

TAÍS MIYUKI TSUDA

**UNIDADE DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS: ANÁLISE PRELIMINAR PARA IMPLANTAÇÃO EM PAÍSES
EM DESENVOLVIMENTO**

Monografia apresentada ao PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para conclusão do curso de MBA em Gestão Integrada de Resíduos Sólidos.

São Paulo
2019

TAÍS MIYUKI TSUDA

**UNIDADE DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS: ANÁLISE PRELIMINAR PARA IMPLANTAÇÃO EM PAÍSES
EM DESENVOLVIMENTO**

Monografia apresentada ao PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para a conclusão do curso de MBA em Gestão Integrada de Resíduos Sólidos.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Tereza Carvalho

São Paulo
2019

[verso da folha de rosto]

FICHA CATALOGRÁFICA

[Colocar na versão final do trabalho em capa dura. Verificar como fazer em Diretrizes para Apresentação de Dissertações e Teses. Escola Politécnica da USP]

DEDICATÓRIA

*Dedico esse trabalho a minha família
que sempre incentivou e apoiou as
minhas escolhas para trilhar essa
jornada.*

AGRADECIMENTOS

À Universidade de São Paulo – USP por tornar esse curso possível.

À minha orientadora pela paciência e comprometimento.

A todo o corpo docente do curso por serem sempre solícitos ao compartilhar seus conhecimentos que ajudaram a tornar minha formação de maneira enriquecedora.

À MultiGeo pelo incentivo financeiro e por proporcionar o meu crescimento profissional.

Aos meus pais que mesmo nos momentos mais difíceis estiveram ao meu lado para me dar apoio e carinho.

RESUMO

A preocupação com a gestão adequada dos resíduos sólidos domiciliares é um dos maiores desafios enfrentados pela sociedade moderna, diante das mudanças contínuas de padrões de consumo, crescimento populacional, criação de novos materiais, gerenciamento inadequado e da falta de áreas disponíveis para a disposição final. Todos esses fatores são precursores pela busca de novas alternativas que venham a contribuir para a gestão integrada de resíduos. Neste trabalho serão analisadas as tecnologias de Unidade de Recuperação de Energia (URE), sendo elas Oxidação térmica, Gaseificação, Piólise e Digestão anaerobia, como parte da estratégia da gestão integrada de resíduos sólidos no Brasil, com a utilização de uma matriz de apoio a decisão para um cenário hipotético. Conforme resultado obtido, nenhuma das alternativas seriam consideradas adequadas, por apresentarem ao menos uma necessidade de melhoria ou modificação das condições locais antes de dar prosseguimento às próximas etapas de implantação do projeto. A única tecnologia com perspectiva de desenvolvimento é a digestão anaeróbia, por ter exibido somente parâmetros adequados e de necessidade de melhoria. Entretanto, ainda dependerá da execução de melhorias dos parâmetros relacionados ao nível global da gestão de resíduos, composição dos resíduos, atores envolvidos na operação das instalações, comercialização e/ou disposição final dos resíduos do processo, quadro jurídico e requisitos ambientais para URE, financiamento da gestão de RSU, dependência do mercado estrangeiro, acesso a usuários finais de energia de URE e incentivos para geração de energia de baixo carbono.

Palavras-chave: Resíduos sólidos urbanos; Unidade de Recuperação de Energia; Matriz de tomada de decisão; Países em desenvolvimento.

ABSTRACT

Concern for the proper management of municipal solid waste is one of the biggest challenges faced by modern society, given the continuous changes in consumption patterns, population growth, creation of new materials, inadequate management and the lack of available areas for final disposal. All these factors are precursors to the search for new alternatives that may contribute to integrated waste management. This paper will analyze the Waste to Energy (WtE) technologies, such as Thermal oxidation, Gasification, Pyrolyses and Anaerobic digestion as part of the integrated solid waste management strategy in Brazil, using a multi criteria decision making for a hypothetical scenario. As a result, none of the alternatives would be considered appropriate, as they present at least one improvement or local condition to be modify before proceeding with the next steps of project implementation. The only technology with a deployment perspective is Anaerobic digestion, as it has shown only appropriate parameters and need for improvement. However, it will still depend on making improvements to the parameters related to the level of waste management, waste composition, actors involved in facility operation, marketing and / or final disposal of process waste, legal framework and environmental requirements for WtE, funding for municipal solid waste management, foreign market dependence, access to WtE energy users and incentives for low carbon power generation.

Keywords: Municipal Solid Waste; Waste-to-Energy; Multi criteria decision making; Developing countries.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

	Pág.
Figura 1 - Hierarquização da gestão de resíduos sólidos	22
Figura 2 - Tecnologias de recuperação energética de resíduos.	27
Figura 3 - Cenário mundial de tecnologias de tratamento de RSU.	28
Figura 4 - Diagrama de fluxo do processo de Oxidação térmica.	32
Figura 5 - Incinerador em grelha	32
Figura 6 - Diagrama de fluxo do processo de gaseificação.	35
Figura 7 - Gaseificador.	36
Figura 8 - Diagrama de fluxo do processo de pirólise.	38
Figura 9 - Pirólise	39
Figura 10 - Etapas do processo de digestão anaeróbia.	41
Figura 11 - Digestor anaerobio.	42

LISTA DE QUADROS

	Pág.
Quadro 1 - Comparação dos principais tipos de Oxidação térmica.	29
Quadro 2 - Quadro resumo das características da Oxidação térmica	33
Quadro 3 - Quadro resumo das características da gaseificação	37
Quadro 4 - Quadro resumo das características da pirólise	39
Quadro 5 - Quadro resumo das características da digestão anaerobia	43
Quadro 6 - Comparação entre as tecnologias URE	37
Quadro 7 - Descrição dos parâmetros	40
Quadro 8 - Matriz de tomada de decisão	42
Quadro 9 - Avaliação dos resultados obtidos	48
Quadro 10 - Características do cenário hipotético analisada	50
Quadro 11 - Resultado compilado para o cenário hipotético.	49

LISTA DE TABELAS

	Pág.
Tabela 1 - Estimativa de custo de plantas de URE em países em desenvolvimento	41
Tabela 2 - Poder calorífico do RSU no Brasil.....	43
Tabela 3 - Avaliação das tecnologias para o cenário hipotético	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACL	Ambiente de Contratação Livre
ACR	Ambiente de Contratação Regulada
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
CDR	Combustível Derivado de Resíduos Sólidos
CDRU	Combustível Derivado de Resíduos Sólidos Urbanos
CH ₃ COOH	Ácido Acético/Acetato
CH ₄	Metano
CHP	<i>Combined Heat and Power/Combinação de calor e potência</i>
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
CO _x	Óxidos de carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPA	Controle de Poluição do Ar
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
EUR	Euro
GIZ	<i>Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit</i>
H ₂	Gás Hidrogênio
H ₂ O	Água
HCl	Ácido Clorídrico
kcal/kg	Quilocaloria por quilograma
km	Quilômetros
kW	Quilowatt
MBT	Mechanical Biological Treatment
MJ/kg	Megajoule por quilograma
MW	Megawatts
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
PCI	Poder Calorífico Interno

pH	Potencial Hidrogeniônico
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RSU	Resíduo Sólido Urbano
SMA	Secretaria do Meio Ambiente
SO ₂	Dióxido de Enxofre
SO _x	Óxidos de enxofre
SRF	<i>Solid Recovered Fuel</i>
t	Tonelada
TUST	Tarifa de Utilização de Serviços de Transmissão
TUSD	Tarifa de Utilização de Serviços de Distribuição
URE	Unidade de Recuperação Energética
WtE	<i>Waste-to-Energy</i>

SUMÁRIO

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	15
1.1 Motivações	16
1.2 Objetivos.....	17
1.2.1 Geral.....	17
1.2.2 Específicos	17
1.3 Estrutura do Trabalho.....	17
2. VISÃO GERAL SOBRE O MANEJO DE RESÍDUOS SÓLIDOS.....	19
2.1 Saneamento básico.....	19
2.2 Mudanças climáticas	20
2.3 Gestão de resíduos sólidos	20
2.4 Legislações aplicáveis.....	22
2.5 Comercialização de energia	24
2.6 Considerações finais do capítulo.....	25
3. UNIDADES DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA NO MUNDO	27
3.1 Oxidação térmica.....	29
3.1.1. <i>Etapas do processo</i>	30
3.1.2 <i>Pontos positivos e negativos</i>	33
3.2 Gaseificação.....	34
3.2.1 <i>Etapas do processo</i>	34
<i>Uma representação gráfica de um gaseificador pode ser observada na Figura 7.....</i>	<i>35</i>
3.2.2 <i>Pontos positivos e negativos</i>	36
3.3 Pirólise ou Carbonização.....	37
3.3.1. <i>Etapas do processo</i>	38
3.3.2 <i>Pontos positivos e negativos</i>	39
3.4 Biodigestão Anaeróbia	40
3.4.1 <i>Etapas do processo</i>	40
3.4.2 <i>Pontos positivos e negativos</i>	42
3.4 Análise Comparativa dos Processos.....	43
3.5 Considerações finais do capítulo.....	39
4. DESAFIOS DA IMPLANTAÇÃO DE URE NO BRASIL	40

4.1 Caracterização dos resíduos	40
4.2 Aspectos econômicos.....	41
4.3 Suscetibilidade de corrosão	42
4.4 Baixo poder calorífico dos RSU.....	42
4.5 Emissões atmosféricas e geração de cinzas	44
4.6 Outros desafios	44
4.7 Considerações finais do capítulo.....	45
5. MATRIZ DE TOMADA DE DECISÃO	39
5.1 Método de utilização da matriz de tomada decisão	40
5.2 Aplicação da matriz de tomada de decisão.....	48
5.3 Considerações finais do capítulo.....	52
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
6.1 Contribuições do Trabalho	53
6.2 Trabalhos Futuros	56

1. INTRODUÇÃO

O saneamento básico é um conjunto de atividades, infraestruturas e instalações operacionais que visa assegurar a saúde pública e a proteção ao meio ambiente. “Um dos pilares fundamentais para garantir um ambiente salubre está na limpeza urbana e no manejo de resíduos sólidos, que abrangem a coleta, o transporte, o transbordo, o tratamento e o destino final do resíduo doméstico e originário da varrição e da limpeza de logradouros e vias públicas”, conforme descrito na Lei nº 11.445/2007.

A ausência ou até mesmo a implementação parcial desse elemento chave ao longo do desenvolvimento de uma sociedade pode provocar altos gastos no setor da saúde pública, que poderiam ser evitados.

O manejo dos resíduos sólidos urbanos no Brasil produz um cenário no qual um gerenciamento mais efetivo, novas tecnologias, métodos e capacitação de recursos humanos são considerados urgentes (MARCHI, 2015).

Juntamente com a publicação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), a busca por novas alternativas que viessem auxiliar na solução dos desafios enfrentados na gestão dos resíduos no país aumentou gradativamente.

Uma das tecnologias que passou a ter maior enfoque no Brasil foi a Unidade de Recuperação de Energia (URE), também conhecida como *Waste to Energy* (WtE), e refere-se ao tratamento de resíduos com a possibilidade de recuperação energética, podendo está ser gerada na forma de calor, eletricidade ou combustíveis alternativos. Dentre os tipos de URE serão analisadas nesse estudo a oxidação térmica, a gaseificação, a pirólise e a biodigestão anaerobia.

Para a implantação consolidada de novas tecnologias, como a URE, deve-se analisar as etapas de processo, as aplicações, as vantagens, assim como suas limitações,

proporcionando um conhecimento completo para posterior verificação da possibilidade de implantação dessa tecnologia frente ao cenário atual da gestão de resíduos no país.

O presente estudo visa analisar comparativamente as Unidades de Recuperação Energética (URE) existentes e por meio de matriz de tomada de decisão analisar as tecnologias mais adequadas para o cenário hipotético estabelecido por meio de simulação, considerando as características de um município com nível de gestão de resíduos mediano.

1.1 Motivações

A crescente preocupação com a escassez de recursos naturais, déficit da geração de energia e a contribuição da gestão inadequada de resíduos para a contaminação de solo, águas superficiais e subterrâneas, emissão de gases de efeito estufa, juntamente com a necessidade de atendimento e adequação à PNRS atraiu a atenção de tomadores de decisões para a instalação da tecnologia URE.

Muitos fornecedores dessa tecnologia propõem uma solução frente à gestão debilitada dos resíduos sólidos e à contribuição com o fornecimento de energia para os municípios.

A busca por novas alternativas é muito importante para aprimorar o manejo dos resíduos sólidos. Entretanto, para que seja possível garantir sua instalação atendendo as condicionantes impostas pelo órgão ambiental, a operação segura, a utilização contínua e a manutenção é preciso analisar os tipos de tecnologias disponíveis e mais consolidadas no setor.

Tendo em vista o crescente interesse por essa tecnologia em países em desenvolvimento, esse trabalho tem por objetivo analisar as condições essenciais para optar pela URE como uma alternativa exequível que venha a complementar um sistema de gestão de resíduos sólidos urbanos e realizar uma avaliação prévia de tecnologia URE potencialmente adequada para um cenário hipotético, por meio da utilização da

matriz de apoio à tomada de decisão elaborada pela Agência Alemã de Cooperação Internacional (GIZ - *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit*).

1.2 Objetivos

Nesta seção, serão apresentados o objetivo geral e objetivos específicos deste trabalho.

1.2.1 Geral

O objetivo geral deste trabalho é realizar a análise comparativa das Unidades de Recuperação Energética existentes e por meio de matriz de tomada de decisão avaliar as tecnologias mais adequadas para o cenário hipotético de um município com nível de gestão de resíduos mediano.

1.2.2 Específicos

Para a elaboração do presente trabalho serão seguidos os objetivos específicos listados a seguir:

- Descrever os tipos de Unidades de Recuperação de Energia (URE) existentes no mundo.
- Fazer uma análise comparativa dos processos envolvidos numa URE.
- Especificar os parâmetros usados na matriz de tomada de decisões.
- Aplicar a matriz de tomada de decisões num cenário hipotético.
- Identificar os desafios para a implantação da URE no Brasil.

1.3 Estrutura do Trabalho

O Capítulo 1 INTRODUÇÃO apresenta as motivações, o objetivo, as justificativas e a estrutura do trabalho.

O Capítulo 2 VISÃO GERAL SOBRE O MANEJO DE RESÍDUOS SÓLIDOS apresenta a influência da gestão de resíduos nas mudanças climáticas e no saneamento básico, os tipos de tecnologias de processamento de resíduos com aproveitamento de energia existentes no mundo, as legislações aplicáveis para o setor e os incentivos para a comercialização da energia gerada por meio de biomassa (resíduos sólidos urbanos).

O Capítulo 3 UNIDADES DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA NO MUNDO apresenta uma descrição dos aspectos gerais das tecnologias de Unidade de Recuperação de Energia (URE) no mundo, suas vantagens, desvantagens e uma análise comparativa dos processos.

O Capítulo 4 DESAFIOS DA IMPLANTAÇÃO DE UNIDADES DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA NO BRASIL descreve as principais dificuldades e os obstáculos encontrados que afetariam diretamente a viabilidade de implantação dessas unidades no país.

O Capítulo 5 MATRIZ DE TOMADA DE DECISÃO apresenta os problemas encontrados no país referentes à gestão dos resíduos, à necessidade de busca de novas alternativas para o desenvolvimento do setor o método adotado, bem como a aplicação da matriz de tomada de decisão utilizando-se de um cenário hipotético.

O Capítulo 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS apresenta as contribuições do trabalho e sugestões para trabalhos futuros relacionados ao tema.

REFERÊNCIAS relaciona os trabalhos que deram sustentação técnica ao trabalho.

2. VISÃO GERAL SOBRE O MANEJO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Na seção 2 será abordada a importante influência da gestão dos resíduos sólidos no saneamento básico, nas mudanças climáticas, os diferentes tipos de objetivos durante a evolução dos modelos de gestão de resíduos, as legislações aplicáveis as unidades de recuperação de energia e os incentivos para a comercialização de energia para estas tecnologias.

2.1 Saneamento básico

Os resíduos sólidos urbanos possuem um papel importante na estrutura epidemiológica da sociedade. Em meados do século XIX, com os padrões de vida estabelecidos pela nova ordem social decorrente da revolução industrial, os problemas causados pela ausência de manejo adequado dos resíduos sólidos começaram a se destacar dentro do contexto ambiental (MARSHALL; FARAHBAKHSH, 2013).

Na maioria dos países, essa situação foi se agravando em decorrência do intenso crescimento urbano, associados a criação ou mudança de hábitos, melhoria do nível de vida, desenvolvimento industrial, dentre outros. Tais fatores afetaram diretamente a quantidade e os tipos de resíduos sólidos produzidos que eram dispostos nas ruas dos principais centros urbanos (MARSHALL; FARAHBAKHSH, 2013).

A decomposição dos resíduos sólidos urbanos dá origem a dois subprodutos: gases e chorume. Os gases gerados apresentam odor desagradável característico (gás sulfídrico, metano, dentre outros) e podem ser inflamáveis, implicando em riscos de poluição atmosférica, incêndios e explosões na massa do resíduo, se acondicionados a céu aberto. O chorume, líquido altamente poluente, tem alto potencial de risco de contaminação de recursos hídricos, tanto pelo escoamento por meio da massa de resíduos, quanto pela infiltração no solo, quando depositados em solo exposto e sem qualquer tipo de controle operacional.

Além do potencial de degradação do meio em que foram dispostos, os resíduos sólidos têm grande importância na transmissão de doenças pela ação de vetores (ratos, baratas, moscas e mosquitos), que encontram nestes locais condições adequadas para sua proliferação, podendo abrigar em seu corpo diversas espécies diferentes de agentes causadores de doenças, tais como vírus, bactérias e protozoários. (BROLLO, 2016)

2.2 Mudanças climáticas

Um dos fatores que auxiliaram para as mudanças ocasionadas na gestão de resíduos sólidos foi a influência dessas atividades no aumento da emissão de poluentes atmosféricos.

A gestão considerada tradicional com enfoque na disposição final em aterros sanitários, porém largamente utilizada no Brasil, contribui significativamente no aumento de cerca de 8% a 12% nas emissões de gases de efeito estufa (PLANSAB, 2019).

Conforme Plano de Resíduos Sólidos do Estado de São Paulo, publicado em 2014, os resíduos sólidos urbanos confinados em aterros passam por decomposição descontrolada, além disso, os líquidos e as emissões gasosas gerados podem perdurar pelo período de trinta a cinquenta anos.

O enfoque para a gestão do resíduo *in natura* baseada no fim da cadeia produtiva tem se tornado cada vez mais obsoleta, tanto em aspectos técnicos, quanto econômicos. Como alternativa, a variedade de sistemas de valorização, que reutilizam o resíduo como insumo na fabricação de produtos, tem crescido, dispondo somente o que for considerado rejeito em aterros sanitários (PLANSAB, 2019).

2.3 Gestão de resíduos sólidos

A fim de evitar os impactos ambientais e problemas de saúde pública causados pelos resíduos sólidos urbanos faz-se necessário adotar ações e modelos de gestão alinhados aos programas de gerenciamento dos resíduos.

Segundo PEREIRA e CURI (2012), a evolução dos modelos de gestão de resíduos sólidos nos países desenvolvidos se manifestam com objetivos distintos ao longo do tempo. Posteriormente esses modelos foram expandidos para o restante do mundo, dada a importância de sua adoção para a saúde da sociedade e conservação do meio ambiente.

Por mais que na primeira fase de evolução dos modelos de gestão de resíduos sólidos haja uma preocupação maior a disposição dos resíduos, isso era tratado apenas no final da cadeia produtiva. Foi nesta época que os aterros sanitários e incineradores surgiram em substituição aos lixões a céu aberto.

“Na primeira fase, até o início da década de 70, deu-se prioridade a disposição dos resíduos. Concentrada no final da cadeia produtiva, essa ação não considerava qualquer iniciativa que levasse à redução dos resíduos em outras etapas do processo produtivo. Como consequência houve o crescimento acelerado do volume final de resíduos a serem dispostos, proporcionalmente à expansão da produção e do consumo, bem como a eliminação durante a década dos anos 60 e início da seguinte, na maioria dos países da Europa Ocidental, dos últimos lixões a céu aberto. A maior parte dos resíduos passou a ser encaminhada para aterros sanitários e incineradores.” (PEREIRA; CURI, 2012, p. 10)

No século XX os países membros da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) começaram a dar prioridade ao reaproveitamento de parte dos resíduos, possibilitando a diminuição do consumo de recursos naturais.

“A segunda fase da evolução dos modelos de gestão de resíduos sólidos foi marcada pela publicação de novas prioridades, para a gestão de resíduos, pelos países membros da OCDE, em 1975, dentre elas: a redução da quantidade de resíduos sólidos gerados, reciclagem do material, Oxidação térmica e reaproveitamento da energia resultante, disposição dos resíduos sólidos em aterros sanitários. Nesta fase entende-se, como metas prioritárias na política de gestão de resíduos sólidos, a recuperação e a reciclagem dos materiais. Além disso, foram estabelecidas novas relações entre consumidores finais e produtores, e entre distribuidores e consumidores, para garantir pelo menos o reaproveitamento de parte dos resíduos.” (BROLLO, 2016, p. 45)

“A reciclagem, feita em etapas diferentes do processo produtivo, levou ao crescimento mais lento do consumo de recursos naturais e do volume de

resíduos sólidos a ser disposto, devido ao reaproveitamento de uma parte dos mesmo que, durante a fase anterior, seria destinada aos aterros sanitários e aos incineradores. Entretanto, as vantagens atribuídas ao reaproveitamento dos materiais (menor consumo de energia e redução da quantidade de resíduos sólidos gerados) deveriam ser relativizadas, uma vez que o processo de reciclagem demanda quantidades consideráveis de matéria-prima e energia, além de também produzir resíduos.” (BROLLO, 2016, p. 45)

Na terceira fase da evolução do modelo de gestão de resíduos, os olhares foram voltados para a redução da geração de resíduos durante todo o processo produtivo de um produto, e não mais centralizado apenas na etapa em que é gerado. O maior enfoque está em impedir que os resíduos sejam gerados por meio da prevenção da necessidade de aquisição de novos produtos, aumentando a vida útil de bens de consumo.

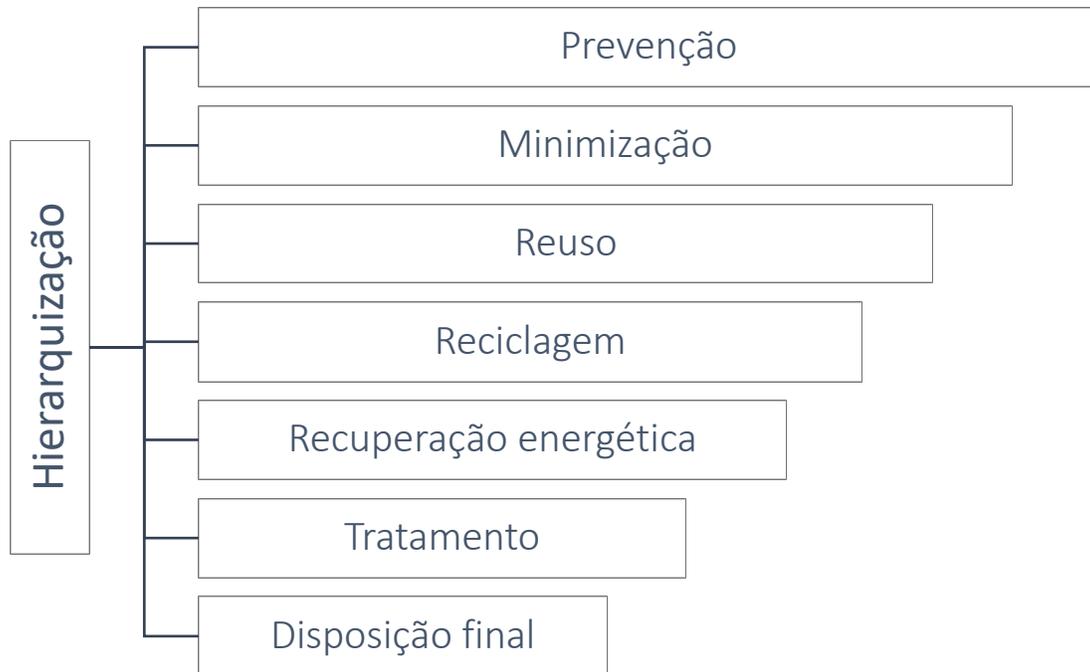
“O final da década de 80, identificada como a terceira fase de evolução, marca o estabelecimento de novas prioridades em relação à gestão de resíduos sólidos, especialmente nos países desenvolvidos. Nesta é dada uma maior atenção à redução do volume de resíduos desde o início do processo produtivo e em todas as etapas da cadeia produtiva. Assim, antes de diminuir a produção de determinados bens, passa a ser prioritário impedir que sejam gerados. Ao invés de buscar a reciclagem propõe-se a sua reutilização. Antes de depositar os produtos em aterros sanitários, deve-se reaproveitar a energia presente nos resíduos, por meio de incineradores, bem como tornar inertes os resíduos antes da disposição final. Outra mudança refere-se às alterações no processo produtivo, tendo em vista o objetivo de utilizar a menor quantidade possível de energia e matérias-primas e de gerar quantidade ainda menores de resíduos.” (BROLLO, 2016, p. 46)

2.4 Legislações aplicáveis

A Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que dispõe sobre os princípios, objetivos, instrumentos e diretrizes relacionados com a gestão integrada e o gerenciamento de resíduos sólidos urbanos.

Essa Política propõe práticas de hábitos de consumo sustentáveis e abrange instrumentos variados para propiciar a reutilização dos resíduos sólidos (reaproveitamento), bem como a destinação ambientalmente adequada dos diversos rejeitos. A Figura 1 apresenta a Hierarquização da Gestão de Resíduos Sólidos proposta pela PNRS.

Figura 1 - Hierarquização da gestão de resíduos sólidos



Fonte: PNRS, 2010.

A Política cria metas importantes para a eliminação dos chamados "lixões", e determina a criação de planos de gestão integrada dos resíduos sólidos.

Publicada antes da PNRS, a Resolução SMA nº 079 foi sancionada em 4 de novembro de 2009, estabelecendo diretrizes e condições para o licenciamento e operação de atividades de tratamento térmico com valorização energética de resíduos sólidos.

O processamento térmico com aproveitamento energético de resíduos é considerado uma alternativa preferível à disposição em aterros sanitários ou formas inadequadas, recorrentemente utilizadas no Brasil.

A Portaria Interministerial nº 274, de 30 de abril de 2019, define conceitos, limites de emissão, operação e sistema de monitoramento contínuo, tornando os resíduos decorrentes da limpeza urbana e domiciliares, passíveis de recuperação energética.

Outros instrumentos legais empregados no licenciamento de processos de recuperação energética de resíduos no estado de São Paulo são:

- **Resolução ANP nº 685/17:** que estabelece a especificação do biometano de aterros sanitários e de ETEs (Estação de Tratamento de Efluentes) comercializado para uso veicular, residencial, industrial e comercial e as regras para o controle de sua qualidade.
- **Resolução SMA nº 38/17:** Estabelece diretrizes e condições para o licenciamento e a operação da atividade de recuperação de energia proveniente do uso de Combustível Derivado de Resíduos Sólidos Urbanos (CDRU) em Fornos de Produção de Clínquer.
- **Resolução CONAMA nº 316/02:** Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos.
- **Resolução SMA nº 79/09:** Estabelece diretrizes e condições para a operação e o licenciamento da atividade de tratamento térmico de resíduos sólidos em Unidades de Recuperação de Energia – URE.
- **Decreto Estadual nº 59.113/13:** Estabelece novos padrões de qualidade do ar para o Estado de São Paulo e estabelece providências correlatas.

O processamento de resíduos com aproveitamento de energia está condicionado à comprovação da viabilidade técnica e ambiental, além da implantação de um acompanhamento periódico das emissões de efluentes atmosféricos gerados por essas unidades.

2.5 Comercialização de energia

Com o intuito de estimular a utilização de fontes renováveis, tais como, energia térmica proveniente de biomassa, solar, energia eólica e biogás, para geração de energia elétrica, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) criou um incentivo que possibilita a sua comercialização isenta de taxas de transmissão (TUST - Tarifa de Utilização de Serviços de Transmissão) e de distribuição (TUSD - Tarifa de Utilização de Serviços de Distribuição).

Para plantas que utilizam mais de 50% de resíduos sólidos urbanos e/ou biogás que geram uma potência correspondente a um valor máximo de 30 MW, são consideradas

totalmente isentas as tarifas citadas anteriormente, assim como as unidades que utilizem lodo de estações de tratamento de esgoto.

Para as tecnologias URE configuram-se dois tipos de atores: o autoprodutor e o produtor independente.

O autoprodutor utiliza energia produzida para atender, parcial ou totalmente, a demanda própria. O excedente pode ser comercializado mediante autorização da ANEEL, na forma do inciso IV do art. 26 da Lei no 9.427, de 26 de dezembro de 1996. Já, no caso do produtor independente, a geração de eletricidade destina-se à finalidade de venda, seja no Ambiente de Contratação Regulada (ACR), seja no Ambiente de Contratação Livre (ACL) (PNUD, 2010).

Ambos os produtores e utilizadores de fonte térmica (exceto nuclear) devem solicitar autorização à ANEEL, para potência gerada superior a 5 MW, ou apenas comunicar à ANEEL, para registro, no caso de uma usina com capacidade reduzida nos termos da Lei no 9074/95 e observado o disposto na Resolução nº 390 de 15 de dezembro de 2009.

2.6 Considerações finais do capítulo

A mudança da visão e dos objetivos no manejo dos resíduos propiciam o melhor aproveitamento da parcela reciclável e compostável dos resíduos sólidos urbanos que contribui com o aprimoramento do saneamento básico local.

A consolidação de novas tecnologias que possam compor o sistema integrado de gestão de resíduos só se torna possível, por meio de um quadro jurídico abrangente e bem estabelecido, que inclua elevados padrões ambientais para emissões atmosféricas, efluentes líquidos, solo, ruídos e requisitos de saúde e segurança, além de eficientes mecanismos de fiscalização.

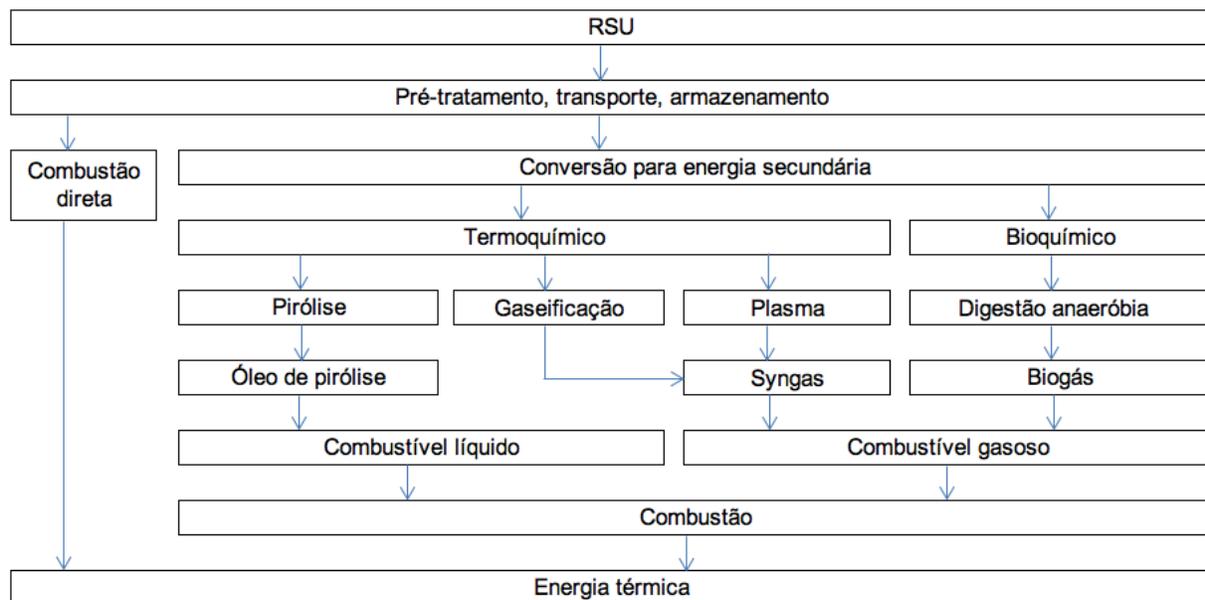
O incentivo à utilização de fontes renováveis para a comercialização de energia é um outro fator para o estabelecimento de tecnologias de tratamento de resíduos com a possibilidade de recuperação de energia ascendentes no mercado.

Na seção 3 serão abordadas as tecnologias URE mais utilizadas no mundo, as etapas de processo, e os pontos positivos e negativos das tecnologias analisadas.

3. UNIDADES DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA NO MUNDO

Entre os diversos métodos de tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) disponíveis atualmente, destacam-se as URE, que permitem a redução de massa e volume, a redução da necessidade de grandes áreas para implantação de uma unidade de tratamento de RSU, a neutralização de substâncias tóxicas, a separação de materiais para reciclagem e a possibilidade de obtenção de energia a partir do resíduo. As tecnologias de recuperação energética disponíveis podem ser observadas no fluxograma da Figura 2 (ARENA, 2012).

Figura 2 - Tecnologias de recuperação energética de resíduos.

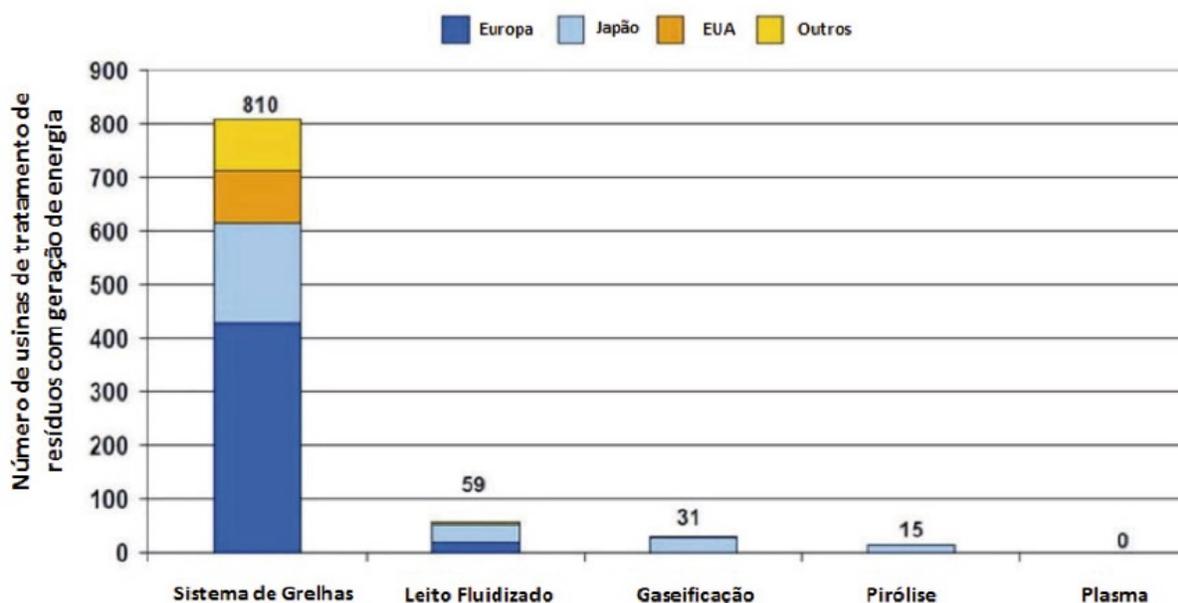


Fonte: BOSMANS ET. AL., 2013 (adaptado)

A biodigestão anaeróbia é uma tecnologia bioquímica de tratamento de resíduos, em que se obtém biogás a partir da digestão anaeróbia da fração orgânica do RSU. O alto volume de matéria orgânica presente no RSU brasileiro, característico de países em desenvolvimento, torna a consideração desta técnica relevante (FEAM, 2012).

Dentre os processos térmicos, nota-se uma maior aplicação de tratamentos por Oxidação térmica (sistema de grelhas e leito fluidizado), gaseificação e pirólise, como pode ser observado no gráfico da Figura 3 (COMITÊ DE VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA, 2012).

Figura 3 - Cenário mundial de tecnologias de tratamento de RSU.



Fonte: COMITÊ DE VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA, 2012.

De forma geral, os tratamentos termoquímicos consistem na queima de resíduos sólidos para a obtenção de energia elétrica ou térmica, diferenciando-se, principalmente, pela operação de equipamentos, quantidade de oxigênio disponível e produto final. E segundo Resolução CONAMA n. 316/2002, define-se como tratamento térmico os processos com temperatura acima de 800°C. Desse modo, processos ocorridos abaixo desta temperatura, como fornos microondas e autoclaves, não se configuram como tratamento térmico, sendo utilizados para desinfecção de resíduos de serviços de saúde, contudo podem ser caracterizados como pré-tratamento de resíduos para processos de tratamento térmico (FEAM, 2012).

Ressalta-se que nesse estudo o aterro sanitário não foi abordado como tecnologia URE, pois foi considerado como uma opção para a disposição final de resíduos, enquanto as demais tecnologias URE são consideradas como alternativas intermediárias de processamento dos resíduos.

A partir dos dados apresentados nesta seção, serão conceituadas nos seguintes itens as tecnologias de Oxidação térmica, Gaseificação, Pirólise e Biodigestão, devido ao seu maior uso no mercado.

3.1 Oxidação térmica

A Oxidação térmica consiste na oxidação do material combustível (carbono, hidrogênio e enxofre) do resíduo na presença de oxigênio em excesso, visando redução de massa e volume (cerca de 70% e 90%, respectivamente), e conversão da energia química em calor e eletricidade (BEYENE; WERKNEH; AMBAYE, 2018).

É o processo mais utilizado devido à sua capacidade de tratar uma grande variedade de resíduos sem a necessidade de tratamento prévio, como a separação e trituração. No entanto, no caso de países em desenvolvimento, cujo resíduo é caracterizado por alta taxa de umidade, apresentando baixo poder calorífico e conseqüentemente obtendo menor eficiência de processo, é possível a utilização de combustíveis auxiliares, assim como a realização de triagem de forma a reduzir a fração de material orgânico que possui alta umidade (BOSMANS et. al., 2013; KUMAR; SAMADDER, 2017).

Existem três principais tipos de incineradores que se diferenciam essencialmente pelo tipo de resíduo tratado, sistema de grelha (RSU), forno rotativo (resíduos perigosos) e leito fluidizado (lodo de esgoto e resíduos com partículas finamente divididas), sendo o de grelha o mais utilizado (BOSMANS et. al., 2013). Uma comparação dos tipos de incineradores citados pode ser vista na Quadro 1.

Quadro 1 - Comparação dos principais tipos de Oxidação térmica.

	Incinerador em grelha	Forno rotativo	Leito fluidizado
Descrição do processo	As grelhas transportam o resíduo através de várias zonas da câmara de combustão.	Câmara cilíndrica situada em rolos que permitem a rotação/ oscilação do forno em torno de seu eixo. O resíduo é conduzido por gravidade.	Câmara de combustão em forma cilíndrica vertical, a secção inferior consiste em um leito de material inerte fluidizado com o ar. O resíduo é continuamente alimentado no leito de fluido de areia.
Aplicação	RSU misto, possíveis adições: resíduos comerciais e industriais não perigosos, lodos, resíduos hospitalares	Resíduos perigosos e hospitalares.	Resíduos finamente divididos (ex.: CDR, lodo de esgoto).
Temperatura do processo	850 – 1.100°C	850 – 1.300°C	<i>Freeboard</i> : 850 – 950°C Leito 650°C (ou maior)
Observações	Mais amplamente utilizado.	<ul style="list-style-type: none"> - Muito robusto, permite a Oxidação térmica de resíduos sólidos, líquidos e gasosos, e lodo. - Para aumentar a destruição de compostos tóxicos, comumente adiciona-se uma câmara de pós-combustão 	3 tipos: <ul style="list-style-type: none"> - Borbulhante: comumente usado para lodo (esgoto e (petro) químico). - Circulante: especialmente apropriado para Oxidação térmica de lodo de esgoto seco com alto poder calorífico. - Rotativo: permite grande variedade de poder calorífico de combustíveis (co-combustão de lodo e resíduos pré-tratados).

Fonte: BOSMANS et. al., 2013.

3.1.1. Etapas do processo

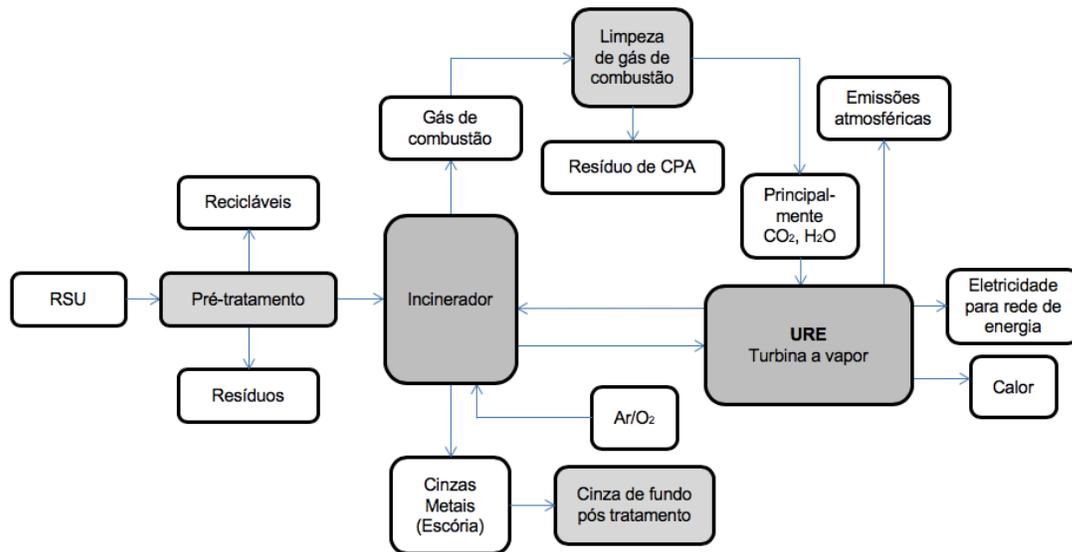
O processo de Oxidação térmica inicia-se com a alimentação do silo da usina com o resíduo em sua forma bruta, seguido da utilização de uma garra mecânica para disposição do material na tremonha de alimentação que se estende por todo o forno, onde é submetido a uma combustão completa com excesso de oxigênio a uma faixa de temperatura variando entre 850°C e 1.200°C. São necessárias altas temperaturas (1.200°C) para que a queima resulte na formação de, principalmente, CO₂ e H₂O, bem

como para eliminação de gases cancerígenos, como dioxinas e furanos (SILVA, 2017; FEAM, 2012). O calor gerado aquece a água presente na caldeira, fazendo com que o vapor passe pelo sistema de turbina e gerador, produzindo energia elétrica (FEAM, 2012).

Após a Oxidação térmica obtém-se como produtos finais gases e sólidos. A parte gasosa deve passar por um sistema de tratamento anteriormente à sua emissão na atmosfera pela chaminé, removendo gases poluentes como SO_x, CO_x, NO_x, hidrocarbonetos poliaromáticos e metais pesados. E a parte sólida é captada e resfriada por sistemas coletores presentes abaixo da grelha, podendo as cinzas serem destinadas para compor agregado em concreto e mistura para pavimentação de asfalto e produtos de concreto, havendo a possibilidade de recuperação de metais ferrosos e não ferrosos (KUMAR; SAMADDER, 2017; FEAM, 20212).

Um diagrama de processo apresentando as etapas da Oxidação térmica por sistema de grelhas pode ser visto na Figura 4.

Figura 4 - Diagrama de fluxo do processo de Oxidação térmica.

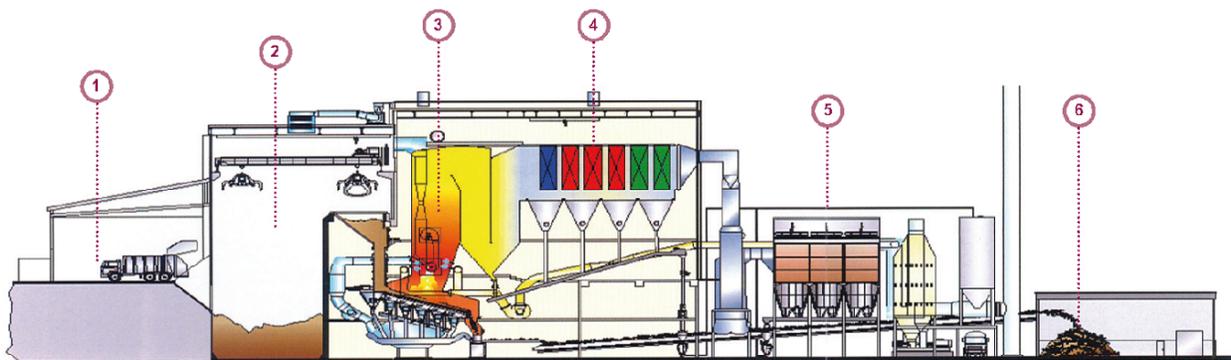


CPA: Controle de poluição de ar

Fonte: BOSMANS et. al., 2013.

A Figura 5 apresenta uma representação gráfica de um incinerador em grelha.

Figura 5 - Incinerador em grelha



1 - Recebimento e Oxidação térmica;
2 - Armazenamento;
3 - Forno em grelha;

4 - Caldeira a vapor;
5 - Limpeza de gases;
6 - Escória;

Fonte: FCC ENVIRONMENT, 2017.

3.1.2 Pontos positivos e negativos

Dentre as características positivas dessa alternativa é possível citar: a grande flexibilidade de recebimento de resíduos diversos, a redução do volume depositado em aterros sanitários, a destruição de contaminantes presentes nos resíduos, a geração de energia elétrica ou térmica, além de não requer uma área muito grande para a sua instalação (BASTOS, 2013).

Em contrapartida, são tecnologias que requerem altos custos de investimento, de operação e de manutenção, são limitadas para o tratamento de resíduos com alto teor de umidade, devem apresentar sistema de monitoramento rigoroso e contínuo dos resíduos, emissões atmosféricas (como CO e NOx) e do processo em si, verificando-se com frequência, também, a qualidade das águas, efluentes líquidos gerados, solo e ar (BASTOS, 2013; FEAM, 2012).

Quadro 2 - Quadro resumo das características da Oxidação térmica

Descrição:	Combustão direta do resíduo com oxigênio em excesso
Resíduos tratados:	RSU misto ou CDR
Redução do volume:	75 – 90%
Subproduto gerado:	Calor
Aplicação:	Geração de eletricidade e vapor/calor
Controle de poluição:	Alto
Extensão de uso:	Amplamente usado na Europa, EUA, Japão, China Aumento de interesse em economias de rápido desenvolvimento
Aplicabilidade em países em desenvolvimento:	RSU geralmente muito úmido para processar sem combustível auxiliar e pré-triagem

	Difícil recuperação dos custos da planta URE em países de baixa/média renda
--	---

3.2 Gaseificação

A gaseificação corresponde à oxidação parcial do resíduo na presença de agente de gaseificação em quantidade inferior à requerida na estequiometria, formando o syngas (composto de CO, CO₂, H₂, H₂O, CH₄, outros hidrocarbonetos, gases inertes e contaminantes), um gás contendo produtos não oxidados totalmente, que possuem alto poder calorífico. Este gás pode ser utilizado como matéria-prima na indústria química ou como combustível para produção de eletricidade e/ou calor (BOSMANS et. al., 2013; ARENA, 2012).

Trata-se de um processo em estudo por ocorrerem reações complexas ainda não determinadas totalmente, no entanto, com áreas de aterro limitadas e alto custo de processos bem difundidos como Oxidação térmica, há um interesse crescente nesta tecnologia, visto que o gás possui maior facilidade de manipulação do que resíduos sólidos (FEAM, 2012; ARENA, 2012).

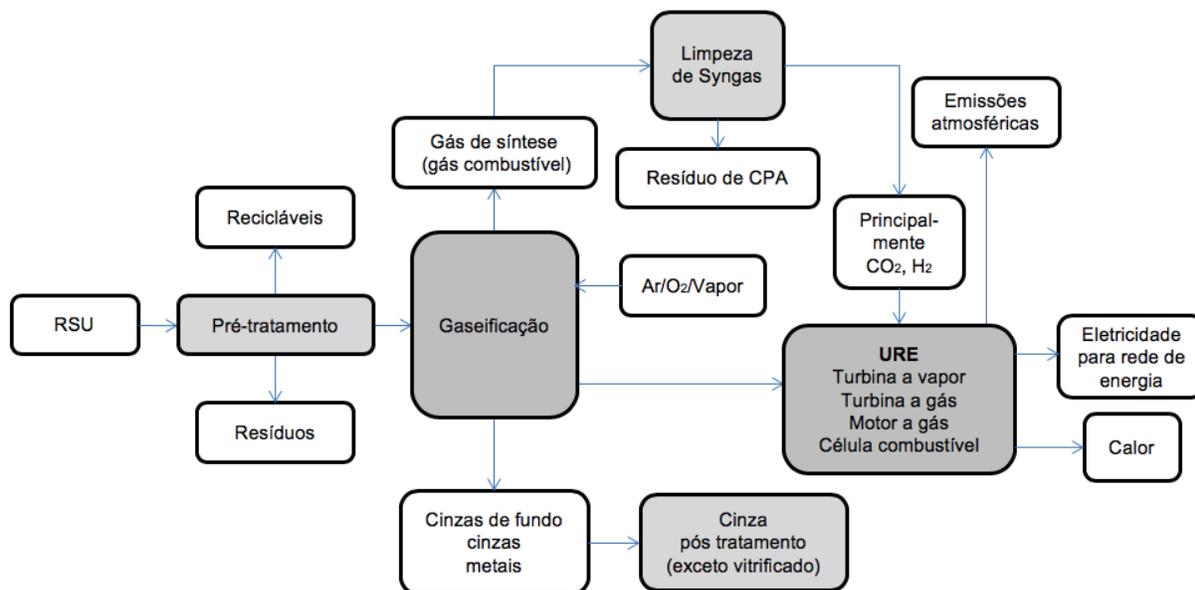
3.2.1 Etapas do processo

O resíduo previamente tratado, conforme parâmetros definidos do processo, é colocado em um gaseificador que são recipientes revestidos com material refratário, onde será aquecido a altas temperaturas (entre 800°C e 1200°C), sem ocorrer a queima direta, para que gaseifique, passando por reações de secagem, decomposição termal, redução e combustão (BASTOS, 2013; BOSMANS et. al., 2013).

Inicialmente ocorre o aquecimento e a secagem a 160°C envolvendo a migração de líquidos e vapor provenientes da massa tratada, seguido da decomposição termal a 700°C, na qual ocorrem reações de quebra e formação de gases, alcatrão e carvão. A

alta quantidade de voláteis gerada pelo RSU proporciona uma atmosfera incinerável de gases combustíveis, além dos gases formados do processo. Por fim, os rejeitos são tratados para então terem sua destinação final (ARENA, 2012). O diagrama de fluxo do processo de gaseificação pode ser visto na Figura 6.

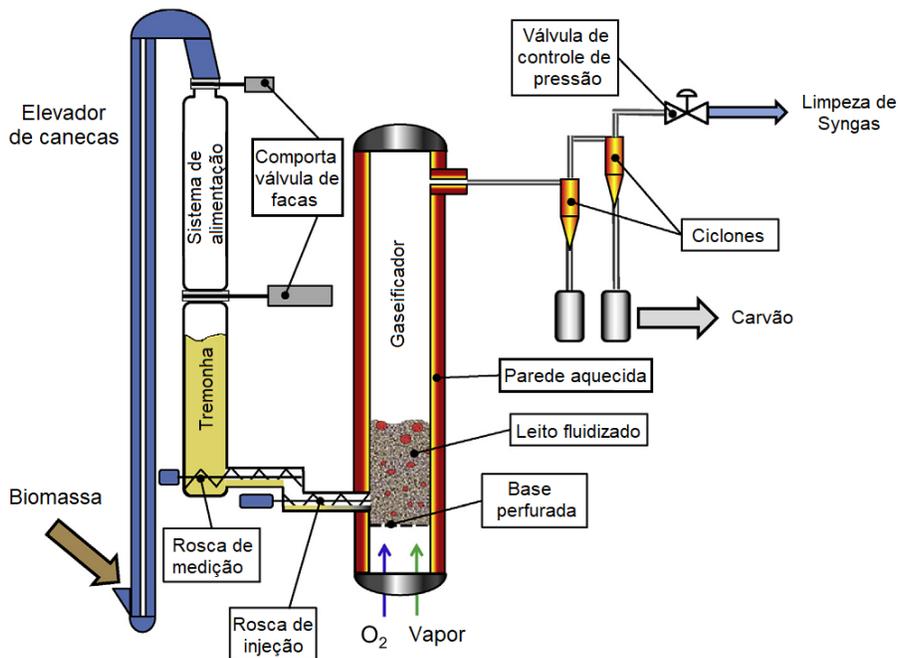
Figura 6 - Diagrama de fluxo do processo de gaseificação.



Fonte: BOSMANS et. al., 2013.

Uma representação gráfica de um gaseificador pode ser observada na Figura 7.

Figura 7 - Gaseificador.



Fonte: IOWA STATE UNIVERSITY, 2014.

3.2.2 Pontos positivos e negativos

Este processo apresenta menor geração de CO₂ do que o processo de Oxidação térmica e redução do volume de resíduo em 95% (KUMAR; SAMADDER, 2017). Devido à ausência de oxigênio, não há a formação de dioxinas (ARENA, 2012).

Para maior recuperação energética, deve-se tratar resíduos lignocelulósicos com baixa umidade (madeira, cascas, palha, dentre outros). Como o RSU brasileiro é caracterizado pela alta quantidade de resíduo orgânico, reduz-se a eficiência energética (FEAM, 2012).

Em teoria, a gaseificação apresenta grandes benefícios devido ao gás de alto poder calorífico produzido, no entanto na prática a obtenção de um gás de qualidade com alto controle de segurança ainda se mostra um desafio. Desse modo, a maioria dos gaseificadores comerciais são os de geração de calor, pois ainda não é possível gerar energia elétrica em escala comercial. A obtenção de gás de qualidade requer a utilização

de oxigênio puro e deve-se ser um gás limpo com baixos teores de alcatrão e pirolenhosos, exigindo etapas especiais de limpeza (FEAM, 2012).

Além disso, requer alto controle de emissões atmosféricas, pois a presença de material particulado, metais alcalinos e o alcatrão podem causar danos ao equipamento por meio da erosão, corrosão e obstrução de filtros (FEAM, 2012).

Quadro 3 - Quadro resumo das características da gaseificação

Descrição:	Oxidação parcial de resíduos com quantidade menor de oxigênio
Resíduos tratados:	CDR, também aplicável para outros resíduos orgânicos relativamente homogêneos (resíduos de madeira, da agricultura, esgoto e lodo)
Redução do volume:	90%
Subproduto gerado:	Gás de síntese (syngas)
Aplicação:	Pode ser utilizado como matéria-prima na indústria química ou como combustível para produção de eletricidade e/ou calor
Controle de poluição:	Médio
Extensão de uso:	Japão e Coréia do Sul possuem instalações de gaseificação de RSU com 20 anos Interesse da Europa por plantas de pequena/média escala
Aplicabilidade em países em desenvolvimento:	Potencial para aplicação em gaseificação de madeira Índia tem um dos maiores programas para pequenos gaseificadores

3.3 Pirólise ou Carbonização

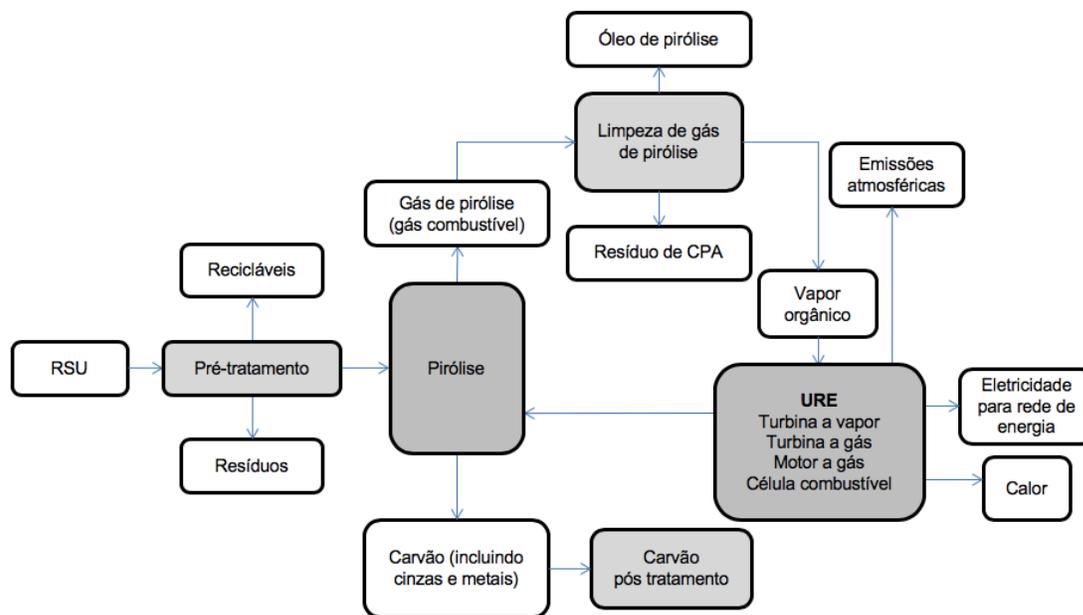
O processo de Pirólise é a degradação térmica dos resíduos com ausência total de oxigênio, permitindo a obtenção de produtos recicláveis como carvão, óleo e gases

combustíveis. É um processo flexível, capaz de tratar diferentes quantidades de resíduo (CHEN et. al., 2014).

3.3.1. Etapas do processo

Inicialmente, realiza-se a preparação e a moagem do resíduo, padronizando-o para o processo, seguido da secagem, que aumenta o poder calorífico dos gases e a eficiência das reações gás-sólido. Após a preparação do resíduo, este é submetido à pirólise, a qual ocorre a decomposição térmica das moléculas orgânicas dos resíduos, aquecendo o material em diferentes zonas de calor, composta por volatilização, oxidação e fusão (variando entre 400 e 900°C). Esse processo leva à formação de gases e fração sólida (coque), que serão tratados por meio da condensação, extraíndo óleos, ou por meio da Oxidação térmica dos mesmos para eliminar componentes orgânicos (BOSMANS et. al., 2013). O diagrama de fluxo do processo de pirólise é mostrado na Figura 8.

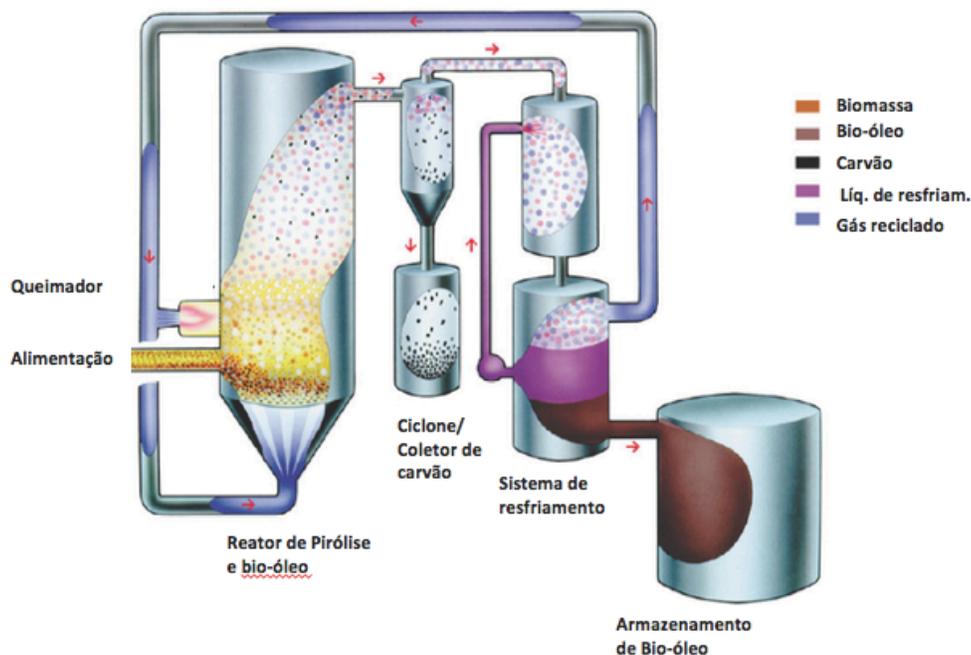
Figura 8 - Diagrama de fluxo do processo de pirólise.



Fonte: BOSMANS et. al., 2013.

A representação gráfica de um equipamento de pirólise é apresentada na Figura 9.

Figura 9 - Pirólise



Fonte: GGE, 2019.

3.3.2 Pontos positivos e negativos

Requer controle de sistema de tratamento de emissões atmosféricas do processo de pirólise e a queima do combustível, devendo atender aos padrões de emissões (FEAM, 2012).

As condições deste processo causam diversos fenômenos termoquímicos em um resíduo variado, resultando na formação de diversos componentes ainda não determinados em sua totalidade (BOSMANS et. al., 2013).

Quadro 4 - Quadro resumo das características da pirólise

Descrição:	Degradação térmica com ausência de oxigênio
Resíduos tratados:	CDR, também aplicável para outros resíduos orgânicos relativamente homogêneos (resíduos de madeira, da agricultura, esgoto e lodo)

Redução do volume:	50 – 90%
Subproduto gerado:	Carvão, bio-óleo e Syngas
Aplicação:	Eletricidade e calor
Controle de poluição:	Médio
Extensão de uso:	Não usual para tratamento de RSU
Aplicabilidade em países em desenvolvimento:	Baixa - ainda não utilizado, mesmo em países desenvolvidos

3.4 Biodigestão Anaeróbia

A biodigestão é um processo bioquímico de digestão anaeróbia da parte orgânica dos RSU, em que microrganismos irão degradar, em quatro etapas, o resíduo em ambiente com ausência de oxigênio, obtendo-se o biogás (KUMAR; SAMADDER, 2017).

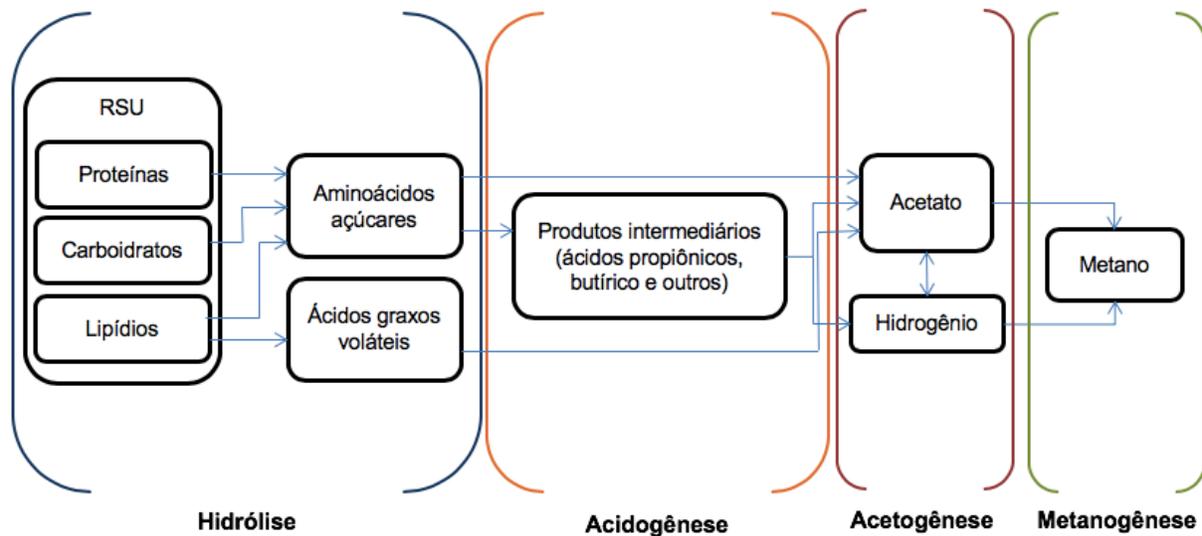
3.4.1 Etapas do processo

O resíduo a ser tratado deve passar por pré-tratamento, onde será submetido a triagem, trituração e preparação do material, que será levado ao reator onde ocorre a digestão anaeróbia (FEAM, 2012).

A Digestão anaeróbia acontece em quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Na hidrólise, as macromoléculas complexas que compõem o resíduo são digeridas por enzimas, formando compostos simples que permitem sua passagem pelas paredes de bactérias fermentativas que realizam a segunda etapa, a acidogênese. Na acidogênese, ocorre a metabolização das substâncias pelas bactérias fermentativas resultando em compostos mais simples. O produto gerado pela etapa anterior é oxidado, produzindo H_2 , CO_2 e CH_3COOH , na acetogênese, fase em que ocorre aumento de pH, sendo necessária a correção de pH para que elementos como amônia e gás sulfídrico

não interrompam a metanogênese. Nessa última etapa, ocorre o consumo do acetato e hidrogênio resultando na produção de metano (biogás) (SILVA, 2017; REIS, 2012). O diagrama de fluxo do processo de pirólise é apresentado na Figura 10.

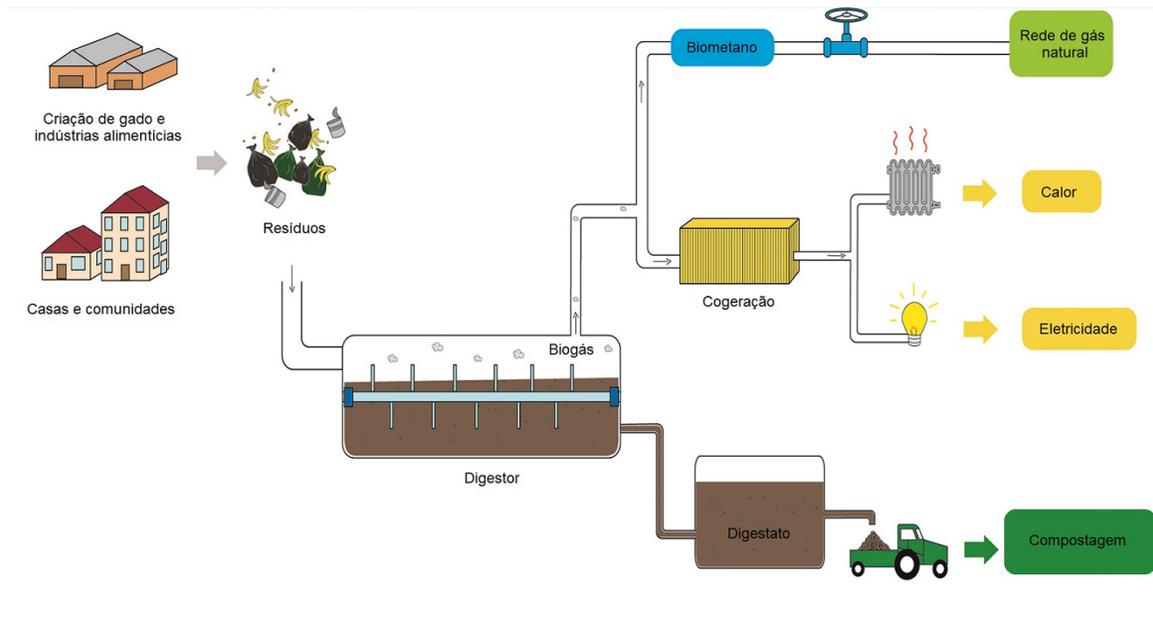
Figura 10 - Etapas do processo de digestão anaeróbia.



Fonte: REIS, 2012.

Na Figura 11 pode ser observado uma representação gráfica para um digestor anaeróbio.

Figura 11 - Digestor anaeróbio.



Fonte: VINCI ENVIRONMENT, 2019.

Após a digestão forma-se o biogás e lodo biológico, sendo necessário realizar o tratamento de ar ambiente, efluentes atmosféricos, efluentes líquidos e resíduos sólidos. Com relação ao lodo biológico, este pode ser utilizado como condicionador de solo e/ou na correção de campos de agricultura. (FEAM, 2012; KUMAR; SAMADDER, 2017)

3.4.2 Pontos positivos e negativos

Uma das principais vantagens do processo de digestão anaeróbia é o tratamento da fração do resíduo com alto teor de umidade, além de ser uma tecnologia que permite a sua construção em diferentes escalas, desde grandes unidades que tratam lodo ou resíduos urbanos, até unidades menores que tratam materiais de fazendas ou de pequenas comunidades (BASTOS, 2013).

A biodigestão é um processo que necessita de maior duração do que as tecnologias termoquímicas, podendo durar cerca de 20 a 40 dias. Faz-se necessária a remoção da fração inerte para um bom desempenho de processo (BASTOS, 2013; KUMAR; SAMADDER, 2017).

Esse processo produz rejeitos, efluentes atmosféricos e líquidos que devem passar por tratamento e disposição final adequada (FEAM, 2012).

Quadro 5 - Quadro resumo das características da digestão anaerobia

Descrição:	Biodegradação de resíduos orgânicos com ausência de oxigênio e atuação de microrganismos anaerobios.
Resíduos tratados:	Fração orgânica do RSU separada ou resíduo alimentício, dejetos de animais ou lodo de ETE
Redução do volume:	45 – 50%
Subproduto gerado:	Biogás e composto biodegradado
Aplicação:	Eletricidade, fertilizante rico em nitrogênio
Controle de poluição:	Baixo – Médio
Extensão de uso:	Não difundido para RSU. Crescente interesse em países de alta renda. Para países de baixa renda, há o interesse em tecnologias de pequena escala.
Aplicabilidade em países em desenvolvimento:	Digestores anaeróbios de pequena escala são usados para atender às necessidades de comunidades rurais.

3.4 Análise Comparativa dos Processos

O Quadro 6 apresenta uma análise comparativa das alternativas URE mais utilizadas mundialmente, trazendo informações operacionais, as vantagens, os tipos de resíduos tratados, principais produtos gerados, taxa de redução de volume do resíduo tratado, extensão de uso e aplicabilidade em países em desenvolvimento.

Quadro 6 - Comparação entre as tecnologias URE

Tecnologias	Benefícios	Limitações	Produto primário	Aplicação	Controle de poluição requerido	Extensão de uso	Aplicabilidade em países em desenvolvimento
Oxidação térmica	Apropriada para alto valor calorífico	Alto custo de capital, manutenção e operação.	Calor	Geração de eletricidade e vapor/calor	Alto	Largamente usado, com um histórico consolidado na Europa, Japão, China e EUA.	RSU frequentemente úmidos demais para queimar sem combustível auxiliar.
	Reduz volume e massa em até 80% e 70%, respectivamente	Produz poluentes perigosos de resíduos sólidos				Aumento de interesse em economias de rápido desenvolvimento.	Recuperar os custos de uma planta URE de RSU em países de renda baixa/média é difícil.
Pirólise	Produz combustível de alta qualidade	Alta viscosidade de pirólise	Carvão, bio-óleo e syngas	Eletricidade, produção de produtos químicos e solventes	Médio	Não amplamente utilizado para RSU.	Baixa - ainda não utilizado, mesmo em países desenvolvidos.
	Reduz tratamento de gás de combustão apropriado para resíduos com alto teor de carbono	Alto custo de operação, manutenção e capital					
	Reduz volume de RSU em até 50-90%						

Gaseificação	Produção de gás/óleo combustível que pode ser utilizado para diversos propósitos	Tecnologias imaturas, inflexíveis, menos competitiva	Gás produtor de syngas	Geração de eletricidade e produtos químicos	Médio	Japão e a Coréia do Sul tem mantido instalações de gaseificação de RSU por 20 anos.	Potencial para tecnologia de gaseificação de madeira.
		Alto risco de falha				Interesse na Europa em pequena/média escala.	Índia tem um dos maiores programas para pequenos gaseificadores.
Digestão Anaeróbia	Preferível para biomassa com alta composição de água	Não apropriado para resíduos contendo pouca matéria orgânica	Biogás e composto biodegradado	Eletricidade, fertilizante rico em nitrogênio e biorrefinaria de alimentos	Baixo - Média	Difundido principalmente para não RSU.	Digestores anaeróbios de pequena escala são usados para atender às necessidades de comunidades rurais.
	Alta composição de metano (CH ₄) e baixa composição de dióxido de carbono (CO ₂) do que aterro					Crescente interesse em países de alta renda. Para países de baixa renda, há o interesse em tecnologias de pequena escala.	

Fonte: BEYENE; WERKNEH; AMBAYE, 2018; UNEP, 2015.

3.5 Considerações finais do capítulo

O setor de URE possui tipos de tecnologias diferentes com um propósito em comum de proporcionar boas condições de saneamento básico à população com o tratamento dos resíduos sólidos.

Os diversos tipos de tecnologias construídos para atender a demanda da gestão de resíduos sólidos em países desenvolvidos, quando trazidos para países em desenvolvimento, podem enfrentar desafios na sua implantação. Os principais desafios envolvidos serão discorridos na seção 4.

4. DESAFIOS DA IMPLANTAÇÃO DE URE NO BRASIL

O Brasil, por ser um país com dimensões continentais, possui discrepâncias socioeconômicas, culturais, tecnológicas, que resultam em maneiras muito diferentes de compreender e encarar a problemática ambiental, de região para região, inclusive entre municípios (MORAES, 2016).

A falta de gerenciamento, tratamento e disposição final dos resíduos sólidos é outro fator que dificulta a viabilidade da implantação de novas tecnologias de tratamento no Brasil. Informações publicadas pela Abrelpe em seu último Panorama (2016) registraram o total de 3.331 municípios brasileiros que enviaram mais de 29,7 milhões de toneladas de resíduos, correspondentes a 41,5% do coletado em 2016, para lixões ou aterros controlados.

Além de sua dimensão territorial e composição diversificada dos resíduos gerados, a implantação dessas unidades no Brasil também estão sujeitas aos fatores que serão explanados a seguir.

4.1 Caracterização dos resíduos

Muitos municípios brasileiros ainda carecem da execução de Planos de Gestão de resíduos sólidos, gerando incertezas quanto aos tipos e quantidades da fração de resíduo disponível para plantas URE. Tais fatores podem inviabilizar a implantação de alternativas tecnológicas.

A sazonalidade é outro aspecto que deve ser previsto em um projeto de URE, assim como o comércio possui um comportamento de consumo variável durante o ano, o mesmo ocorre com os resíduos gerados.

Superestimar o volume que será recebido pela unidade pode causar impactos na eficiência do tratamento e geração de energia, bem como impactos financeiros para a

continuidade do funcionamento da unidade. As alternativas termoquímicas são projetadas para o recebimento de resíduos com características previamente estabelecidas, o não atendimento destes requisitos podem levar a manutenções constantes, que por consequência necessitariam parar as operações, gerando custos adicionais.

Portanto, a caracterização físico-química e a composição gravimétrica individual para cada município são de suma importância quando da escolha de alternativas de tratamento de resíduos, principalmente quando se trata de países que possuem dimensões continentais como o Brasil.

4.2 Aspectos econômicos

A implantação de UREs envolvem alto capital de investimento (Tabela 1), altos custos de operação e a necessidade de mão de obra especializada, o que pode acabar inviabilizando o projeto. Além disso, o projeto deve contar com um planejamento financeiro de longo prazo e recursos para operação e manutenção contínua da planta.

Tabela 1 - Estimativa de custo de plantas de URE em países em desenvolvimento

	Investimento inicial	Custos de capital anual por tonelada de resíduos	Custos de O&M por tonelada	Custo total por tonelada	Receitas com venda de energia por tonelada *	Custo a ser coberto por tonelada de resíduos **
Oxidação térmica Capacidade: 150.000 t/ano	30 - 75 milhões de EUR	22 - 55 EUR/t	20 - 35 EUR/t	42 - 90 EUR/t	2 - 10 EUR/t (energia elétrica)	40 - 80 EUR/t
Digestão anaeróbia Capacidade: 150.000 t/ano	12 - 20 milhões de EUR	12 - 19 EUR/t	10 - 15 EUR/t	22 - 34 EUR/t	8 - 16 EUR/t	14 - 18 EUR/t

Pirólise/ Gaseificação Capacidade: 150.000 t/ano	48 - 72 milhões de EUR	21 - 27 EUR/t	18 - 24 EUR/t	39 - 51 EUR/t	1,2 - 3 EUR/t	37,8 - 48 EUR/t
--	------------------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	--------------------

Legenda: (*) Receitas na forma de substituição de combustíveis fósseis. Sem subsídios.

(**) Custos a serem cobertos por taxas adicionais, subsídios, dentre outros.

Fonte: GIZ, 2017.

Observa-se que para todas as alternativas a receita gerada com a venda de energia por tonelada de resíduo é inferior aos custos anuais da planta. Assim, o custo líquido a ser coberto (última coluna) deverá ocorrer por meio de outras formas de financiamento.

Detecta-se que em países em desenvolvimento, há a disponibilidade de recursos para investimento inicial, enquanto recursos financeiros para a fase operacional não costumam ser considerados de forma adequada.

4.3 Suscetibilidade de corrosão

Problemas de corrosão também são frequentemente associados às UREs. Os gases provenientes da combustão dos resíduos sólidos contêm impurezas que propiciam a corrosão das tubulações dos fornos. O cloreto e o enxofre têm sido considerados os principais elementos que causam esta corrosão. Devido as características dos resíduos gerados no Brasil, que possuem altas taxas de umidade e a tendência em gerar HCl, SO₂ e outros gases ácidos, a probabilidade de ocorrência de corrosão nas plantas de URE são altas, resultando em altos custos em manutenção e na parada das operações da unidade.

4.4 Baixo poder calorífico dos RSU

Enquanto a reciclagem já está bem difundida em países desenvolvidos da Europa e no Japão, o Brasil ainda continua “preso” no estágio de separação dos resíduos, que ainda

hoje é executado sem muito planejamento, em comparação com países desenvolvidos que possuem sistemas sofisticados de classificação de resíduos.

O RSU gerado no Brasil possui grande quantidade de matéria orgânica e alta taxa de umidade, por isso acabam atingindo uma baixa eficiência energética quando incinerados. A segregação na fonte é um requisito importante para que resíduos volumosos e perigosos sejam tratados separadamente.

O poder calorífico médio do RSU produzido na cidade de São Paulo é de 11,82 MJ/kg (2824,38 kcal/kg), valor equiparado quando comparado ao poder calorífico dos resíduos sólidos em países desenvolvidos, 8,4 a 17 MJ/kg (2.006,30-4.060,38 kcal/kg). Este valor tem a tendência de reduzir à medida que se seleciona apenas a parcela de resíduos disponíveis para a tecnologia URE. A fração disponível refere-se aos resíduos fornecidos para a planta a um custo acessível e que não possam ser reciclados (GIZ, 2019).

A Tabela 2 apresenta a composição do RSU de São Paulo. Como este resíduo contém muita substância orgânica e nutrientes, os recursos renováveis nele contido são destruídos no processo de Oxidação térmica.

Aproximadamente 30% do calor produzido será perdido como fumaça, que também necessita passar por sistema de tratamento.

Tabela 2 - Poder calorífico do RSU no Brasil

Parâmetro	Material orgânico	Plástico	Papel/Papelão	Metais	Outros
Composição RSU (%)	57,80	16,77	11,08	2,18	12,43
Fração RSU sem metal	0,5893	0,1710	0,1130	-	0,1267
PCI (Kcal/kg)	1310,00	6300,00	4030,00	-	4102,50
Energia RSU (Kcal/kg)	772,00	1077,20	455,26	-	519,92
RSU não metálico (%)	98,08	PCI total (kcal/kg RSU)			2824,38

Fonte: ENEGEP, 2017.

O PCI (Poder Calorífico Interno) está intimamente relacionado à quantidade de resíduo disponível, ao comportamento de consumo local, às alterações sazonais na composição dos resíduos, dentre outras características, que o torna específico para cada município.

4.5 Emissões atmosféricas e geração de cinzas

A emissão de dioxinas é um dos motivos para a oposição pública da implantação de Unidade de Recuperação Energética (URE) em centros urbanos domiciliares. A falta de monitoramento e a deficiência na fiscalização contribuem para a ausência de segurança operacional da planta e possível alteração da qualidade do meio ambiente.

Por mais que o volume dos resíduos diminuam rapidamente durante a combustão, alguns rejeitos permanecem, como as cinzas de fundo e cinzas da caldeira. Tanto as cinzas de fundo, quanto outros materiais inertes (não combustíveis) são oriundos do processo de combustão. Esses subprodutos devem ser retirados por um sistema de extração de cinzas e para que seja realizada a separação dos metais por equipamentos adequados.

Além dos metais ferrosos e não ferrosos, pode ser encontrado em sua composição materiais inertes como vidros, pedras, cinzas de Oxidação térmica, entre outros, bem como podem ainda apresentar até 3% de material orgânico não incinerado que deve retornar para o fosso após separação (Comitê de Valorização Energética, 2012).

Em alguns países, principalmente países europeus e asiáticos, detentores de tecnologia, as cinzas podem ser utilizadas para compor agregado em concreto e mistura para pavimentação de asfalto e produtos de concreto, após passarem por tratamento de estabilização (TASNEEM, 2014).

4.6 Outros desafios

Além dos desafios explanados anteriormente outros fatores importantes também devem ser aprimorados para que as tecnologias URE possam fazer parte de um sistema

integrado de gestão de resíduos sólidos, tais como: a consolidação de incentivos para energia de baixo carbono, a negligência de questões de subsistência de trabalhadores informais, a regulamentação juridicamente vinculativa, dentre outros.

4.7 Considerações finais do capítulo

Juntamente com a implantação de novas alternativas em países em desenvolvimento diversos desafios surgem em decorrência do nível de desenvolvimento no setor de gestão de resíduos, da ausência de planejamento dos recursos financeiros a longo prazo, da falta de preparo de tomadores de decisão, da dificuldade em adaptar a tecnologia para o tipo de resíduo gerado no país, dentre outros.

Estes fatores quando não bem provisionados e gerenciados podem facilmente inviabilizar alternativas de tratamento de resíduos que poderiam auxiliar na gestão integrada de resíduos sólidos, garantindo níveis mínimos de saneamento básico para a população.

Na seção 5 será apresentada o método de utilização e aplicação da matriz de tomada de decisão contendo parâmetros considerados importantes quando da avaliação de implantação de URE.

5. MATRIZ DE TOMADA DE DECISÃO

O país já sofre pela ausência da universalização do saneamento básico tanto em cidades mais desenvolvidas, quanto em cidades que carecem desta assistência, diferenciando apenas em seu grau de implementação.

Atualmente, a gestão urbana busca atingir um desenvolvimento que consiga conciliar o crescimento econômico à preservação e manutenção dos recursos naturais disponíveis, juntamente à equidade social.

Ausência de manejo de resíduos adequado e a disposição inadequada de resíduos no solo, com a conseqüente contaminação das águas superficiais, são considerados graves problemas enfrentados na atualidade. Os efeitos do lançamento de rejeitos na natureza são considerados incalculáveis e contribuem, principalmente, com a escassez de recursos naturais, a contaminação da água e o crescimento de doenças associadas à poluição ambiental (MARCHI, 2015).

Dentre os diversos métodos de tratamento de resíduos, a URE tem sido amplamente discutida. Em locais como Europa, América do Norte, Japão e China, muitas plantas URE obtiveram êxito em sua aplicação e alcançaram escala industrial (GIZ, 2017).

Entretanto, a simples transferência de tecnologia para utilização em países em desenvolvimento pode ter resultados de desempenho negativo, devido ao não atendimento de requisitos financeiros, composição da matéria-prima e das capacidades locais que as tornem viáveis (GIZ, 2017).

Neste contexto, uma avaliação dos requisitos básicos necessários de implantação é importante para auxiliar na tomada de decisão ao considerar uma planta de URE como alternativa para complementar um sistema de gestão de resíduos sólidos existente no município.

5.1 Método de utilização da matriz de tomada decisão

A matriz desenvolvida pela Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ) em cooperação com a Universidade de Ciências Aplicadas do Noroeste da Suíça é usada para efetuar uma avaliação inicial da aplicabilidade de cinco tecnologias URE diferentes por meio da consideração de 12 aspectos essenciais (Quadro 7) que irão configurar contextos locais com características diferentes.

Quadro 7 - Descrição dos parâmetros

Parâmetros		Descrição
1	Nível global de gestão de resíduos	Neste parâmetro deve-se analisar o tipo de sistema de gestão de resíduos adotado no município, considerando a presença ou não de coleta seletiva e os tipos de destinações dados a algumas frações de resíduos.
2	Composição dos resíduos	Considera-se quais os métodos utilizados de coleta para cada fração do RSU gerado e se existe ou não mistura destas.
3	Poder calorífico dos RSU para processos térmicos, teor orgânico	É um importante indicador da adequação do RSU para os processos estudados. Além disso, deve-se considerar o teor orgânico presente no resíduo que será tratado.
4	Quantidade de resíduos adequada para URE	Uma operação economicamente viável depende diretamente da quantidade de resíduos disponíveis. Estes referem-se às frações adequadas de resíduos que podem ser fornecidas para a planta a um custo acessível e que não possam ser reciclados.
5	Operação eficiente das instalações de gestão de resíduos	Esta operação pode ser realizada tanto pelo setor público, quanto privado, ou em cooperação. Quando se trata de tecnologias estrangeiras, gestores experientes e equipe técnica bem treinada são essenciais para uma operação eficiente.

6	Tempo de transporte dos RSU e distância adicional até a planta URE	A possível distância adicional do transporte de resíduos pode implicar no aumento do custo da coleta, congestionamentos e emissões de poluentes atmosféricos.
7	Comercialização e/ou disposição final dos resíduos do processo	Existência de mercado para os subprodutos gerados no processo e destinação segura dos resíduos perigosos em aterro sanitário próximo a planta.
8	Quadro jurídico e requisitos ambientais para URE	Considera a importância de haver legislações aplicáveis às condições nacionais, quanto aos padrões definidos para emissões atmosféricas, líquidas e para o solo, bem como odores, ruídos, saúde e segurança.
9	Financiamento da gestão de RSU	Capacidade dos municípios de subsidiar a coleta e a disposição final de RSU em aterro sanitário e a facilidade de obtenção de recursos adicionais para cobrir os custos adicionais.
10	Dependência do mercado estrangeiro	Disponibilidade e acesso a peças de reposição no mercado nacional ou presença de escritórios de vendas e importação de peças.
11	Acesso a usuários finais de energia de URE	Proximidade da planta a áreas industriais com demanda de energia, calor ou gás, e a existência de infraestrutura disponível de transportes e energia.
12	Incentivos para geração de energia de baixo carbono	Presença de incentivos regulatórios para geração de energia de baixo carbono.

Fonte: GIZ, 2017 (adaptado)

Cada parâmetro contém uma matriz comparativa composta por quatro condições dispostas horizontalmente da esquerda (muito desenvolvida) para a direita (menos desenvolvida). A aplicabilidade de cada tipo de tecnologia URE é representada por uma cor diferente, conforme observado na figura 12.

Figura 12 – Potencial de cada tecnologia URE



VERDE	AMARELO	VERMELHO
Provavelmente a tecnologia URE é adequada.	Mais informações e/ou melhorias nas condições locais podem ser exigidas para o planejamento e implementação de um projeto URE com sucesso.	A tecnologia não é adequada. Recomenda-se fortemente melhorar ou modificar as condições locais específicas.

Fonte: GIZ, 2017.

A matriz utilizada para auxiliar na tomada de decisão é apresentada na Quadro 8.

Quadro 8 - Matriz de tomada de decisão

Nível global de gestão de resíduos				
1	Sistema avançado de gestão de resíduos baseado em fluxos de resíduos (biomassa, resíduos perigosos, recicláveis) existente.	A coleta sistemática de resíduos é organizada. Algumas frações de resíduos (pneus, recicláveis, biomassa) são direcionadas para reciclagem e compostagem.	Há coleta sistemática de resíduos e descarte em aterro. Não há reciclagem sistemática organizada.	Ausência de coleta, reciclagem e descarte sistemático de resíduos.
	Oxidação térmica	Oxidação térmica	Oxidação térmica	Oxidação térmica
	Digestão anaerobia	Digestão anaerobia	Digestão anaerobia	Digestão anaerobia
	Gaseificação	Gaseificação	Gaseificação	Gaseificação
	Pirólise	Pirólise	Pirólise	Pirólise
Composição dos resíduos				
2	Frações orgânicas e não orgânicas são coletadas separadamente. Resíduos minerais volumosos ou perigosos são tratados separadamente.	RSU ou frações coletadas separadamente são ocasionalmente misturadas com pequenas frações de resíduos minerais ou perigosos.	RSU costuma ser misturado com frações minerais ou resíduos perigosos.	RSU é misturado com grandes quantidades de resíduos minerais e perigosos
	Oxidação térmica	Oxidação térmica	Oxidação térmica	Oxidação térmica
	Digestão anaerobia	Digestão anaerobia	Digestão anaerobia	Digestão anaerobia
	Gaseificação	Gaseificação	Gaseificação	Gaseificação
	Pirólise	Pirólise	Pirólise	Pirólise

Continuação

Poder calorífico dos RSU para processos térmicos, teor orgânico				
3	O poder calorífico médio dos RSU é > 8 MJ/kg.	O poder calorífico médio está entre 7 e 8 MJ/kg.	O poder calorífico dos RSU é < 7 MJ/kg. Alto teor de biomassa com elevada umidade.	O poder calorífico dos RSU é < 7 MJ/kg. A proporção de frações inorgânicas (cinza, areia, vidro, metais) é alta.
	Oxidação térmica	Oxidação térmica	Oxidação térmica	Oxidação térmica
	Digestão anaerobia	Digestão anaerobia	Digestão anaerobia	Digestão anaerobia
	Gaseificação	Gaseificação	Gaseificação	Gaseificação
	Pirólise	Pirólise	Pirólise	Pirólise
Quantidade de resíduos adequada para URE				
4	> 150,000 toneladas anuais de frações adequadas de resíduos estão disponíveis.	De 50,000 a 150,000 toneladas anuais de frações adequadas de resíduos.	De 10,000 a 50,000 toneladas anuais de frações adequadas de resíduos.	< 10,000 toneladas anuais de frações adequadas de resíduos.
	Oxidação térmica	Oxidação térmica	Oxidação térmica	Oxidação térmica
	Digestão anaerobia	Digestão anaerobia	Digestão anaerobia	Digestão anaerobia
	Gaseificação	Gaseificação	Gaseificação	Gaseificação
	Pirólise	Pirólise	Pirólise	Pirólise
Operação eficiente das instalações de gestão de resíduos				
5	Atores públicos e privados são experientes e eficientes na administração de instalações de gestão de resíduos e atuam em cooperação.	Atores públicos e privados são experientes, mas requerem capacitação para gerir instalações de URE com eficiência.	Atores públicos têm experiência limitada com URE e a contratação local de pessoal qualificado é difícil.	Nem atores públicos nem privados têm experiência com a operação de sistemas URE.
	Oxidação térmica	Oxidação térmica	Oxidação térmica	Oxidação térmica
	Digestão anaerobia	Digestão anaerobia	Digestão anaerobia	Digestão anaerobia
	Gaseificação	Gaseificação	Gaseificação	Gaseificação
	Pirólise	Pirólise	Pirólise	Pirólise

Continuação

Tempo de transporte dos RSU e distância adicional até a planta URE				
6	Nem a distância nem o tempo de transporte devem mudar consideravelmente em relação à situação atual.	O tempo de transporte irá aumentar < 1 hora, distância adicional < 50 km.	O tempo de transporte irá aumentar > 1 hora, distância adicional > 100 km.	A distância adicional > 200 km e não há transporte ferroviário disponível.
	Oxidação térmica	Oxidação térmica	Oxidação térmica	Oxidação térmica
	Digestão anaerobia	Digestão anaerobia	Digestão anaerobia	Digestão anaerobia
	Gaseificação	Gaseificação	Gaseificação	Gaseificação
	Pirólise	Pirólise	Pirólise	Pirólise
Comercialização e/ou disposição final dos resíduos do processo				
7	Existe mercado para os resíduos do processo. Resíduos perigosos podem ser dispostos com segurança num aterro sanitário próximo à planta URE.	Não há mercado para os resíduos do processo. Todos os resíduos do processo podem ser dispostos com segurança num aterro sanitário próximo à planta.	Não há mercado para os resíduos do processo. A disposição segura requer transporte por grandes distâncias.	Não há mercado para os resíduos do processo e a disposição segura não pode ser disponibilizada.
	Oxidação térmica	Oxidação térmica	Oxidação térmica	Oxidação térmica
	Digestão anaerobia	Digestão anaerobia	Digestão anaerobia	Digestão anaerobia
	Gaseificação	Gaseificação	Gaseificação	Gaseificação
	Pirólise	Pirólise	Pirólise	Pirólise

Continuação

Quadro jurídico e requisitos ambientais para URE					
8	Existe um quadro jurídico amplo, que abrange todos os tipos de URE. O cumprimento das leis é fiscalizado e a estratégia nacional de gestão de resíduos contempla URE.	Existe um quadro jurídico nacional para URE. As deficiências de fiscalização, ordenação e regulamentação estão sendo abordadas.	Não existe quadro jurídico para URE, ou existe parcialmente. Pode-se assegurar que normas internacionais são cumpridas em projetos específicos.	O quadro jurídico existente proíbe URE térmico, ou há indícios de que os padrões adequados de emissões não podem ser aplicados.	
	Oxidação térmica	Oxidação térmica	Oxidação térmica	Oxidação térmica	
	Digestão anaerobia	Digestão anaerobia	Digestão anaerobia	Digestão anaerobia	
	Gaseificação	Gaseificação	Gaseificação	Gaseificação	
	Pirólise	Pirólise	Pirólise	Pirólise	
Financiamento da gestão de RSU					
9	Os custos de coleta e destinação de RSU são sempre totalmente cobertos. Há recursos financeiros para cobrir os custos adicionais com URE.	Os custos de coleta e destinação de RSU são sempre totalmente cobertos. Os custos adicionais com URE podem ser difíceis de cobrir.	Os custos de coleta e destinação de RSU não são cobertos regularmente.	Costuma haver falta de recursos financeiros para cobrir os custos operacionais dos serviços de RSU.	
	Oxidação térmica	Oxidação térmica	Oxidação térmica	Oxidação térmica	
	Digestão anaerobia	Digestão anaerobia	Digestão anaerobia	Digestão anaerobia	
	Gaseificação	Gaseificação	Gaseificação	Gaseificação	
	Pirólise	Pirólise	Pirólise	Pirólise	

Continuação

Dependência do mercado estrangeiro				
10	Peças de reposição podem ser adquiridas localmente. Não há restrição para compra de peças de reposição importadas.	Grande parte das peças de reposição pode ser adquirida localmente. Há escritórios de venda e importação de peças disponíveis localmente.	A tecnologia chave da usina URE precisa ser importada. Há atrasos para compras realizadas internacionalmente.	Não há acesso a processos de importação.
	Oxidação térmica	Oxidação térmica	Oxidação térmica	Oxidação térmica
	Digestão anaerobia	Digestão anaerobia	Digestão anaerobia	Digestão anaerobia
	Gaseificação	Gaseificação	Gaseificação	Gaseificação
	Pirólise	Pirólise	Pirólise	Pirólise
Acesso a usuários finais de energia de URE				
11	As instalações de URE ou CDR estão próximas de uma área industrial com demanda por energia e calor ou gás. Existe boa infraestrutura de transportes e energia.	As instalações de URE ou CDR estão em uma área com demanda moderada por calor. Existe boa infraestrutura de transportes e energia.	As instalações de URE ou CDR estão próximas a uma grande rede de transmissão de energia. Não há demanda por calor na região.	As instalações de URE ou CDR estão em uma área que é deficientemente conectada com os consumidores de energia.
	Oxidação térmica	Oxidação térmica	Oxidação térmica	Oxidação térmica
	Digestão anaerobia	Digestão anaerobia	Digestão anaerobia	Digestão anaerobia
	Gaseificação	Gaseificação	Gaseificação	Gaseificação
	Pirólise	Pirólise	Pirólise	Pirólise

Continuação

Incentivos para geração de energia de baixo carbono				
12	Os incentivos econômicos para energia e calor de baixo carbono já foram aplicados com sucesso.	Os incentivos para energia de baixo carbono são regulamentados por lei, mas ainda não foram aplicados.	Não há incentivos econômicos. A introdução de incentivos econômicos deverá acontecer dentro de um ano.	Não há incentivos econômicos.
	Oxidação térmica	Oxidação térmica	Oxidação térmica	Oxidação térmica
	Digestão anaerobia	Digestão anaerobia	Digestão anaerobia	Digestão anaerobia
	Gaseificação	Gaseificação	Gaseificação	Gaseificação
	Pirólise	Pirólise	Pirólise	Pirólise

Fonte: GIZ, 2017 (adaptado).

Conclusão

Com a análise dos doze parâmetros obtêm-se um panorama de aplicabilidade para cada uma das tecnologias avaliadas nas condições locais do município estudado. Para a determinação da adequabilidade da tecnologia de interesse, para o cenário em questão, é feita a quantificação dos campos vermelhos, amarelos e verdes.

Quadro 9 - Avaliação dos resultados obtidos

Total da matriz	Potencial de aplicabilidade da tecnologia
<p>Nove ou mais campos verdes. O restante amarelo.</p>	<p>A princípio, a tecnologia parece ser adequada. Entretanto, os parâmetros em amarelo devem ser investigados mais detalhadamente e melhorias devem ser iniciadas.</p>
<p>Menos de nove campos verdes. O restante amarelo.</p>	<p>A tecnologia poderá ser adequada, mas as condições atuais não são propícias à sua aplicação. Tomadores de decisão devem avaliar as condições mais detalhadamente antes de iniciar um projeto de URE ou focar numa tecnologia que tenha mais campos verdes.</p>
<p>Um ou mais campos vermelhos.</p>	<p>Critério impeditivo: há deficiência graves que impedem a aplicação desta tecnologia. Todas as condições marcadas em vermelho devem ser melhoradas antes de iniciar um projeto com respectiva tecnologia ou realizar a escolha de uma tecnologia que apresente somente campos amarelos e verdes.</p>

Fonte: GIZ, 2017

5.2 Aplicação da matriz de tomada de decisão

Com intuito de avaliar se as condições das cidades brasileiras são aptas para a introdução de uma planta URE, será considerado como cenário hipotético as características do estado de São Paulo na aplicação da matriz de tomada de decisão.

O estado de São Paulo possui uma geração de 61.078 t/dia de resíduos sólidos urbanos. Deste montante 60.961 t/dia são coletados e apenas 76,9% dispostos em aterro sanitário (ABRELPE, 2016).

Os resíduos sólidos urbanos são constituídos por mais de 50% de matéria orgânica. Conforme discutido na seção 4, o poder calorífico médio do RSU produzido na cidade de São Paulo é de 11,82 MJ/kg (2824,38 kcal/kg), valor equiparado ao de países desenvolvidos, 8,4 a 17 MJ/kg (2.006,30-4.060,38 kcal/kg). Este valor tende a reduzir uma vez que serão utilizadas apenas a parcela de resíduos disponíveis para a tecnologia URE, de modo a evitar a utilização de materiais que ainda podem ser reciclados (GIZ, 2019).

A importação de tecnologias estrangeiras está fortemente sujeita a dependência do mercado exterior, tanto pela necessidade de aquisição do maquinário e peças para manutenção, quanto pela ausência de mão de obra especializada em países em desenvolvimento.

Por ser uma tecnologia relativamente nova no país, atores públicos e privados possuem conhecimentos limitados ao processo de tratamento e existe uma dificuldade de contratação de profissionais qualificados.

Além disso, os resíduos do processo de URE ainda não possuem mercado, mas podem ser dispostos em aterro sanitário localizado próximo à planta.

Devido as condições climáticas na maioria dos municípios, não há demanda pela utilização de aquecimento em residências. Uma opção que pode ser cogitada seria a utilização do calor gerado em indústrias.

Mesmo com a publicação da Portaria Interministerial nº 274/2019 e legislações referentes a emissão de poluentes atmosféricos, diretrizes e condições para a operação e o licenciamento da atividade de tratamento térmico de resíduos sólidos, ainda assim

há deficiências na fiscalização e ausência de legislações específicas para cada tipo de URE existente.

O país possui incentivos de geração de energia de baixo carbono principalmente voltados para energia gerada em aterros sanitários, mas ainda não foram aplicados para esse tipo específico de tecnologia.

A partir de um cenário hipotético (Quadro 10) que considera um município bem estruturado, com a gestão de resíduos relativamente desenvolvida e disponibilidade de instalação da tecnologia próxima a região de aterro sanitário, será apresentada uma compilação da matriz de tomada de decisão que permitirá a comparação de diferentes tecnologias URE. Esta análise não substitui a necessidade de avaliação de viabilidade técnica, ambiental, jurídica, econômica e social.

Quadro 10 - Características do cenário hipotético analisada

Parâmetros	Cenário hipotético
Geração de resíduos:	<i>61.078 t/dia, desse montante 60.961 t/dia são coletados; sendo 76,9% dispostos em aterro sanitário.</i>
Composição:	<i>RSU são constituídos por mais de 50% de matéria orgânica.</i>
Poder calorífico médio:	<i>Valor < 11,82 MJ/kg (apenas fração adequada).</i>
Dependência do mercado exterior:	<i>A tecnologia da usina URE precisa ser importada</i>
Quadro jurídico e requisitos ambientais:	<i>Há deficiências na fiscalização e ausência de legislações específicas para cada tipo específico de URE existente.</i>
Operação das instalações:	<i>Atores públicos e privados possuem conhecimentos limitados ao processo de tratamento. Existe dificuldade de contratação de profissionais qualificados.</i>

Comercialização e/ou disposição final dos resíduos do processo:	<i>Os resíduos do processo de URE ainda não possuem mercado, mas poderiam ser dispostos em aterro sanitário localizado próximo à planta.</i>
Acesso a usuários finais de energia de URE:	<i>Não há demanda pela utilização de aquecimento em residências, mas existe a possibilidade de utilização desta energia por indústrias.</i>
Incentivos para geração de energia de baixo carbono	<i>Há incentivos de geração de energia de baixo carbono voltados para aterros sanitários, mas ainda não foram aplicados para esse tipo específico de tecnologia.</i>

Quadro 11 - Resultado compilado para o cenário hipotético.

	Nível global de gestão de resíduos		Composição dos resíduos		Poder calorífico dos RSU para processos térmicos, teor orgânico		Quantidade de resíduos adequada para URE
1	A coleta sistemática de resíduos é organizada. Algumas frações de resíduos (pneus, recicláveis, biomassa) são direcionadas para reciclagem e compostagem.	2	RSU ou frações coletadas separadamente são ocasionalmente misturadas com pequenas frações de resíduos minerais ou perigosos.	3	O poder calorífico dos RSU é < 7 MJ/kg. Alto teor de biomassa com elevada umidade.	4	> 150,000 toneladas anuais de frações adequadas de resíduos estão disponíveis.
	Oxidação térmica		Oxidação térmica		Oxidação térmica		Oxidação térmica
	Digestão anaerobia		Digestão anaerobia		Digestão anaerobia		Digestão anaerobia
	Gaseificação		Gaseificação		Gaseificação		Gaseificação
	Pirólise		Pirólise		Pirólise		Pirólise
5	Operação eficiente das instalações de gestão de resíduos	6	Tempo de transporte dos RSU e distância adicional até a planta URE	7	Comercialização e/ou disposição final dos resíduos do processo	8	Quadro jurídico e requisitos ambientais para URE
	Atores públicos têm experiência limitada com URE e a contratação local de pessoal qualificado é difícil para os setores público e privado.		O tempo de transporte irá aumentar < 1 hora, distância adicional < 50 km.		Não há mercado para os resíduos do processo. Todos os resíduos do processo podem ser dispostos com segurança em aterro sanitário próximo à planta.		Existe um quadro jurídico nacional para URE. As deficiências de fiscalização, ordenação e regulamentação estão sendo abordadas.
	Oxidação térmica		Oxidação térmica		Oxidação térmica		Oxidação térmica
	Digestão anaerobia		Digestão anaerobia		Digestão anaerobia		Digestão anaerobia
	Gaseificação		Gaseificação		Gaseificação		Gaseificação
Pirólise	Pirólise	Pirólise	Pirólise				

	Financiamento da gestão de RSU		Dependência do mercado estrangeiro		Acesso a usuários finais de energia de URE		Incentivos para geração de energia de baixo carbono
9	Os custos de coleta e destinação de RSU são sempre totalmente cobertos. Os custos adicionais com URE podem ser difíceis de cobrir.	10	A tecnologia chave da usina URE precisa ser importada. Há atrasos para compras realizadas internacionalmente.	11	As instalações de URE ou CDR estão próximas a uma grande rede de transmissão de energia. Não há demanda por calor na região.	12	Os incentivos para energia de baixo carbono são regulamentados por lei, mas ainda não foram aplicados.
	Oxidação térmica		Oxidação térmica		Oxidação térmica		Oxidação térmica
	Digestão anaerobia		Digestão anaerobia		anaerobia		Digestão anaerobia
	Gaseificação		Gaseificação		Gaseificação		Gaseificação
	Pirólise		Pirólise		Pirólise		Pirólise

Conforme o método de avaliação desenvolvido pela GIZ, nenhuma das tecnologias são consideradas adequadas, pois apresentam ao menos um campo vermelho, sendo importante o aprimoramento ou a modificação das condições locais específicas antes de dar prosseguimento às próximas etapas de implantação do projeto.

Tabela 3 - Avaliação das tecnologias para o cenário hipotético

	Tecnologia URE adequada	Necessário maiores informações e/ou melhorias nas condições locais	Tecnologia URE não adequada
Oxidação térmica	3	7	2
Digestão anaeróbia	3	9	0
Gaseificação	0	7	5
Pirólise	0	7	5

Dentre os processos térmicos, a Oxidação térmica mostrou-se a mais apta diante das condições locais selecionadas apresentando 3 parâmetros que a torna adequada; 7 parâmetros intermediários, os quais maiores informações e melhorias serão necessárias para o planejamento e a implementação da tecnologia; e 2 parâmetros não favoráveis a sua instalação, havendo uma forte recomendação de melhoria ou modificação quanto a dependência do mercado estrangeiro e os atores envolvidos na operação das instalações.

Por meio do resultado obtido conclui-se que para o cenário hipotético adotado tanto a gaseificação, quanto a pirólise são tecnologias que apresentaram 7 parâmetros indicadores de necessidade de melhoria; e 5 não adequados referentes ao poder calorífico, os atores envolvidos na operação das instalações, financiamento da gestão de RSU, dependência do mercado estrangeiro e acesso a usuário finais de energia de URE. Entretanto, não apresentaram nenhum parâmetro que as tornem adequadas para instalação.

A única tecnologia com perspectiva de desenvolvimento do projeto é a digestão anaeróbia, por ter exibido somente parâmetros adequados e de necessidade de melhoria. Entretanto, ainda dependerá da execução de melhorias dos parâmetros relacionados ao nível global da gestão de resíduos, composição dos resíduos, atores envolvidos na operação das instalações, comercialização e/ou disposição final dos resíduos do processo, quadro jurídico e requisitos ambientais para URE, financiamento da gestão de RSU, dependência do mercado estrangeiro, acesso a usuários finais de energia de URE e incentivos para geração de energia de baixo carbono.

5.3 Considerações finais do capítulo

Mesmo os parâmetros mínimos a serem avaliados não se prendem somente aos aspectos ambientais e operacionais do sistema de tratamento. Tratam-se de aspectos diversificados compostos por todos os setores que possam ter influência no seu adequado funcionamento.

A matriz se mostrou uma ferramenta importante para uma avaliação dos requisitos básicos necessários de instalação de uma planta URE. Observa-se que para o cenário hipotético muitos aspectos técnicos, financeiros, jurídicos, ambientais e sociais ainda precisariam ser aprimorados para garantir o bom funcionamento dessa tecnologia.

A simples desconsideração dos parâmetros que possuem necessidade de mudanças ou melhorias podem causar danos irreparáveis à saúde humana, ao meio ambiente e a ocorrência de riscos financeiros.

Na próxima seção serão descritas as contribuições trazidas com a elaboração deste trabalho, assim como sugestões de futuros trabalhos que irão auxiliar em um entendimento ainda mais aprofundado a cerca das tecnologias URE.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na seção 6 serão expostas as contribuições do trabalho e sugestões de trabalhos futuros.

6.1 Contribuições do Trabalho

A grande maioria das plantas mundiais de tratamento térmico de RSU é do tipo Oxidação térmica em grelha. Existem apenas algumas unidades de gaseificação e pirólise, que na verdade são tecnologias em desenvolvimento e ainda requerem a comprovação de sua viabilidade técnica no processamento de resíduo sólido urbano.

O processo de Oxidação térmica possui o maior número de referências e é a que tem maior flexibilidade, quanto às características do resíduo, sendo adequada para processar RSU previamente tratado ou bruto, assim como CDR.

Os processos de gaseificação e pirólise possuem poucas referências e alguns desses processos ainda estão em fase experimental.

A instalação de uma unidade de tratamento térmico de resíduos sólidos, em caráter comercial (não experimental) é uma alternativa que requer: o conhecimento sobre a composição dos resíduos sólidos e sobre tecnologia que melhor se enquadra; mão de obra especializada; disponibilidade de quadro jurídico e atendimento a requisitos ambientais; planejamento do financiamento da gestão de RSU; identificação da dependência do mercado estrangeiro e da existência de incentivos para a geração de energia de baixo carbono.

Variações no fluxo de resíduos (tanto em composição como em quantidade) são um dos fatores de maior risco para a manutenção dos padrões de emissão das plantas de recuperação de energia. Quando se considera a vida útil da planta, é provável que o fluxo irá variar em função do aumento populacional, renda, hábitos de consumo, mercado

para materiais recicláveis e outros fatores. Essas variações irão ocorrer não somente ao longo da vida útil, mas também de forma sazonal.

Os padrões de emissão ambiental para os processos de tratamento térmico de resíduos são estabelecidos pela resolução Conama nº 316 de 29 de outubro de 2002, sendo este o regulamento básico a ser atendido. Comparada a padrões de emissão de outros países como os Estados Unidos, Japão ou União Europeia, o padrão brasileiro é menos restritivo, embora haja padrões estaduais comparáveis aos internacionais (por exemplo, no Estado de São Paulo).

Mesmo que a receita gerada com a comercialização de energia seja muito inferior aos custos anuais da planta, ainda assim é importante maximizar a eficiência de recuperação de energia elétrica, pois pode ser utilizada para abastecer o próprio empreendimento e reduzir custos.

Vale ressaltar que as tecnologias URE não devem ser utilizadas como solução única, mas sim como uma alternativa de um sistema integrado de gestão de resíduos sólidos. Conforme a hierarquia determinada pela PNRS, verifica-se que a reciclagem e recuperação energética são alternativas complementares. E que a implantação de URE deve sempre estar acompanhada de estudos de avaliação de viabilidade técnica, ambiental, jurídica, econômica e social, para garantir a segurança operacional da unidade e para que países em desenvolvimento não se tornem receptores de tecnologias obsoletas.

Considerando a realidade dos sistemas de coleta, a fração seca dos RSU, quando separados e coletados na fonte, e aptos para reciclagem devem ser encaminhados para tal fim. Para os demais resíduos, que foram coletados misturados com as frações orgânicas, a melhor alternativa de destinação é a recuperação energética. O rejeito do processo de triagem e reciclagem também pode ser destinado às usinas de recuperação de energia (Comitê de Valorização Energética, 2012).

A matriz desenvolvida pela GIZ foi utilizada para avaliar os parâmetros essenciais para instalação e aplicabilidade das tecnologias URE estudadas, considerando um cenário hipotético, apresentado no Quadro 11.

Conforme resultado obtido, nenhuma das alternativas seriam consideradas adequadas, por terem apresentado ao menos um campo vermelho ou amarelo. Indicadores nessas colorações apontam a necessidade de melhoria ou modificação das condições locais específicas antes de dar prosseguimento às próximas etapas de implantação do projeto.

Dentre os processos térmicos, a Oxidação térmica mostrou-se a mais apta diante das condições locais selecionadas apresentando 3 parâmetros que a torna adequada; 7 parâmetros intermediários, de necessidade de melhoria; e 2 parâmetros não favoráveis à sua instalação, havendo uma forte recomendação de aprimoramento ou modificação quanto à dependência do mercado estrangeiro e os atores envolvidos na operação das instalações.

Tanto a gaseificação, quanto a pirólise são tecnologias que apresentaram 7 parâmetros indicadores de necessidade de melhoria; e 5 não adequados referentes ao poder calorífico, os atores envolvidos na operação das instalações, financiamento da gestão de RSU, dependência do mercado estrangeiro e acesso a usuário finais de energia de URE. Entretanto, não apresentaram nenhum parâmetro que as tornem adequadas para instalação.

A única tecnologia com perspectiva de desenvolvimento do projeto é a digestão anaeróbia, por ter exibido somente parâmetros adequados e de necessidade de melhoria. Entretanto, ainda dependerá da execução de melhorias dos parâmetros relacionados ao nível global da gestão de resíduos, composição dos resíduos, atores envolvidos na operação das instalações, comercialização e/ou disposição final dos resíduos do processo, quadro jurídico e requisitos ambientais para URE, financiamento da gestão de RSU, dependência do mercado estrangeiro, acesso a usuários finais de energia de URE e incentivos para geração de energia de baixo carbono.

Assim, as principais contribuições do trabalho foram:

- Demonstrar a importância de considerar parâmetros multidisciplinares na seleção de novas alternativas de tratamento de resíduos;
- Apresentar os aspectos básicos essenciais a serem considerados quando da instalação de URE.
- Mostrar que a avaliação inicial de aplicabilidade da tecnologia se difere conforme o cenário de estudo;
- A implantação de tecnologias URE em países em desenvolvimento ainda é passível de uma série de mudanças e melhorias para proporcionar o seu devido funcionamento.

6.2 Trabalhos Futuros

Diante do trabalho desenvolvido observou-se a importância da consideração de indicadores multidisciplinares para a verificação da aplicabilidade de instalação das plantas URE.

Com isso, sugere-se elaboração de estudo para (a) identificar a fração passível de ser utilizada em processos URE, (b) avaliar o poder calorífico desta fração adequada, (c) adicionar mais dois parâmetros a matriz de tomada de decisão: capacidade técnica e aspectos sociais.

Em caso de enquadramento das características locais hipotéticas com o município alvo, uma análise de viabilidade que considere todas as faces envolvidas, técnica, ambiental, jurídica, econômica e social, deve ser realizada, a fim de assegurar a segurança operacional da tecnologia escolhida.

REFERÊNCIAS

ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2016**. São Paulo. 2016. Disponível em: <<http://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em: jan. de 2019.

ARENA, U. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review. **Waste Management**: Solid waste gasification, Volume 32, Issue 4, p. 625-639, 2012. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X11004314>>. Acesso em: out. 2019.

BASTOS, B. Q. **Tecnologias de aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos**. Monografia (Graduação). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10007270.pdf>>. Acesso em out. 2019.

BEYENE, H. D.; WERKNEH, A. A.; AMBAYE, T. G. Current updates on waste to energy (WtE) technologies: a review. **Renewable energy focus**, volume 24, p. 1-11, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1755008417301564>>. Acesso em: out. 2019.

BOSMANS, A. et. al. The crucial role of Waste-to-Energy technologies in enhanced landfill mining: a technology review. **Journal of cleaner production**: Special Volume: Urban and landfill mining, volume 55, p. 10-23, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652612002557?via%3Dihub>>. Acesso em: jun. 2019.

BRASIL. ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis). Resolução ANP n. 685/17, 29 de junho de 2017. **Estabelece as regras para aprovação do controle da qualidade e a especificação do biometano oriundo de aterros sanitários e de estações de tratamento de esgoto destinado ao uso veicular e às instalações residenciais, industriais e comerciais a ser comercializado em todo o território nacional**, DOU, 30 de junho de 2017. Disponível em: <<http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2017/junho&item=ranp-685--2017>>. Acesso em jul. 2019.

BRASIL. CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente). Resolução CONAMA n. 316/02, 29 de outubro de 2002. **Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos**, DOU n. 224, seção I, p. 92-95, 20 de novembro de 2002. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=338>>. Acesso em jul. 2019.

BRASIL. SMA (Secretaria do Meio Ambiente). Resolução SMA n. 38/17, 31 de maio de 2017. **Estabelecem diretrizes e condições para o licenciamento e a operação da atividade de recuperação de energia proveniente do uso de Combustível Derivado de Resíduos Sólidos Urbanos – CDRU em Fornos de Produção de Clínquer**, DOE, seção I, p. 48-49, 02 de junho de 2017. Disponível em: <<https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/legislacao/2017/05/resolucao-sma-38-2017/>>. Acesso em set. 2019.

BRASIL. SMA (Secretaria do Meio Ambiente). Resolução SMA n. 79/09, 04 de novembro de 2009. **Estabelece diretrizes e condições para a operação e o licenciamento da atividade de tratamento térmico de resíduos sólidos em Unidades de Recuperação de Energia – URE**, DOE, seção I, p. 44-45, 05 de novembro de 2009. Disponível em: <<https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/legislacao/2009/11/resolucao-sma-79-2009/>>. Acesso em ago. 2019.

CHEN, D. et. al. Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review. **Waste Management**, volume 34, issue 12, p. 2466-2486, 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X14003596?via%3Dihub>>. Acesso em: set. 2019.

COMITÊ DE VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA. **Recuperação energética resíduos sólidos urbanos**. [S.l.]. 2012. Disponível em: <<http://abrelpe.org.br/caderno-informativo-recuperacao-energetica/>>. Acesso em: out. 2019.

ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, XXXVII, 2017, Joinville. **Análise da viabilidade econômica e ambiental da produção de energia a partir da Oxidação térmica dos resíduos sólidos urbanos da cidade de São Paulo**. Joinville: 2017. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_STP_246_424_34486.pdf>. Acesso em: set. 2019.

EPA (Environmental Protection Agency). **Climate Change and Municipal Solid Waste**. 2016. Disponível em: <<https://archive.epa.gov/wastes/conservation/tools/payt/web/html/factfin.html>>. Acesso em: dez. 2019.

FEAM (Fundação Estadual do Meio Ambiente). **Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos: guia de orientações para governos municipais de Minas Gerais**. Belo Horizonte. 2012. Disponível em: <http://www.feam.br/images/stories/arquivos/mudnacaclimatica/2013/aproveitamento%20energetico%20de%20rsu_guia%20de%20orientaes_versao_publicacao_on_line.pdf>. Acesso em: out. 2019.

FFC ENVIRONMENT. **Waste Processing & Resource Recovery Waste-to-Energy**. 2017. Disponível em: <https://www.fcc-group.eu/files/austria/zisterdorf_en_2017.pdf>. Acesso em out. 2019.

GGE. **The Technology Behind GGE**. 2019. Disponível em: <<http://ggeamericas.com>>. Acesso em out. 2019.

GIZ. **Alternativas em Waste-to-Energy na Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos**. Eschborn. 2017. Disponível em: <<https://www.giz.de/en/downloads/WasteToEnergy%20Guidelines%20GIZ%202017%20-%20PT%20web.pdf>>. Acesso em: set. 2019.

IOWA STATE UNIVERSITY. **Biomass Gasification and Syngas Cleaning**. 2014 Disponível em: <<https://www.biorenew.iastate.edu/research/thermochemical/gasification/>>. Acesso em out. 2019.

JACOBI, P.R.; BESEN, G.R. **Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade**. Estudos avançados, São Paulo, volume 25, número 71, 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142011000100010>. Acesso em: jan. 2019.

KUMAR, A.; SAMADDER, S. R. **A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste**. Waste management, volume 69, p. 407-422, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X17306268?via%3Dihub>>. Acesso em: out. 2019.

MARCHI, C. M. D. F. **Novas perspectivas na gestão do saneamento: apresentação de um modelo de destinação final de resíduos sólidos urbanos**. Revista Brasileira de Gestão Urbana (Brazilian Journal of Urban Management), Curitiba, v. 7, n. 1, p. 91–105, 2015.

MARSHALL, R. E; FARAHBAKHS, K. **Systems approaches to integrated solid waste management in developing countries**. Waste Management, volume 33, p. 988-1003. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X13000032>. Acesso em: dez. 2019.

MORAES, J.L. de. **Dificuldades para o aproveitamento energético de resíduos sólidos através da Oxidação térmica no Brasil**. Geosaberes, Fortaleza, v. 6, número especial (3), p. 173-180, 2016. Disponível em: <www.geosaberes.ufc.br>. Acesso em: jan. 2019.

PEREIRA, S. S.; CURI, R. C. **Modelos de Gestão Integrada dos Resíduos Sólidos Urbanos: a Importância dos Catadores de Materiais Recicláveis no Processo de Gestão Ambiental**. Unipinhal. 2012. Disponível em: <ferramentas.unipinhal.edu.br>. Acesso em: nov. 2019.

PLANSAB (Plano Nacional de Saneamento Básico). **Recuperação Energética de Resíduos Sólidos Urbanos**. Caderno Temático 3. São Paulo. 2019.

PNUD (Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento). **Estudo sobre o Potencial de Geração de Energia a partir de Resíduos de Saneamento (lixo, esgoto), visando incrementar o uso de biogás como fonte alternativa de energia renovável**. São Paulo. 2010. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/164/_publicacao/164_publicacao10012011033201.pdf>. Acesso em: jan. 2019.

REIS, A. S. **Tratamento de resíduos sólidos orgânicos em biodigestor anaeróbio**. 2012. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2012. Disponível em: <<https://www3.ufpe.br/ppqecam/images/documentos/2013/dt1alexandro.pdf>>. Acesso em: out. 2019.

SÃO PAULO (Estado). Decreto n. 59.113/13, 23 de abril de 2013. **Estabelece novos padrões de qualidade do ar e dá providências correlatas**, DO - Executivo, p. 1, 24 de abril de 2013. Disponível em: <<https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/2013/decreto-59113-23.04.2013.html>>. Acesso em set. 2019.

SILVA, R. F. **A análise multicritério de tecnologias utilizadas na Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos**. 2017. Dissertação (Mestrado) - Escola Nacional de Saúde Pública SERGIO AROUCA, Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <<https://www.arca.fiocruz.br/handle/icict/24065>>. Acesso em: out. 2019.

TASNEEM, K. **Beneficial utilization of municipal solid waste incineration ashes as sustainable road construction materials**. 2014. Tese (Mestrado) - University of Central Florida, 2014. Disponível em: <<https://stars.library.ucf.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=5545&context=etd>>. Acesso em: set. 2019.

UNEP (United Nations Environment Programme). **Global waste management outlook**. [S.I.]. 2015. Disponível em: <<https://www.unenvironment.org/resources/report/global-waste-management-outlook>>. Acesso em: out. 2019.

VIA PÚBLICA. **Estudo de alternativas de tratamento de resíduos sólidos urbanos**: Incinerador mass burn e Biodigestor anaeróbio. São Paulo, 2012. Disponível em: <<https://polis.org.br/publicacoes/estudo-de-alternativas-de-tratamento-de-residuos-solidos-urbanos-incinerador-mass-burn-e-biodigestor-anaerobio/>>. Acesso em: jan. 2018.

VINCIR ENVIRONEMT. **Anaerobic Digestion**. Acesso em: <<https://www.entrepose.com/en/vinci-environnement/our-expertise/anaerobic-digestion/>>. Disponível em out. 2019.

