

## OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEL ALTERNATIVO DE UMA UNIDADE DE VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA

Thiago Henrique Martins Pereira, Gustavo Menezes Carvalho, Alexandre Cássio Rodrigues  
Centro Universitário Metodista Izabela Hendrix, tigoemtv@hotmail.com

### RESUMO

No atual cenário ambiental, tecnologias sustentáveis para a destinação de resíduos tem ganhado força. Com a necessidade de extinção de lixões e a determinação de ordem de prioridade para destinação de resíduos, estabelecidas pela Lei 12.305/2010, a tecnologia de valorização energética se torna cada vez mais viável e competitiva economicamente. Um dos grandes problemas enfrentados pelas Unidades de Valorização Energética – UVEs está em garantir a qualidade do produto final sem que haja retrabalho com correções de lotes fora de especificação. Desta forma este artigo tem como tema a otimização da produção de combustível alternativo para coprocessamento. O objetivo é determinar em que proporção os resíduos recebidos em uma UVE, devem ser misturados de modo a otimizar a produção de combustível alternativo. A justificativa se dá pela possibilidade de maximizar o aproveitamento desses resíduos, atender tanto à legislação vigente quanto aos critérios de qualidade estabelecidos pelas cimenteiras. A metodologia de desenvolvimento do trabalho se dá através do levantamento das especificações dos resíduos e dos critérios de qualidade exigidos, modelagem e implementação do problema da mistura de resíduos, interpretação dos resultados do modelo de otimização e realização da análise de sensibilidade. Na discussão dos resultados é feita uma análise dos resultados obtidos antes e depois da aplicação do modelo, onde se pôde determinar em qual proporção os resíduos devem ser misturados, maximizando a produção e atendendo aos parâmetros de qualidade e ainda é realizada a análise de sensibilidade que demonstrou quais os resíduos e restrições apresentam a possibilidade de maximização da função objetivo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Valorização Energética, Problema da Mistura, Resíduos sólidos.

### INTRODUÇÃO

Tecnologias sustentáveis para destinação de resíduos sólidos ganharam destaque após a promulgação da Política Nacional de Resíduos Sólidos, que foi instituída pela Lei nº 12.305/2010. A partir de então, ficou estabelecido que “[...] na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos” (BRASIL, 2010, Art. 9º).

Outra determinação daquela lei, prevista no Art. 54 do título IV, é que a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos deverá ser implantada em até 4 (quatro) anos após a data de publicação daquela lei, ou seja 03/08/2014. Desta forma todos os lixões do país deveriam ter sido extintos até esta data, exigência que até o início de agosto de 2014 havia sido cumprida por 40,4% dos municípios brasileiros (FOLHA Apud INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA-IPEA). Aqueles que descumprirem essa determinação e mantiverem lixões a céu aberto estarão cometendo crime ambiental, passível de multa de até R\$ 50 milhões (AGÊNCIA SENADO, 2014).

Nesse contexto, o coprocessamento é uma alternativa sustentável de reutilização de resíduos, que através da mistura e destruição térmica, faz com que estes gerem energia alternativa para aquecer fornos de fabricação de cimento (FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE - FEAM, 2012). O potencial de geração de combustível alternativo é enorme. Por exemplo, no ano 2012, em Belo Horizonte, foram recolhidas, em média, 4.700 toneladas de resíduos por dia, parte desse montante poderia ser direcionado, à produção de combustível alternativo (SUPERINTENDÊNCIA DE LIMPEZA URBANA - SLU, 2012).

Uma das dificuldades enfrentadas para aumentar a produção de combustível alternativo está em atestar que os critérios de qualidade exigidos pelas cimenteiras sejam atingidos na mistura, haja vista a alta heterogeneidade e a vasta possibilidade de combinação dos resíduos. Dentre os requisitos que devem ser atendidos, destacam-se o poder calorífico superior e os percentuais de cloro, flúor, umidade e cinzas da mistura.

Diante disso, o objetivo desse trabalho é determinar em que proporção os resíduos recebidos em uma UVE devem ser misturados de modo a otimizar a produção de combustível alternativo e, ao mesmo tempo, atender aos critérios de qualidade exigidos pelas cimenteiras.

A justificativa para a realização dessa pesquisa reside na possibilidade de maximizar o aproveitamento desses resíduos, atendendo, assim, tanto à legislação vigente quanto aos critérios de qualidade estabelecidos pelas cimenteiras. Além disso, no caso das UVE's, contribui-se para a redução de custos de retrabalho, que ocorrem em virtude das correções de lote devido ao não atendimento de especificação das cimenteiras, tornando-as assim, mais competitivas.

Esse artigo conta com quatro seções, além dessa introdução. A segunda aborda o referencial teórico. Na seção três, é apresentada a metodologia do trabalho e na seção quatro a discussão dos resultados. Por fim, na quinta seção, são feitas as considerações finais.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS**

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) prevê instrumentos importantes que permitem o avanço do país no que se refere à solução dos principais problemas ambientais, sociais e econômicos, que surgem em consequência da utilização inadequada dos resíduos sólidos. O Art. 6º estabelece como princípio a prevenção e redução da geração de resíduos, através da prática de consumo sustentável e do consequente aumento da reciclagem e reutilização em geral destes resíduos, além da destinação correta dos rejeitos que não puderam ser reaproveitados.

De acordo com o Art. 3º, a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos é um conjunto de atribuições individualizadas e encadeadas dos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, dos consumidores e dos titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos, para minimizar o volume de resíduos sólidos e rejeitos gerados, bem como para reduzir os impactos causados à saúde humana e à qualidade ambiental decorrentes do ciclo de vida dos produtos.

Além destes fatores, no Art. 5º criam-se metas de redução, reutilização, reciclagem, aproveitamento energético dos gases gerados nas unidades de disposição final de resíduos sólidos, eliminação e recuperação de lixões, associadas à inclusão social, com vistas a reduzir a quantidade de resíduos e rejeitos encaminhados para disposição final ambientalmente adequada, importantes para a diminuição e futura eliminação dos lixões e cria instrumentos de planejamento para o correto gerenciamento de resíduos sólidos.

Segundo o Art. 9º, no gerenciamento de resíduos sólidos deve-se haver seguinte ordem de prioridade: com a não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos, destinação correta dos rejeitos gerados e utilização de tecnologias para o aproveitamento energético dos resíduos.

### **2.2 COPROCESSAMENTO DOS RESÍDUOS**

A técnica de coprocessamento, segundo a FEAM (2012), é uma forma de destruir termicamente os resíduos, fazendo com que estes gerem energia para aquecer fornos para fabricação de cimento. Estes resíduos também podem ser utilizados como matéria prima, não afetando as propriedades do produto final.

De acordo com Pontifícia Universidade Católica - PUC (2010), os materiais mais utilizados para o coprocessamento são as borrachas, pneus, resíduos de biomassa, ceras, substâncias oleosas, lodo de estação de tratamento de efluentes, resinas, colas, látex, catalisadores usados, madeira, terras contaminadas e solventes.

Contudo, para essas finalidades, o resíduo necessita ser misturado e homogeneizado, assegurando as características necessárias ao processo. A Figura 1 mostra o fluxo de destinação destes resíduos destinados à valorização energética.

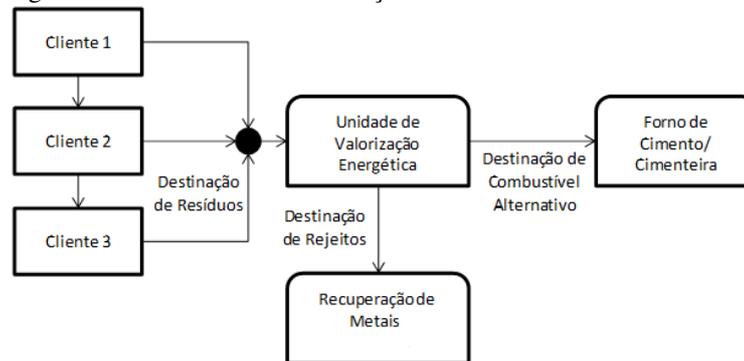


Figura 1 – Fluxo de destinação dos resíduos. Fonte: Elaborada pelos autores.

Os resíduos destinados pelos clientes de diversos setores industriais diferentes, vão para UVE's, onde são triados. Resíduos metálicos, por exemplo, não podem ser destinados ao processo de valorização energética devido às suas características específicas, como o alto percentual de Cloro, Flúor, Cinzas, Umidade e o baixo Poder Calorífico Superior. Estes resíduos, ao serem recebidos, devem ser separados e enviados a empresas especializadas na venda/tratamento, já que não são passíveis de queima em forno de cimento e não serão aproveitados como combustível.

Os resíduos que atendem aos parâmetros já citados serão processados, gerando o combustível alternativo que é enviado para queima em fornos de cimento. Atualmente, as UVE's pagam às cimenteiras pela queima do combustível alternativo. O custo total do processo deve ser inferior ao custo de destinação em aterros, para assim ser mais competitiva e viável economicamente. Dessa forma tem-se um ciclo sustentável, pois se tem a redução do consumo de combustíveis fósseis por parte das cimenteiras que utilizam resíduos valorizados pelas UVE's como combustível alternativo.

### 2.3 MODELAGEM DO PROBLEMA DA MISTURA APLICADO A UMA UNIDADE DE VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA

O problema da mistura ocorre em situações nas quais se deve escolher o valor de variáveis sujeitas a restrições de modo a otimizar uma função objetivo. Logo haja vista a otimização de recursos, visa-se “[...] encontrar a melhor distribuição possível dos recursos entre as diversas tarefas ou atividades, de modo a atingir um valor ótimo do objetivo estabelecido” (ANDRADE, 2009).

Diante disso, no caso da mistura de resíduos, tem-se:

- a) Variáveis de decisão:

$x_i$  = Massa, em toneladas, do resíduo,  $i = 1, 2, \dots, n$ , a ser inserida na mistura;

- b) Função Objetivo: Maximizar a produção de combustível alternativo de uma UVE:

$$\text{Max} \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{Equação (1)}$$

- c) Restrições do modelo:

$$\sum_{i=1}^n x_i PCS_i \geq PCS \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{Equação (2)}$$

$$\sum_{i=1}^n x_i PCL_i \leq PCL \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{Equação (3)}$$

$$\sum_{i=1}^n x_i PFL_i \leq PFL \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{Equação (4)}$$

$$\sum_{i=1}^n x_i PUM_i \leq PUM \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{Equação (5)}$$

$$\sum_{i=1}^n x_i PCZ_i \leq PCZ \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{Equação (6)}$$

$$x_i \leq E_i, \forall_i, i = 1, 2, \dots, n \quad \text{Equação (7)}$$

$$x_i \geq 0, \forall_i, i = 1, 2, \dots, n \quad \text{Equação (8)}$$

Nessas inequações, PCS é o Poder Calorífico Superior, PCL é o Percentual de Cloro, PFL é o Percentual de Flúor, PUM é o Percentual de Umidade e PCZ é o Percentual de Cinzas da Mistura exigidos pelo cliente. Na Equação (7)  $E_i$  é Estoque de resíduo  $i$  e a Equação (8), é a condição de não negatividade.

### 3. METODOLOGIA

Em relação à finalidade, essa pesquisa é classificada como aplicada, pois tem como objetivo investigar, comprovar ou rejeitar hipóteses sugeridas pelos modelos teóricos. Em se tratando do método, a pesquisa se caracteriza como quantitativa, uma vez que utiliza técnicas estatísticas a fim de traduzir em números as opiniões e informações que serão classificadas e analisadas para uma posterior tomada de decisão (RODRIGUES, 2007).

Em relação à coleta de dados, a pesquisa possui características documentais, pois foram considerados dados de uma UVE, situada na região metropolitana de Belo Horizonte. Destaca-se que essa investigação é um estudo de caso. Logo, os resultados não são passíveis de generalização.

As etapas da pesquisa foram:

- Levantamento das especificações dos resíduos e dos critérios de qualidade exigidos;
- Modelagem e implementação do problema da mistura de resíduos;
- Interpretação dos resultados do modelo de otimização;
- Realização de análise de sensibilidade.

### 4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

#### 4.1 PARÂMETROS DO MODELO

No exemplo abaixo considerou-se a utilização de 5 resíduos de diferentes clientes e diferentes características químicas. A Tabela 1 destaca as especificações dos resíduos e a quantidade disponível em estoque.

**Tabela 1 – Especificações e estoques disponíveis de resíduos. Fonte: Elaborada pelos autores.**

Resíduo	PCS (kcal/kg)	% Cl	% F	% Umidade	% Cinzas	Estoque (t)
Lã de Vidro	787,90	0,00	0,00	3,00	3,00	25,00
Borra de Tinta	4320,00	0,40	0,01	26,00	22,00	30,00
Contaminados de óleo	4051,60	0,00	1,38	3,00	4,19	30,00
EPI's contaminados	4136,00	1,57	0,00	3,00	3,00	15,00

#### 4.2 CARACTERÍSTICAS DA MISTURA DE TODOS RESÍDUOS

Os critérios de qualidade exigidos pela cimenteira e as características da mistura de todos os resíduos em estoque são mostrados na Tabela 2. Observa-se que apenas dois dos cinco critérios de qualidade da mistura seriam alcançados com essa estratégia. Nesse caso, a UVE precisaria arcar com os custos de retrabalho.

**Tabela 2 – Critérios de qualidade exigidos e resultados obtidos na mistura.**

Fonte: Elaborada pelos autores.

Critérios de Qualidade	Limite inferior	Limite superior	Valores obtidos na mistura
PCS (kcal/kg)	3700,00	-	3328,86
% Cl	-	0,27	0,36
% F	-	0,27	0,42
% Umidade	-	18,00	9,90
% Cinzas	-	18,00	9,06

#### 4.3 COMBINAÇÃO ÓTIMA DOS RESÍDUOS

A Tabela 3 mostra a combinação ótima de resíduos para composição da mistura, que foi obtida a partir da implementação do modelo de otimização apresentado na seção anterior. Nessa implementação, usou-se a ferramenta Solver do Microsoft Excel 2013. Observa-se que apenas o resíduo Borra de Tinta é adicionado totalmente na mistura.

**Tabela 3 – Combinação ótima de resíduos. Fonte: Elaborada pelos autores.**

Resíduo	Estoque (t)	Total a ser utilizado (t)	Resíduo não utilizado (t)
Lã de Vidro	25,00	7,51	17,49
Borra de Tinta	30,00	30,00	0,00
Contaminados de óleo	30,00	8,86	21,14
EPI's contaminados	15,00	0,38	14,62

A Tabela 4 compara o atendimento aos critérios de qualidade exigidos pela cimenteira antes e depois da implementação do modelo de otimização.

**Tabela 4 – Comparação dos critérios de exigidos pelo cliente. Fonte: Elaborada pelos autores.**

<b>Crítérios de qualidade</b>	<b>Limite inferior</b>	<b>Limite superior</b>	<b>Solução antes da implementação do modelo</b>	<b>Solução proposta pelo modelo</b>
PCS (Kcal/kg)	3700,00	-	3328,86	3700,00
% Cl	-	0,27	0,36	0,27
% F	-	0,27	0,42	0,27
% Umidade	-	18,00	9,90	17,76
% Cinzas	-	18,00	9,06	15,42

Nota-se que a solução apresentada pelo modelo de otimização atende a todos os critérios de qualidade exigidos pela cimenteira. Com isso, podem ser produzidas 46,75 toneladas de combustível alternativo. Essa estratégia, além de possibilitar melhor aproveitamento dos resíduos, evita à ocorrência de custos de retrabalho em virtude de correções de lote devido ao não atendimento das especificações exigidas pelas cimenteiras.

#### **4.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO PROBLEMA DA MISTURA**

A Tabela 5 apresenta o resultado obtido no Gradiente Reduzido. O mesmo se refere ao grau de impacto que uma unidade adicional de cada resíduo tem sob a função objetivo. O valor de 1,56 encontrado no resíduo Borra de Tinta, significa que, caso estivesse disponível, uma tonelada de borra de tinta aumentaria a produção de combustível alternativo em 1,56 toneladas.

Os outros resíduos possuem o valor do Gradiente Reduzido igual à zero, pois, nenhum deles melhoraria a função objetivo, ou seja, não apresentam capacidade de otimização da produção. Isso pode ser observado na tabela 3, pois não se utilizou todo estoque disponível dos outros resíduos.

**Tabela 5 – Impacto da disponibilidade adicional de resíduos sobre a Função Objetivo. Fonte: Elaborado pelos autores.**

<b>Resíduo</b>	<b>Final Valor</b>	<b>Gradiente Reduzido</b>
Lã de Vidro - Entrada na Mistura	7,51	0,00
Borra de Tinta - Entrada na Mistura	30,00	1,56
Contaminados de Óleo - Entrada na Mistura	8,86	0,00
EPI's Contaminados - Entrada na Mistura	0,38	0,00

A Tabela 6 apresenta os resultados do Multiplicador Lagrange dos critérios de qualidade. Este indicador apresenta a possibilidade de relaxamento das restrições em uma unidade para o aumento do volume produzido. A exemplo do Percentual de cloro, caso seu limite superior fosse acrescido de uma unidade (1,27) seria possível aumentar a produção de combustível alternativo em 58,57t. Da mesma forma, se o Flúor tivesse um relaxamento igualmente aumentado, seriam produzidas 65,09 t adicionais. No caso do PCS, tem-se um limite mínimo exigido, ou seja, diferente dos percentuais de cloro e flúor deve-se atender a um limite inferior. Dessa forma, o limite é reduzido em uma unidade do seu total (3699,00), assim, ter-se-ia um aumento de 0,03 t. do total produzido, ou o inverso, caso fosse acrescida uma unidade no total (3701,00), a produção seria penalizada em 0,03 t. Os parâmetros que apresentam um Multiplicador Lagrange igual a 0 (Umidade e Cinzas), não apresentam a possibilidade de relaxamento, pois a mistura destes não atingiram os limites permitidos.

**Tabela 6 – Impacto do relaxamento das restrições sobre a Função Objetivo. Fonte: Elaborado pelos autores.**

<b>Crítérios de qualidade</b>	<b>Final Valor</b>	<b>Multiplicador Lagrange</b>
PCS (Kcal/Kg) Real	3700,00	-0,03
Cl (%) Real	0,27	58,57
F (%) Real	0,27	65,09
Umidade (%) Real	17,76	0,00
Cinzas (%) Real	15,42	0,00

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A produção de combustível alternativo para queima em fornos de cimenteiras é um meio para atender à PNRS no que se refere à exigência de reaproveitamento de resíduos. Contudo, isso esbarra no desafio de determinar em que proporções os resíduos devem ser misturados de modo que o produto final atenda aos critérios de qualidade exigidos.

Para superá-lo, nesse trabalho, o problema de mistura de resíduos foi formulado a partir de um modelo de otimização e implementado em *Excel* por meio da ferramenta *Solver*. Com isso, obteve-se a combinação ótima de resíduos que atenda a todas às exigências da cimenteira, evitando, assim, a ocorrência de custos de retrabalho em virtude das correções de lote devido ao não atendimento daqueles critérios de qualidade.

Além disso, foi realizada a análise de sensibilidade da produção de combustível alternativo. É percebido que o resíduo, Borra de Tinta, apresenta um potencial de aproveitamento na mistura, embora sua disponibilidade seja limitada. A análise do Gradiente Reduzido é importante para auxiliar a tomada de decisões, pois se percebe quais são as entradas (no caso, resíduos) mais importantes para a maximização da produção. Outro ponto observado é que se houvesse um relaxamento dos limites de qualidade estabelecidos pela cimenteira, principalmente dos critérios de cloro e flúor, haveria um aumento da produção de combustível alternativo.

Realizar a análise do relatório de limites é um interessante caminho para dar continuidade a essa pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGÊNCIA SENADO 2014. Disponível em: <[http://www12.senado.gov.br/noticias/materias/2014/08/01/lixoes-a-ceu-aberto-resistem-apesar-do-fim-do-prazo-para-substitui-los-por-aterros-sanitarios/imprimir\\_materia](http://www12.senado.gov.br/noticias/materias/2014/08/01/lixoes-a-ceu-aberto-resistem-apesar-do-fim-do-prazo-para-substitui-los-por-aterros-sanitarios/imprimir_materia)> Acesso em 08 ago. 2014.> Acesso em 17 jun. 2014.
2. ANDRADE, Eduardo Leopoldino. Introdução à Pesquisa Operacional. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
3. BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Define a política nacional de resíduos sólidos e dá outras providências. Disponível em: < [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)>. Acesso em 15 mai. 2014.
4. FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente. Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos: Guia de Orientações para Governos Municipais de Minas Gerais. Disponível em: <[http://www.em.ufop.br/ceamb/petamb/cariboost\\_files/aproveitamento\\_20energ\\_c3\\_a9tico.pdf](http://www.em.ufop.br/ceamb/petamb/cariboost_files/aproveitamento_20energ_c3_a9tico.pdf)> Acesso em 17 mai. 2014
5. FOLHA DE SÃO PAULO 2014. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/colunas/maragama/2014/08/1494203-lixo-pais-nao-conseguiu-erradicar-os-lixoes-no-prazo-coleta-avancou.shtml>>. Acesso em 17 mai. 2014.
6. PUC - PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO. Fabricação do cimento Portland e coprocessamento de resíduos industriais nos fornos de produção de cimento. Apresentação em slides. Disponível em:<[www.dema.puc-rio.br/download/Aula%20cimento%20IEM.pdf](http://www.dema.puc-rio.br/download/Aula%20cimento%20IEM.pdf)>. Acesso em: 04 de maio 2014.
7. RODRIGUES, W. Metodologia Científica. FAETEC / IST, Paracambi, 2007.
8. SLU - Superintendência de Limpeza Urbana - Estatísticas da [tp://portalpbh.pbh.gov.br/pbh/ecp/contents.do?evento=conteudo&idConteudo=132272&chPlc=132272&&IdPlc=&app=salanoticias](http://portalpbh.pbh.gov.br/pbh/ecp/contents.do?evento=conteudo&idConteudo=132272&chPlc=132272&&IdPlc=&app=salanoticias)> Acesso em 07 ago. 2014.