuízo à empresa.

Em sua modelagem, PANTALENA (2004) adicionou uma parcela de custo de ICMS correspondente ao saldo (crédito - débito) a ser pago pela indústria, além de restrições garantindo que em cada estado o valor final do débito seja maior que o do crédito e assim não gerando o crédito morto (com exceção de São Paulo).

SILVA (2007) realiza uma generalização do caso de PANTALENA (2004) modelando uma rede genérica considerando a incidência do ICMS, benefícios fiscais de crédito presumido, economias de escala na operação dos armazéns e restringindo a formação de crédito morto.

A restrição de saldo nulo ou zero nos CDs proposta por SILVA (2007) é uma maneira de garantir a não geração de crédito morto uma vez que esta quantia não pode ser reavista como valor monetário. Porém limitando esta geração, se está limitando também possíveis configurações de malhas que, logisticamente, poderiam ser interessantes.

Ainda na mesma linha, JUNQUEIRA e MORABITO (2006, apud QUEIROZ, 2011) estudaram o efeito do imposto no planejamento da produção e distribuição de sementes de milho, utilizando uma abordagem simplificada do modelo de YOSHIZAKI (2002), considerando dois elos de beneficiamento entre os campos de colheita (fornecedores) e o mercado consumidor.

QUEIROZ (2011) realiza um estudo do efeito do ICMS no planejamento de redes logísticas, analisando as diferentes políticas de estoque e modelos de localização que consideram, ou não, o custo do imposto. O modelo proposto pelo autor visa responder, dentre outros, a quantidade de armazéns abertos, suas localidades, alocação de cada mercado a cada armazém, proporção do custo tributário em relação ao da operação e o impacto das diferentes políticas de estoque no custo total da rede.

NAZÁRIO (2002) descreve, a partir de dois estudos de caso, o impacto do ICMS na localização de empresas. O primeiro caso estudado foi o de uma empresa distribuidora de aço, onde foram analisados os impactos fiscais provenientes de benefícios tributários. O segundo caso estudado foi o de uma empresa de telecomunicações, e foi enfatizado o balanço de ICMS nos estados de atuação.

#### 4. Formulação Matemática Proposta

A seguir a formulação proposta nesse trabalho com o intuito de modelar o problema de rede logística considerando ICMS, benefícios fiscais e permitindo situações em que é gerado crédito morto nos CDs.

##### Índices:

i	Fábrica
j	CDs
c	Clientes
p	Produtos

##### Parâmetros:

$Dem_{pc}$	Demanda do produto p no cliente c (t/ano)
$CapFab_{ip}$	Capacidade da fábrica i para produzir o produto p (t/ano)
$CapCD_j$	Capacidade do CD j (t/ano)

$CTrns_{ij}$	Custo do frete de transferência da fábrica i para o CD j (R\$/t)
$CDstr_{jc}$	Custo do frete de distribuição do CD j para o cliente c (R\$/t)
$FixCD_j$	Custo fixo do CD j (R\$/ano)
$CvCD_j$	Custo variável de transbordo no CD j (R\$/t)
$AliqICMS_{IJ_{ij}}$	Alíquota de ICMS correspondente ao arco com origem na fábrica i e destino no CD j
$AliqICMS_{JC_{jc}}$	Alíquota de ICMS correspondente ao arco com origem no CD j e destino no cliente c
$AliqBef_j$	Percentual relativo ao crédito presumido fornecido pelo benefício (CD j)
$PC_p$	Custo de produção do produto p sem o ICMS, ou seja, o valor utilizado na NF de transferência do produto, sobre o qual incide o ICMS (R\$/t)
$PV_p$	Preço de venda do produto p sem o ICMS, ou seja, custo de produção + margem, sobre o qual incide o ICMS (R\$/t)
$Saldo_{ijcp}$	Saldo no CD j dos fluxos do produto p vindos de i e com destino c
$SaldoFinal_{ijcp}$	Mínimo entre $Saldo_{ijcp}$ e zero

Variáveis:

$fluxo_{ijcp}$	Variável de decisão: Quantidade do produto p transferida da fábrica i para o CD j e posteriormente para o cliente c (t/ano)
$z_j$	Variável de decisão binária: assume valor 1 caso o CD j esteja aberto e 0 em caso contrário

Função Objetivo:

Minimizar

$$\begin{aligned} & \sum_{ijcp} (CTrns_{ij} \cdot fluxo_{ijcp}) && \text{(Custo do frete de transferência i-j)} \\ & + \sum_{ijcp} (CDstr_{jc} \cdot fluxo_{ijcp}) && \text{(Custo do frete de distribuição j-c)} \\ & + \sum_j (FixCD_j \cdot z_j) && \text{(Custo fixo anual do CD j)} \\ & + \sum_{ijcp} (CvCD_j \cdot fluxo_{ijcp}) && \text{(Custo de transbordo no CD j)} \\ & - \sum_{ijcp} (Margem_{ijcp} \cdot fluxo_{ijcp}) && \text{(Margem da operação de venda do produto)} \\ & - \sum_{ijcp} (BenFiscal_{jp} \cdot fluxo_{ijcp}) && \text{(Ganho fiscal a partir do CD j)} \end{aligned}$$

Onde

$$Margem_{ijcp} = \left[ \frac{PV_p}{(1 - AliqICMS_{jc})} \right] - \left[ \frac{PC_p}{(1 - AliqICMS_{ij})} \right] + SaldoFinal_{ijcp}$$

$$SaldoFinal_{ijcp} = \text{Mínimo} \left\{ \left[ \frac{PC_p}{(1 - AliqICMS_{ij})} - PC_p \right] - \left[ \frac{PV_p}{(1 - AliqICMS_{jc})} - PV_p \right]; 0 \right\}$$

$$BenFiscal_{jp} = \frac{PV_p}{(1 - AliqBef_j)} - PV_p$$

Restrições:

Atendimento da demanda

$$\sum_i \sum_j fluxo_{ijcp} = Dem_{cp}, \quad \forall c, \quad \forall p$$

Capacidade de operação do CD j

$$\sum_i \sum_c \sum_p fluxo_{ijcp} \leq z_j \cdot CapCD_j, \quad \forall j$$



Capacidade de produção do fornecedor  $i$

$$\sum_j \sum_c \text{fluxo}_{ijcp} \leq \text{CapFab}_{ip}, \quad \forall i, \quad \forall p$$

Binárias

$$z_j \begin{cases} = 1, \text{ se o } CD_j \text{ está operando} \\ = 0, \text{ em caso contrário} \end{cases} \quad \forall j$$

Não negatividade

$$\text{fluxo}_{ijcp} \geq 0, \quad \forall i, \quad \forall j, \quad \forall c, \quad \forall p$$

O cálculo da margem de cada produto é representado na função objetivo pela quinta parcela, com sinal negativo, pois vai ao sentido contrário da minimização de custos. Esta parcela é calculada subtraindo-se do preço de venda (incluindo ICMS) o preço de compra (também com ICMS) e somando-se o saldo desta operação.

Este saldo refere-se à diferença entre o débito de ICMS na operação de venda menos o crédito de ICMS na operação de compra. Caso este saldo seja negativo, ao ser somado com a diferença entre o preço de venda e de compra todas as parcelas de ICMS serão canceladas e a operação não será prejudicada nem beneficiada pelo imposto. No caso de o saldo ser positivo a empresa teria então um crédito, que é considerado como um valor que não será reavido, e por isso, ganha a nomenclatura de “crédito morto”. Neste caso, a função mínimo (gerada no pré-processamento dos parâmetros) garante que o saldo será nulo e, com isso, esta operação ficará em desvantagem, pois este crédito será considerado como um custo.

Outra consideração importante sobre a formulação é a necessidade de tratar os fluxos de materiais de maneira completa (i,j,c,p). Nas formulações deste tipo de problema usualmente divide-se os fluxos entre elos (fornecedor-CD e CD-cliente). Porém, foi necessário lançar mão deste artifício para viabilizar o cálculo da margem de cada produto, que varia de acordo com a origem e o destino da transação. Com isso não foi possível utilizar a modelagem clássica de problemas de rede onde cada etapa do fluxo de transporte é modelada em separado. Ao modelar o fluxo completo sabe-se todo o caminho de cada material e, por isso, é possível saber se é gerado crédito morto.

Porém, a modelagem do fluxo de maneira completa exige um maior esforço computacional, o que pode se tornar um impeditivo dependendo do tamanho da instância a ser processada. Nos casos testados neste trabalho o desempenho computacional não foi uma barreira devido às instâncias serem de tamanhos moderados. Em cenários com quantidades muito grandes de fornecedores e/ou clientes a modelagem proposta deve ser melhor avaliada antes de ser implementada.

As duas primeiras parcelas da função objetivo correspondem aos custos de transporte de transferência e distribuição, respectivamente. Os parâmetros destes custos apresentam-se em R\$/tonelada, e, ao serem multiplicados pela variável de fluxo, em toneladas, resultam em R\$.

A terceira e a quarta parcelas referem-se ao custo de armazenagem, sendo a primeira delas o custo fixo de abertura de uma instalação e a segunda o custo variável por tonelada movimentada (entrada) no CD.

Não foi considerado o custo de movimentação no fornecedor, como era considerado em outros trabalhos. Optou-se por suprimir esta parcela, pois ela ocorrerá indiferentemente à escolha de fluxos e CDs.

As duas últimas parcelas representam os cálculos tributários conforme detalhado anteriormente.

Com relação às restrições a primeira delas garante o atendimento das demandas dos clientes, igualando o somatório do fluxo de um determinado produto em cada cliente à demanda por este produto pelo cliente.

A restrição seguinte refere-se à capacidade de operação dos CDs. Esta restrição é o coração da modelagem de rede, sendo responsável pela abertura dos CDs. A inequação garante que, para existir um fluxo para um determinado CD, sua variável  $z$  binária deve ser igual a 1, caso contrário todo o fluxo é zerado.

A próxima restrição é a de produção de cada fornecedor, garantindo que sua capacidade produtiva será respeitada.

Por último, aparecem a restrição de não negatividade dos fluxos e a restrição que restringe as variáveis  $z$  binárias, encerrando a lista.

## 5. Resultados Computacionais

Para avaliar a formulação proposta em 4 e verificar se a inclusão dos fatores tributários pode gerar desbalanceamento na rede logística, escolheu-se um problema de dimensões reais, baseado em valores verídicos da operação, como a localização dos fornecedores e clientes finais, mas os valores e as margens dos produtos foram alterados de modo a garantir o sigilo da operação.

O modelo foi implementado em Xpress Mosel versão 3.2.3 e otimizado com o versão Xpress Optimizer 22.01.09 em um Pentium i3 de 2.20 GHZ com 4GB de memória.

O caso estudado é de uma empresa real de prestação de serviços técnicos, no ramo de infraestrutura de telecomunicações, com atuação nos estados do Norte, Nordeste e Sul. Foi fundada em 1993 e atualmente conta com mais de 17 mil colaboradores, possuindo um faturamento de mais de um bilhão de Reais.

Para esta primeira análise escolheu-se uma instância reduzida contendo três fornecedores (Natal, Teresina e Fortaleza), três possíveis CDs (Iguatu (CE), Petrolina (PE) e Juazeiro (BA)), três clientes (Salvador, Camaçari e Vitória da Conquista, todos na Bahia) e um único produto. Testou-se então 7 cenários variando a inclusão do ICMS, proibição de crédito morto, inclusão de benefícios fiscais e preço do produto.

Os resultados podem ser observados nos gráficos da Figura 4 e da Figura 5, a seguir.

### Resumo dos Custos dos Cenários do Caso Base

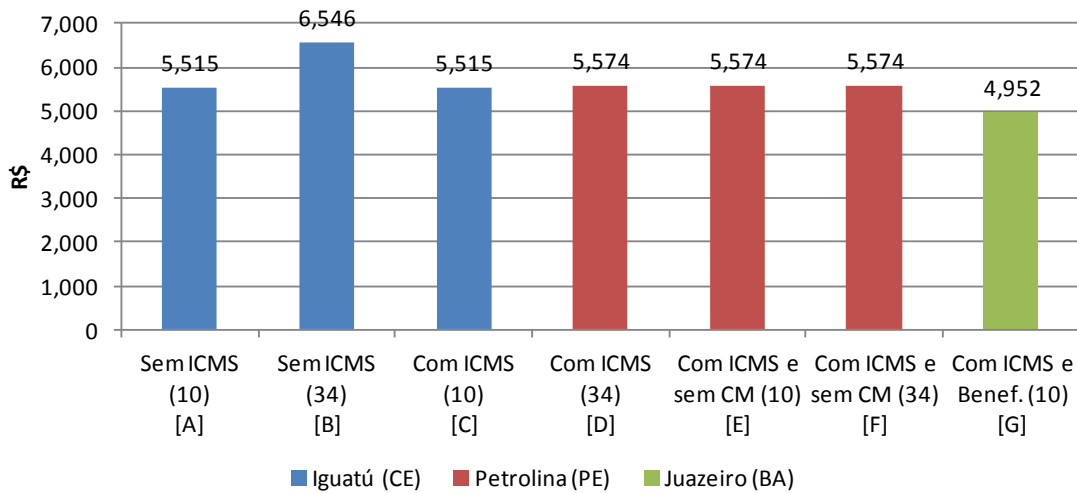


Figura 4 – Resumo dos Custos dos Cenários do Caso Base  
Fonte: Autoria própria

### Detalhes dos Custos dos Cenários do Caso Base

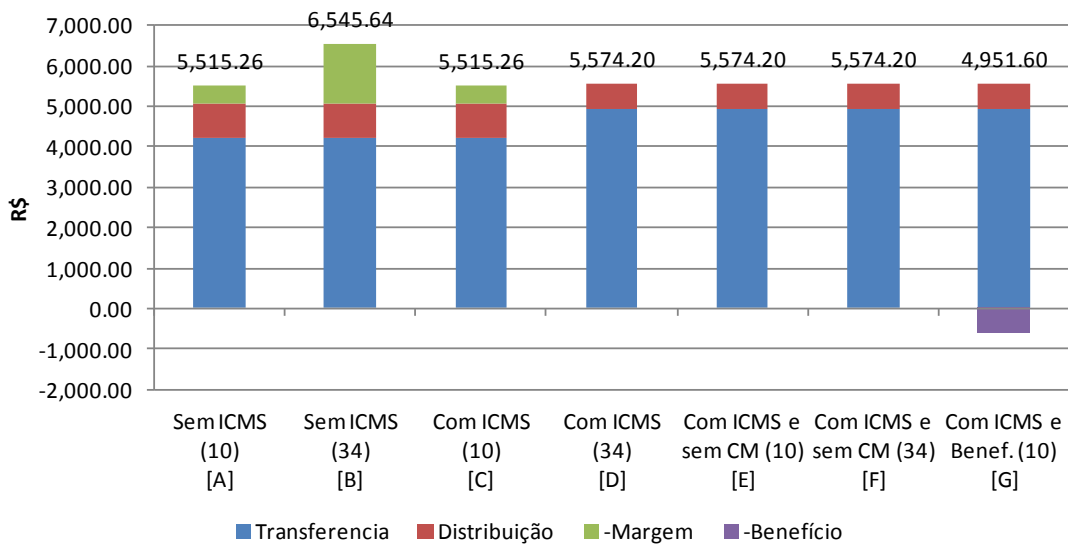


Figura 5 – Detalhe dos Custos dos Cenários do Caso Base  
Fonte: Autoria própria

Analisando os gráficos da Figura 4 e da Figura 5 é possível chegar a duas conclusões.

A primeira é que a consideração do ICMS pode alterar a configuração da malha. Isso pode ser percebido ao comparar os cenários B e D, onde o preço do produto é o mesmo, porém, a inclusão do custo do tributo acarretou na alteração da localização do CD, de modo a não incorrer na geração de crédito morto, evitando um custo maior. Isso pode ser melhor visualizado no gráfico da Figura 5. No cenário D não existe nenhuma penalidade por ICMS (não é considerado na função objetivo). A comparação do cenário A com G também exemplifica esta situação, porém, agora com o desbalanceamento devido ao incentivo fiscal.

A segunda conclusão é que, apesar de a geração de crédito morto ser indesejada, ao restringi-la, pode-se jogar fora o cenário ótimo. Isso pode ser observado ao se comparar os cenários C e E do gráfico da Figura 5. No cenário C existe uma parcela de margem negativa (crédito morto), mas, mesmo assim, este caso possui custo total menor que E.

## 6. Referências Bibliográficas

BALLOU, R. H. *Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos / Logística Empresarial*. 5ª edição, Ed Bookman, 2006.

BRANDEAU, M.L.; CHIU, S.S. *An overview of representative problems in location research*. Management Science, V35, n. 7, 1989.

GEOFFRION, A.M.; GRAVES, G.W. *Multicommodity Distribution System Design by Benders Decomposition*. Management Science, Vol. 20, n. 5, 1974.

JUNQUEIRA, R.; MORABITO, R. *Um Modelo de Otimização Linear Para o Planejamento Agregado da Produção e Logística de Sementes de Milho*. Produção, v.16, n.3, p.510-525, 2006.

Lei Complementar Nº 87, de 13 de setembro de 1996 (Lei Kandir).

MARTOS, A. *Projeto de Redes Logísticas com Consideração de Estoques e Modais*, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, USP, 2000.

MELO, J. E. S. *ICMS, Teoria e Prática*. 10ª edição, São Paulo, 2008. Ed Dialética.

MELO M.T.; NICKEL, S.; SALDANHA-DA-GAMA F. *Facility location and supply chain management – a review*. European Journal of Operational Research, Vol. 196, Issue 2, p.401–412, 2009.

NAZÁRIO, P. R. S. *Impactos Fiscais na Decisão de Localização de Instalações: Estudo de Caso*, Dissertação de Mestrado, COPPE-Produção, UFRJ, 2002.

PANTALENA, B.G. *Otimização da Malha Logística de uma Indústria Química*, Trabalho de Formatura, Escola Politécnica, USP, 2004.

QUEIROZ, I. S. *Planejamento de Redes Logísticas Considerando o Efeito do ICMS*, Dissertação de Mestrado, COPPEAD, 2011.

SILVA, M.B. *Otimização de redes de distribuição física considerando incentivo fiscal baseado no crédito presumido de ICMS*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, USP, 2007.

XPRESS: [www.fico.com/en/Products/DMTools/Pages/FICO-Xpress-Optimization-Suite.aspx](http://www.fico.com/en/Products/DMTools/Pages/FICO-Xpress-Optimization-Suite.aspx)  
FICO® Xpress Optimization Suite

YOSHIZAKI, H. T. Y. *Projeto de redes de distribuição física considerando a influência do imposto de circulação de mercadorias e serviços*. Tese de Livre-docência, Escola Politécnica, USP, 2002.