

INSTITUTO FEDERAL DE MINAS GERAIS

Campus Bambuí

THIAGO HENRIQUE MARTINS PEREIRA

**DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ÓTIMAS DO *BLEND*
DE RESÍDUOS DO MUNICÍPIO DE BETIM/MG PARA
COPROCESSAMENTO EM CIMENTEIRAS**

BAMBUÍ - MG

2017

THIAGO HENRIQUE MARTINS PEREIRA

DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ÓTIMAS DO BLEND
DE RESÍDUOS DO MUNICÍPIO DE BETIM/MG PARA
COPROCESSAMENTO EM CIMENTEIRAS

Dissertação apresentada por Thiago Henrique Martins Pereira para o Mestrado Profissional em Sustentabilidade e Tecnologia Ambiental, do Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Bambuí, como pré-requisito para a obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Fernando Lemos

BAMBUÍ - MG

2017



FICHA DE APROVAÇÃO

Dissertação de Mestrado, intitulada “**Valorização Energética de Resíduos: O Lixo de Hoje é a Energia do Amanhã**”, de autoria do mestrando em Sustentabilidade e Tecnologia Ambiental **Thiago Henrique Martins Pereira**, aprovada pela Banca Examinadora de Defesa, em 07/07/2017, com a média de pontuação de **88,3**.

Título do Trabalho – houve alteração (X) Sim () Não

Se sim, qual o título: **Determinação das características ótimas do blend de resíduos do município de Betim/MG para coprocessamento em cimenteiras.**

Bambuí (MG), 07 de julho de 2017.



Prof.º Dr. Carlos Fernando Lemos - Orientador



Prof.º Dr. Arnaldo de Freitas Oliveira Júnior (CEFET-MG)



Prof.º Dr. Hygor Aristides Victor Rossoni (UFV/Florestal)



Prof.ª Dra. Janaína Kizzi de Moraes Silva (FUMEC)



Ronaldo dos Reis Barbosa
Secretário do Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade e Tecnologia Ambiental do IFMG

P442v Pereira, Thiago Henrique Martins.
Determinação das características ótimas do *blend* de resíduos do município de Betim/MG para coprocessamento em cimenteiras. / Thiago Henrique Martins Pereira. – 2017.
93 f.: il.; color.

Orientador: Dr. Carlos Fernando Lemos.
Dissertação de mestrado (Pós-graduação) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Bambuí, MG, Mestrado Profissional em Sustentabilidade e Tecnologia Ambiental, 2017.

1. Valorização energética. 2. Redução de custos em cimenteiras. 3. Coprocessamento. I. Lemos, Carlos Fernando. II. Título.

CDD 363.7282

RESUMO

No atual cenário ambiental, tecnologias sustentáveis para destinação de resíduos têm ganhado força. Com a necessidade de extinção de lixões e determinação da ordem de prioridade para destinação de resíduos, estabelecidas pela Lei 12.305/2010, processos como os de reciclagem tornam-se cada vez mais viáveis e competitivos economicamente. Porém, há dois grandes fatores complicadores para alavancar os índices de reciclagem no país os quais são: O aspecto cultural do povo brasileiro que não tem o hábito de separar o lixo reciclável dos demais e as estruturas precárias que as associações de catadores têm para desempenhar seu trabalho. Uma outra saída para uma destinação mais sustentável é a valorização energética para coprocessamento. Essa tecnologia consiste em utilizar resíduos com potencial energético, devidamente triturados e homogeneizados, para servir de combustível para fornos de fabricação de cimento. Neste contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar a destinação de resíduos sólidos do município de Betim considerando a ordem de prioridade estabelecida pela Política Nacional de Resíduos Sólidos e verificar se existe potencial de aproveitamento de parte dos resíduos sólidos que atualmente são destinados para aterro sanitário na tecnologia de coprocessamento. Por fim determinar o valor do blend de resíduos através de comparativo para utilização em fornos de fabricação de cimento. A metodologia adotada passa pela análise gravimétrica do município, análises químicas e formulação do blend de resíduos através de modelo de otimização. Ao fim do trabalho pôde-se concluir que a utilização do *blend* seria possível e vantajosa tanto para as fabricas de cimento que reduziriam seus custos quanto para o município que não geraria um passivo ambiental com resíduos dispostos em aterro sanitário.

Palavras-chave: Valorização Energética, Redução de Custos em Cimenteiras, Coprocessamento.

ABSTRACT

In the current environmental scenario, sustainable technologies for waste disposal have gained strength. With the need to extinguish dumps and determine the order of priority for waste disposal, established by Law 12.305 / 2010, processes such as recycling become increasingly feasible and economically competitive. However, there are two major complicating factors to leverage recycling rates in the country: The cultural aspect of the Brazilian people who do not have the habit of separating recyclable waste from others and the precarious structures that waste collectors' associations have to play their role job. Another solution to a more sustainable destination is energy recovery for coprocessing. This technology consists in using waste with energy potential, properly ground and homogenized, to serve as fuel for cement kilns. In this context, the objective of this work is to evaluate the destination of solid waste in the municipality of Betim/MG considering the order of priority established by the National Solid Waste Policy and to verify if there is potential for the use of part of the solid waste that is currently destined for landfill coprocessing technology. Finally, determine the value of the waste blend through comparative for use in cement kilns. The methodology adopted is based on the gravimetric analysis of the municipality, chemical analyzes and formulation of the waste blend through an optimization model. At the end of the study, it was concluded that the use of the blend would be possible and advantageous for cement factories that would reduce their costs as well as for the municipality that would not generate an environmental liability with waste disposed in a landfill.

Keywords: Energy Enhancement, Costs Reduction in Cement, Coprocessing.

Lista de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Equipamentos para realização das análises químicas. | 52 |
| Tabela 2 - Classificação das amostras coletadas no município..... | 53 |
| Tabela 3 - Classificação das amostras coletadas no município..... | 54 |
| Tabela 4 - Resumo da Composição Gravimétrica de 3 tipos de bairros da cidade de Betim/MG .. | 55 |
| Tabela 5 - Quantidade de resíduos sólidos urbanos gerados no Município de Betim - MG..... | 56 |
| Tabela 6 - Resumo da Composição Gravimétrica de 3 tipos de bairros da cidade de Betim/MG .. | 57 |
| Tabela 7 - Análises Químicas de Qualidade por Categoria de Resíduos. | 58 |
| Tabela 8 - Formulação do <i>Blend</i> de Resíduos a Partir da Distribuição da Análise Gravimétrica do Município De Betim..... | 59 |
| Tabela 9 - Resultado de Poder Calorífico Superior de Combustíveis para Fornos de Cimento | 72 |
| Tabela 10 - Informações financeiras e técnicas dos combustíveis | 73 |
| Tabela 11 - Informações operacionais da fábrica de cimento..... | 73 |
| Tabela 12 - Comparativo energético dos combustíveis alternativos com o coque de petróleo. | 74 |
| Tabela 13 - Resultados da Mistura do <i>Blend</i> – Cenário 1. | 74 |
| Tabela 14 - Resultados da Mistura do <i>Blend</i> – Cenário 2. | 75 |
| Tabela 15 - Resultados da Mistura do <i>Blend</i> – Cenário 3. | 76 |
| Tabela 16 - Resultados da Mistura do <i>Blend</i> – Cenário 4. | 77 |
| Tabela 17 - Resultados da Mistura do <i>Blend</i> – Cenário 5. | 77 |
| Tabela 18 - Resultados da Mistura do <i>Blend</i> – Cenário 6. | 78 |
| Tabela 19 - Resultados da Mistura do <i>Blend</i> – Cenário 7. | 79 |
| Tabela 20 - Resultados da Mistura do <i>Blend</i> – Cenário 8. | 80 |
| Tabela 21 - Resultados da Mistura do <i>Blend</i> – Cenário 9. | 80 |
| Tabela 22 - Resultados da Mistura do <i>Blend</i> – Cenário 10. | 81 |
| Tabela 23 - Resumo geral dos cenários..... | 83 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Produção anual de cimento no Brasil entre 1970 a 2008 em (106 ton). | 14 |
| Figura 2 - Pré-aquecedor de suspensão. | 16 |
| Figura 3 - Pré-aquecedor e pré-calcinador..... | 17 |
| Figura 4 - Esquema das etapas do processo de fabricação do cimento..... | 18 |
| Figura 5 - Combustíveis utilizados na indústria de cimento..... | 21 |
| Figura 6 - Evolução do coprocessamento no Brasil. | 24 |
| Figura 7 - Esquema de montagem do calorímetro. | 25 |
| Figura 8 - Alternativas de disposição de resíduos. | 33 |
| Figura 9 - Hierarquia de sustentabilidade no tratamento de resíduos sólidos..... | 35 |
| Figura 10 - Unidade de Valorização Energética da Essencis MG Soluções Ambientais S/A..... | 37 |
| Figura 11 - Processo de construção de um modelo matemático. | 39 |
| Figura 12 - Técnicas de Otimização..... | 40 |
| Figura 13 - Triturador de Bancada marca Bruno Industrial modelo TBS – 215 x 405 1E..... | 49 |
| Figura 14 - Quarteamento de amostras para pulverização..... | 49 |
| Figura 15 - Moinho de Panelas marca Contenco modelo I-4227..... | 50 |
| Figura 16 - Amostra pulverizada de resíduos realizada em moinho de panela..... | 51 |
| Figura 17 - Aplicação de modelo de otimização para formulação do <i>blend</i> com resíduos..... | 60 |
| Figura 18 - Modelo aplicado em planilha do Microsoft Office Excel 2017 utilizando solver..... | 62 |
| Figura 19 - Descarga de caminhão de resíduos na ASCAPEL..... | 66 |
| Figura 20 - Área interna do galpão de triagem de resíduos da ASCAPEL. | 67 |
| Figura 21 - Área interna do galpão de triagem de resíduos da ASCAPEL. | 68 |
| Figura 22 - Área externa do galpão da ASCAPEL..... | 68 |
| Figura 23 - Área externa do galpão da ASCAPEL..... | 69 |
| Figura 24 - Toneladas recicladas na ASCAPEL em 2016..... | 69 |
| Figura 25 - Utilização percentual de blend de resíduos em função do seu valor | 84 |

Sumário

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 9 |
| 2 REFERENCIAL TEÓRICO | 12 |
| 2.1 PROCESSO DE PRODUÇÃO DO CIMENTO..... | 12 |
| 2.1.1 Origem do cimento..... | 12 |
| 2.1.2 Panorama nacional da indústria do cimento..... | 13 |
| 2.1.3 Processo produtivo do cimento | 15 |
| 2.1.3.1 Processo via seca | 15 |
| 2.1.3.2 Preparação dos combustíveis | 18 |
| 2.1.3.3 Queima do clínquer | 19 |
| 2.2 COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS NA INDÚSTRIA DE CIMENTO | 20 |
| 2.2.1 Carvão Mineral..... | 21 |
| 2.2.2 Carvão Vegetal | 22 |
| 2.2.3 Óleo Combustível..... | 22 |
| 2.2.4 Coque de Petróleo | 23 |
| 2.2.5 Combustível Alternativo..... | 23 |
| 2.2.6 Avaliação do poder calorífico em combustíveis | 24 |
| 2.3 COPROCESSAMENTO DE RESÍDUOS..... | 27 |
| 2.3.1 Definição de Coprocessamento..... | 27 |
| 2.3.2 Classificação dos resíduos..... | 28 |
| 2.3.3 Legislação | 28 |
| 2.3.3.1 Resíduos que podem ser coprocessados..... | 29 |
| 2.3.3.2 Resíduos que não podem ser coprocessados..... | 32 |
| 2.3.4 Vantagens da Utilização da Técnica de Coprocessamento | 32 |
| 2.3.4.1 Comparação com o método de incineração..... | 33 |
| 2.3.4.2 Comparação com aterros | 34 |
| 2.4 UNIDADES DE PRODUÇÃO DE <i>BLEND</i> | 35 |
| 2.5 OTIMIZAÇÃO..... | 37 |
| 2.5.1 Modelos de Otimização e Simulação..... | 38 |
| 2.5.2 Formulação do modelo matemático de otimização..... | 39 |
| 2.5.2.1 Etapas de modelagem..... | 40 |
| 2.5.2.2 Variáveis de decisão | 41 |
| 2.5.2.3 Função objetivo | 41 |
| 2.5.3.4 Restrições | 42 |
| 2.5.4 Modelos De Otimização De Combustível Alternativo..... | 43 |
| 2.6 OUTROS TRABALHOS SOBRE COMBUSTÍVEIS COM RSU..... | 43 |
| 2.6.1 Caso de Cantagalo/RJ | 43 |

| | |
|---|-----------|
| 2.6.2 Tecnologias de Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos..... | 44 |
| 2.6.3 Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos: Uma Abordagem Tecnológica..... | 46 |
| 3 METODOLOGIA..... | 47 |
| 3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA | 47 |
| 3.2 COLETA DOS DADOS DA PESQUISA | 47 |
| 3.3 MÉTODO DE PREPARAÇÃO E ANÁLISE DOS RESÍDUOS..... | 48 |
| 3.3.1 Preparação de amostra..... | 48 |
| 3.3.2 Análise Laboratorial..... | 51 |
| 3.4 A GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DE BETIM..... | 53 |
| 3.4.1 Análise Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos do Município de Betim | 53 |
| 3.4.2 Resíduos com potencial para valoração..... | 57 |
| 3.4.3 Composição do <i>Blend</i> de resíduos..... | 59 |
| 3.4 ESTRUTURAÇÃO DO MODELO PARA DETERMINAR O VALOR DO <i>BLEND</i> | 61 |
| 3.4.1 Implementação do modelo na planilha de otimização | 62 |
| 3.4.2 Métodos de cálculo e fórmulas..... | 63 |
| 4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS..... | 65 |
| 4.1 ASCAPEL | 65 |
| 4.2 CARACTERÍSTICAS ATUAIS DO MERCADO DAS FÁBRICAS DE CIMENTO..... | 70 |
| 4.3 CARACTERÍSTICAS DOS COMBUSTÍVEIS | 71 |
| 4.4 PROCESSO DE ALIMENTAÇÃO DO FORNO COM COMBUSTÍVEIS..... | 72 |
| 4.5 APLICANDO O MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA REDUZIR CUSTOS..... | 72 |
| 4.5.1 Determinações para mistura dos combustíveis | 72 |
| 4.5.2 Cenários da mistura de combustíveis..... | 74 |
| 4.5.2.1 Cenário 1 – <i>Blend</i> a R\$ 100,00/t..... | 74 |
| 4.5.2.2 Cenário 2 – <i>Blend</i> a R\$ 76,00/t | 75 |
| 4.5.2.3 Cenário 3 – <i>Blend</i> a R\$ 75,00/t | 76 |
| 4.5.2.4 Cenário 4 – <i>Blend</i> a R\$ 17,00/t | 76 |
| 4.5.2.5 Cenário 5 – <i>Blend</i> a R\$ 16,00/t | 77 |
| 4.5.2.6 Cenário 6 – <i>Blend</i> a R\$ 16,00/t e menores valores dos demais combustíveis. ... | 78 |
| 4.5.3.7 Cenário 7 – <i>Blend</i> a R\$ 10,00/t e menores valores dos demais combustíveis. ... | 79 |
| 4.5.3.8 Cenário 8 – <i>Blend</i> a R\$ 86,00/t e maiores valores dos demais combustíveis. ... | 79 |
| 4.5.3.9 Cenário 9 – <i>Blend</i> a R\$ 85,00/t e maiores valores dos demais combustíveis | 80 |
| 4.5.3.10 Cenário 10 – <i>Blend</i> a R\$ 21,00/t e maiores valores dos demais combustíveis. ... | 81 |
| 5 CONCLUSÕES | 83 |
| 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 84 |
| 7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 86 |
| 8 ANEXOS..... | 92 |

1 INTRODUÇÃO

As 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, conforme artigo 9º, 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).

No artigo 54 da mesma lei ainda está previsto que a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, deveria ser implantada até agosto de 2014. Desta forma, todos os lixões do país deveriam ter sido extintos até a referida data. Sendo que aqueles que descumprirem essa determinação e mantiverem lixões a céu aberto, estarão cometendo crime ambiental, passível de multa de até R\$ 50 milhões (BRASIL, 2014).

No entanto, segundo pesquisa divulgada pela Confederação Nacional dos Municípios - CNM, 51,7% dos 4.193 municípios brasileiros entrevistados, ainda descartam os resíduos sólidos em lixões (CNM, 2015).

Desta maneira, para atendimento integral da lei e da sua ordem de prioridade, o panorama ideal seria que todo resíduo passível de reciclagem fosse descartado à parte dos demais, visando facilitar e promover a separação dos mesmos pelos catadores e/ou empresas especializadas, o que infelizmente não ocorre no cenário atual primeiramente devido a um problema cultural, pois ainda há descarte de recicláveis juntamente com os demais resíduos domiciliares (o que poderá ser percebido na análise gravimétrica apresentada posteriormente), inviabilizando assim a reciclagem de grande parte dos mesmos.

Paralelo a este cenário, “a condição de precariedade é estrutural da sustentação econômica do circuito da reciclagem, como corolário da falta de alternativas para os trabalhadores, que a tal condição “devem” se submeter (ROOS, CARVALHAL E RIBEIRO, 2010). Assim a falta de estrutura administrativa e de políticas públicas adequadas para os catadores realizarem a separação e/ou coleta é um fator dificultante e que é facilmente percebido, uma vez que na maioria dos casos, todo o processo é manual, onde necessita-se de um grande número de pessoas e de muitas horas de trabalho para separar poucas toneladas de resíduos.

Nesse contexto, o coprocessamento de resíduos tem se mostrado uma alternativa sustentável de destinação final ambientalmente adequada e correta, que através da mistura e destruição térmica, consiste na substituição de matérias-primas e combustíveis convencionais por uma grande variedade de resíduos, incluindo os *blends*¹, que são misturas preparadas em unidades específicas para esse fim, denominadas popularmente de blendeiras (MALARD, 2016).

O potencial de geração de combustível alternativo por meio desta prática é enorme quando são avaliadas as características dos resíduos gerados no município de Betim. Por exemplo, no ano 2017, no município de Betim, estima-se que serão geradas aproximadamente 100.000 toneladas de resíduos, cerca de 30% desse montante poderia ser direcionado, à produção de combustível alternativo (BETIM, 2015).

Na atual conjuntura da economia brasileira, onde para se manter no mercado as empresas precisam procurar alternativas econômicas para obter maior lucro, a valorização energética é uma saída atrativa para as cimenteiras que precisam manter seus fornos em atividade sem a necessidade de uma alta produção. Isso se dá porque a eficiência energética do combustível alternativo é menor que a dos combustíveis fósseis, porém, seu custo-benefício é melhor nesse cenário econômico.

Nesse contexto o objetivo deste trabalho é avaliar a destinação de resíduos sólidos do município de Betim considerando a ordem de prioridade estabelecida pela Política Nacional de Resíduos Sólidos. Além disso será verificada a existência de viabilidade e potencial de aproveitamento de parte dos resíduos sólidos que atualmente são destinados para aterro sanitário na tecnologia de coprocessamento. Por fim determinar o valor econômico do *blend* de resíduos através de comparativo para utilização em fornos de fabricação de cimento.

A justificativa para a realização dessa pesquisa está na possibilidade de reduzir o montante de resíduos sólidos que são enviados anualmente para aterro sanitário, seja pelo aspecto cultural da sociedade que não separa completamente seus resíduos recicláveis ou pela falta de políticas públicas que atendam melhor aos catadores. Cabe ainda destacar que estes resíduos possuem potencial energético para se transformar em combustíveis substitutos nas fábricas de cimento, reduzindo assim não só o passivo ambiental gerado com aterros, mas também diminuindo o consumo de combustíveis fósseis comumente utilizados nas cimenteiras. Além disso, pretende-se reduzir os custos

¹ Segundo o Art. 14 da Deliberação Normativa COPAM nº 154, "*blend*" é a mistura de resíduos a serem encaminhados para o coprocessamento.

variáveis de uma cimenteira com a substituição de uma fração dos combustíveis fósseis utilizados por combustível alternativo produzido em Unidades de Valorização Energética – UVE's.

Essa pesquisa faz-se uma ferramenta importante para os municípios que poderão realizar destinação sustentável de resíduos visando atender à legislação e também as cimenteiras pois, contribui-se para a redução de custos com a aquisição deste material ao invés de combustíveis fósseis, e dessa forma, tornam-se mais competitivas e economicamente viáveis.

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

É importante ressaltar que uma versão deste trabalho foi vencedora do prêmio CSUL de Qualidade Urbana chancelado pelo União Brasileira para a Qualidade, conforme apêndice deste trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 PROCESSO DE PRODUÇÃO DO CIMENTO

Conforme apresentado em Votorantim Cimentos (*apud* Salomon 2002, p.19), tecnicamente pode-se definir o cimento como sendo um pó fino, com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob a ação de água.

2.1.1 Origem do cimento

Segundo Renó (2007), a palavra cimento é originada do latim “*caementu*”, que designava na velha Roma espécie de pedra natural de rochedos e não esquadrejada. A origem do cimento remonta há cerca de 4500 anos. Os monumentos do antigo Egito já utilizavam uma liga constituída por uma mistura de gesso calcinado.

O grande passo no desenvolvimento do cimento foi dado em 1756 pelo inglês John Smeaton, que conseguiu obter um produto de alta resistência por meio de calcinação de calcários moles e argilosos (PAULA, 2009).

Para cimento.org, 2006 (*apud* Renó, 2007), foi somente em 1824, que o construtor inglês Joseph Aspdin queimou pedras calcárias e argila, e as transformou em um pó fino. Percebeu, assim, que resultava em uma mistura e após a secagem desta, tornava-se tão dura quanto as pedras utilizadas em construções. Tal mistura não se dissolvia em água e foi patenteada pelo construtor no mesmo ano, com o nome de cimento Portland. Nome dado devido a semelhança que o cimento tinha em relação à cor e propriedades de durabilidade e solidez das rochas da ilha britânica de Portland.

Foi com a criatividade de arquitetos e projetistas, com os avançados métodos de cálculo e a genialidade dos construtores que ocorreu o avanço das tecnologias do cimento e do concreto, criando possibilidades do homem transformar o meio em que vive, de acordo com as suas necessidades (RENÓ, 2007).

Ao longo dos anos, aumentou-se a importância deste material, como afirmado por Renó:

A importância desse material aumentou ao longo dos anos extremamente. A partir do concreto simples, passou para concreto armado e finalmente, ao concreto protendido. A descoberta de novos aditivos, como a sílica ativa possibilitou a obtenção de concreto de alto desempenho, com resistência à compressão até 10 vezes superiores às até então admitidas. Obras cada vez mais arrojadas e indispensáveis, que propiciam conforto, bem-estar - barragens, pontes, viadutos, edifícios, estações de tratamento de água, rodovias, portos e aeroportos - e o contínuo surgimento de novos produtos e aplicações fazem do cimento um dos produtos mais consumidos da atualidade. (RENÓ, 2007).

2.1.2 Panorama nacional da indústria do cimento

Segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento – SNIC, o ano de 1926 se constituiu num verdadeiro marco para a indústria do cimento no Brasil. Com a inauguração da Companhia Brasileira de Cimento Portland, em Perus, a 23 quilômetros da cidade de São Paulo. A instalação da nova fábrica representou o início do processo de crescimento da produção brasileira de cimento, que saltou imediatamente de 13.000 toneladas em 1926 para 54.000 em 1927, 88.000 em 1928 e 96.000 em 1929.

A Segunda Guerra Mundial foi um marco para a indústria de cimento. Com as naturais dificuldades de importação, as empresas brasileiras floresceram e registraram um acelerado ritmo de crescimento da produção. O consumo per capita de cimento saltou de 12,9 kg/ano em 1935, para 22,3 kg/ano no fim da guerra e para nada menos do que 67,7 kg/ano em 1962. (SNIC, 2017).

Entre os anos 2000 e 2003, a produção sofreu queda, resultante das sucessivas crises mundiais e, conseqüentemente, instabilidade econômica. Desde 2004, o consumo se estabilizou, indicando o início de uma retomada que culminou, em 2006, com o consumo voltando ao patamar de 40 milhões de toneladas, reflexo da expansão das construções imobiliárias ocorrida em todas as regiões do país, tanto nas capitais quanto no interior (WILLS, 2010). Na Figura 1 é apresentada a produção de cimento no Brasil entre 1970 e 2008:



Figura 1 - Produção anual de cimento no Brasil entre 1970 a 2008 em (106 ton).

Fonte: WILLS, 2010.

O Brasil lidera tanto a produção quanto o consumo na América Latina, sendo responsável por 1,6 % do consumo mundial, mas segundo o SNIC (2009, *apud* WILLS, 2010), se a produção da China fosse excluída, a participação do Brasil alcançaria 3% do mercado mundial. O País está entre os 10 maiores produtores e consumidores mundiais de cimento.

Ainda, Snic (2009, *apud* Wills, 2010) afirma que para suprir o aumento de demanda, em 2008, que apresentou consumo recorde de 51,8 milhões de toneladas (crescimento de 14,4% sobre 2007), as exportações caíram 58%. Atualmente, operam no Brasil 68 fábricas, pertencentes a 10 grupos industriais nacionais e estrangeiros, com capacidade instalada da ordem de 63 milhões t/ano, suficiente para atender à demanda interna. Algumas características específicas da produção do cimento tornam sua logística bastante complexa. Para Wills, 2010:

Trata-se de produto consumido durante o ano inteiro, sem interrupções; deve estar presente em todas as regiões do País, pois é imprescindível em quase todos os tipos de obras; dois terços são distribuídos através da cadeia da revenda; apresenta baixa relação preço/peso; requerer estocagem em condições especiais, pois é perecível e em prazos limitados a poucos dias. Por todos esses motivos, o peso da logística do cimento é maior do que em diversos outros segmentos de bens de consumo. Dessa forma, a localização das fábricas deve se dar a distâncias relativamente pequenas de seu mercado alvo. O modal de transporte mais utilizado pela

indústria é o rodoviário, com 94% do total de cimento transportado, o que, também, contribui para o já citado elevado peso da logística no setor. (WILLS, 2010).

2.1.3 Processo produtivo do cimento

Atualmente são conhecidos quatro tipos principais de processos de produção de cimento: por via úmida, semiúmida, via seca e semi-seca. Nos processos úmidos, a matéria prima é moída simultaneamente com a água, e nos processos secos, a água não é utilizada na moagem, conseqüentemente, a umidade é reduzida, alimentando o forno em forma de pó (WILLS, 2010).

2.1.3.1 Processo via seca

As indústrias brasileiras utilizam atualmente fornos que operam em processo via seca. Neste processo, as matérias-primas são secas e homogeneizadas em um alimentador primário seco. Normalmente são utilizados gases de exaustão do forno para a secagem e pré-aquecimento do cru (RENÓ, 2007).

Inicialmente, foram desenvolvidos sistemas de pré-aquecedores que consistiam em uma série de ciclones. Dentro dos ciclones do pré-aquecedor, a matéria-prima é pré-aquecida e uma parte da calcinação do carbonato de cálcio ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$), ocorre através de transferência de calor com os gases de exaustão do forno, por volta de 800 °C. Em um sistema de pré- calcinador grande parte da calcinação ocorre no pré-calcinador onde são queimados de 50 a 60% do combustível introduzido. O material parcialmente processado entra no forno rotativo relativamente curto, onde acontecem a calcinação final e as reações de formação do clínquer. O consumo específico de combustível em fornos de via seca está em torno de 3500-3800 kJ/kg para fornos equipados com pré-aquecedores de suspensão e 3100-3400 kJ/kg para aqueles equipados com pré-calcinadores. (SALOMON, 2002).

Nos fornos equipados com pré-aquecedores, a farinha é introduzida no sistema em forma pulverulenta, sendo pré-aquecida pelos gases provenientes do forno rotativo até a

temperatura de calcinação em uma torre de ciclones, normalmente de 4 a 6 estágios, no interior da qual a descarbonatação do calcário pode chegar a 50% (RENÓ, 2007). A Figura 2 representa um sistema de pré-aquecedor de suspensão (em amarelo).



Figura 2 - Pré-aquecedor de suspensão.

Fonte: MARINGOLO, 2001 *apud* RENÓ, 2007

Em outra configuração, 90 a 95% da calcinação ocorre num pré-calcinador fixo, construído dentro do tubo de ascensão do forno. O calcinador funciona como um verdadeiro forno, gerando gás a uma temperatura de 850 a 1000°C, promovendo a descarbonatação do calcário rapidamente. O ar para a combustão no calcinador, chamado de ar terciário, é retirado do resfriador através de um duto separado, que é misturado com os gases do forno na entrada do calcinador, antes de ser usado para a combustão. (RENÓ, 2007).

Na figura 3, encontra-se apresentado o modelo de pré-aquecedor (em vermelho) com pré-calcinador (em amarelo).

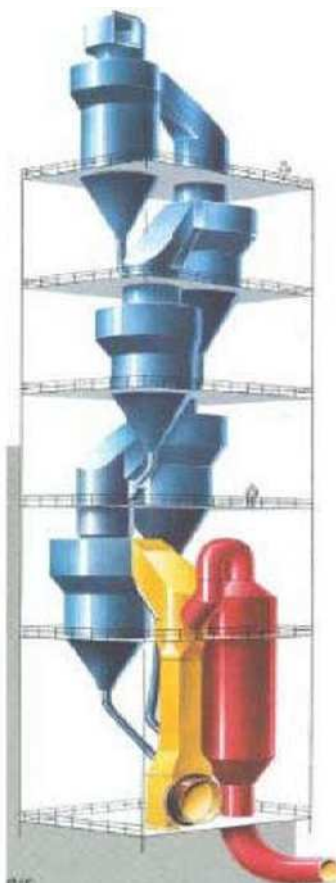


Figura 3 - Pré-aquecedor e pré-calcinador.

Fonte: MARINGOLO, 2001 *apud* RENÓ, 2007

No processo via seca, há um menor consumo de energia, porém um uso mais eficiente, pois a umidade do cru deve ser inferior a 1%, não havendo a necessidade de adicionar calor para evaporar o cru. Como resposta a este aproveitamento do calor nos fornos via seca, estes são mais curtos do que os de via úmida, obtendo perdas de calor menores e uma maior produção, em fornos com mesmo diâmetro e rotação (SALOMON, 2002). As principais vantagens deste processo consistem na possibilidade de utilizar qualquer tipo de combustível sólido, ou um *blend* dos mesmos, para se obter o poder calorífico necessário ao processo e, o baixo consumo específico de calor (CEMBURAU, 1999 *apud* SALOMON, 2002, p.29). O processo de fabricação do cimento pode ser descrito de acordo com as etapas apresentadas na Figura 4 (RENÓ, 2007):

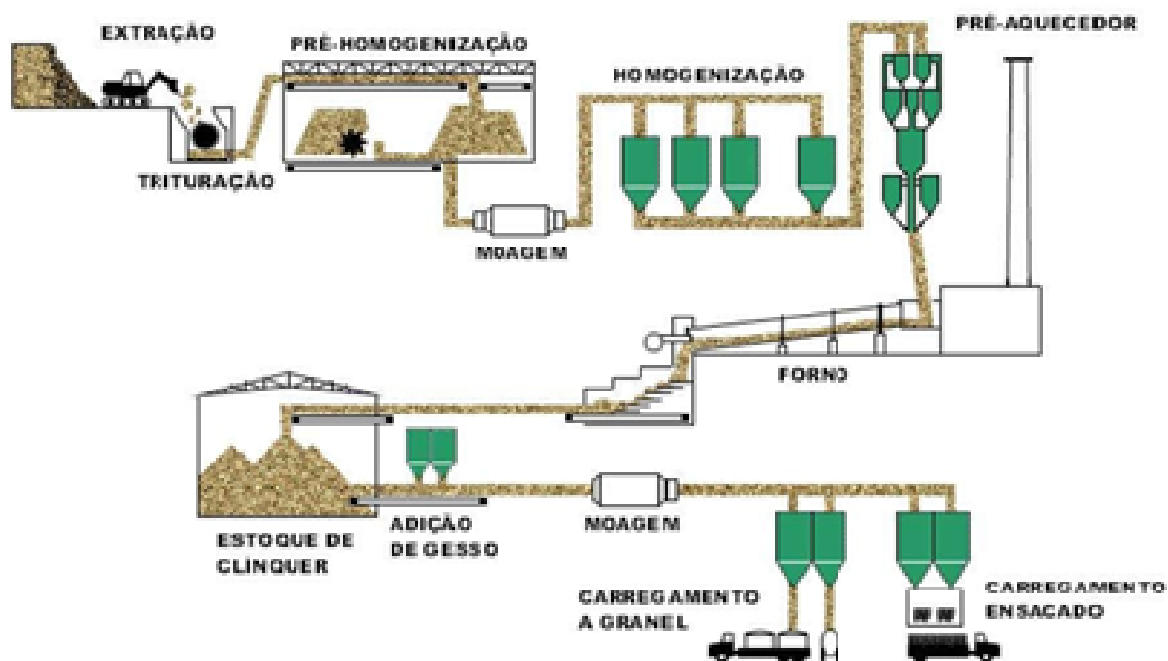


Figura 4 - Esquema das etapas do processo de fabricação do cimento.

Fonte: ceset.unicamp, 2007 *apud* RENÓ 2007.

2.1.3.2 Preparação dos combustíveis

São conhecidos alguns combustíveis convencionais utilizados no processo do clínquer.

Os combustíveis convencionais (fósseis) usados no processo de fabricação do clínquer são, principalmente, os carvões (vegetal e mineral), o coque de petróleo e óleos pesados. O gás natural é pouco utilizado devido a seu alto preço. Atualmente existe a técnica denominada coprocessamento, uma tecnologia capaz de queimar grande parte dos resíduos, gerados pelas indústrias. Nesta técnica, diferentes tipos de resíduos industriais vêm sendo aproveitados na fabricação de cimento, sejam como substitutos das matérias-primas, sejam como substitutos dos combustíveis tradicionais, desde que o resíduo a ser eliminado apresente características similares às dos componentes normalmente empregados na produção do clínquer. (RENÓ, 2007).

2.1.3.3 Queima do clínquer

O clínquer é o principal componente do cimento, é um processo em que haverá um tratamento térmico controlado, e aquecimento a temperaturas de até 1450°C, que irá resultar em reações termoquímicas no cru, dando origem ao clínquer. Neste processo há um consumo de cerca de 80% da energia necessário para a produção do cimento (UTLU, 2006 *apud* RENÓ, 2014). A produção do clínquer é a parte central do processo de fabricação de cimento, sendo a etapa mais complexa e crítica em termos de qualidade e custo. De acordo com Wills, 2010:

No início do processo de fabricação do clínquer, a farinha pré-calcinada é levada ao forno rotativo. Parte das reações de descarbonatação e a formação de silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio ocorrem no interior desse forno. A matéria prima permanece no forno por aproximadamente 4 horas e atinge temperaturas de até 1.450°C (uma menor temperatura produz cal e maior temperatura apenas aumenta o consumo energético). Essa elevada temperatura causa reações químicas e físicas, tornando a mistura incandescente e pastosa, e transformando a farinha em clínquer. A capacidade de produção de um forno médio é 3.000 a 4.000 toneladas por dia (próximo à média brasileira), já os maiores fornos do mundo produzem até 10.000 toneladas por dia. (WILLS, 2010).

O clínquer é um mineral granulado escuro fosco, com propriedades hidráulicas, formado basicamente por quatro compostos cristalinos, responsáveis pela mineralogia, morfologia e características físico-químicas (RENÓ, 2007):

- C_4AF ($Al_2O_3 \cdot 4CaO \cdot Fe_2O_3$) Ferritoaluminato tetracálcico.
- C_3A ($3CaO \cdot Al_2O_3$) Aluminato tricálcico.
- C_2S ($2CaO \cdot SiO_2$) Silicato dicálcico ou belita.
- C_3S ($3CaO \cdot SiO_2$) Silicato tricálcico ou alita.

Na etapa de adição, ocorre a mistura do clínquer com os outros componentes minerais. Todos os tipos de cimento recebem cerca de 4 a 5% de gesso que é utilizado para controlar o tempo da secagem do produto (WILLS, 2010).

Mas o clínquer pode ser misturado a outros componentes, como, por exemplo, resíduos de outras indústrias, porém deve-se seguir um padrão para que um resíduo possa ser empregado como matéria-prima secundária em uma fábrica de cimento, como a compatibilidade com as matérias primas e o clínquer, devem apresentar propriedades estruturais semelhantes às do cimento para garantir uma uniformidade e qualidade ao produto final, e manter ainda um custo competitivo em relação as matérias primas tradicionais. Quando é realizada esta mistura de outros materiais na mistura com o clínquer, o produto é chamado de cimento composto (WILLS, 2010).

2.2 COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS NA INDÚSTRIA DE CIMENTO

Devido ao alto consumo energético na produção de cimentos, a indústria cimenteira sempre se preocupou com a utilização de combustíveis de baixo custo que não comprometessem a qualidade do clínquer formado. Como alternativa para obter-se economia de recursos energéticos é utilizada a técnica de coprocessamento de resíduos industriais, denominados também como combustíveis secundários (CARPIO, 2005).

Figura 5 representa os tipos de combustíveis que são utilizados em fornos de cimento, nela é possível perceber a existência de duas classes os classificados como convencionais e os alternativos.

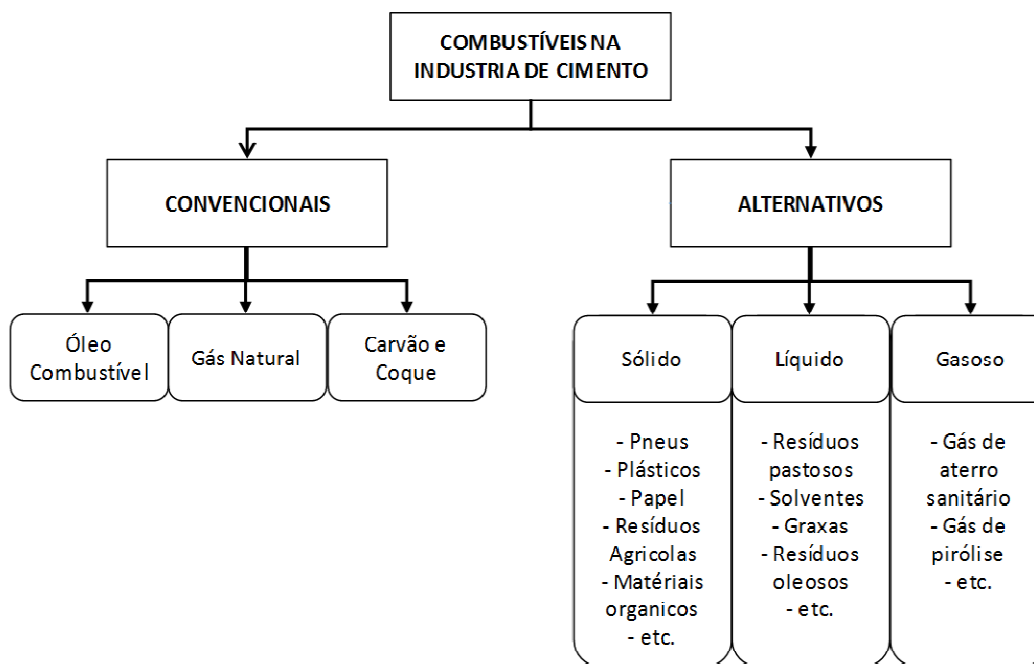


Figura 5 – Combustíveis utilizados na indústria de cimento.

Fonte: Carpio, 2005.

São considerados combustíveis tradicionais utilizados nas indústrias cimenteiras o óleo combustível, o gás natural, o carvão mineral, o carvão vegetal e o coque de petróleo. Eles devem apresentar características específicas de chama e de constituintes, para não afetar a qualidade do clínquer e conseqüentemente do cimento, sendo cuidadosamente selecionados em função de sua composição química elementar, poder calorífico e custo (RENÓ, 2007).

2.2.1 Carvão Mineral

O carvão mineral é formado pela mistura de componentes orgânicos sólidos, fossilizados em um longo período de anos. A quantidade de carbono presente em sua composição determina a sua qualidade, e ele varia dependendo do tipo e estágio dos componentes orgânicos, a seguir estão citados alguns tipos de carvões minerais. (Aneel, 2006 apud Renó, 2007):

- A Turfa apresenta um baixo conteúdo carbonífero, na ordem de 45%, o linhito oferecendo um índice que varia de 60% a 75%;
- O carvão betuminoso (hulha), mais utilizado como combustível, contém cerca de 75% a 85% de carbono;
- O antracito apresenta um conteúdo carbonífero superior a 90%.

Segundo Renó (2007, p. 30):

Os carvões nacionais se assemelham com os carvões da Austrália, Índia, e da Alemanha. Os elevados teores de cinzas dos carvões brasileiros é o principal problema para utilização desses combustíveis. Na maioria dos casos é necessário submetê-los a um beneficiamento com a finalidade de reduzir seu teor de cinzas, antes do mesmo ser enviado para sua aplicação industrial. (RENÓ, 2007).

2.2.2 Carvão Vegetal

O carvão vegetal é produzido, pelo processo de carbonização da lenha em fornos de alvenaria com ciclos de aquecimento e resfriamento que duram vários dias. Os fornos retangulares equipados com sistemas de condensação de vapores e recuperadores de alcatrão são muito utilizados no Brasil. Os fornos cilíndricos com pequena capacidade de produção, sem mecanização e sistemas de recuperação de alcatrão são utilizados em maior quantidade em carvoarias (RENÓ, 2007).

2.2.3 Óleo Combustível

O óleo combustível é um derivado do petróleo, originado da parte remanescente da destilação das frações do petróleo, por meio de processos de refino. Sua composição complexa não depende só do petróleo que o originou, mas também do tipo

de processo e mistura que sofre nas refinarias. Eles são utilizados nas indústrias cimenteiras para o aquecimento de fornos e caldeiras, motores de combustão interna para a geração de calor (RENÓ, 2007).

2.2.4 Coque de Petróleo

O coque de petróleo foi utilizado inicialmente para melhorar as características do carvão mineral. Ele vem sendo consumido pela indústria de cimento desde os anos de 1980. Após 1990 com o desenvolvimento de queimadores especiais foi introduzido como combustível principal, chegando a representar 100% do consumo térmico dos fornos. Ele despertou interesse como combustível por ter características similares e em alguns casos mais vantajosas em relação ao carvão mineral. As principais características são: poder calorífico maior, baixo teor de cinzas, preço competitivo, isso contribuiu para o estudo e avanço da viabilidade deste combustível (CARPIO, 2005). De acordo com Renó:

O enxofre contido no coque reage com o óxido de cálcio, presente em grande quantidade na matéria-prima do cimento para produzir sulfatos e sais, contribuindo para a redução do sulfato de cálcio (gesso) requerido durante a moagem do cimento. Os metais pesados, principalmente vanádio e níquel, quando estão presentes no coque não resultam em grandes problemas para o cimento e são incorporados à estrutura do clínquer. (RENÓ, 2007).

2.2.5 Combustível Alternativo

O Com o alto grau da atividade industrial e a elevação do padrão de vida da sociedade, que é acompanhada pela crescente geração de resíduos que representa um grande problema ambiental, as restrições impostas para o descarte de resíduos tornam-se cada vez mais severas exigindo soluções tecnológicas factíveis para a destinação dos milhares de toneladas. Com isso tem-se a possibilidade de utilizar alguns resíduos

industriais para a fabricação de cimento, como fonte alternativa de matérias-primas secundárias e como combustíveis secundários, os resíduos utilizados em fornos de cimento devem ter características orgânicas que substituam o uso de combustíveis não renováveis e respeitem a classificação de resíduos da norma Brasileira. (CARPIO, 2005).

De acordo com SNIC:

Atualmente, o país tem 35 fábricas com fornos licenciados pelos órgãos ambientais para coprocessar resíduos possuindo capacidade potencial de destruição de 2,5 milhões de toneladas. Só em 2008, a indústria cimenteira nacional deu destinação a cerca de um milhão de toneladas de resíduos (incluindo aproximadamente 33 milhões de pneus inservíveis). A utilização desses resíduos como combustível alternativo já representa hoje uma substituição de 15% de combustíveis fósseis não renováveis. (SNIC, 2009).

A Figura 6 representa a evolução do coprocessamento no Brasil no período de 1999 até 2008.

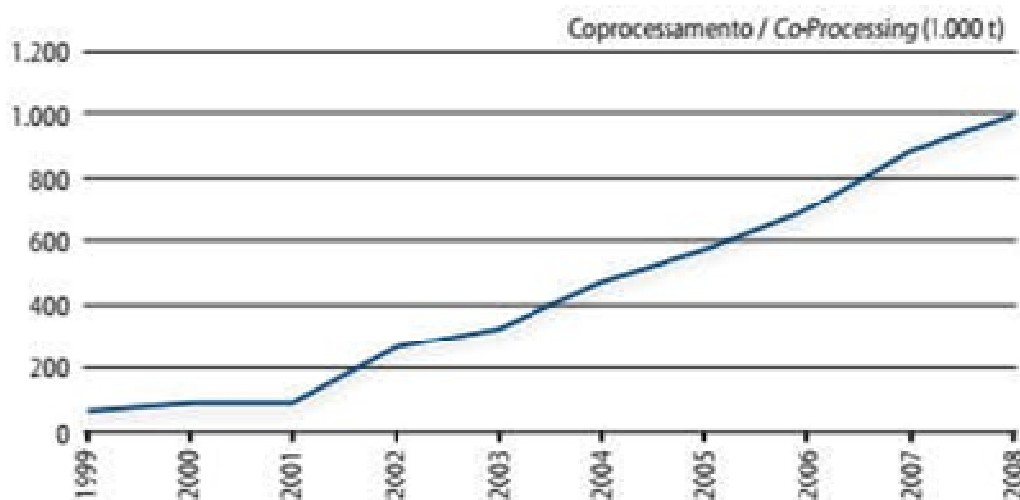


Figura 6 - Evolução do coprocessamento no Brasil.

Fonte: SNIC,2009.

2.2.6 Avaliação do poder calorífico em combustíveis

É importante conhecer a quantidade líquida de energia que é originada por meio da queima de determinado combustível. Para isso é definido o conceito de poder calorífico como a energia (líquida, bruta ou sob outra condição pré-definida) disponível em uma unidade de massa de um combustível (POLI, et al 2013).

De acordo com IPT (2001 *apud* Poli, 2013) o poder calorífico do combustível:

É definido como a quantidade de calor que é transferida de um calorímetro, onde se realiza a combustão completa da unidade de massa ou volume de um combustível, e sendo o combustível e o ar introduzido no calorímetro em combustão padrão (1 atm, 25°C), e os produtos de combustão levados à mesma condição padrão. (IPT, 2001).

A Figura 7 representa o esquema do funcionamento interno do calorímetro.

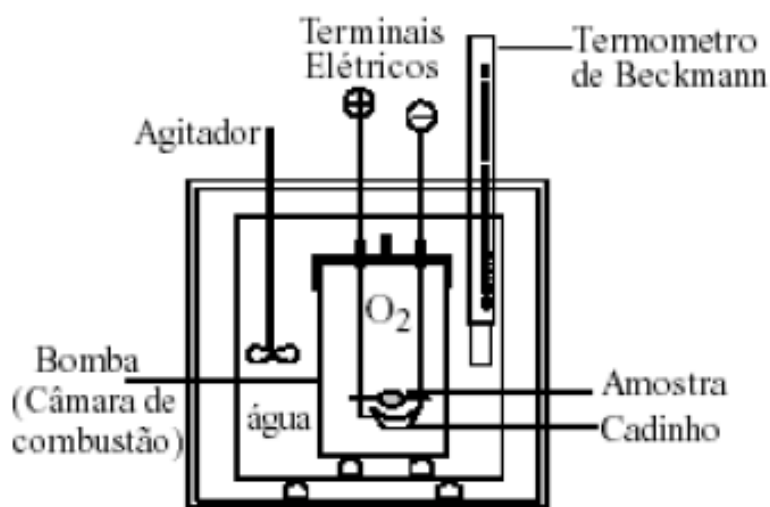


Figura 7 - Esquema de montagem do calorímetro.

Fonte: Revista de ciências exatas e tecnologia, 2014.

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) recomenda seguir as normas ASTM (American Society for Testing Materials) nº D 407-44, D 271-58 e D 240-57 T. 2 para a determinação do poder calorífico de combustíveis sólidos ou

líquidos. De acordo com ASTM (apud DEQ, 2007), tem-se a seguinte definição de poder calorífico superior em volume constante:

Poder Calorífico Superior em Volume Constante (PCSVcte): É a quantidade de calor produzida pela queima completa da unidade de massa de um combustível sólido ou líquido em volume constante, dentro de uma bomba calorimétrica contendo oxigênio com as seguintes condições: pressão inicial do oxigênio de 20 a 40 atm, temperatura final de 20 a 35° C, produtos na forma de cinzas, umidade presente no combustível e água resultante da combustão condensadas (água líquida), SO₂, CO₂ e N₂ gasosos. O valor do PC é dito superior porque se recupera o calor de condensação da água. (ASTM, 2007).

Por meio da bomba calorimétrica tem-se o PC superior em volume constante. No entanto, na prática as combustões em queimadores e caldeiras são realizadas em geral, sob pressão atmosférica e seus produtos são liberados em temperatura na forma que a água está em estado de vapor. Sendo necessário calcular, a partir do PCSvcte obtido pela bomba, o poder calorífico inferior a pressão constante (DEQ-USP, 2007).

De acordo com ASTM (apud DEQ, 2007, p. 11), tem-se a seguinte definição de poder calorífico inferior sob pressão constante:

Poder Calorífico Inferior sob Pressão Constante (PCIpcte): É o poder calorífico para o caso da queima sob pressão constante e com toda a água contida no combustível e formada na combustão se encontrando, ao final, no estado de vapor. O PC é dito inferior porque a água está ao final do experimento está no estado de vapor, e o calor latente de sua condensação não é recuperado. Ele pode ser calculado a partir do PC superior em volume constante. (ASTM, 2007).

Para as indústrias cimenteiras, o estudo do poder calorífico é crucial para o desenvolvimento do processo, pois por meio dele é possível uma melhora considerável da queima do combustível alternativo. Consequentemente, a diminuição da utilização de combustíveis tradicionais reduz a poluição gerada durante o processo de queima.

2.3 COPROCESSAMENTO DE RESÍDUOS

O crescimento populacional mundial coligado ao processo de industrialização, traz a expansão da quantidade de resíduos industriais gerados no mundo, os quais a destinação final compõe um problema que ainda deve ser corrigido. Segundo a Resolução 313 do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA de 2002, resíduo sólido industrial é todo resíduo que resulte de atividades industriais e que se encontre nos estados sólido, semisólido, gasoso - quando contido e líquido - cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgoto ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnicas ou economicamente inviáveis em face de melhor tecnologia disponível (CONAMA, 2002).

As indústrias cimenteiras surgem nessas circunstâncias como uma alternativa para a diminuição da quantidade desses resíduos por meio da técnica do coprocessamento, contribuindo de maneira significativa ao meio ambiente e ainda sendo economicamente viável para a própria empresa, partindo do princípio que este segmento se caracteriza pelo consumo intensivo de energia.

2.3.1 Definição de Coprocessamento

Coprocessamento é a incorporação de resíduos no processo de produção de clínquer, levando a um resultado de destruição térmica eficiente e segura, do ponto de vista operacional e ambiental. É aplicado a resíduos suplentes de matérias primas e combustíveis (TOCCHETTO, 2005).

Em outras palavras o coprocessamento é a técnica de destruição térmica a altas temperaturas em fornos de clínquer devidamente autorizados para este fim, que possuem como característica o aproveitamento de conteúdo energético e também da fração mineral como matéria-prima, sem que ocorra a geração de novos resíduos (SOUZA, 2008).

2.3.2 Classificação dos resíduos

Os resíduos sólidos são classificados no Brasil por meio da ABNT, segundo a norma NBR-10.004 (2004), em três classes:

- Classe I - Resíduos Perigosos: São resíduos que apresentam riscos à saúde pública em função de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.
- Classe II - Resíduos Não Inertes: São aqueles que não apresentam periculosidade, porém não são inertes, podendo apresentar certas propriedades tais como combustibilidade, biodegradabilidade, ou solubilidade em água.
- Classe III - Resíduos Inertes: São aqueles que, ao serem submetidos aos testes de solubilização não apresentam nenhum de seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, ou seja, a água permanecerá potável quando em contato com o resíduo.

2.3.3 Legislação

A utilização da técnica de coprocessar resíduos no estado de Minas Gerais teve início em 1990, e normatizado pela primeira vez em 1998, com a Deliberação Normativa COPAM nº 026. Em abrangência federal foi publicada, em 1999, a Resolução CONAMA nº 264, referente ao licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de coprocessamento de resíduos, com a exceção dos resíduos domiciliares brutos, de serviços de saúde, radioativos, explosivos, organoclorados, agrotóxicos e afins, e também se estabeleceu limites de emissões para material particulado e poluentes.

A Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, que estabelece diretrizes relativas a gestão e gerenciamento de resíduos sólidos. Desta maneira a indústria cimenteira, se apresenta como alternativa ambientalmente segura para estes resíduos.

2.3.3.1 Resíduos que podem ser coprocessados

Existem propriedades dos resíduos industriais que serão utilizados como combustíveis alternativos ou como matéria-prima alternativa que necessitam de análises, tais como: estado físico dos combustíveis (sólido, líquido, gasoso), toxicidade (compostos orgânicos e metais pesado), composição e conteúdo das cinzas, quantidade de voláteis, poder calorífico e conteúdo de umidade (RENÓ, 2007).

É importante o conhecimento dessas propriedades, devido ao fato da qualidade química do combustível alternativo deve estar conforme as leis de proteção ambiental, o poder calorífico deve ser estável suficiente para permitir o controle da alimentação no forno rotativo. A forma física deve ser de fácil manuseio para o transporte a uma planta de cimento (Mokrzycki e Uliasz-Bochenczyk, 2003 apud Renó, 2007). Conhecer a composição dos resíduos industriais também é importante, pela influência delas sobre as propriedades do cimento.

A maior parte dos resíduos são utilizados no forno como combustíveis alternativos devido ao fato de seu poder calorífico inferior ser maior que 7100 kJ/kg. Os resíduos que normalmente são coprocessados (SALOMON, 2002 apud RENÓ, 2007):

- Óleos usados, incluindo de uso lubrificante;
- Terra contaminada com óleos e graxas;
- Resíduos oleoso
- Resíduo oleoso (panos, cavaco, serragem, vegetação com impregnação de óleo e água, de ar, papel toalha com óleo, etc), lodo oleoso, borra de óleo, areia com óleo, borra de retífica, óleo solúvel, óleos em emulsão, óleo sujo, resíduo de graxa, graxa usada, manta filtrante (filtro de óleo), etc;
- Óleo usado, incluindo o de uso lubrificante;
- Terra contaminada com óleo graxo (mix com ácidos graxos), terra contaminada com óleo (combustível, lubrificante), resíduo oleoso (panos, cavaco, serragem, vegetação com impregnação de óleo e água, de ar, papel toalha com óleo, EPI's com óleo, etc), lodo oleoso, borra de óleo, areia com óleo, borra de retífica, óleo

solúvel, óleos em emulsão, óleo sujo, resíduo de graxa, graxa usada, manta filtrante (filtro de óleo), etc.

- Sólidos da emulsão de óleo residual das indústrias de refinação de petróleo;
- Resíduos de limpeza:
 - com solvente na fabricação de tintas;
 - com água ou materiais cáusticos na fabricação de tintas.
- Lodos de tratamento de águas residuais da produção de tintas;
- Borra neutra do re-refino de óleos usados;
- Resíduos sólidos compostos de metais não tóxicos;
- Torta de cromatação, panos do filtro prensa, borra de lavagem, lodo de ETE, lodo galvânico, lodo de fosfato (borra de fosfato de Zn), lama de fosfato, etc.
- Lodo biológico;
- Areia de fundição;
- Escória de fundição de alumínio, ferro, aço e zinco;
- Resíduo de refratários e materiais cerâmicos;
- Resíduos de minerais não metálicos;
- Resíduos de papel, papelão, plástico polimerizado e materiais têxteis;
- Cabo óptico, bombonas plásticas vazias;
- Resíduos de varrição;
- Resíduos gerados fora do processamento industrial e outros resíduos;
- Lodo de estações de tratamento de efluentes líquidos e de tratamento de água;
- Lodos de fundo de tanque de tratamento superficial com cianeto, provenientes de operações;

- Soluções de cianetos exauridos, provenientes da limpeza de cadinhos de banho salino, das operações de tratamento térmico de metais;
- Lodo de alcatrão do tanque de decantação, utilizado no sistema de tratamento de gases de coqueria;
- Resíduo de lavagem ácida do benzeno, originário da destilação do alcatrão de coque;
- Lodos de tratamento de águas residuárias provenientes de banho de têmpera, das operações de tratamento térmico de metais, dos processos onde os cianetos são utilizados;
- Resíduos resultantes da incineração ou tratamento térmico de solo contaminado;
- Resíduos e lodos de tinta e lodos do sistema de tratamento de águas residuárias da pintura industrial;
- Borra de tinta, resíduo de pintura, tinta em pó, filtros da cabine de pintura, lodo de impressão, lodo de tinturaria, mix de tintas com solventes, resíduo de base aquosa de tinta, remanescentes de tintas e solventes, resíduo multiciclone (fuligem);
- Lodos e lavagens com solvente, lodos e lavagens alcalinas, ou lodos e lavagens aquosas da limpeza de tubulação e equipamentos usados na formulação de tintas a partir de pigmentos, secantes, sabões, e/ou estabilizantes contendo cromo ou chumbo;
- Borra ácida originada do re-refino de óleos usados;
- Resíduos de fundo e frações de destilação da produção de acetaldeído a partir do etileno;
- Solventes:
 - Emulsão asfáltica (em solvente), asfalto com redutor, solvente parafínico com tinta, solventes, solventes sujos, solvente com água, borra (em meio líquido) de percloroetileno, mix de resinas com solventes, Trietileno glicol.

Além destes vários outros resíduos de vários outros processos também podem ser coprocessados.

2.3.3.2 Resíduos que não podem ser coprocessados

De acordo com as normas, fatores econômicos e ambientais, as cimenteiras não queimam resíduos corrosivos, reativos ou tóxicos. Dentre os resíduos que não podem passar pela técnica de coprocessamento estão: resíduos hospitalares não-tratados, lixo doméstico não-classificado, explosivos, elementos radioativos, pesticidas, fossas orgânicas, materiais com alto teor de metais pesados, materiais com alto teor de cloro, materiais com baixo poder calorífico ou sem contribuição na substituição de matérias-primas (SOUZA, 2008).

2.3.4 Vantagens da Utilização da Técnica de Coprocessamento

Segundo Renó (2007), o coprocessamento de resíduos industriais nos fornos de clínquer apresentam várias vantagens, algumas delas são:

- Altas temperaturas: os fornos de clínquer tem uma temperatura máxima de 1450°C, podendo chegar a 2000°C na zona de queima do combustível no forno e 1100°C no pré-calcinador, garantindo desta forma alta taxa de destruição dos resíduos pelas altas temperaturas;
- Inércia térmica elevada: as emissões que resultam das paradas dos fornos, não ocorrem nos fornos de cimento, devido ao fato de se ter uma elevada inércia térmica, que se deve pela quantidade ampla de matéria-prima no interior do forno. Dessa forma, retarda a diminuição da temperatura quando ocorrem paradas momentâneas ou alterações operacionais no forno;
- Meio alcalino: Devido à presença de calcário na matéria-prima, o interior do forno de cimento torna-se alcalino. Dessa maneira, os gases e os vapores ácidos, como o

dióxido de carbono (CO_2), dióxido de enxofre (SO_2), ácido clorídrico (HCl) e ácido fluorídrico (HF) são neutralizados e em grande parte absorvidos pelo clínquer;

- **Metais pesados:** Devido ao forno apresentar um meio alcalino, os metais pesados que estão presentes nos resíduos têm um ambiente químico ótimo para serem absorvidos pelo clínquer. Desse modo as taxas de absorção dos metais pesados são de um modo geral bastante elevada.

De modo geral, os benefícios com a utilização do método são: eliminação definitiva, técnica e ambientalmente segura dos resíduos, substituição de recursos energéticos não renováveis, ferramenta sustentável para gestão de resíduos, preservação de jazidas, redução da pegada ambiental das atividades extrativas, destruição dos pneus velhos hospedeiros dos mosquitos da dengue, redução das emissões de CO_2 e geração de resíduos (ABCP, 2015).

Através da Figura 8 pode ser feita uma comparação entre os métodos de disposição de resíduos, bem como nota se uma das principais vantagens com a utilização do coprocessamento no tratamento de resíduos industriais.



Figura 8 - Alternativas de disposição de resíduos.

Fonte: Kihara, 2009.

2.3.4.1 Comparação com o método de incineração

Entre as tecnologias “permanentes” de tratamento, os sistemas de incineração são os que mais destroem e possuem controle da maior diversidade de resíduos. Incineração é um processo da engenharia que emprega a destruição térmica através da oxidação a alta temperatura (MARINGOLO, 2001).

De acordo com Lima e Ferreira (2007), em se tratando de fatores econômicos, a incineração foi o método de maior valor com média de R\$ 1.800,00 por tonelada, e quando usada deve conter todas as medidas e dispositivos de controle referente ao lançamento de gases a fim de não gerar outra degradação. Através do método de coprocessamento, a média pelas empresas pesquisadas é de R\$775,00 por tonelada, no qual a variação de valor é de acordo a cada material, deste modo é o método mais utilizado por ocasionar destruição total do resíduo, não gera passivo ambiental, diferentemente da incineração em que junto a destruição gera um alto teor de cinzas.

O método de incineração consiste no processo de oxidação térmica sob alta temperatura no qual ocorre a decomposição do resíduo, transformando-o em duas fases uma gasosa e outra sólida. A incineração possui o objetivo de reduzir o volume, peso ou eliminar resíduos, as cinzas geradas devem ser devidamente dispostas em aterros industriais se forem identificadas provenientes de resíduos de alta periculosidade. Dessa maneira, o resíduo a ser incinerado deve ser conhecido, por ocorrer poluição dos gases gerados, tendo todas as medidas e dispositivos de controle (LIMA e FERREIRA, 2007).

2.3.4.2 Comparação com aterros

O tratamento por acondicionamento em aterro é mais barato se comparado ao método de coprocessamento, mas é possível observar que é menos usado caindo até em desuso, por não destruir totalmente o resíduo apenas acondiciona, e não deixa de criar um passivo ambiental (LIMA e FERREIRA, 2007).

Segundo Lima e Ferreira (2007), aterros controlados produzem, em geral, poluição localizada, similar ao aterro sanitário, a abrangência da área de disposição é reduzida. Todavia, normalmente não dispõe de impermeabilização de base fato que compromete a qualidade das águas subterrâneas e não possui sistemas de tratamento de

chorume ou de dispersão dos gases gerados. Este método é preferível ao lixão, porém, devido aos problemas ambientais que causa e aos seus custos de operação, a qualidade é inferior ao aterro sanitário e principalmente ao coprocessamento que possui característica de não gerar passivos ambientais.

Na Figura 9, observa-se a hierarquia de sustentabilidade no tratamento de resíduos bem como o posicionamento do método de coprocessamento, incineração e disposição em aterro controlado. Esta hierarquia de destinação está diretamente relacionada com a PNRS e com a sua ordem de prioridade na destinação de resíduos.



Figura 9 - Hierarquia de sustentabilidade no tratamento de resíduos sólidos.

Fonte: Kihara, 2009.

2.4 UNIDADES DE PRODUÇÃO DE *BLEND*

Segundo a Deliberação Normativa COPAM nº 154, as Unidades de Mistura e Pré-condicionamento de Resíduos, “são unidades onde se realiza o preparo e/ou mistura de resíduos oriundos de diversos processos industriais, resultando em produtos com determinadas características, para serem utilizados no coprocessamento em fornos de clínquer.”

De acordo com Pereira, Carvalho e Rodrigues (2015), “os resíduos destinados por clientes de diversos setores industriais, vão para UVE’s, onde são triados. Os resíduos que atenderem aos parâmetros predefinidos serão processados, gerando o combustível alternativo que é enviado para queima em fornos de cimento”.

Estas unidades possuem a seguinte estrutura para realizar o processamento de resíduos:

- Equipamentos
 - Pré-triturador – Realizar a trituração dos resíduos, reduzindo assim seu tamanho. Possui Capacidade média de 5 t/h de resíduos à 50mm;
 - Peneira rotativa – Realiza a classificação por tamanho dos resíduos;
 - Extrator de metais ferrosos – Retira metais ferrosos inclusos nos resíduos;
 - Transportadores de correias – Conduz os resíduos através do processo de trituração e peneiramento;
 - Escavadeira Hidráulica – Realiza a alimentação do pré-triturador;
 - Empilhadeira – Realiza a descarga das cargas acondicionadas em tambores.
 - Pá carregadeira – Realiza a movimentação e auxilia na mistura de resíduos.

- Galpão
 - Área fechada de 1980m²;
 - 4 Baias negativas com 106 m³ cada;
 - Piso impermeabilizado para resíduos classe I;
 - Sistema de combate a incêndio com hidrantes e caixa de 20.000 l.

Encontra-se apresentado na figura 10, a estrutura de equipamentos da Unidade de Valorização Energética da Essencis MG, que é uma empresa de Soluções Ambientais, situada em Betim.



Figura 10 – Unidade de Valorização Energética da Essencis MG Soluções Ambientais S/A.

Fonte: Essencis MG Soluções Ambientais, 2013.

2.5 OTIMIZAÇÃO

Otimização, na engenharia de processos, consiste no aprimoramento aspectos existentes e/ou projeta parâmetros novos que possibilitem maior eficiência e menor custo das operações, maximizando ou minimizando funções objetivo de determinadas variáveis na existência ou não de restrições, de forma que não haja a necessidade da aplicação de todas as opções envolvidas. Sua implementação é benéfica por reduzir o tempo dedicado ao projeto e possibilitar o domínio simultâneo de variáveis e restrições (CARPIO, 2005).

Otimizar está relacionado a tornar ou buscar o ótimo e otimização se refere a busca da solução ótima, ao campo da matemática que desenvolve métodos eficientes para a determinação de extremos nas funções que apresentam uma ou mais variáveis (PERLINGEIRO, 2006).

Os problemas de otimização buscam desenvolver a solução ótima, que é a melhor das soluções para os projetos. Dentro de tais projetos existem subproblemas de níveis estrutural e paramétrico, que são resolvidos de forma conjunta. Em nível estrutural

(síntese) são geradas sucessivamente estruturas ótimas para o sistema, cujo desempenho ótimo é superior ao de qualquer outra estrutura; em nível paramétrico (análise) é determinado o desempenho ótimo de cada uma das estruturas por meio de variáveis cujos valores correspondem ao lucro máximo ou custo mínimo destas (PERLINGEIRO, 2006).

A análise de processos industriais tem como objetivo prever e avaliar os comportamentos físicos e econômicos de um determinado processo. São realizadas previsões econômicas que antecipam a lucratividade do processo, por meio de modelos matemáticos, e avaliações que verificam se essa lucratividade prevista atende suas especificações e justifica seu desenvolvimento e operação, até mesmo em condições adversas. As etapas que compreendem o desenvolvimento da análise de processos são etapas preparatórias de reconhecimento do processo, modelagem matemática e estimativa das propriedades físicas e coeficientes técnicos; e etapas executivas de dimensionamento (equipamentos, consumo de matéria-prima, insumos, condições das correntes) e simulação (PERLINGEIRO, 2006).

Na resolução de problemas de dimensionamento pode-se ter três tipos de situações diferentes:

- Problema não admite solução: situação na qual as metas do projeto são em quantidade excessiva ou inconsistentes;
- Problema admite uma única solução: situação na qual as metas do projeto são consistentes, mas não deixam graus de liberdade;
- Problema admite mais de uma solução: situação na qual as metas do projeto são insuficientes, deixando margem a graus de liberdade; e nessa situação busca-se a melhor dentre as soluções viáveis, que é a solução ótima (PERLINGEIRO, 2006).

2.5.1 Modelos de Otimização e Simulação

Modelos de otimização são modelos prescritivos que recomendam decisões e/ou alternativas. Já os modelos de simulação são modelos descritivos que avaliam decisões específicas (GOMIDE, 2016).

2.5.2 Formulação do modelo matemático de otimização

A construção de um modelo matemático de otimização deve ser feita descrevendo-se de forma detalhada os detalhes do problema a ser tratado, identificando-se a classe do modelo mais apropriado e por fim definindo-se as variáveis e funções, com simplificações se necessário. A Figura 11 demonstra o processo de construção de um modelo matemático de otimização (RANGEL, 2015).

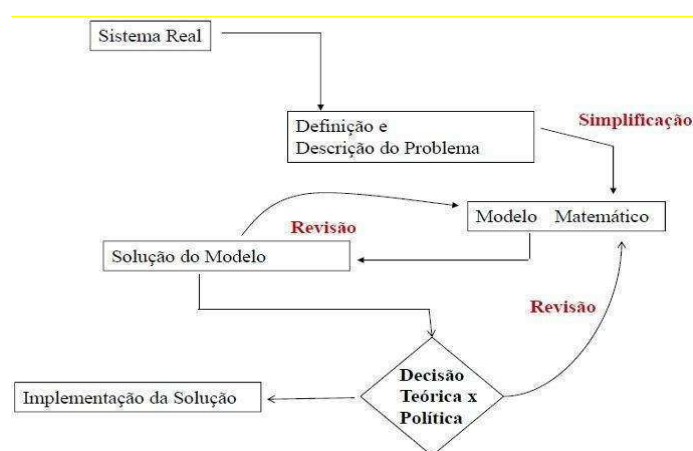


Figura 11 - Processo de construção de um modelo matemático.

Fonte: Rangel, 2015.

As técnicas clássicas de otimização (determinísticas) são utilizadas na área da engenharia e de outras ciências devido a sua confiabilidade aplicação em diversos segmentos. Segundo Ribeiro Filho et al. (1994 apud Carpio, 2005) existem três métodos para solução de problemas de otimização: métodos baseados em Cálculo, métodos estocásticos e métodos enumerativos.

Estão relacionadas à presença de limitantes do problema a otimização restrita de métodos indiretos (métodos sequenciais) e diretos (programação linear, que é o caso deste estudo) e também a otimização irrestrita. Relacionado ao número de variáveis, os métodos determinísticos não-lineares podem ser diferenciados em funções de uma única variável, nas quais são utilizados métodos de busca unidimensional (Método de Fibonacci); e funções de várias variáveis, nas quais são utilizados métodos de primeira ordem baseados no cálculo do gradiente de primeira derivada, métodos de segunda ordem baseados no cálculo de matriz Hessiana de segunda derivada e métodos Quase-Newton baseados no cálculo de matriz pseudo-Hessiana. O esquema da Figura 12 indica as técnicas de otimização relacionadas a cada método (CARPIO, 2005).

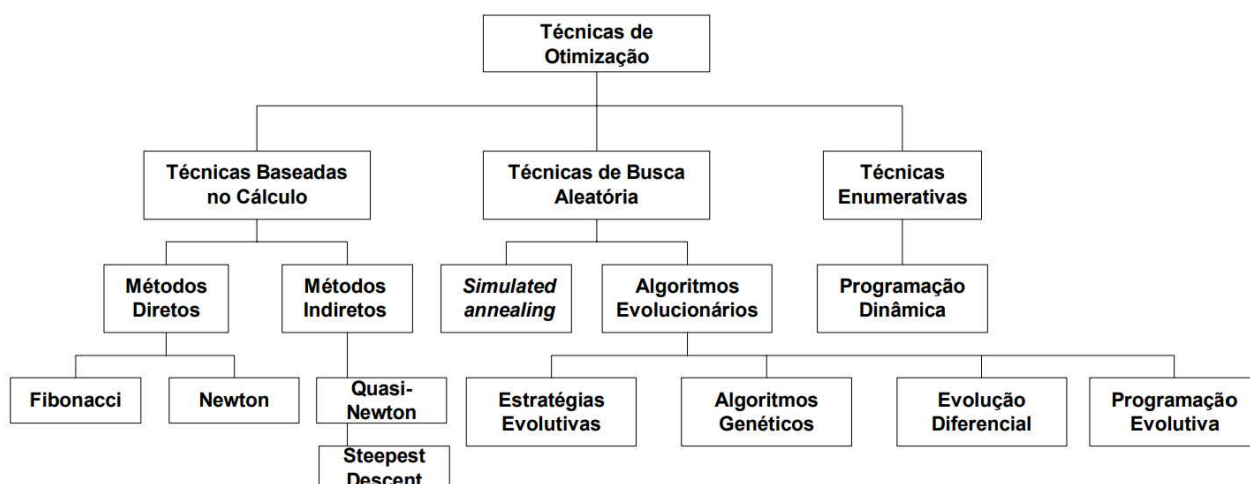


Figura 12 – Técnicas de Otimização.

Fonte: Carpio, 2005.

2.5.2.1 Etapas de modelagem

São etapas de modelagem dos modelos de otimização: formular o problema, observar o sistema, formular o modelo matemático, verificar o modelo, selecionar a alternativa apropriada, apresentar os resultados, e por fim avaliar e implementar as recomendações (GOMIDE, 2016).

2.5.2.2 Variáveis de decisão

Em problemas de otimização as variáveis de decisão são variáveis independentes que, quando manipuladas, alcançam a solução ótima. Na engenharia de processos tais variáveis são definidas como variáveis de projeto, escolhidas dentre as não- especificadas e correspondem ao número de graus de liberdade do problema. A escolha de determinada variável influencia no esforço computacional, mas a solução ótima permanece a mesma (PERLINGEIRO, 2006).

2.5.2.3 Função objetivo

Função objetivo é a expressão matemática do critério que avalia as variáveis do sistema, sendo capaz de indicar se uma decisão é preferível a outras e sua probabilidade de sucesso na resolução do problema. Os problemas de otimização podem ser resolvidos avaliando-se as três principais características da função objetivo: continuidade, modalidade e convexidade (PERLINGEIRO, 2006).

Relacionada à continuidade pode-se caracterizar a função objetivo como:

- Contínua: quando $y(x) = \lim_{h \rightarrow 0} y(x + h)$, quando $h \rightarrow 0$, oferece menos problemas na busca do ponto extremo quando comparada as demais, pode apresentar problemas na sua derivada aplicada na busca do ótimo;
- Descontínua: quando a função oferece dois valores distintos para a mesma variável de decisão, oferece dificuldades na busca do ótimo;
- Discreta: descontinuidade na qual a variável de decisão assume apenas valores discretos, são utilizados métodos de otimização discreta ou contínua nos quais o valor discreto é definido como o mais próximo da solução (PERLINGEIRO, 2006).

A função objetivo pode ser unimodal, por apresentar apenas um valor extremo de máximo ou mínimo, ou multimodal, por apresentar um valor extremo global e os demais valores extremos locais. A multimodalidade é vista como dificultadora nos problemas de otimização por poder convergir para extremos locais e não globais, que são os desejáveis (PERLINGEIRO, 2006).

A convexidade é característica de algumas funções unimodais. Para situações de única variável de decisão, avaliando-se o sinal da segunda derivada da função no ponto ótimo, a função será convexa para o ponto positivo e côncava para o ponto negativo. Já para situações de várias variáveis, a convexidade é analisada por meio dos valores da matriz Hessiana $H(x)$ da função, formada por elementos das segundas derivadas da função (PERLINGEIRO, 2006).

2.5.3.4 Restrições

As restrições são definidas como limites que ditam o comportamento do sistema e podem ser classificadas como restrições de igualdade ou de desigualdade. As restrições de igualdade, representadas como $h(x) = 0$, são equações do modelo matemático do processo. Já as restrições de desigualdade, representadas como $g(x) \leq 0$ ou g limites físicos das variáveis do projeto. A formulação do problema de otimização para minimização, por exemplo, de acordo com as restrições, se dá por:

$$\text{Min } f(x)$$

$$(x)$$

$$\text{s.a.: } g(x) \leq 0$$

$$h(x) = 0$$

Que significa “minimizar a função f em relação a x sujeito às restrições $g(x)$ e $h(x)$ ”. Durante a resolução do problema, tais restrições são condições que as variáveis podem assumir (PERLINGEIRO, 2006).

2.5.4 Modelos de Otimização de Combustível Alternativo

O modelo de otimização desenvolvido por Pereira, Carvalho e Rodrigues (2014) determina a combinação ótima de resíduos que otimiza a quantidade de combustível alternativo produzido para uso em fornos clínquer. A modelagem empregada pelos autores incorpora as restrições físico-químicas do combustível alternativo impostas pelas cimenteiras

O presente modelo apresentado neste trabalho tem por objetivo determinar o valor do *blend* de resíduos através de comparativo para utilização em fornos de fabricação de cimento. Desta maneira levará em consideração os preços de mercado, o PCS e as restrições operacionais para alimentação no forno. Deste modo determinará o valor do *blend* em casa cenário apresentado.

2.6 OUTROS TRABALHOS SOBRE COMBUSTÍVEIS COM RSU

2.6.1 Caso de Cantagalo/RJ

Existe um potencial de aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos não só no Brasil, mas no mundo. Kihara, 2009, exemplifica o projeto executado entre uma parceria da prefeitura de Cantagalo/RJ e a cimenteira Lafarge na época. Neste projeto o resíduo era coletado, transportado para usina e triado. Após os resíduos eram separados para quatro tecnologias seguindo a ordem de destinação:

- 1 – Reciclagem
- 2 – Compostagem
- 3 – Coprocessamento
- 4 – Aterro sanitário

Kihara aponta como resultados deste projeto:

- Modelo positivo de parceria entre entidade pública e iniciativa privada;
- Substituição de combustíveis fósseis e não renováveis por energia alternativa;
- Diminuição do Impacto Ambiental gerado pelo aterro de resíduo urbano.

Além destes, aponta como oportunidades:

- Redução do impacto ambiental das áreas de disposição de resíduos;
- Redução do passivo ambiental dos aterros;
- Aproveitamento de grandes volumes de resíduos através de uma política de valorização pelo estímulo à reciclagem e ao coprocessamento;
- Aproveitamento do resíduo urbano como insumo energético.

Por fim, trata como desafios os seguintes pontos:

- Elaboração de legislação específica para coprocessamento de resíduo urbano;
- Incentivo aos municípios para adoção de soluções mais sustentáveis;
- Participação efetiva dos municípios na implantação de áreas de triagem e na organização da cadeia de recicladores e catadores;
- Equacionamento econômico dos investimentos necessários com as tecnologias existentes.

Desta maneira, bem como neste trabalho, as avaliações acerca do coprocessamento de resíduos sólidos urbanos são positivas. Fica evidente que existem benefícios no uso desta técnica apesar da necessidade de desenvolvimento de legislação específica para este fim.

2.6.2 Tecnologias de Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos

No trabalho apresentado por Bastos (2013), são abordadas “três tecnologias de aproveitamento energético de resíduos sólidos – a combustão convencional, a digestão anaeróbica e a gaseificação. O trabalho atentou para o funcionamento destas tecnologias e para os fatores que afetam sua operação, eficiência e viabilidade econômica”. Ainda neste contexto, Bastos apresenta casos de geração de energia a partir do lixo, o primeiro na China (tecnologia de combustão convencional) e outro na Espanha (digestão anaeróbica).

Concluída a explanação do assunto, foi feita uma avaliação energética de três práticas de gerenciamento, levando-se em consideração o lixo produzido no Brasil e analisou-se o potencial de cada prática, tendo em vista a fração de lixo cabível a cada uma.

Após realizar a análise de viabilidade de cada uma das tecnologias e cenários propostos Bastos (2013), conclui que “A composição dos resíduos sólidos urbanos é de grande importância para a viabilidade técnica e econômica das usinas Waste-to-Energy. O conhecimento da composição do lixo permitiria, portanto, a escolha do tratamento adequado a cada caso, auxiliando o processo pré-decisório”.

Quanto a “combustão à queima direta de resíduos sólidos pós-reciclagem representa a opção mais madura a nível mundial, provada técnica e comercialmente; ela é a mais simples e barata opção de aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos”. (BASTOS, 2013)

Também é madura a digestão anaeróbica, que trata a fração orgânica do lixo. O desempenho desta tecnologia está diretamente relacionado à composição do insumo que entra no digestor, às condições criadas dentro do digestor e à eficiência do dispositivo conversor.

Já a “gaseificação (tratamento térmico avançado do lixo) ainda não está comercialmente estabelecida a nível mundial, e precisa do sucesso de demonstrações em escala comercial para confirmar a habilidade de tratar grandes quantidades de lixo de forma confiável, durante longo período de tempo”. (BASTOS, 2013)

Um grande problema identificado em todas as tecnologias é o custo pois:

Custos altos ainda são empecilhos à adoção das tecnologias de recuperação de energia dos resíduos. A viabilidade econômica depende de diversos fatores, como incentivo de governos, receita recebida pelo lixo tratado, etc., fazendo-a possível somente em lugares específicos, que possuam um ambiente favorável à adoção daquelas tecnologias. (BASTOS, 2013).

Por fim, Bastos Concluí que:

“O gerenciamento ótimo dos resíduos ocorrerá quando as diversas práticas estiverem integradas. Como consequência, haveria o aumento do valor energético dos resíduos sólidos enviados aos processos de conversão energética. O gerenciamento ótimo e a conscientização da sociedade precisam ser “empregados” para que este problema comece a ser confrontado. A adoção das práticas de gerenciamento dos resíduos sólidos é fundamental para o desenvolvimento sustentável da sociedade”. (BASTOS, 2013).

2.6.3 Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos: Uma Abordagem Tecnológica

De acordo com Henriques (2004), a crescente produção de resíduos é um fator de grande preocupação uma vez que a maioria é descartada em lixões, o que gera a emissão de gás metano, o que contribui para o aumento do efeito estufa. Diante deste cenário é primordial encontrar alternativas para a disposição destes resíduos. De acordo com a autora, a coleta seletiva e a reciclagem não são eficientes devido a sua pequena escala. Assim, surge a necessidade de aproveitamento dos resíduos de alto potencial energético, para tanto foram analisadas as alternativas:

Para os lixões que assim já se encontram, uma alternativa seria a utilização do biogás, sendo que a mesma pode ser utilizada para vários fins. Esta tecnologia se torna atrativa apesar da ineficiência da planta e dos altos custos de *up grade*, por já existirem inúmeros lixões no país emitindo gás de forma descontrolada podendo ter seu

aproveitamento imediato, bem como a conversão em energia possibilita a recuperação do capital e incrementa a viabilidade econômica.

Foi analisada a tecnologia de digestão anaeróbica acelerada, sendo que esta possui a vantagem de gerar subproduto um composto orgânico, sendo que os impactos ambientais irão variar com a tecnologia adotada. A quantidade de água existente deve ser observada, quanto mais existir, mais energia será necessária para a secagem do composto orgânico, bem como o excedente disponível será menor para a comercialização. (HENRIQUE, 2004).

A outra forma avaliada foi a incineração dos resíduos, e dentre as três abordadas esta se mostra de maior eficiência na conversão energética, tendo ainda capacidade de diminuir o volume dos resíduos destinados à aterros sanitários, fazendo com que estes aumentem suas vidas úteis. Porém esta técnica a princípio não é considerada ambientalmente a mais correta, no entanto, vem-se aprimorando de forma com que os gases da combustão atendam às exigências legais. (HENRIQUE, 2004).

3 METODOLOGIA

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

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 visa produzir informações numéricas, que, posteriormente, serão utilizadas para a tomada de decisão (RODRIGUES, 2007).

3.2 COLETA DOS DADOS DA PESQUISA

Em relação à coleta de dados, a pesquisa possui características documentais, pois foram considerados dados das seguintes instituições:

- Dados do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do Município de Betim;
- Dados de relatórios de expedição de uma Associação de Catadores de Papel – ASCAPEL, do município de Betim;
- Análises e dados laboratoriais e da Essencis MG Soluções Ambientais S/A;
- Dados de relatórios de controle de uma Fábrica de Cimento bem como orçamentos/Cotações de combustíveis utilizados na mesma Fábrica de Cimento.

Todas estas instituições estão situadas na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH). Destaca-se que essa investigação é um estudo de caso. Logo, os resultados não são totalmente passíveis de generalização.

3.3 MÉTODO DE PREPARAÇÃO E ANÁLISE DOS RESÍDUOS

3.3.1 Preparação de amostra

O primeiro passo para a determinação dos parâmetros de qualidade dos resíduos que serão enviados para valorização energética é a coleta e preparação de amostras.

No exemplo a ser abordado, foram coletadas amostras individuais e compostas dos resíduos para análise. Nestes casos os resíduos são primeiramente triturados em um triturador de bancada para redução do seu tamanho. O método de análise foi conforme a NBR 10.007 que trata de amostragem de resíduos sólidos. Na figura 13, encontra-se apresentado o triturador de bancada TBS – 215 x 405 1E, da Bruno Industrial, utilizado pela empresa para realização desta atividade.



Figura 13 - Triturador de Bancada marca Bruno Industrial modelo TBS – 215 x 405 1E.

Fonte: Laboratório Físico da Essencis Soluções Ambientais S/A

Ao fim da trituração, os resíduos ganham um aspecto mais homogêneo, mas ainda grosseiro para realização de análises. Após isso a amostra dos resíduos é quarteada conforme NBR 10.007 para redução da massa a ser alocada na panela do moinho. Na figura 14 encontra-se apresentada a ferramenta utilizada para realização desta etapa.



Figura 14 - Quarteamento de amostras para pulverização.

Fonte: Laboratório Físico da Essencis Soluções Ambientais S/A

Este processo é determinado pela NBR 10.007 e visa garantir que a amostra seja representativa, ou seja, que uma “parcela do resíduo a ser estudada, obtida através de um processo de amostragem, e que, quando analisada, apresenta as mesmas características e propriedades da massa total do resíduo. ”

O último passo para a preparação de amostra é a pulverização. Na figura 15 encontra-se apresentado o moinho de panelas i-4227 da Contenco, utilizado para realização deste passo.



Figura 15 - Moinho de Panelas marca Contenco modelo I-4227.

Fonte: Laboratório Físico da Essencis Soluções Ambientais S/A

Neste momento uma parcela do resíduo é alocada em uma panela que pulverizará a amostra por meio de atrito. Após a pulverização o resíduo ganha um aspecto de pó (como pode ser observado na figura 16), apropriado para realização das análises químicas. Esse método é considerado adequado pois faz com que não haja seleção de fragmentos dentro da amostra. Dessa forma 100% do que é coletado é pulverizado, dando assim uma melhor representatividade a amostra.



Figura 16 - Amostra pulverizada de resíduos realizada em moinho de panela.

Fonte: Laboratório Físico da Essencis Soluções Ambientais S/A

Após a realização da amostra cerca de 20g são depositados em um saco plástico, selado e direcionado ao laboratório químico para realização das análises solicitadas.

3.3.2 Análise Laboratorial

O próximo passo para a definição dos parâmetros de qualidade é a análise química. Os parâmetros analisados serão o Poder Calorífico Superior, concentração percentual de cloretos, fluoretos, cinzas e umidade. Operacionalmente estes parâmetros estão entre os definidos como mais importantes à serem controlados pelas fábricas de cimento. Isso se faz necessário pois:

- Quanto maior o poder calorífico melhor será seu aporte energético no forno;
- Quanto menor os teores de cloretos e fluoretos menor será o índice de manutenção no forno por encrostamento destas substancias nas paredes refratárias;
- Quanto menor a umidade, menor será a energia desprendida ou perdida para fazer a evaporação da água contida no *blend*.

- Quanto menor o índice de cinzas menor é o risco de perda de qualidade no clínquer.

Na tabela 1 encontram-se apresentados os equipamentos que são adotados para definição de cada um dos parâmetros por parte da empresa. O laboratório onde foram realizadas as análises não possui certificação por ser um laboratório interno da empresa, porém, todos os equipamentos passam por calibrações frequentes. Apesar do espectrofotômetro utilizado para leitura dos parâmetros de cloretos e fluoretos apresentar a leitura em absorvância, é realizado um cálculo de conversão para percentual.

Tabela 1 – Equipamentos para realização das análises químicas.

| Tipo de Dispositivo de Monitoramento e Medição | Fabricante | Modelo/Série | Intervalo de Calibração | Faixas de Calibração | Grandezas Requeridas | Análises Realizadas |
|---|-------------------|---------------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| Espectrofotômetro DR 3900 | HACH | DR 3900 | ANUAL | 0,240 a 0,559 | Abs | Concentração de Cloretos e Fluoretos |
| Estufa QUIMIS | QUIMIS | Q 317 B12 | - | Até 200°C | °C | Umidade |
| Mufla QUIMIS | QUIMIS | Q 318 M24 | BIENAL | Até 1000°C | °C | Cinzas |
| Balança Analítica | GEHAKA | AG 200 | ANUAL | 0,01 a 199.9990g | g | PCS, Umidade e Cinzas |
| Calorímetro | LECO | AC 600 | Verificação diária | - | cal/g | PCS |
| Vaso de Pressão Calorimétrico | LECO | 1365 | 5000 Queimas | - | - | PCS |
| Vaso de Pressão Calorimétrico | LECO | 1368 | 5000 Queimas | - | - | PCS |
| Peso Padrão 5g | Marte | P-5 / n° 341809 | BIENAL | - | - | PCS, Umidade e Cinzas |
| Peso Padrão 50g | Marte | P-50 / n° 341140 | BIENAL | - | - | PCS, Umidade e Cinzas |

Fonte: Elaborada pelo autor, 2017.

3.4 A GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DE BETIM

3.4.1 Análise Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos do Município de Betim

Em 2015, o município de Betim lançou uma nova versão do seu Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos. Neste plano é apresentada uma análise gravimétrica realizada pelo município que evidência os tipos de resíduos sólidos urbanos gerados. Segundo BETIM (2015):

A caracterização realizada em 2015, apresentada neste trabalho apenas como uma referência, foi conduzida por meio de amostragens distintas no Município de Betim, a ponto que cada Amostra se refira a estratificação socioeconômica do Município, de modo que se atinja certo grau de confiança, a fim de relacionar como o padrão de produção e o consumo influenciam diretamente na geração e reaproveitamento de resíduos. (BETIM, 2015).

Na tabela 2 encontram-se apresentados a classificação das amostras coletadas.

Tabela 2 – Classificação das amostras coletadas no município.

| Número da coleta | Local de coleta |
|-------------------------|---|
| Amostra 1 | bairro residencial com baixo poder aquisitivo típico |
| Amostra 2 | bairro residencial com médio a alto poder aquisitivo típico |
| Amostra 3 | bairro comercial típico |

Fonte: Adaptado de Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Betim/2015.

De acordo com o referido plano, as amostras foram obtidas da seguinte forma:

A realização da amostragem ocorreu entre os dias 17/08/2015 a 21/08/2015, de modo que a retirada das amostras ocorresse diretamente nos domicílios a fim de preservar as amostras de possível catação por material reciclado, ataque por animais de rua e também por recolhimento regular da coleta de resíduos domiciliar. Assim sendo, foi definido para cada dia de amostragem os seguintes bairros, a fim de atender todas as regionais do município de Betim. (BETIM, 2015).

Na tabela 3 encontram-se apresentados os bairros de coleta de cada uma das amostras.

Tabela 3 – Classificação das amostras coletadas no município.

| Número da coleta | Local de coleta |
|-------------------------|--|
| Amostra 1 | Sítio Porções, Citrolândia / Paquetá, Vianópolis e Paulo Camilo. |
| Amostra 2 | Riacho 3, Brasiléia, Novo Guarujá, Jardim da Cidade. |
| Amostra 3 | Centro, PTB, Teresópolis e São Caetano |

Fonte: Adaptado de Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Betim/2015.

Ainda segundo BETIM (2015), “O esforço amostral foi para obter 200kg de resíduos por dia, totalizando num período de 05 (cinco) dias 1000kg de resíduos na semana amostrada. ”

Os recursos utilizados para a amostragem foram:

- 01 (um) veículo tipo pick-up,
- 01 (um) motorista,
- 01 (um) coletor,
- 02 (dois) ajudantes,
- Saco plástico de 150 L,
- Contêiner de 120 L
- Balança capacidade nominal de 1000 kg;
- Equipamento de proteção individual

Ainda está previsto no Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Betim que:

Uma vez obtidas às amostras necessárias, estas eram pesadas, para se determinar o peso específico das mesmas. Após a pesagem, o material era despejado sobre uma mesa, onde era realizada a triagem e separação dos materiais, por categoria, para posterior quantificação. De posse do peso dos diversos componentes, foi calculado o percentual de cada material. Depois, foi determinada a média entres os valores obtidos nas séries de amostragem, chegando-se à composição dos resíduos por categoria. A pesquisa restringiu à caracterização qualitativa e quantitativa, por tipos, dos resíduos sólidos urbanos gerados na área urbana da sede do município, não se estendendo, portanto, à caracterização físico-química e/ou microbiológica dos mesmos. (BETIM, 2015).

Esta análise é importante para verificar qual é a característica do resíduo do município e qual é a destinação dada a este resíduo. Na tabela 4 encontra-se apresentado um resumo dos três cenários encontrados na cidade e a média percentual total.

Tabela 4 - Resumo da Composição Gravimétrica de 3 tipos de bairros da cidade de Betim/MG.

| Categoria | Exemplos | Percentual(%) Amostra 1* | Percentual(%) Amostra 2** | Percentual(%) Amostra 3*** | Percentual(%) Médio |
|--------------------------------|---|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------|
| Resto de comida | Restos alimentares, cascas de legumes e frutas | 47,70% | 52,67% | 51,21% | 50,53% |
| Poda | Flores, podas de árvores, grama | 4,04% | 0,72% | 0,91% | 1,89% |
| Plástico | Sacos, sacolas, embalagens de refrigerantes, água e leite, recipientes de produtos de limpeza, esponjas, isopor, utensílios de cozinha, látex, sacos de ráfia | 12,41% | 12,70% | 9,85% | 11,65% |
| Papel e papelão | Caixas, revistas, jornais, cartões, papel, pratos, cadernos, livros, pastas, embalagens longa vida | 6,56% | 8,51% | 10,76% | 8,61% |
| Vidro | Copos, garrafas de bebidas, pratos, espelho, embalagens de produtos de limpeza, embalagens de produtos de beleza, embalagens de produtos alimentícios | 2,51% | 4,47% | 3,18% | 3,39% |
| Metal ferroso | Palha de aço, alfinetes, agulhas, embalagens de produtos alimentícios | 1,12% | 1,59% | 0,91% | 1,21% |
| Metal não ferroso | Latas de bebidas, restos de cobre, restos de chumbo, fiação elétrica | 1,12% | 1,30% | 0,91% | 1,11% |
| Pedra, terra, louça e cerâmica | Vasos de flores, pratos, xícaras, restos de construção, terra, tijolos, cascalho, pedras decorativas | 1,95% | 0,72% | 1,67% | 1,45% |
| Madeira | Caixas, tábuas, palitos de fósforo, palitos de picolé, tampas, móveis, lenha | 0,00% | 0,00% | 0,30% | 0,10% |
| Couro e borracha | Bolsas de couro, mochilas, sapatos, tapetes, luvas látex, cintos, balões | 0,56% | 1,73% | 0,30% | 0,86% |
| Têxtil | Aparas, roupas, panos de limpeza, pedaços de tecido, bolsas de pano | 1,95% | 2,60% | 1,82% | 2,12% |
| Contaminante biológico | Papel higiênico, cotonetes, algodão, curativos, gases e panos com sangue, fraldas descartáveis, absorventes higiênicos, seringas, lâminas de barbear, cabelos, pêlos, embalagens de anestésicos, luvas | 13,39% | 10,10% | 14,70% | 12,73% |
| Contaminante químico | Pilhas, baterias, medicamentos, lâmpadas, inseticidas, raticida, colas em geral, cosméticos, vidros de esmaltes, embalagens de produtos químicos, latas de óleo de motor, latas com tintas, embalagens pressurizadas, canetas com carga, papel carbono, filme fotográfico | 1,53% | 0,14% | 0,45% | 0,71% |
| Equipamento eletroeletrônico | Computadores, laptops, celulares, rádios, liquidificadores, mouses, teclados | 0,14% | 0,29% | 0,00% | 0,14% |
| Diversos | Velas de cera, restos de sabão e sabonete, carvão, giz, pontas de cigarro, rolhas, cartões de crédito, lápis de cera, embalagens metalizadas, sacos de aspirador de pó, lixas e outros materiais de difícil identificação | 5,02% | 2,45% | 3,03% | 3,50% |
| Total | | 100,0% | 100,0% | 100,0% | 100,0% |

*Amostra 1 - bairro residencial com baixo poder aquisitivo típico

**Amostra 2 - bairro residencial com médio a alto poder aquisitivo típico

***Amostra 3 - bairro comercial típico

Fonte: Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Betim/2015.

Ainda segundo BETIM (2015), apesar de haver um grande potencial de reciclagem, (cerca de 26% de todo o resíduo gerado), apenas 0,83% do total é destinado para este fim na ASCAPEL, e a maior parte dos resíduos, ou seja, os outros 98,43% são destinados para aterro sanitário, com exceção dos hospitalares que possuem destinação específica conforme legislação nacional e representam 0,74% no município.

Esse comportamento de baixa reciclagem já perdura por mais de 15 anos, conforme tabela 5.

Tabela 5 – Quantidade em Kg de resíduos sólidos urbanos gerados no Município de Betim – MG.

| Ano | CS | RC | RSS | RP | RD | Total |
|--------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|----------------------|----------------------|
| 1997 | - | 380.850 | 245.770 | - | 26.988.530 | 27.615.150 |
| 1998 | - | 885.940 | 258.470 | - | 35.886.100 | 37.030.510 |
| 1999 | - | 1.130.765 | 359.115 | 1.645.635 | 39.931.060 | 43.066.575 |
| 2000 | 319.270 | 923.700 | 415.690 | 687.815 | 43.857.325 | 46.203.800 |
| 2001 | 339.200 | 1.566.525 | 433.125 | 2.048.800 | 43.297.245 | 47.684.895 |
| 2002 | 280.430 | 3.128.080 | 585.665 | 1.099.030 | 48.879.985 | 53.973.190 |
| 2003 | 137.360 | 3.514.805 | 465.360 | 1.703.220 | 45.961.430 | 51.782.175 |
| 2004 | 96.120 | 3.624.040 | 538.490 | 1.456.830 | 47.519.640 | 53.235.120 |
| 2005 | 148.060 | 3.381.170 | 476.540 | 1.003.280 | 50.360.590 | 55.369.640 |
| 2006 | 78.360 | 3.763.610 | 463.580 | 2.521.130 | 53.413.550 | 60.240.230 |
| 2007 | 1.222.050 | 4.773.050 | 463.500 | 3.662.840 | 55.741.650 | 65.863.090 |
| 2008 | 1.083.560 | 6.209.930 | 485.250 | 3.973.160 | 59.388.100 | 71.140.000 |
| 2009 | - | 7.827.220 | 525.710 | 2.258.960 | 64.819.270 | 75.431.160 |
| 2010 | - | 5.698.750 | 588.870 | 707.400 | 70.027.445 | 77.022.465 |
| 2011 | - | - | 648.870 | 802.730 | 70.545.110 | 71.996.710 |
| 2012 | - | - | 618.030 | - | 80.843.100 | 81.461.130 |
| 2013 | - | - | 591.870 | - | 82.317.950 | 82.909.820 |
| 2014 | 685.310 | - | 603.690 | - | 80.863.120 | 82.152.120 |
| Total | 4.389.720 | 46.808.435 | 8.767.595 | 23.570.830 | 1.000.641.200 | 1.084.177.780 |

*CS = Coleta seletiva; RC = Resíduo comercial; RSS = Resíduo de serviços de saúde; RP = Resíduo público; RD = Resíduo domiciliar

Fonte: Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Betim/2015.

Em visita à ASCAPEL foi questionado quanto a falta de valores na tabela publicada no Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Betim em alguns anos, em resposta ao questionamento, foi informado pelos representantes da associação que nestes períodos, ou não houve destinação de resíduos ou estes não foram mensurados.

Observando os dados fornecidos, revela-se um cenário preocupante, podendo ser constatado que ocorre não só o desperdício de material com potencial de aproveitamento, seja para a reciclagem ou para a valorização energética, mas também o aumento do passivo ambiental gerado, tendo em vista o maior volume de resíduos destinados ao aterro sanitário.

Outro aspecto negativo da destinação inadequada é o social. Estes resíduos poderiam ser fonte de renda para famílias carentes, gerando emprego e dando melhores condições de vida a quem mais precisa.

3.4.2 Resíduos com potencial para valorização

Um ponto de grande importância para este trabalho reside no fato de que parte dos resíduos que hoje são destinados para aterro sanitário tem grande potencial de serem enviados para a valorização energética situada na mesma planta da Essencis, proprietária do aterro sanitário. Após verificação pelo corpo técnico da empresa, as categorias foram avaliadas com o objetivo de identificar os resíduos com potencial de serem destinados para a valorização energética. Encontram-se apresentado na tabela 6, os resíduos identificados com potencial para serem destinados para a valorização energética, separados por bairros de coleta.

Tabela 6 - Resumo da Composição Gravimétrica de 3 tipos de bairros da cidade de Betim/MG.

| Destinação /Disposição /Potencial | Categoria | Exemplos | Percentual(%) Amostra 1* | Percentual(%) Amostra 2** | Percentual(%) Amostra 3*** |
|-----------------------------------|--------------------------------|---|--------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Coprocessoamento | Poda | Flores, podas de árvores, grama | 4,04% | 0,72% | 0,91% |
| | Plástico | Sacos, sacolas, embalagens de refrigerantes, água e leite, recipientes de produtos de limpeza, esponjas, isopor, utensílios de cozinha, látex, sacos de rafia | 12,41% | 12,70% | 9,85% |
| | Papel e papelão | Caixas, revistas, jornais, cartões, papel, pratos, cadernos, livros, pastas, embalagens longa vida | 6,56% | 8,51% | 10,76% |
| | Pedra, terra, louça e cerâmica | Vasos de flores, pratos, xícaras, restos de construção, terra, tijolos, cascalho, pedras decorativas | 1,95% | 0,72% | 1,67% |
| | Madeira | Caixas, tábuas, palitos de fósforo, palitos de picolé, tampas, móveis, lenha | 0,00% | 0,00% | 0,30% |
| | Couro e borracha | Bolsas de couro, mochilas, sapatos, tapetes, luvas látex, cintos, balões | 0,56% | 1,73% | 0,30% |
| | Têxtil | Aparas, roupas, panos de limpeza, pedaços de tecido, bolsas de pano | 1,95% | 2,60% | 1,82% |
| | Diversos | Velas de cera, restos de sabão e sabonete, carvão, giz, pontas de cigarro, rolhas, cartões de crédito, lápis de cera, embalagens metalizadas, sacos de aspirador de pó, lixas e outros materiais de difícil identificação | 5,02% | 2,45% | 3,03% |
| Total | | | 32,5% | 29,4% | 28,6% |

*Amostra 1 - bairro residencial com baixo poder aquisitivo típico

**Amostra 2 - bairro residencial com médio a alto poder aquisitivo típico

***Amostra 3 - bairro comercial típico

Fonte: Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Betim/2015

Para a realização da confirmação desta possibilidade, amostras foram coletadas nas cargas recebidas e analisadas pelo laboratório interno da Essencis. Os parâmetros analisados são os principais determinados por contrato e que mais tem importância operacional para cimenteira, são eles:

- Poder Calorífico Superior (kcal/kg)
- Concentração percentual de Cloretos (%)

- Concentração percentual de Fluoretos (%)
- Concentração percentual de Cinzas (%)
- Concentração percentual de Umidade (%)

A tabela 7, conforme anexo II, traz os resultados das análises químicas das categorias e dos resíduos, agrupados por similaridade em uma amostra composta.

Tabela 7 - Análises Químicas de Qualidade por Categoria de Resíduos.

| Categoria | Resíduo | PCS (kcal/kg) | % de Cloretos | % de Fluoretos | % de cinzas | % de Umidade |
|--------------------------------|---|------------------|------------------|-------------------|----------------|-----------------|
| Poda | Flores, podas de árvores e grama secas | 3016,32 | 0,04 | 0,01 | 1,2 | 2,36 |
| Plástico | Sacos, sacolas, embalagens de refrigerantes, água e leite, recipientes de produtos de limpeza, , utensílios de cozinha, látex, sacos de rafia | 3851,11 | 0,39 | 0,04 | 2,42 | 1,89 |
| | Espunjas | 3628,33 | 0,13 | 0,06 | 0,63 | 1,92 |
| | Isopor | 4090,81 | 0,09 | 0,02 | 1,16 | 0,95 |
| Papel e Papelão | Caixas, revistas, jornais, cartões, papel, pratos, cadernos, livros, pastas, embalagens longa vida | 4322,61 | 0,11 | 0,02 | 3,21 | 0,87 |
| Pedra, terra, louça e cerâmica | Vasos de flores, pratos, xícaras, restos de construção, terra, tijolos, cascalho e pedras decorativas | ND | ND | ND | ND | ND |
| Madeira | Caixas, tábuas, palitos de fósforo, palitos de picolé, tampas, móveis e lenha. | 3264,55 | 0,16 | 0,04 | 3,21 | 3,44 |
| Couro e borracha | Bolsas de couro, mochilas, sapatos, tapetes, luvas látex, cintos, balões | 5320,07 | 0,27 | 0,06 | 4,36 | 3,52 |
| Têxtil | Aparas, roupas, panos de limpeza, pedaços de tecido, bolsas de pano | 4241,22 | 0,24 | 0,04 | 3,95 | 2,14 |
| Diversos | Velas de cera, restos de sabão e sabonete, cartões de crédito, lápis de cera, embalagens metalizadas, lixas e outros materiais de difícil identificação | 1854,22 | 0,18 | 0,03 | 1,25 | 5,21 |
| | Carvão | 5630,52 | 0,11 | 0,02 | 2,11 | 3,25 |
| | Giz | ND | ND | ND | ND | ND |
| | Pontas de Cigarro, rolhas e sacos de aspirador de pó | 4521,09 | 0,18 | 0,04 | 3,25 | 4,21 |

Fonte: Laboratório Químico da Essencis MG Soluções Ambientais S/A 2017.

É possível perceber que vários dos resíduos apontados apresentam um PCS acima do limite inferior estabelecido pela cimenteira e abaixo dos limites de cloretos, fluoretos, cinzas e umidade determinados no anexo II do contrato da Essencis, anexo III deste trabalho.

3.4.3 Composição do *Blend* de resíduos

Seguindo a mesma distribuição encontrada na média da análise gravimétrica, é possível então determinar, através de regra de três, quais seriam as entradas na mistura do *blend* de resíduos. Por exemplo, na categoria de “poda” há em média 1,9% em um universo de 30,2%, isso é o mesmo que 6,3% em um universo de 100%. Dessa forma, na tabela 8 é realizada a distribuição de formulação do *blend* de resíduos a ser considerada mais à frente no trabalho.

Tabela 8 - Formulação do *Blend* de Resíduos a Partir da Distribuição da Análise Gravimétrica do Município de Betim.

| Categoria | Resíduo | Nº | % do montante total de resíduos | % na formulação do blending |
|--------------------------------|---|----|---------------------------------|-----------------------------|
| Poda | Flores, podas de árvores e grama secas | 1 | 1,9% | 6,3% |
| Plástico | Sacos, sacolas, embalagens de refrigerantes, água e leite, recipientes de produtos de limpeza, utensílios de cozinha, látex, sacos de rafia | 2 | 11,7% | 38,6% |
| | Espanjas | 3 | | |
| | Isopor | 4 | | |
| Papel e Papelão | Caixas, revistas, jornais, cartões, papel, pratos, cadernos, livros, pastas, embalagens longa vida | 5 | 8,6% | 28,5% |
| Pedra, terra, louça e cerâmica | Vasos de flores, pratos, xícaras, restos de construção, terra, tijolos, cascalho e pedras decorativas | 6 | 1,5% | 4,8% |
| Madeira | Caixas, tábuas, palitos de fósforo, palitos de picolé, tampas, móveis e lenha. | 7 | 0,1% | 0,3% |
| Couro e borracha | Bolsas de couro, mochilas, sapatos, tapetes, luvas látex, cintos, balões | 8 | 0,9% | 2,8% |
| Têxtil | Aparas, roupas, panos de limpeza, pedaços de tecido, bolsas de pano | 9 | 2,1% | 7,0% |
| Diversos | Velas de cera, restos de sabão e sabonete, cartões de crédito, lápis de cera, embalagens metalizadas, lixas e outros materiais de difícil identificação | 10 | 3,5% | 11,6% |
| | Carvão | 11 | | |
| | Giz | 12 | | |
| | Pontas de Cigarro, rolas e sacos de aspirador de pó | 13 | | |
| Total | | | 30,2% | 100% |

Fonte: Adaptado pelo autor a partir do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Betim/2015.

Com a determinação dos parâmetros de qualidade de cada resíduo realizada pelo laboratório, se faz possível calcular o resultado da mistura do combustível alternativo através do modelo de otimização apresentado por Pereira, Carvalho e Rodrigues (2015). O modelo por eles apresentado realiza o cálculo ótimo da mistura ideal, visando atender a máxima produção possível com todos parâmetros estabelecidos pela cimenteira dentro dos limites. Essa formulação constitui uma estrutura típica de um modelo de misturas em programação linear onde, através de um balanço de massa realiza-se o cálculo da mistura bem como o emprego das restrições visando obter um combustível alternativo de qualidade.

Considerou-se para o cálculo no caso dos resíduos da categoria “Plástico” e da categoria “Diversos” que a mesma massa de cada resíduo iria compor o percentual a ela atribuído. Desta forma o percentual de contribuição de 38,6% foi dividido em três partes iguais para os três resíduos da categoria “Plástico” e o percentual de 11,6% foi dividido em 4 partes iguais para os resíduos da categoria “Diversos”.

A figura 17 apresenta o resultado da mistura das toneladas dos combustíveis para formação do combustível alternativo a partir de resíduos domiciliares de Betim através de modelo desenvolvido por Pereira, Carvalho e Rodrigues (2015).

| | C | D | E | F | G | H | I | J | L | M | N |
|----|----|------------------|--------|-------|---------------|----------------|--------------------------|-----------------------|-------------------|-------------|----------------|
| 1 | Nº | PCS (Kcal/Kg) | Cl (%) | F (%) | Cinzas (%) | Umidade (%) | Toneladas Disponíveis | Entrada na mistura | | | |
| 2 | 1 | 3016,3 | 0,040 | 0,010 | 1,200 | 2,360 | 1.884,79 | 1.884,79 | | | |
| 3 | 2 | 3851,1 | 0,390 | 0,040 | 2,420 | 1,890 | 3.849,36 | 3.849,36 | | | |
| 4 | 3 | 3628,3 | 0,130 | 0,060 | 0,630 | 1,920 | 3.849,36 | 3.849,36 | | | |
| 5 | 4 | 4090,8 | 0,090 | 0,020 | 1,160 | 0,950 | 3.849,36 | 3.849,36 | | | |
| 6 | 5 | 4322,6 | 0,110 | 0,020 | 3,210 | 0,870 | 8.526,44 | 8.526,44 | | | |
| 7 | 6 | 0,0 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 1.436,03 | 1.436,03 | Restrições | | |
| | | | | | | | | | Parâmetros | Real | Cliente |
| | | | | | | | | | PCS (Kcal/Kg) | 3717,75 | 3600,00 |
| | | | | | | | | | Cl (%) | 0,151 | 0,280 |
| | | | | | | | | | F (%) | 0,029 | 0,500 |
| | | | | | | | | | Cinzas (%) | 2,135 | 40,000 |
| | | | | | | | | | Umidade (%) | 1,639 | 30,000 |
| 12 | 11 | 5630,5 | 0,110 | 0,020 | 2,110 | 3,250 | 867,60 | 867,60 | | | |
| 13 | 12 | 0,0 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 867,60 | 867,60 | | | |
| 14 | 13 | 4521,1 | 0,2 | 0,0 | 3,3 | 4,2 | 867,60 | 867,60 | | | |
| 15 | | | | | | | 29.917,33 | 29.917,33 | | | |

Figura 17 - Aplicação de modelo de otimização para formulação do *blend* com resíduos.

Fonte: Pereira, Carvalho e Rodrigues, 2015.

Conforme anexo III, as principais restrições de qualidade são atendidas por completo e com isso seria possível produzir cerca de 29.917,33 toneladas de *blend* de resíduos no ano de 2017, dentro dos parâmetros de qualidade exigidos pelas cimenteiras.

3.4 ESTRUTURAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO PARA DETERMINAR O VALOR DO *BLEND*

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, 2004).

Diante disso, no caso da mistura de resíduos e/ou combustíveis alternativos, foram elaboradas pelo autor as seguintes fórmulas para o cálculo da mistura:

a) Variáveis de decisão:

x_i é Custo, em reais, do mix combustível, $i = 1, 2, \dots, n$, a ser inserida na mistura;

b) Função Objetivo: Minimizar o custo do mix de combustíveis de uma cimenteira:

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

c) Restrições do modelo:

$$\sum_{i=1}^n T_i \leq T_{max} \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n T_i \geq T_{min} \quad (3)$$

$$\%sub \leq \%sub_{max} \quad (4)$$

$$x_i \geq 0, \forall i, i = 1, 2 \dots, n \quad (5)$$

$$x_i \leq E_i, \forall i, i = 1, 2 \dots, n \quad (6)$$

Nessas inequações, a (2) traz T que é o Consumo Térmico e deve ser menor ou igual ao Consumo Térmico Máximo, a (3) traz T que é o Consumo Térmico e deve ser maior ou igual ao Consumo Térmico Mínimo, na inequação (4) é a restrição quanto ao limite de substituição onde %sub deve ser menor ou igual ao %sub máximo, (5) é Estoque de combustível i. A inequação (6) é a condição de não negatividade.

3.4.1 Implementação do modelo matemático na planilha de otimização

Para poder realizar os cálculos, o modelo foi aplicado no Excel 2017 com apoio da função de otimização solver. Encontra-se apresentado na figura 18 a representação do modelo programa Excel 2017.

| Cálculo do Combustível Consumido | | | | | | |
|----------------------------------|------------------|---------------|---------------|--------------|-------------------------------|-------------------------|
| Combustíveis | Estoque (t) | Custo (R\$/t) | PCS (kcal/kg) | Custo R\$/Gj | Utilização de Combustível (%) | Inserção na mistura (t) |
| Moinha de Carvão | 6.250 | R\$ 243,70 | 4.553 | R\$ 12,78 | 0% | - |
| Coque de Petróleo | 8.333 | R\$ 361,45 | 8.137 | R\$ 10,61 | 73% | 5.046,37 |
| Óleo 2A | 417 | R\$ 2.105,00 | 9.269 | R\$ 54,24 | 0% | - |
| Pneus Triturados | 1.250 | R\$ 129,30 | 6.735 | R\$ 4,59 | 0% | 0,00 |
| Blending de Resíduos | 2.493 | R\$ 13,00 | 3.717 | R\$ 0,84 | 27% | 1.866,47 |
| Cavaco de Madeira | 1.667 | R\$ 91,65 | 3.586 | R\$ 6,10 | 0% | 0,00 |
| Total | 20.409,78 | | | | 100% | 6.912,84 |

| | Real | Ideal |
|---|------------------|-------|
| Produção de Clínquer (t/mês) | 60.000,00 | |
| Fator de Adequação de preço do blending | 30% | 10 |
| Limitação Operacional de Substituição | 27% | 27% |
| Cons. Térmico Máximo (Mj/t clínquer) | 800,00 | 850 |
| Cons. Térmico Mínimo (Mj/t clínquer) | 800,00 | 800 |
| Custo Mix (R\$/Gj) | R\$ 7,97 | |
| PCS Médio (kcal/kg) | 6.943,60 | |
| Custo total com combustíveis | R\$ 1.848.275,82 | |

Resultados do Solver

O Solver encontrou uma solução. Todas as Restrições e condições de adequação foram satisfeitas.

Manter Solução do Solver

Restaurar Valores Originais

Retornar à Caixa de Diálogo Parâmetros do Solver

Relatórios: Resposta, Sensibilidade, Limites

Relatórios de Estrutura de Tópicos

OK CANCELAR Salvar Cenário...

O Solver encontrou uma solução. Todas as Restrições e condições de adequação foram satisfeitas.

Quando o mecanismo GRG foi usado, o Solver encontrou pelo menos uma solução ideal local. Quando LP Simplex é usado, significa que o Solver encontrou uma solução ideal global.

Figura 18 - Modelo aplicado em planilha do Microsoft Office Excel 2017 utilizando solver.

Fonte: Elaborado pelo autor

3.4.2 Métodos de cálculo e fórmulas

Para realizar os cálculos usou-se as seguintes formulas:

- Células **E₃** a **E₈** – Para obter o custo na unidade (R\$/Gj) por tipo de combustível, foi aplicada equação (7):

$$R_i = \frac{C_i}{\frac{P_i}{(4,1868) * 1000}} \quad (7)$$

Onde: **C_i** é o custo (R\$/t) por combustível, **P_i** é o Poder Calorífico Superior (kcal/kg), **R_i** é o resultado em (R\$/Gj) e 4,1868 é a constante de conversão de Gj para kcal.

- Células **F₃** a **F₈** – Para obter os percentuais de utilização de cada combustível, aplicou-se a equação (8):

$$U_i = \frac{M_i}{M_{total}} \quad (8)$$

Onde: **U_i** é a utilização percentual de cada combustível, **M_i** é a massa inserida na mistura, **M_{total}** é a massa total de combustível.

- Células **B₁₅** e **B₁₆** – Para calcular o resultado entre os limites superior e inferior de consumo térmico aplicou-se as seguintes equações (9) e (10):

$$T_{max} = \frac{\sum P_1 \cdot \sum M_1}{\sum P_5 \cdot \sum M_5} \quad (9)$$

$$T_{min} = \frac{\sum P_1 \cdot \sum M_1}{\sum P_5 \cdot \sum M_5} \quad (10)$$

Onde: P_i é o Poder Calorífico Superior (kcal/kg), M_i é a massa inserida na mistura, V é a produção de clínquer (t/mês), T_{max} é o consumo térmico máximo desejado e T_{min} é o consumo térmico mínimo desejado

- Célula B_{17} – Para calcular o custo da mistura em R\$/Gj utilizou-se a equação (11):

$$R_{total} = \sum_{R_5}^{R_1} \cdot \sum_{U_5}^{U_1} \quad (11)$$

Onde: U_i é a utilização percentual de cada combustível, R_i é o resultado em (R\$/Gj) e R_{total} é o custo total em (R\$/Gj).

- Célula B_{18} – Para calcular o Poder Calorífico Superior médio, aplicou-se a equação (12):

$$P_{med} = \frac{\sum P_1 \cdot \sum M_1}{M_{total}} \quad (12)$$

Onde: P_i é o Poder Calorífico Superior (kcal/kg), M_i é a massa inserida na mistura, P_{med} é o PCS médio da mistura e M_{total} é a massa total de combustível.

- Célula **B₁₉** – Para calcular o custo total com combustíveis, aplicou-se a equação (13):

$$C_{total} = \sum_{M_5}^{M_1} \cdot \sum_{C_5}^{C_1} \quad (13)$$

- Onde: **C_{total}** é o custo total com combustíveis no mês, **C_i** é o custo (R\$/t) por combustível e **M_i** é a massa inserida na mistura.

Desta maneira, ao fim da aplicação do modelo matemático ao Microsoft Office Excel 2017 e em sua ferramenta de otimização (Solver) tem-se implementado o modelo para determinação do valor do *blend* de resíduos.

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 ASCAPEL

Em Betim, segundo seu Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos, os resíduos recicláveis são destinados para famílias que trabalham com a separação dos resíduos secos, sendo os mesmos encaminhados para o galpão da ASCAPEL, onde são separados e comercializados com empresas recicladoras.

Atualmente a associação conta com 23 pessoas que trabalham regularmente na separação dos materiais recebidos.

Porém a proporção dos resíduos gerados diariamente e os destinados a reciclagem é muito baixa devido a inúmeros fatores, podendo destacar entre eles, o problema cultural da população em dar a destinação correta aos resíduos.

Além deste, outro problema percebido é baixa eficiência na separação dos resíduos recicláveis domiciliares, há ainda uma falta de estrutura dos catadores que ficou evidente ao ser realizada uma visita técnica na ASCAPEL no dia 04/04/2017.

Nesta mesma visita, vários pontos preocupantes foram constatados, sendo o primeiro deles percebido logo quando há a chegada dos resíduos na unidade, visto a forma com que os trabalhadores têm acesso a estes nos caminhões.

Conforme figura 19, as pessoas transitam sob os resíduos para realizar suas descargas nas baias de recebimento. Esta prática incorreta coloca em risco os trabalhadores, podendo haver quedas, bem como o risco de ocorrerem perfurações nos mesmos, caso haja resíduos perfurocortantes descartados de forma inadequada em meio aos destinados à reciclagem.



Figura 19 - Descarga de caminhão de resíduos na ASCAPEL.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Este problema permanece durante a separação dos resíduos, uma vez que os trabalhadores transitam em meio aos mesmos na parte interna do galpão, aonde são espalhados para facilitar a seleção.

Ao adentrar no galpão, outro problema identificado quanto à segurança é constatado, uma vez que se presenciou vários trabalhadores não utilizando os Equipamentos Individuais de Segurança - EPI's – obrigatórios ou os utilizando de maneira inadequada no processo de separação dos resíduos.

Para que sejam sanados estes riscos, os catadores devem utilizar luvas com proteções contra materiais perfurocortantes, botinas com palmilhas de aço, óculos de proteção, vestuário adequado, sendo estes equipamentos de uso obrigatório para esta atividade, porém, não foram identificadas as suas utilizações no dia da visita.

Conforme pode-se constatar na figura 20, o trânsito de pessoas e permanência em meio aos resíduos é algo rotineiro para os catadores, visto que devido a precariedade das instalações faz-se necessário para que consigam realizar a separação de material reciclado.



Figura 20 - Área interna do galpão de triagem de resíduos da ASCAPEL.

Fonte: Elaborado pelo autor.

No decorrer de toda a visita também pode ser constatado que a manutenção e organização do galpão e dos equipamentos não ocorre de maneira regular, sendo que itens de segurança como sistema de combate a incêndio e extintores não passam com periodicidade por uma reavaliação e manutenção. Luminárias e carrinhos de transporte danificados, ficam encostados aguardando manutenção e acabam tumultuando e dificultando ainda mais o trabalho dos catadores.

A figura 21 traz uma visão da outra extremidade do galpão onde é possível visualizar uma grande quantidade de resíduos e *big bags* espalhados por todo o local.



Figura 21 - Área interna do galpão de triagem de resíduos da ASCAPEL.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Além disso, os catadores recorrentemente relataram a presença de roedores e animais peçonhentos, expondo os trabalhadores ao risco de serem contagiados por doenças como a leptospirose ou serem picados.

Um fator observado e que pode estar diretamente relacionado há existência destes animais, foi a falta de limpeza, manutenção e/ou conservação das áreas externas e jardins da unidade, conforme figuras 22 e 23, onde pode ser observado que os jardins estão cheios e requerem manutenção e remoção de resíduos acumulados.



Figura 22 - Área externa do galpão da ASCAPEL.

Fonte: Elaborado pelo autor.



Figura 23 - Área externa do galpão da ASCAPEL.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quanto a separação de resíduos, através do levantamento obtido na associação, pode ser observado que em média 36,7 toneladas são separadas e recicladas por mês na ASCAPEL, conforme figura 24.

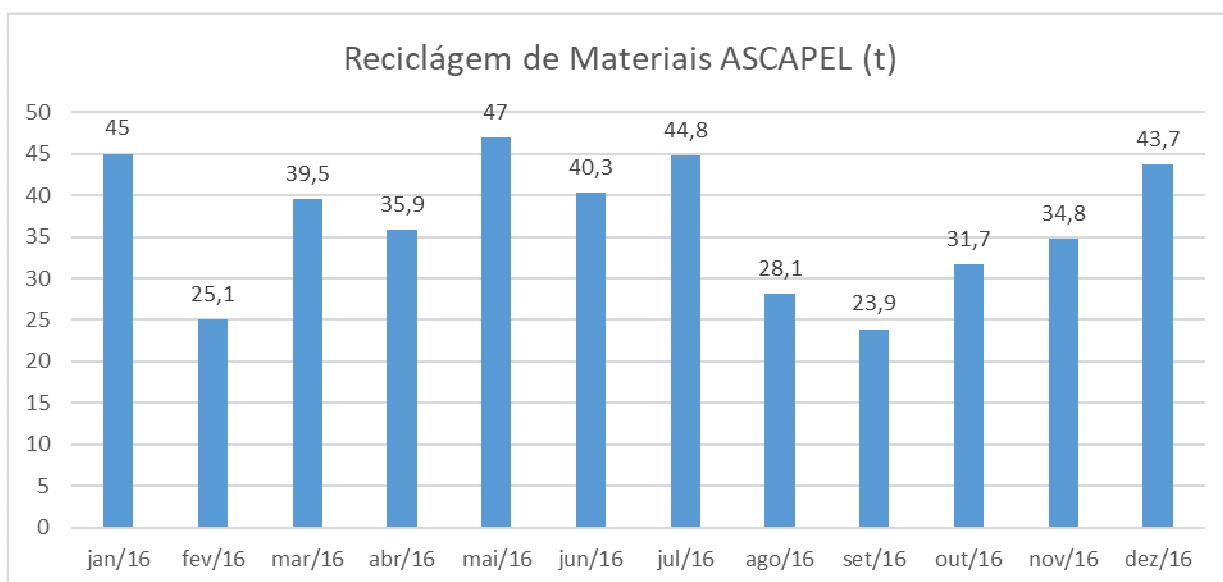


Figura 24 – Toneladas recicladas na ASCAPEL em 2016.

Fonte: ASCAPEL. 2016.

Tendo por base a quantidade de resíduos recicláveis produzidos mensalmente em Betim, este baixo montante se dá devido à necessidade de haver uma separação minuciosa dos materiais que ao final são divididos diversos grupos diferentes de resíduos, segundo informações dos catadores.

Ressalta-se que esta estrutura de galpão, bem como o fornecimento de energia elétrica e água são subsidiados pela prefeitura.

A ASCAPEL, para o processamento dos materiais conta com um triturador de vidro e uma prensa, sendo que esta última é utilizada para formar os fardos dos principais recicláveis leves como papel, papelão e embalagens plásticas.

Ao fim da visita conclui-se que, para a ASCAPEL funcionar de maneira correta e receber maior quantidade de resíduos recicláveis e realizar a separação dos mesmos, é imprescindível primeiramente o fornecimento dos EPI's obrigatórios, bem como há a necessidade de uma reforma e adequação nas instalações e ainda é necessária a aquisição de equipamentos.

4.2 CARACTERÍSTICAS ATUAIS DO MERCADO DAS FÁBRICAS DE CIMENTO

Sabe-se que os fornos para fabricação de cimento devem trabalhar ininterruptamente pois, uma parada gera altos custos e perda de produtividade, este fato ocorre devido ao fato de que o forno leva em média 30 horas para chegar a temperatura ideal para o seu pleno funcionamento.

Este fato atrelado a atual conjuntura do mercado brasileiro, faz com que os fornos de cimento não necessitem trabalhar em alto ritmo, porém, não os possibilita interromper suas atividades.

Um grande problema enfrentado pelas cimenteiras encontra-se no consumo de combustíveis fósseis ou nobres para manter o forno em funcionamento e de outro lado os anseios sociais visando práticas que possibilitem uma produção de forma sustentável, com o objetivo de resguardar ao máximo o meio ambiente e seus recursos.

Porém, esta decisão de manter os fornos em funcionamento, mantém os custos mais baixos que a parada total dos mesmos, mas ainda assim são gerados desperdícios de combustíveis, o que impacta negativamente nos resultados econômico-financeiros, bem como há questionamentos quanto a degradação do meio ambiente, devido a emissão de poluentes pela queima de combustíveis fósseis.

Uma saída para estes problemas reside na possibilidade de se utilizar combustíveis alternativos produzidos em UVE's, havendo, portanto, uma substituição dos combustíveis nobres nos fornos de fabricação de cimento, que são mais caros e que degradam o meio ambiente.

Esse combustível alternativo tem um custo de "aquisição" variável e negociável, pois depende das suas características físico-químicas e da disponibilidade de resíduos no mercado, porém traz benefícios ambientais.

Os combustíveis alternativos produzidos pelas UVE's são basicamente provenientes da mistura e tratamento de resíduos industriais que são diariamente descartados em todo o país, assim, a substituição dos combustíveis fósseis por estes, faz com que haja uma redução significativa nos descartes em aterros sanitários, tornando o processo ambientalmente sustentável.

Diante destes fatos, a substituição de percentuais dos combustíveis fósseis utilizados pelas indústrias de cimento por combustíveis advindos de UVE's, faz com que além de economia financeira para as cimenteiras, haja também benefícios para a sociedade, visto que estes são ecologicamente mais corretos, já que reaproveitam materiais que seriam descartados no meio ambiente e em muitos casos o poluindo.

4.3 CARACTERÍSTICAS DOS COMBUSTÍVEIS

No caso a ser apresentado, foram considerados 6 combustíveis principais utilizados em fornos de cimento: Moinha de Carvão, Coque de Petróleo, Óleo 2A, Pneus, Cavaco de Madeira e o *Blend* de Resíduos. Encontra-se apresentado na tabela 9 o PCS, o maior custo, o menor custo e o custo médio de aquisição dos combustíveis fósseis com o frete incluso. Estes valores foram obtidos através de relatório de compras de uma fábrica de cimento dos últimos 2 anos. O valor do combustível alternativo não foi considerado pois sua valorização será determinada logo a seguir:

Tabela 9 - Resultado de Poder Calorífico Superior de Combustíveis para Fornos de Cimento.

| Combustível | PCS(kcal/kg) | Menor Valor (R\$/t) | Valor Médio (R\$/t) | Maior Valor (R\$/t) |
|---------------------|--------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Moinha de Carvão | 4.553 | 243,70 | 285,85 | 302,50 |
| Coque de Petróleo | 8.137 | 361,45 | 432,00 | 473,90 |
| Óleo 2 ^a | 9.269 | 2.105,00 | 2.543,15 | 2.815,00 |
| Pneus triturados | 6.735 | 129,30 | 161,40 | 181,60 |
| Blend de Resíduos | 3.717 | - | - | - |
| Cavaco de Madeira | 3.586 | 77,90 | 91,65 | 104,00 |

Fonte: Adaptado Laboratório Essencis MG e LafargeHolcim 2017.

4.4 PROCESSO DE ALIMENTAÇÃO DO FORNO COM COMBUSTÍVEIS

As cimenteiras possuem um limite operacional de utilização/substituição do *blend* de resíduos, isso se dá, pois, a alta inserção deste material gera uma queda na energia calorífica do forno de cimento, devido ao PCS ser inferior quando comparado ao dos combustíveis fósseis comumente utilizados, no caso apresentado, o limitante de 27% foi estabelecido a partir de uma orientação da fábrica.

Outro ponto importante é a variação do consumo térmico do forno para a produzir uma tonelada de clínquer². Esta variação entre os fornos faz com que cada um apresente maior ou menor eficiência energética. No exemplo dado, considerou-se um forno eficiente que consome entre 800 e 850 Mj/t de clínquer. Além disso é aplicado no modelo um fator de adequação de preço do *blend* que é determinado pela gerencia de coprocessamento, no exemplo dado, foi estipulado 30% sob o custo do combustível alternativo. Isso se faz necessário pois o uso deste combustível acarreta alguns ônus de difícil mensuração por parte da cimenteira como menor prazo para realização de manutenção, custos devidos as oscilações no forno devido ao combustível dentre outros.

4.5 APLICANDO O MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA REDUZIR CUSTOS

4.5.1 Determinações para mistura dos combustíveis

² Principal matéria prima do cimento.

Encontra-se apresentado na tabela 10, as seguintes informações:

- Estoque de combustíveis disponível para a fábrica de cimento;
- O Custo médio por tonelada dos combustíveis;
- Resultado da análise de PCS dos combustíveis;
- Custo médio da energia gerada por cada combustível em R\$/Gj.

Tabela 10 - Informações financeiras e técnicas dos combustíveis.

| Combustível | Estoque (t) | Custo (R\$/t) | PCS (kcal/kg) | Custo R\$/Gj |
|--------------------------|--------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| Moinha de Carvão | 6.250 | 285,85 | 4.553 | R\$ 15,00 |
| Coque de Petróleo | 8.333 | 432,00 | 8.137 | R\$ 12,68 |
| Óleo 2ª | 417 | 2.543,15 | 9.269 | R\$ 65,53 |
| Pneus triturados | 1.250 | 161,40 | 6.735 | R\$ 5,72 |
| Blend de Resíduos | 2.493 | - | 3.717 | - |
| Cavaco de Madeira | 1.667 | 91,65 | 3.586 | R\$ 6,10 |

Fonte: Elaborada pelo autor

Encontra-se apresentado na tabela 11 as restrições que darão os parâmetros de trabalho para o modelo. São eles a produção de clínquer desejada ao longo de um ano e o consumo térmico ideal de cada tonelada. Ambos são determinados por cada fábrica de cimento.

Tabela 11 – Informações operacionais da fábrica de cimento.

| Restrição | Ideal/Desejado |
|--|-----------------------|
| Produção de Clínquer (t) | 60.000 |
| Consumo Térmico Mínimo (kcal/t de clínquer) | 800,00 |
| Consumo Térmico Máximo (kcal/t de clínquer) | 850,00 |

Fonte: Elaborada pelo autor

Além dos parâmetros explicitados, na tabela 12 encontra-se apresentado uma relação comparativa do PCS dos combustíveis alternativos com o PCS do principal combustível fóssil utilizado, no caso o coque de petróleo. Este comparativo é importante pois retrata qual é a massa de coque que se preserva ao consumir combustíveis alternativos.

Tabela 12 – Comparativo energético dos combustíveis alternativos com o coque de petróleo.

| Combustível | PCS | % Comparativo (coque) |
|--------------------------|-------|-----------------------|
| Coque de Petróleo | 8.137 | 100% |
| Pneus triturados | 6.735 | 82,8% |
| <i>Blend</i> de Resíduos | 3.717 | 45,7% |
| Cavaco de Madeira | 3.586 | 44,1% |

Esse comparativo é importante pois informará qual é o volume de coque poupado ao meio ambiente em cada cenário de substituição apresentado. Para obter os resultados em cada cenário deve-se multiplicar as toneladas de cada combustível pelo índice descrito acima.

4.5.2 Cenários da mistura de combustíveis

4.5.2.1 Cenário 1 – *Blend* a R\$ 100,00/t

A seguir serão apresentados vários cenários com simulações de possíveis valores e resultados do modelo. Estas simulações consideraram valores diferentes nos custos de aquisição dos combustíveis para avaliar qual é o comportamento do valor real do *blend* de resíduos em cada cenário. Encontra-se apresentado na tabela 13 o cálculo considerando os custos médios dos combustíveis e um valor estipulado para o *blend* de R\$ 100,00, acrescido de 30% do fator de correção, conforme explicado no item 4.4 deste trabalho.

Tabela 13 – Resultados da Mistura do *Blend* – Cenário 1.

| Combustível | Estoque (t) | Custo (R\$/t) | PCS (kcal/kg) | Custo (R\$/Gj) | Utilização de Combustível (%) | Inserção na Mistura (t) |
|--------------------------|-------------|---------------|---------------|----------------|-------------------------------|-------------------------|
| Moinha de Carvão | 6.250 | 285,85 | 4.553 | 15,00 | 0,0 | 0,00 |
| Coque de Petróleo | 8.333 | 432,00 | 8.137 | 12,68 | 73,0 | 4.656,26 |
| Óleo 2ª | 417 | 2543,15 | 9.269 | 65,53 | 0,0 | 0,00 |
| Pneus triturados | 1.250 | 161,40 | 6.735 | 5,72 | 20,0 | 1.250,00 |
| <i>Blend</i> de Resíduos | 2.493 | 130,00 | 3.717 | 8,35 | 0,0 | 0,00 |
| Cavaco de Madeira | 1.667 | 91,65 | 3.586 | 6,10 | 7,0 | 472,18 |

Fonte: Elaborada pelo autor

É possível perceber que na primeira simulação, com o valor do *blend* a R\$ 100,00/t, acrescido de 30% do fator de correção, que não houve utilização do mesmo na mistura. Os pneus foram responsáveis por cerca de 20% da substituição, como o estoque deste finalizou o modelo utilizou o de segundo melhor custo-benefício para completar a mistura, no caso os cavacos de madeira. Neste exemplo o custo total com combustíveis foi de R\$ 2.256.530,98. Neste cenário haveria um total de 1034,63 t de coque de petróleo preservadas devido ao uso dos pneus triturados e 208,09 t devido ao uso de cavaco de madeira.

4.5.2.2 Cenário 2 – *Blend* a R\$ 76,00/t

Após algumas simulações de valores no intervalo de R\$ 100,00 a R\$ R\$ 77,00, foi possível perceber que o valor de R\$ 76,00 é o limite antes de utilização. Encontra-se apresentado na tabela 14 o cálculo considerando os custos médios dos combustíveis e um valor estipulado para o *blend* de R\$ 76,00, acrescido de 30% do fator de correção.

Tabela 14 - Resultados da Mistura do *Blend* – Cenário 2.

| Combustível | Estoque (t) | Custo (R\$/t) | PCS (kcal/kg) | Custo (R\$/Gj) | Utilização de Combustível (%) | Inserção na Mistura (t) |
|---------------------------------|----------------|------------------|------------------|-------------------|----------------------------------|----------------------------|
| Moinha de Carvão | 6.250 | 285,85 | 4.553 | 15,00 | 0,0 | 0,00 |
| Coque de Petróleo | 8.333 | 432,00 | 8.137 | 12,68 | 73,0 | 4.656,26 |
| Óleo 2ª | 417 | 2543,15 | 9.269 | 65,53 | 0,0 | 0,00 |
| Pneus triturados | 1.250 | 161,40 | 6.735 | 5,72 | 20,0 | 1.250,00 |
| <i>Blend</i> de Resíduos | 2.493 | 98,80 | 3.717 | 6,35 | 0,0 | 0,00 |
| Cavaco de Madeira | 1.667 | 91,65 | 3.586 | 6,10 | 7,0 | 472,18 |

Fonte: Elaborada pelo autor

É possível perceber que na segunda simulação, com o valor do *blend* a R\$ 76,00/t, acrescido de 30% do fator de correção, da mesma maneira que na simulação 1, não houve utilização do *blend* na mistura. Além disso, como não houve alterações em nenhum volume de utilização o custo total com combustíveis se manteve em R\$ 2.256.530,98. Neste cenário haveria um total de 1034,63 t de coque de petróleo preservadas devido ao uso dos pneus triturados e 208,09 t devido ao uso de cavaco de madeira.

4.5.2.3 Cenário 3 – Blend a R\$ 75,00/t

Encontra-se apresentado na tabela 15 o cálculo considerando os custos médios dos combustíveis e um valor estipulado para o *blend* de R\$ 75,00 acrescido de 30% do fator de correção. Nesta simulação já é possível perceber que o ponto de equilíbrio do custo do *blend* de resíduos com os cavacos de madeira é encontrado.

Tabela 15 - Resultados da Mistura do Blend – Cenário 3.

| Combustível | Estoque (t) | Custo (R\$/t) | PCS (kcal/kg) | Custo (R\$/Gj) | Utilização de Combustível (%) | Inserção na Mistura (t) |
|--------------------------|-------------|---------------|---------------|----------------|-------------------------------|-------------------------|
| Moinha de Carvão | 6.250 | 285,85 | 4.553 | 15,00 | 0,0 | 0,00 |
| Coque de Petróleo | 8.333 | 432,00 | 8.137 | 12,68 | 73,0 | 4.649,76 |
| Óleo 2ª | 417 | 2543,15 | 9.269 | 65,53 | 0,0 | 0,00 |
| Pneus triturados | 1.250 | 161,40 | 6.735 | 5,72 | 20,0 | 1.250,00 |
| Blend de Resíduos | 2.493 | 97,50 | 3.717 | 6,27 | 7,0 | 469,77 |
| Cavaco de Madeira | 1.667 | 91,65 | 3.586 | 6,10 | 0,0 | 0,00 |

Fonte: Elaborada pelo autor

É possível perceber que na terceira simulação, com o valor do *blend* a R\$ 75,00/t, acrescido de 30% do fator de correção, houve utilização do mesmo na mistura. Desta forma o *blend* tomou a parcela de contribuição do cavaco de madeira, fazendo com que os 20% fossem ocupados pelos pneus triturados e agora 7% com *blend* de resíduos. Além disso, como houve alterações no volume de utilização o custo total com combustíveis foi reduzido para R\$ 2.256.249,41, ou seja, R\$ 281,57 menor que o anterior. Dessa maneira, a partir deste valor já se economiza recursos na fábrica de cimento. Neste cenário haveria um total de 1034,63 t de coque de petróleo preservadas devido ao uso dos pneus triturados e 214,59 t devido ao uso de *blend* de resíduos.

4.5.2.4 Cenário 4 – Blend a R\$ 17,00/t

Após algumas simulações de valores no intervalo de R\$ 75,00 a R\$ 17,00, acrescidos de 30% do fator de correção, foi possível perceber que o valor de R\$ 17,00 é o limite antes de utilização. Encontra-se apresentado na tabela 16 o cálculo considerando

os custos médios dos combustíveis a um valor estipulado para o *blend* de R\$ 17,00, acrescido de 30% do fator de correção.

Tabela 16 - Resultados da Mistura do *Blend* – Cenário 4.

| Combustível | Estoque (t) | Custo (R\$/t) | PCS (kcal/kg) | Custo (R\$/Gj) | Utilização de Combustível (%) | Inserção na Mistura (t) |
|---------------------------------|----------------|------------------|------------------|-------------------|----------------------------------|----------------------------|
| Moinha de Carvão | 6.250 | 285,85 | 4.553 | 15,00 | 0,0 | 0,00 |
| Coque de Petróleo | 8.333 | 432,00 | 8.137 | 12,68 | 73,0 | 4.649,76 |
| Óleo 2ª | 417 | 2543,15 | 9.269 | 65,53 | 0,0 | 0,00 |
| Pneus triturados | 1.250 | 161,40 | 6.735 | 5,72 | 20,0 | 1.250,00 |
| <i>Blend</i> de Resíduos | 2.493 | 22,10 | 3.717 | 1,42 | 7,0 | 469,77 |
| Cavaco de Madeira | 1.667 | 91,65 | 3.586 | 6,10 | 0,0 | 0,00 |

Fonte: Elaborada pelo autor

Nesta simulação, não há alterações nos volumes utilizados, mas como o custo do *blend* utilizado está menor, o custo final também é menor, sendo ele de R\$ 2.220.828,42. Neste cenário haveria um total de 1034,63 t de coque de petróleo preservadas devido ao uso dos pneus triturados e 214,59 t devido ao uso de *blend* de resíduos.

4.5.2.5 Cenário 5 – *Blend* a R\$ 16,00/t

Encontra-se apresentado na tabela 17 o cálculo considerando os custos médios dos combustíveis e um valor estipulado para o *blend* de R\$ 16,00, acrescido de 30% do fator de correção.

Tabela 17 - Resultados da Mistura do *Blend* – Cenário 5.

| Combustível | Estoque (t) | Custo (R\$/t) | PCS (kcal/kg) | Custo (R\$/Gj) | Utilização de Combustível (%) | Inserção na Mistura (t) |
|---------------------------------|----------------|------------------|------------------|-------------------|----------------------------------|----------------------------|
| Moinha de Carvão | 6.250 | 285,85 | 4.553 | 15,00 | 0,0 | 0,00 |
| Coque de Petróleo | 8.333 | 432,00 | 8.137 | 12,68 | 73,0 | 5.046,37 |
| Óleo 2ª | 417 | 2543,15 | 9.269 | 65,53 | 0,0 | 0,00 |
| Pneus triturados | 1.250 | 161,40 | 6.735 | 5,72 | 0,0 | 0,00 |
| <i>Blend</i> de Resíduos | 2.493 | 20,80 | 3.717 | 1,34 | 27,0 | 1.866,47 |
| Cavaco de Madeira | 1.667 | 91,65 | 3.586 | 6,10 | 0,0 | 0,00 |

Fonte: Elaborada pelo autor

É possível perceber que no quinto cenário, com o valor do *blend* a R\$ 16,00/t, houve utilização total do *blend* como combustível substituto na mistura. Desta forma o *blend* tomou a parcela de contribuição não só do cavaco de madeira, mas também os 20% que na simulação anterior eram ocupados pelos pneus triturados. Desse modo foi encontrado o ponto de equilíbrio do *blend* com os pneus triturados. Um detalhe importante é que o valor do *blend* abaixou muito para conseguir ser mais competitivo economicamente que os pneus triturados pois, devido ao PCS mais baixo do *blend*, o volume de coque de petróleo utilizado subiu. Como o coque é um combustível mais caro, o valor do *blend* teve que ser reduzido de forma a subsidiar a utilização do coque, pois não atenderia a demanda energética sozinho.

Além disso, como houve alterações no volume de utilização o custo total com combustíveis reduziu para R\$ 2.218.855,92, R\$ 1.972,50 menor que o anterior. Neste cenário haveria um total de 852,61 t de coque de petróleo preservadas devido ao uso de *blend* de resíduos.

4.5.2.6 Cenário 6 – *Blend* a R\$ 16,00/t e menores valores dos demais combustíveis

Encontra-se apresentado na tabela 18 o cálculo considerando os custos mais baixos em um período de 2 anos, dos combustíveis e um valor estipulado para o *blend* de R\$ 16,00, acrescido de 30% do fator de correção.

Tabela 18 - Resultados da Mistura do *Blend* – Cenário 6.

| Combustível | Estoque (t) | Custo (R\$/t) | PCS (kcal/kg) | Custo (R\$/Gj) | Utilização de Combustível (%) | Inserção na Mistura (t) |
|---------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|--|------------------------------------|
| Moinha de Carvão | 6.250 | 243,70 | 4.553 | 12,78 | 0,0 | 0,00 |
| Coque de Petróleo | 8.333 | 361,45 | 8.137 | 10,61 | 73,0 | 4.649,76 |
| Óleo 2ª | 417 | 2105,00 | 9.269 | 54,24 | 0,0 | 0,00 |
| Pneus triturados | 1.250 | 129,30 | 6.735 | 4,59 | 20,0 | 1.250,00 |
| <i>Blend</i> de Resíduos | 2.493 | 20,80 | 3.717 | 1,34 | 7,0 | 469,77 |
| Cavaco de Madeira | 1.667 | 77,90 | 3.586 | 5,19 | 0,0 | 0,00 |

Fonte: Elaborada pelo autor

É possível perceber que, com o valor do *blend* a R\$ 16,00/t, houve utilização de 7% do *blend* como combustível substituto na mistura e outros 20% de pneus triturados. Isso

ocorreu pois, com o menor valor dos pneus, o *blend* ficou menos interessante financeiramente, reduzindo assim o seu percentual de inserção. Neste cenário o custo total com combustíveis foi de R\$ 1.852.052,13. Neste cenário haveria um total de 1034,63 t de coque de petróleo preservadas devido ao uso dos pneus triturados e 214,59 t devido ao uso de *blend* de resíduos.

4.5.3.7 Cenário 7 – *Blend* a R\$ 10,00/t e menores valores dos demais combustíveis

Encontra-se apresentado na tabela 19 o cálculo considerando os custos mais baixos num período de 2 anos, dos combustíveis e um valor estipulado para o *blend* de R\$ 10,00, acrescido de 30% do fator de correção.

Tabela 19 - Resultados da Mistura do *Blend* – Cenário 7.

| Combustível | Estoque (t) | Custo (R\$/t) | PCS (kcal/kg) | Custo (R\$/Gj) | Utilização de Combustível (%) | Inserção na Mistura (t) |
|---------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|--|------------------------------------|
| Moinha de Carvão | 6.250 | 243,70 | 4.553 | 12,78 | 0,0 | 0,00 |
| Coque de Petróleo | 8.333 | 361,45 | 8.137 | 10,61 | 73,0 | 5.046,37 |
| Óleo 2ª | 417 | 2105,00 | 9.269 | 54,24 | 0,0 | 0,00 |
| Pneus triturados | 1.250 | 129,30 | 6.735 | 4,59 | 20,0 | 0,00 |
| <i>Blend</i> de Resíduos | 2.493 | 13,00 | 3.717 | 0,84 | 7,0 | 1.866,47 |
| Cavaco de Madeira | 1.667 | 77,90 | 3.586 | 5,19 | 0,0 | 0,00 |

Fonte: Elaborada pelo autor

É possível perceber que, com o valor do *blend* a R\$ 10,00/t, houve novamente utilização de 27% do *blend* como cenário 5 apresentado anteriormente. Neste cenário o custo total com combustíveis foi de R\$ 1.848.275,82. Neste cenário haveria um total de 852,61 t de coque de petróleo preservadas devido ao uso de *blend* de resíduos.

4.5.3.8 Cenário 8 – *Blend* a R\$ 86,00/t e maiores valores dos demais combustíveis

Encontra-se apresentado na tabela 20 o cálculo considerando os custos mais altos em um período de 2 anos, dos combustíveis e um valor estipulado para o *blend* de R\$

86,00, acrescido de 30% do fator de correção. O valor de R\$ 86,00 foi estipulado como o ponto anterior ao ponto de utilização, simulados previamente.

Tabela 20 - Resultados da Mistura do *Blend* – Cenário 8.

| Combustível | Estoque (t) | Custo (R\$/t) | PCS (kcal/kg) | Custo (R\$/Gj) | Utilização de Combustível (%) | Inserção na Mistura (t) |
|--------------------------|----------------|------------------|------------------|-------------------|----------------------------------|----------------------------|
| Moinha de Carvão | 6.250 | 302,50 | 4.553 | 15,87 | 0,0 | 0,00 |
| Coque de Petróleo | 8.333 | 473,90 | 8.137 | 13,91 | 73,0 | 4.656,26 |
| Óleo 2ª | 417 | 2815,00 | 9.269 | 72,54 | 0,0 | 0,00 |
| Pneus triturados | 1.250 | 181,60 | 6.735 | 6,44 | 20,0 | 1.250,00 |
| Blend de Resíduos | 2.493 | 111,80 | 3.717 | 7,18 | 0,0 | 0,00 |
| Cavaco de Madeira | 1.667 | 104,00 | 3.586 | 6,93 | 7,0 | 472,18 |

Fonte: Elaborada pelo autor

É possível perceber que no cenário 8, com o valor do *blend* a R\$ 86,00/t, acrescido de 30% do fator de correção, da mesma maneira que no cenário 2, não houve utilização do *blend* na mistura. No caso, o custo total com combustíveis foi de R\$ 2.482.709,83. Neste cenário haveria um total de 1034,63 t de coque de petróleo preservadas devido ao uso dos pneus triturados e 208,09 t devido ao uso de cavaco de madeira.

4.5.3.9 Cenário 9 – *Blend* a R\$ 85,00/t e maiores valores dos demais combustíveis

Encontra-se apresentado na tabela 21 o cálculo considerando os custos mais altos em um período de 2 anos, dos combustíveis e um valor estipulado para o *blend* de R\$ 85,00, acrescido de 30% do fator de correção.

Tabela 21- Resultados da Mistura do *Blend* – Cenário 9.

| Combustível | Estoque (t) | Custo (R\$/t) | PCS (kcal/kg) | Custo (R\$/Gj) | Utilização de Combustível (%) | Inserção na Mistura (t) |
|--------------------------|----------------|------------------|------------------|-------------------|----------------------------------|----------------------------|
| Moinha de Carvão | 6.250 | 302,50 | 4.553 | 15,87 | 0,0 | 0,00 |
| Coque de Petróleo | 8.333 | 473,90 | 8.137 | 13,91 | 73,0 | 4.656,26 |
| Óleo 2ª | 417 | 2815,00 | 9.269 | 72,54 | 0,0 | 0,00 |
| Pneus triturados | 1.250 | 181,60 | 6.735 | 6,44 | 20,0 | 1.250,00 |
| Blend de Resíduos | 2.493 | 110,50 | 3.717 | 7,10 | 0,0 | 469,77 |
| Cavaco de Madeira | 1.667 | 104,00 | 3.586 | 6,93 | 7,0 | 0,00 |

Fonte: Elaborada pelo autor

É possível perceber que no cenário 9, com o valor do *blend* a R\$ 85,00/t, acrescido de 30% do fator de correção, houve utilização de 7% *blend* na mistura. No caso, o custo total com combustíveis foi de R\$ 2.482.431,43, R\$ 278,40 a menos que na simulação anterior. Além disso, é interessante ressaltar que, considerando os custos mais altos de aquisição já registrados, o primeiro ponto de equilíbrio do *blend*, quando comparado com cavaco de madeira, sobe de R\$ 76,00 (conforme cenário 3) para R\$ 85,00 (conforme cenário 9). Neste cenário, fica evidente que *blend* teria um maior valor de mercado. Além disso, haveria um total de 1034,63 t de coque de petróleo preservadas devido ao uso dos pneus triturados e 214,59 t devido ao uso de *blend* de resíduos.

4.5.3.10 Cenário 10 – *Blend* a R\$ 21,00/t e maiores valores dos demais combustíveis

Após a realização de simulações com valores decrescentes, foi possível identificar o ponto de equilíbrio do *blend*, quando comparado com os pneus triturados. Encontra-se apresentado na tabela 22 o cálculo considerando os custos mais altos em um período de 2 anos, dos combustíveis e um valor estipulado para o *blend* de R\$ 21,00, acrescido de 30% do fator de correção.

Tabela 22 - Resultados da Mistura do *Blend* – Cenário 10.

| Combustível | Estoque (t) | Custo (R\$/t) | PCS (kcal/kg) | Custo (R\$/Gj) | Utilização de Combustível (%) | Inserção na Mistura (t) |
|---------------------------------|-------------|----------------|---------------|----------------|-------------------------------|-------------------------|
| Moinha de Carvão | 6.250 | 302,50 | 4.553 | 15,87 | 0,0 | 0,00 |
| Coque de Petróleo | 8.333 | 473,90 | 8.137 | 13,91 | 73,0 | 5.046,37 |
| Óleo 2ª | 417 | 2815,00 | 9.269 | 72,54 | 0,0 | 0,00 |
| Pneus triturados | 1.250 | 181,60 | 6.735 | 6,44 | 0,0 | 0,00 |
| <i>Blend</i> de Resíduos | 2.493 | 27,30 | 3.717 | 1,75 | 27,0 | 1.866,47 |
| Cavaco de Madeira | 1.667 | 104,00 | 3.586 | 6,93 | 0,0 | 0,00 |

Fonte: Elaborada pelo autor

Novamente, é possível perceber que, assim como no quinto cenário, no décimo, com o valor do *blend* a R\$ 21,00/t, acrescido de 30% do fator de correção, houve utilização total do *blend* como combustível substituto na mistura. Desta forma o *blend* tomou a parcela de contribuição não só do cavaco de madeira, mas também os 20% que

na simulação anterior eram ocupados pelos pneus triturados. Desse modo foi encontrado o ponto de equilíbrio do *blend* com os pneus triturados. Um detalhe importante é que o valor do *blend* novamente abaixou para conseguir ser mais competitivo economicamente que os pneus triturados pois, devido ao PCS mais baixo do *blend*, o volume de coque de petróleo utilizado subiu. Como o coque é um combustível mais caro, o valor do *blend* teve que ser reduzido de forma a subsidiar a utilização do coque, pois não atenderia a demanda energética sozinho. É importante frisar que apesar do cenário ser basicamente o mesmo do quinto, o valor do *blend* ficou valorizado em R\$ 5,00.

Além disso, como houve alterações no volume de utilização o custo total com combustíveis subiu para R\$ 2.442.431,02 ao ano. Neste cenário ainda haveria um total de 852,61 t de coque de petróleo preservadas devido ao uso de *blend* de resíduos. A tabela 23 resume o comportamento de todos os cenários apresentados.

Tabela 23 - Resumo geral dos cenários.

| Cenário | Valor dos Pneus | Valor do Cavaco | Valor do <i>blend</i> ³ | Utilização Calculada | Custo Total com combustíveis | Economia estimada de coque (t) |
|-------------------|-----------------|-----------------|------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| Cenário 1 | R\$ 161,40 | R\$ 91,65 | R\$ 100,00 | 20% Pneus + 7% Madeira | R\$ 2.256.530,98 | 1242,72 |
| Cenário 2 | R\$ 161,40 | R\$ 91,65 | R\$ 76,00 | 20% Pneus + 7% Madeira | R\$ 2.256.530,98 | 1242,72 |
| Cenário 3 | R\$ 161,40 | R\$ 91,65 | R\$ 75,00 | 20% Pneus + 7% <i>Blend</i> | R\$ 2.256.249,41 | 1249,22 |
| Cenário 4 | R\$ 161,40 | R\$ 91,65 | R\$ 17,00 | 20% Pneus + 7% <i>Blend</i> | R\$ 2.220.828,42 | 1249,22 |
| Cenário 5 | R\$ 161,40 | R\$ 91,65 | R\$ 16,00 | 27% <i>Blend</i> | R\$ 2.218.855,92 | 852,61 |
| Cenário 6 | R\$ 129,30 | R\$ 77,90 | R\$ 16,00 | 20% Pneus + 7% <i>Blend</i> | R\$ 1.852.052,13 | 1249,22 |
| Cenário 7 | R\$ 129,30 | R\$ 77,90 | R\$ 10,00 | 27% <i>Blend</i> | R\$ 1.848.275,82 | 852,61 |
| Cenário 8 | R\$ 181,60 | R\$ 104,00 | R\$ 86,00 | 20% Pneus + 7% Madeira | R\$ 2.482.709,83 | 1242,72 |
| Cenário 9 | R\$ 181,60 | R\$ 104,00 | R\$ 85,00 | 20% Pneus + 7% <i>Blend</i> | R\$ 2.482.431,43 | 1249,22 |
| Cenário 10 | R\$ 181,60 | R\$ 104,00 | R\$ 21,00 | 27% <i>Blend</i> | R\$ 2.442.431,02 | 852,61 |

Fonte: Elaborada pelo autor, 2017.

³ Valor sem considerar o fator de correção de 30%.

5 CONCLUSÃO

Ao fim deste trabalho, pode-se concluir que a utilização de *blend* de resíduos é relevante financeiramente para as fabricas de cimento. Nos cenários tratados a utilização percentual de *blend* varia de acordo com o valor atribuído ao *blend* ou devido ao valor de mercado dos outros combustíveis alternativos passíveis de utilização em fabricas de cimento. Conforme é demonstrado na figura 25, o *blend* promove uma redução de custos mais rápida quando o valor dos outros combustíveis está mais alto e fica menos interessante quando os valores dos demais combustíveis está mais baixo.

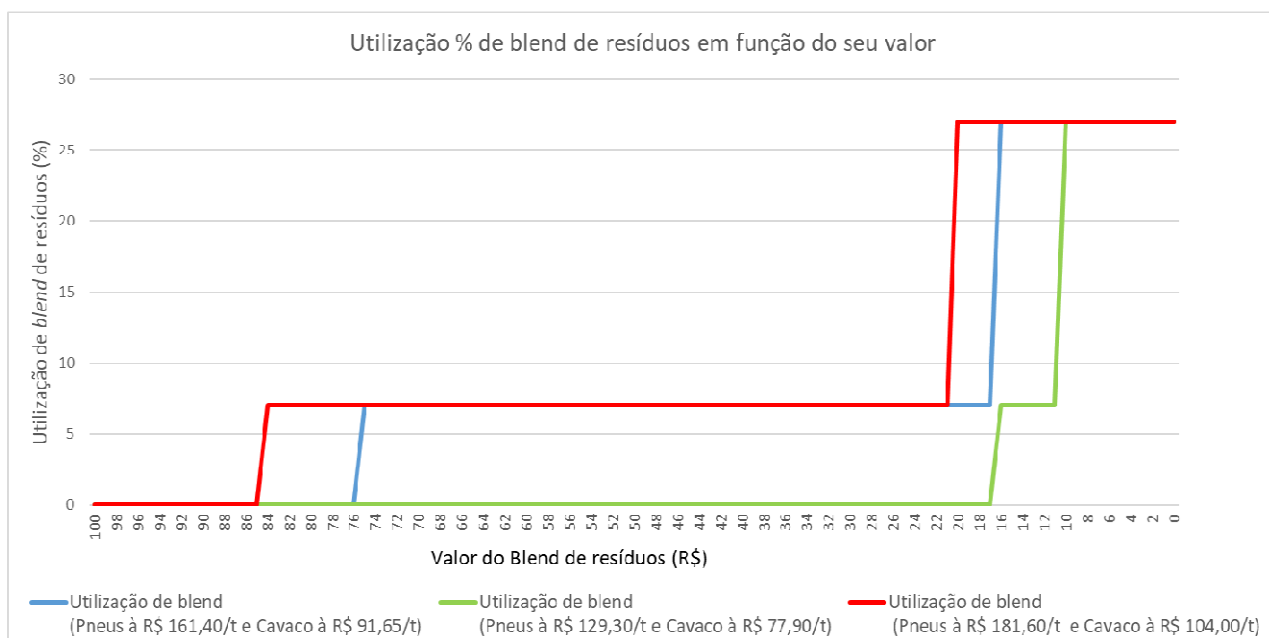


Figura 25 – Utilização percentual de *blend* de resíduos em função do seu valor.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Outro fator que poderia alterar ou agregar maior valor ao *blend* de resíduos seria um incremento no PCS. Caso o PCS fosse mais alto, maior seria o valor de ponto de equilíbrio para a utilização de *blend* quando comparado aos demais combustíveis. Outro ponto que evidencia este fato, é que os menores custos totais, considerando cada um dos três cenários de valores dos combustíveis alternativos (como pode ser observado na tabela 23), possuem um índice de substituição de 27% de blend de resíduos. Em contrapartida ao menor custo, outro ponto que deve ser observado é que utilizando um índice de substituição de 27% de *blend* tem-se uma redução da economia teórica de coque de petróleo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na atual conjuntura do mercado, apoiado pela Política Nacional de Resíduos Sólidos, tecnologias sustentáveis para a destinação de resíduos ganham força, como a reciclagem e valorização energética.

Mas ao realizar um estudo no município de Betim fica evidente que essa realidade não se aplica ao município. Historicamente mais de 98% do resíduo do município é destinado para aterro sanitário. Comparado aos outros municípios do Brasil, onde cerca de 50% ainda faz a destinação de seus resíduos para lixões este é um fator positivo, por outro lado, quando comparado a países desenvolvidos, fica evidenciado o grande potencial energético que é desperdiçado com a disposição de resíduos em aterros sanitários.

Apesar de haver uma associação de catadores de papel, sua estrutura é muito pequena visto o grande volume de resíduos gerados no município. Para dar conta de toda esta demanda haveria necessidade de investimento em infraestrutura, em adequações de segurança, tecnologia e captação de mais catadores para suportar todo volume de resíduos gerado.

Porém existe uma oportunidade realizar a destinação de cerca de 30% dos resíduos para a tecnologia de valorização energética sem reduzir a atual reciclagem. Foi possível constatar que estimadas 29.917 toneladas por ano poderiam ser destinadas para a valorização energética e formar um *blend* com um PCS de 3717 kcal/kg, acima do limite mínimo exigido pela cimenteira. A prática habitual das cimenteiras é ser remunerada pela queima de resíduos, pois o foco da operação era a destruição de resíduos em um forno de cimento e não a sua substituição como combustível alternativo. Atualmente esse cenário está mudando e isso se deve a cinco fatos importantes:

1. Altos custos dos combustíveis fósseis;
2. Redução da geração de resíduos nas indústrias, diminuindo assim a disponibilidade destes para queima em fornos;
3. Investimento em tecnologia e aperfeiçoamento das UVE's para ganho de qualidade no produto;
4. Retração do mercado isentando as cimenteiras da necessidade de alta produção;

5. Conscientização da importância de que haja uma produção visando práticas que preservem o meio ambiente.

Estes fatores estão causando uma mudança inevitável no mercado, onde as cimenteiras precisam se tornar mais competitivas e acabam entrando em uma árdua concorrência para receber/adquirir o combustível alternativo das UVE's.

Além de avaliar a destinação de resíduos sólidos do município de Betim considerando a ordem de prioridade estabelecida pela Política Nacional de Resíduos Sólidos e verificar a existência de potencial de aproveitamento de parte dos resíduos sólidos que atualmente são destinados para aterro sanitário na tecnologia de coprocessamento, um outro objetivo alcançado deste trabalho era determinar o valor do *blend* de resíduos através de comparativo para utilização em fornos de fabricação de cimento.

Este objetivo foi alcançado através de um modelo de otimização desenvolvido que leva em consideração os valores de mercado dos principais combustíveis para fornos de fabricação de cimento, o PCS dos mesmos e as restrições de um forno.

Dessa forma foi possível determinar também o ponto de equilíbrio da relação do *blend* de resíduos quando comparado com cavaco de madeira e pneus triturados. Esta ferramenta se mostrou útil para as fábricas de cimento determinarem o valor real do *blend* de resíduos em cada momento, baseando-se principalmente no mercado de combustíveis para se manter num menor custo operacional.

Além dos ganhos econômicos, as cimenteiras ao adotarem combustíveis alternativos provenientes de UVE's, ainda cumprem com seu papel ambiental perante a sociedade, contribuindo para a preservação do meio ambiente, visto que estas fontes de energia são provenientes de resíduos anteriormente descartadas em aterros sanitários.

Por fim conclui-se neste trabalho que há uma oportunidade de gerar uma grande quantidade de *blend* de resíduos, dentro dos parâmetros de qualidade, provenientes de resíduos que hoje são destinados para aterro sanitário. Esta prática resultaria em redução do passivo ambiental gerado e aproveitamento do potencial energético hoje depositado no aterro, redução do consumo de combustíveis fósseis utilizados pelas fábricas de cimento e ainda atender a legislação no que diz respeito a ordem de prioridade de destinação de resíduos. Diante do trabalho exposto, é possível afirmar que, para as fábricas de cimento, o lixo de hoje é a energia do amanhã.

6 REFERÊNCIAS

ABNT (2004). **NBR 10.004 – Resíduos Sólidos – Classificação**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 71p. Disponível em: <<http://www.videverde.com.br/docs/NBR-n-10004-2004.pdf>> Acesso em: 16 abr. 2017.

ANDRADE, Eduardo Leopoldino. **Introdução à Pesquisa Operacional: Análise de Decisões**. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

ANEEL (2006), “Agência Nacional de Energia Elétrica”, Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/>> *apud* RENÓ, Maria Luiza Grillo. **Uso de Técnicas de Otimização Robusta Multi-Objetivos na Produção de Cimento**. Dissertação de mestrado (mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, 2007. Disponível em <<http://saturno.unifei.edu.br/bim/0036354.pdf>> Acesso em: 03 mai. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. **Panorama do coprocessamento Brasil 2015**. 2015. Disponível em: <http://coprocessamento.org.br/cms/wp-content/uploads/2015/10/panorama_coprocessamento_2015.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.007. **Amostragem de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro. 2004.

ASTM D 1238 - 94 a, "**Standard test method for flow rates of thermoplastics by extrusion plastometer**", Annual Book of ASTM Standards, 1994. *apud* DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA – USP. Apostila de aulas práticas, 2007. Disponível em: <<http://sites.poli.usp.br/d/pqi2110/arquivos/apost-lab-qtg-2014.pdf>>. Acesso em: 22 mar. 2017.

BETIM. **Plano municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Betim**. 128 p. Secretaria de Meio ambiente. Betim. 2015. Disponível em: <[http://www.betim.mg.gov.br/ARQUIVOS_ANEXO/Plano%20Municipal%20de%20Betim%20-%20Revis%C3%A3o%20-%202015.09.15%20\(1\)%20\(1\);;20151104.pdf](http://www.betim.mg.gov.br/ARQUIVOS_ANEXO/Plano%20Municipal%20de%20Betim%20-%20Revis%C3%A3o%20-%202015.09.15%20(1)%20(1);;20151104.pdf)> Acesso em 15 dez. 2016.

BRASIL – SENADO FEDERAL - AGÊNCIA SENADO. **Lixões a céu aberto persistem, apesar do prazo para substituí-los por aterros sanitários**. 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>> Acesso em 15 abr. 2017.

BRASIL. **Lei nº 12.305, DE 2 de agosto de 2010: Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências**. Diário Oficial da União, Brasília, 02 ago. de 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm> Acesso em: 23 abr. 2017.

BASTOS, B.Q. **Tecnologias de Aproveitamento energético de Resíduos Sólidos Urbanos**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10007270.pdf>> Acesso em 11 jun. 2017.

CARPIO, R.C. (2005). **Otimização no Coprocessamento de Resíduos na Indústria do Cimento Envolvendo Custos, Qualidade e Impacto Ambiental**. Tese (Doutorado) – Instituto de Engenharia Mecânica Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, 2005. Disponível em: <<http://saturno.unifei.edu.br/bim/0029895.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2017.

CEMBURAU - The European Cement Association – “Best Available Techniques for the Cement Industry”, 1999. On-line. Disponível em: <http://www.cembureau.be>. apud SALOMON, Virgínia Gouveia. **Avaliação dos efeitos da presença de metais pesados nos resíduos coprocessados quando utilizados como combustíveis alternativos e matéria-prima na indústria cimenteira**. Tese (Mestrado) – Instituto de Engenharia Mecânica Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, 2002. Disponível em: <<http://saturno.unifei.edu.br/bim/0031074.pdf>> Acesso em: 22 mar. 2017.

CIMENTO (2006), “Tudo sobre o cimento”, Disponível em: <http://www.cimento.org/> apud RENÓ, Maria Luiza Grillo. **Uso de Técnicas de Otimização Robusta Multi-Objetivos na Produção de Cimento**. Dissertação de mestrado (mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, 2007. Disponível em <<http://saturno.unifei.edu.br/bim/0036354.pdf>> Acesso em: 21 mar. 2017.

CNM - Confederação Nacional dos Municípios, **Diagnóstico da Gestão Municipal de Resíduos Sólidos 2015**, p. 2. 2015. Disponível em: <<http://www.cnm.org.br/biblioteca/exibe/2596>> Acesso em 24 abr. 2017.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução no 264, de 26 de agosto de 1999**, CONAMA, 1999. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=262>>. Acesso em: 20 mar. 2017.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução no 313, de 29 de outubro de 2002**, CONAMA, 2002. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=335>> . Acesso em: 22 mar. 2017.

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA – DEQ USP. Apostila de aulas práticas, 2007. Disponível em: <<http://sites.poli.usp.br/d/pqi2110/arquivos/apost-lab-qtg-2014.pdf>>. Acesso em: 12 mar. 2017.

GOMIDE. F. **Modelos de Otimização e Simulação**. Slides. DCA. FEEC. UNICAMP. Brasil. 2016. Disponível em: <http://www.dca.fee.unicamp.br/~gomide/courses/EA044/transp/EA_044_ModelosOtimizacaoSimulacao.pdf> Acesso em: 12 abr. 2017.

HENRIQUES, R. M. **Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos: Uma Abordagem Tecnológica**. 2004. Tese de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: < http://observatorioambiental.iff.edu.br/publicacoes/publicacoes-cientificas/lixo_tese.pdf> Acesso em 09 jun. 2017.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Curso de combustão industrial. São Paulo. [sn]. 2001. *apud* POLI, D. C. R., ZANCHETA, M. N., BOARI, Z. M., MELDONIAN, N. L., MOURA, C. L., JIURGIU, P.A. **Uma avaliação das metodologias para determinação do poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos**. Revista de ciências exatas e tecnologia. Publicação Anhanguera Educacional Ltda. v.8, n.8, 2013, p. 9-31. Disponível em: <<http://sare.anhanguera.com/index.php/rcext/article/view/4603>>. Acesso em: 14 mai. 2017.

KIHARA, Y. **Coprocessamento de Resíduos em Fornos de Cimento: Resíduos Urbanos**. Slides. CMMR, 2009. Disponível em: < <http://feam.br/images/stories/arquivos/mudnacaclimatica/cenario%20coproccmrrfinal-v1.pdf> >. Acesso em: 13 mai. 2017.

LIMA, R.G.C. e FERREIRA, O.M. **Resíduos Industriais – Métodos de Tratamento e Análise de Custos**. Universidade Católica de Goiás – Departamento de Engenharia Ambiental. Goiânia, Goiás, 2007. Disponível em: <<http://www.ucg.br/ucg/prope/cpgss/ArquivosUpload/36/file/RES%C3%8DDUOS%20INDUSTRIAIS%20-%20M%C3%89TODOS%20DE%20TRATAMENTO%20E%20AN%C3%81LISE%20DE%20CUSTOS.pdf>>. Acesso em: 13 mai. 2017

MALARD, Antônio Augusto Melo. **Avaliação ambiental do setor de coprocessamento no Estado de Minas Gerais**. 2016. 1 recurso online (246 p.). Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, SP.

MARINGOLO;V. **Clínquer Coprocessado: Produto de Tecnologia Integrada para Sustentabilidade e Competitividade da Indústria de Cimento**. Tese de Doutorado Instituto de Geociências em Mineralogia e Petrologia São Paulo, 2001. Disponível em :<<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44135/tde-16022006-132935/ptbr.php>> Acesso em: 5 mai. 2017.

MINAS GERAIS. Deliberação Normativa COPAM nº 154, de 25 de agosto de 2010. **Dispõe sobre o Coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer**. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=14613>> Acesso em 01 jun 2017.

MOKRZYCKI, E., ULIASZ-BOCHENGZYK, A. (2003), “Alternative Fuel for the Cement Industry”, Applied Energy, v 74, pp 95-100. *apud* RENÓ, Maria Luiza Grillo. **Uso de Técnicas de Otimização Robusta Multi-Objetivos na Produção de Cimento**. Dissertação de mestrado (mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, 2007. Disponível em <<http://saturno.unifei.edu.br/bim/0036354.pdf>> Acesso em: 22 mar. 2017.

PAULA, Luiz Gonzaga de. **Análise Termoeconômica do Processo de Produção de Cimento Portland com Coprocessamento de Misturas de Resíduos**. Dissertação de mestrado (mestrado em engenharia mecânica), Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, 2009. Disponível em : <<http://saturno.unifei.edu.br/bim/0034506.pdf>>. Acesso em: 12 abr. 2017.

PEREIRA, Thiago Henrique Martins; CARVALHO, Gustavo Menezes; RODRIGUES, Alexandre de Cássio. **Otimização da Produção de Combustível Alternativo de uma Unidade de Valorização Energética**. Revista Petra, v. 1, n. 1, 2015.

PERLINGEIRO, Carlos Augusto G. **Engenharia de processos: análise, simulação, otimização e síntese de processos químico**. São Paulo: Edgar Blucher, 2006.

POLI, D. C. R., ZANCHETA, M. N., BOARI, Z. M., MELDONIAN, N. L., MOURA, C. L., JIURGIU, P.A. **Uma avaliação das metodologias para determinação do poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos**. Revista de ciências exatas e tecnologia. Publicação Anhanguera Educacional Ltda. v.8, n.8, 2013, p. 9-31. Disponível em:

<
https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwj_m_PBk8vUAhUEQCYKHdxdBhkQFggrMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.pgsskroton.com.br%2Fseer%2Findex.php%2Frcext%2Farticle%2Fdownload%2F2217%2F2123&usg=AFQjCNFDrKqINSYCJqWkQdsLs0KNH82Rog >. Acesso em: 14 mai. 2017.

RANGEL, S. **Construção de Modelos de Otimização e Ferramentas Computacionais**. Slides. Departamento de Matemática Aplicada. UNESP. Brasil. 2015. Disponível em: <http://www.ibilce.unesp.br/Home/Departamentos/MatematicaAplicada/docentes/socorro/aula2_mod_ferr_2015.pdf> Acesso em: 14 mar. 2017.

RENÓ, Maria Luiza Grillo. **Uso de Técnicas de Otimização Robusta Multi-Objetivos na Produção de Cimento**. Dissertação de mestrado (mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, 2007. Disponível em <<http://saturno.unifei.edu.br/bim/0036354.pdf>> Acesso em: 22 mar. 2017.

RIBEIRO FILHO, J. L., TRELEAVEN, P. C., ALLIPI, C. (1994). Genetic-Algorithm Programming Environments. IEEE, Computer, vol. 27, pp. 28-43. apud CARPIO, R.C. (2005). **Otimização no Coprocessamento de Resíduos na Indústria do Cimento Envolvendo Custos, Qualidade e Impacto Ambiental**. Tese (Doutorado) - Instituto de Engenharia Mecânica Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, 2005. Disponível em: <<http://saturno.unifei.edu.br/bim/0029895.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2017.

RODRIGUES, W. **Metodologia Científica**. FAETEC / IST, Paracambi, 2007

ROOS, Djeovani; CARVALHAL, Marcelo Dornelis; RIBEIRO, Solange Queiróz. **A Precariedade do Trabalho dos Catadores de Material Reciclável no Oeste**

Paranaense e a Dinâmica Estratégica da Reprodutividade do Capital. Revista Pegada, v. 11, n. 2, 2010.

SALOMON, V. G. (2002), Avaliação dos Efeitos da Presença de Metais Pesados nos Resíduos Coprocessados quando Utilizados como Combustíveis Alternativos e Matéria-Prima na Indústria Cimenteira, Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI, 146 p. *apud* RENÓ, Maria Luiza Grillo. **Uso de Técnicas de Otimização Robusta Multi-Objetivos na Produção de Cimento.** Dissertação de mestrado (mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, 2007. Disponível em <<http://saturno.unifei.edu.br/bim/0036354.pdf>> Acesso em: 15 jan. 2017.

SNIC, 2009. Press Kit 2009. Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. Rio de Janeiro, RJ. *Apud* WILLS, William. **Estudo 61: Indústria do cimento.** Perspectivas dos investimentos sociais no Brasil. 2010. Disponível em: <<http://www.cedeplar.ufmg.br/pesquisas/pis/Estudo%2061.pdf>> Acesso em: 22 mar. 2017.

SNIC, 2017. Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **História.** Disponível em: <<http://www.snic.org.br/historia.asp>> Acesso em: 19 jun. 2017.

SOUZA, F.A. **Coprocessamento de Resíduos Industriais.** Slides. Votorantim Cimentos. 2008. Disponível em: <[http://www.abmbrasil.com.br/cim/download/20080327_2workshopagregado_Francis](http://www.abmbrasil.com.br/cim/download/20080327_2workshopagregado_Francis%20Alberto.pdf)>. Acesso em: 22 abr. 2017.

TOCCHETTO, M.R.L. **Gerenciamento de Resíduos Sólidos Industriais.** 2005. Universidade Federal de Santa Maria. Apostila - Curso de Química Industrial. Disponível em: <<http://www.blogdocancado.com/wpcontent/uploads/2012/04/gerenciamento-de-residuos-solidos-industriais.pdf>>. Acesso em: 17 abr. 2017.

UTLU, Z., SOGUT, Z., HEPBASLI, A., OKTAY, Z. (2006), "Energy and Exergy Analyses of Raw Mill in a Cement Production", Applied Thermal Engineering, v 26, pp 2479- 2489. *Apud* RENÓ, Maria Luiza Grillo. **Uso de Técnicas de Otimização Robusta Multi-Objetivos na Produção de Cimento.** Dissertação de mestrado (mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, 2007. Disponível em <<http://saturno.unifei.edu.br/bim/0036354.pdf>> Acesso em: 02 mai. 2017.

VOTORANTIM CIMENTOS, "História do Cimento". On-line. Disponível em: <www.votorantimcimentos.com.br>. *apud* SALOMON, Virgínia Gouveia. **Avaliação dos efeitos da presença de metais pesados nos resíduos coprocessados quando utilizados como combustíveis alternativos e matéria-prima na indústria cimenteira.** Tese (Mestrado) – Instituto de Engenharia Mecânica Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, 2002. Disponível em: <<http://saturno.unifei.edu.br/bim/0031074.pdf>> Acesso em: 13 mar. 2017.

WILLS, William. **Estudo 61: Indústria do cimento. Perspectivas dos investimentos sociais no Brasil.** 2010. Disponível em: <<http://www.cedeplar.ufmg.br/pesquisas/pis/Estudo%2061.pdf>> Acesso em: 22 out. 2016.

7 ANEXOS

Anexo I – Declaração de Vencedor do Prêmio CSUL de Qualidade Urbana, chancelado pela União Brasileira para a Qualidade – UBQ, com o projeto “Valorização Energética de Resíduos: O Lixo de Hoje é a Energia do Amanhã”.



DECLARAÇÃO

Declaramos para os devidos fins, que Thiago Henrique Martins Pereira foi vencedor do Prêmio CSul de Qualidade Urbana - Ciclo 2016, com o Projeto “VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS: O LIXO DE HOJE É A ENERGIA DO AMANHÃ”, categoria Pessoa Física, Eixo Temático: Materiais e Recursos.

Resumo do Projeto:

No atual cenário ambiental, com tecnologias sustentáveis para destinação da ordem de prioridade para destinação de resíduos, estabelecidas pela Lei 12.305/2010, a valorização energética torna-se cada vez mais viável e competitiva economicamente.

Objetiva-se nesse trabalho, apresentar um método que determine em que proporção os resíduos recebidos em uma UVE - Unidade de Valorização Energética devem ser misturados para otimizar a produção de combustível alternativo e, ao mesmo tempo, atender aos critérios de qualidade exigidos pelas cimenteiras.

Essa ferramenta auxiliará na redução de resíduos dispostos em aterros sanitários e na economia de combustíveis fósseis comumente utilizados em fornos de cimento, uma vez que ela aumentará as possibilidades de recebimento destes resíduos para a valoração energética.

Por ser verdade, firmamos a presente.

Belo Horizonte, 23 de março de 2017.

Silvana Rizzioli
Presidente



Anexo II – Laudo de Avaliações Químicas de Resíduos da Essencis MG



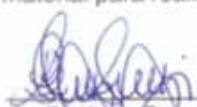
Laudo Avaliações Químicas de Resíduos

Conforme solicitação do Eng. Thiago Henrique Martins Pereira, abaixo tabela de resultados das análises físico-químicas dos resíduos conforme descrição. No caso foram analisadas amostras pulverizadas para leitura no calorímetro.

| Categoria | Resíduo* | PCS (kcal/kg) | % de Cloretos | % de Fluoretos | % de cinzas | % de Umidade |
|--------------------------------|---|---------------|---------------|----------------|-------------|--------------|
| Poda | Flores, podas de árvores e grama secas | 3016,32 | 0,04 | 0,01 | 1,2 | 2,36 |
| Plástico | Sacos, sacolas, embalagens de refrigerantes, água e leite, recipientes de produtos de limpeza, utensílios de cozinha, látex, sacos de rafia | 3851,11 | 0,39 | 0,04 | 2,42 | 1,89 |
| | Espunjas | 3628,33 | 0,13 | 0,06 | 0,63 | 1,92 |
| | Isopor | 4090,81 | 0,09 | 0,02 | 1,16 | 0,95 |
| Papel e Papelão | Caixas, revistas, jornais, cartões, papel, pratos, cadernos, livros, pastas, embalagens longa vida | 4322,61 | 0,11 | 0,02 | 3,21 | 0,87 |
| Pedra, terra, louça e cerâmica | Vasos de flores, pratos, xícaras, restos de construção, terra, tijolos, cascalho e pedras decorativas | ND | ND | ND | ND | ND |
| Madeira | Caixas, tábuas, palitos de fósforo, palitos de picolé, tampas, móveis e lenha. | 3264,55 | 0,16 | 0,04 | 3,21 | 3,44 |
| Couro e borracha | Bolsas de couro, mochilas, sapatos, tapetes, luvas látex, cintos, baiões | 5320,07 | 0,27 | 0,06 | 4,36 | 3,52 |
| Têxtil | Aparas, roupas, panos de limpeza, pedaços de tecido, bolsas de pano | 4241,22 | 0,24 | 0,04 | 3,95 | 2,14 |
| Diversos | Velas de cera, restos de sabão e sabonete, cartões de crédito, lápis de cera, embalagens metalizadas, lixas e outros materiais de difícil identificação | 1854,22 | 0,18 | 0,03 | 1,25 | 5,21 |
| | Carvão | 5630,52 | 0,11 | 0,02 | 2,11 | 3,25 |
| | Giz | ND | ND | ND | ND | ND |
| | Pontas de cigarro, rochas e sacos de aspirador de pó | 4521,09 | 0,18 | 0,04 | 3,25 | 4,21 |

*Nos campos onde houver mais de um resíduo, foi produzida uma amostra com partes iguais de cada material para realização das análises.

Sem mais para este.


Regiane Camargos da Silva
Téc. Química

Regiane Camargos da Silva
Téc. Química
CRQ - 124276/0
Cuiabá - MT

107 004 980/0001-40
ESSENCIS MG SOLUÇÕES AMBIENTAIS S/A.
BR 381, KM 499 - Morada do Trevo
CEP. 32600-836 - Cx. Postal 12
B E T I M - M G

Anexo III – Anexo II do Contrato da Essencis com a cimenteira LafargeHolcim – Parâmetros de Qualidade exigidos no *blend* de resíduos.



ANEXO II

| Parâmetros de Processo | | | | | | | |
|------------------------|---|-------------------------|-----------------------------------|--|------------------------------------|--|--------------------------------------|
| Linha Blend Terceiro | | | | | | | |
| Temperatura (°C) | Radiação (mSv) | Umidade (%) | PCI (kcal/kg) | PCS (kcal/kg) | Fe ₂ O ₃ (%) | Fluoreto (F) (%) | Fe metálico + material imantável (%) |
| < 60 | < 50 | < 30 | ≥ 3200 | ≥ 3600 | < 5,0 | < 0,50 | < 0,5 |
| PCB's (ppm) | Varredura de orgânicos | Mercúrio (Hg) (ppm) | Soma grupo I (Cd + Hg + Ti) (ppm) | Soma grupo II (As + Co + Ni + Se + Te) (ppm) | Chumbo (Pb) (ppm) | Soma grupo III (Cr + Pb + Sb + Sn + V) (ppm) | Granulometria (%) Máx. |
| < 50 | Conforme limites toxicológicos EWC-2002 | < 5 | ≤ 100 | ≤ 1500 | ≤ 3000 | ≤ 5800 | ≤ 50 mm |
| Cinzas (%) | Zinco | Cloretos Total (Cl) (%) | Berílio | Enxofres (%) | Cobre | pH em solução | |
| < 40 | < 30000 | < 0,28 | < 5 | < 1,0 | < 5000 | 4 a 10 | |

Silvia
CP