UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE SAÚDE PÚBLICA

Adriana Amaral Martini

Estudo de alternativa de valorização de resíduos de serviços de saúde advindos de processo de desinfecção por desativação eletrotérmica (ETD)

SÃO PAULO
2016

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE SAÚDE PÚBLICA

Adriana Amaral Martini

Estudo de alternativa de valorização de resíduos de serviços de saúde advindos de processo de desinfecção por desativação eletrotérmica (ETD)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Ambiente, Saúde e Sustentabilidade, da Faculdade de Saúde Pública, da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientadora: Wanda Maria Risso Günther
Co-orientador: Edinilson Viana

SÃO PAULO
2016

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto na sua forma impressa como eletrônica. Sua reprodução, total ou parcial, é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano da dissertação.

Catalogação da Publicação

Serviço de Documentação

Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo

Martini, Adriana Amaral
Estudo de alternativa de valorização de resíduos de serviços de saúde advindos de processo de desinfecção por desativação eletrotérmica (ETD). Wanda Maria Risso Günther e Edinilson Viana – São Paulo – 2016.
Nº folhas. f.: il. Final 90.
Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo - 2016

MARTINI, Adriana Amaral. Estudo de alternativa de valorização de resíduos de serviços de saúde advindos de processo de desinfecção por desativação eletrotérmica (ETD). Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

FOLHA DE APROVAÇÃO (DISSERTAÇÃO)

MARTINI, Adriana Amaral

Estudo de alternativa de valorização de resíduos de serviços de saúde advindos de processo de desinfecção por desativação eletrotérmica (ETD).

Dissertação apresentada ao ***Programa de Pós-Graduação Ambiente, Saúde e Sustentabilidade, da Faculdade de Saúde Pública, da Universidade de São Paulo***, para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovado em: _____/_____/_____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. _____ Instituição:_____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição:_____

Julgamento: _____Assinatura:_____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

DEDICATÓRIA

Aos meus pais,
Edgard e Eliza, pelo
incentivo, apoio e amor.

Aos meus irmãos,
Alexandre e Ana Cristina,
pelo incentivo e carinho
constantes.

Aos meus
sobrinhos Gabriela, Juliana,
Lucas e Rafael que alegram
minha vida.

AGRADECIMENTOS

À Deus por me dar forças e fé para continuar a acreditar em mim e nos meus sonhos.

Aos meus pais, que são minha base e que me proporcionaram chegar até aqui. Vocês são minha inspiração.

Aos meus irmãos por todo apoio e torcida.

Aos meus sobrinhos pela alegria que me trazem.

À minha orientadora, Profª. Drª. Wanda Maria Risso Günther pela dedicação, apoio, incentivo e parceria.

Ao meu co-orientador Ednilson Viana por toda colaboração e incentivo.

Às colegas Angela e Larissa por toda ajuda oferecida.

Ao Celso Luiz Guido Braga, pela amizade, por incentivar o meu desenvolvimento profissional e por todas as oportunidades que me proporcionou.

Ao Julio Cavasin e André Gomes, que autorizaram realização deste estudo "*in loco*".

Aos amigos da Unidade de Tratamento de Resíduos, por todo apoio, carinho, amizade e ajuda oferecida. Em especial ao Luciano Ferreira e José Raimundo.

Aos meus amigos e amigas por entenderem minhas ausências e angustias ao longo desta trajetória.

A todos os colegas de curso, pela amizade, vocês tornaram essa jornada muito especial.

A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

EPÍGRAFE

“Às vezes dá vontade de agarrar a vida

com uma, duas, dez mãos

e levar à boca e trincar nos dentes

como uma fruta no ponto”

Roseana Murray

RESUMO

MARTINI, A. A., **Estudo de alternativa de valorização de resíduos de serviços de saúde advindos de processo de desinfecção por desativação eletrotérmica (ETD).** 2015. 90 f. Dissertação (Mestrado Profissional) em Ambiente, Saúde e Sustentabilidade, Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

Introdução. Os Resíduos de Serviços de Saúde (RSS) correspondem à pequena parcela dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) de uma comunidade. No entanto, sua composição e a periculosidade requerem tratamento e destinação adequados, em especial dos resíduos dos grupos A (infectantes), B (químicos), C (radioativos) e E (perfuro-cortantes). No município de São Paulo, os resíduos infectantes (A e E) são desinfetados por meio da tecnologia de desativação eletrotérmica, na Unidade de Tratamento de Resíduos (UTR), resultando em resíduos similares aos comuns (classe IIA). Essa unidade trata 100 toneladas/dia de resíduos infectantes e os encaminha para disposição no solo em aterro sanitário, a um custo de R$ 198.000,00/mês, incidindo além do custo em impactos ambientais do transporte e da disposição final e não atendendo aos requisitos de valorização de resíduos trazidos pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). **Objetivos.** A pesquisa objetivou estudar as alternativas de valorização energética dos resíduos pós-tratados, com foco na composição e no teor energético desses resíduos, considerando as exigências legais e as tecnologias disponíveis. **Método.** Foi desenvolvido um método de coleta de amostras, integrando resíduos das 2 linhas operacionais de tratamento, e realizadas análises dos parâmetros de poder calorífico e composição gravimétrica. Os resultados foram comparados aos parâmetros correspondentes aos RSU, considerando que o tratamento confere aos resíduos pós-tratados esta similaridade. **Resultados.** A composição gravimétrica identificou a presença de materiais de alto poder energético. O valor médio do poder calorífico inferior (PCI) resultou em 5.872,5 Kcal/Kg, representando 3,5 vezes o correspondente aos RSU. **Conclusão.** A caracterização física realizada por meio de análise gravimétrica e de poder calorífico comprovou a similaridade dos resíduos pós-tratados com os RSU, validando sua indicação à valorização energética por meio das tecnologias de coprocessamento, incineração, plasma, pirólise e gaseificação. No caso, a valorização energética apresenta ganhos: a) diretos: economia de R$ 198.000,00/mês com transporte e disposição em aterro sanitário; e a produção de CDR que poderá ser comercializado; e b) indiretos: aumento da vida útil do aterro sanitário; minimização de possíveis impactos ambientais; a não emissão de gases de efeito estufa decorrentes do transporte; minimização de passivos ambientais; e o atendimento à hierarquia de resíduos da PNRS, fechando o ciclo de vida dos produtos dentro do conceito de economia circular.

Palavras-chave: resíduos sólidos, resíduos de serviços de saúde, resíduos infectantes; valorização energética, CDR, poder calorífico, composição gravimétrica, PNRS.

ABSTRACT

MARTINI, A. A., Study of energy recovery the alternative from healthcare waste from disinfection process by electrothermal deactivation (ETD). 2015. 90 f. Master's Thesis – School of Public Health, University of São Paulo, São Paulo, 2016.

Introduction. The Healthcare Waste (HCW) corresponds to the small share of Municipal Solid Waste (MSW) of a community. However, their composition and hazardous require adequate treatment and disposal, especially the (infectious), B (chemical), C (radioactive) and E (sharp). In São Paulo, infectious wastes (A and E) are disinfected through the electrothermal deactivation technology, in the Waste Treatment Unit (WTU), resulting in a waste similar to the common ones (class IIA). This unit treats 100 tons / day of infectious waste and forwards them to landfill for disposal with a cost of R$ 198,000.00 / month, with transport and final disposal environmental impact, and not meeting the National Solid Waste Policy (NSWP) requirements for waste recovery. **Objectives.** The aim of this research was study the alternatives for energy recovery of post-treated waste, focusing on the composition and energy content of these wastes, considering the legal requirements and the available technologies. **Methods.** Was developed a method for sample collection, integrating residues from the 2 operational lines of treatment, and analyzes parameters of calorific value and gravimetric composition. The results were compared to with parameters corresponding to the MSW, considering the treatment confers the post-treated residues this similarity. **Results.** The gravimetric composition identified the presence of high energy materials. The mean value of the lower calorific value (LCV) resulted in 5,872.5 Kcal / kg, representing 3.5 times that the RSU. **Conclusions.** The physical characterization carried out means of gravimetric and calorific analysis proved the similarity of residues post-treated with MSW, validating their indication for the energy recovery through coprocessing, incineration, plasma, pyrolysis and gasification technologies. In this case, the energy valorization presents winnings: a) direct: savings R $ 198,000.00 / month with transportation and disposition in landfill; and the RDF production can be commercialized; and b) indirect: increase the useful life of landfill; minimization of possible environmental impacts; the non-emission of greenhouse gases from transport; minimization of environmental liabilities; and compliance the waste hierarchy in the PNRS, closing the products life cycle within the concept of circular economy.

Keywords: solid waste, healthcare waste, infectious waste; energy recovery, RDF, calorific value, gravimetric composition, PNRS.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CC – Centro Cirúrgico
EfW – *Energy from Waste* (Energia a partir de resíduos)
EPA – *Environmental Protection Agency* (Agência de Proteção Ambeintal)
EUA – Estados Unidos da América
LOGA – Logística Ambiental de São Paulo S.A
PC – Poder Calorífico
PCI – Poder Calorífico Inferior
PCS - Poder Calorífico Superior
PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos
RS – Resíduos Sólidos
RSS – Resíduos de Serviços de Saúde
RSU – Resíduos Sólidos Urbanos
TWh - Terawatts hora
UE – União Européia
URE – Usina de Recuperação de Energia
URE – Usinas de Reaproveitamento Energético
CADRI – Certificado de Movimentação de Resíduos de Interesse Ambiental
LO – Licença de Operação

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Níveis de inativação microbiana..... 27

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Autoclave 28
Figura 2. Esquema de desinfecção de RSS por Microondas. 30
Figura 3. Incinerador de resíduos perigosos 32
Figura 4. Fluxograma do processo de tratamento de RSS por ETD. 33
Figura 5. Esquema do processo de incineração de RSU com recuperação energética 36
Figura 6. Esquema de coleta e homogeneização da amostra semanal. 51
Figura 7. Esquema de preparação semanal do material para triagem. 53
Figura 8. Pesagem da amostra final. 53
Figura 9. Registro de coletas de amostras de resíduos pós-tratamento, por linha, nos meses de Novembro e Dezembro de 2015, para análise da composição gravimétrica. 54
Figura 10. Registro de coletas de amostras de resíduos pós-tratamento, por linha no mês de Junho de 2016, para análise da composição gravimétrica. 55
Figura 11. Registro de coletas de amostras de resíduos pós-tratamento, por linha no mês de Julho de 2016, para análise da composição gravimétrica. 56
Figura 12. Poder calorífico inferior de alguns materiais componentes do RSU. 58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resultado das análises de poder calorífico superior, teor de cloro e teor de cinzas, nas amostras exploratórias. 43
Tabela 2. Resultados das análises de poder calorífico realizadas entre os meses de fevereiro e julho de 2014. 45
Tabela 3. Composição gravimétrica das amostras exploratórias. 48
Tabela 4. Valor médio das análises do poder calorífico superior, poder calorífico inferior, teor de cloro e teor de cinzas em Novembro e Dezembro de 2015. 57
Tabela 5. Valor médio das análises de composição gravimétrica realizadas nos meses de Novembro e Dezembro de 2015; e Junho e Julho de 2016 59
Tabela 6. Resultado da análise gravimétrica do resíduo estudado 60
Tabela 7. Resultados, em porcentagem, da quantidade de material resultante da composição gravimétrica no presente estudo, em comparação com o estudo de Andrade, 1999. 61

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Distribuição gráfica da composição gravimétrica. 48
Gráfico 2. Representação gráfica da composição gravimétrica do resíduo estudado .. 60
Gráfico 3. Composição gravimétrica dos resíduos estudados do estudo de Andrade (1999). 62

SUMÁRIO

RESUMO 9
ABSTRACT 10
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS 11
LISTA DE QUADROS 12
LISTA DE ILUSTRAÇÕES 13
LISTA DE TABELAS 14
LISTA DE GRÁFICOS 15
SUMÁRIO 16
INTRODUÇÃO 17
1. OBJETIVOS 24
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 25
2.1 Gerenciamento de RSS 25
2.2 Tecnologias de Tratamento de RSS 27
2.3 Caracterização dos Resíduos 33
2.4 Tecnologias de reaproveitamento energético de resíduos 35
Incineração com recuperação energética 36
Gaseificação 37
Plasma 40
Pirólise 40
Coprocessamento 41
3. ANÁLISES PRELIMINARES EXPLORATÓRIAS 43
Composição gravimétrica 47
4. MÉTODOS 50
4.1 Revisão Bibliográfica 50
4.2 Análises do poder calorífico, teor de cloro e teor de cinzas, para identificar o potencial energético do resíduo pós-tratamento por desativação eletrotérmica 50
4.3 Análises da composição gravimétrica para caracterização do resíduo 52
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO 57
5.1 Poder Calorífico 57
5.2 Composição Gravimétrica 59
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 67
7. REFERÊNCIAS 69
GLOSSÁRIO 76
ANEXO A 17
APÊNDICE A 17

INTRODUÇÃO

De acordo com o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), a quantidade de resíduos gerados em um país está diretamente relacionada ao desenvolvimento da população e seu poder de compra, entre outros. O Brasil apresenta uma evolução crescente em sua economia e acompanhando essa evolução, sua produção de resíduos sólidos urbanos (RSU) aumentou aproximadamente 35,7% no período de 2001 a 2010. Contudo, a geração dos resíduos sólidos e seu gerenciamento não estão relacionados somente aos fatores sociais e econômicos, mas também a sua gestão pelo poder público, por meio da implantação de ações que incentivem a redução de resíduos e/ou sua recuperação (BNDES, 2014).

O gerenciamento de resíduos sólidos refere-se a um conjunto de ações baseadas em normas e planejamentos operacionais e financeiros, embasadas nos princípios sanitários, ambientais e econômicos, com o objetivo de coletar, tratar e dispor os RSU de um município. Essas envolvem aspectos preventivos como redução da produção nas fontes geradoras, reaproveitamento, reciclagem e recuperação energética, o acondicionamento, a coleta e transporte, a limpeza dos logradouros, o tratamento e a disposição final adequada dos resíduos (BNDES, 2014; JACOBI; BESEN, 2011).

No Brasil, o marco regulatório para a gestão de RSU é a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), estabelecida na Lei 12.305/2010, que tem como objetivos a proteção à saúde pública, a qualidade ambiental sustentável e a disposição final ambientalmente adequada do rejeito.

A Lei 12.305, que constitui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) define Resíduos Sólidos como:

> *Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe a proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semisólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.*

De acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004), resíduos sólidos são resíduos nos estados sólidos e semi-sólido, que são classificados de acordo com sua origem e natureza e são divididos em duas classes:

- Classe I: resíduos perigosos, que, em função de suas propriedades físicas, químicas ou biológicas, podem apresentar riscos à saúde e ao ambiente. Sua classificação se dá pela presença de uma ou mais das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e

patogenecidade.

- Classe II: resíduos não perigosos e estão subdivididos em duas classes:
  - Classe II-A: São os não inertes. Podem apresentar propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
  - Classe II-B: São os inertes. Não apresentam nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, com exceção dos aspectos cor, turbidez, dureza e sabor.

Outra classificação de resíduos sólidos (RS) que não os RSU, são os resíduos especiais. Entre estes encontram-se os RSS.

De acordo com a RDC ANVISA nº 306/2004 e Resolução CONAMA nº 358/2005 RSS são aqueles gerados pelos serviços relacionados ao atendimento à saúde humana ou animal e são classificados em cinco grupos:

Grupo A - engloba os componentes com possível presença de agentes biológicos que, por suas características de maior virulência ou concentração, podem apresentar risco de infecção. Possui os seguintes subgrupos:

- *A1 Culturas e estoques de microorganismos; resíduos de fabricação de produtos biológicos, exceto os hemoderivados; descarte de vacinas de microorganismos vivos ou atenuados; meios de cultura e instrumentais utilizados para transferência, inoculação ou mistura de culturas; resíduos de laboratórios de manipulação genética.*

  Resíduos resultantes da atenção à saúde de indivíduos ou animais, com suspeita ou certeza de contaminação biológica por agentes da classe de risco 4, microorganismos com relevância epidemiológica e risco de disseminação ou causadores de doença emergente que se torne epidemiologicamente importante ou cujo mecanismo de transmissão seja desconhecido.

  Bolsas transfusionais contendo sangue ou hemocomponentes rejeitadas por contaminação ou por má conservação, ou com prazo de validade vencido, e aquelas oriundas de coleta incompleta.

  Sobras de amostras de laboratório contendo sangue ou líquidos corpóreos, recipientes e materiais resultantes do processo de assistência à saúde, contendo sangue ou líquidos corpóreos na forma livre.
- *A2 Carcaças, peças anatômicas, vísceras e outros resíduos provenientes de animais submetidos a processos de experimentação com inoculação de microorganismos, bem como suas forrações, e os cadáveres de animais suspeitos de serem portadores de microorganismos de relevância epidemiológica e com risco de disseminação que foram*

submetidos ou não a estudo anátomo-patológico ou confirmação diagnóstica.

- *A3 Peças anatômicas (membros) do ser humano; produto de fecundação sem sinais vitais, com peso menor que 500 gramas ou estatura menor que 25 centímetros ou idade gestacional menor que 20 semanas, que não tenham valor científico ou legal e não tenha havido requisição pelo paciente ou familiares.*
- *A4 Kits de linhas arteriais, endovenosas e dialisadores, quando descartados. Filtros de ar e gases aspirados de área contaminada; membrana filtrante de equipamento médico hospitalar e de pesquisa, entre outros similares.*

  Sobras de amostras de laboratório e seus recipientes contendo fezes, urina e secreções, provenientes de pacientes que não contenham e nem sejam suspeitos de conter agentes classe de risco 4, e nem apresentem relevância epidemiológica e risco de disseminação, ou microorganismo causador de doença emergente que se torne epidemiologicamente importante ou cujo mecanismo de transmissão seja desconhecido ou com suspeita de contaminação com príons.

  Resíduos de tecido adiposo proveniente de lipoaspiração, lipoescultura ou outro procedimento de cirurgia plástica que gere este tipo de resíduo.

  Recipientes e materiais resultantes do processo de assistência à saúde, que não contenham sangue ou líquidos corpóreos na forma livre.

  Peças anatômicas (órgãos e tecidos) e outros resíduos provenientes de procedimentos cirúrgicos ou de estudos anátomo-patológicos ou de confirmação diagnóstica.

  Carcaças, peças anatômicas, vísceras e outros resíduos provenientes de animais não submetidos a processos de experimentação com inoculação de microorganismos, bem como suas forrações.

  Bolsas transfusionais vazias ou com volume residual pós-transfusão.
- *A5 Órgãos, tecidos, fluidos orgânicos, materiais perfurocortantes ou escarificantes e demais materiais resultantes da atenção à saúde de indivíduos ou animais, com suspeita ou certeza de contaminação com príons.*

Grupo B - contém substâncias químicas que podem apresentar risco à saúde pública ou ao meio ambiente, dependendo de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade e toxicidade.

- *Produtos hormonais e produtos antimicrobianos; citostáticos; antineoplásicos; imunossupressores; digitálicos; imunomoduladores; anti-retrovirais, quando descartados por serviços de saúde, farmácias, drogarias e distribuidores de medicamentos ou apreendidos e os resíduos e insumos farmacêuticos dos medicamentos controlados pela Portaria MS 344/98 e suas atualizações.*
- *Resíduos de saneantes, desinfetantes, desinfestantes; resíduos contendo metais pesados; reagentes para laboratório, inclusive os recipientes contaminados por estes.*
- *Efluentes de processadores de imagem (reveladores e fixadores).*
- *Efluentes dos equipamentos automatizados utilizados em análises clínicas.*
- *Demais produtos considerados perigosos, conforme classificação da NBR 10004 da ABNT (tóxicos, corrosivos, inflamáveis e reativos).*

Grupo C - quaisquer materiais resultantes de atividades humanas que contenham radionuclídeos em quantidades superiores aos limites de eliminação especificados nas normas da Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN.

- *Enquadram-se neste grupo os rejeitos radioativos ou contaminados com radionuclídeos, provenientes de laboratórios de análises clínicas, serviços de medicina nuclear e radioterapia, segundo a Resolução CNEN-6.05.*

Grupo D - não apresentam risco biológico, químico ou radiológico à saúde ou ao meio ambiente, podendo ser equiparados aos resíduos domiciliares.

- *Papel de uso sanitário e fralda, absorventes higiênicos, peças descartáveis de vestuário, resto alimentar de pacientes, material utilizado em antisepsia e hemostasia de venóclises, equipamento de soro e outros similares não classificados como A1.*
- *Sobras de alimentos e do preparo de alimentos.*
- *Resto alimentar de refeitório.*
- *Resíduos provenientes das áreas administrativas.*
- *Resíduos de varrição, flores, podas e jardins.*
- *Resíduos de gesso provenientes de assistência à saúde*

Grupo E - materiais perfuro-cortantes ou escarificantes.

- *Materiais perfurocortantes ou escarificantes, tais como: lâminas de barbear, agulhas, escalpes, ampolas de vidro, brocas, limas endodônticas, pontas diamantadas, lâminas de bisturi, lancetas; tubos capilares; micropipetas; lâminas e lamínulas; espátulas; e todos os utensílios de vidro*

quebrados no laboratório (pipetas, tubos de coleta sanguínea e placas de Petri) e outros similares.

Destes 5 grupos, apenas o grupo D corresponde a resíduos não perigosos. Logo, os demais grupos, considerados resíduos perigosos necessitam passar por tratamento antes de sua disposição no solo.

Há diversas alternativas para o tratamento destes grupos de resíduos (microondas, autoclave, incineração e desativação eletrotérmica).

O enfoque desta pesquisa são os RSS do grupo A (A1, A2 e A3) e grupo E, submetidos a tratamento por desativação eletrotérmica. Após esse tratamento esses resíduos são considerados resíduos não perigosos (classe IIA), podendo ser encaminhados para disposição no solo em aterro sanitário ou serem recuperados, levando-se em conta o ciclo de vida dos materiais, o qual permite a recuperação total da energia contida (BARAN; MAMIS; ALAGOZ, 2016).

Neste sentido, a PNRS indere o conceito de rejeito, considerando o ciclo de vida dos materiais, não permitindo o descarte dos resíduos enquanto estes ainda possuírem possibilidade de tratamento e recuperação:

> *Os "rejeitos" são resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada.*

Assim, a PNRS reforçaa o encaminhamento dos resíduos sólidos para processos que os recuperem ou aproveitem suas propriedades, desde que as tecnologias utilizadas sejam economicamente e tecnicamente viáveis e que não agridam o ambiente.

O encaminhamento dos resíduos para sistemas de recuperação ou reaproveitamento minimiza a disposição final em aterros, evitando possíveis riscos à saúde pública, à segurança e impactos ambientais adversos.

Para Ensinas (2003), a disposição final dos resíduos sólidos urbanos (RSU) é um problema ambiental dos grandes centros urbanos e que tende a se agravar de acordo com o aumento do consumo de bens descartáveis.

Baran, Mamis e Alagoz (2016) alertam sobre a necessidade de melhoria nos sistemas de eliminação dos resíduos, incluindo em sua gestão a reciclagem/reaproveitamento total dos materiais presentes nos resíduos, de maneira a preservar os recursos naturais de modo a atender às demandas de aumento da população, evitando futuras contaminações e insuficiência dos recursos naturais.

Neste sentido, Bosmans (2010) relaciona o aumento da geração total de RSU com a necessidade de busca por alternativas de desvio de resíduos de aterros, uma vez

que está sendo cada vez mais difícil encontrar espaço para novos aterros e conseguir a permissão para a sua construção.

Neste contexto, os (RSS) seguem a mesma tendência de aumento de geração. De acordo com Abrelpe (2014), houve um crescimento de 5,0% nas quantidades de RSS coletados pelos municípios brasileiros em 2014, relativamente a 2013.

No município de São Paulo, são tratadas e dispostas anualmente 35 mil toneladas de RSS, geradas por 20 mil geradores cadastrados na Autoridade Municipal de Limpeza Urbana (AMLURB). Os RSS perigosos são destinados para tratamento por desativação eletrotérmica (infectantes), cremação (carcaça de animais) ou incineração (químicos perigosos), de acordo com sua natureza (PMSP, 2013).

Para Diaz, Savage e Eggerth (2005), os RSS potencialmente infecciosos quando não gerenciados corretamente e, portanto, que tenham tratamento e disposição final inadequados, podem acarretar impactos negativos ao ambiente, colocar em risco a saúde dos pacientes, da equipe e dos envolvidos na gestão dos resíduos dentro e fora do estabelecimento de saúde.

Além disso, a disposição final inadequada de RSS como o lançamento a céu aberto ou a queima não controlada, aumentam o risco de propagação de infecções e de exposição a emissões tóxicas (MAVROPOULOS, 2010).

Atualmente, novas tecnologias estão sendo desenvolvidas para diminuir os impactos ambientais causados pela geração de resíduos e o uso de combustíveis fósseis. Fontes de energia derivadas do petróleo estão sendo substituídas por fontes alternativas de energia por meio de novas tecnologias, as quais permitem a redução do volume dos resíduos e sua recuperação energética (NOVI, 2011). De acordo com o Cempre (2004), cerca de 5% de toda a energia produzida no planeta provêm de fonte renovável e calcula-se que em 2060 esse percentual chegue a 70%.

A valorização dos resíduos envolve o uso de tecnologias que transformam resíduos em energia, gerando eletricidade e/ou calor (BOSMANS, 2010).

O primeiro sistema de conversão de resíduos em energia por meio da incineração foi construído em 1896 em Hamburgo, na Alemanha. Em 1906, uma planta de geração elétrica a partir da queima de RSU fornecia eletricidade para iluminar a Ponte de Williamsburg, em Nova York, no entanto esta pratica progrediu lentamente até 1979, quando 522 plantas de conversão de resíduos em energia estavam em operação no mundo (KORZUN, 1990).

No Brasil, utilizou-se a incineração para tratamento de RSS, porém sem recuperação energética. Estes incineradores foram desativados em decorrência de equipamentos obsoletos, sem manutenção ou controle de emissão de poluentes; sua aceitação gerou opiniões favoráveis e desfavoráveis.

Porém, nos dias atuais, utilizar sistemas para obter recuperação energética torna-se incipiente à medida que novas tecnologias adentram ao mercado

(MARCHEZETTI, 2009). Da mesma forma, a falta de combustíveis fósseis, as questões ambientais relacionadas à inadequada disposição final de resíduos e as questões econômicas têm incentivado o aumento da utilização de energias renováveis.

Assim, com vistas ao atendimento da PNRS que incentiva a recuperação de resíduos com a utilização de tecnologias para recuperação energética, o presente estudo de caso, pretende buscar tecnologias de recuperação energética para RSS tratados por desativação eletrotérmica. Esse processo torna os resíduos como fonte de combustível alternativo para geração de calor e/ou energia, evita sua disposição final em aterro sanitário e contribui para a diminuição dos custos de transporte e disposição final.

Com a finalidade de se estudar os RSS infectantes do município de São Paulo, que são encaminhados para tratamento por desativação eletrotérmica, este estudo tem como objetivo geral estudar as alternativas para valorização energética desses resíduos pós-tratados, considerando as exigências legais, as tecnologias disponíveis, e o desenvolvimento sustentável.

Espera-se que o estudo possa contribuir para o processo de revisão das políticas públicas referentes à valorização energética dos RSS, sendo um trabalho inovador e pioneiro que busca fornecer embasamento teórico, baseado na normativa nacional e nas tecnologias existentes para que os RSS possam ser utilizados na geração de energia e/ou calor, além de servir de fonte de dados para a realização de novos estudos na área.

A dissertação está estruturada de acordo com os seguintes capítulos:

O capítulo 1 introduz o tema e apresenta o objetivo geral e os objetivos específicos.

O capítulo 2 apresenta a revisão da literatura relacionada aos RSS, seu gerenciamento, tratamento e tecnologias de tratamento, descrição das análises das propriedades dos resíduos e discorre sobre as tecnologias de reaproveitamento energético.

No capítulo 3 é apresentada a descrição detalhada dos métodos empregados para as análises preliminares exploratórias.

O capítulo 4 apresentada a descrição detalhada dos métodos empregados para o alcance dos objetivos da pesquisa.

O capítulo 5 mostra os resultados obtidos no desenvolvimento da pesquisa e as discussões a partir dos conceitos identificados na revisão de literatura.

Por fim, o capítulo 6 apresenta as considerações finais da pesquisa.

Ao final da dissertação, são apresentadas as referências utilizadas neste estudo como embasamento teórico para sua realização, o glossário, anexo A – CADRI (Certificado de Movimentação de Resíduos de Interesse Ambiental) e Apêndice A - Termo de Autorização Institucional.

1. *OBJETIVOS*

A pesquisa tem como objetivo geral estudar as alternativas para valorização energética dos RSS pós-tratamento por ETD.

Para alcançar o objetivo geral, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar o resíduo pós-tratamento da Unidade de Tratamento de Resíduos (UTR) quanto à composição gravimétrica.

- Determinar o potencial energético do resíduo pós-tratamento por ETD.

- Avaliar as tecnologias capazes de promover a recuperação energética dos resíduos estudados.

- Caracterizar o tipo de mercado adequado para absorver o Combustível Derivado de Resíduos (CDR) final.

2. *REVISÃO BIBLIOGRÁFICA*

Para um melhor entendimento da problemática envolvendo os RSS pós-tratamento por ETD e sua valorização energética, a revisão bibliográfica irá abordar:

1) O gerenciamento dos RSS
    - Tratamento dos RSS: definição.
    - Tecnologias de tratamento de RSS: revisão das tecnologias existentes para o tratamento dos resíduos infectantes.
2) Caracterização física dos resíduos: revisão das características presentes nos resíduos que comprovam sua possibilidade de utilização como combustível alternativo ou matéria prima, em unidades de resuperação energética.
3) Tecnologias de reaproveitamento energético: revisão das tecnologias disponíveis para recuperação energética de resíduos.

2.1 GERENCIAMENTO DE RSS

No Brasil, de acordo com a Resolução Anvisa 306/2004, o gerenciamento dos RSS tem como objetivos minimizar a produção de resíduos e proporcionar aos resíduos gerados um encaminhamento seguro, priorizando a proteção dos trabalhadores, a preservação da saúde pública, dos recursos naturais e, do ambiente.

Todo gerador de RSS tem obrigatoriedade de elaborar seu Plano de Gerenciamento de Resíduos de Serviços de Saúde (PGRSS) com base nas características e na classificação dos resíduos gerados, o qual deve ser compatível com as normas locais relativas à coleta, transporte e disposição final dos resíduos gerados nos serviços de saúde. O PGRSS envolve as etapas de: manejo, segregação, acondicionamento, identificação, transporte interno, armazenamento temporário, tratamento interno, armazenamento externo, coleta e transporte externo, tratamento e disposição final.

A segregação é uma etapa fundamental, pois possibilita a redução da quantidade de resíduos a serem tratados, e consequentemente o custo, uma vez que parte considerável é constituída por resíduos do grupo D (comuns), que não apresentam riscos. Em estudo realizado em centros cirúrgicos de 2 hospitais de grande porte, Salomão, Trevizan e Günther (2004) demonstraram que aproximadamente 80% (em peso) dos resíduos gerados nos CC (centros cirúrgicos) podem ser considerados como resíduos comuns, sendo passíveis de reaproveitamento, desde que segregados adequadamente. De acordo com Anvisa (2006), os demais grupos de resíduos, uma vez segregados, devem ser encaminhados para tratamento, de acordo com suas características.

No município de São Paulo são tratadas e dispostas anualmente 35 mil toneladas de RSS geradas por 20 mil geradores cadastrados na Autoridade Municipal de Limpeza Urbana (AMLURB). As condutas a cerca da coleta, tratamento e disposição são operacionalizadas através do regime de concessão onde as concessionárias Logística Ambiental de São Paulo S.A (LOGA), operando no Noroeste do município e Ecourbis Ambiental (Sudeste do município) planejam, organizam, executam e coordenam os serviços de coleta, transporte externo e tratamento dos RSS considerados perigosos (Grupos A, B e E) (PMSP, 2013).

Quanto ao tratamento e à disposição final dos RSS infectantes, o município de São Paulo dispõe de uma unidade de tratamento realizado pelo Processo de Desativação Eletrotérmica (do inglês , *Eletrothermal Deactivation* - ETD) para os RSS do grupo A e E. Os resíduos do grupo B são encaminhados para incineração enquanto que os resíduos do grupo C (radioativos), seguem a normatização específica da Comissão Nacional de Energia Nuclear- CNEN-6.05

Segundo a Resolução RDC 306/2004 da ANVISA, o tratamento dos RSS fundamenta-se na aplicação de método, técnica ou processo que modifique as características dos riscos inerentes aos resíduos, reduzindo ou eliminando o risco de contaminação, de acidentes ocupacionais ou de dano ao ambiente. O tratamento pode ser aplicado no próprio estabelecimento gerador (tratamento interno) ou em outro estabelecimento (tratamento externo), seguindo as condições de segurança para o transporte entre o estabelecimento gerador e o local do tratamento.

De acordo com o *Technical Assistance Manual: State Regulatory Oversight of Medical Waste Treatment Technology* da EPA (1994), há diversos níveis sequenciais de inativação microbiana. Para as tecnologias de tratamento de RSS é necessário atingir pelo menos o nível 3, conforme indicado na Quadro 2 (ANVISA, 2006).

Quadro 1. Níveis de inativação microbiana

Nível de Inativação	Descrição
Nível 1	Inativação de bactérias vegetativas, fungos e vírus lipofílicos com uma redução maior ou igual a 6 Log_{10}.
Nível 2	Inativação de bactérias vegetativas, fungos e vírus lipofílicos e hidrofílicos, parasitas e microbactérias com uma redução maior ou igual a 6 Log_{10}.
Nível 3	Inativação de bactérias vegetativas, fungos e vírus lipofílicos e hidrofílicos, parasitas e microbactérias com uma redução maior ou igual a 6 Log_{10} e inativação de esporos de *B. staerotermophilus* ou *B. subtilis* com uma redução maior ou igual a 4 Log_{10}.
Nível 4	Inativação de bactérias vegetativas, fungos e vírus lipofílicos e hidrofílicos, parasitas e microbactérias e inativação de esporos de *B. staerotermophilus* ou *B. subtilis* com uma redução maior ou igual a 6 Log_{10}.

Fonte: Anvisa, 2006.

2.2 TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE RSS

São muitos os processos de tratamento de RSS possíveis de serem utilizados, sendo classificados conforme técnica e tipos de aplicação (CHAERUL; TANAKA, 2008).

De acordo com Tudor *et al* (2009), as tecnologias de tratamento de RSS para serem consideradas seguras devem, segundo as características dos resíduos:

• Resíduos infectantes: demonstrar a capacidade de reduzir o número de organismos infectantes presentes nos resíduos a um nível que não seja necessária nenhuma medida de precaução adicional para proteção da saúde e do ambiente.

• Resíduos anatômicos: descaracterizar a peça anatômica

• Resíduos químicos perigosos: destruir as substâncias químicas que os compõem.

Para os resíduos infectantes, objetos desta pesquisa, várias tecnologias podem ser usadas como incineração, autoclave e microondas (CHAERUL, TANAKA E SHEKDAR , 2008), descritas a seguir.

De acordo com a Resolução CONAMA 316/2006, é necessária a realização de um estudo de análise de alternativas tecnológicas em função das características dos resíduos a tratar para que se comprove que a escolha da tecnologia adotada está de acordo com o conceito de melhor técnica disponível, antes da adoção de determinado sistema, o qual também atenda aos critérios técnicos da referida norma e normas complementares, caso seja solicitado pelo órgão ambiental de competência. No caso da

Região Metropolitana de São Paulo o órgão ambiental competente é a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), o qual também é responsável por determinar a periodicidade dos testes para verificação de conformidade dos limites máximos de emissão e os demais condicionantes da Licença de Operação.

Para Diaz, Savage e Eggerth (2005), não existe um método único de tratamento de resíduos que elimine completamente todos os riscos para a saúde ou para o ambiente. O uso de algumas tecnologias como a incineração transformam os resíduos de uma fase para outra do tratamento, resultando em subprodutos gasosos CO_2, H_2O, CO e outros gases, alguns dos quais são compostos tóxicos e subprodutos sólidos chamados de cinzas.

O tratamento dos resíduos infectantes tem como objetivo mais importante à destruição dos microorganismos que conferem risco aos resíduos, evitando o descarte de material perigoso no ambiente (DIAZ; SAVAGE; EGGERTH, 2005), sendo então, o tratamento fundamental para os resíduos do grupo A e E por serem infectantes.

Autoclave

É um recipiente de metalgeralmente aço, resistente à alta pressão e temperatura (Figura 2). Esse sistema utiliza calor úmido e pressão, sendo que o vapor necessário nestas unidades é gerado por meio de caldeira (DIAZ; SAVAGE; EGGERTH, 2005).

Os líquidos são aquecidos e sua temperatura aumenta até que entrem em ebulição e a água seja convertida em vapor. A desinfecção ocorre em ciclos, ou seja, os lotes de material são submetidos a ciclos de compressão e de descompressão de forma a facilitar o contato entre o vapor e os resíduos. A cada ciclo o equipamento é carregado e inicia-se a desinfecção (DIAZ; SAVAGE; EGGERTH, 2005).

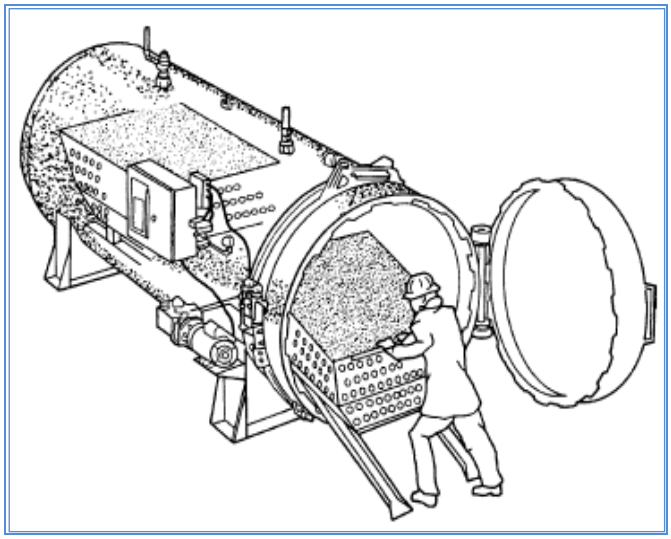

Figura 1. Autoclave
Fonte: DIAZ; SAVAGE; EGGERTH, 2005.

Este processo utiliza valores de pressão de 3 a 3,5 bar e temperatura de 135ºC e cada ciclo se dá por meio das seguintes fases (ANVISA, 2006):

- Pré-vácuo inicial: são geradas condições de pressão negativa para que o vapor entre em contato com os resíduos na próxima fase;
- Admissão de vapor: injeção de vapor na autoclave e aumento gradual da pressão para permitir o contato entre o vapor e os resíduos através da destruição de envoltórios;
- Exposição: período de tempo onde o material fica exposto aos níveis já determinados de temperatura e pressão até que se conclua o processo de descontaminação;
- Exaustão lenta: libertação gradual do vapor e da pressão. O vapor liberado passa por um filtro poroso com uma malha que impede a passagem de microorganismos para o exterior da autoclave;
- Arrefecimento da carga: redução da carga até uma temperatura em que os resíduos possam ser retirados do equipamento.

De acordo com Eleutério, Hamada e Padim (2008) o efluente remanescente deste processo deve ser liberado em uma estação de tratamento como efluente doméstico.

Microondas

De acordo com a Anvisa (2006), a tecnologia de microondas pode ser de alta ou baixa frequência e consiste na descontaminação de resíduos, previamente triturados e umidificados, a uma temperatura entre 95º e 105ºC.

O uso da tecnologia de microondas no tratamento de RSS é considerada como uma alternativa à tecnologia de incineração. É uma tecnologia baseada em vapor e ondas electromagnéticas com frequências entre as ondas de rádio e infravermelhas que usa a água presente nos resíduos ou a adição de vapor para proceder à esterilização (Figura 3). Além disso, o microondas possui ciclos que oscilam entre polos positivos e negativos com uma frequência muito alta em torno de 2,4 bilhões de vezes por segundo, assim, quando atingir o resíduo vibra muito rapidamente resultando em atrito que irá gerar calor (GHASEMI; YUSUFF, 2016).

Figura 2. Esquema de desinfecção de RSS por Microondas.
Fonte: PERREIRA, 2012.

Incineração

De acordo com Bosmans (2010), os objetivos mais comuns da incineração de resíduos são: reduzir seu volume, tratar características perigosas e destruir substâncias potencialmente nocivas. Processos de incineração também podem fornecer um meio para permitir a recuperação do teor de energia, minerais e/ou químicas dos resíduos (Figura 4).

De acordo com Eleutério, Hamada e Padim (2008), a incineração é um processo de combustão controlada em equipamento de tratamento térmico, em temperaturas próximas a 900ºC. A combustão é alimentada pelo oxigênio, enquanto os resíduos juntamente com o óleo diesel atuam como materiais combustíveis. Os produtos da queima geralmente são cinzas, escorias e gases: dióxido de carbono (CO_2), dióxido de enxofre (SO_2), Nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2), água (H_2O) e, portanto, durante o processo deve-se manter um cuidadoso controle de emissões gasosas para a atmosfera (Figura 3).

Os sistemas de incineração possuem fases operacionais diferentes de acordo com os tipos de resíduos utilizados e de como eles são deslocados no interior do forno. Os principais sistemas de tratamento térmico por meio da incineração de RSU são apresentados a seguir (BOSMANS, 2010; FERREIRA, 2013):

- Grelhas Fixas

Esta tecnologia possui múltiplas câmaras onde os resíduos são depositados, em porções, nas grelhas fixas permitindo a passagem das cinzas formadas após a combustão. Este sistema é composto por uma primeira câmara onde ocorre a queima dos resíduos através de bicos queimadores de óleo diesel ou de gás combustível e uma

segunda câmara a qual possui ao menos um bico queimador, o qual garante a eliminação das partículas contidas nos gases que não foram queimados na primeira câmara. Esta tecnologia é indicada para o tratamento de RSS e não deve queimar resíduos industriais perigosos.

- Grelhas Móveis

A tecnologia de incineração por grelhas móveis é uma das principais tecnologias utilizadas ao redor do mundo. Os resíduos são lançados nas grelhas móveis com movimentos de inclinação os quais permitem o deslocamento dos resíduos e sua queima. Este sistema de grelhas móveis mantém os resíduos em movimento e em temperaturas entre 850ºC e 1.000ºC, até que ocorra sua queima completa, podendo haver a necessidade de utilização de combustível auxiliar para ajudar na combustão.

- Forno Rotativo

Neste tipo de incinerador, os resíduos são encaminhados para dentro de um cilindro com movimento de rotação o qual possibilita seu revolvimento e queima completa a uma temperatura aproximada de 850ºC - 1.000ºC. De acordo com o poder calorífico do resíduo, pode haver necessidade de adição de combustível auxiliar. O tratamento dos gases resultantes da queima, geralmente é realizado por meio de filtros eletrostáticos e lavadores de gases. Esse processo não permite a recuperação térmica ou energética devido ao baixo poder calorífico dos materiais utilizados, os quais geralmente são resíduos perigosos – Classe I.

- Leito Fluidizado

Para serem utilizados neste processo, os resíduos devem ser previamente para posteriormente serem encaminhados para um leito de areia superaquecida e mantida sob agitação constante e uma temperatura entre 650ºC - 850ºC. Neste caso, pode haver a necessidade de se manter a temperatura por meio da injeção de combustível auxiliar (BOSMANS, 2010; FERREIRA, 2013).

De acordo com Bosmans (2010), a tecnologia de incineração tem se desenvolvido para atender às legislações ambientais de redução de emissões atmosféricas.

Para Ferreira (2013) a incineração está de acordo com a hierarquia dos resíduos prevista na PNRS, uma vez que esta tecnologia possibilita a extração da energia contida nos resíduos sólidos para produção de eletricidade, calor ou vapor, minimizando assim, a quantidade de resíduos enviados aos aterros sanitários. Isto caracteriza uma modalidade de recuperação energética de resíduo sólido.

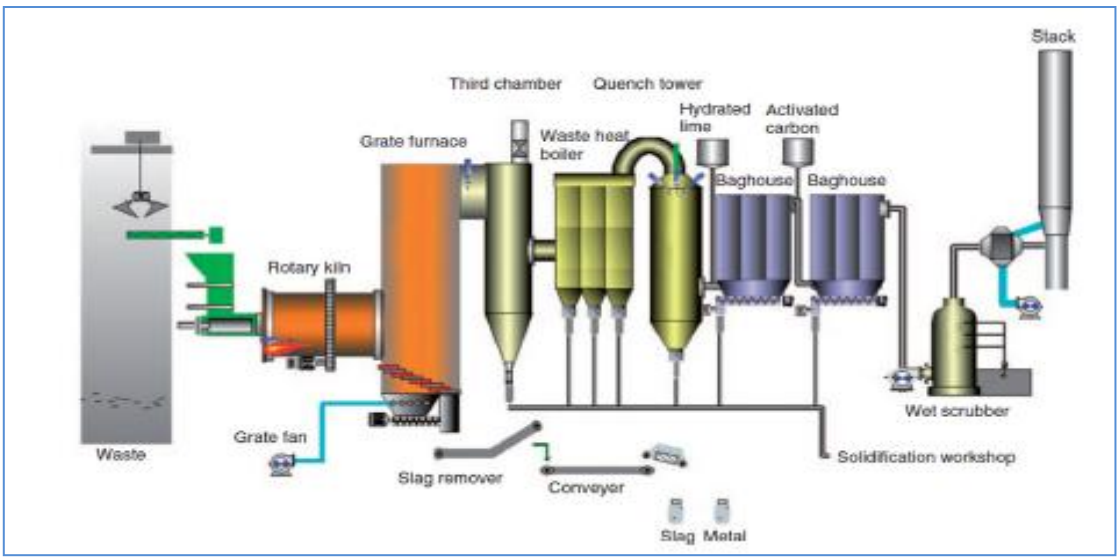

Figura 3. Incinerador de resíduos perigosos
Fonte: DORN; FLAMME; NELLES, 2012 apud MA et al., 2011.

Desativação Eletro Térmica

A Desativação Eletro Térmica inativa os microorganismos presentes nos resíduos por meio da exposição a intenso campo elétrico de alta potência, gerado por ondas de rádio frequência (Figura 5).

No início do processo, os resíduos infectantes são descaracterizados em um sistema de trituração, que reduz em 80% o volume final, e a seguir são homogeneizados com adição de água. Após essa etapa, os resíduos passam por dentro de um tubo de fibra de vidro e resina, onde absorvem a energia elétrica do campo magnético e se aquecem rapidamente, atingindo temperaturas entre 90ºC a 100ºC, com tempo de residência médio de 15 minutos. Esta tecnologia é considerada de alta desinfecção (nível III), conforme Resolução CONAMA 358/2005. Após o tratamento, os resíduos passam a ter as mesmas características dos resíduos domiciliares e podem ser dispostos em aterros sanitários como resíduos comuns.

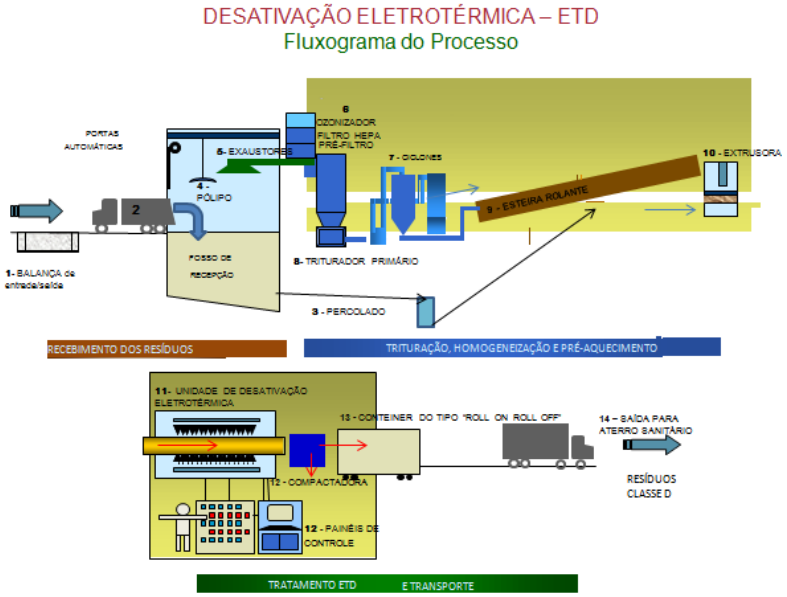

Figura 4. Fluxograma do processo de tratamento de RSS por ETD.
Fonte: UTR adaptado pela autora.

Legenda: 1 – Pesagem, do caminhão contendo o RSS a ser tratado; 2 – Descarga do conteúdo do caminhão no fosso de recepção; 3 – o percolado (líquido) do fosso é recolhido e enviado para tratamento junto com os resíduos; 4 – os RSS a serem tratados são retirados do fosso e encaminhados para tratamento, com auxílio de um pólipo;5 - os exaustores puxam o ar do fosso para o sistema de tratamento do ar; 6 – sistemas de tratamento do ar; 7 – os ciclones puxam o ar das áreas de trituração e encaminham para o sistema de tratamento de ar; 8 – os RSS são triturados para sua descaracterização; 9 – os RSS são encaminhados por meio da esteira rolante até a extrusora; 10 – a extrusora de modo a entrar no tubo; 11 - os RSS triturados e descaracterizados passam por dentro do tubo e absorvem a energia elétrica das ondas de rádio-frequencia; 12 – os resíduos tratados são compactados; 12 –os resíduos são empurrados, por meio de uma prensa, até o interior do container; 14 – o caminhão acopla o container com os resíduos tratados e se encaminha para o aterro sanitário.

2.3 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS

Para verificar o potencial de aproveitamento energético dos RSS é necessário conhecer suas características de maneira a fornecer as informações necessárias para seu manuseio, para escolha das alternativas técnicas adequadas ao tratamento de cada material presente nesses resíduos, assim como o entendimento dos equipamentos e dispositivos adequados para tal (RISSO, 1993).

Composição gravimétrica

De acordo com Quezado (2010), a composição gravimétrica indica o percentual dos materiais que compõem os resíduos em estudo. Corresponde à composição quantitativa.

Para Andrade (1992) a composição gravimétrica refere-se à porcentagem (em peso)de cada componente (papel, plásticos, matéria orgânica, etc.) em relação ao peso total do resíduo e é, ainda, uma ferramenta para subsidiar a escolha do tipo de tratamento e/ou destinação mais adequado aos componentes dos RS.

Peso Específico Aparente

De acordo com Carvalho (2005), o peso específico aparente é o peso do resíduo em função do volume ocupado sem qualquer compactação, e é expresso em kg/m^3.

Para Quezado (2010), sua determinação é fundamental para que se dimensionem equipamentos e instalações.

Teor de umidade

O teor de umidade evidencia a quantidade de água presente no resíduo. É medido em percentual em função de seu peso (CARVALHO, 2005).

De acordo com Garcia (2010), quando o material combustível está úmido, parte da energia liberada em sua combustão é utilizada para vaporização da água. Assim, quanto mais seco o material combustível, mais energia disponível terá para seu aquecimento, por isso é importante o cálculo do teor de umidade.

Teor de Cinzas

Corresponde à porcentagem do material após a queima (ANDRADE, 1997).

Teor de Cloro

A maior parte dos tipos de plásticos utilizados nos serviços se saúde são clorados, sendo que os RSS são compostos por aproximadamente 30% de materiais plásticos enquanto que os RSU contêm aproximadamente 7% de plástico em sua composição (MAVROPOULOS, 2010).

Segundo Machado Júnior *et al apud* Andrade (1997), o teor de cloro presente nos resíduos permite conhecer as quantidades de ácido clorídrico expelidas pelas chaminés dos incineradores. Além do ácido clorídrico, a quantidade de cloro nos resíduos incinerados leva à emissão de gases tóxicos (organoclorados) como dioxinas e furanos e agravam a chuva ácida (MAVROPOULOS, 2010).

No processo de coprocessamento, durante a combustão dos resíduos cuja composição contém metais pesados e compostos organoclorados como as dioxinas e os furanos, emitem gases prejudiciais tanto às propriedades do cimento, como à saúde ocupacional e à saúde ambiental. Os níveis e as características das emissões dos poluentes atmosféricos dependem das características tecnológicas e operacionais do processo industrial (ROCHA; LINS; SANTO, 2011).

Poder calorífico

Para Carvalho (2005), o poder calorífico (PC) determina o potencial que um determinado material possui de desprender calor quando submetido à queima.

De acordo com Zuim (2013), o poder calorífico é a quantidade de energia liberada na forma de calor durante a combustão completa de um determinado material combustível, e pode ser determinado através da combustão de uma amostra utilizando-se uma bomba calorimétrica. Esse valor pode variar muito de acordo com o teor de umidade do resíduo. Assim, o Poder Calorífico Superior (PCS) considera que a água presente no material não evapora junto aos gases de combustão, enquanto o Poder Calorífico Inferior (PCI) considera que a água presente no material é vaporizada junto aos gases de combustão. O PCS deve ser maior que o PCI, uma vez que para vaporizar a água presente no combustível necessita-se de energia.

Segundo Poli *et al* (2013), para a caracterização energética de combustíveis, assim como de resíduos, utiliza-se o PCI e os demais ajustes às especificações de cada equipamento são realizados pelos parâmetros operacionais e condição específica do resíduo.

2.4 TECNOLOGIAS DE REAPROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS

A quantidade crescente da geração de resíduos e os problemas relacionados ao seu gerenciamento, em especial à disposição final, tem exigido um manejo mais sustentável, com a utilização de tecnologias de reaproveitamento energético capazes de transformar resíduos em energia e/ou calor (BOSMANS, 2010)

As tecnologias termoquímicas capazes de transformar resíduos em energia, para obter eficiências de processo elevadas requerem uma alimentação com materiais de alto poder calorífico. Por isso, o combustível derivado de resíduos (CDR) uma forma processada de RSU é frequentemente usado combustível para esses sistemas. O processo de conversão de RSU em CDR consiste nas fases de trituração, triagem, secagem e/ou peletização para melhorar as características de manuseamento e a homogeneidade do material.

A seguir serão apresentadas as tecnologias utilizadas para valorização energética dos resíduos: Incineração, Gaseificação, Plasma, Pirólise e Coprocessamento.

INCINERAÇÃO COM RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA

Como apresentado anteriormente, a tecnologia de incineração é utilizada para o tratamento dos resíduos. Porém, hoje em dia a incineração de resíduos é quase sempre combinada com recuperação energética, nos países desenvolvidos (Figura 6), sendo que a Dinamarca e a Suécia foram líderes na utilização de energia gerada a partir da incineração por mais de um século. Na Dinamarca, no ano de 2005, a incineração de resíduos produziu 4,8% da eletricidade e 13,7% do consumo total de aquecimento doméstico (em forma de calor) (BOSMANS *et al*., 2013).

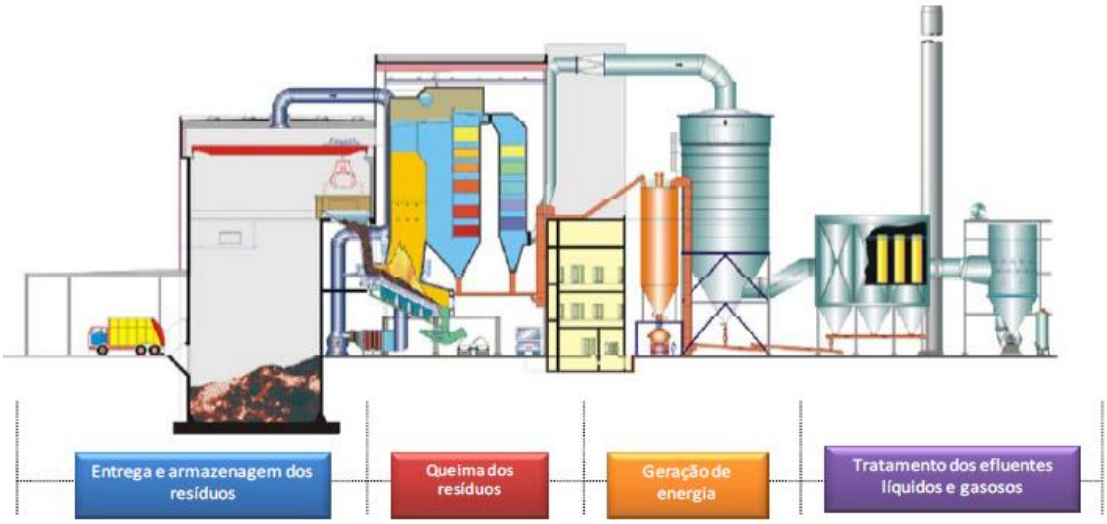

Figura 5. Esquema do processo de incineração de RSU com recuperação energética
Fonte: SMA, 2011.

A incineração é basicamente a oxidação dos materiais combustíveis presentes nos resíduos, os quais geralmente são materiais heterogênios compostos por substâncias orgânicas, minerais, metais e água. Este processo ocorre em dois estágios: no primeiro estágio ocorre a incineração dos resíduos em presença de oxigênio e temperatura entre 500ºC-900ºC; no segundo estágio a temperatura se eleva a aproximadamente 1200ºC e o corre a conversão dos gases, nesta fase dependendo do tipo de resíduo utilizado, pode haver necessidade de adição de combustível auxiliar como gás natural ou carvão. Porém, se o valor calorífico dos resíduos e o fornecimento de oxigênio forem suficientes, a combustão torna-se autosuficiente, não havendo necessidade de adição de outros combustíveis. Para geração de energia, os gases quentes ao saírem do forno de incineração passam por uma caldeira de recuperação de calor, onde ocorre a geração de vapor utilizado na movimentação do conjunto turbina/gerador. Ao final do processo, todos os gases provenientes da queima passam por um processo de lavagem e resfriamento, e as cinzas resultantes do processo podem ser encaminhadas para aterros

sanitários (BREEF, 2006; BOSMANS, 2010; MORGADO E FERREIRA, 2006; FERREIRA, 2013).

GASEIFICAÇÃO

A gaseificação é um processo de transformação de materiais à base de carbono, como RSU, em energia sem queimá-lo. No processo de gaseificação, os RSU são convertidos em um gás de síntese por meio de reações químicas as quais combinam os materiais à base de carbono com pequenas quantidades de ar ou oxigênio, quebrando-as em moléculas simples, principalmente uma mistura de monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H), removendo poluentes e impurezas. O syngas, ou gás de síntese, resultante do processo de gaseificação pode ser utilizado como um combustível para geração de energia - para tal o gás é queimado num queimador convencional, interligado a uma caldeira e uma turbina de vapor – e, também, ser utilizado na produção de produtos químicos, combustíveis de transporte e fertilizantes (ARENA, 2012 *apud* HEERMANN, SCHWAGER & WHITING, 2001; RAJASEKHAR *et al*., 2015; GTC, 2014).

Processos de gaseificação podem ser utilizados para o tratamento de RSU, alguns tipos de resíduos perigosos e de lama seca. A natureza (tamanho, consistência) dos resíduos deve atender a limites pré-definidos para garantir a conversão do carbono em CO_2 e H_2 e a formação de alcatrão, o que requer o pré-processamento dos resíduos, aumentando os custos do tratamento (BOSMANS, 2010; ARENA 2011).

As fases do processo de gaseificação de um resíduo sólido ocorrem por meio de uma sequencia reações endotérmicas e exotérmicas, descritas a seguir:

- Aquecimento e secagem

Esta fase ocorre em temperatura superior a 160°C por meio de uma combinação de eventos que envolvem água, vapor e sólido poroso por onde o líquido e vapor migram.

- Devolatização (Pirólise ou decomposição térmica)

Ocorre a uma temperatura até cerca de 700°C, envolvendo reações térmicas, transferência de calor e de massa, resultando na liberação de gases leves (como H_2, CO, CO_2, CH_4, H_2O, NH_3), alcatrão e carvão. A composição, quantidade e característica dos produtos químicos voláteis liberados nesta fase dependem da composição e estrutura dos resíduos utilizados, da temperatura, pressão e taxa de aquecimento imposta pelo tipo de reator utilizado.

- Reações químicas

Ocorrem em um ambiente com baixa presença de oxigênio, em um processo de gaseificação auto-térmica ocorre a oxidação parcial de gás combustível, vapores e carvão por meio de uma quantidade controlada de ar, oxigênio ou ar oxigenado os quais

proporcionam o calor necessário possibilitando o fracionamento térmico de alcatrões e hidrocarbonetos e a gaseificação de carvão por vapor ou dióxido de carbono (ARENA, 2011).

Para que os RSU sejam utilizados neste tipo de tecnologia para transformá-lo em energia, é necessário a instalação de sistemas de pré-processamento de modo a extrair metais, vidros, materiais inorgânicos. Por outro lado, alguns plásticos que não podem ser reciclados (ex: cabos de panela, tomadas, isopor, adesivos, espuma, teclados de computador, acrílicos) são considerados excelente matéria-prima para a gaseificação, em decorrência da alta energia que produzem (GTC, 2014).

Os principais tipos de gaseificadores podem ser adaptados para recuperação energética de RSU. Os tipos de reatores de gaseificação utilizados para esta finalidade serão descritos a seguir.

Gaseificadores de Leito Fixo

São geralmente fáceis de projetar e de operar, trabalham de forma eficiente com combustíveis de alta densidade e alta granulometria e são usados em plantas de energia de tamanhos pequenos ou médios.

Estes gaseificadores podem ter reatores concebidos em configurações de corrente ascendente ou corrente descendente.

- Corrente ascendente: o resíduo sólido é inserido no sistema pela parte superior do gaseificador e a ingestão do agente oxidante é feita pela parte inferior, de modo que, os resíduos se movam em contracorrente com os gases. Possui alta eficiência de conversão energética, porém, produz altas quantidades de alcatrão.
- Corrente descendente: o resíduo sólido é inserido no sistema pelo topo do gaseificador, enquanto o elemento oxidante é introduzido a partir das laterais ou da parte superior fazendo com que os resíduos e os gases se movem na mesma direção. Neste tipo de gaseificador, ocorre a quebra térmica do alcatrão, possibilitando a produção de um gás livre deste componente. O combustível sólido, neste processo, precisa estar compactado em blocos antes de serem usados como matéria prima e não podem possuir alto teor de cinzas para evitar a formação de escórias (BALAT, 2009; BELGIORNO *et al* 2003; ARENA, 2011).

Gaseificadores de leito fluidizado

O gaseificador de leito fluidizado utiliza um elemento como a areia para servir de leito, o qual será aquecido e mantido em suspensão por um fluido. A matéria-prima entra em combustão em contato com as partículas a alta temperatura do leito fluidizado. Este tipo de gaseificador promove um excelente contato entre sólido e gás favorecendo a intensa circulação e as reações que envolvem o processo.

Seu desempenho depende das características da matéria-prima utilizada, do agente oxidante e dos parâmetros de operação do reator.

Este tipo de gaseificador pode ser do tipo borbulhante ou circulante (BALAT, 2009; BELGIORNO *et al* 2003; ARENA, 2011).

Gaseificador de Leito Fluidizado Borbulhante e o Circulante

A gaseificação em leito fluidizado pode ser do tipo borbulhante ou circulante:

- Circulante: as partículas arrastadas pelos gases são enviadas de volta para o leito através de um ciclone, mantendo-se em circulação.
- Borbulhante: nestes gaseificadores as partículas arrastadas pelos gases não voltam para o leito, trabalhando com velocidades menores que a de transporte pneumático. A alimentação de biomassa é feita diretamente na região do leito (BALAT, 2009; BELGIORNO *et al* 2003; ARENA, 2011).

Gaseificador de Fluxo Arrastado

É utilizado para o tratamento de carvão, resíduos de refinaria, resíduos plásticos mistos e pode ser utilizado para o tratamento de RSU previamente triturado. A matéria prima utilizada é gaseificada na presença de oxigênio em fluxo descendente circulante (BALAT, 2009; BELGIORNO *et al* 2003; ARENA, 2011).

Gaseificação por Plasma

A gaseificação por plasma converte materiais contendo carbono em gás de síntese o qual pode ser usado para gerar energia e combustível de transporte, entre outros. O plasma é um gás ionizado formado quando uma descarga elétrica passa através de um gás. Tochas e arcos de plasma convertem energia elétrica em energia térmica (calor) intensa a qual inicia e suplementa as reações de gaseificação podendo aumentar a taxa dessas reações e tornando o processo mais eficiente circulante (BALAT, 2009; BELGIORNO *et al* 2003; ARENA, 2011).

No interior do gaseificador, os gases quentes da tocha de plasma entram em contato com o material utilizado como matéria-prima (RSU, RSS, biomassa ou resíduos perigosos), aquecendo-os a mais de 1648ºC. Esse calor extremo mantém as reações de gaseificação, as quais rompem as ligações químicas da matéria-prima e as convertem em gás de síntese - formado principalmente por CO e H_2 – o qual pode ser utilizado na produção de produtos químicos, fertilizantes, gás natural substituto, combustíveis para meios de transporte; podem ser utilizados também em turbinas a gás, ou em motores alternativos para produzir a eletricidade, ou ainda ser queimado para produzir o vapor para turbinas (BALAT, 2009; BELGIORNO *et al* 2003; ARENA, 2011).

O processo de gaseificação reduz a massa dos resíduos em cerca de 70-80% e o volume em cerca de 80-90%, preservando o espaço do aterro sanitário; destrói

contaminantes orgânicos, como hidrocarbonetos halogenados; permite o descarte dos contaminantes inorgânicos de forma útil e segura; reduz as emissões de gases com efeito de estufa resultantes da decomposição anaeróbia dos resíduos orgânicos; e produz calor e eletricidade a partir de resíduos (ARENA, 2012).

Segundo Arena (2012), as usinas de tratamento térmico podem converter o valor energético dos RSU em diferentes formas de energia, como eletricidade ou calor, tanto para utilização em instalações industriais como para aquecimento urbano (ARENA, 2012).

PLASMA

O plasma é uma forma especial de material gasoso que conduz eletricidade. É conhecido como o "quarto estado da matéria" (sólido, líquido, gasoso e plasma). No estado de plasma o gás atinge temperaturas extremamente elevadas que podem variar de 5 000 a 50 000 ºC de acordo com as condições de geração.

O plasma é gerado pela formação de um arco elétrico por meio da troca de corrente entre o cátodo e o anodo, e a injeção de um gás ionizado. O gás sob o estado de plasma apresenta boa condutividade elétrica e alta viscosidade quando comparado a um gás no estado normal. O plasma gerado é controlado em tochas de plasma, dispositivo capaz de transformar energia elétrica em calor transportado por um gás (BOSMANS, 2010, TUDOR *et al*, 2009).

O uso de tecnologias de plasma no gerenciamento de resíduos é um conceito relativamente novo, os resíduos podem ser utilizados nos sistemas de pirólise plasmática; gaseificação plasmática; compactação de plasma e vitrificação de resíduos sólidos, e combinações dos três (HELSEN; BOSMANS, 2010).

As principais vantagens do uso desta tecnologia são rápido aquecimento e "*start-up*" do reator e uso de eletricidade como fonte de energia, fator este que possibilita a venda de seus coprodutos - gás de síntese, hidrogênio ou eletricidade (BOSMANS, 2010).

PIRÓLISE

A pirólise é a degradação térmica que ocorre com pouco ou nenhum agente oxidante, em temperaturas entre 400ºC e 900ºC. Três produtos são obtidos nessa reação: gás de pirólise, líquido de pirólise e coque sólido (BOSMANS, 2012).

A pirólise é um processo de degradação térmica dos resíduos na ausência de ar e produz carvão, óleo/cera e gases combustíveis. A pirólise tem sido usada para produzir carvão vegetal a partir de biomassa há milhares de anos, atuando como um eficiente conversor de resíduos em energia (CHEN *et al*., 2014).

Os reatores de pirólise possuem uma das seguintes configurações: leito fixo, leito móvel, leito fluidizado, fluxo arrastado, forno rotativo e reator ablativo. No reator, a interação entre um grande número de fenômenos termoquímicos resulta em grande diversidade de substâncias. Centenas de compostos diferentes são produzidos durante a pirólise dos resíduos e muitos destes ainda não foram identificados. A utilidade da pirólise para a produção de combustível secundário ou recuperação de substâncias a partir de resíduos depende da presença de potenciais poluentes (BOSMANS, 2012).

Os processos de pirólise permitem a recuperação de parte da fração orgânica como material combustível. O carvão pode ser recuperado para utilização externa e o gás de pirólise pode ser utilizado para alimentar motores a gás ou turbinas a gás que geram eletricidade de forma mais eficiente do que as caldeiras a vapor convencionais (BOSMANS, 2012).

COPROCESSAMENTO

O processo de fabricação de cimento é, essencialmente, a reação química de decomposição térmica utilizada para transformar o calcário ($CaCO_3$) em cal virgem (CaO), liberando gás carbônico (CO_2) e a fusão de um material constituído aproximadamente de 94% de calcário, 4% de argilas e 2% de óxidos de ferro e alumínio em um forno rotativo onde é produzido o clínquer (ROCHA; LINS; SANTO, 2011).

O coprocessamento é a utilização de resíduos como matéria-prima ou como fonte de energia, ou ambos, para substituir recursos minerais naturais e combustíveis fósseis como carvão, petróleo e gás (LAMAS; PALAU; CAMARGO, 2013)

A produção de cimento Portland (cimento comum) começa com a extração da matéria-prima, onde a pedra calcária é o principal componente. Uma vez moída, a pedra calcária é misturada com outros produtos como argila, ferro, silicone e alumínio. Esta mistura é enviada para fornos, onde é aquecida a temperaturas entre 1.200 e 1500C, levando a uma fusão de material parcial e formação de grânulos de clínquer, o qual é resfriado, misturado com gesso e escória de alto-forno e moído, dando origem ao cimento Portland (LAMAS; PALAU; CAMARGO, 2013).

A inclusão de RSU como CDR nesta mistura é uma maneira de esgotar esses resíduos, eles devem ser triados para reutilização da parcela que pode se reciclada de modo a se obter fluxos de resíduos definidos de uma qualidade conhecida (STAFFORD *et al*., 2015).

O aproveitamento energético do RSS pós-tratamento por meio do coprocessamento, possibilita o aumento da vida útil dos aterros sanitários, reduzindo o volume depositado e contribui com a gestão de resíduos por substituir o uso de combustíveis fósseis, reduzir o uso de recursos naturais e o consumo de energia.

Stafford *et al* (2015) argumenta que na UE a taxa de substituição do uso de combustíveis fósseis por resíduos são de 80% nos Países Baixos e 60% na Áustria,

Alemanha e Noruega . Já na América Latina, essa taxa varia entre 7 e 20%, devido às suas legislações e práticas de gestão de resíduos.

Neste sentido, Baidya, Ghosh e Parlikar (2016) consideram a Índia como o segundo maior produtor de cimento do mundo e sua produção envolve um alto uso de energia, assim, o coprocessamento de materiais representam uma forma de redução de custo e impacto ambiental, sendo que a decisão a cerca de qual resíduo utilizar como combustível alternativo se dá através do conhecimento do poder calorífico, cinzas e umidade, além de fatores econômicos e de emissões.

3. *ANÁLISES PRELIMINARES EXPLORATÓRIAS*

A observação visual dos RSS pós-tratamento por desativação eletrotérmica sugerem que esses resíduos são compostos em sua maioria, por materiais como plástico, papel, borracha e trapos. A composição desses resíduos triturados e tratados levou a um questionamento sobre qual seria a melhor destinação para esse material, uma vez que os materiais observados apresentam potencial calorífico, possibilitando o seu aproveitamento, em termos de recuperação energética.

Para verificar a real composição dos RSS pós-tratamento e seu potencial calorífico, foram realizadas análises exploratórias.

Poder calorífico

As análises exploratórias iniciais ocorreram no período de Novembro de 2013 a Julho de 2014. Tais análises e seus resultados estão descritos a seguir.

Inicialmente foram aprovadas pela UTR a realização de 18 amostragens. As coletas forma realizadas nos dias 25/11/2013, 02/12/2013 e 21/01/2014. Em cada uma dessas datas, foram coletadas 1 amostra de resíduo pós-tratamento por período (manhã, tarde e noite) e por linha (linha 1 e linha 2), totalizando 18 amostras, conforme apresentado na Tabela 1. As amostras foram coletadas pela autora da dissertação, em sacos Whirl-Pak com capacidade de 207 ml, e enviadas para o laboratório contratado pela empresa, para análise do poder calorífico superior, teor de cloro e teor de cinzas.

Tabela 1. Resultado das análises de poder calorífico superior, teor de cloro e teor de cinzas, nas amostras exploratórias.

LABORATÓRIO A				
Data	Amostra nº	PSC cal/g	Teor de Cloro Total %	Teor de Cinzas (b. seca) %
25/11/2013	U-17445	5639	1,53	10,44
	U-17446	8003	3,33	7,53
	U-17447	6293	0,48	10,13
	U-17448	8462	0,23	9,82
	U-17449	4844	0,31	10,99
	U-17450	6908	0,03	8,39
02/12/2013	U-17494	2370	0,25	8,72
	U-17495	4986	0,91	7,37
	U-17496	3984	1,03	6,59
	U-17497	5681	0,85	5,58
	U-17498	5205	1,03	4,99
	U-17499	3660	0,33	7,5
21/01/2014	U-17653	3818	0,56	5,23
	U-17654	4815	1,09	8,83
	U-17655	6605	1,18	7,78
	U-17656	5804	1,02	5,44
	U-17657	5082	1,12	4,71
	U-17658	4972	1,95	7,27
MÉDIA		5396	0,96	7,63

Os resultados obtidos foram comparados ao poder calorífico de alguns combustíveis, constatando o alto valor do poder calorífico do material analisado.

Diante do resultado, a pesquisadora solicitou ao corpo gerencial da empresa a realização de um número maior de amostras, por questões de custo e tempo, decidiu-se elevar o número de amostras para 100.

Assim, durante os meses de Fevereiro a Julho de 2014 foram realizadas análises de 100 amostras de RSS pós-tratamento por ETD, obtendo resultados que corroboraram com os resultados anteriores.

O procedimento para as coletas semanais desta fase exploratória para avaliação de poder calorífico são descritos a seguir:

Em cada um dos dias foram coletados pela autora desse estudo, em uma bandeja, resíduos pós-tratamento na saída do processo das 2 linhas de produção. Em seguida os resíduos foram distribuídos aleatoriamente em 5 sacos Whirl-Pak encaminhados para análise de poder calorífico. Para estas análises, foi contratado um novo laboratório com escopo de análise mais completa, que inclui o PCI, parâmetro mais importante para avaliação de poder calorífico.

Este procedimento se repetiu em todas as 20 datas, totalizando 100 amostras, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Resultados das análises de poder calorífico realizadas entre os meses de fevereiro e julho de 2014.

Data	Amostra nº	% de sólidos	PCS kcal/g	PCI kcal/g	Teor de Cloro mg/kg	Teor de Cinzas (b. seca) %	Teor de Cinzas (b. úmida) %
18/02/2014	1802/1	82,1	5539	5129	5956	10,7	8,8
	1802/2	82,0	4231	3918	3441	15,1	12,4
	1802/3	80,5	5174	4791	8356	12,3	9,9
	1802/4	89,6	6516	6033	6404	10,5	9,4
	1802/5	97,5	6611	6121	1160	8,5	8,3
24/02/2014	2402/1	78,3	4200	3889	1947	35,3	27,6
	2402/2	58,0	4120	3815	3425	26,0	15,1
	2402/3	58,8	5010	4639	2511	13,3	7,8
	2402/4	89,7	5100	4722	1594	8,6	7,7
	2402/5	56,6	4801	4445	3453	13,4	7,6
06/03/2014	0603/1	66,3	4340	4019	3929	9,6	6,4
	0603/2	75,7	4280	3963	15359	7,5	5,7
	0603/3	76,7	5435	5032	69132	4,7	3,6
	0603/4	80,1	6849	6342	8600	9,6	7,7
	0603/5	66,4	3750	3472	5568	13,9	9,3
12/03/2014	1203/1	73,6	5223	4836	26461	5,2	3,8
	1203/2	60,0	4070	3769	1740	10,0	6,0
	1203/3	74,2	8135	7532	1792	12,8	9,5
	1203/4	95,1	6679	6184	1516	8,1	7,7
	1203/5	81,2	4268	3952	834	8,9	7,2
19/03/2014	1903/1	90,6	7184	6652	1504	7,5	6,8
	1903/2	55,8	3791	3510	54252	5,6	3,1
	1903/3	63,0	4461	4131	11795	7,5	4,7
	1903/4	56,1	3406	3154	4128	8,2	4,6
	1903/5	84,7	5787	5358	21602	7,8	6,6
27/03/2014	2703/1	89,4	6186	5728	5032	14,9	13,3
	2703/2	85,7	5541	5131	4771	10,2	8,8
	2703/3	85,1	5368	4970	8164	10,9	9,3
	2703/4	82,9	5540	5130	9405	13,4	11,1
	2703/5	78,6	5139	4758	4577	17,3	13,6
03/04/2014	0304/1	71,6	5304	4911	21956	13,3	9,6
	0304/2	64,3	2851	2640	4812	10,3	6,7
	0304/3	84,6	4532	4196	3942	6,9	5,8
	0304/4	51,6	3342	3094	5536	9,0	4,6
	0304/5	72,2	2696	2496	8887	6,7	4,8
10/04/2014	1004/1	71,8	6046	5598	10815	6,8	4,9
	1004/2	84,5	5565	5153	4948	5,4	4,6
	1004/3	87,6	6477	5997	21251	9,0	7,9
	1004/4	82,4	6379	5906	6960	12,2	10,0
	1004/5	69,0	5023	4651	6123	8,8	6,1
16/04/2014	1604/1	63,9	4156	3848	2677	10,4	6,7
	1604/2	85,8	5247	4858	2202	12,3	10,6
	1604/3	87,7	5010	4639	2383	12,9	11,3
	1604/4	89,1	6017	5571	5455	0,1	0,1
	1604/5	78,6	6401	5927	3206	14,4	11,3
24/04/2014	2401/1	70,4	4595	4255	5865	9,1	6,4
	2404/2	69,8	4178	3869	3953	9,1	6,4
	2404/3	65,1	4735	4384	5814	8,8	5,7
	2404/4	70,0	4258	3943	4005	5,7	4,0
	2404/5	74,4	4940	4574	8526	7,0	5,2

Tabela 2. Continuação

Data	Amostra nº	% de sólidos	PCS kcal/g	PCI kcal/g	Teor de Cloro mg/kg	Teor de Cinzas (b. seca) %	Teor de Cinzas (b. úmida) %
30/04/2014	3004/1	81,5	5680	5259	1875	9,3	7,6
	3004/2	80,7	4377	4053	3832	5,4	4,3
	3004/3	78,4	4236	3922	6834	10,5	8,2
	3004/4	62,7	5201	4816	3796	9,8	6,2
	3004/5	79,0	4985	4616	4689	9,7	7,7
07/05/2014	0705/1	79,3	4093	3790	3647	23,9	19,0
	0705/2	70,2	4351	4029	4492	8,3	5,8
	0705/3	73,6	4912	4548	3774	11,3	8,3
	0705/4	61,2	5102	4724	6546	13,4	8,2
	0705/5	89,2	5547	5136	2346	9,3	8,3
14/05/2014	1405/1	81,4	5489	5082	143	6,4	5,3
	1405/2	84,3	6118	5665	110	10,8	9,1
	1405/3	84,6	5818	5387	106	11,8	10,0
	1405/4	86,2	5904	5467	242	6,8	5,9
	1405/5	79,1	4480	4148	115	8,4	6,6
22/05/2014	2205/1	85,7	4312	3993	2308	11,3	9,7
	2205/2	88,7	4886	4524	2791	8,7	7,7
	2205/3	82,9	4549	4212	4608	10,9	9,0
	2205/4	89,9	5854	5420	5243	8,4	7,5
	2205/5	74,4	5030	4657	11004	7,8	5,8
29/05/2014	2905/1	86,9	4890	4528	6157	21,6	18,7
	2905/2	76,0	4834	4476	3835	13,9	10,5
	2905/3	82,1	5844	5411	1278	12,8	10,5
	2905/4	62,4	2578	2378	3458	16,6	10,3
	2905/5	87,5	6064	5615	1413	4,1	3,6
06/06/2014	0606/1	58,9	3037	2812	2946	12,0	7,1
	0606/2	68,6	2587	2395	5406	12,6	8,7
	0606/3	48,0	2181	2019	3131	5,2	2,5
	0606/4	50,7	2100	1944	4373	19,3	9,8
	0606/5	77,6	3940	3648	3148	17,4	13,5
13/06/2014	1306/1	61,6	5302	4909	9802	13,1	8,1
	1306/2	85,9	5592	5178	5400	9,1	7,8
	1306/3	84,2	5302	4909	10923	9,3	7,8
	1306/4	64,8	6911	6399	9222	9,7	9,3
	1306/5	88,2	6568	6081	7393	8,3	7,3
18/06/2014	1806/1	80,8	3427	3173	4357	10,3	8,3
	1806/2	62,8	2166	2006	2636	14,9	9,4
	1806/3	40,3	2836	2626	4889	13,8	5,6
	1806/4	67,8	2581	2390	3603	16,1	10,9
	1806/5	68,0	2985	2764	2689	13,5	9,2
28/06/2014	2806/1	80,2	5263	4873	3120	7,4	5,9
	2806/2	76,7	5106	4728	4090	5,1	3,9
	2806/3	86,2	3721	3445	2190	15,0	12,9
	2806/4	37,3	1124	1041	1600	17,3	6,5
	2806/5	41,4	4552	4215	3160	14,5	6,0
03/07/2014	0307/1	76,5	5640	5220	4230	4,2	3,2
	0307/2	87,8	4750	4400	2500	11,0	9,6
	0307/3	79,3	4690	4350	7220	15,0	11,9
	0307/4	88,4	5200	4810	8840	4,2	3,8
	0307/5	70,0	4310	3990	6420	10,4	7,3
MÉDIA		75,8	5090	4713	8754	10,50	7,91

Composição gravimétrica

Para corroborar com a observação visual dos RSS pós-tratamento por desativação eletrotérmica foram realizadas análises exploratórias também da composição gravimétrica desses resíduos, com a finalidade de verificação da sua real composição.

A coleta dos resíduos para composição gravimétrica exploratória ocorreu em quatro dias aleatórios: 25/03/2012, 28/03/2013, 24/04/2013 e 30/04/2013. A coleta foi realizada pela autora do estudo, com a colaboração dos ajudantes da UTR.

Em cada dia foram coletadas uma quantidade aproximada à metade da capacidade, em volume, do *big bag* utilizado na coleta (capacidade de $1m^3$), conforme apresentado a seguir:

25/03/2012: 4840 gramas

28/03/2013: 5066 gramas

24/04/2013: 5160 gramas

30/04/2013: 5115 gramas

Em cada uma das amostras, foram necessários de 3 a 4 dias para realizar a separação total do material amostrado, necessitando de auxílio de mão de obra extra para realização do trabalho; auxiliares operacionais da UTR foram transferidos dos seus postos para colaboração no processo de segregação dos tipos de materiais presentes.

Os materiais foram separados, pesados e registrados, e revelaram a presença em maior quantidade de plástico, sobra[1], trapos, borracha e papel e papelão, seguidos de vidro, isopor e espumas, alumínio, ferro e madeira, conforme apresentado na Tabela 3.

---

[1] Sobras: foram consideradas sobras materiais não possíveis de identificação devido ao tamanho ou por estarem junto com outros materiais, também não identificáveis.

Tabela 3. Composição gravimétrica das amostras exploratórias.

Materiais	25/03/2012	28/03/2013	24/04/2013	30/04/2013	Material	Peso Médio (g)	Porcentagem
	Peso (g)	Peso (g)	Peso (g)	Peso (g)			
	4.840	5066	5160	5115			
Alumínio	150	25	0	0	**Alumínio**	**44**	0,9
Borracha	755	175	900	455	**Borracha**	**571**	11,3
Ferro	35	240	57	30	**Ferro**	**91**	1,8
Isopor e espumas	10	270	65	35	**Isopor e espumas**	**95**	1,9
Madeira	50	100	30	40	**Madeira**	**55**	1,0
Papel e papelão	275	475	385	400	**Papel e papelão**	**384**	7,6
Plástico	1535	1650	1440	1615	**Plástico**	**1560**	31,0
Sobra	1040	361	888	775	**Sobra**	**766**	15,1
Trapos	940	1700	1340	1700	**Trapos**	**1420**	28,1
Vidro	50	70	55	65	**Vidro**	**60**	1,2

O Gráfico 1 apresenta a composição gravimétrica distribuída graficamente, representando as quantidades, em porcentagem, dos materiais encontrados.

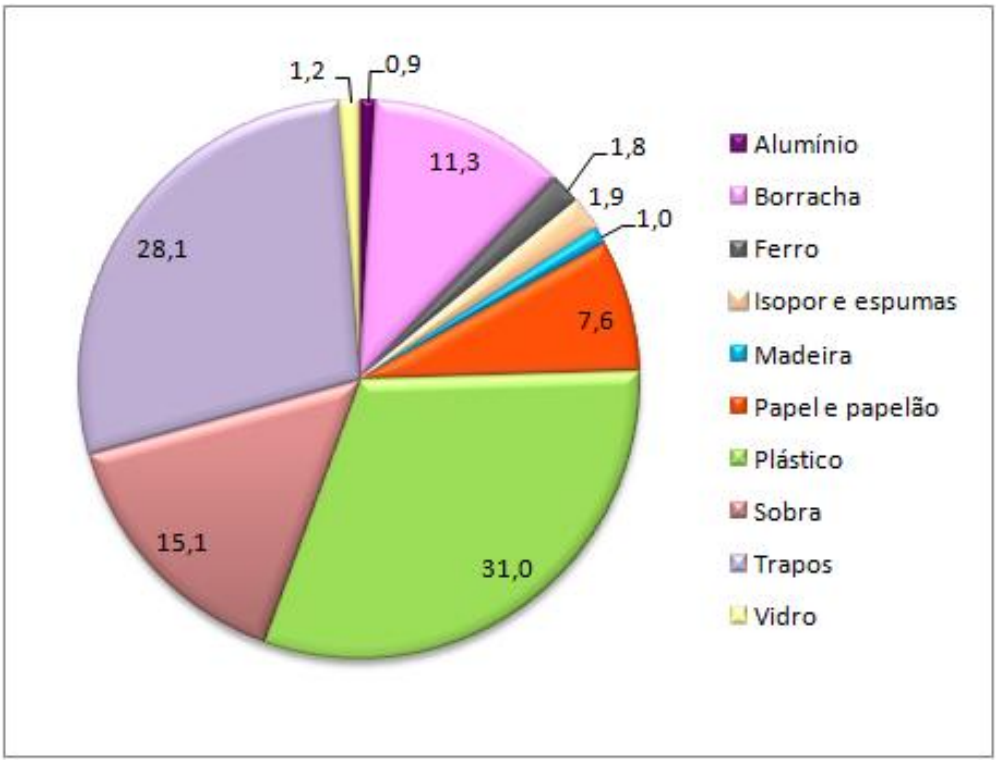

Gráfico 1. Distribuição gráfica da composição gravimétrica.

A análise da composição gravimétrica inicial confirmou as análises visuais dos RSS pós-tratamento por desativação eletrotérmica, atestando a presença em maior quantidade de plástico, trapos, borracha e papel e papelão, materiais de alto poder calorífico.

Ao final das análises exploratórias iniciaram-se então, a coleta do material a ser analisado em maior profundidade.

Os resultados das análises exploratórias foram decisivos para o ingresso no Mestrado Profissional buscando desenvolver a temática de valorização dos RSS pós-tratamento por desativação eletrotérmica.

4. *MÉTODOS*

O objeto de estudo dessa investigação é constituído pelos RSS dos grupos A e E (infectantes), oriundos de serviços de saúde, que passaram por tratamento de desinfecção por desativação eletrotérmica, na Unidade de Tratamento de Resíduos (UTR), instalada na Avenida Gonçalo Madeira nº 400 (fundos), no Bairro do Jaguaré, São Paulo, SP.

Para realização desse estudo, foi assinado um Termo de Autorização Institucional, no qual a empresa autorizou a realização do estudo em questão, conforme apresentado no Apêndice A.

O estudo foi realizado em etapas, conforme apresentado a seguir:

4.1) Revisão Bibliográfica.

4.2) Análises do poder calorífico, teor de cloro e teor de cinzas, para identificar o potencial energético do resíduo pós-tratamento por desativação eletrotérmica;

4.3) Análises da composição gravimétrica para caracterização do resíduo pós-tratamento por desativação eletrotérmica;

Os procedimentos metodológicos adotados em cada etapa, para atingir os objetivos deste estudo, são detalhados a seguir.

4.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Foram efetuados levantamentos de artigos publicados em periódicos indexados na base de dados *Web of Science*, utilizando palavras-chave como *waste to energy*, *energy reuse of waste* e *technologies for refuse derived fuel* (RDF), com foco na caracterização de resíduo sólido, nos sistemas de tratamento de RSS e nos sistemas de valorização energética de resíduos sólidos.

4.2 ANÁLISES DO PODER CALORÍFICO, TEOR DE CLORO E TEOR DE CINZAS, PARA IDENTIFICAR O POTENCIAL ENERGÉTICO DO RESÍDUO PÓS-TRATAMENTO POR DESATIVAÇÃO ELETROTÉRMICA

Para análise do poder calorífico, teor de cloro e teor de cinzas dos RSS pós-tratamento por desativação eletrotérmica, a autora deste estudo optou por realizar mais 4 análises, limitados a este número devido a questões de custo e tempo. As amostras do material coletado foram enviadas para laboratório contratado, para realização das análises laboratoriais e emissão do laudo.

As coletas foram realizadas durante 4 semanas consecutivas entre os meses de Novembro e Dezembro de 2015, durante as quais de segunda a sexta foram coletadas amostras de material tratado, nas 2 linhas de produção, conforme evidenciado a seguir e apresentado na Figura 7:

Número de amostras analisadas $= \frac{4 \text{ semanas} \times 5 \text{ dias} \times 2 \text{ linhas}}{10} = 4$ amostras de material tratado.

O procedimento semanal adotado durante as coletas é descrito a seguir:

1) As coletas foram realizadas pela autora do estudo ou outro colaborador da UTR, na saída do processo de tratamento;
2) Foram coletados 1 saco Whirl-Pak (207ml) de resíduos por linha, em períodos aleatórios do dia;
3) Os sacos contendo o material coletado foram armazenados no laboratório da UTR, em temperatura ambiente;
4) Após a coleta das 10 amostras da semana os resíduos pós-tratamento foram retirados dos sacos e misturados, em uma bandeja, para sua homogeneização;
5) Após a homogeneização retirou-se do material homogeneizado uma amostra composta cuja quantidade correspondeu ao volume do saco Whirl-Pak (207ml);
6) A amostra semanal, então, foi encaminhada para o laboratório contratado para realização das análises laboratoriais de poder calorífico, teor de cloro e teor de cinzas.

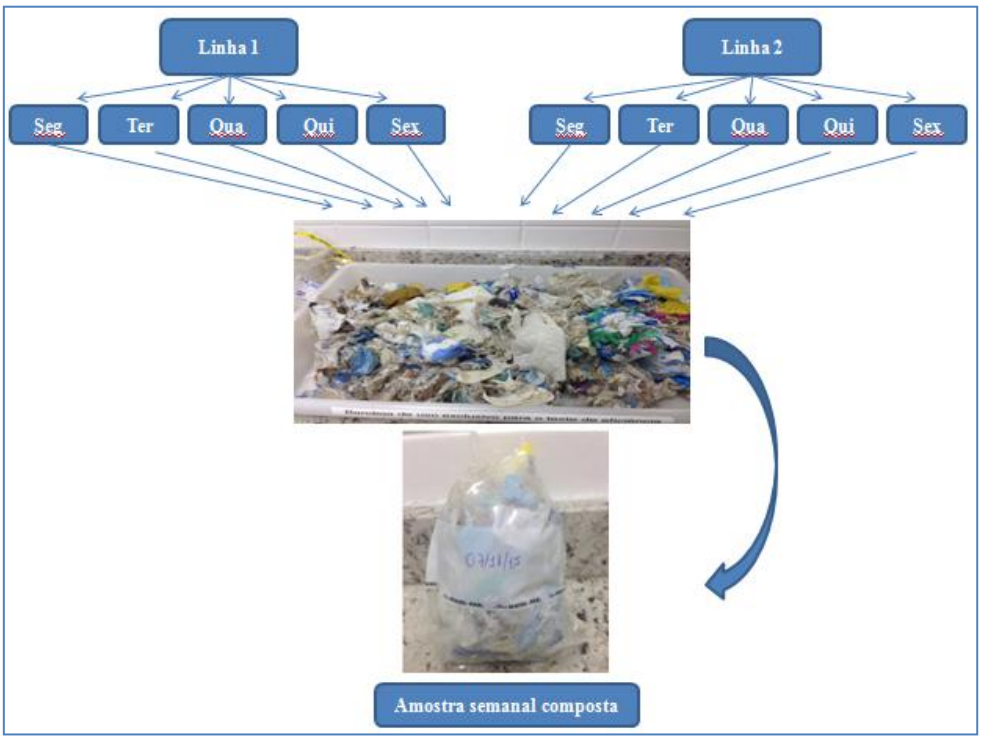

Figura 6. Esquema de coleta e homogeneização da amostra semanal.

4.3 ANÁLISES DA COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA PARA CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO

Para a caracterização dos resíduos pós-tratamento, foram realizadas 3 análises gravimétricas, que resultaram na composição gravimétrica final, correspondente à média dos valores encontrados nessas 3 análises.

As amostras foram coletadas em 2 períodos: Novembro e Dezembro de 2015 e Janeiro e Fevereiro de 2016.

No 1º período foram coletadas 4 amostras semanais (compostas) que resultaram em 1 amostra única desse período. No 2º período foram coletadas amostras em todos os dias úteis do mês de Janeiro e Fevereiro de 2016, totalizando 5 amostras compostas em cada mês desse período, as quais resultaram em 1 amostra única por mês.

Os procedimentos de coleta de amostra para análise gravimétrica são detalhados a seguir e apresentados nas figuras 7 e 8.

1) Durante 2 semanas do mês de Novembro de 2015 e 2 semanas do mês de Dezembro de 2015, foram coletadas diariamente (em dias úteis) em sacos Whirl-Pak, o volume de 207 ml de resíduo tratado de cada linha de produção ;
2) Após a coleta, cada saco contendo o resíduo coletado, foi identificado (com a data da coleta e a linha) e pesado individualmente;
3) Após 5 dias de coleta, de segunda a sexta, o material coletado foi depositado em uma bandeja para homogeneização (2 sacos por dia, totalizando 10 sacos em cada semana);
4) Do total de resíduo homogeneizado, foi retirada 1 amostra composta, igual ao volume de um *Whril-Pak* (207 ml), para triagem, a qual foi pesada, identificada (1ª. Coleta de Novembro de 2015 e 2ª. Coleta de Novembro de 2015) e armazenada;
5) Ao final das coletas do período de 4 semanas de coleta, as 4 amostras compostas armazenadas foram depositadas em uma bandeja única a qual foi pesada no total e o material foi triado em: alumínio, borracha, ferro, isopor e espumas, madeira, papel e papelão, plástico, sobras, trapos e vidro;
6) Durante o processo de triagem o material foi sendo depositado em potes que, posteriormente foram pesados, por tipo.

Todos os procedimentos de coleta, pesagem, registros, homogeneização e triagem, foram realizados pela autora do estudo, com eventual participação de um colaborador da UTR

A figura 9 apresenta o registro de coleta de amostras no período de Novembro e Dezembro de 2015. A figura 10 apresenta o registro de amostras de Junho de 2016 e a figura 11 apresenta o registro de coleta das amostras de Julho de 2016.

Figura 7. Esquema de preparação semanal do material para triagem.

Figura 8. Pesagem da amostra final.

A figura 9 apresenta os registros das coletas de resíduo pós-tratamento realizadas em 4 semanas entre os meses de Novembro e Dezembro, nas 2 linhas de produção. O material coletado durante cada semana (4 semanas) foi depositado em bandeja única, homogeneizado e separou-se uma quantidade correspondente ao volume do saco Whril-Pak (207 ml). Os volumes corresponderam a 100g na primeira coleta, 100g na segunda coleta, 100g na terceira coleta e 115g na quarta coleta. Após a realização das coletas do período determinado, o conteúdo do saco Whril-Pak de cada semana foi depositado em bandeja única e pesado (415g). Esta foi a amostra submetida à análise gravimétrica deste período.

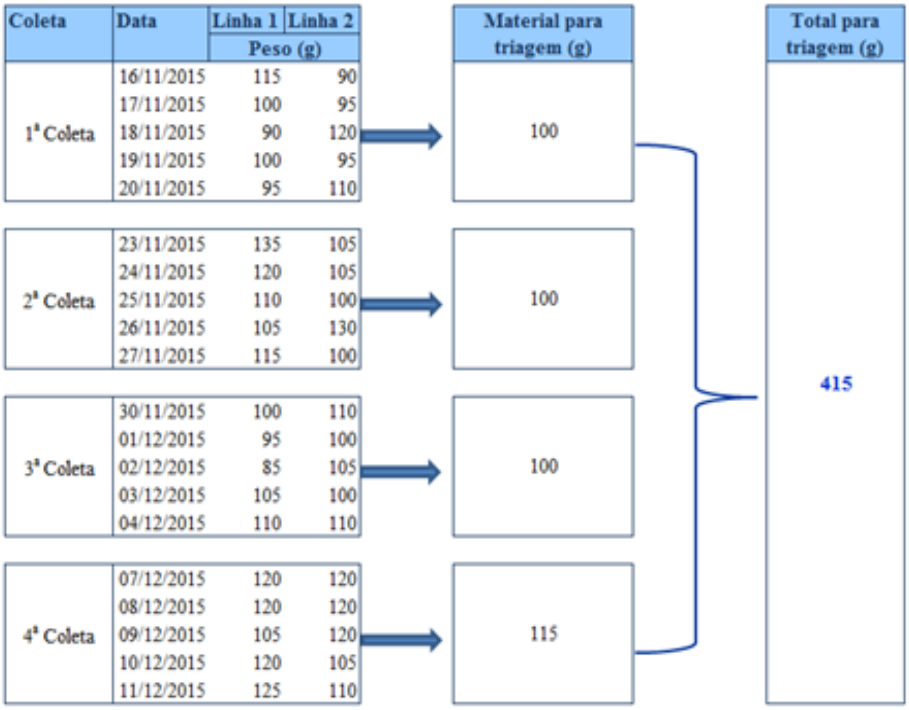

Figura 9. Registro de coletas de amostras de resíduos pós-tratamento, por linha, nos meses de Novembro e Dezembro de 2015, para análise da composição gravimétrica.

A figura 10, apresenta os registros das coletas de resíduo pós-tratamento, durante o mês de Junho, nas 2 linhas de produção. O material coletado durante cada semana (5 semanas) foi depositado em bandeja, homogeneizado e foi separada uma quantidade correspondente ao volume do saco Whril-Pak (200 ml). Os volumes corresponderam a 105g na primeira coleta, 105g na segunda coleta, 115g na terceira coleta, 105g na quarta coleta e 115g na quinta coleta. Após a realização das coletas neste período, o conteúdo do saco Whril-Pak de cada semana foi depositado em bandeja única e pesado (545g). Esta foi a amostra resultante submetida à análise gravimétrica deste período.

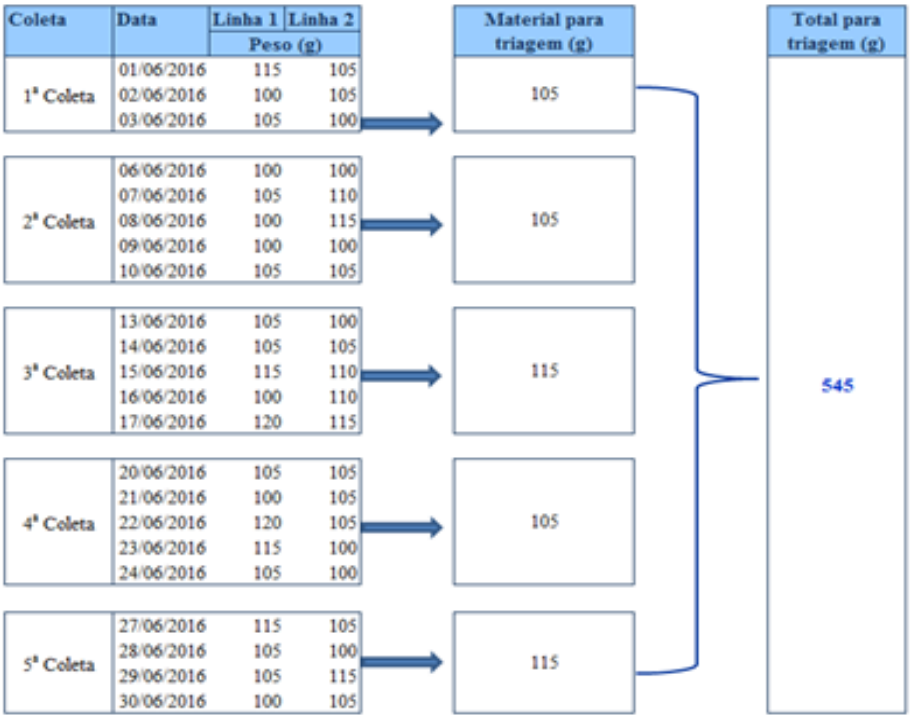

Figura 10. Registro de coletas de amostras de resíduos pós-tratamento, por linha no mês de Junho de 2016, para análise da composição gravimétrica.

A figura 11, apresenta os registros das coletas de resíduo pós-tratamento, durante o mês de Julho, nas 2 linhas de produção. O material coletado durante cada semana (5 semanas) foi depositado em bandeja, homogeneizado e foi separada uma quantidade correspondente ao volume do saco Whril-Pak (200 ml). Os volumes corresponderam a 105g na primeira coleta, 100g na segunda coleta, 100g na terceira coleta, 120g na quarta coleta e 110 na quinta coleta. Após a realização das coletas do período determinado, o conteúdo do saco Whril-Pak de cada semana foram depositadas em bandeja, pesados (535g) e separados para análise gravimétrica.

Coleta	Data	Linha 1	Linha 2	Material para triagem (g)	Total para triagem (g)
		Peso (g)			
1ª Coleta	01/07/2016	120	100	105	535
2ª Coleta	04/07/2016	105	105	100	
	05/07/2016	105	105		
	06/07/2016	105	100		
	07/07/2016	105	105		
	08/07/2016	105	100		
3ª Coleta	11/07/2016	105	110	100	
	12/07/2016	110	100		
	13/07/2016	125	110		
	14/07/2016	120	115		
	15/07/2016	100	110		
4ª Coleta	18/07/2016	105	110	120	
	19/07/2016	100	115		
	20/07/2016	95	95		
	21/07/2016	120	110		
	22/07/2016	115	100		
5ª Coleta	25/07/2016	100	120	110	
	26/07/2016	95	110		
	27/07/2016	95	100		
	28/07/2016	105	100		
	29/07/2016	100	100		

Figura 11. Registro de coletas de amostras de resíduos pós-tratamento, por linha no mês de Julho de 2016, para análise da composição gravimétrica.

Após a realização das análises da composição gravimétrica dos resíduos nos períodos estipulados, os resultados foram tabelados e serão apresentados no capítulo a seguir.

5. *RESULTADOS E DISCUSSÃO*

Os resultados obtidos com as análises do Poder Calorífico e da Composição Gravimétrica, foram tabulados e serão apresentados e discutidos a seguir,

5.1 PODER CALORÍFICO

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos nas análises do poder calorífico dos materiais presentes no resíduo pós-tratamento.

Tabela 4. Valor médio das análises do poder calorífico superior, poder calorífico inferior, teor de cloro e teor de cinzas em Novembro e Dezembro de 2015.

2015							
DATA	**Quantidade de amostras**	**% de sólidos**	**PCS kcal/kg**	**PCI kcal/kg**	**Teor de Cloro mg/kg**	**Teor de Cinzas (b. seca) %**	**Teor de Cinzas (b. úmida) %**
23/11/2015	1	65,9	5550	5140	7100	8,56	5,65
30/11/2015	1	32,5	6240	5780	<443	11,3	3,66
07/12/2015	1	86,7	5860	5430	8470	7,6	6,59
14/12/2015	1	99,2	7710	7140	7940	4,71	4,68
Média		71,075	6340,00	5872,50	7836,67	8,04	5,15

As análises de poder calorífico do resíduo estudado apresentaram um valor médio de 5872,50 kcal/kg para o PCI, comprovando a possibilidade de valorização energética sem a necessidade de utilização de combustível auxiliar e técnicas de secagem. De acordo com Ferreira (2013), no caso do PCI é necessário um valor superior a 2.000 kcal/kg, permitindo que este seja utilizado em processos de combustão como o coprocessamento, incineração e a pirólise, tecnologias que utilizam RSU como combustível alternativo ou matéria prima.

De acordo com FEAM (2012), para ser utilizado em processos de coprocessamento, o resíduo deve possuir PCI mínimo de 1.500/2.000 kcal/kg. O PCI dos RSU (FEAM, 2012) é aproximadamente de 1.650 kcal/kg, valor bem mais baixo quando comparado ao PCI do resíduo estudado, cujo valor médio é 3,5 vezes o PCI dos RSU.

Considerando o PCI médio do RSU de 2.200 kcal/kg, o aproveitamento energético de seu uso no sistema de gaseificação em uma comunidade ou consórcio de 1.000.000 habitantes, são produzidos, diariamente em média e com base em 0,8Kg/indivíduo - segundo convenção brasileira, 800t/dia de RSU, ou o equivalente a

400t/dia de CDR, o suficiente para gerar, no mínimo, 16,6MW/h de energia elétrica (CARBOGÁS)

De acordo com a Carbogás, empresa fabricante de gaseificadores, 1tonelada de RSU gera 0,5 toneladas de CDR com PCI de 2.200 Kcal/kg. Uma comunidade de 1.000.000 habitantes, com geração de 0,8kg de RSU por indivíduo, ou seja, 800 toneladas/dia de RSU, ou o equivalente a 400t/dia de CDR, gera no mínimo, 16,6 MW/h de energia elétrica, conforme apresentado abaixo.

1.000.000 hab x 0,8kg de RSU/pessoa = 800 t/dia de RSU
1 t de RSU = 0,5 t de CDR, logo, 800t/dia de RSU = 400 t/dia de CDR

Outra técnica possível de absorver o resíduo estudado como fonte de energia é a pirólise. Tôrres-Filho et al. (2014) avaliaram técnica e ambientalmente uma planta piloto de tratamento de RSS por pirólise, no município de Belo Horizonte, MG, e concluíram que o produto carbonizado resultante do processo, possui um PCI de 5.692 kcal/kg, podendo ser utilizado para valorização energética. O resíduo estudado apresentou um PCI médio de 5872,5 Kcal/kg, valor próximo ao obtido por Tôrres-Filho. No caso exemplificado a pirólise foi utilizada como forma de tratamento dos RSS brutos e posterior reaproveitamento energético, enquanto que no presente estudo primeiro procedeu-se o tratamento dos RSS, eliminando sua periculosidade e permitindo sua utilização em processos de resuperação energética.

Nos dois casos os valores de PCI médio encontrados comprovam o alto poder calorífico presente nos componentes dos RSS.

Além da análise do poder calorífico, para verificar quais tecnologias poderiam valorizar energeticamente o resíduo objeto do estudo, foi analisada, a composição gravimétrica desse resíduo. A composição gravimétrica nos permite conhecer o resíduo enquanto suas partes constituintes e analisar qual técnica seria mais adequada para sua utilização. Por exemplo, pode-se verificar o percentual de materiais com alto poder calorífico como madeira e plásticos presentes neste resíduo (Figura 12).

Material	PCI (Kcal/kg)
Resíduo orgânico	700
Papel/papelão	2.500
Têxtil	3.400
Madeira	4.300
Plástico	5.000

Figura 12. Poder calorífico inferior de alguns materiais componentes do RSU.

O resultado da análise gravimétrica é exposto a seguir para complementar as análises de poder calorífico.

5.2 COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA

A Tabela 5 apresenta os valores encontrados na análise gravimétrica realizada nos meses de Novembro e Dezembro de 2015; e Junho e Julho de 2016 evidenciando a presença de plástico, trapos, borracha, papel e papelão. Ao final, foi calculado o valor médio dessas três análises, valor considerado para cálculo dos percentuais relativos e para avaliação.

Tabela 5. Valor médio das análises de composição gravimétrica realizadas nos meses de Novembro e Dezembro de 2015; e Junho e Julho de 2016

Materiais	nov e dez/16 (g)	Porcentagem (%)	jun/16 (g)	Porcentagem (%)	jul/16 (g)	Porcentagem (%)	Média Total (g)	Porcentagem Total (%)
	415		545		535		498	
Alumínio	2	0,5	4,0	0,7	3,0	0,6	3,0	0,6
Borracha	69,5	16,7	51,0	9,4	74,0	13,8	64,8	13,3
Ferro	1	0,2	0,0	0,0	5,0	0,9	2,0	0,4
Isopor e espumas	0	0,0	2,0	0,4	6,0	1,1	2,7	0,5
Madeira	0	0,0	0,0	0,0	3,0	0,6	1,0	0,2
Papel e papelão	61	14,7	52,0	9,5	65,0	12,1	59,3	12,1
Plástico	121,5	29,3	185,0	33,9	151,0	28,2	152,5	30,5
Sobra	72	17,3	153,0	28,1	130,0	24,3	118,3	23,2
Trapos	88	21,2	95,0	17,4	91,0	17,0	91,3	18,5
Vidro	0	0	3,0	0,6	7,0	1,3	3,3	0,6
Total	415	100	545	100	535	100	498	100

A Tabela 6 apresenta, em destaque, o resultado da análise gravimétrica do resíduo estudado, enquanto que o Gráfico 2 traz a representação gráfica.

Tabela 6. Resultado da análise gravimétrica do resíduo estudado

Materiais	Porcentagem Total (%)
Alumínio	0,6
Borracha	13,3
Ferro	0,4
Isopor e espumas	0,5
Madeira	0,2
Papel e papelão	12,1
Plástico	30,5
Sobra	23,2
Trapos	18,5
Vidro	0,6
Total	100

O Gráfico 2 apresenta a porcentagem de cada material, ao final das análises gravimétricas.

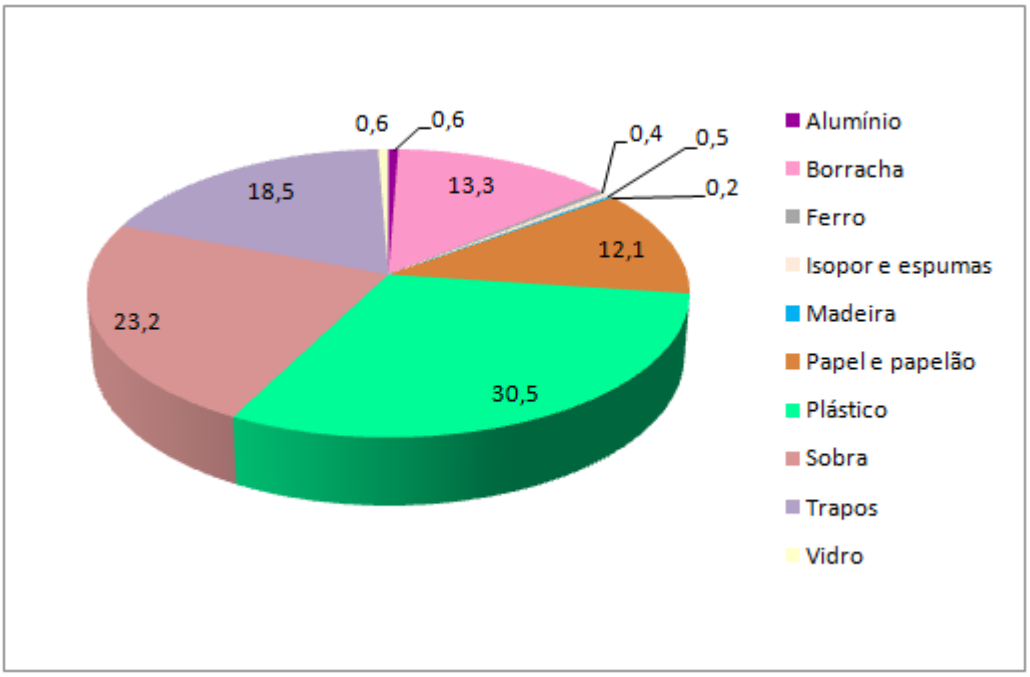

Gráfico 2. Representação gráfica da composição gravimétrica do resíduo estudado

A observação visual dos RSS antes do tratamento revela a presença em maior quantidade de materiais como papel, plástico, borracha e trapos. Porém, durante o processo de desinfecção por ETD, os resíduos são triturados, umedecidos e aquecidos, para se adequarem ao processo de tratamento. Durante a análise da composição gravimétrica, percebeu-se que materiais como papel e papelão foram dissolvidos ou reduzidos a pedaços muito pequenos, impossibilitando sua separação dos demais materiais; assim como materiais como vidro e alguns plásticos foram triturados a pedaços ainda menores, dificultando sua classificação.

A Tabela 7 apresenta a comparação entre os resultados encontrados no presente estudo e os resultados encontrados no Estudo de determinação da composição gravimétrica dos RSS de diferentes tipos de estabelecimentos geradores, desenvolvido na cidade de São Carlos, por Andrade (1999).

Tabela 7. Resultados, em porcentagem, da quantidade de material resultante da composição gravimétrica no presente estudo, em comparação com o estudo de Andrade, 1999.

Materiais	Resíduo estudado (%)	Resíduo (Andrade, 1999) (%)
Madeira	0,20	0,97
Papel e papelão	12,10	36,38
Plástico	30,50	23,93
Trapos	18,50	8,75
Vidro	0,60	14,79

Ao compararmos a composição gravimétrica dos resíduos do presente estudo, com os RSS pré-tratado ao estudo de Andrade (1999), verificamos pequena diferença. Enquanto Andrade encontrou 70% de material de alto poder calorífico, nosso resíduo resultou em 61,3%, valor também significativo.

Esta diferença se dá pelo fato dos RSS, ao serem tratados por desativação eletrotérmica, serem triturados e umedecidos dificultando a segregação e identificação no momento da separação para pesagem. Além disso, ocorre a dissolução de parte do material constituinte de celulose (papel e papelão).

Da mesma maneira, a trituração prévia dos RSS submetidos a tratamento por desativação eletrotérmica, dificulta a identificação de pedaços pequenos de vidro, os quais muitas vezes se transformam em um “pó” de vidro. Além da trituração, a extrusora e a prensa, compactam o material reforçando o processo de quebra e fragmentação dos materiais.

Do mesmo modo, a trituração e a umidade adicionada aos RSS antes do tratamento dificultam a separação e a identificação da madeira.

O Gráfico 3 apresenta a comparação gráfica entre as análises gravimétricas de ambos os estudos.

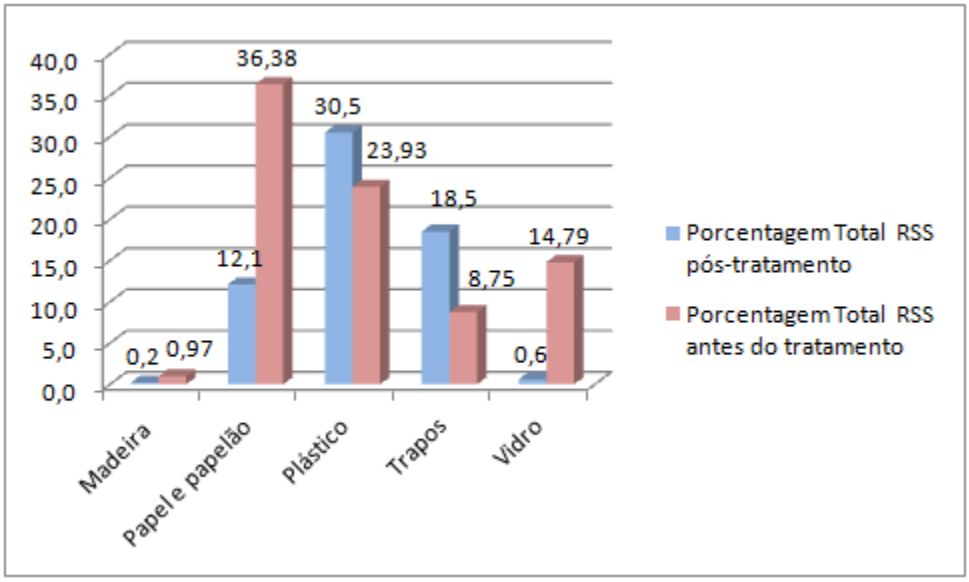

Gráfico 3. Composição gravimétrica dos resíduos estudados do estudo de Andrade (1999).

No presente estudo, a composição gravimétrica dos RSS pós-tratamento por desativação eletrotérmica evidenciou a prevalência de materiais como plásticos, trapos, papel e papelão borracha e sobras permitindo a comparação de sua composição com RSU, os quais, de acordo com Chen *et al* (2014), apresentam em sua composição papel, madeira e derivados de combustíveis fósseis como plásticos, borrachas e tecidos. Este resultado é importante, uma vez que a presença destes materiais se alinha com as características de resíduos que a EPA considera como recurso de energia renovável, logo podendo ser encaminhado para recuperação energética (CHEN *et al*, 2014).

Considerando que os RSU e o CDR são tidos como os tipos mais importantes de combustíveis alternativos originados de resíduos, técnicas de transformação de resíduos em calor/energia podem ser empregadas satisfatoriamente na gestão de RSU e também de RSS (BOSMANS *et al*, 2013). Isso representa também uma alternativa à disposição em aterro sanitário, cumprindo com o estabelecido o PNRS, quanto à recuperação máxima (valorização) dos resíduos antes de sua disposição no ambiente.

A valorização de resíduos tem grande impacto, principalmente nas regiões metropolitanas do Estado de São Paulo, onde o volume de resíduos gerado é muito elevado e a disponibilidade de áreas para disposição em aterros é quase inexistente. Pode ser considerada ainda uma tecnologia mitigadora no enfrentamento do aquecimento global, e um Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) que agrega

valor aos resíduos e elimina os efeitos adversos da disposição direta de resíduos no solo (SMA, 2009).

Conforme levantado, as principais tecnologias de valorização energética de resíduos são incineração, gaseificação, pirólise e plasma (BOSMANS *et al*, 2013). Outra tecnologia importante é a utilização de CDR por meio de coprocessamento, pelas indústrias cimenteiras.

Essas tecnologias serão discutidas a seguir, de acordo com os resultados das análises gravimétricas e de poder calorífico obtidas neste estudo.

COPROCESSAMENTO

O coprocessamento é uma tecnologia de valorização de resíduos que tem empregado o CDR. Os principais tipos de resíduos utilizados como CDR pelos países latino-americanos são: solo contaminado, pneus, lamas oleosas, catalisadores usados, adesivos, resinas, látex, borracha, plásticos e madeiras, advindos de processos industriais, enquanto que em muitos países europeus, são utilizados também CDR que empregam os RSU (STAFFORD *et al*., 2015).

Para serem utilizados como CDR pela indústria cimenteira, esses materiais devem possuir determinadas características de poder calorífico, teor de umidade e critérios físicos, propriedades estas encontradas nos resíduos ques o tornam aptos a serem utilizados como fontes de energia (GÜERECA, TORRES E JUÁREZ-LÓPEZ, 2015).

Os resultados obtidos no presente estudo comprovam a possibilidade da utilização do resíduo estudado como base para CDR.

Para Bosmans *et al* (2013) os principais benefícios da conversão de RSU em CDR são maior poder calorífico, menores emissões de poluentes e menores teor de cinzas e, finalmente, armazenamento, manuseio e transporte mais fácil.

Considerando que o resíduo estudado é similar aos RSU, tais aspectos são validos também para is RSS pós-tratamento.

Considerando que UTR trata 100 toneladas/dia de RSS, o resíduo pós-tratamento poderia gerar uma quantidade significativa de energia. Bujak (2009) mostrou ser possível obter cerca 660-800 KW de energia utilizável a partir de 100 kg de RSS bruto. Neste sentido, as 100 toneladas/dias de resíduo tratado poderia gerar de 660.000 a 800.000 kw/h de energia.

O valor médio de consumo de energia elétrica, em kw/h, por habitante no ano de 2012 foi de 275.1313 kw/h, logo, a energia gerada por 100 toneladas/dias de resíduo tratado, poderia gerar energia suficiente por habitante por aproximadamente 2-3 meses.

Em relação à Legislação, no Brasil a Resolução CONAMA 264/99, não permite a utilização de RSS em fornos de coprocessamento, mas assente quanto à utilização de RSU como substituto de matéria-prima e/ou de combustível, desde que

estes apresentem características similares às dos componentes normalmente empregados e as condições do processo assegurem o atendimento às exigências técnicas e aos parâmetros fixados pela Resolução, comprovados a partir dos resultados práticos do plano do Teste de Queima.

No entanto, apesar do resíduo estudado ter origem como RSS, após seu tratamento por desativação eletrotérmica, é considerado RSU (classe II). Comprovando este fato, nota-se no CADRI expedido para disposição em aterro sanitário, a classificação como Classe II-A.

De acordo com a Associação Europeia do Cimento, a CEMBUREAU (2009), o coprocessamento utilizando combustíveis alternativos não apresenta impactos negativos nas emissões dos processos produtivos ou na qualidade ambiental e técnica do produto final.

No entanto, a comparação técnica quanto ao enquadramento das possíveis emissões à legislação vigente se dá por meio de Teste de Queima.

No presente estudo, não foi realizado o Teste de Queima para verificação das emissões e seus possíveis impactos ambientais gerados na valorização dos resíduos estudados, devido ao prazo e ao custo das análises. Porém, reconhece-se a importância desta análise como complementar e fundamental para decisão de utilização destes resíduos na valorização energética.

PIROLISE

No processo de pirólise, alguns tipos de biomassa são utilizados como fonte de combustível renovável para produção de produtos como carvão e gás. Essa biomassa pode ser madeira, bagaço, biomassa lenhosa, palhas e RSU, por exemplo, (BALAT *et al*, 2009).

O resíduo estudado apresentou baixa porcentagem de madeira, porém, sua composição gravimétrica permite sua equivalência com os RSU, permitindo seu uso no processo de transformação de resíduo em energia por meio da tecnologia de pirólise.

Chen (2014) coloca duas vantagens adicionais ao processo de pirólise dos RSU: 1) evita o transporte à longa distância; e 2) sua instalação não exige plantas que ocupem muito espaço como incineradores ou aterros sanitários.

No entanto, de acordo com Chen (2014) o RSU é mais heterogênio em comparação a outros resíduos utilizados no processo de pirólise com recuperação energética, como pneus, plásticos e lodo de esgoto e, portanto, são necessários estudos adicionais para complementar as informações sobre desenvolvimento tecnológico, caracterização de produtos e possíveis impactos ambientais decorrentes do uso de RSU na pirólise.

PLASMA

Essa tecnologia é viável de acordo com as características dos materiais componentes dos RSU. Para os resíduos com altas concentrações de materiais orgânicos e alto poder calorífico, os processos de plasma são interessantes na medida em que geram vapor com recuperação energética na forma de gás de síntese.

Já os resíduos com elevada concentração de plásticos requerem temperaturas muito elevadas e dispendiosos sistemas de prevenção ou redução de emissões tóxicas. Neste caso, a economia é desfavorável, uma vez que é mais difícil obter um produto valioso. Finalmente, para os resíduos contendo materiais sólidos inorgânicos podem ser utilizados resultando na recuperação de componentes valiosos, presentes nos resíduos inorgânicos, ou podem ser reduzidos em volume por fusão (técnica muito utilizada para resíduos perigosos) ou ainda, podem ser oxidados e retidos numa escória vitrificada (HELSEN; BOSMANS, 2010).

Os resíduos estudados apresentaram alta porcentagem de plástico em sua composição.possuindo capacidade para gerar energia/calor por meio da tecnologia de plasma. Essa tecnologia, de acordo com Helsen e Bosmans (2010) utiliza resíduos agrícolas, plásticos, pneus usados e resíduos médicos, produzindo gás e um resíduo carbonoso chamado de *char* (char), utilizados para geração de energia/calor.

GASEIFICAÇÃO

Uma vez que os resultados obtidos neste estudo, comprovaram a similaridade das características de poder calorífico e composição gravimétrica dos RSS pós-tratamento com as mesmas características dos RSU e sua real possibilidade de utilização como CDR, podemos então analisar o uso do resíduo objeto de estudo no processo de gaseificação, para geração de energia e/ou calor.

Conforme exposto anteriormente por Chen (2014) e confirmado por Belgiorno *et al*, (2003) os RSU em geral são compostos por materiais heterogêneos. Este fato dificulta o processo de gaseificação, tornando necessário a produção de um CDR com características homogêneas e controladas.

INCINERAÇÃO

Para Baran, Mamis e Alagoz (2016) resíduos como plástico, couro e borracha reduzem o potencial energético do aterro sanitário com relação à produção e recuperação do biogás, porém, aumentam o potencial energético da tecnologia de incineração. O resíduo estudado apresentou em sua composição gravimétrica 30,5% de plástico, 13,3% de borracha, 18,5% de trapos e 13,3% de borracha, produtos com alto poder calorífico o que possibilita seu uso em processos de incineração com recuperação energética e desvia a destinação do RSS pós-tratamento para aterro sanitário.

Nesse sentido, os autores consideram que a transformação dos RSU em energia tem se tornado importante etapa da gestão dos RSU na China, contando com o apoio de políticas governamentais e incentivos financeiros que visam ao crescimento da indústria de incineração para geração de energia renovável.

De acordo com Menezes, Gerlach e Menezes (2000), o Brasil ainda não acompanha a tendência mundial de gerar energia oriunda dos RSU, talvez por apresentar outras alternativas de energia renovável. Segundo esses autores 1 tonelada de RSU pode gerar: 200 kg da carvão, ou 250 kg de combustível, ou 30 toneladas de água quente, ou, ainda, 500 kwh de energia elétrica.

6. *CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES*

A crescente geração de RSS sua composição e periculosidade acarretam problemas econômicos, ambientais e de saúde, principalmente relacionados ao seu manejo e à disposição no ambiente, em especial, quando ocorre de forma ambientalmente não controlada.

Os RSS perigosos (grupo A – infectantes; grupo B – químicos perigosos e grupo E – perfuro-cortantes) exigem tratamento específico para eliminar o risco inerente.

No município de São Paulo, no ano de 2016, as 100 ton/dia de RSS infectantes (grupo A e E) geradas são enviadas para tratamento por desativação eletrotérmica. Após desinfecção, resultam na mesma quantidade de resíduos pós-tratamento, considerados com características de resíduos comuns (Classe II – A) e similares aos RSU para fins de destinação.

Atualmente, tais resíduos pós-tratados são encaminhados para aterro sanitário, distante 30,5 km e a um custo diário de R$ 9.900,00 (R$ 198.000.00/mês), correspondendo a R$ 4.600,00 de transporte e 5.300,00 para disposição em aterro sanitário.

Porém, mesmo considerando que tais resíduos são dispostos de forma ambientalmente adequada em aterro licenciado, tanto a hierarquia de resíduos prevista na PNRS, como os custos envolvidos e mesmo as emissões de GEE (gases de efeito estufa) decorrentes do transporte reforçam a alternativa de valorização destes resíduos.

Neste contexto, o presente estudo avaliou as características físicas dos RSS do grupo A e E, após serem submetidos a tratamento por ETD e encontrou alto valor de poder calorífico (5872,50 kcal/kg) e composição gravimétrica composta por 74,4% de materiais de alto poder energético: plástico (30,5%), trapos (18,5%), borracha (13,3%), papel e papelão (12,1%). As sobras representaram 23,2% da composição gravimétrica dos RSS pós-tratamento, porém seu valor calorífico não foi analisado neste estudo.

A caracterização física realizada por meio de análise gravimétrica e de poder calorífico, comprovou a similaridade do RSS pós-tratamento por desativação eletrotérmica com os RSU, reafirmando sua condição de “não rejeito” e confirmou sua viabilidade de utilização em tecnologias de coprocessamento, incineração, plasma, pirólise e gaseificação para serem transformados em energia e/ou calor.

A alternativa de valorização energética para os RSS tratados no ETD apresenta ganhos diretos: a economia de R$ 198.000,00 mês com transporte e disposição final em aterro sanitário e a produção de CDR que poderá ser comercializado para contribuição energética em vários dos processos de valorização estudados. Por outro lado, apresenta ganhos indiretos como: aumento da vida útil dos aterros sanitários, minimização de possíveis impactos ambientais, a não emissão de poluentes e GEE, decorrente do

transporte e fechando o ciclo de vida dos produtos dentro do conceito de economia circular.

O uso do resíduo pós-tratamento por desativação eletrotérmica em sistemas de recuperação de energia e/ou calor, torna estes sistemas mais sustentáveis por meio da incorporação da energia contida nos resíduos ao mesmo tempo em que os desvia dos aterros, não contribuindo para a formação de passivos ambientais.

Considerando que a legislação vigente não permite a valorização de RSS mesmo que tratados, devido à sua origem, a única alternativa possível, na presente data, é a disposição em aterro sanitário. Tal fato confronta com o estabelecimento da hierarquia de resíduos da PNRS e inviabiliza qualquer opção de valorização, na esfera legal. Nesse sentido, recomenda-se revisão da legislação pertinente.

Para o emprego de tais resíduos pós-tratados em sistemas de valorização energética, recomenda-se a realização de Testes de Queima para análise das emissões atmosféricas resultantes em cada processo estudado (coprocessamento, pirólise, plasma, gaseificação e incineração), verificando o grande atendimento às exigências técnico as fixadas pelo órgão ambiental e legislação pertinente.

Durante a análise da composição gravimétrica, o material considerado sobra (não identificado) representou 23,2% da composição do resíduo estudado. Este resultado coloca este material como o 2º material encontrado em maior quantidade. Diante dessa representatividade, recomenda-se a análise do poder gravimétrico deste material.

7. *REFERÊNCIAS*

_____. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária – ANVISA. RDC nº 306, de 07.12.2004. **Dispõe sobre o regulamento Técnico para o Gerenciamento de Resíduos de Serviços de Saúde**.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução n° 358, de 29.04.2005. **Dispõe sobre o tratamento e a disposição final dos resíduos de serviços de saúde e dá outras providências**.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. RDC nº 316, de 29.10.2002. **Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos, inclusive coprocessamento.**

_____. Ministério da Educação. Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES. Portaria Normativa nº 17 de 28 de dezembro de 2009. **Dispõe sobre o mestrado profissional no âmbito da Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior CAPES**. Disponível em:

_____. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente RESOLUÇÃO CONAMA nº 264, de 26 de agosto de 1999. **Dispõe sobre o licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de coprocessamento de resíduos**.

_____. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária – ANVISA. **Manual de gerenciamento de resíduos de serviços de saúde**. Brasília:2006

<http://www.gasification-syngas.org/uploads/downloads/GTC_Waste_to_Energy.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004: Resíduos Sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10007: Amostragem de resíduos: procedimentos.** Rio de Janeiro. 2004.

ABRELPE (Org.). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil.** São Paulo: Abrelpe, 2014

ANDRADE, João Bosco Ladislau de. **Análise do fluxo e das características físicas, químicas e microbiológicas dos resíduos de serviços de saúde: proposta de metodologia para o gerenciamento em unidades hospitalares**. 1997. Tese (doutorado), EESC/USP, São Carlos, SP.

ANDRADE, João Bosco Ladislau de. **Determinação da composição gravimétrica dos resíduos de serviços de saúde de diferentes tipos de estabelecimentos geradores.** Em: Anais do 20° Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e

Ambiental. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental; 1999.

ANDRADE, João Bosco Ladislau de. **Determinação da composição gravimétrica, peso específico e teor de umidade dos resíduos sólidos produzidos na Cidade de Manaus. Manaus**. Secretaria Municipal de Defesa do Meio Ambiente; 1992.

ANUÁRIO ESTATÍSTICO DE ENERGÉTICOS POR MUNICÍPIO NO ESTADO DE SÃO PAULO - ano base 2014. Governo do Estado de São Paulo.

ARENA, Umberto. **Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review.** Waste Management, [s.l.], v. 32, n. 4, p.625-639, abr. 2012. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2011.09.025.

BAIDYA, Rahul; GHOSH, Sadhan Kumar; PARLIKAR, Ulhas V. **Co-processing of Industrial Waste in Cement Kiln – A Robust System for Material and Energy Recovery.** Procedia Environmental Sciences, [s.l.], v. 31, p.309-317, 2016. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.proenv.2016.02.041.

BALAT, Mustafa et al. **Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Part 2: Gasification systems.** Energy Conversion And Management, [s.l.], v. 50, n. 12, p.3158-3168, dez. 2009. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2009.08.013.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES). **Análises das diversas tecnologias de tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão.** Pernanbuco: BNDES, 2014. p. 187.

BARAN, Burhan; MAMIS, Mehmet Salih; ALAGOZ, Baris Baykant. **Utilization of energy from waste potential in Turkey as distributed secondary renewable energy source.** Renewable Energy, [s.l.], v. 90, p.493-500, maio 2016. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.12.070.

BELGIORNO, V.; DE FEO, G.; ROCCA, C. DELLA; NAPOLI, R. M. A. **Energy from gasification of solid wastes**. Waste Management, v. 23, n. 1, p. 1–15, 2003.

BOSMANS L., HELSEN L. **Energy from waste: review of thermochemical Technologies for refuse derived fuel (RDF) treatment.** 30º International Symposium on Energy from Biomass and Waste. Venice, Italy. 2010.

BOSMANS, A. *et al*. **The crucial role of Waste-to-Energy technologies in enhanced landfill mining: a technology review.** Journal Of Cleaner Production, [s.l.], v. 55, p.10-23, set. 2013. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.032

BRASIL. **Lei nº 12.305, 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. Brasília, DF: [s.n], 2010. Disponível em:

http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 13/10/2014.

BREEF. **Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration.** Eropean Commission. Integrated Pollution Prevention and Control. August 2006.

BUJAK, J. **Experimental study of the energy efficiency of an incinerator for medical waste.** Applied Energy, [s.l.], v. 86, n. 11, p.2386-2393, nov. 2009. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.03.016.

CARVALHO, Patrícia Leão de. **Caracterização física dos resíduos sólidos domiciliares do município de Hidrolândia-GO.** Tese (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Departamento de Engenharia, Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2005.

CEMBUREAU. **Sustainable cement production: co-processing of alternative fuels and raw materials in the european cement industry.** 2009.

CEMPRE. Compromisso Empresarial para a Reciclagem. **CEMPRE Informa**. nov./dez., São Paulo, 2004.

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Norma Técnica E15.010. Sistemas de tratamento sem combustão de resíduos de saúde contaminados biologicamente**: Procedimentos. São Paulo, 2011.

CHAERUL, Mochammad; TANAKA, Masaru; SHEKDAR, Ashok V. **A system dynamics approach for hospital waste management.** Waste Management, [s.l.], v. 28, n. 2, p.442-449, jan. 2008. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2007.01.007.ENSINAS, A. V**. Estudo da Geração de Biogás no Aterro Sanitário Delta em Campinas – SP**. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2003.

CHEN, Dezhen *et al*. **Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review. Waste Management**, [s.l.], v. 34, n. 12, p.2466-2486, dez. 2014. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.08.004.

CHENG, Hefa; HU, Yuanan. **Municipal solid waste (MSW) as a renewable source of energy: Current and future practices in China.** Bioresource Technology, [s.l.], v. 101, n.11, p.3816-824, jun.2010. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.040.

CHENG, Y.W. et al. **Medical waste production at hospitals and associated factors. Waste Management**, [s.l.], v. 29, n. 1, p.440-444, jan. 2009. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2008.01.014.

CLIFT, R. DOING, A. FINNVEDEN, G. **The applications of life cycle assessment to integrated solid waste management - Part 1-Methodology.** V 78. P.279-287, jul. 2000. Institution of Chemical Engineers.

COELHO, Thaysi Castro et al. **Alternativa de tratamento de resíduos sólidos e aproveitamento energético através de fornos de queima: uma análise.** Revista de Ciências Ambientais, Canoas, v. 1, n. 7, p.79-89, jul. 2013.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 358, de Abril de 2005. Dispõe sobre o tratamento e a disposição final dos resíduos dos serviços de saúde e dá outras providências.** Brasília, DF.

DIAZ, L.f.; SAVAGE, G.m.; EGGERTH, L.l. **Alternatives for the treatment and disposal of healthcare wastes in developing countries.** Waste Management, [s.l.], v. 25, n. 6, p.626-637, jan. 2005. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2005.01.005

DORN, T.; FLAMME, S.; NELLES, M. **A review of energy recovery from waste in China.** Waste Management & Research, [s.l.], v. 30, n. 4, p.432-441, 1 abr. 2012. SAGE Publications. http://dx.doi.org/10.1177/0734242x11433530.

ELEUTÉRIO, João Pedro Lima; HAMADA, Jorge; PADIM, Antônio Fernando. **Gerenciamento Eficaz no tratamento dos resíduos de serviços de saúde – Estudo de duas tecnologias térmicas.** In: XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção - A integração de cadeias produtivas com a abordagem da manufatura sustentável, 2008, Rio de Janeiro, 2008. p. 1 - 11.

FERREIRA, Adriana Ziemer Garcia. **Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos pelo Processo de Incineração: Análise Técnica e Ambiental.** ConexÃo Academia A Revista Científica Sobre Resíduos Sólidos, v. 4, ano II, p.9-17, jul. 2013.

FINNVEDEN, Göran. **Methodological aspects of life cycle assessment of integrated solid waste management systems.** Resources, Conservation and recycling, Stockholm, Sweden, v. 26, p.173-187, jan. 1999.

Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM). **Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos: guia de orientação para governos municipais de Minas Gerais** / Fundação Estadual do Meio Ambiente. Belo Horizonte: FEAM, 2012. 163p.

GARCIA, Dorival Pinheiro. **Caracterização química, física e térmica de pellets de madeira produzidos no Brasil.** 2010. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

GHASEMI, Maryam Khadem; YUSUFF, Rosnah Mohd. **Advantages and Disadvantages of Healthcare Waste Treatment and Disposal Alternatives: Malaysian Scenario.** Polish Journal Of Environmental Studies, [s.l.], v. 25, n. 1, p.17-25, 2016. HARD Publishing Company. http://dx.doi.org/10.15244/pjoes/59322.

GTC – Gasification Technologies Council. **Gasification the Waste to Energy Solution.** Texas, Estados Unidos, agosto, 2014. Disponível em: <http://www.gasification-yngas.org/uploads/downloads/GTC_Waste_to_Energy. pdf>. Acesso em: 13 novembro 2016

GÜERECA, Leonor Patricia; TORRES, Nathalia; JUÁREZ-LÓPEZ, Claudia Roxana. **The co-processing of municipal waste in a cement kiln in Mexico. A life-cycle assessment approach.** Journal Of Cleaner Production, [s.l.], v. 107, p.741-748, nov. 2015. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.085.

HELSEN, Lieve; BOSMANS Anouk. **Waste-to-Energy through thermochemical processes: matching waste with process.** 1st Int. Symposium on Enhanced Landfill Mining. Houthalen-Helchteren, Belgium. 41p. 2010 .

JACOBI, Pedro Roberto; BESEN, Gina Rizpah. **Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade.** Estudos Avançados, [s.l.], v. 25, n. 71, p.135-158, abr. 2011. Fap/UNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s0103-40142011000100010.

KORZUN, Edwin A.. **Economic Value of Municipal Solid Waste. Journal Of Energy Engineering**, [s.l.], v. 116, n. 1, p.39-39, abr. 1990. American Society of Civil Engineers (ASCE). http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9402(1990)116:1(39).

LAMAS, Wendell de Queiroz; PALAU, Jose Carlos Fortes; CAMARGO, Jose Rubens de. **Waste materials co-processing in cement industry: Ecological efficiency of waste reuse**. Renewable And Sustainable Energy Reviews, [s.l.], v. 19, p.200-207, mar. 2013. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.015.

LIMA, Rafael Guimarães Corrêa; FERREIRA, Osmar Mendes. **Resíduos industriais – Métodos de tratamento e análise de custos.** 2007. 18 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Ambiental, S – Departamento de Engenharia –, Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2007. Disponível em: <file:///E:/USP/RESÍDUOS INDUSTRIAIS - MÉTODOS DE TRATAMENTO E ANÁLISE DE CUSTOS.pdf>. Acesso em: 02 set. 2015.

MARCHEZETTI, A. L. **Avaliação de alternativas tecnológicas para o tratamento de resíduos sólidos domiciliares pela aplicação do método AHP: estudo de caso da região metropolitana de Curitiba.** 2009. 175 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2009.

MAVROPOULOS, Antonis. **Estudo para a Gestão de Resíduos de Serviços de Saúde no Brasil.** São Paulo: Abrelpe, 2010.

MENEZES, Ricardo A. Amaral; GERLACH, José Luiz; MENEZES, Marco Antonio. **ESTÁGIO ATUAL DA INCINERAÇÃO NO BRASIL.** In: VII Seminário Nacional de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública, 2000, Curitiba. Estágio atual da incineração no Brasil. Curitiba: ABLP – Associação Brasileira de Limpeza Pública, 2000.

MORGADO, T. C.; FERREIRA, O. M. **Incineração de resíduos sólidos urbanos, aproveitamento na co-geração de energia: estudo para a região metropolitana de Goiânia.** Departamento de Engenharia, Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2006.

NOVI, Juliana Chiaretti. **Avaliação legal, ambiental e econômico-financeira da implantação de sistema próprio de tratamento de resíduos de serviços de saúde no HC-FMRP-USP para geração de energia.** 2011. 129 f. Tese (Mestrado) – Pós-graduação em Administração de Organizações, Departamento de Administração, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2011.
pdf>. Acesso em: 13 janeiro 2016

PEREIRA, Eliane Alves; SILVA, Karla Alcione da; SOUZA, Harley Anderson de. **Tratamento de Resíduos Sólidos de Serviços de Saúde através de micro-ondas.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 3., 2012, Goiânia: Ibeas – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, 2012. p. 1 - 9.

PMSP – Prefeitura Municipal e São Paulo. **Reelaboração participativa do Plano de Gestão Integrada de resíduos sólidos – PGIRS**. 4ª. Conferência Nacional do Meio Ambiente, 2013. Disponível em: http:// www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/servicos/conferencia_meio_ambiente/arquivos/PGIRS_RSS_e_outros-para-conferencia.pdf. Acessado em 13 out. 2014.

POLI, Dora de Castro Rubio *et al*. **Uma avaliação das metodologias para determinação do poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos.** Revista de Ciências Exatas e Tecnologia, Valinhos, v. 8, n. 8, p.9-31, 2013. Anual.

QUEZADO, Luis Henrique Nunes**. Avaliação de tecnologias para aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos.** 2010. 48 f. TCC (Graduação) - Curso de Curso de Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

RAJASEKHAR, M. *et al.* **Energy Generation from Municipal Solid Waste by Innovative Technologies – Plasma Gasification**. Procedia Materials Science, [s.l.], v. 10, p.513-518, 2015. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.mspro.2015.06.094.

RISSO, Wanda Maria de. **Gerenciamento de resíduos de serviços de saúde - a caracterização como instrumento básico para a abordagem do problema.** 1993. 162 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

ROCHA, Sônia Denise Ferreira; LINS, Vanessa de Freitas Cunha; SANTO, Belinazir Costa do Espírito. **Aspectos do coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer.** Engenharia Sanitaria e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 16, n. 1, p.1-10, mar. 2011.

RUN-DONG, Li *et al*. **Options for Healthcare Waste Management and Treatment in China.** The Chinese Journal Of Process Engineering, China, v. 6, n. 2, p.261-266, abr. 2006.

SÃO PAULO. **Resolução Secretaria do Meio Ambiente nº 079, de 04 de novembro de 2009. Estabelece diretrizes e condições para a operação e o**

licenciamento da atividade de tratamento térmico de resíduos sólidos em Usinas de Recuperação de Energia – Ure. São Paulo, SP. 05 nov. 2009. p. 1-19.

SILVA FILHO, Carlos Roberto Vieira da; SOLER, Fabrício Dorado. **Gestão de Resíduos Sólidos: o que diz a Lei.** 2. ed. São Paulo: Trevisan Editora, 2013. 364 p.

SMA. Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo. **Relatório da missão São Paulo - Baviera sobre Gestão de Resíduos Sólidos no Estado da Baviera**. In: Seminário técnico, 2011, São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, 2011. p. 1 - 46. Disponível em: <http://www.ambiente.sp.gov.br/wp-content/uploads/2011/10/baviera-maio-2011.pdf>. Acesso em: 29 nov. 2016.

SMA. Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo. **RELATÓRIO DA MISSÃO São Paulo - Baviera sobre Gestão de Resíduos Sólidos no Estado da Baviera**. In: SEMINÁRIO TÉCNICO, 2011, São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, 2011. p. 1 - 46. Disponível em: <http://www.ambiente.sp.gov.br/wp-content/uploads/2011/10/baviera-maio-2011.pdf>. Acesso em: 29 nov. 2016.

Solution. Texas, Estados Unidos, agosto, 2014. Disponível em:

STAFFORD, F.n. *et al*. **Advances and Challenges for the Co-processing in Latin American Cement Industry.** Procedia Materials Science, [s.l.], v. 9, p.571-577, 2015. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.mspro.2015.05.032.

TÔRRES-FILHO, Artur *et al*. **Tratamento de Resíduos de Serviços de Saúde pelo processo de pirólise.** Engenharia Sanitaria e Ambiental, [s.l.], v. 19, n. 2, p.187-194, abr. 2014. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522014000200009.

TUDOR, T. L. *et al*. **An overview of arisings and large-scale treatment technologies for healthcare waste in the United Kingdom.** Waste Management & Research, [s.l.], v. 27, n. 4, p.374-383, 26 maio 2009. SAGE Publications. http://dx.doi.org/10.1177/0734242x09336244.

ZHAO, Wei *et al*. **Comparative life cycle assessments of incineration and non-incineration treatments for medical waste.** The International Journal Of Life Cycle Assessment, [s.l.], v. 14, n. 2, p.114-121, 16 dez. 2008. Springer Nature. http://dx.doi.org/10.1007/s11367-008-0049-1

ZUIM, Bruno Brandino. **Reaproveitamento Energético dos refugos industriais do processo de rotomoldagem a partir da gaseificação.** 2013. 140 f. TCC (Graduação) - Curso de Curso de Engenharia Elétrica Com ênfase em Sistemas de Energia e Automação, Escola de Engenharia de São Carlos USP, São Carlos, 2013.

GLOSSÁRIO

Gerenciamento de Resíduos: conjunto de ações fundamentadas em normas e planejamentos (operacional e financeiro) baseados em critérios sanitários, ambientais e econômicos que uma administração desenvolve com a finalidade de coletar, tratar e dispor os RSU de um município (BNDES, 2014).

Zero waste (resíduo zero): Concepção e gestão de produtos e processos de maneira a evitar e eliminar o desperdício, recuperando todos os recursos, ou seja, não há resíduos desnecessários e indesejados de um produto em qualquer fase do seu ciclo de vida (ZAMAN, 2015).

Clínquer: material resultante da calcinação de uma mistura de calcário, argila e de componentes químicos como o silício, o alumínio e o ferro. É a matéria prima básica de diversos tipos de cimento.

http://www.ecivilnet.com/dicionario/o-que-e-clinquer.html

Calcinação: Decomposição de um sólido em um gás mais outro sólido; por exemplo, $CaCO_3$ em $CaO + CO_2$

http://www.ecivilnet.com/dicionario/o-que-e-calcinacao.html

ANEXO A

APÊNDICE A