

## **GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS DE SONDAS DE PERFURAÇÃO *OFFSHORE*: UMA ABORDAGEM VIA PROGRAMAÇÃO INTEIRA MISTA**

**Cristiano Oliveira de Souza, M.Sc.**

Programa de Engenharia de Produção – COPPE/UFRJ  
*desouza.cristiano@gmail.com*

**Laura Bahiense, D.Sc.**

Programa de Engenharia de Produção – COPPE/UFRJ  
*laura.bahiense@gmail.com*

**Virgílio José Martins Ferreira Filho, D.Sc.**

Programa de Engenharia de Produção – COPPE/UFRJ  
*virgilio@ufrj.br*

**Paulo Roberto dos Santos Carvalho, M.Sc.**

Doutorando em Engenharia de Produção – COPPE/UFRJ  
*carvapr@hotmail.com*

### **Resumo**

O gerenciamento de resíduos das sondas de perfuração *offshore* tem se tornado um fator importante nas operações de exploração e produção de hidrocarbonetos, visando a obtenção de uma destinação otimizada para os resíduos gerados, evitando passivos ambientais, gerando lucro e benefícios à imagem da empresa geradora, e atendendo aos princípios da sustentabilidade ambiental. Este problema se insere na área de Logística Verde, a parte da Logística que se preocupa com os aspectos e impactos ambientais causados pela atividade logística, visando ao desenvolvimento sustentável. Neste trabalho apresenta-se um modelo de programação inteira mista, que é validado sobre instâncias montadas com dados reais, e implementado na linguagem MOSEL, utilizando como otimizador o XPRESS-MP.

**Palavras-chave:** Gerenciamento de Resíduos, Logística Verde, Programação Inteira Mista

### **Abstract**

Waste management of offshore drilling rigs has become an important factor in the operations of exploration and production of hydrocarbons in order to obtain an optimal destination for the waste generated by avoiding environmental liabilities, generating income and benefits to the generator company's image, considering the principles of environmental sustainability. This problem belongs to the area of Green Logistics, the Logistics part concerned with the environmental aspects and impacts caused by logistics activities, aiming at sustainable development. This work presents a mixed integer programming model, which is validated on instances employing real data and implemented in the MOSEL language, using the optimizer XPRESS-MP.

**Keywords:** Waste Management, Green Logistics, Mixed Integer Programming

## 1. Introdução

O gerenciamento de resíduos tem se tornado uma ferramenta importante no fluxo de materiais, desde o gerador até a destinação final. É importante notar que simples postos de coleta seletiva, localizados em condomínios, clubes ou em pequenas comunidades, geram um balanço positivo em relação aos custos de manuseio, segregação e transporte.

Na indústria, a gestão de resíduos é cada vez mais relevante, devido a políticas ambientais, regulamentadas por órgãos governamentais que autorizam e fiscalizam as operações. As atividades relativas à gestão de resíduos podem gerar custos inesperados de diversas formas para as atividades industriais, através de multas, interrupção das operações ou cassações de licenciamentos ambientais.

Além disso, a imagem da empresa perante o consumidor pode ficar comprometida através de passivos ambientais, seja por destinação final inadequada ou derramamentos provenientes de uma má gestão de resíduos. O manejo correto do resíduo se torna imprescindível na cadeia produtiva de pós-consumo.

Nesse contexto das atividades de exploração e produção de hidrocarbonetos, os resíduos industriais gerados por sondas de perfuração *offshore* possuem grande relevância, pois podem gerar danos graves ao meio ambiente, quando mal gerenciados, estando diretamente ligadas ao seu gerador, oferecendo risco à imagem da empresa. Segundo SCHAFFEL (2002), contemplar a variável ambiental é, cada vez mais, uma questão decisiva para a sociedade e para a própria sobrevivência das grandes multinacionais do petróleo, que competem e se fundem na busca sem fronteiras por novas reservas de hidrocarbonetos.

Um bom gerenciamento dos resíduos *offshore* contribui não só para a mitigação de impactos ambientais negativos, como também para uma melhor distribuição dos resíduos aos seus respectivos destinos finais, gerando com isso benefícios econômicos para a empresa.

A abordagem estudada neste trabalho está alinhada com os conceitos da Logística Verde, a qual DONATO (2008) define como a parte da Logística que se preocupa com os aspectos e impactos ambientais causados pela atividade logística, que pode trazer ganhos ambientais, pois tem como finalidade o Desenvolvimento Sustentável.

O foco deste estudo está na movimentação e destinação dos resíduos das atividades de perfuração *offshore*. Para isso, é realizada uma abordagem dos procedimentos do gerenciamento dos resíduos das atividades de perfuração *offshore* e a implementação de um modelo de programação inteira mista que forneça uma solução ótima, minimizando os custos de destinação e transporte.

## 2. Alguns estudos aplicados à logística de movimentação e planejamento no tratamento de resíduos

Uma revisão de modelos e algoritmos de PO aplicados a problemas de logística reversa pode ser encontrada em COSTA e GALVÃO (2008). Alguns artigos que tratam de problemas específicos são revisados a seguir.

SCHULTMANN *et al.* (2006) realizaram um estudo com aspectos de Logística Reversa, abordando o planejamento do roteamento de veículos visando cumprir uma nova demanda que é composta de diferentes negócios e campos de pesquisa. Tais experiências com o retorno de um específico tipo de produto são poucas. O estudo foi realizado com o foco na reciclagem de veículos no final de vida, tradução de *end-of-life vehicle* (ELV) na Alemanha. As principais motivações para as empresas integrarem estes produtos na cadeia de suprimentos são a motivação financeira e motivação legal.

COSTA (2009) analisou o gerenciamento de fluxos de retorno de materiais, no qual a Logística Reversa e o planejamento da distribuição reversa envolvem o transporte físico dos produtos usados a partir do usuário final até as facilidades de coleta e recolhimento. Utilizou-se um modelo proposto por JAYARAMAN *et al.* (2003) que propôs uma modelagem de programação matemática inteira mista para um problema de localização capacitado em dois níveis: facilidades de coleta no primeiro nível e de recolhimento ou reciclagem no segundo nível. COSTA (2009) propôs alternativas para obtenção de limites inferiores para o problema por meio do uso da relaxação Lagrangeana e para a obtenção de soluções aproximadas, foi proposto um algoritmo genético especializado, que fez uso das características estruturais do modelo para resolver o problema. Foram realizados testes computacionais em 120 instâncias geradas. Os resultados foram comparados, quando possível, com as soluções exatas

encontradas por um *solver* e, nesses casos, o GAP médio das soluções foi igual a 1,8% e GAP dos limites inferiores igual a 5,5% em relação ao ótimo.

HU, SHEU e HUANG (2002) apresentaram um modelo que minimiza os custos no tratamento de resíduos perigosos. O problema investigado trata a Logística Reversa de resíduos perigosos, que pode ser aplicado em indústrias de alta tecnologia. A abordagem da Logística Reversa se faz presente no planejamento, gerenciamento e controle do fluxo dos resíduos para reuso ou disposição final. As configurações do sistema de Logística Reversa para este problema são dados, tais como as localizações e as respectivas capacidades das unidades envolvidas. Os resultados obtidos nesta aplicação do modelo para os vários casos sugeridos resultaram na redução em mais de 49% dos custos totais.

SPENGLER *et al.* (1997) desenvolveram um modelo matemático para o problema de planejamento do desmonte e reciclagem de produtos no final de vida útil. O artigo trata do desenvolvimento do modelo de programação matemática inteira mista, associados a problemas de planejamento e reciclagem e suas aplicações a situações reais, que foi abordado em vários projetos e pesquisas no setor industrial. O modelo foi aplicado na operação de desmonte e reciclagem de resíduos de construção entre a França e Alemanha na região conhecida como *Upper Rhine Valley*.

FLEISCHMANN *et al.* (1997) Realizaram uma pesquisa, mostrando trabalhos em logística reversa, envolvendo as áreas de planejamento da distribuição, controle do estoque e planejamento da produção. Em cada uma, foram discutidas as implicações dos esforços do reuso, revisão dos modelos matemáticos propostos na literatura e assinaladas as áreas que necessitam de pesquisas futuras.

### 3. Descrição do Problema

O problema do gerenciamento dos resíduos gerados por sondas de perfuração *offshore* consiste em se determinar a melhor destinação final para cada tipo de resíduo, no fluxo de distribuição reverso, de modo a se minimizar os custos de transporte e destinação final.

Os resíduos de perfuração são gerados e estocados na plataforma, e posteriormente transportados em navios de apoio marítimo. Em seguida, são estocados temporariamente no terminal de apoio marítimo. As empresas transportadoras de resíduos realizam a movimentação destes materiais para as empresas de destinação final.

O modelo proposto neste trabalho orienta a tomada de decisão nesta última parte do processo, ou seja, nas escolhas que concernem a quais empresas receberão estes resíduos, que quantidade de cada tipo de resíduo será enviada para cada tipo de destinação final, a respectiva quantidade de veículos necessários para o transporte dos resíduos, e, finalmente, o tipo de veículo que irá realizar a movimentação dos resíduos.

O esquema da Figura 1 mostra a movimentação dos resíduos sólidos e líquidos, desde a geração até a destinação final. O escopo deste trabalho abrange as etapas dos caminhões de transporte de resíduos e o destino final. A capacidade dos destinos finais determina parâmetros que não podem ser ultrapassados.

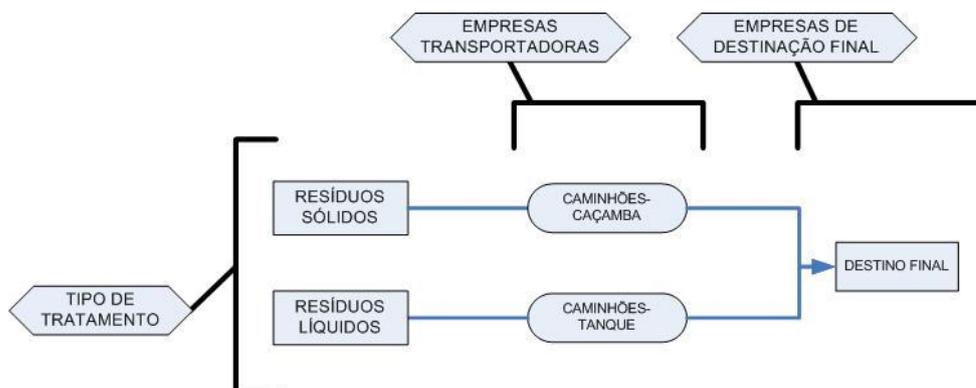


Figura 1 – Movimentação dos resíduos sólidos e líquidos  
 Fonte: elaboração dos autores

## PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

O ciclo operacional da distribuição dos resíduos de sondas de perfuração *offshore*, ilustrado pela Figura 2, obedece à seguinte sequência:

- Geração dos resíduos na sonda de perfuração *offshore*
- Transporte dos resíduos por barcos de apoio
- Armazenamento temporário no terminal de apoio marítimo
- Transporte dos resíduos do terminal de apoio marítimo aos destinos finais (foco do estudo)
- Destinação final (foco do estudo)



Figura 2 – Ciclo operacional da distribuição dos resíduos de sondas de perfuração *offshore*, Fonte: elaboração dos autores

Os resíduos são divididos em conjuntos, de acordo com os diferentes tipos de tratamento. Esta divisão considera a classificação dos resíduos segundo a norma ABNT NBR 10.004:2004, que padroniza, a nível nacional, a classificação dos resíduos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, indicando quais resíduos devem ter manuseio e destinação mais rigidamente controlados. A classificação é relevante em várias etapas no estudo, associando o resíduo ao respectivo destino final.

De acordo com a norma ABNT NBR 10.004:2004, a Tabela 1 exibe a classificação dos resíduos.

Tabela 1 – Classificação dos resíduos (Fonte: ABNT NBR 10.004:2004)

Classificação dos resíduos	
Classe I	Classe II
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perigosos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não perigosos                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Classe II A – Não inertes</li> <li>○ Classe II B – Inertes</li> </ul> </li> </ul>

No presente estudo, os resíduos provenientes das operações de perfuração *offshore* são classificados segundo a Tabela 2.

## PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

Tabela 2 – Classificação dos resíduos da operação de Perfuração (Fonte: ABNT NBR 10.004:2004)

<b>Classificação segundo a norma ABNT NBR 10.004:2004</b>	<b>Tipo de Resíduo</b>
Classe I	Bombonas Contaminadas
	Lama de Perfuração
	Cimento
	Resíduos Contaminados com óleo
	Tambores contaminados
	Lâmpadas Fluorescentes
	Resíduos Infecto-contagiosos
	Óleo de Cozinha
	Resíduos oleosos (óleo usado e água oleosa)
Classe II A	Aerosol
	Pilha e bateria
	Resíduos não passíveis de reciclagem
	Resíduo alimentar desembarcado
	Lodo residual de esgoto tratado
	Tambores não contaminados
Classe II B	Cartucho de impressão
	Madeira não contaminada
	Papel e Papelão
	Vidro não contaminado
	Metal não contaminado
	Lata de alumínio
Plástico não contaminado	

A Coordenação Geral de Petróleo e Gás (CGPEG) é um órgão do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) que tem como uma de suas responsabilidades a padronização dos procedimentos de análise dos estudos e relatórios ambientais, necessários para a concessão das licenças para pesquisa e exploração de hidrocarbonetos. Segundo a Nota Técnica CGPEG/DILIC/IBAMA nº 03/08, 2008, as opções de destino final são descritas na Tabela 3.

Tabela 3 – Tipos de Destinação Final, (Fonte: Nota Técnica CGPEG/DILIC/IBAMA nº 03/08, 2008)

<b>Tipos de Destinação Final</b>	
Devolução ao fabricante	Descontaminação
Reuso	Aterro sanitário
Reciclagem	Aterro industrial
Recondicionamento	Incineração em terra
Refino	Beneficiamento
Coprocessamento	Blendagem

#### 4. Modelagem do Problema

Propõe-se, neste trabalho, uma modelagem matemática de Programação Inteira Mista para o problema, visto que há dois fatores importantes na sua decisão: a quantidade de veículos para realizar o transporte do resíduo estocado temporariamente e a quantidade de resíduos distribuídos para cada destino final, a qual define implicitamente a designação de um destino final para cada resíduo. Na decisão da quantidade de veículos, a variável de decisão é inteira, que determina a menor quantidade de veículos (caminhões-caçamba, caminhões-tanque ou furgão) para a movimentação dos resíduos. Na decisão da

quantidade de resíduos distribuídos para cada destino final, a variável é real, já que os fluxos podem ser fracionados.

### 4.1 Premissas do modelo

Visando atingir os objetivos do estudo, a elaboração do modelo deve considerar as seguintes premissas básicas:

- Todo resíduo armazenado temporariamente será transportado por veículo do tipo caminhão-caçamba, caminhão-tanque ou furgão;
- Os resíduos sólidos serão transportados por caminhão-caçamba;
- Os resíduos líquidos serão transportados por caminhão-tanque;
- Os resíduos infecto-contagiosos serão transportados por veículos específicos para este fim (furgões);
- Diferentes tipos de resíduos sólidos podem ser misturados em uma mesma caçamba;
- Os resíduos líquidos não podem ser misturados em um mesmo tanque;
- Os resíduos são separados pelas classes I, IIA e IIB (ABNT NBR 10.004:2004). Isso determina o tipo de destinação final para cada tipo de resíduo;
- Os limites dos destinos finais não podem ser ultrapassados;
- Alguns resíduos comportam tipos distintos de destino final.

O custo de destino é dividido em três categorias:

- **Pagamento:** a empresa geradora de resíduos contrata empresas de tratamento de resíduos, pagando um valor para tanto (custo de destinação maior que zero);
- **Venda:** a empresa geradora de resíduos possui clientes que compram os resíduos, recebendo por eles um determinado valor (custo de destinação menor que zero);
- **Doação:** a empresa geradora de resíduos não paga e também não vende os seus resíduos (custo de destinação igual a zero).

Os custos de transporte são classificados nas categorias:

- **CIF** (*Cost, Insurance and Freight*): o custo associado à contratação de veículo pertencente a uma empresa transportadora e é pago pela empresa geradora de resíduos (custo de transporte é maior que zero);
- **FOB** (*Freight-on-Board*): o custo associado ao uso dos veículos é assumido pela empresa de destinação final (custo de transporte é igual a zero).

### 4.2 Notações para o modelo matemático

#### 4.2.1 Conjuntos

$$TR = \{tr \mid tr \text{ é um tipo de tratamento de resíduos}\}$$
$$T = \{t \mid t \text{ é um tipo de empresa transportadora contratada ou um veículo próprio de uma empresa de destino final}\}$$
$$TC = \{tc \mid tc \text{ é um tipo de veículo}\}$$
$$R = \{r \mid r \text{ é um tipo de resíduo}\}$$

$D = \{d \mid d \text{ é um tipo de empresa de destinação final}\}$

#### 4.2.2 Parâmetros

- $c_{transp_{t,tc}}$  custo fixo de requisitar um caminhão da transportadora  $t \in T$ , do tipo  $tc \in TC$ .
- $ckm$  custo fixo, associado a distância percorrida, em quilômetros, na viagem do veículo
- $dist_r$  distância, em quilômetros, associada ao transporte do resíduo  $r \in R$
- $c_{dest_{tr,r,d}}$  custo variável, para o tipo de tratamento  $tr \in TR$ , na destinação do resíduo  $r \in R$ , para o destino  $d \in D$
- $q_{res_r}$  quantidade do resíduo  $r \in R$ , armazenado temporariamente no terminal de apoio marítimo
- $q_{inic_r}$  quantidade inicial do resíduo  $r \in R$  que é compartilhado para diferentes tipos de destino final
- $cap_{tr,t,tc}$  capacidade dos caminhões das empresas transportadoras  $t \in T$ , do tipo do veículo  $tc \in TC$
- $cap_{tr,d}$  capacidade dos destinos finais  $d \in D$ , para cada tipo de tratamento de resíduos  $tr \in TR$

#### 4.2.3 Variáveis de decisão

- $x_{tr,r,d}$  variável de fluxo real, que determina a quantidade distribuída do resíduo  $r \in R$  para a empresa de destinação final  $d \in D$ , considerando-se o tipo de tratamento  $tr \in TR$
- $y_{tr,t,tc,r,d}$  variável de decisão inteira, que determina a quantidade de caminhões, do tipo de caminhão  $tc \in TC$ , da empresa transportadora  $t \in T$ , para o transporte do resíduo  $r \in R$ , enviado para a empresa de destinação final  $d \in D$ , para ao tipo de tratamento  $tr \in TR$

#### 4.3 Modelagem de Programação Inteira Mista

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{tr \in TR} \sum_{t \in T} \sum_{tc \in TC} \sum_{r \in R} \sum_{d \in D} c_{transp_{t,tc}} \times ckm \times dist_r \times y_{tr,t,tc,r,d} + \sum_{tr \in TR} \sum_{r \in R} \sum_{d \in D} c_{dest_{tr,r,d}} \times x_{tr,r,d}$$

Sujeito às seguintes restrições:

$$\sum_{r \in R} x_{tr,r,d} \leq cap_{tr,d}; \quad \forall tr \in TR, \forall d \in D \quad (R1)$$

$$\sum_{d \in D} x_{tr,r,d} = q_{res_r}; \quad \forall r \in R, \forall tr \in TR \quad (R2)$$

$$\sum_{d1 \in D} x_{tr1,r,d1} + \sum_{d2 \in D} x_{tr2,r,d2} + \sum_{d4 \in D} x_{tr4,r,d4} = q_{inic_r}; \quad r = \text{Madeira não Contaminada} \quad (R3)$$

$$\sum_{d5 \in D} x_{tr5,r,d5} + \sum_{d6 \in D} x_{tr6,r,d6} = q_{inic_r}; \quad r = \text{Residuo oleoso} \quad (R4)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{t \in T} \text{cap}_{tr,t,c} \times y_{tr,t,t,c,r,d} \geq \sum_{r \in R} x_{tr,r,d}, \forall tr \in TR, tc = \text{caminhão - caçamba}, \forall d \in D \quad (R5)$$

$$\sum_{t \in T} \text{cap}_{tr,t,c} \times y_{tr,t,t,c,r,d} \geq x_{tr,r,d}, \forall tr \in TR, tc = \text{caminhão - tanque}, \forall r \in R, \forall d \in D \quad (R6)$$

$$y_{tr,t,t,c,r,d} \in Z, \forall tr \in TR, \forall t \in T, \forall tc \in TC, \forall r \in R, \forall d \in D \quad (R7)$$

$$x_{tr,r,d} \geq 0, \forall tr \in TR, \forall r \in R, \forall d \in D \quad (R8)$$

A função objetivo minimiza o somatório dos custos de transporte e destinação final, para cada tipo de tratamento. O conjunto de restrições (R1) garante que os limites de capacidade dos destinos finais não serão excedidos. O conjunto de restrições (R2) garante que todos os resíduos armazenados temporariamente no terminal de apoio marítimo serão transportados para o respectivo destino final.

A restrição (R3) permite que o resíduo madeira não contaminada seja compartilhado entre os tipos de tratamento tr1 (Blendagem), tr2 (Reciclagem) e tr4 (Aterro Industrial). A restrição (R4) permite que os resíduos oleosos sejam compartilhados entre os tipos de tratamento tr5 (Rerrefino) e tr6 (Beneficiamento).

O conjunto de restrições (R5) determina o somatório da quantidade dos veículos do tipo caminhão-caçamba necessário para o transporte dos resíduos sólidos, para cada tipo de tratamento e destino final. O conjunto de restrições (R6) determina o somatório da quantidade de veículos do tipo caminhão-tanque, para o transporte dos resíduos líquidos para cada tipo de tratamento e destino final.

A restrição (R7) garante a integralidade das variáveis  $y_{tr,t,t,c,r,d}$  e a restrição (R8) garante a não-negatividade das variáveis  $x_{tr,r,d}$ .

## 5. Dados utilizados

Os conjuntos de dados utilizados estão relacionados a 316 dias de operação de uma sonda usada na exploração de hidrocarbonetos. Os dados de custo de destinação de resíduos foram obtidos através de *sites* de Bolsa de Resíduos da Federação das Indústrias do Rio de Janeiro (FIRJAN) e da Federação das Indústrias do Estado de São Paulo (FIESP). Os dados relacionados à quantidade de resíduos, empresas de destinação final, empresas transportadoras, distâncias aproximadas entre o desembarque e a disposição final de cada resíduo, foram obtidos através de um Projeto de Controle da Poluição (PCP), estudo realizado por empresas de exploração e produção de hidrocarbonetos, em cumprimento às condicionantes da licença ambiental emitida pelo IBAMA para as atividades de perfuração. A Tabela 4 mostra as quantidades de cada um desses tipos de elementos.

Tabela 4 – Quantidades dos elementos usados nesta instância (Fonte: elaboração dos autores)

Quantidade dos elementos				
Tipos de Tratamento	Empresas Transportadoras	Tipos de Veículos	Tipos de Resíduos	Empresas de Destino Final
6	6	3	21	15

Na prática é difícil de se obter as capacidades dos destinos finais, uma vez que estas capacidades dependem, conjuntamente, de quanto todos os clientes enviam de resíduos e de quanto de disponibilidade do resíduo o destinador tem armazenado versus o quanto o mercado está pagando pelos resíduos. Por tudo isso, faz-se necessário, didaticamente, obter uma estimativa matemática para estas capacidades dos destinos finais. Vale ressaltar ainda que aqui, neste estudo, as capacidades estão sendo estimadas com base em apenas uma empresa geradora de resíduos, o que na prática também não é verdade.

Com o objetivo de se obter valores que limitem as capacidades dos destinos finais no modelo proposto, utilizaram-se as equações (EQ1) e (EQ2).

A equação (EQ1) realiza o somatório da quantidade de cada resíduo em cada tipo de tratamento, obtendo o volume total para cada tipo de tratamento.

$$QTRAT_{tr} = \sum_{r \in R} QRES_{r, tr}; \forall tr \in TR \quad (EQ1)$$

O parâmetro  $QTRAT_{tr}$  refere-se à quantidade total de resíduo em cada tipo de tratamento, onde  $tr \in TR$ . O parâmetro  $QRES_{r, tr}$  refere-se a quantidade de cada resíduo  $r \in R$ , onde  $R$  é o conjunto de resíduos que estão contidos em cada tipo de tratamento.

A equação (EQ2) permite obter o valor referente à capacidade de cada destino final. É calculada uma média aritmética onde a quantidade de resíduos a ser tratada, calculada pela equação (EQ1), é dividida pelo número de destinos finais em cada tipo de tratamento  $tr \in TR$ .

$$CAPDEST_d = \frac{QTRAT_{tr}}{ND_{tr}}; \forall tr \in TR \quad (EQ2)$$

O parâmetro  $CAPDEST_d$  refere-se ao valor da capacidade para cada destino final. O parâmetro  $ND_{tr}$  refere-se ao número de destinos finais em cada tipo de tratamento de resíduos.

A partir do quantitativo absoluto total do volume de resíduos gerados, referente aos 316 dias de operação de perfuração, foram gerados três horizontes de planejamento, levando-se em conta os volumes gerados por semana, por mês e por bimestre.

Estes valores foram obtidos dividindo-se o total de cada resíduo por 45,1 semanas, 10,37 meses e 5,19 bimestres, respectivamente. A Figura 3 mostra a organização de cada horizonte de planejamento, referente às instâncias geradas.

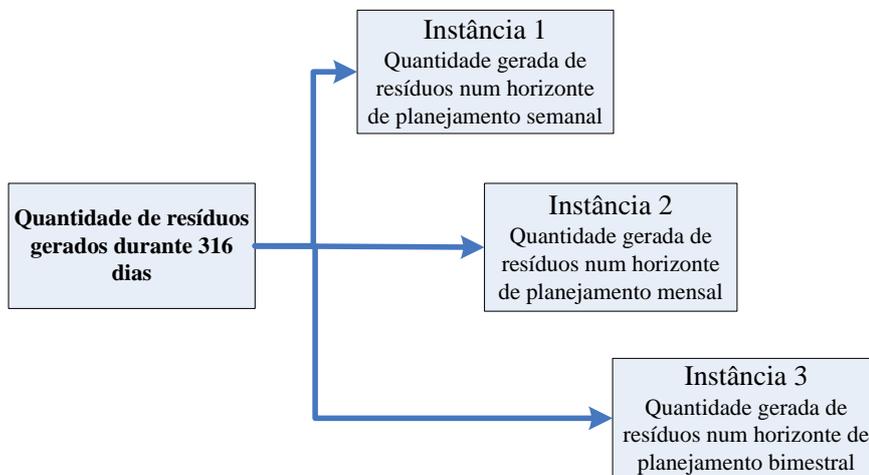


Figura 3 – Instâncias geradas para cada horizonte de planejamento  
Fonte: elaboração dos autores

## 6. Resultados Computacionais

Os resultados computacionais obtidos consolidam as soluções, determinadas pela formulação de programação matemática inteira mista proposta, para cada uma das três instâncias geradas.

O modelo proposto foi implementado em MOSEL<sup>®</sup> 2.4.2 e otimizado pelo Xpress-MP Optimizer<sup>®</sup> 19.00.17, dentro do ambiente Xpress-IVE<sup>®</sup> 1.19.01. Os testes foram executados em um computador com processador Intel Celeron de 1,86 GHz, com 384 MB de RAM, usando o sistema operacional Windows XP.

Os esquemas mostrados a seguir em 5.1, 5.2 e 5.3 apresentam as soluções obtidas, mostrando o fluxo da movimentação de resíduos. A coluna *Resíduos estocados temporariamente* representa o tipo de resíduo armazenado no terminal de apoio marítimo, com sua respectiva quantidade e a distância, em

quilômetros, referente à distância do destino final. Estes resíduos são agrupados em cada tipo de destinação final.

A coluna *Transportadora* representa o tipo de veículo adotado para cada resíduo, que pode ser do tipo caminhão-tanque ou caminhão-caçamba, mostrando o custo praticado na contratação de cada veículo, a lotação, que representa a capacidade do transporte de cada veículo e, como solução, a quantidade de veículos usados.

A coluna *Destinos Finais* representa as empresas de destinação final, com a respectiva capacidade de recebimento. A coluna *Resíduos Destinados* representa o tipo de resíduo enviado para cada empresa, com o seu respectivo volume e o custo em R\$/kg, associado a cada tipo de resíduo.

### 6.1 Resultados para a Instância 1

A Figura 4 apresenta os resultados relativos ao tratamento blendagem.

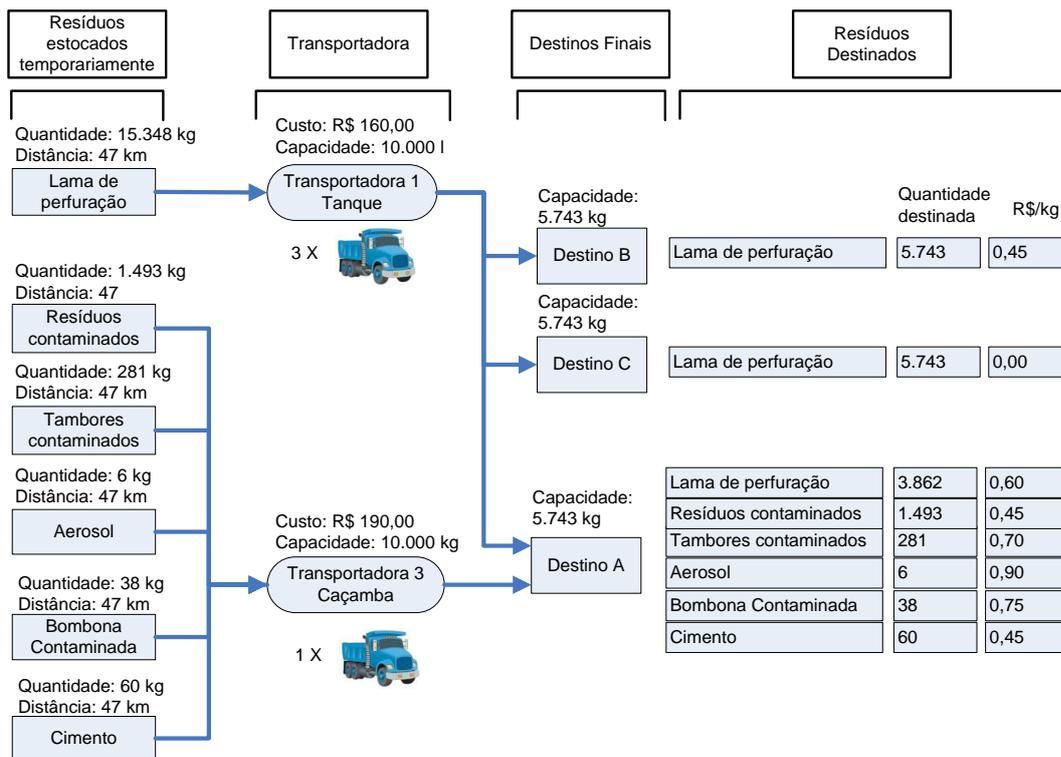


Figura 4- Tratamento Blendagem – Instância 1

A Figura 5 apresenta os resultados relativos ao tratamento incineração.

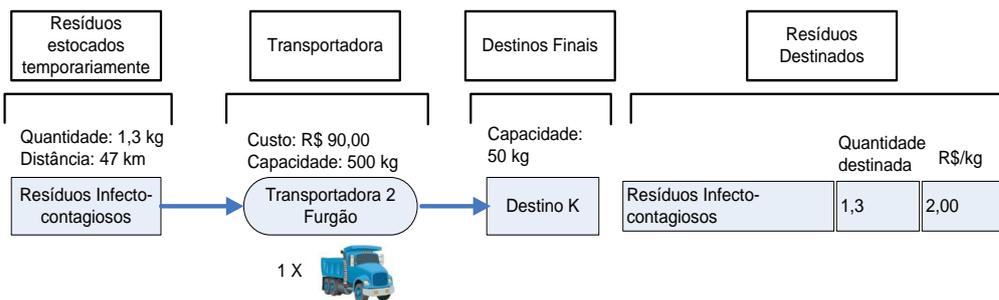


Figura 5- Tratamento Incineração – Instância 1

A Figura 6 apresenta os resultados relativos ao tratamento aterro industrial.

## PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

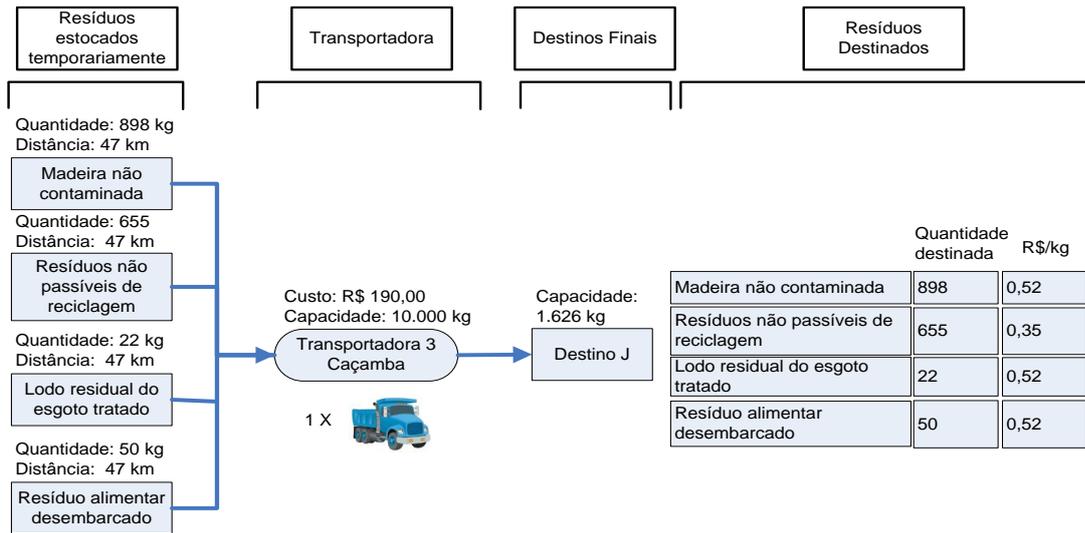


Figura 6- Tratamento Aterro Industrial – Instância 1

A Figura 7 apresenta os resultados relativos ao tratamento rerrefino e beneficiamento.

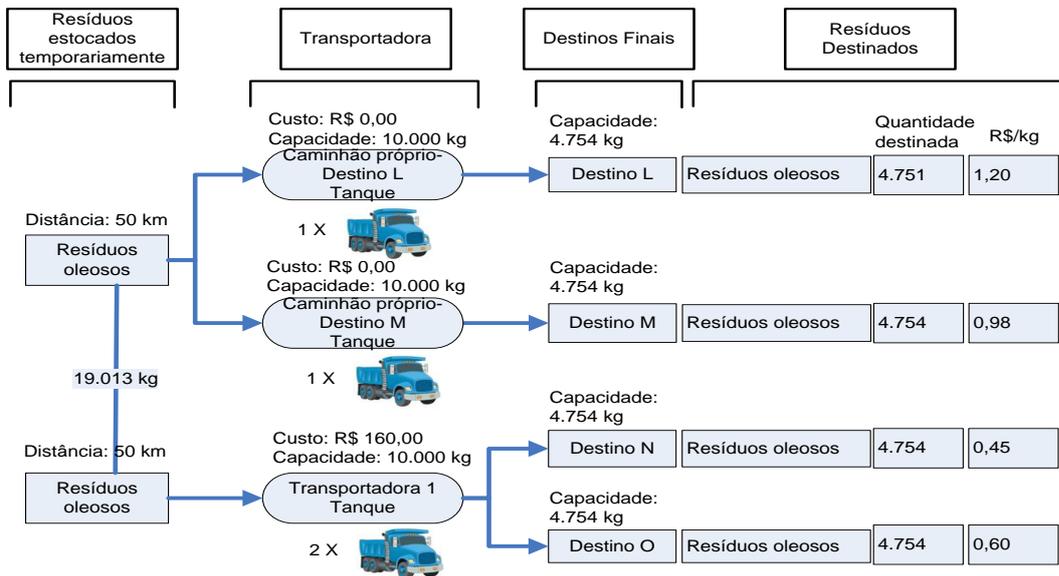


Figura 7- Tratamento Rerrefino e Beneficiamento – Instância 1

A Figura 8 apresenta os resultados relativos ao tratamento reciclagem.

## PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

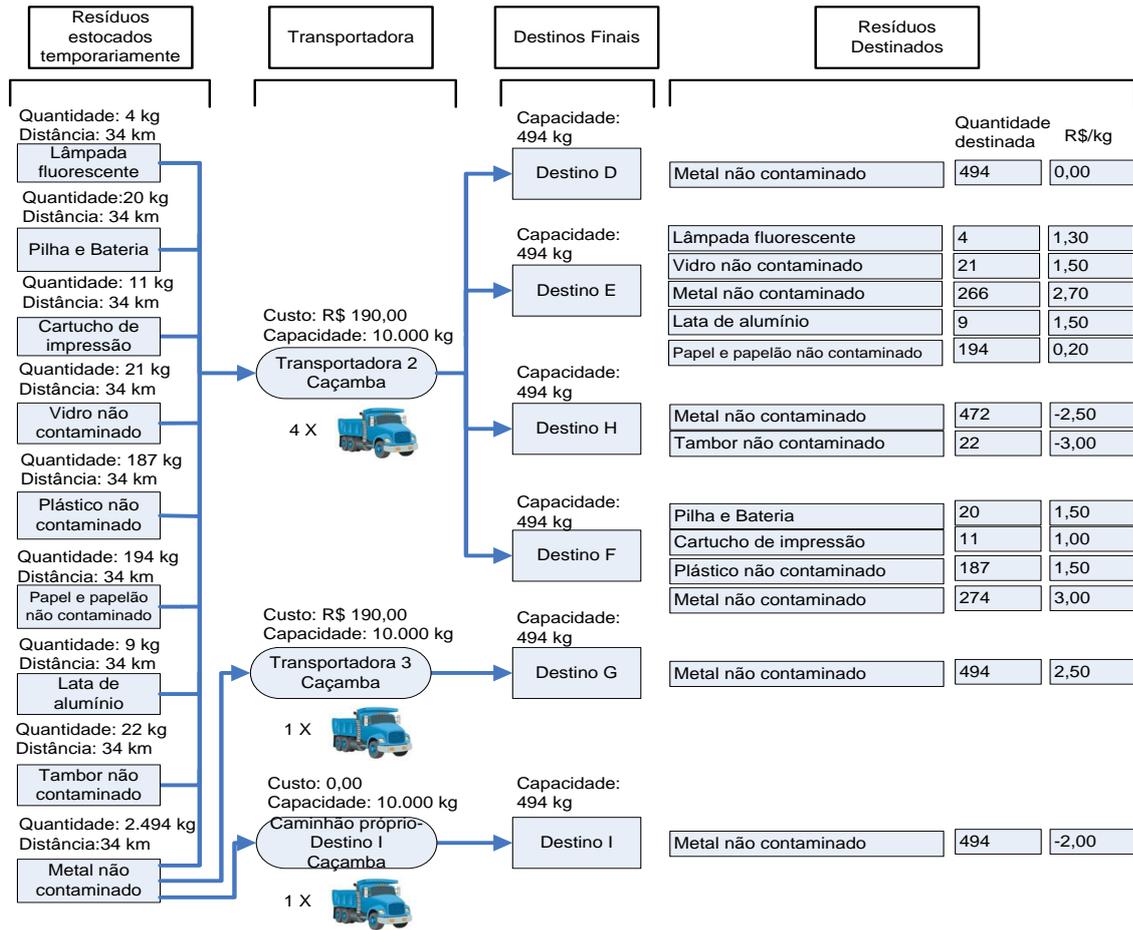


Figura 8- Tratamento Reciclagem – Instância 1

O figura 9 mostra os custos de transporte para a Instância 1.

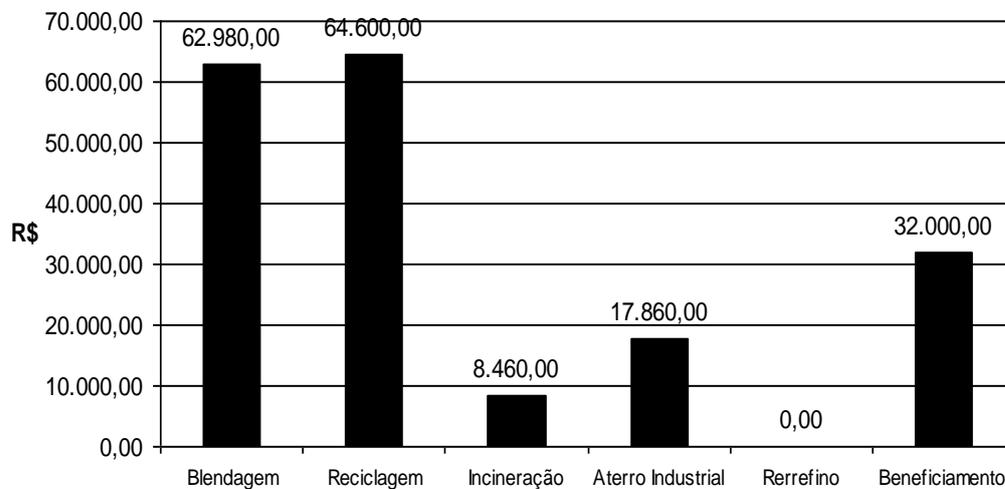


Figura 9 – Custos de transporte para a instância 1

O figura 10 mostra os custos de destinação final para a Instância 1.

## PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

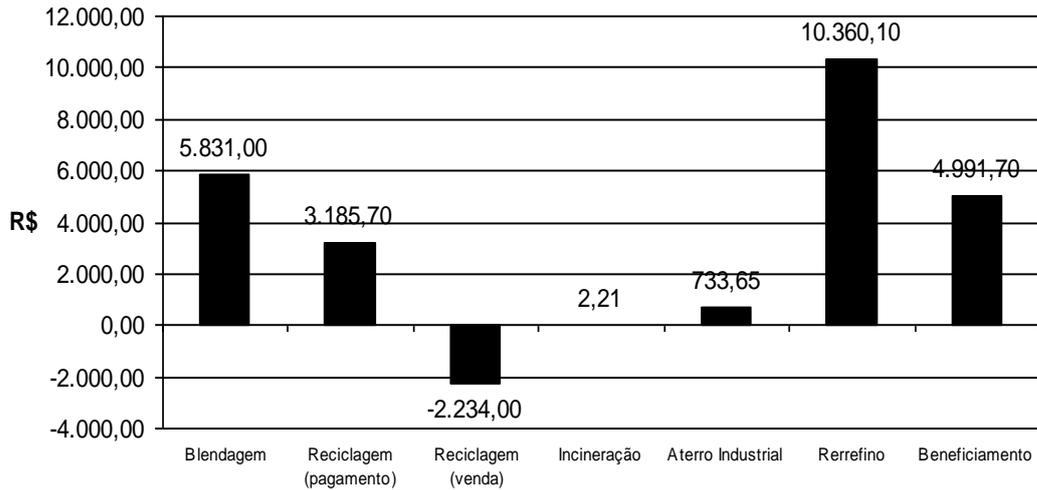


Figura 10 - Custos de destinação para a instância 1

### 6.2 Resultados para a Instância 2

A Figura 11 apresenta os resultados relativos ao tratamento blendagem.

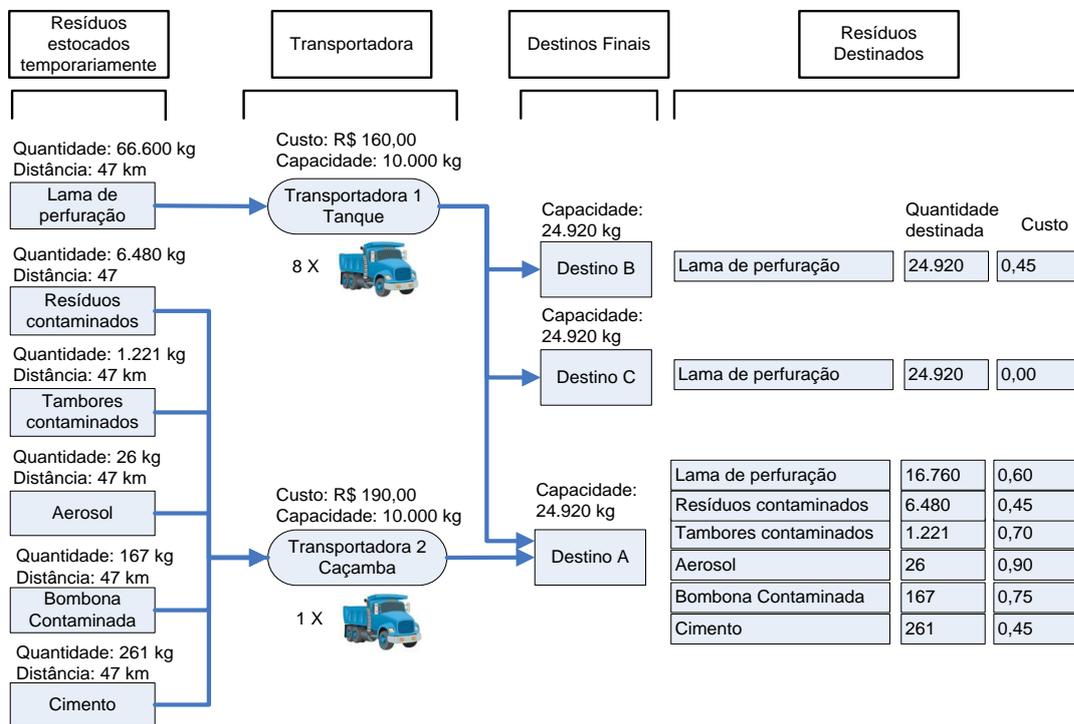


Figura 11 - Tratamento Blendagem – Instância 2

A Figura 12 apresenta os resultados relativos ao tratamento aterro industrial.

## PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

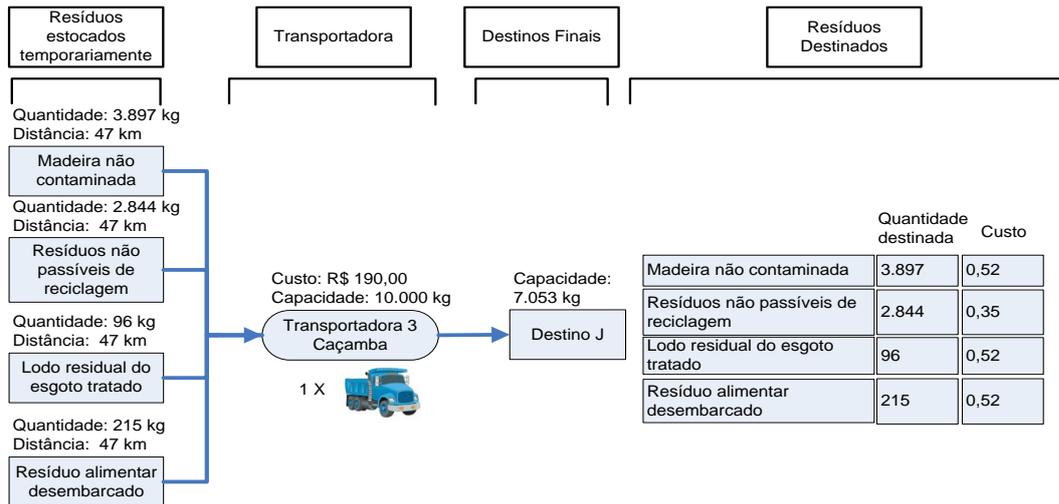


Figura 12 - Tratamento Aterro Industrial – Instância 2

A Figura 13 apresenta os resultados relativos ao tratamento reciclagem.

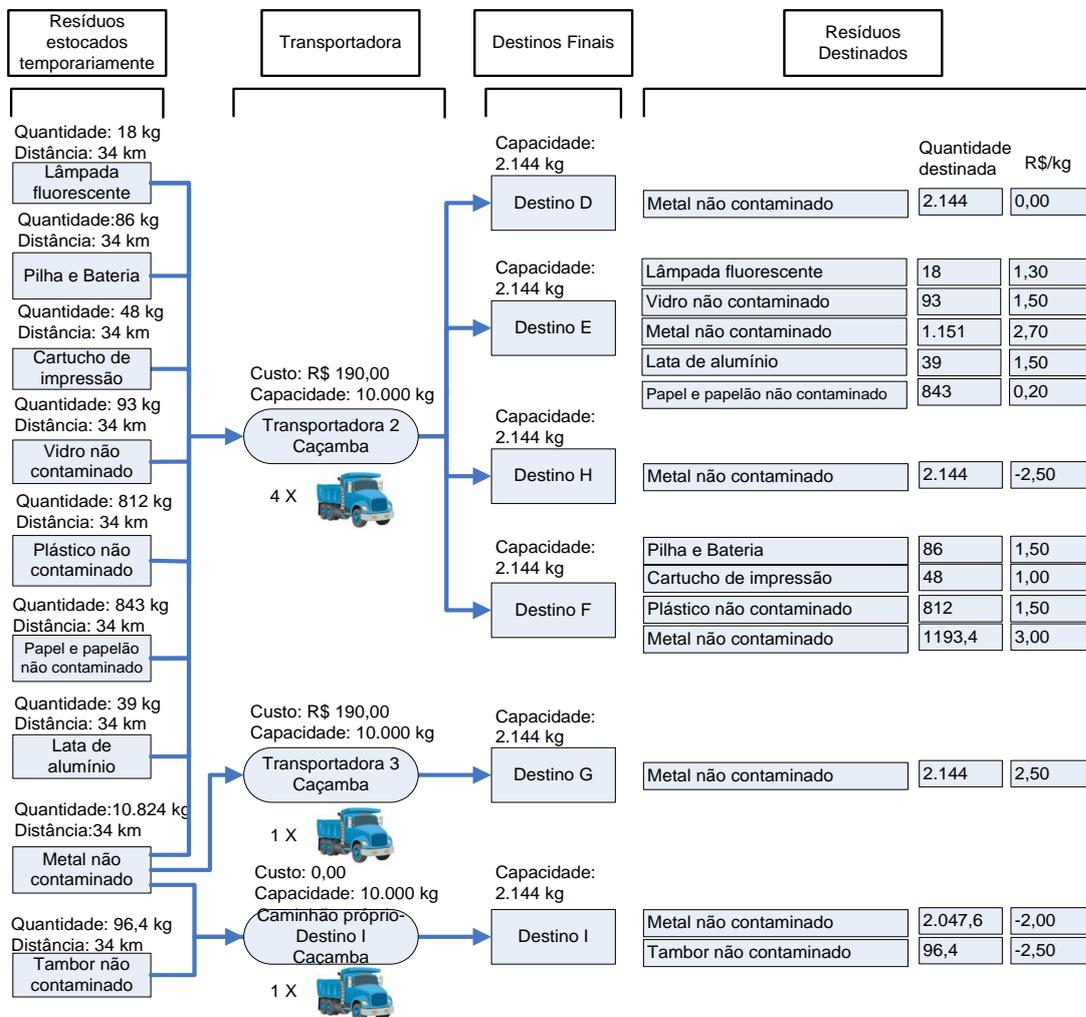


Figura 13 - Tratamento Reciclagem – Instância 2

A Figura 14 apresenta os resultados relativos ao tratamento incineração.

## PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

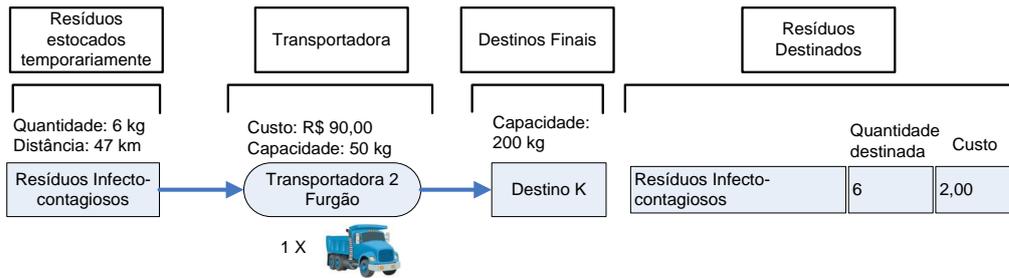


Figura 14 - Tratamento Incineração – Instância 2

A Figura 15 apresenta os resultados relativos ao tratamento re-refino e beneficiamento.

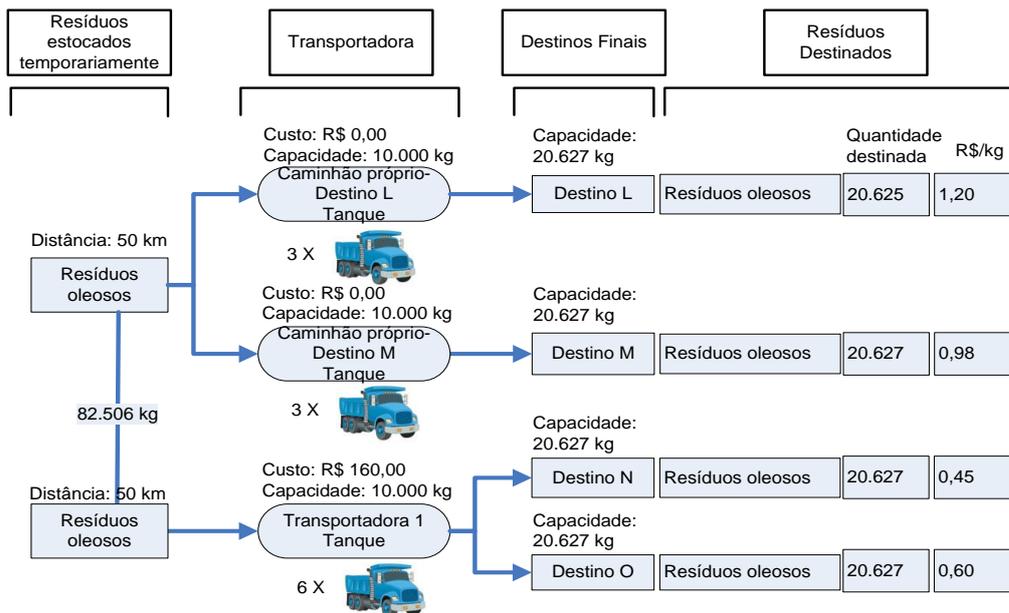


Figura 15 - Tratamentos Re-refino e Beneficiamento – Instância 2

O figura 16 mostra os custos de transporte para a Instância 2.

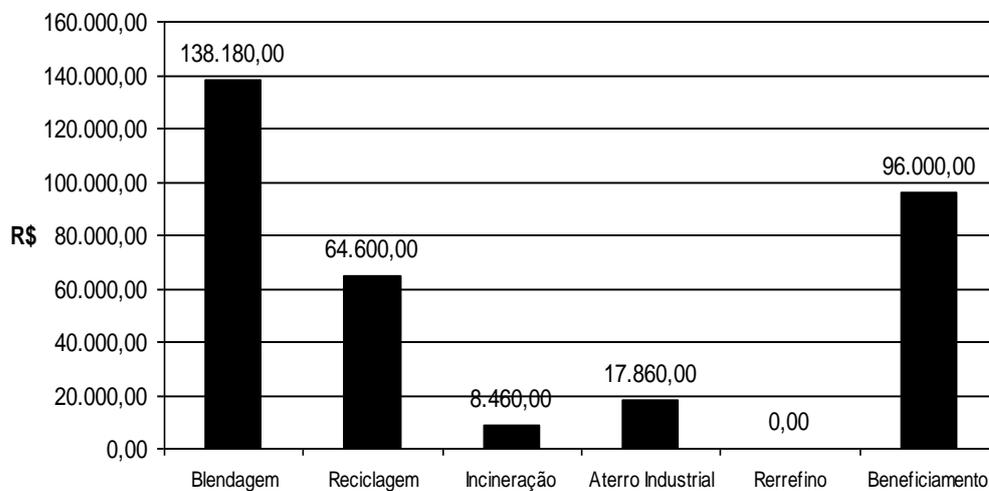


Figura 16 – Custos de transporte para a instância 2

O figura 17 mostra os custos de destinação final para a Instância 2.

## PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

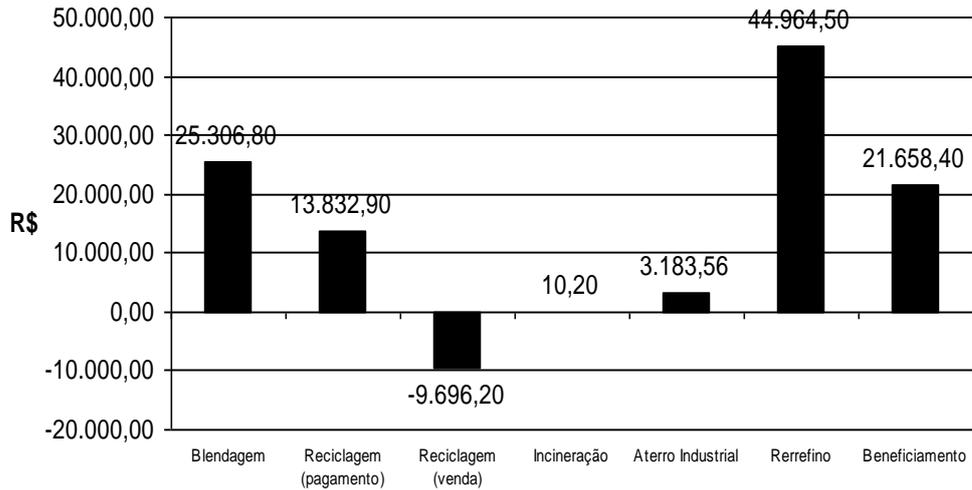


Figura 17 - Custos de destinação para a instância 2

### 6.3 Resultados para a Instância 3

A Figura 18 apresenta os resultados relativos ao tratamento blendagem.

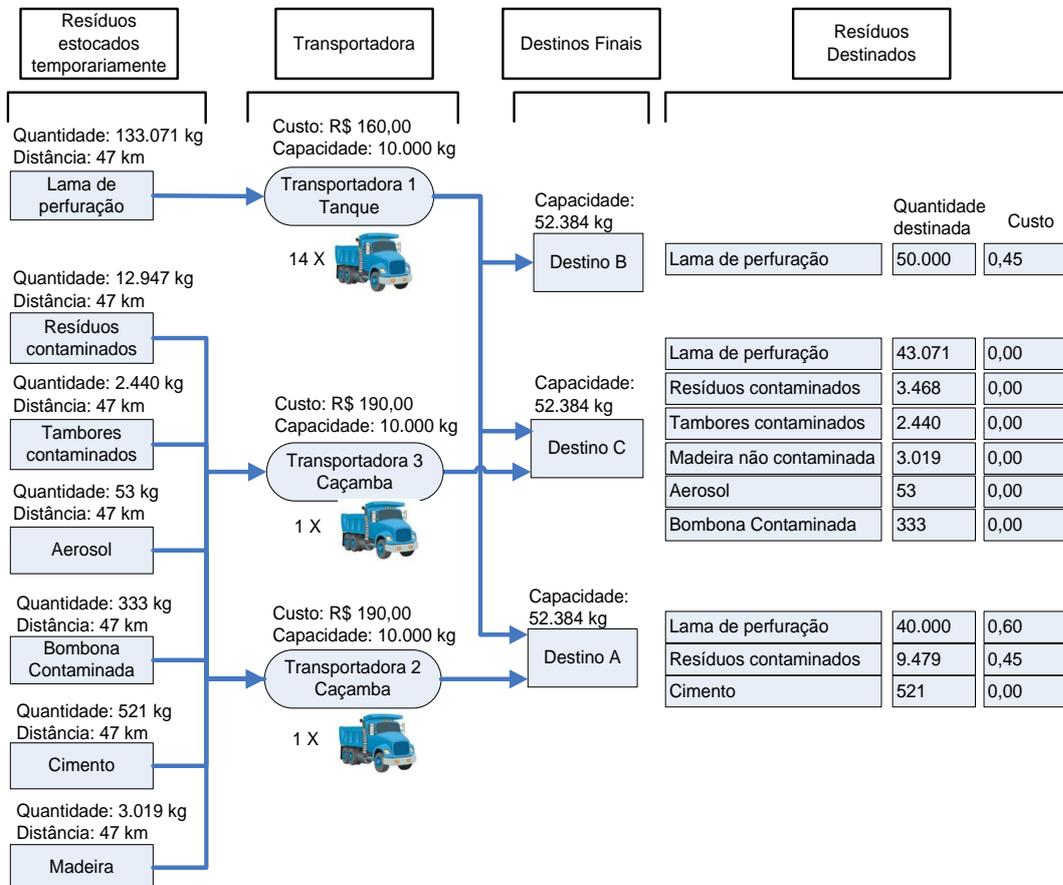


Figura 18 – Tratamento Blendagem – Instância 3

A Figura 19 apresenta os resultados relativos ao tratamento aterro industrial.

## PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

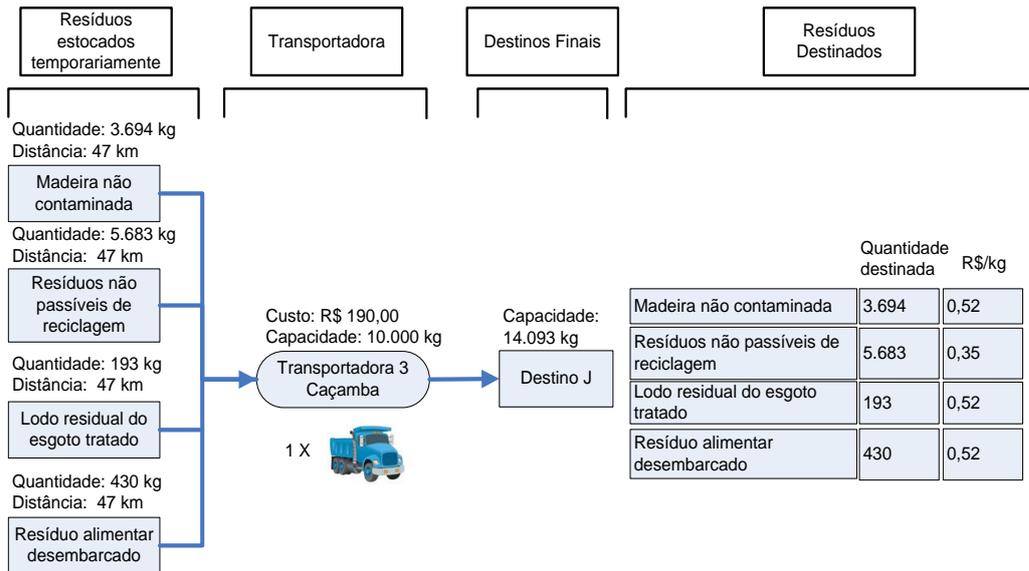


Figura 19 – Tratamento Aterro Industrial – Instância 3

A Figura 20 apresenta os resultados relativos ao tratamento re-refino e beneficiamento.

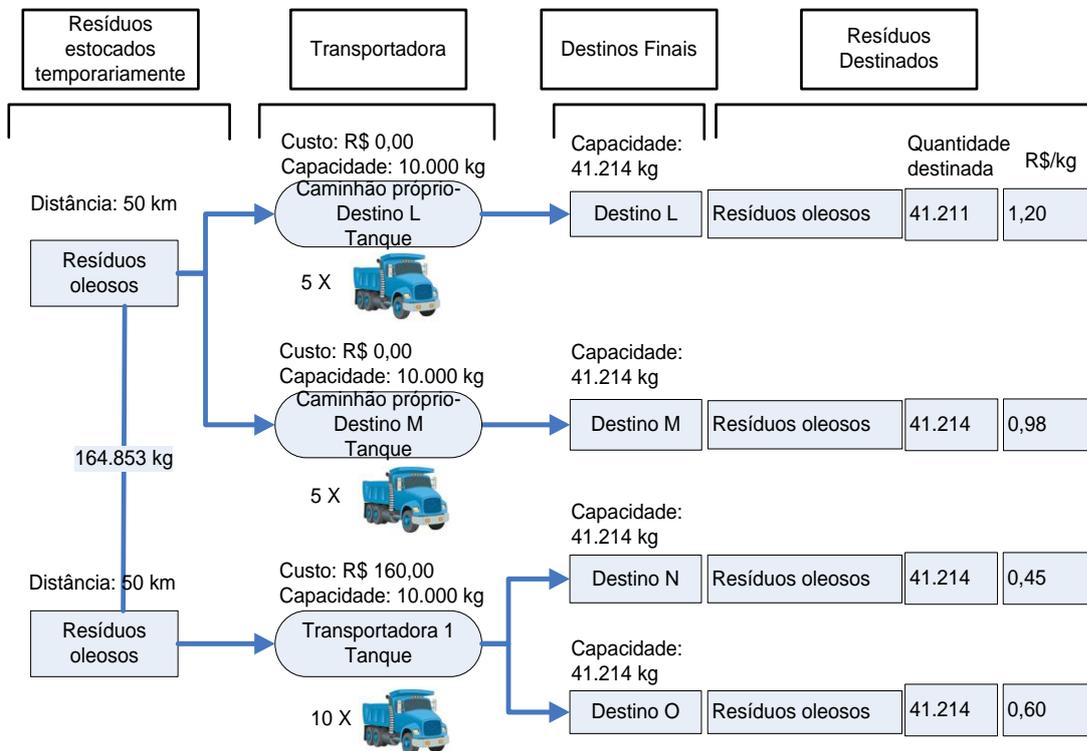


Figura 20 – Tratamentos Re-refino e Beneficiamento – Instância 3

A Figura 21 apresenta os resultados relativos ao tratamento reciclagem.

## PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

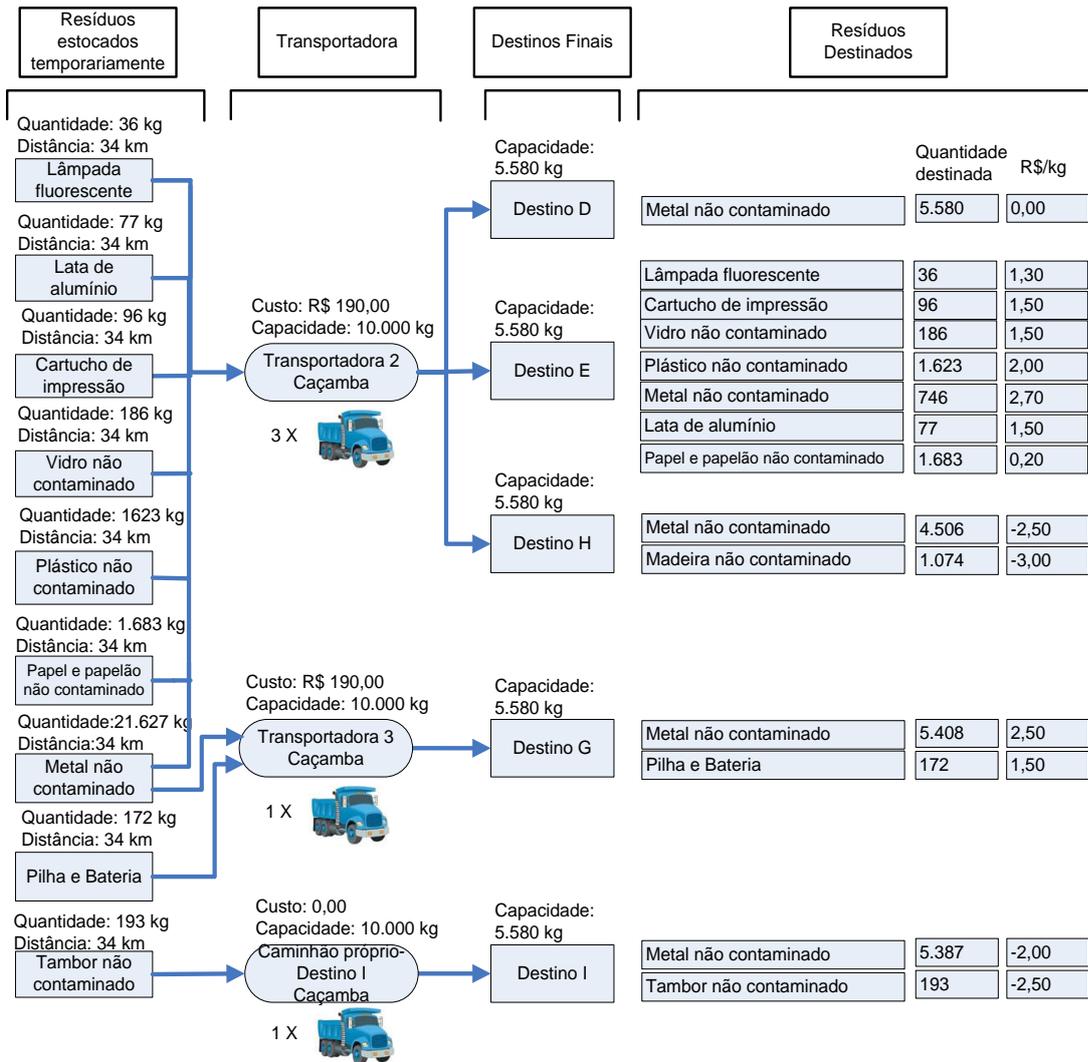


Figura 21 – Tratamento Reciclagem – Instância 3

A Figura 22 apresenta os resultados relativos ao tratamento incineração.

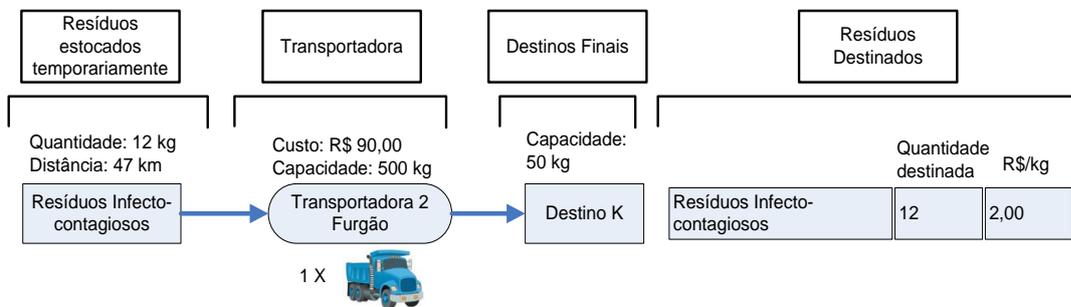


Figura 22 – Tratamento Incineração – Instância 3

O figura 23 mostra os custos de transporte para a Instância 3.

## PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

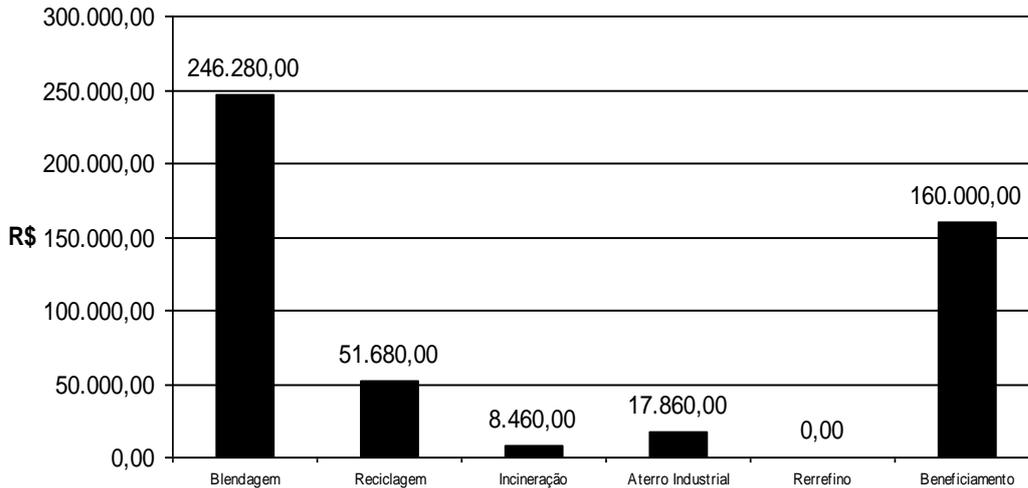


Figura 23 – Custos de transporte para a instância 3

O Figura 24 mostra os custos de destinação final para a Instância 3.

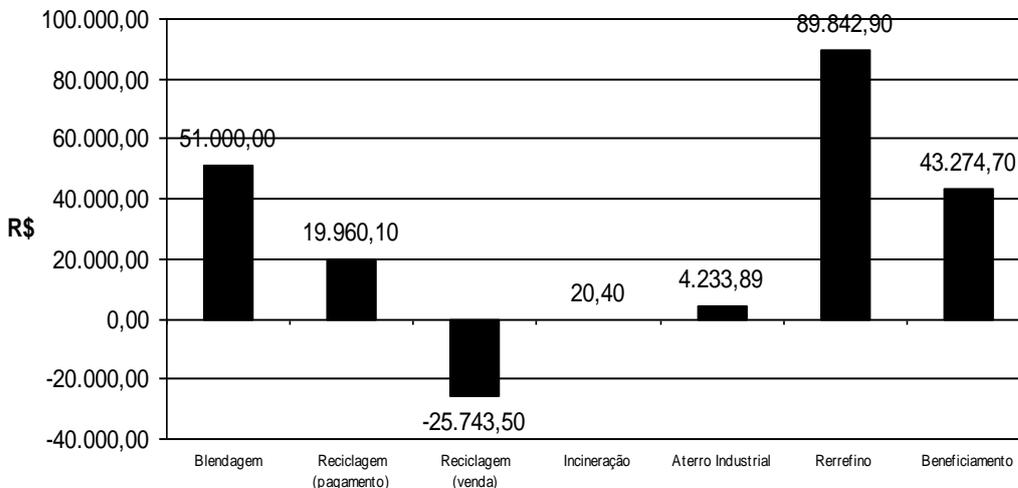


Figura 24 - Custos de destinação para a instância 3

Os custos de transporte nas três instâncias, relacionados aos tratamentos incineração, aterro industrial e rerrefino, são iguais, pois usam a mesma quantidade de veículos para a realização da movimentação de resíduos. Em relação aos custos de transporte para o rerrefino, este é zero, sendo este resíduo transportado por veículos próprios das empresas a que se destinam.

O custo de transporte para reciclagem se mantém igual para as instâncias 1 e 2, embora ocorra a redução de um caminhão na instância 3, devido a dispensa da empresa “Destino F”. Os custos de transporte para os tratamentos blendagem e beneficiamento são crescentes, devido ao aumento na oferta de resíduos, necessitando de uma demanda maior de caminhões.

Os custos de destinação para o tratamento rerrefino são elevados nas três instâncias, pois estas empresas, apesar de possuírem veículos próprios, o que torna o custo de transporte nulo, recebem uma grande quantidade de resíduos, associado a um elevado custo de destinação.

O custo de incineração é o menor em todas as instâncias, devido a um pequeno volume de resíduos infecto-contagiosos. Para os outros tipos de tratamento, os custos aumentam proporcionalmente à oferta de resíduos.

Os custos totais, mostrados no figura 25, representam o somatório entre os custos de movimentação de resíduos e a destinação.

## PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

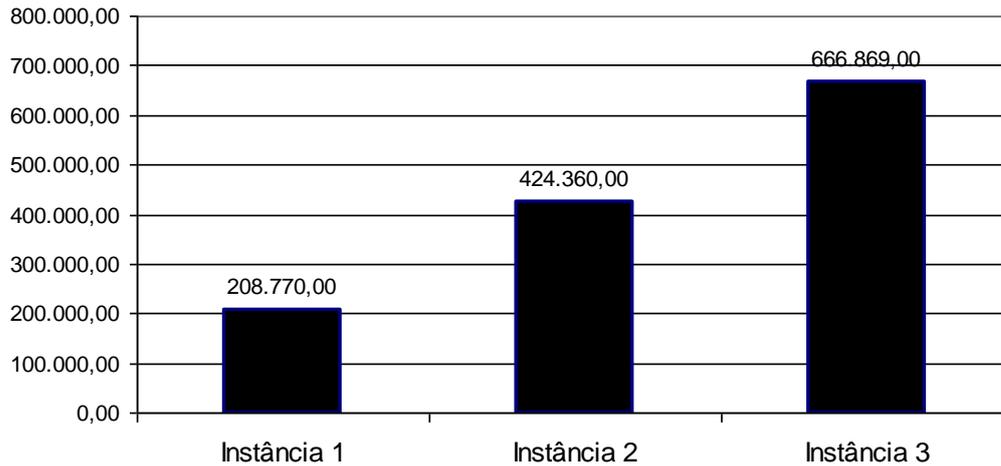


Figura 25 – Custos totais obtidos em cada instância

Os custos totais obtidos são crescentes devido ao volume gerado em cada horizonte de planejamento. Isto implica em cada uma das instâncias, um número crescente de veículos empregados e um volume crescente de resíduos destinados.

Embora o custo total na instância 1 seja menor, se o planejamento realizado por esta instância for aplicado durante duas semanas, o custo total é equivalente a R\$ 417.540,00, ou seja, bem próximo ao custo total obtido para instância 2. Por sua vez, a aplicação do horizonte de planejamento referente à instância 2 durante dois meses, supera o custo total obtido na instância 3.

### 7. Conclusões

Com as novas regulamentações ambientais, empresas de exploração e produção de hidrocarbonetos têm a necessidade de rever os seus custos de movimentação e destinação de resíduos. O gerenciamento dos resíduos das sondas de perfuração *offshore*, com o auxílio de formulações matemáticas desenvolvidas para este tipo de problema, dá um maior suporte na tomada de decisão, no sentido de reduzir os custos de movimentação dos mesmos, dentro de um grande número de possibilidades de locais de destinação e transporte.

O presente trabalho se baseou numa situação real enfrentada por uma empresa atuante na exploração e produção de petróleo. Muito embora, por razões de confidencialidade, os custos reais e as práticas de gerenciamento de resíduos não possam ser publicadas, os resultados obtidos foram amplamente validados pela empresa. Além disto, o desenvolvimento do modelo proposto contribuiu para a sistematização dos procedimentos de gerenciamento dos resíduos e o seu emprego pode ainda contribuir com a redução dos custos logísticos e na decisão do destino final correto para determinado tipo de resíduo, evitando gastos desnecessários.

Como considerações futuras no modelo matemático, pode-se realizar uma abordagem que inclua a chegada dos resíduos no terminal de apoio marítimo, considerando as distintas fases de perfuração do poço, bem como a consideração das condições (custos e restrições de armazenagem) de estoque de resíduos por períodos mais longos no terminal de apoio marítimo. Estas considerações aumentam o poder de decisão, flexibilizando ainda mais a logística de movimentação de resíduos.

### Referências

## PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

Associação Brasileira de Normas e Técnicas (2004). Resíduos Sólidos – Classificação, NBR 10.004, São Paulo.

ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres, Disponível em: <http://www.antt.gov.br/>, Acessado em maio de 2010.

COSTA, L., R., (2009). O Problema de Localização Capacitado em Dois Níveis e sua aplicação ao Planejamento de Logística Reversa, Tese D.Sc., UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, Brasil.

COSTA, L., R., GALVÃO, R., D., (2008). Localização em Logística Reversa: Modelos e Algoritmos para um Problema Capacitado em Dois Níveis, Minicurso apresentado no XL Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional.

DONATO, V. (2008). Logística Verde: Uma Abordagem Sócio-Ambiental, Editora Ciência Moderna, Rio de Janeiro

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, Sistema FIESP, Disponível em: <http://apps.fiesp.com.br/bolsaresiduos/>, Acessado em março de 2010.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, Sistema FIRJAN, Disponível em: <http://www.firjan.org.br/>, Acessado em maio de 2010.

FLEISCHMAN, M. & BLOEMHOF-RUWAARD, J. M. & DEKKER, R. & VAN der LAAN, E. & VAN NUNEN, Jo A. E. E. & VAN WASSENHOVE, L. N. (1997). Quantitative Models for Reverse Logistics: A Review, *European Journal of Operational Research*, 103, 1-17

HU, T., SHEU, J., HUANG, K. (2002). A reverse logistics cost minimization model for the treatment of hazardous wastes. *Transportation Research Part E*, 38, 457-473.

IBAMA, Instituto Brasileiro de Meio Ambiente, Nota Técnica CGPEG/DILIC/IBAMA N° 03/08, 2008, Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/licenciamento/>, Acessado em maio de 2010.

JAYARAMAN, V., PATTERSON, R. A., ROLLAND, E., (2003). The design of reverse distribution networks: Models and solution procedures. *European Journal of Operational Research*, v. 150, n. 1, pp. 128-149.

SCHAFFEL, S. B. (2002). A Questão Ambiental na Etapa da Perfuração de Poços Marítimos de Óleo e Gás no Brasil, Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

SCHULTMANN, F., ZUMKELLER, M., RENTZ, O., (2006). Modeling Reverse Logistic tasks within closed-loop supply chains: An example from the automotive industry, *European Journal of Operational Research*, 171, 1033-1050.

SPENGLER, T., PURCHET, H., PENKUHN, T., RENTZ, O., (1997). Environmental Integrated Production and Recycling Management, *European Journal of Operational Research*, 97, 308-326.