

MODELO DE PROGRAMAÇÃO ESTOCÁSTICA PARA O PLANEJAMENTO DA REDE REVERSA DE LATAS DE ALUMÍNIO

Aura Jalal

Universidade Federal de São Carlos
Rod. Washington Luiz, São Carlos - SP, 13565-905, Brasil
auramariajalal@gmail.com

Laís Salles

Universidade Federal de São Carlos
Rod. Washington Luiz, São Carlos - SP, 13565-905, Brasil
laismoniquems@gmail.com

Reinaldo Morabito

Universidade Federal de São Carlos
Rod. Washington Luiz, São Carlos - SP, 13565-905, Brasil
morabito@ufscar.br

RESUMO

Neste artigo, é apresentado um modelo de programação estocástica de dois estágios para abordar o planejamento do projeto da rede de recuperação, considerando que quantidade de material coletado é estocástica. Foram realizados experimentos computacionais usando dados da literatura coletados da reciclagem de latas de alumínio para bebidas no Brasil. A abordagem de programação estocástica é avaliada por meio de medidas de desempenho, mostrando a importância de considerar a incerteza de retorno nesse problema.

PALAVRAS CHAVE. Rede de recuperação, Programação estocástica de dois estágios, Reciclagem de latas de alumínio.

L&T – Logística e Transportes

ABSTRACT

In this paper, we present a two-stage stochastic programming model to address the planning of recovery network design, considering stochastic return quantity. We performed computational experiments using literature data collected from recycling of beverage aluminum cans in Brazil. The stochastic programming approach is evaluated through performance measures, showing the importance of considering return uncertainty in this problem.

KEYWORDS. Recovery network. Two-stage stochastic programming. Aluminum cans recycling.

L&T – Logistic and Transportation

1. Introdução

O alumínio representa o maior percentual de reciclagem no Brasil, cerca de 98% deste resíduo é reciclado. O país é o líder mundial em reciclagem do material, seguido pelo Japão e Estados Unidos. De acordo com Associação Brasileira do Alumínio (ABAL) apenas a etapa de coleta de latas de alumínio injetou R\$ 1,2 bilhão e gerou mais de 400 mil empregos diretos e indiretos em 2017. A reciclagem do alumínio também apresenta vantagens ambientais, pois reduz a extração de matéria prima virgem, assim como o descarte do material no meio ambiente, ainda diminui significativamente o consumo de energia no processo de fabricação, consumindo apenas 5% da energia que seria necessária na produção do metal a partir da extração de matéria prima. Além disso, a análise de Ciclo de Vida deste produto aponta que sua reciclagem reduz em 95% a emissão de gases de efeito estufa no meio ambiente [ABRALATAS, 2018, 2019].

Projetos de redes de recuperação e reciclagem de produtos em geral são problemas desafiadores devido à alta capilaridade dos pontos iniciais de coleta e devido à incerteza da quantidade e qualidade do material recuperado. Jalal et al. [2017] propuseram um modelo determinístico para o problema de localização de centros de coleta e dimensionamento de frota de veículos de uma rede de logística reversa de latas de alumínio para bebidas no Brasil, visando minimizar o custo logístico da rede. Contudo, na prática a quantidade de material gerado em cada ponto é incerta, em geral prevista com pouca precisão. Motivado por tal fato, este trabalho modela o problema via programação estocástica de dois estágios, considerando a incerteza nesta quantidade gerada. O modelo busca minimizar o custo total esperado de configuração de rede e transporte de material. A abordagem de programação estocástica com dois estágios é avaliada através das medidas de desempenho, mostrando a importância de considerar a incerteza da demanda neste problema.

2. Revisão de literatura

A logística reversa pós-consumo se inicia com a coleta de produtos descartados pelos consumidores finais e termina com o seu reparo, reuso, reciclagem, reprocessamento nos locais de remanufatura ou disposição final em locais adequados [Agrawal et al., 2016; Alshamsi e Diabat, 2015]. Nos últimos anos as organizações têm dado maior importância à logística reversa devido ao aumento da preocupação com o meio ambiente, à construção de uma imagem sustentável frente aos consumidores e às imposições legais [Govindan et al., 2015; Agrawal et al., 2016]. A logística reversa também propicia benefícios financeiros pelo reaproveitamento de matéria-prima, proveniente dos canais reversos de reuso ou de remanufatura. Aliás, os governos têm estabelecido legislações que exige que as empresas se responsabilizem pelos produtos que fabricaram.

Na logística reversa se destaca a importância dos centros de coleta/inspeção na configuração da rede Alshamsi e Diabat [2015] consideram que a quantidade e localização desses centros tem um grande impacto nos custos de transporte da rede. Há diversos trabalhos na literatura que propõem modelos matemáticos para auxiliar na tomada decisões de localização de centros para configuração de redes de logística reversa. Xiao et al. [2019] abordam o problema de localização-alocação de logística reversa para veículos no fim da vida útil com base na medição das emissões de carbono. Wang et al. [2019] propõem um modelo para projeto de rede de logística reversa de resíduos de serviços de saúde urbanos. O modelo proposto por Ali et al. [2020] projetar uma cadeia de suprimentos sustentável e otimização da logística reversa de uma empresa de manufatura de ar condicionado industrial.

Comparando logística reversa com logística direta, há uma maior dificuldade no planejamento da logística reversa devido às incertezas na quantidade e qualidade dos produtos que retornam para o ciclo de produção [Niknejad e Petrovic, 2014]. Fattahi e Govindan [2017] aborda o projeto e o planejamento de uma rede de logística direta/reversa integrada em um horizonte de planejamento com vários períodos táticos. Para isso, utiliza a programação estocástica de dois estágios. Zeballos et al. [2018] propõem um modelo de programação estocástica de dois estágios incorporando incerteza sobre a qualidade e quantidade dos fluxos de retorno. Um estudo de caso de uma empresa europeia de bens de consumo é explorado. Azizi et al. [2020] propõem um modelo de programação estocástica de dois estágios para um problema de projeto de rede de logística reversa sob incerteza de retorno e demanda.

Jalal et al. [2017] propõem um modelo de otimização para planejar a rede reversa, que considera decisões de localização e dimensionamento dos centros de coleta, alocação dos pontos de geração aos centros de coleta, e dimensionamento da frota de veículos. A formulação matemática é baseada no modelo para o problema de localização de plantas com restrição de capacidade e distância (CDCPLP- *Capacity and Distance Constrained Plant Location Problem*) proposto por Albareda-Sambola et al. [2009]. Nosso trabalho apresenta uma versão estocástica deste problema para abordar a incerteza no retorno dos produtos.

3. Descrição do problema

No processo de reciclagem de latas de alumínio, o material descartado é coletado e encaminhado para os centros de coleta, onde é feita a triagem e compactação do material de acordo com os padrões exigido pelas empresas processadoras e para facilitar o transporte. O material é enviado para as plantas de fundição onde segue o processo de transformação, voltando à cadeia produtiva [Jalal et al., 2017].

As incertezas na quantidade e qualidade do material que retorna são um dos maiores desafios no planejamento de redes reversas, pois variações nas informações de entrada na tomada de decisões podem alterar as disposições resultantes. Dado que o planejamento envolve decisões estratégicas, geralmente tomadas para o longo prazo, uma vez executadas, são custosas e difíceis de reverter, aumentando significativamente o custo total da rede [Pishvaei et al., 2010]. Assim, a tarefa de lidar com a incerteza existente nos parâmetros do problema tem um papel significativo no desempenho da rede. O design das redes de logística reversa sob incerteza atraiu a atenção da comunidade acadêmica, Govindan et al. [2017] apresenta uma revisão de literatura sobre este assunto.

A principal fonte de incerteza neste problema é a quantidade de material encontrada (ou disponível) nos pontos de geração, que depende de fatores econômicos e sociais: densidade da população da região, o padrão de consumo da população, as diferenças socioeconômicas de acesso a bebidas enlatadas, mudanças na economia do país, entre outros. De fato, a quantidade de material poderia ser determinada apenas no final do horizonte de planejamento. A subestimação da quantidade gerada leva a não coleta e, conseqüentemente, perda de oportunidades financeiras, no futuro, por meio da venda de lingotes de alumínio. No entanto, a superestimação resulta em altos custos por capacidade ociosa. Ambas as situações são indesejáveis. Planejar a rede com base em valores médios, aproximados ou estimados pode resultar em decisões mais custosas ou ainda decisões ineficazes em alguns cenários. Em contraste, a consideração de incertezas na tomada de

decisões pode proporcionar soluções factíveis para qualquer realização das incertezas e com menor custo esperado no longo prazo.

Desta forma, neste trabalho propomos um modelo de programação estocástica de dois estágios para auxiliar a tomada de decisões no problema de planejamento da rede de logística reversa de latas de alumínio descrito por Jalal et al. [2017], sob consideração de incertezas na quantidade de material encontrada nos pontos de geração. As decisões abordadas neste problema são localização e dimensionamento de capacidade dos centros de coleta, dimensionamento da frota de veículos em cada centro de coleta e alocação de pontos de geração de resíduos aos centros de coleta.

4. Modelagem matemática estocástica de dois estágios

O problema de planejamento da rede reversa de latas de alumínio para bebidas considerando demanda estocástica pode ser formulado como um modelo de programação linear inteira mista. O modelo é baseado no problema de planejamento da rede reversa de latas de alumínio para bebidas proposto por [Jalal et al., 2017].

Para considerar a incerteza da demanda no problema, propomos uma formulação usando uma abordagem baseada em cenários dentro do paradigma de programação estocástica de dois estágios. A variável aleatória de demanda é aproximada por um conjunto discreto de realizações ou cenários ξ que pertence a um conjunto amostral Ξ , tal que $\xi \in \Xi = \{1, 2, 3, \dots\}$ com probabilidade de ocorrência de cada cenário de $\pi(\xi)$, tal que $\pi(\xi) \geq 0$ e $\sum_{\xi} [\pi(\xi)] = 1$. Um conjunto de eventos é identificado como $\mathcal{F}$, com $\mathcal{F} \in \Xi$.

Na programação estocástica de dois estágios, considera-se que as decisões são tomadas antes e depois da realização das variáveis aleatórias, e são chamadas de decisões “aqui e agora” e “espere e veja”, respectivamente. Neste problema, a decisão a tomar “aqui e agora” é a definição da localização de centros de coleta e dimensionamento da frota de veículos em cada centro de coleta, porque a coleta do material requer instalações em pleno funcionamento. Dado que construir ou alugar uma instalação e adequá-la com equipamentos necessários para funcionar como centro de coleta requer tempo, a instalação tem que ser executada com antecedência. Caso contrário, o material não pode ser coletado e processado no período. Logo, esta decisão deve basear-se na informação parcial sobre demanda, isto é, a localização é definida no primeiro estágio do modelo, por ser uma decisão estratégica, custosa e difícil de reverter. Após conhecer a quantidade de material coletada, é possível adaptar-se a solução obtida através de variáveis corretivas, que são variáveis de segundo estágio do modelo. Ou seja, se tomarão as decisões associadas ao fluxo de produtos entre as instalações, alocação de regiões de geração de resíduos aos centros de coleta e alocação dos centros de coleta às unidades de processamento. Como variáveis corretivas são introduzidas as variáveis de coleta de material, a possibilidade de subcontratação da prensagem de material e o aumento da capacidade nominal dos centros de coleta. Estas variáveis de segundo estágio são determinadas com base nas informações atualizadas de demanda e em função da localização prévia dos centros de coleta.

Para a formulação do modelo de programação estocástica de dois estágios, considere a seguinte notação matemática.

Índices

$i \in \mathcal{I}$	Pontos (estados) de geração de resíduos.
$j \in \mathcal{J}$	Locais candidatos à instalação dos centros de coleta.
$k \in \mathcal{K}$	Plantas de fundição de latas de alumínio.
$l \in \mathcal{L}$	Níveis de capacidade dos centros de coleta (em toneladas).
$v \in \mathcal{V}$	Veículos alocados nos centros de coleta.
$\xi \in \Xi$	Cenários de geração de material.

Parâmetros

f_{jl}	Custo fixo de instalação do centro de coleta no local j com nível de capacidade l .
g	Custo fixo por veículo (frota própria ou frete dedicado)
c_{ij}	Custo de cada viagem entre estado i e o centro de coleta j .
c'_{jk}	Custo de cada viagem entre o centro de coleta j e o centro de fundição k .
o_j	Custo de subcontratar o processamento de material incorrido pelo centro j .
h_i	Penalidade por não coletar material.
ϕ	Fator de penalidade por abertura emergencial.
d_{ij}	Distância do estado i ao centro de coleta j .
d'_{jk}	Distância do centro de coleta j ao centro de fundição k .
D_{max}	Distância máxima que cada veículo pode percorrer no horizonte de tempo considerado.
q_l	Capacidade de cada centro de coleta no nível l .
q_{capsub}	Limite de capacidade subcontratada
C_{sutaca}	Capacidade de carga do veículo para carga não prensada (em toneladas).
C_{fardo}	Capacidade de carga do veículo para carga prensada (em toneladas).
$r_i(\xi)$	Volume de resíduo gerado no estado i no cenário ξ .
$\pi(\xi)$	Probabilidade de ocorrência do cenário ξ .

Variáveis

Y_{il}	Indica se o centro j é aberto com nível de capacidade l .
W_{jv}	Indica se o veículo v é utilizado pelo centro de coleta j .
$X_{ij}(\xi)$	Quant. de material transportada do estado i e processada pelo centro j no cenário ξ .
$X'_{jk}(\xi)$	Quant. de material transportada do centro j para a planta k no cenário ξ .
$Z_{ijv}(\xi)$	Número de viagens do veículo v do ponto i ao centro de coleta j no cenário ξ .
$Z'_{jkv}(\xi)$	Número de viagens do veículo v entre o centro j e a planta de fundição k no cenário ξ .
$U_i(\xi)$	Quantidade de material não coletada do estado i no cenário ξ .
$O_j(\xi)$	Capacidade subcontratada pelo centro j no cenário ξ .
$V_{jl}(\xi)$	Indica se a capacidade de um centro de coleta aberto no local j é expandida para o nível l .
$W'_{jv}(\xi)$	Indica se o veículo v é alocado de forma emergencial ao centro de coleta j .

A função objetivo visa minimizar o custo total esperado.

$$\begin{aligned} \min \left(\sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{l \in \mathcal{L}} f_{jl} Y_{jl} + g \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{v \in \mathcal{V}} W_{jv} + \sum_{\xi \in \Xi} \pi(\xi) \left(\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{v \in \mathcal{V}} c_{ij} Z_{ijv}(\xi) \right. \right. \\ \left. \left. + \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{v \in \mathcal{V}} c'_{jk} Z'_{jkv}(\xi) + \sum_{j \in \mathcal{J}} o_j O_j(\xi) + \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{l \in \mathcal{L}'} \phi f_{jl} V_{jl}(\xi) + \sum_{i \in \mathcal{I}} h_i U_i(\xi) \right) \right) \end{aligned} \quad (1)$$

Sujeito às seguintes restrições.

$$\sum_{j \in \mathcal{J}} X_{ij}(\xi) + U_i(\xi) = r_i(\xi) \quad \forall i \in \mathcal{I}, \xi \in \Xi \quad (2)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} X_{ij}(\xi) \leq q_l \left(Y_{jl} - \sum_{l'=l+1}^L V_{jl}(\xi) \right) + \sum_{l'=l+1}^L q_l V_{jl}(\xi) + O_j(\xi) \quad \forall j \in \mathcal{J}, l \in \mathcal{L}, \xi \in \Xi \quad (3)$$

$$\sum_{l \in \mathcal{L}} Y_{jl} \leq 1 \quad \forall j \in \mathcal{J} \quad (4)$$

$$\sum_{l \in \mathcal{L}} V_{jl}(\xi) \leq 1 \quad \forall j \in \mathcal{J}, \xi \in \Xi \quad (5)$$

$$\sum_{l \in \mathcal{L}} V_{jl}(\xi) \leq (1 - Y_{jl}) \quad \forall j \in \mathcal{J}, l \in \mathcal{L}, \xi \in \Xi \quad (6)$$

$$\sum_{l'=l+1}^L V_{jl}(\xi) \leq \sum_{l \in \mathcal{L}} Y_{jl} \quad \forall j \in \mathcal{J}, \xi \in \Xi \quad (7)$$

$$O_j(\xi) \leq L_{capsub} \sum_{l \in \mathcal{L}} q_l Y_{jl} \quad \forall j \in \mathcal{J}, \xi \in \Xi \quad (8)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} X_{ij}(\xi) = \sum_{k \in \mathcal{K}} X'_{jk}(\xi) \quad \forall j \in \mathcal{J}, \xi \in \Xi \quad (9)$$

$$\sum_{v \in \mathcal{V}} W_{jv} \leq |V| \sum_{l \in \mathcal{L}} Y_{jl} \quad \forall j \in \mathcal{J} \quad (10)$$

$$\sum_{v \in \mathcal{V}} W'_{jv}(\xi) \leq |V| \sum_{l \in \mathcal{L}} V_{jl}(\xi) \quad \forall j \in \mathcal{J}, \xi \in \Xi \quad (11)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} d_{ij} Z_{ijv}(\xi) + \sum_{k \in \mathcal{K}} d'_{jk} Z'_{jkv}(\xi) \leq D_{max}(W_{jv} + W'_{jv}(\xi)) \quad \forall j \in \mathcal{J}, v \in \mathcal{V}, \xi \in \Xi \quad (12)$$

$$X_{ij}(\xi) \leq C_{sucata} Z_{ijv}(\xi) \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, v \in \mathcal{V}, \xi \in \Xi \quad (13)$$

$$X'_{jk}(\xi) \leq C_{fardo} Z'_{jkv}(\xi) \quad \forall j \in \mathcal{J}, k \in \mathcal{K}, v \in \mathcal{V}, \xi \in \Xi \quad (14)$$

$$W_{jv} \leq W_{j,v-1} \quad \forall j \in \mathcal{J}, v \in \mathcal{V}/\{1\}, \xi \in \Xi \quad (15)$$

$$W'_{jv}(\xi) \leq W'_{j,v-1}(\xi) \quad \forall j \in \mathcal{J}, v \in \mathcal{V}/\{1\}, \xi \in \Xi \quad (16)$$

$$Y_{jl}, W_{jv} \in \mathbb{B} \quad \forall j \in \mathcal{J}, l \in \mathcal{L}, v \in \mathcal{V} \quad (17)$$

$$V_{jl}(\xi), W'_{jv}(\xi) \in \mathbb{B} \quad \forall j \in \mathcal{J}, v \in \mathcal{V}, j \in \mathcal{J}, \xi \in \Xi \quad (18)$$

$$Z_{ijv}(\xi), Z'_{jkv}(\xi) \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, k \in \mathcal{K}, v \in \mathcal{V}, \xi \in \Xi \quad (19)$$

$$X_{ij}(\xi), X'_{jk}(\xi), U_i(\xi), O_j(\xi) \in \mathbb{R}^+ \quad \forall j \in \mathcal{J}, k \in \mathcal{K}, \xi \in \Xi \quad (20)$$

A função objetivo (1) consiste em minimizar o custo esperado total, composto pelos custos fixos das decisões de primeiro estágio de abertura de centros de coleta e alocação de veículos aos mesmos, bem como custos das decisões de segundo estágio: custos de transporte de material, custo de subcontratação de capacidade, custo de expansão da capacidade nominal dos centros de coleta, e finalmente custo de penalidade por não coletar e processar o material gerado.

As restrições (2) garantem a conservação de fluxo nos pontos de geração para cada cenário. Se a rede não tem capacidade para processar todo o material gerado, parte deste material pode não ser coletado, sob penalidade na função objetivo. As restrições (3) condicionam o envio de materiais à abertura de determinado centro de coleta e ao limite de capacidade definido pelo nível definido no primeiro estágio. Caso a capacidade seja insuficiente, o centro pode ser expandido no segundo

estágio e também pode-se subcontratar capacidade para prensagem do material. As restrições (4) definem que cada centro de coleta pode ser aberto com apenas um nível de capacidade no primeiro estágio, enquanto que as restrições (5) definem que, na expansão do centro de coleta, só um nível de capacidade pode ser escolhido. As restrições (6) e (7) definem que só podem ser expandidos no segundo estágio centros que foram instalados no primeiro estágio, e a capacidade do centro só pode aumentar no segundo estágio, ou seja, os centros não podem diminuir de capacidade. As restrições (8) impõem um limite para a capacidade que pode ser subcontratada em função da capacidade instalada do centro. As restrições (9) consistem no balanço de fluxo nos centros de coleta. As restrições (10) condicionam a alocação de veículos à abertura dos centros de coleta no primeiro estágio, enquanto que as restrições (11) definem a alocação emergencial de veículos aos centros de coleta. As restrições (12) limitam a distância máxima percorrida pelos veículos alocados no primeiro e segundo estágio. As restrições (13) e (14) relacionam a quantidade transportada ao número de viagens realizada por veículo em cada cenário. As restrições (15) e (16) permitem a eliminação de soluções com simetria. Finalmente, as restrições (17) à (20) definem o domínio das variáveis de decisão.

5. Experimentos computacionais

Os experimentos para a validação do modelo proposto e avaliação dos resultados foram realizados utilizando a linguagem GAMS (Generic Algebraic Modeling System) versão 24.1.3, com o solver CPLEX versão 12.5, em um processador Intel Core i7, 1.8 GHz, 16 GB de memória RAM e sistema operacional Windows 7. Todos os testes foram executados com um limite de tempo de 7200 segundos ou até atingir 0,1% de *gap*.

5.1. Descrição dos dados e geração de cenários

Os dados usados neste trabalho estão baseados em dados da literatura [Jalal et al., 2017]. Os conjuntos $\mathcal{I}$ e $\mathcal{J}$ correspondem às capitais de 11 estados brasileiros. Para o conjunto $\mathcal{K}$, foram consideradas as plantas de fundição das duas maiores empresas do setor localizadas no Estado de São Paulo. Para o conjunto $\mathcal{V}$, admitiu-se que cada centro de coleta pode adquirir de 1 a 20 veículos. Para o conjunto $\mathcal{L}$ foram considerados diferentes níveis de capacidade, a saber 5.000, 10.000, 20.000, 50.000 e 100.000 toneladas anuais. Os custos de transporte em cada viagem consideram as distâncias entre instalações (ida e volta) e inclui despesas com combustível, pedágios, manutenção, pneus, entre outros custos variáveis. O volume de material a ser coletado em cada estado brasileiro (r_i) foi calculado usando o percentual de participação de cada estado brasileiro na geração de resíduos sólidos de acordo com o relatório Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil [Jalal et al., 2017].

Existem diversas formas de gerar cenários: métodos baseados nas propriedades estatísticas, métodos de simulação por amostragem, modelos econométricos e de séries temporais, entre outros. Neste trabalho, foi utilizada uma abordagem por cenários. Aproximou-se a coleta e geração de material a quatro possíveis realizações equiprováveis, tendo como referência o correspondente valor nominal ou médio, calculado com base em dados históricos de coleta de material das duas maiores empresas de reciclagem de alumínio do Brasil. Assim, definiu-se como cenário 1 a coleta do 60% das latas de alumínio produzidas e consumidas no Brasil; o cenário 2 representa a coleta do 70% do material, que atualmente é processado pelas duas maiores empresas recicladoras e produtoras de lingotes de alumínio; o cenário 3 representa a coleta do 98,4% do material, que atualmente é

realmente coletada entre todos os atores do setor; finalmente, o cenário 4, a coleta de todas as latas de alumínio produzidas e importadas no Brasil (115,4%).

5.2. Resultados do cenário mais provável

A Figura 1 apresenta os resultados do modelo considerando o cenário 2 de coleta de resíduo em relação à localização e dimensionamento da capacidade dos centros, sendo que 4 centros de coleta foram abertos com capacidade de processamento de 5 mil toneladas/ano; 3 com capacidade de 10 mil toneladas/ano; 3 com capacidade de 20 mil toneladas/ano; e só 1 com capacidade de 50 mil toneladas/ano, localizado na cidade de São Paulo, o estado de São Paulo é responsável pela geração do 28% de resíduos de latas de alumínio do Brasil.

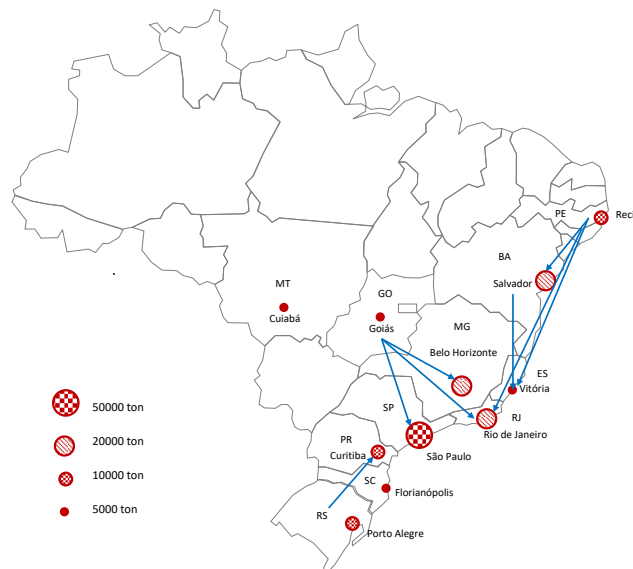


Figura 1: Resultado para localização e capacidade dos centros de coleta.

A taxa média de utilização da capacidade da rede é de 76%, sendo que as cidades de São Paulo, Rio de Janeiro e Goiânia têm taxa de utilização de mais de 90%. A taxa de utilização mais baixa é de Curitiba com 53%. Apesar de em cada ponto de geração ter sido aberto um centro de coleta, existe fluxo entre os diferentes estados, como mostra o mapa e a Tabela 1. Os fluxos saem de alguns estados (com centros de coleta de baixa capacidade) para centros de coleta mais próximos da planta de fundição.

Para transportar todo o resíduo de latas de alumínio é necessária uma frota de 23 veículos nos 11 centros de coleta. A taxa de utilização dos veículos é 97% no primeiro trecho e de 100%, sendo que um mesmo veículo tanto pode ser utilizado para coleta nos pontos de geração quanto para envio do material prensado para as plantas de fundição. A capacidade de utilização dos veículos com respeito à distância que podem percorrer é de 95%.

A rede proposta pelo modelo apresenta um custo logístico de R\$22,2 milhões para coletar aproximadamente 135 mil toneladas/ano, indicando a abertura de centros de coleta nos 11 locais considerados. Os custos de abertura dos centros correspondem apenas a 7% do total, enquanto os

Tabela 1: Fluxo de material não prensado entre estados e centros de coleta

Estado	Local do centro de coleta	Material (Ton)
Bahia	Vitoria	11
Goiás	Belo Horizonte	736
	Rio Janeiro	128
	São Paulo	4
São Paulo	Rio Janeiro	240
	Curitiba	553
Rio Grande do Sul	Curitiba	13
Pernambuco	Salvador	432
	Vitoria	41
	Rio Janeiro	176

custos fixos de transporte associados ao dimensionamento de frota correspondem a 24%. Os custos de transporte de material não prensado correspondem a 21% do total, já os custos de transporte de material prensado correspondem a 48% dos custos totais, uma vez que os centros de coleta estão descentralizados e as plantas de fundição concentram-se em um único local. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos para os custos anuais da rede de coleta proposta pelo modelo determinístico.

Tabela 2: Custos totais resultantes do modelo determinístico.

Termos da Função Objetivo	Valor	Participação (%)
Custos de Instalação de Centros de Coleta	1.498.811	7%
Custos Fixos de Veículos	5.384.304	24%
Custos de Transporte Material Não Prensado	4.629.624	21%
Custos de Transporte Material Prensado	10.596.774	48%
Custo Total	22.109.514	100%

5.3. Resultados do modelo estocástico

A Tabela 3 apresenta os resultados do modelo estocástico em relação à localização e dimensionamento da capacidade dos centros de coleta. A primeira coluna apresenta os locais candidatos considerados. A segunda coluna apresenta a localização e capacidade instalada (Cap Inst) dos centros de coleta em ausência de incertezas. Enquanto que a terceira coluna apresenta a localização e dimensionamento da capacidade (Cap Inst) proposto pelo modelo estocástico no primeiro estágio. As colunas subsequentes apresentam as decisões de subcontratação (Sub) e expansão (Exp) de capacidade para os diferentes cenários de geração de material nos diferentes pontos. A última linha apresenta a capacidade total da rede para a solução determinística e a solução estocástica.

A média de utilização da capacidade da rede é dada por 66%, 80%, 89% e 96% para cada cenário, respectivamente. É alocada uma frota de 47 veículos no primeiro estágio e 28 veículos no segundo estágio, com taxa de utilização dos veículos perto de 100%.

A rede proposta pelo modelo estocástico resulta em uma solução ótima com um custo de R\$27,5 milhões para coletar uma quantidade de aproximadamente 107 mil e 220 toneladas/ano. A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos para os custos anuais da rede de coleta proposta pelo modelo estocástico e suas variações com respeito aos resultados do modelo determinístico.

5.4. Valor Esperado da Informação Perfeita e Valor da Solução Estocástica

A pertinência do uso modelos de programação estocástica de dois estágios com recurso (RP) em detrimento de opções computacionalmente menos complexas pode ser avaliada através de

Tabela 3: Localização e dimensionamento da capacidade dos centros de coleta

Solução Determinística		Solução Estocástica							
		Estágio 1	Estágio 2						
			Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3		Cenário 4		
Locais	Cap Inst	Cap Inst	Sub	Sub	Exp	Sub	Exp	Sub	
São Paulo	50.000	100.000	729	317	20.000	3.187	20.000	301	
Salvador	20.000	10.000							
Belo Horizonte	20.000	20.000							
Rio Janeiro	20.000	20.000							
Curitiba	10.000	10.000		725	10.000	1.127	10.000	2.510	
Porto Alegre	10.000	5.000				492		2.056	
Recife	10.000	5.000						2.060	
Goiânia	5.000	5.000						790	
Cuiabá	5.000	5.000							
Vitoria	5.000	5.000							
Floripa	5.000	5.000							
Cap Total	160.000	190.000	190.729	191.042	227.146		244.476		

Tabela 4: Custos totais resultantes do modelo estocástico

Custos da Função objetivo	Solução Determinística	Solução Estocástica	Variação
Instalação de Centros de Coleta	1.498.811	1.806.386	21%
Adquisição de Veículos	5.384.304	5.778.278	7%
Transporte Material Não Prensado	4.629.624	5.592.969	21%
Transporte Material Prensado	10.596.774	12.905.939	22%
Subcontratação capacidade (2º estágio)		510.864	
Abertura de novos centros (2º estágio)		488.536	
Adquisição de veículos (2º estágio)		1.674.387	
Custo Total	22.109.514	28.757.359	30%

duas medidas de desempenho: o Valor Esperado de Informação Perfeita, $EVPI$ (*Expected Value of Perfect Information*) e o Valor da Solução Estocástica, VSS (*Value of the Stochastic Solution*). O $EVPI$ mede o ganho esperado de informações perfeitas, e o VSS representa o custo esperado incorrido em ignorar a aleatoriedade dos parâmetros estocásticos ao tomar uma decisão.

O $EVPI$ mostra quanto seria possível poupar na presença de informação perfeita, indicando se seria importante considerar a aleatoriedade do problema. Isto é, valores baixos de $EVPI$ indicam que o impacto de considerar a aleatoriedade não é tão importante. $EVPI$ é a diferença entre o valor da solução do problema RP e o valor da solução do problema WS : $EVPI = RP - WS$, em que RP é o valor da solução do problema de programação estocástica de dois estágios, $WS = \sum \xi \pi(\xi) WS(\xi)$ é o valor da solução “espere e veja” e $WS(\xi)$ expressa o valor da solução do problema determinístico para o cenário ξ . O problema WS consiste na resolução dos problemas sob informação perfeita, obtido como a ponderação segundo a valor de probabilidade da solução de cada problema determinístico associado a cada um dos cenários. O VSS é a diferença entre o valor da solução do problema EEV e o valor da solução do problema RP , $VSS = EEV - RP$. O problema EEV é o próprio problema estocástico RP , em que as variáveis de primeiro estágio foram previamente fixadas de acordo com a solução do problema EV ou a solução do problema determinístico associado a um cenário de referência, neste trabalho é como pior caso. A Tabela 5 mostra o custo das soluções RP , WS e EEV . Percebe-se que o valor da solução do problema RP é menor do que o valor das soluções dos

cenários 3 e 4, e menor que o valor da função objetivo do *EVV*.

Tabela 5: Função objetivo, gap e tempo computacional dos problemas de *WS* e *RP*

Custos da Função Objetivo	WS(1)	WS(2)	WS(3)	WS(4)	RP	EVV
Instalação de Centros de Coleta	1.410.591	1.498.811	2.829.906	2.965.162	1.806.386	1.498.811
Adquisição de Veículos	4.202.384	5.384.304	7.485.496	8.667.416	5.778.278	5.384.304
Transporte Material Não Prensado	3.584.639	4.629.624	6.519.144	7.967.539	5.592.969	5.647.261
Transporte Material Prensado	8.499.498	10.596.774	15.129.357	17.315.845	12.905.939	12.976.288
Subcontratação de capacidade	-	-	-	-	510.864	139.379
Abrir novos centros	-	-	-	-	488.536	2.163.725
Não coleta de material	-	-	-	-	-	531
Alocação emergencial de veículos	-	-	-	-	1.674.387	2.166.854
Custo Total	17.697.111	22.109.514	31.963.903	36.915.962	28.757.359	29.977.152
GAP	0,0%	0,1%	0,1%	0,1%	0,5%	1,8%
Tempo de execução (seg.)	1.799	4.476	1.322	2.712	7.200	7.200
Tempo ao encontrar a solução (seg.)	32	4.113	103	1.938	7.015	3.973

O *EVPI* resulta em R\$ 1.585.736, ou seja, 6% com respeito ao valor do problema *RP*, mostrando que aparentemente a consideração de incertezas é pouco relevante para este problema se consideramos o valor relativo. No entanto, a diferença em valor absoluto é significativa. O valor do *VSS*, calculado em função do cenário 2 de demanda média é de R\$1.219.841, só 4% em termos relativos. Porém, o *VSS* também foi calculado para os cenários de demanda mais alta (cenário 4), reportando um *VSS* de R\$23.222.766, 45% em termos relativos. Estes valores do *EVPI* e *VSS* indicam não apenas que a aleatoriedade desempenha um papel importante no modelo, mas também que aproximações considerando cenários de pior caso resultam em altos custos.

6. Considerações finais

Este trabalho aborda o planejamento da rede de logística reversa de latas de alumínio para bebidas no Brasil, considerando as incertezas inerentes à geração de resíduos. É proposto um modelo de programação estocástica de dois estágios, que considera as decisões de localização de centros de coleta, dimensionamento e alocação da frota de veículos para os centros abertos e o fluxo de material entre as instalações da rede. O objetivo é reduzir o custo logístico total esperado. Foram feitos testes com dados da reciclagem de latas de alumínio do Brasil reportados na literatura. Uma comparação feita com a abordagem hierárquica usada na prática das empresas mostra que a integração pode fornecer ganhos em termos de custo. Os resultados também sugerem que o modelo é capaz de fornecer soluções de primeiro estágio que seriam viáveis para a maioria dos valores de realização da variável aleatória. Além disso, os resultados dos testes mostram que para este problema, em particular, a consideração das incertezas permite reduzir o custo total esperado, quando comparado com um cenário de valor esperado.

Pesquisas futuras incluem a proposição de métodos mais sofisticados para a geração de cenários. O uso de outras técnicas para considerar as incertezas no problema, como otimização robusta. Além disso, experimentos adicionais com o modelo proposto poderiam ser desenvolvidos com instâncias de maior porte. Como o modelo poderia ser intratável para instâncias de grande escala, outro tópico de pesquisas futuras pode incluir o uso de métodos de solução baseados em decomposição para resolver o problema. Recomenda-se a incorporação de outros recursos ao modelo estocástico para responder às incertezas.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP (processo nº2018/09563-1) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES.

Referências

- ABRALATAS (2018). Reciclagem da latinha injetou R\$ 1,2 bilhão na economia. <http://www.abralatas.org.br/reciclagem-da-latinha-injetou-r-12-bilhao-na-economia/>. Acessado: 2020-06-09.
- ABRALATAS (2019). Reciclagem: economia equivale a um ano de energia para 7 milhões de brasileiros. <http://www.abralatas.org.br/reciclagem-economia-equivale-a-um-ano-de-energia-para-7-milhoes-de-brasileiros/>. Acessado: 2020-06-09.
- Agrawal, S., Singh, R. K., e Murtaza, Q. (2016). Outsourcing decisions in reverse logistics: Sustainable balanced scorecard and graph theoretic approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 108:41–53. ISSN 18790658.
- Albareda-Sambola, M., Fernández, E., e Laporte, G. (2009). The capacity and distance constrained plant location problem. *Computers & Operations Research*, 36(2):597–611. ISSN 03050548.
- Ali, S. S., Paksoy, T., Torğul, B., e Kaur, R. (2020). Reverse logistics optimization of an industrial air conditioner manufacturing company for designing sustainable supply chain: a fuzzy hybrid multi-criteria decision-making approach. *Wireless Networks*, 6. ISSN 1022-0038.
- Alshamsi, A. e Diabat, A. (2015). A reverse logistics network design. *Journal of Manufacturing Systems*, 37:589–598. ISSN 02786125.
- Azizi, V., Hu, G., e Mokari, M. (2020). A two-stage stochastic programming model for multi-period reverse logistics network design with lot-sizing. *Computers and Industrial Engineering*, (September 2019):106397. ISSN 03608352.
- Fattahi, M. e Govindan, K. (2017). Integrated forward/reverse logistics network design under uncertainty with pricing for collection of used products. *Annals of Operations Research*, 253(1):193–225. ISSN 15729338.
- Govindan, K., Fattahi, M., e Keyvanshokoh, E. (2017). Supply chain network design under uncertainty: A comprehensive review and future research directions. *European Journal of Operational Research*, 263(1):108–141. ISSN 03772217.
- Govindan, K., Soleimani, H., e Kannan, D. (2015). Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European Journal of Operational Research*, 240(3):603–626. ISSN 03772217.
- Jalal, A. M., Henrique, L. M., e Toso, E. A. V. (2017). Modelo para planejamento da rede reversa de latas de alumínio para bebidas. *Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento*, 9(3):144–161. ISSN 1984-3534.
- Niknejad, A. e Petrovic, D. (2014). Optimisation of integrated reverse logistics networks with different product recovery routes. ISSN 03772217.
- Pishvaei, M. S., Kianfar, K., e Karimi, B. (2010). Reverse logistics network design using simulated annealing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 47(1-4):269–281. ISSN 02683768.
- Wang, Z., Huang, L., e He, C. X. (2019). A multi-objective and multi-period optimization model for urban healthcare waste's reverse logistics network design. *Journal of Combinatorial Optimization*. ISSN 1382-6905.
- Xiao, Z., Sun, J., Shu, W., e Wang, T. (2019). Location-allocation problem of reverse logistics for end-of-life vehicles based on the measurement of carbon emissions. *Computers & Industrial Engineering*, 127(December 2018):169–181. ISSN 03608352.
- Zaballos, L. J., Méndez, C. A., e Barbosa-Povoa, A. P. (2018). Integrating decisions of product and closed-loop supply chain design under uncertain return flows. *Computers and Chemical Engineering*, 112:211–238. ISSN 00981354.