

A faint, light-colored outline map of Brazil is centered in the background of the page. The map shows the state boundaries of the country.

DO RESÍDUO À ENERGIA

CAMINHOS E OPORTUNIDADES

A FBRER

A geração de resíduos representa um dos maiores problemas da sociedade moderna e, somada ao déficit de saneamento básico, contribui para o agravamento do gerenciamento destes resíduos desde a sua origem até a disposição final.

O crescimento populacional e o desenvolvimento das indústrias obrigam a busca constante de soluções para a disposição adequada dos resíduos. Aproximadamente 43% do lixo urbano é disposto de maneira inadequada em aterros controlados ou lixões.

A destinação não adequada traz graves danos ambientais e à saúde da população, constituindo-se num dos problemas estruturais históricos do país.

O desenvolvimento de rotas ambientalmente mais adequadas como a Recuperação Energética tem efeito direto e indireto no aumento do percentual de reciclagem; a reinserção destes resíduos novamente na cadeia produtiva, atende ao mais amplo conceito da economia circular.

O Brasil precisa criar políticas públicas, mecanismos e ações estruturantes para viabilizar projetos, visando a Recuperação Energética como solução ambientalmente mais adequada e, em linha, com que é estabelecido na PNRS/2010. Há a necessidade de um trabalho integrado entre os entes públicos, privados e sociedade civil para avançar em uma agenda

pró-ativa com o objetivo de criar condições para uma política de desenvolvimento visando a Recuperação Energética.

A FBRER - Frente Brasil de Recuperação Energética de Resíduos, foi criada com o intuito de conjugar esforços dos participantes quanto ao desenvolvimento da gestão integrada e sustentável dos resíduos sólidos e efluentes, com o objetivo de implementar rotas tecnológicas de destinação ambientalmente mais adequadas destes resíduos e transformar a matriz energética do Brasil em uma fonte de energia mais limpa e renovável.

Uma ampla cooperação entre as quatro entidades setoriais, ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland; ABETRE - Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos e Efluentes; ABIOGÁS - Associação Brasileira do Biogás e a ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos e Efluentes, visa a apoiar institucional e tecnicamente a gestão integrada e sustentável dos resíduos sólidos e efluentes, com vistas a viabilizar a recuperação energética e promover a integração ao mercado de energias limpas e renováveis.

LISTA DE GRÁFICOS

- Gráfico 1.** Tratamento e disposição de _____ **06**
resíduos no mundo
- Gráfico 2.** Tratamento e disposição de _____ **07**
resíduos por região do mundo
- Gráfico 3.** Comparação dos tipos de _____ **07**
destinação dos resíduos por faixa de
renda em 2012 e 2016
- Gráfico 4.** Geração de RSU no Brasil _____ **10**
- Gráfico 5.** Coleta de RSU no Brasil _____ **10**
- Gráfico 6.** Projeção de combustíveis _____ **38**
alternativos e biomassas -2014 - 2050
- Gráfico 7.** Taxa de substituição por _____ **63**
combustíveis alternativos -
Europa/Brasil

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Principais benefícios e _____ **01**
desafios da recuperação energética

Tabela 2. Materiais de entrada _____ **02**
necessários e materiais de saída
gerados pelas principais tecnologias
de tratamento de recuperação
energética de resíduos sólidos

Tabela 3. Materiais de entrada _____ **16**
necessários e materiais de saída
gerados pelas plantas de recuperação
energética por incineração

Tabela 4. Impacto da remoção de _____ **17**
alguns materiais no processo
previamente a incineração

Tabela 5. Informações gerais sobre a _____ **20**
gestão de resíduos local e da planta
de recuperação energética

Tabela 6. Unidade de Preparo de _____ **32**
Resíduos Sólidos Urbanos – UP-RSUE

LISTA DE TABELAS

Tabela 7. Custos para implantação e operação de unidades de recuperação energética por incineração no Brasil **62**

Tabela 8. Parâmetros de qualidade do RSUE para utilização na indústria do cimento **65**

Tabela 9. Parâmetros de investimentos para a produção de RSUE **68**

Tabela 10. Investimentos na fábrica de cimento para utilização do RSUE **70**

Tabela 11. Investimento em sistema de monitoramento de emissões e laboratório na fábrica de cimento para utilização do RSUE **70**

Tabela 12. Estimativa de custo da digestão anaeróbia em países emergentes **73**

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Mapa conceitual da _____ **04**
economia circular em um sistema industrial de produção e consumo
- Figura 2.** Mapa conceitual do _____ **15**
funcionamento de uma planta de incineração
- Figura 3.** . Pneu inservível sendo _____ **22**
transportado ao forno de cimento
- Figura 4.** Biomassas coprocessadas _____ **23**
(caroço de açaí)
- Figura 5.** Forno rotativo para a _____ **23**
produção do clínquer
- Figura 6.** Processo de fabricação do _____ **24**
cimento
- Figura 7.** Mapa e localização das _____ **25**
fábricas de cimento
- Figura 8.** Resíduo Sólido Urbano _____ **28**
- RSU

LISTA DE FIGURAS

- Figura 9.** Resíduo Sólido Urbano para fins Energéticos - RSUE _____ **29**
- Figura 10.** Balanço de massa desde a entrada do RSU à geração do RSUE _____ **31**
- Figura 11.** Esquema do forno onde mostra o queimador principal e o pré-calcinador _____ **39**
- Figura 12.** Ecoparc IV, Barcelona, Espanha _____ **39**
- Figura 13.** Sogama, Galícia, Espanha _____ **40**
- Figura 14.** ROAF, Oslo, Noruega _____ **40**
- Figura 15.** Stora Enso, Elienburg, Alemanha _____ **41**
- Figura 16.** Cadeia do biogás no escopo das plantas de TMB _____ **43**
- Figura 17.** CTR Palmeiras em Piracicaba, São Paulo _____ **49**

LISTA DE FIGURAS

- Figura 18.** Fluxograma do funcionamento da planta TMB Ecopark Piracicaba **50**
- Figura 19.** Raabrede - Lübeck, Alemanha **51**
- Figura 20.** Fluxogramas da unidade de TMB em Lübeck, AL por tipo de entrada do resíduo **52**
- Figura 21.** Fases do processo de Geração de Energia a partir do biogás **53**
- Figura 22.** Fluxograma do negócio **54**
- Figura 23.** Fluxograma de Purificador de Biogás com recuperação de CO₂ **55**
- Figura 24.** Oportunidades e alternativas **57**
- Figura 25.** Mapa conceitual da estrutura de financiamento de um incinerador de RSU **61**
- Figura 26.** Resíduo Sólido Urbano para fins Energéticos - RSUE **66**

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABCP** - Associação Brasileira de Cimento Portland
- Abetre** - Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos
- ABiogás** - Associação Brasileira de Biogás
- Abrelpe** - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
- ANEEL** - Agência Nacional de Energia Elétrica
- BNDES** - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
- CDE** - Conta de Desenvolvimento Energético
- CDR** - Combustível derivado de resíduo
- CONAMA** - Conselho Nacional do Meio Ambiente
- ETE** - Estações de tratamento de efluentes
- Fbrer** - Frente Brasil pela Recuperação Energética de Resíduos
- GEE** - Gases de efeito estufa
- IEA** - International Energy Agency
- IFC** - International Finance Corporation
- LFG** - Landfill gas
- MS** - Matéria seca
- PCI** - Poder Calor Inferior
- PNRS** - Política Nacional de Resíduos Sólidos
- PPP** - Parceria Público-Privada
- Proinfra** - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
- RSU** - Resíduo Sólido Urbano
- RSUE** - Resíduo sólido urbano para fins energéticos
- SNIC** - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

TMB - Tratamento mecânico biológico

UE - União Europeia

UP-RSUE - Unidade de preparo de resíduos sólidos urbanos para fins energéticos

URE - Unidade de Recuperação Biológica

WBCSD - World Business Council for Sustainable Development

TERMOS E DEFINIÇÕES

Amostragem: processo de elaboração ou constituição de uma amostra representativa de um resíduo ou RSUE;

Hierarquia de gestão e gerenciamento de resíduos: ordem de prioridade na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos;

Poder calorífico inferior – PCI: quantidade de energia calculada subtraindo o calor de vaporização do vapor de água da quantidade de energia liberada na combustão completa, expressa por unidade de massa ou volume (m/V);

Resíduos industriais: resíduos gerados pelos processos produtivos e instalações industriais;

TERMOS E DEFINIÇÕES

Resíduos classe II – Não perigosos - aqueles classificados como Classes IIA e IIB na ABNT NBR 10.004;

Resíduos sólidos urbanos – RSU - resíduos originários de atividades domésticas em residências urbanas, como varrição, limpeza de logradouros e de vias públicas, e outros serviços de limpeza urbana, de estabelecimentos comerciais e de prestadores de serviços;

Resíduo sólido urbano para fins energéticos – RSUE - resíduos sólidos urbanos, com ou sem incorporação de outros resíduos sólidos, resíduos agrossilvipastoris ou industriais não perigosos elegíveis, utilizados em processos de recuperação energética de maneira controlada;

Separação: operação unitária de divisão de componentes, partículas ou camadas, quando se busca obter a segregação de diferentes frações ou fases dos resíduos a serem utilizados na preparação do RSUE;

Teor de umidade: quantidade de água presente em um resíduo ou RSUE, obtida a partir de um ensaio específico;

Triagem: atividade, manual ou não, realizada para dividir ou manter separados os resíduos sólidos ou resíduos sólidos urbanos em componentes designados;

TERMOS E DEFINIÇÕES

Trituração: operação unitária de tratamento mecânico cuja finalidade é reduzir o tamanho das partículas do resíduo com a utilização de equipamentos apropriados que efetuem corte, rasgo ou diminuição do resíduo;

Unidade de preparo de resíduos sólidos urbanos para fins energéticos - UP-RSUE: planta onde se realiza o preparo do RSUE a partir do resíduo sólido urbano ou de uma mistura de resíduos, incluindo as plantas de preparo situadas dentro da URE.

SUMÁRIO

1. Introdução técnica sobre recuperação energética e tipos de tecnologia	01
1.1. Recuperação energética de resíduos: breve contextualização e conceitos	01
1.2. A recuperação energética e a hierarquia dos resíduos	05
1.3. Estado da arte: a recuperação energética no Brasil	09
2. Rotas tecnológicas para recuperação energética de resíduos	14
2.1. Tratamento térmico	14
2.2. Coprocessamento	21
2.3. Digestão anaeróbia	41
2.4. Gás de aterro sanitário	52
3. Análise dos potenciais e desafios técnicos e financeiros	58
3.1. Tratamento térmico	58
3.2. Coprocessamento	62
3.3. Digestão anaeróbia	71
4. Onde está o potencial?	74
5. Materiais de referência	75

1. Introdução técnica sobre recuperação energética e tipos de tecnologia

· Recuperação energética de resíduos: breve contextualização e conceitos

1.1 · O que é recuperação energética de resíduos

A **recuperação energética** refere-se ao conjunto de tecnologias que tratam resíduos para recuperar energia na forma de calor, eletricidade ou combustíveis alternativos, como o biogás, compreendendo diferentes escalas e níveis de complexidade. Os principais processos disponíveis são: incineração, coprocessamento, digestão anaeróbia e captura de gás de aterro, além das tecnologias alternativas como a pirólise, gaseificação, plasma e carbonização hidrotermal. No sistema de gestão de resíduos, observa-se os seguintes benefícios e desafios da recuperação energética (Tabela 1).

Tabela 1. Principais benefícios e desafios da recuperação energética.

Benefícios	Desafios
Desvio de resíduos encaminhados à disposição final com aumento da vida útil desses locais	Altos custos de instalação e operação
Redução das emissões de gases poluentes	Oposição social devido à deficiência de informação e engajamento no assunto
Aumento das taxas de reciclagem	Algumas tecnologias precisam de separação de RSU na fonte ou de um pré-tratamento para funcionarem adequadamente
Diminuição da dependência e uso de combustíveis fósseis	Riscos jurídicos e financeiros podem afastar investidores
Geração de novos empregos	A receita da venda de energia não cobre os custos da recuperação energética

Fonte: Elaborada a partir do Guia de Recuperação Energética da CNI (2019) e Waste-to-Energy. Options in Municipal Solid Waste Management da GIZ (2017).

Tabela 1. Principais benefícios e desafios da recuperação energética.

Benefícios	Desafios
Redução de odores e propagação de vetores de doenças	
Redução de custos com energia e geração de receita adicional com venda da energia produzida	

Fonte: Elaborada a partir do Guia de Recuperação Energética da CNI (2019) e Waste-to-Energy. Options in Municipal Solid Waste Management da GIZ (2017).

Destaca-se, também, que o potencial energético depende da quantidade e qualidade dos resíduos sólidos introduzidos. A tabela a seguir resume os materiais de entrada e principais materiais de saída de cada tecnologia (Tabela 2). O capítulo 2 fornecerá uma visão mais detalhada destes processos.

Tabela 2. Materiais de entrada necessários e materiais de saída gerados pelas principais tecnologias de tratamento de recuperação energética de resíduos sólidos.

Tecnologia	Materiais de entrada	Materiais de saída
Tratamento térmico	<ul style="list-style-type: none">· Resíduos Sólidos Urbanos para fins energéticos· Resíduos Industriais e Comerciais· Combustíveis Derivados de Resíduos	<ul style="list-style-type: none">· Eletricidade e/ou calor· Cinzas de fundo· Cinzas volantes
Coprocessamento em forno de clínquer	<ul style="list-style-type: none">· Resíduos Sólidos Urbanos para fins energéticos· Resíduos Industriais e Comerciais· Biomassa· Pneus	Não gera, os rejeitos gerados no processo são incorporados como matéria-prima secundária para fabricação do cimento
Digestão anaeróbia	<ul style="list-style-type: none">· Resíduos orgânicos· Resíduos Industriais e Comerciais específicos (ex: abatedouros)· Resíduos agrícolas· Lodos de esgoto	<ul style="list-style-type: none">· Biogás· Digestato
Aproveitamento de gás de aterro	Resíduos Sólidos Urbanos	Biogás

Fonte: elaborada a partir do Guia de Recuperação Energética da CNI (2019) e Waste-to-Energy Options in Municipal Solid Waste Management da GIZ (2017).

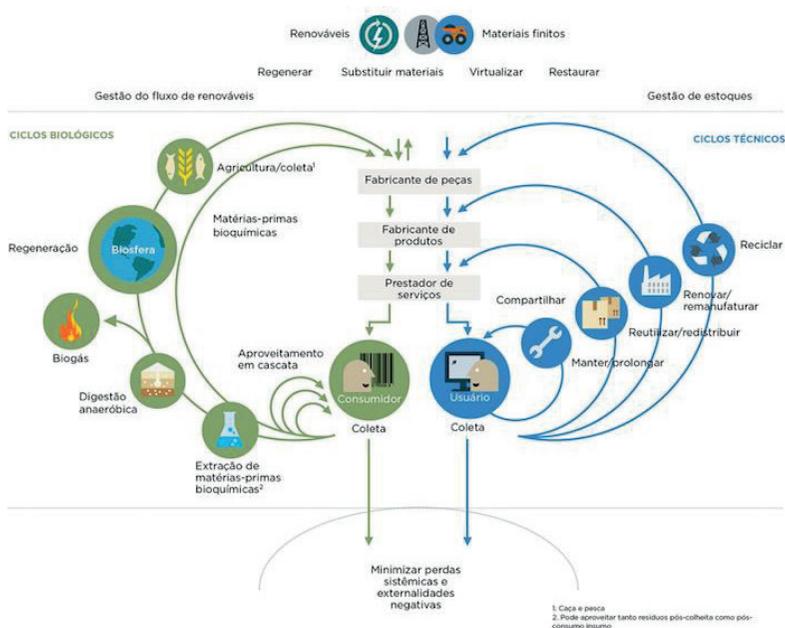
• A recuperação energética e a hierarquia dos resíduos

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) define a ordem de prioridade da gestão de resíduos, que de acordo com o Art. 9º deve contemplar não geração, redução, reutilização, reciclagem, **tratamento dos resíduos sólidos** e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (BRASIL, 2010).

A redução de resíduos através da prevenção é, portanto, prioritária, seguida pela preparação para reutilização e reciclagem. A recuperação energética integra os processos de tratamento de resíduos e, dessa forma, não compete com medidas anteriores na hierarquia. Com isso, a variedade de sistemas de recuperação possibilita o uso do resíduo como insumo para diversas atividades produtivas, buscando dispor somente o rejeito nos aterros sanitários.

Nesse sentido, a recuperação energética é um elemento essencial e propulsor para a transição da vigente economia linear, cuja lógica é extrair, produzir e descartar, para a economia circular. Cada tecnologia existente pode ser aplicada em diferentes níveis dentro do sistema, bem como exposto no mapa conceitual abaixo (Figura 1). As setas circulares são as ações que podem/devem ser realizadas para reinserir os materiais no sistema de produção, enquanto o centro representa a linearidade.

Figura 1: Mapa conceitual da economia circular em um sistema industrial de produção e consumo.



Fonte: TCE-Report, 2013 (p. 30). Ellen MacArthur Foundation.

A modernização dos sistemas de gestão de resíduos tem como um dos objetivos fomentar a economia com matérias-primas secundárias e energia que podem ser obtidas por meio desses materiais e, a partir dessa perspectiva e de acordo com o Guia para Tomada de Decisões em países em desenvolvimento e emergentes da GIZ, algumas características devem ser destacadas e serão aprofundadas nos próximos capítulos:

- Durante o processo de triagem e reciclagem, além de rejeitos, há geração de resíduos que não possuem valor material e/ou de mercado, sendo que a melhor solução cabível é a recuperação para geração de energia e combustível.

- Os tratamentos por incineração e coprocessamento (dentro dos padrões estabelecidos pela legislação vigente de emissões atmosféricas), são também importantes para a destruição de substâncias orgânicas tóxicas, não só para geração de energia.
- Mesmo após o processo de incineração, as cinzas de fundo e escórias geradas ainda possuem valor agregado devido à presença de metais valiosos, que podem ser retirados e recuperados, e retornarem ao ciclo produtivo. O que sobra deste processo é apenas rejeito em pequeno volume, que pode ser tratado e encaminhado à disposição final.
- A partir do processo de digestão anaeróbia, além do composto orgânico, gera-se energia renovável, que, além de fonte de energia elétrica e térmica, pode ser utilizada como combustível veicular.
- A coleta do gás de aterro é de suma importância para mitigação das externalidades causadas pelo metano gerado no processo de decomposição dos resíduos orgânicos dispostos nessas áreas.

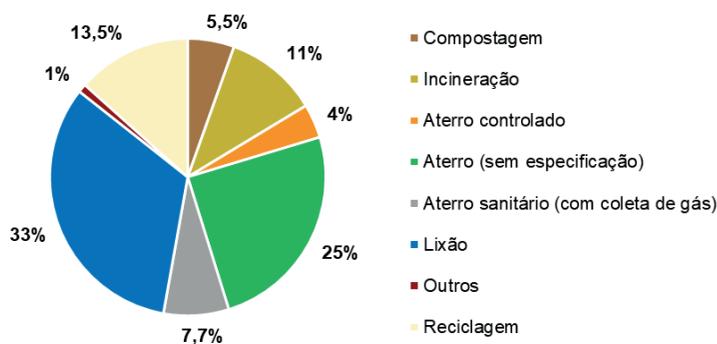
1.2 • A recuperação energética e a hierarquia dos resíduos

• Panorama atual

De acordo com o Banco Mundial em seu relatório What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050, que avaliou a gestão de resíduos pelo mundo no período de 2012 a 2016, a geração global de resíduos foi estimada em cerca de 2 bilhões de toneladas ao ano.

Do montante gerado, 33% tiveram destino inadequado e foram encaminhados para lixões e aterros controlados. Da fração remanescente, 37% foram enviados para aterros, dos quais 8% seguiram para aterros sanitários com sistemas de coleta de gás (Gráfico 1). Segundo o relatório, o setor de resíduos responde por aproximadamente 5% das emissões globais, valor alcançado principalmente pela disposição em aterros sem sistemas de coleta de gases. Os demais destinos incluíram reciclagem e compostagem, com 19%, e incineração para disposição final, com 11%.

Gráfico 1. Tratamento e disposição de resíduos no mundo.

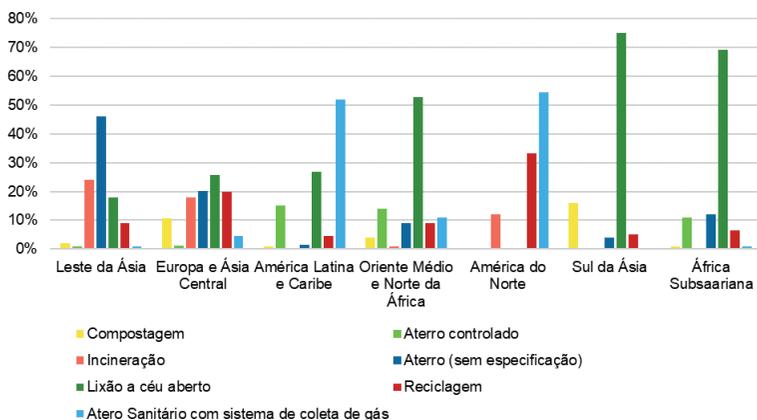


Fonte: Fonte: World Bank, What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050.

Quanto à variação nas diferentes regiões do mundo, observa-se a expressiva presença de disposição inadequada especialmente nas regiões menos desenvolvidas, nas quais a contribuição dos tratamentos de resíduos é baixa (Gráfico 2). Ao comparar os dados com o relatório de 2012, verifica-se que, nos países de renda média baixa e baixa, a disposição final permanece sendo o principal destino (Gráfico 3). Por outro

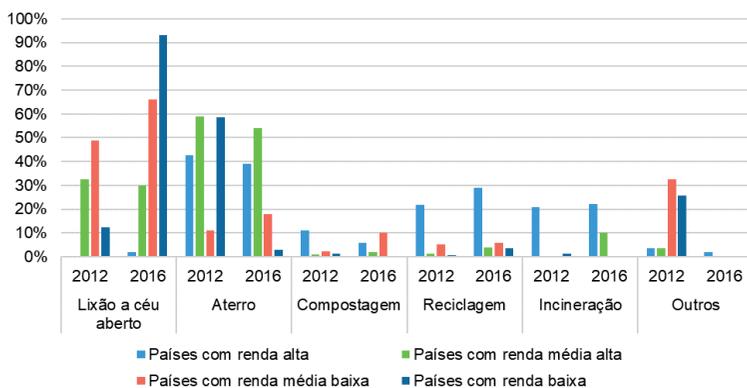
lado, os países com alta renda possuem representação expressiva da reciclagem e incineração como alternativas à disposição final.

Gráfico 2. Tratamento e disposição de resíduos por região do mundo.



Fonte: Adaptado de World Bank, What a Waste 2.0 A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050.

Gráfico 3. Comparação dos tipos de destinação dos resíduos por faixa de renda em 2012 e 2016.



Fonte: Adaptado de World Bank, What a Waste 2.0 A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050.

Dentre as diferentes alternativas de aproveitamento de resíduos, é fundamental a análise da composição. Estima-se que a fração reciclável orgânica representa, em média, 50% dos resíduos gerados em todas as regiões. Na América Latina e Caribe esse percentual é de 52%, o que ressalta o potencial para as tecnologias que reciclem e recuperem essa fração. Entretanto, a região ainda possui estratégias incipientes, e cidades como Montevideo no Uruguai tem uma taxa de reciclagem da fração seca de 15%, enquanto Rosário na Argentina utiliza o processo de compostagem para tratar 10% dos resíduos orgânicos. Quanto à recuperação energética, as iniciativas estão focadas na coleta de gás de aterro sanitário.

• Perspectivas futuras

Com a atenção voltada para o setor de resíduos no futuro, o relatório do Banco Mundial estima que o volume de resíduos gerados no mundo deve crescer para mais de 3 bilhões ao ano até 2050, considerando a manutenção das condições atuais do cenário atual. Dessa forma, as emissões oriundas do setor podem alcançar cerca de 3 bilhões de toneladas de CO₂eq anuais no mesmo período. E esses valores revelam a importância de medidas de redução e reutilização, bem como de avanços na reciclagem e outras tecnologias que permitam o aproveitamento máximo das frações remanescentes.

Nessa perspectiva, a União Europeia adotou a partir de 1990 uma série de diretivas para aprimorar a gestão de resíduos de seus estados-membros. Em sua última atualização, ocorrida em 2015, foi definido o Pacote da Economia Circular, que busca

levar a política de resíduos adiante e trazer benefícios significativos como o desenvolvimento sustentável, criação de empregos, redução de emissões de gases de efeito estufa e economia de recursos. Para tanto, o bloco econômico definiu como uma de suas metas a redução para 10% de envio de resíduos para aterros sanitários até 2030, além de aumento para 65% da preparação para reutilização e reciclagem no mesmo ano. Com isso, nota-se a necessidade dos esforços para o desvio à disposição final, que devem contemplar a recuperação energética especialmente para as frações cuja reciclagem é inviável técnica e economicamente.

Nos Estados Unidos, por sua vez, apesar de não existirem metas definidas do nível federal, mas sim metas voluntárias definidas pelos estados, observa-se a tendência de maior aproveitamento da fração orgânica por meio de digestão anaeróbia, cujo potencial é ampliado com a meta de redução de resíduos alimentares para 2030.

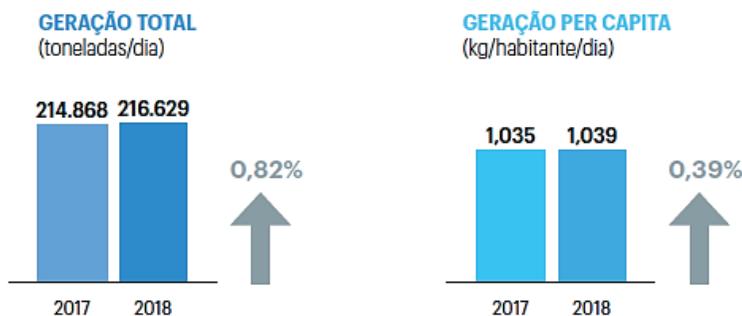
1.3 • Estado da arte: a recuperação energética no Brasil

• Panorama atual

Dados mais recentes do Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe) revelam que o país gerou cerca de 217 mil toneladas/dia de resíduos em 2018 (Gráfico 4), das quais 59,5% tiveram destino adequado e foram enviadas para aterros sanitários, enquanto 40,5% seguiram para disposição inadequada, incluindo aterros controlados e

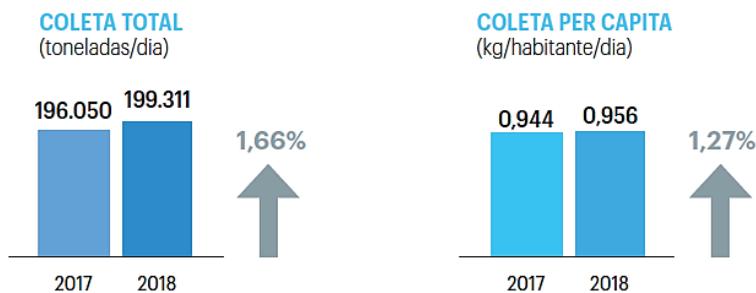
lixões. Do montante gerado, 8% não foram coletados e tiveram destino desconhecido (Gráfico 5).

Gráfico 4. Geração de RSU no Brasil.



Fonte: Abrelpe, 2019.

Gráfico 5. Coleta de RSU no Brasil.



Fonte: Abrelpe, 2019.

Quanto aos demais tipos de destinação, as iniciativas ainda são incipientes e limitam-se, em grande parte, à reciclagem da fração seca. Segundo a Abrelpe, 73% dos municípios brasileiros possuem alguma iniciativa de coleta seletiva, porém, muitas delas não atendem toda a população. Já segundo o SNIS 2018, apenas 2,2% dos resíduos coletados foram reciclados no país.

Essa porcentagem refere-se ao total recuperado nas centrais de triagem, associações e cooperativas de catadores cadastradas, e são inferiores ao potencial existente, tendo em vista que a fração reciclável corresponde a 31,9% da composição gravimétrica do país (Ipea, 2012). No que se refere à matéria orgânica, o país ainda tem muito para avançar, principalmente em sua reciclagem, cujas iniciativas dão conta de menos de 1% da fração orgânica.

Além da reciclagem, a tecnologia de captura de gás de aterro para produção do biogás também possui potencial e tendência de crescimento bastante significativa com novos projetos em vias de aprovação. Atualmente, existem cerca de 40 usinas de aproveitamento do gás metano instaladas em aterros sanitários em todo território nacional, sendo a maior concentração na região Sudeste, as quais produzem aproximadamente 250 MWh de energia elétrica dos mais de 3.900 m³ de metano gerados por dia. Já quanto à energia a partir da codigestão de resíduos e efluentes no país, a produção de biometano é de 33 e 500 mil Nm³/dia respectivamente.

Quanto aos aspectos legais, o Brasil também se apresenta favorável às soluções de recuperação energética. Mesmo antes do estabelecimento da PNRS, o país já possuía legislação em benefício da geração de energia renovável, na qual algumas tecnologias de recuperação energética se enquadram. Dentre a normativa existente, cabe citar: Lei nº 10.438/2002 e Decreto nº 4.541, que respectivamente, cria e regulamenta o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa)

e a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE) e a Política Nacional sobre Mudança no Clima, instituída pela Lei nº 12.187/2009.

Também cabe mencionar a Política Nacional de Biocombustíveis, instituída pela Lei 13.576/2017, que tem como objetivo traçar uma estratégia conjunta para reconhecer o papel estratégico de todos os tipos de biocombustíveis na matriz energética brasileira, tanto para a segurança energética quanto para mitigação de emissões de gases de efeito estufa.

Já no que se refere aos incentivos financeiros, a Lei nº 12.114/2009 criou o Fundo Nacional sobre Mudança no Clima, que visa apoiar financeiramente projetos e estudos com foco na adaptação e mitigação das mudanças climáticas. Além disso, o governo federal autorizou, por meio da PNRS, que as instituições federais criassem linhas de crédito especiais para o financiamento de atividades de prevenção e redução da geração de resíduos em processos produtivos, além da implantação de novas tecnologias. Somado a isso, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) criou a isenção de taxas de transmissão e distribuição para empreendimentos de recuperação energética com capacidade instalada de até 30 MW que utilizam resíduos para satisfazer mais de 50% de sua demanda.

• Perspectivas futuras

A recuperação energética tem ganhado cada vez mais força no território nacional, e as perspectivas apontam para um cenário futuro promissor. No âmbito da atuação da Frente Brasil pela Recuperação Energética de Resíduos (Fbrer), o fechamento dos lixões, que somam aproximadamente 3.000 unidades no país, é prioritário, o que revela o potencial para investimentos públicos e privados em soluções regionais de destinação final ambientalmente adequada. Além disso, a Fbrer também atuará para superar as questões regulatórias e do compartilhamento de tecnologias, a fim de aumentar a segurança jurídica e econômica do setor.

Prevê-se que o setor de resíduos irá requerer cerca de R\$ 15 bilhões de investimentos nos próximos dez anos para fomentar a recuperação energética, além da realização de aprimoramentos na parte operacional dos aterros sanitários, tendo em vista que o tempo de vida útil de um aterro é em torno de 25 anos.

Em termos de potencial do país com base na geração de resíduos, segundo estudo realizado pela Abrelpe e Abiogás, o Brasil possui potencial de geração de 7,6 bilhões de Nm³/ano (referentes ao biogás captado, que representa cerca de 75% do volume gerado). Quanto ao biometano, esse potencial é de 3,9 bilhões de Nm³/ano e o de energia elétrica de 14,40 TWh/ano.

Já para indústria cimenteira, o cenário é de aumento na

utilização de resíduos para geração de energia, no qual o consumo de coque de petróleo deve cair de 85% para 45%, contribuindo para diminuição de custos e emissões de CO₂.

Entendendo o potencial e em busca de alavancar o setor com a recuperação energética de resíduos, o Governo Federal editou o Decreto 10.387, de 5 de junho de 2020, que alterou o Decreto 8.874, de 11 de outubro de 2016, para incentivar o financiamento de projetos de infraestrutura com benefícios ambientais e sociais. Para tanto, listou projetos de limpeza urbana, manejo de resíduos sólidos e de geração de energia a partir dos resíduos como prioritários e elegíveis para emissão de debêntures com benefícios fiscais.

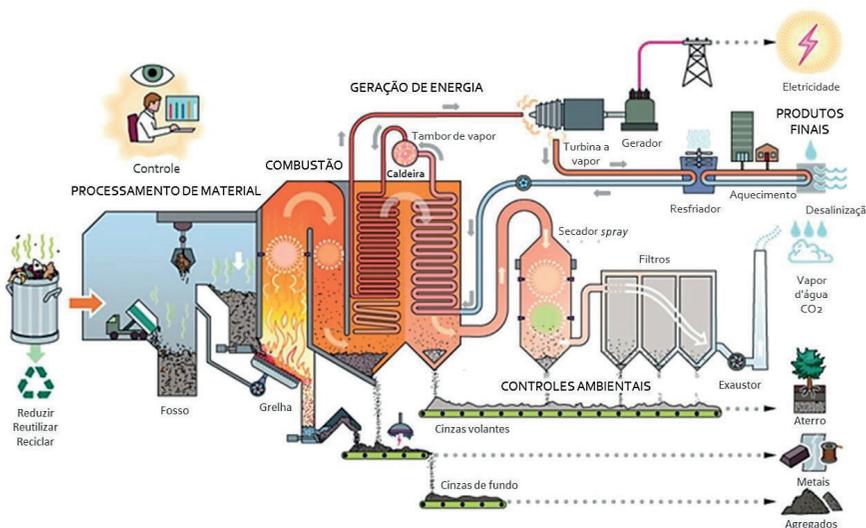
2. Rotas tecnológicas para recuperação energética de resíduos

2.1 • Tratamento térmico

• O que é?

O tratamento térmico é um tipo de tecnologia de **queima controlada de resíduos**, que permite a redução de seu volume e massa e torna-os inertes por meio da combustão. Em termos de materiais de saída, são gerados vapor d'água, dióxido de carbono e calor. Além disso, o processo também resulta na geração de dois tipos de cinzas, as de fundo e as volantes (Figura 2).

Figura 2. Mapa conceitual do funcionamento de uma planta de incineração.



Fonte: GLOBAL Business & Development Construction LTD, sem data.

A temperatura de combustão dos resíduos ocorre entre 850 e 1.450°C, concomitantemente à liberação de energia, e a quantidade mínima para o funcionamento de uma planta de incineração, visando a otimização da economia de escala, é de 500 toneladas/dia² (cerca de 170.000 t/ano). Para queima, é necessário um poder calorífico inferior (PCI) mínimo que torne possível uma reação térmica em cadeia (valor médio de pelo menos 6 MJ/kg em todas as estações e um valor médio inferior de 7 MJ/kg/ano³, que correspondem a 1.450 e 1.700 kcal/kg, respectivamente). Quanto maior a qualidade dos resíduos (em termos de composição química e características físicas e térmicas), melhor será a combustão, podendo viabilizar uma combustão autotérmica, isto é, sem a necessidade de combustível adicional, que é a forma ideal de funcionamento

de uma planta de incineração.

Sua vida útil é em torno de 30 anos e sua operação anual é de cerca de 330-340 dias, com pausas de manutenção variando de acordo com as necessidades operacionais.

• Materiais de entrada e materiais de saída

Os materiais de entrada (materiais de entrada) de uma planta de tratamento térmico podem ser os resíduos sólidos urbanos, alguns resíduos industriais e comerciais, além dos combustíveis derivados de Resíduos Sólidos Urbanos para Fins Energéticos (RSUE). As quantidades de materiais de saída gerados dependem intrinsecamente dos materiais de entrada introduzidos, mas os valores médios produzidos podem ser vistos na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3. Materiais de entrada necessários e materiais de saída gerados pelas plantas de recuperação energética por incineração.

Materiais de entrada	Materiais de saída	
Resíduos Sólidos Urbanos	Eletricidade e/ou calor	Entre 475 e 800 kWh por tonelada de RSU e 1,9 a 2,4 t de vapor.
Resíduos Industriais e Comerciais CDR	Cinzas de fundo/escória	Cerca de 20 a 25%
	Cinzas volantes/em suspensão	Cerca de 2 a 3%
	Gases diversos	Quantidades variáveis

Fonte: Elaborada a partir do Guia de Recuperação Energética da CNI (2019) e Caderno Temático de Recuperação Energética de RSU, PLANSAB (2019).

Os materiais não combustíveis (principalmente vidros e metais) e com alta umidade (orgânicos) diminuem o poder

calorífico dos resíduos de entrada, reduzindo a eficiência da combustão e causando aumento das emissões e das cinzas de fundo decorrentes de materiais inertes, que devem ser tratadas e dispostas corretamente. A tabela a seguir sumariza o impacto da segregação prévia (triagem) de alguns materiais da massa de entrada no incinerador.

Tabela 4. Impacto da remoção de alguns materiais no processo previamente à incineração.

Triagem	Impacto
Resíduos orgânicos	Redução da umidade Aumento do poder calorífico
Resíduos volumosos	Diminuição dos esforços para fragmentação dos resíduos
Resíduos perigosos (ex: eletroeletrônicos, pilhas e baterias)	Diminuição dos esforços para remoção de metais pesados tóxicos voláteis das emissões (ex: mercúrio). Redução da concentração de poluentes tóxicos das cinzas volantes e de fundo (ex: cádmio, chumbo e zinco).
Papel, papelão e plástico	Redução do poder calorífico Redução da emissão de cloro (ex: oriundo do PVC)
Vidros, metais, cinzas e minerais de RCC	Aumento do poder calorífico Diminuição da quantidade de cinzas de fundo e metais recuperáveis

Fonte: Adaptado de Waste-to-Energy Options in Municipal Solid Waste Management da GIZ (2017).

• Aplicabilidade

A tecnologia de tratamento térmico por incineração já é utilizada em países europeus e asiáticos há mais de 30 anos, experimentando diversos tipos de desafios, aplicações, problemas e soluções, dos quais muitos aprendizados foram adquiridos e devem servir de exemplo para países que estejam iniciando seu uso, como é o caso de toda a América Latina, incluindo o Brasil.

Tomando por base o conhecimento adquirido na aplicação deste tipo de tratamento em outros países, bem como algumas ponderações já realizadas por entidades brasileiras quanto às condições de aplicação em território nacional, é importante analisar, principalmente, os seguintes aspectos (GIZ, 2017; CNI, 2019; Plansab, 2019):

- Sistema de gestão de resíduos eficiente e consolidado, que priorize as etapas anteriores da hierarquia.
- Deve haver uma base tecnológica e de fiscalização para um sistema de monitoramento ambiental adequado.
- Existência de recursos financeiros que assegurem a instalação, operação e manutenção adequada durante toda a vida útil da planta.
- Existência de estudos da composição gravimétrica de resíduos.

- Segurança jurídica que permita investimentos.

Assegurados os aspectos mencionados, o próximo passo será entender como aproveitar os potenciais e as oportunidades para o estabelecimento da planta.

· Experiências internacionais e nacionais

Como citado anteriormente, diferentes países incorporam a incineração como parte de seus sistemas de gestão de resíduos. Nesse sentido, o presente capítulo apresenta dois exemplos de plantas, um internacional e um nacional, a saber: Centro Integral de Valorização de Resíduos de Maresme, na Espanha, e a Unidade de Recuperação Energética em Barueri, São Paulo, que ainda não está em operação. Um resumo com as principais características de cada uma é apresentado a seguir.

Centro Integral de Valorização de Resíduos de Maresme - Barcelona, Espanha

O Centro Integral de Valorização de Resíduos de Maresme, localizado na cidade de Barcelona, Espanha, possui uma unidade de recuperação energética por incineração acoplada a uma planta de tratamento mecânico biológico (TMB), operando em uma solução regionalizada e com alto processamento de resíduos. **Recebe resíduos de 28 municípios integrantes do Consórcio para Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos de Maresme**, além, também, de

uma parte de resíduos industriais. A unidade contempla a triagem mecânica, metanização úmida e compostagem para tratamento dos orgânicos. O rejeito da planta é enviado ao sistema de tratamento térmico, com capacidade de recebimento de até 104.500 t/ano com poder calorífico entre 2.600 e 2.800 kcal/kg. O sistema exporta aproximadamente 80 GWh/ano para a rede elétrica da cidade, o que equivale ao consumo interno de 85.000 habitantes. Além disso, fornece energia térmica para a rede "Green tube", com 7,5 t/hora de vapor que é enviado para um hospital da região.

As principais informações sobre a planta estão sumarizadas na tabela a seguir.

Tabela 5. Informações gerais sobre a gestão de resíduos local e da planta de recuperação energética.

Centro Integral de Valorização de Resíduos de Maresme	
Capacidade de tratamento projetada	140.000 t/ano
Previsão do poder calorífico dos combustíveis	2.800 kcal/kg (11,7 MJ/kg)
Número de linhas de processamento	2
Produção energética	115.000 MWh/ano
Autoconsumo energético	30.000 MWh/ano
Venda de energia	85.000 MWh/ano
Coeficiente de geração energética	820 kWh/t RSU

Fonte: Site oficial do Consorci per al tractament de residus sòlids urbans del Maresme (acesso em 28 de julho de 2020).

Usina de Tratamento Térmico de Resíduos Sólidos Urbanos e Recuperação de Energia de Barueri - São Paulo, Brasil

A usina de tratamento térmico e recuperação energética de Barueri é a primeira planta de incineração de resíduos domésticos no Brasil, e está em fase de implementação. O empreendimento é resultado de uma Parceria Público-Privada (PPP) entre a Prefeitura de Barueri e a empresa Foxx Haztec, com contrato de concessão de 30 anos (tempo de vida útil da planta).

A URE será **capaz de processar 825 t/dia de resíduos domiciliares** oriundos dos municípios de Barueri, Carapicuíba e Santana de Parnaíba, **com potência instalada de 20 MW de energia**, da qual parte será destinada à própria subsistência da planta e o seu excedente será exportado para o sistema elétrico público, sendo capaz de abastecer uma população de 240.000 habitantes. Com sua implantação, o município de Barueri terá um menor volume de resíduos enviado à disposição final, que hoje é a Central de Tratamento de Resíduos – TECIPAR, em Santana de Parnaíba, a 20 km de distância.

2.2 · Coprocessamento

· O que é?

Tecnologia que consiste em reaproveitar os resíduos industriais, agrícolas e sólidos urbanos, entre outros, na cadeia produtiva, em substituição aos combustíveis fósseis e matérias primas utilizados na fabricação do cimento. Esta tecnologia

teve a sua origem em meados de 1970 e, no Brasil, mais precisamente, no final da década de 1990. No país, os principais resíduos utilizados até então, são os perigosos, pneus inservíveis e biomassas, porém, a partir de 2019 alguns fornos já começaram a coprocessar a fração não reciclável dos Resíduos Sólidos Urbanos - RSU.

Os fornos de cimento possuem características favoráveis à queima de resíduos, como altas temperaturas, superior a 1.450°C, longo tempo de residência, atmosfera oxidante, o que permite a destruição total dos componentes orgânicos e a não geração de cinzas, entre outras.

Figura 3. Pneu inservível sendo transportado ao forno.



Fonte: Banco de imagem ABCP

Figura 4. Biomassas coprocessadas (caroço de açaí)



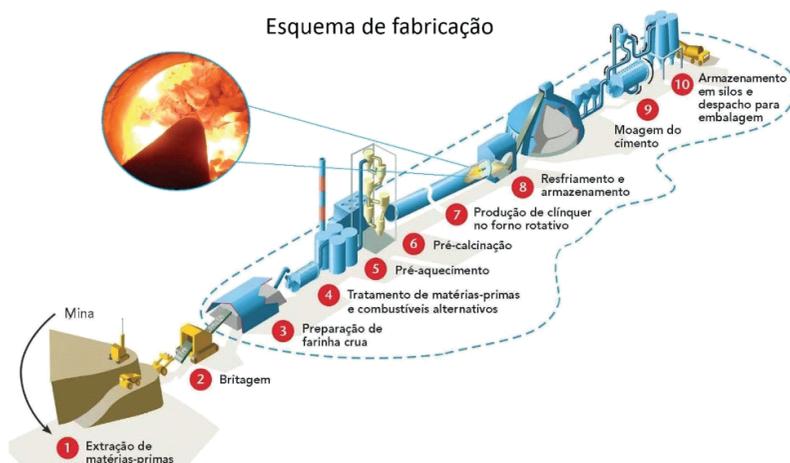
Fonte: Roadmap Tecnológico do Cimento: Potencial redução das emissões de carbono da Indústria do Cimento - Brasil até 2050. Edição 2019.

Figura 5. Forno rotativo para a produção de clínquer



Fonte: Roadmap Tecnológico do Cimento: Potencial redução das emissões de carbono da Indústria do Cimento - Brasil até 2050. Edição 2019.

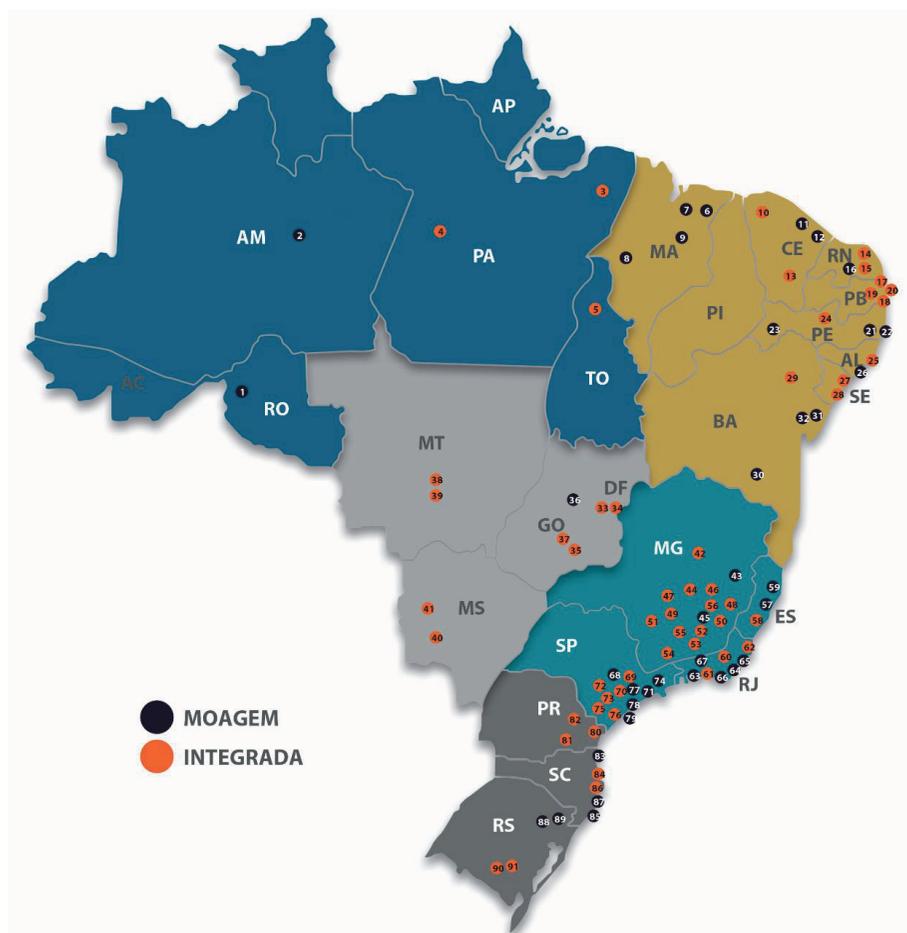
Figura 6. Processo de fabricação do cimento



Fonte: Roadmap Tecnológico do Cimento: Potencial redução das emissões de carbono da Indústria do Cimento - Brasil até 2050. Edição 2019.

Tem como principal objetivo dar uma solução definitiva aos resíduos de maneira sustentável, em linha com a economia circular, já que estes, são reinseridos na cadeia produtiva, seja pela substituição das principais matérias primas utilizadas na fabricação do cimento ou utilizando-os como substituto do coque de petróleo, combustível de origem fóssil não renovável e amplamente utilizado nas diversas fábricas localizadas em todo o território Nacional.

Figura 7. . Mapa e localização das fábricas de cimento no Brasil



Fonte. Sindicato Nacional da Indústria do Cimento – SNIC

REGIÃO NORTE				
Nº	FÁBRICA	MUNICÍPIO	UF	GRUPO INDUSTRIAL
1	Porto Velho	Porto Velho	RO	Votorantim
2	Mizu	Manaus	AM	Mizu
3	Cibrasa	Capanema	PA	João Santos
4	Primavera	Primavera	PA	Votorantim
5	Xambioá	Xambioá	TO	Votorantim

REGIÃO NORDESTE				
Nº	FÁBRICA	MUNICÍPIO	UF	GRUPO INDUSTRIAL
6	São Luís	São Luís	MA	Votorantim
7	Cimento Bravo	São Luís	MA	Cimar
8	Cimento Verde do Brasil	Açailândia	MA	Cimento Verde do Brasil
9	Icibra	Bacabeira	MA	Icibra
10	Sobral	Sobral	CE	Votorantim
11	Pecém	Pecém	CE	Votorantim
12	Apodi	Caucáia	CE	Apodi
13	Apodi	Quixeré	CE	Apodi
14	Itapetinga	Mossoró	RN	João Santos
15	Mizu	Baraúna	RN	Mizu
16	Cimento Elo	Currais Novos	RN	Revemar
17	Inter cement	João Pessoa	PB	Inter cement
18	Lafargeholcim	Caaporã	PB	Lafargeholcim
19	Cimento Elizabeth	Alhandra	PB	Cimento Elizabeth
20	Cimento Nacional	Pitimbu	PB	Cimento Nacional
21	Inter cement	Cabo de Sto. Agostinho	PE	Inter cement
22	Cimento Forte	Cabo de Sto. Agostinho	PE	Cimento Forte
23	Poty Paulista	Paulista	PE	Votorantim
24	Pajeú	Carnaíba	PE	Cimento Pajeú
25	Inter cement	São M. dos Campos	AL	Inter cement
26	Cimento Zumbi	Marechal Deodoro	AL	Cimento Zumbi
27	Laranjeiras	Laranjeiras	SE	Votorantim
28	Mizu	Pacatuba	SE	Mizu
29	Inter cement	Campo Formoso	BA	Inter cement
30	Inter cement	Brumado	BA	Inter cement
31	Valobras	Candeias	BA	Valobras
32	Lafargeholcim	Candeias	BA	Lafargeholcim

REGIÃO CENTRO-OESTE				
Nº	FÁBRICA	MUNICÍPIO	UF	GRUPO INDUSTRIAL
33	Ciplan	Sobradinho	DF	Ciplan
34	Sobradinho	Sobradinho	DF	Votorantim
35	Inter cement	Cozarina	GO	Inter cement
36	Lafargeholcim	Cocalzinho de Góias	GO	Lafargeholcim
37	Edealina	Edealina	GO	Votorantim
38	Nobres	Nobres	MT	Votorantim
39	Cuiabá	Cuiabá	MT	Votorantim
40	Inter cement	Bodoquena	MS	Inter cement
41	Corumbá	Corumbá	MS	Votorantim

REGIÃO SUDESTE				
Nº	FÁBRICA	MUNICÍPIO	UF	GRUPO INDUSTRIAL
42	Lafargeholcim	Montes Claros	MG	Lafargeholcim
43	Inter cement	Santana do Paraíso	MG	Inter cement
44	Cimento Nacional	Matozinhos	MG	Cimento Nacional
45	Mizu	Matozinhos	MG	Mizu
46	Liz	Vespasiano	MG	Liz
47	Lafargeholcim	Pedro Leopoldo	MG	Lafargeholcim
48	Inter cement	Pedro Leopoldo	MG	Inter cement
49	Cimento Nacional	Arcos	MG	Cimento Nacional
50	CSN	Arcos	MG	CSN
51	Itaú de Minas	Itaú de Minas	MG	Votorantim
52	Tupi	Carandaí	MG	Tupi
53	Lafargeholcim	Barroso	MG	Lafargeholcim
54	Inter cement	Ijaci	MG	Inter cement
55	Cimento Nacional	Sete Lagoas	MG	Cimento Nacional
56	Carmocal	Pains	MG	Mineradora Carmocal
57	Lafargeholcim	Serra	ES	Lafargeholcim
58	Itabira	C. de Itapemirim	ES	João Santos
59	Mizu	Vitória	ES	Mizu
60	Rio Negro	Cantagalo	RJ	Votorantim
61	Cimento Nacional	Cantagalo	RJ	Cimento Nacional
62	Lafargeholcim	Cantagalo	RJ	Lafargeholcim
63	Tupi	Volta Redonda	RJ	Tupi
64	CSN	Volta Redonda	RJ	CSN
65	Mizu	Rio de Janeiro	RJ	Mizu
66	Santa Cruz	Itaguaí	RJ	Votorantim
67	Lafargeholcim	Rio de Janeiro	RJ	Lafargeholcim
68	Lafargeholcim	Sorocaba	SP	Lafargeholcim
69	Santa Helena	Votorantim	SP	Votorantim
70	Salto	Salto de Pirapora	SP	Votorantim
71	Cubatão	Cubatão	SP	Votorantim
72	Lafargeholcim	Itapeva	SP	Lafargeholcim
73	Ribeirão Grande	Ribeirão Grande	SP	Votorantim
74	Tupi	Mogi das Cruzes	SP	Tupi
75	Inter cement	Apiai	SP	Inter cement
76	Inter cement	Cajati	SP	Inter cement
77	Inter cement	Jacarei	SP	Inter cement
78	Mizu	Mogi das Cruzes	SP	Mizu
79	SP Cim	Suzano	SP	SP Cim

REGIÃO SUL				
Nº	FÁBRICA	MUNICÍPIO	UF	GRUPO INDUSTRIAL
80	Rio Branco	Rio Branco Do Sul	PR	Votorantim
81	Itambé	Balsa Nova	PR	Itambé
82	Supremo	Adrianoópolis	PR	Secil
83	Itajaí	Itajaí	SC	Votorantim
84	Vidal Ramos	Vidal Ramos	SC	Votorantim
85	Imbituba	Imbituba	SC	Votorantim
86	Supremo	Pomerode	SC	Secil
87	Pozosul	Capivari de Baixo	SC	Pozosul
88	Inter cement	Nova Santa Rita	RS	Inter cement
89	Esteio	Esteio	RS	Votorantim
90	Inter cement	Candiota	RS	Inter cement
91	Pinheiro Machado	Pinheiro Machado	RS	Votorantim

Fonte. Sindicato Nacional da Indústria do Cimento – SNIC

Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) – Material de Entrada

Os RSU são resultantes de atividades domésticas e comerciais realizadas nas cidades. Trata-se, portanto, do lixo doméstico, que tem composição altamente variável, dependendo da localização, do clima e do grau de desenvolvimento econômico e social de cada país. Devido à sua heterogeneidade, estado físico, odor e baixo valor calorífico, o lixo doméstico in natura não está pronto para ser recebido pelas fábricas de cimento. Para que possa ser utilizado nos fornos das plantas de cimento, o RSU necessariamente deverá passar por um processo de preparo e transformação, com o intuito de atender aos parâmetros técnicos e legais.

Unidade de Preparo de Resíduos Sólidos Urbanos para fins Energéticos (UP-RSUE)

O RSU precisa passar por um processo de preparo para que atenda a legislação e as especificações técnicas mínimas necessárias para serem consumidos nas fábricas de cimento. Sendo assim, são necessários investimentos para implantação dessas unidades e que estejam relativamente próximas às fábricas de cimento.

Figura 8. Resíduo sólido urbano - RSU



Fonte: Panorama do Coprocessamento 2021 - Can Stock Photo / James63

Preparo do Resíduo Sólido Urbano para Fins Energéticos (RSUE) - Material de saída

Para tratar os Resíduos Sólidos Urbanos, é essencial classificá-los previamente, para então apontar o melhor tipo de tratamento a ser dado a cada material. Para isso, é primordial entender a composição dos resíduos por meio de uma análise gravimétrica, método que envolve a separação e a pesagem de um elemento ou um composto do elemento na forma mais pura possível.

Tecnicamente, há soluções diversas desde as mais básicas às mais complexas e tem sido aplicáveis em todo o mundo. Considerando a baixa taxa de Gate Fee (remuneração paga

para o gerenciamento e tratamento do RSU) em países com regulamentações emergentes, como ainda é o caso do Brasil, tecnologias simples ou processos mais seletivos devem ser levados em consideração para produzir o RSUE, objetivando atender aos parâmetros técnicos mínimos aceitáveis para que possam ser utilizados nos fornos de cimento, bem como para tornar os projetos economicamente viáveis, levando em consideração o baixo valor calorífico do RSU. Como ponto de atenção, vale destacar que essas tecnologias mais simplificadas e/ou processos de seleção manual podem reduzir a qualidade do RSUE para serem utilizados nos fornos de cimento e, conseqüentemente, a quantidade possível de ser coprocessada.

Figura 9. Resíduo Sólido Urbano para Fins Energéticos (RSUE)



Fonte: Energías Renovables -
<https://www.energias-renovables.com/eficiencia/cemex-apuesta-por-el-uso-de-combustibles>

Tratamento Mecânico de Resíduos

O tratamento mecânico de resíduos é projetado para recuperar a fração dos Resíduos Sólidos Urbanos e Comerciais / Industriais não Perigosos não biodegradáveis. Neste processo não ocorrem reações químicas entre os componentes, como acontece nos muitos casos do tratamento térmico.

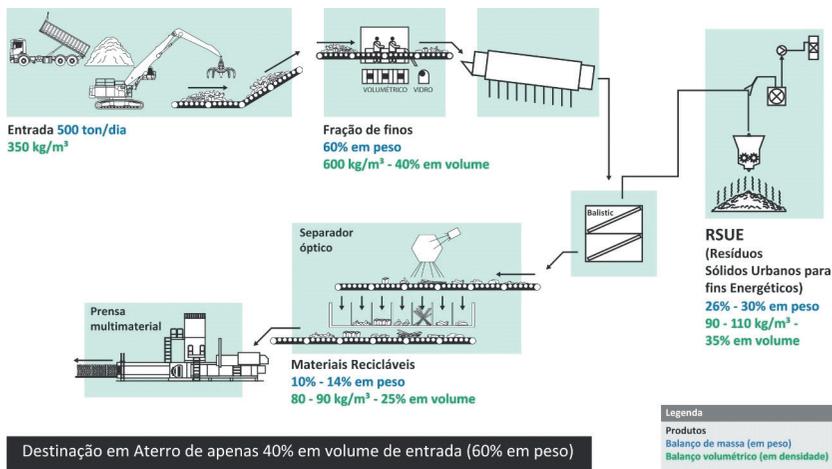
O objetivo do tratamento mecânico é separar e reduzir os resíduos para um tamanho de partícula que permita sua utilização no forno de cimento. Além disso, busca-se remover componentes indesejados, visando adequar as características de qualidade do resíduo às especificações dos fornos, e recuperar materiais recicláveis de maior valor. Note-se que existe uma diferença na característica de injeção dos resíduos conforme a etapa do processo. O queimador principal, parte frontal do forno de cimento, requer um tamanho de partícula relativamente menor, enquanto a alimentação do calcinador (ou torre de pré-aquecimento), parte posterior do forno, é menos exigente quanto ao tamanho da partícula. A sofisticação da tecnologia aplicada depende, portanto, das especificações do RSUE.

As tecnologias de trituração dos resíduos têm progredido constantemente nos últimos 20 anos. A proteção dos trituradores, por meio de pré-triagem ou segregação, melhora a eficiência da linha de trituração e reduz os custos de manutenção com a remoção de grandes peças, sobretudo as metálicas, presentes nos fluxos de resíduos que não podem ser

triturados. A escolha do projeto estará diretamente relacionada às diversas variáveis, que definirão os tipos de equipamentos e as etapas do processo, até a produção final do material a ser enviado para a fábrica de cimento para coprocessamento.

O balanço de massa (Figura 10) visa demonstrar de maneira simples as frações que podem ser retiradas durante o processo de preparo do RSUE. A fração orgânica, que é maior parcela do RSU, representa cerca de 60% do peso e usualmente não é utilizada para a produção do RSUE em função da alta umidade; já os recicláveis são extraídos e representam cerca de 15% da quantidade de entrada. O restante, ou seja, cerca de 25% são transformados em RSUE, que poderá ser consumido pelas fábricas de cimento, em vez de ser disposto em aterro.

Figura 10. Balanço de massa desde a entrada do RSU à geração do RSUE



Fonte. Fornecido por TECSORT - Representante da STADLER Anlagenbau GmbH no Brasil.

A seguir são apresentados três modelos diferentes de Unidade de Preparo de Resíduos Sólidos Urbanos – UP-RSUE, que visam atender às diferentes realidades locais em relação às limitações de investimentos, despesas e tipos de materiais e quantidades de recicláveis que serão extraídos do processo. Quanto mais completa for a planta de tratamento, maior será a quantidade triada de recicláveis e melhor será a qualidade do RSUE, sendo o custo de investimento mais alto.

Em nenhum dos três modelos foi considerada a instalação do triturador, equipamento essencial para reduzir o tamanho das partículas de resíduos, para que o RSU seja de fato transformado em RSUE e possa ser utilizado nos fornos de cimento. Como todas as plantas são projetadas em módulos, este equipamento pode ser incorporado ao projeto ou ser instalado em outra área, por exemplo, na própria fábrica de cimento, que ficará responsável pela etapa de trituração.

Tabela 6. Modelos – Unidade de Preparo de Resíduos Sólidos Urbanos – UP-RSUE

<p>Linha Básica</p> 	<p>Linha Intermediária</p> 	<p>Linha Completa</p> 
Equipamentos Projetados		
Alimentador primário	Alimentador primário	Alimentador primário
Plataforma de triagem primária	Plataforma de triagem primária	Plataforma de triagem primária
Peneira giratória (Tromel)	Peneira giratória (Tromel)	Peneira giratória (Tromel)
Plataforma de triagem secundária	Plataforma de triagem secundária	Plataforma de triagem secundária
Plataforma de triagem manual	Rasga sacos Separador Balístico	Rasga sacos Separador Balístico Separador óptico de rolantes com recirculação

Linha Básica 	Linha Intermediária 	Linha Completa 
Equipamentos Projetados		
Correias de transporte	Plataforma de triagem de rolantes	Plataforma de triagem de rolantes
	Plataforma de triagem de planares	Plataforma de triagem de planares
	Separador de ferrosos	Separador de ferrosos
	Prensa de recicláveis	Prensa de recicláveis
	Correias de transporte	Correias de transporte
Etapa 1		
<p>O início do processo poderá ser por meio de uma pá carregadeira ou outro equipamento similar que descarregará o material na Correia de Alimentação</p>	<p>O início do processo poderá ser por meio de uma pá carregadeira ou outro equipamento similar que descarregará o material na Correia de Alimentação</p>	<p>O início do processo poderá ser por meio de uma pá carregadeira ou outro equipamento similar que descarregará o material na Correia de Alimentação</p>
Etapa 2		
<p>O material seguirá até a Triagem Primária, onde operários farão a remoção dos materiais impróprios, volumosos e vidros</p>	<p>O material seguirá até a Triagem Primária, onde operários farão a remoção dos materiais impróprios, volumosos e vidros</p>	<p>O material seguirá até a Triagem Primária, onde operários farão a remoção dos materiais impróprios, volumosos e vidros</p>
Etapa 3		
<p>Os materiais não removidos continuarão no processo e seguirão até a Peneira Giratória (3) que irá peneirar a 80 mm. A fração fina será composta basicamente por materiais orgânicos, terra, areia e outros materiais pequenos que passarão através da malha de peneiramento.</p>	<p>Os materiais não removidos continuarão no processo e seguirão até a Peneira Giratória (3) que irá peneirar a 80 mm. A fração fina será composta basicamente por materiais orgânicos, terra, areia e outros materiais pequenos que passarão através da malha de peneiramento.</p>	<p>Os materiais não removidos continuarão no processo e seguirão até a Peneira Giratória (3) que irá peneirar a 80 mm. A fração fina será composta basicamente por materiais orgânicos, terra, areia e outros materiais pequenos que passarão através da malha de peneiramento.</p>

<p style="text-align: center;">Linha Básica</p> 	<p style="text-align: center;">Linha Intermediária</p> 	<p style="text-align: center;">Linha Completa</p> 
Etapa 4		
<p>A fração leve com dimensões maiores que não passou pela malha da Peneira Giratória, seguirá o processo até chegar à Plataforma de Triagem Secundária onde operários irão retirar materiais volumosos, impróprios e papelão</p>	<p>A fração leve com dimensões maiores que não passou pela malha da Peneira Giratória, seguirá o processo até chegar à Plataforma de Triagem Secundária onde operários irão retirar materiais volumosos, impróprios e papelão, que serão descarregados no rasga sacos</p>	<p>A fração leve com dimensões maiores que não passou pela malha da Peneira Giratória, seguirá o processo até chegar à Plataforma de Triagem Secundária onde operários irão retirar materiais volumosos, impróprios e papelão, que serão descarregados no rasga sacos</p>
Etapa 5		
<p>Após a seleção, os materiais serão descarregados em outra correia que os levará até a Correia de Triagem Manual. Nela operários dispostos ao longo da correia farão a seleção manual dos materiais e lançarão em calhas para o armazenamento de cada produto antes da prensagem</p>	<p>O Rasga Sacos é um equipamento que possui um rotor com garras. Ele fará a abertura e esvaziamento dos sacos que ainda estiverem fechados neste ponto até serem descarregados no Separador Balístico</p>	<p>O Rasga Sacos é um equipamento que possui um rotor com garras. Ele fará a abertura e esvaziamento dos sacos que ainda estiverem fechados neste ponto até serem descarregados no Separador Balístico</p>
Etapa 6		
	<p>O Separador Balístico é um equipamento com pás oscilatórias e malhas de peneiramento de 55 mm com inclinação ajustável, que divide os materiais em 3 fluxos diferentes</p>	<p>O Separador Balístico é um equipamento com pás oscilatórias e malhas de peneiramento de 55 mm com inclinação ajustável, que divide os materiais em 3 fluxos diferentes</p>
Etapa 7		
	<p>O primeiro fluxo refere-se aos finos que são pequenos pedaços de material que passam através da malha de perfuração das pás de 55 mm, tais como: tampas, pedras, terra, orgânicos e materiais impróprios pequenos, considerados rejeitos</p>	<p>O primeiro fluxo refere-se aos finos que são pequenos pedaços de material que passam através da malha de perfuração das pás de 55 mm, tais como: tampas, pedras, terra, orgânicos e materiais impróprios pequenos, considerados rejeitos</p>

<p>Linha Básica</p> 	<p>Linha Intermediária</p> 	<p>Linha Completa</p> 
Etapa 8		
	<p>Devido ao movimento oscilatório e inclinação das pás, o restante do material será dividido em outros dois fluxos: Rolantes (3D) e Planares (2D), cada um deles distribuído em correia separada</p>	<p>Devido ao movimento oscilatório e inclinação das pás, o restante do material será dividido em outros dois fluxos: Rolantes (3D) e Planares (2D), cada um deles distribuído em correia separada</p>
Etapa 9		
	<p>Para os materiais planares (2D) operários dispostos ao longo da correia farão a seleção manual dos materiais e os lançarão em calhas para o armazenamento de cada produto antes da prensagem</p>	<p>Para os materiais planares (2D) operários dispostos ao longo da correia farão a seleção manual dos materiais e os lançarão em calhas para o armazenamento de cada produto antes da prensagem</p>
Etapa 10		
	<p>O terceiro fluxo a sair do Separador Balístico é o dos materiais rolantes (3D). Esse fluxo contém os materiais rígidos que rolam para a parte mais baixa das pás devido à inclinação e à movimentação delas. Neste fluxo estarão as garrafas e materiais de PET, PP, PAD e tetra dentre outros</p>	<p>O terceiro fluxo a sair do Separador Balístico é o dos materiais rolantes (3D). Esse fluxo contém os materiais rígidos que rolam para a parte mais baixa das pás devido à inclinação e à movimentação delas. Neste fluxo estarão as garrafas e materiais de PET, PP, PAD e tetra dentre outros</p>
Etapa 11		
	<p>Na sequência os materiais seguirão até a Correia de Triagem Manual de Rejeito de Rolantes. Nela, operários dispostos ao longo da correia farão a seleção manual dos materiais e os lançarão em calhas para o armazenamento de cada produto antes da prensagem</p>	<p>Os materiais seguirão até o Separador Ótico, que tem a função de separar os plásticos rígidos em quatro tipos diferentes: A, B, C e D</p>

<p>Linha Básica</p> 	<p>Linha Intermediária</p> 	<p>Linha Completa</p> 
<p>Etapa 12</p>		
		<p>Os materiais serão distribuídos em canais separados e seguirão por correias até a Triagem Manual. Nela, operários dispostos ao longo da correia farão a seleção manual dos materiais e os lançarão em calhas para o armazenamento de cada produto antes da prensagem</p>
<p>Etapa 13</p>		
		<p>Os materiais que não forem retirados cairão ao final da correia em duas baias distintas, para armazenagem e posterior prensagem</p>

Fonte. Fornecido por TECSORT - Representante da STADLER Anlagenbau GmbH no Brasil.

Observação: A Instalação do módulo complementar de trituração para a produção do Resíduo Sólido Urbano para Fins Energéticos - RSUE.

O módulo de trituração faz parte da última etapa do processo para a produção do RSUE e, conforme dito antes, pode ser incorporado a qualquer uma das linhas apresentadas ou, então, ser instalado em outro local, de acordo com as necessidades regionais.

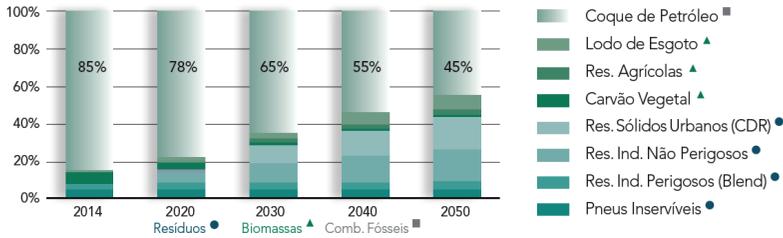
Os materiais triados e que se tornarão RSUE são plásticos rígidos e flexíveis de diferentes polímeros não classificados como recicláveis, além de papel, papelão, madeira de

compensados, tecido, calçados e borracha. Materiais com alta taxa de cloro, metálicos e úmidos não serão destinados à trituração e produção por não estarem em conformidade com os pré-requisitos para sua fabricação. A trituração para a produção do RSUE pode ser feita nas dimensões de 25 mm e 50 mm, esta última sendo a mais utilizada. Pelo fato de os materiais já terem passado pela pré-triagem, os mesmos poderão ser triturados em apenas uma só passagem pelo triturador.

• Aplicabilidade

Sob coordenação do SNIC (Sindicato Nacional da Indústria do Cimento) e da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), foi publicado o Roadmap Tecnológico do Cimento, com a colaboração da IFC (International Finance Corporation), IEA (International Energy Agency) e WBCSD (World Business Council for Sustainable Development). O Roadmap destaca as principais rotas para a mitigação do dióxido de carbono (CO₂), sendo a tecnologia de coprocessamento parte fundamental neste processo de redução, cuja ambição é diminuir a utilização de combustível fóssil nas fábricas de cimento de 85% (2014) para 45% até 2050.

Gráfico 6. Projeção de combustíveis alternativos e biomassas – 2014 a 2050



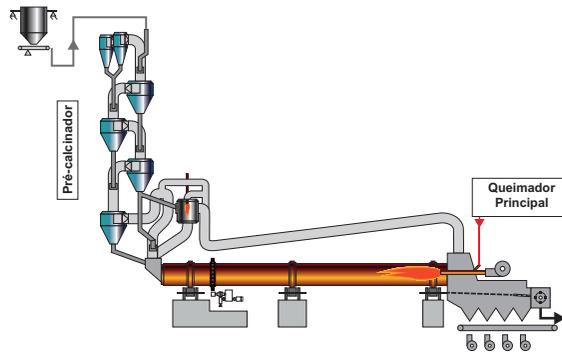
Mensagem-chave: A participação de combustíveis fósseis não renováveis na produção de cimento deverá decrescer de 85% para 45% no “Cenário 2°C”, em função do uso crescente de resíduos e biomassas.

Fonte: Roadmap Tecnológico do Cimento: Potencial redução das emissões de carbono da Indústria do Cimento - Brasil até 2050. Edição 2019.

Em menos de um ano após o lançamento do Roadmap Tecnológico do Cimento, foi promovido um segundo estudo, chamado internamente como “Projeto Clusters”, com o objetivo de identificar os principais obstáculos e desafios existentes nas diversas regiões do país. Como resultado, foram identificadas sete regiões do Brasil - PR, MG, GO, MT, DF, PB e CE, que representam cerca de 50% da capacidade de utilização do RSUE pelo setor.

É importante esclarecer que o RSUE pode ser utilizado em dois pontos distintos do forno: o queimador principal e o pré-calcinador, conforme mostra a figura 11. Normalmente, a preparação do RSUE para o queimador principal é mais cara, dada a necessidade de redução do tamanho dos resíduos e o maior valor energético necessários. Na maior parte das vezes, as fábricas de cimento precisarão realizar investimentos consideráveis para que os RSUE

Figura 11. Esquema do forno onde mostra o queimador principal e o pré-calcinador



Fonte: Ilustração Sergio Colotto

• Experiências internacionais e nacionais

UP-RSUE ao redor do mundo

Figura 12. Ecomarc IV, Barcelona, Espanha



Fonte. Fornecido por TECSORT - Representante da STADLER Anlagenbau GmbH no Brasil.

Figura 13. Sogama, Galícia, Espanha



Fonte. Fornecido por TECSORT - Representante da STADLER Anlagenbau GmbH no Brasil.

Uma das plantas mais eficientes do mundo - separa 3.000 ton/dia

Figura 14. ROAF, Oslo, Noruega



Fonte. Fornecido por TECSORT - Representante da STADLER Anlagenbau GmbH no Brasil.

Prêmio de Inovação para a usina de triagem de resíduos totalmente automatizado pela Câmara Alemã de Comércio-norueguês

Figura 15. Stora Enso, Elienburg, Alemanha



Fonte. Fornecido por TECSORT - Representante da STADLER Anlagenbau GmbH no Brasil.

2.3 · Digestão anaeróbia

· O que é?

O biogás é o resultado da degradação anaeróbia de resíduos orgânicos, processo que ocorre naturalmente na natureza e que gera uma mistura composta por 50 a 70% de metano (CH₄). O metano é um gás com alta carga energética, sendo o principal componente do gás natural de origem fóssil, e por isso pode ser utilizado para fins de geração de energia. Ao se realizar o processo de decomposição anaeróbia de forma controlada, em sistemas específicos conhecidos como biodigestores anaeróbios, é possível aproveitar o biogás como uma fonte de energia. Além de fonte renovável de energia, o biogás tem como principal atrativo sua flexibilidade de aplicação, seja como combustível veicular, como insumo para

geração de energia elétrica e térmica e no uso doméstico de gás. Além disso, é considerado um recurso energético distribuído, aspecto importante para o Brasil pela necessidade de uma geração não intermitente e na ponta do consumo, uma vez que a malha de gasodutos do país é limitada a poucos municípios.

Entre outras externalidades positivas, o biogás contribui com a redução das emissões de gases causadores de efeito estufa, pode ser produzido a partir de diferentes substratos, como resíduos agroindustriais e do saneamento, que estão disponíveis em todo o território brasileiro. Este energético equivalente e intercambiável com o gás natural e pode atuar como substituto de combustíveis fósseis em processos industriais e no transporte.

A difusão de tecnologias e soluções como a digestão anaeróbia é especialmente relevante quando se fala de resíduos sólidos urbanos, não só pelo enorme volume gerado diariamente, representando alto potencial energético, mas por ser um setor com altíssimo consumo de energia elétrica.

Dado que o processo de biodigestão ocorre apenas na fração orgânica dos resíduos sólidos, o aproveitamento energético dos RSU em biodigestores demanda a alteração do cenário mais conhecido atualmente com a destinação deste material para aterros sanitários. Considerando a grande porção orgânica no resíduo brasileiro (mais de 50%) e o contexto atual de mínima segregação na fonte, uma alternativa para a digestão

anaeróbia dos RSU são as Plantas de Tratamento Mecânico Biológico (TMB), que configuram diferentes processos a fim de valorizar as distintas frações que constituem o RSU, como os recicláveis. De acordo com os guias do PROBIOGÁS4, as plantas de TMB que utilizam tecnologias de digestão anaeróbia podem ser divididas nas seguintes seções principais:

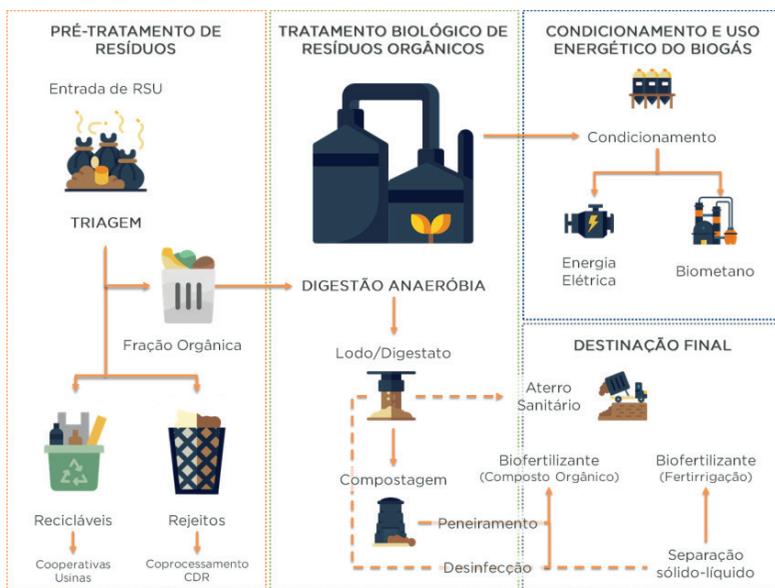
Sistema de pré-tratamento;

Reator(es) de digestão anaeróbia;

Condicionamento e aproveitamento energético do biogás;

Tratamento/disposição final da fração sólida residual.

Figura 16. Cadeia do biogás no escopo das plantas de TMB.



Sistema de pré-tratamento

Um dos principais desafios para a operação de digestão anaeróbia em larga escala em municípios é assegurar o fornecimento regular da fração orgânica de resíduos bem segregados⁵, uma vez que a composição dos resíduos é muito heterogênea. Por isso, a primeira etapa do sistema TMB consiste na separação dos resíduos de forma manual e mecânica, e seu grau de complexidade vai depender das próprias características do resíduo de entrada, do tratamento biológico utilizado e da margem de qualidade exigida para o produto final. Aqui eliminam-se recicláveis, que podem ser destinados para cooperativas ou processos de reciclagem ou logística reversa, e resíduos inertes em geral, que podem ser valorizados como RSUE. A comercialização destes materiais de saída pode inclusive auxiliar a manutenção econômica das plantas de TMB.

Para a aplicação da digestão anaeróbia como o tratamento biológico da planta, deve-se atentar aos seguintes parâmetros na hora de escolha de tecnologia e dimensionamento de projeto:

Qualidade

Análise físico-química (C, H, Cl, granulometria, umidade)

Análise de potencial metanogênico (poder calorífero)

Coleta de amostras compostas

Quantidade

Entrada de insumo (m^3/h ou ton/h)

Frequência

Possíveis variações na entrada de insumo

Em termos de escolha primária das tecnologias disponíveis, é imprescindível saber o teor de matéria seca (MS) desse resíduo. Esse parâmetro interfere na escolha entre digestão úmida e seca, que por sua vez determinará quais são os reatores adequados para o processo.

Reator de Digestão Anaeróbia

A matéria orgânica proveniente do sistema de pré-tratamento é submetida ao processo de digestão anaeróbia, que resulta na estabilização parcial desse material e geração do biogás e do lodo digerido. O processo pode utilizar distintas tecnologias e configurações, sendo que elas podem se diferenciar basicamente pelas seguintes diferenças de processo:

- Temperatura do processo: mesofílico ($37^\circ - 42^\circ C$) ou termofílico ($50^\circ - 60^\circ C$);
- Processos de introdução/extração do substrato: contínuo, semicontínuo ou descontínuo (bateladas sequenciais);
- Concentração de sólidos totais (ST): úmida ou via seca;
- Divisão das etapas de digestão: único ou multiestágio.

A escolha da tecnologia mais adequada vai depender das características do projeto: composição do substrato em termos sólidos totais e impurezas, se há ou não segregação na fonte e qual sua eficácia, e a aplicação a ser dada ao biogás gerado. Em termos de biodigestores, a divisão é feita basicamente em via úmida e seca. Essa divisão vai ditar qual o sistema de pré-tratamento mais coerente e o modelo do digestor.

VIA ÚMIDA: o material a ser digerido é diluído com adição de água ou efluente a um teor máximo de sólidos totais (ST) de 15%. Esta via geralmente utiliza digestores do tipo mistura completa que contam com agitadores.

Uma análise de pontos fortes e fracos de cada configuração pode ser visualizada no Anexo 1.

Ao final do processo de biodigestão, o biogás é captado por uma tubulação específica e direcionado ao sistema de condicionamento e valorização energética. O lodo digerido, por sua vez, passa por um sistema de desaguoamento que objetiva promover a separação sólido-líquido. A fração sólida é encaminhada a uma unidade de compostagem, e a fração líquida a estações de tratamento de efluentes (ETE) que integram as instalações de correção da contaminação.

Condicionamento e aproveitamento energético do biogás

O biogás bruto proveniente do processo pode ser destinado para motogeradores a fim de produzir energia elétrica ou

passar por um processo de purificação e ser utilizado como combustível, o biometano.

Antes de chegar aos equipamentos de produção de energia elétrica ou purificação, o biogás precisa passar por processos de tratamento, de forma a reduzir e/ou eliminar compostos indesejáveis. Entre as principais impurezas que demandam remoção estão o sulfeto de hidrogênio (H_2S , altamente corrosivo), água (H_2O vapor), siloxanos e partículas sólidas (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2008).

A remoção do dióxido de carbono (CO_2) somente se faz necessária para utilização do biogás como gás veicular ou para injeção na linha de gás natural, com o objetivo de ampliar a concentração de metano próxima a 100% e, desta forma, aumentar o poder calorífico do biogás, equiparando-o ao gás natural.

Tratamento/disposição final da fração sólida residual

O residual da digestão anaeróbia, chamado de lodo, deve passar por um tratamento e disposição adequada a depender de sua composição. Diferentes processos geram diferentes tipos de lodo. Um residual pastoso deve sofrer separação da fração líquida da sólida por meio de prensas, por exemplo, a fim de que o tratamento final seja aplicado.

A fração sólida e seca pode ser enviada para processos aeróbios

de estabilização (como a compostagem) e, posteriormente, utilizada como RSUE em plantas de coprocessamento ou enviada para aterro. Ainda que a disposição final do lodo se dê em aterros sanitários, nota-se que o rejeito ocupará menos espaço do que o resíduo que foi destinado para a planta de TMB e, uma vez que passou por estabilização, não terá liberação de chorume e metano tal qual o RSU bruto.

Já a fração líquida do residual deverá ser submetida a tratamento para redução final da carga orgânica. Este tratamento pode ser realizado em estações de tratamento de efluentes da própria planta de TMB ou pela prestadora de serviços de saneamento da localidade, mediante pagamento de uma taxa para o serviço a ser prestado. Estuda-se ainda, a viabilidade técnico-econômica do uso desse lodo estabilizado para fins comerciais, como por exemplo a aplicação como biofertilizante.

Ecoparque - Piracicaba Ambiental SA.

Figura 17. CTR Palmeiras em Piracicaba, São Paulo.



Fonte. Base Lunar Produtora, 2017.

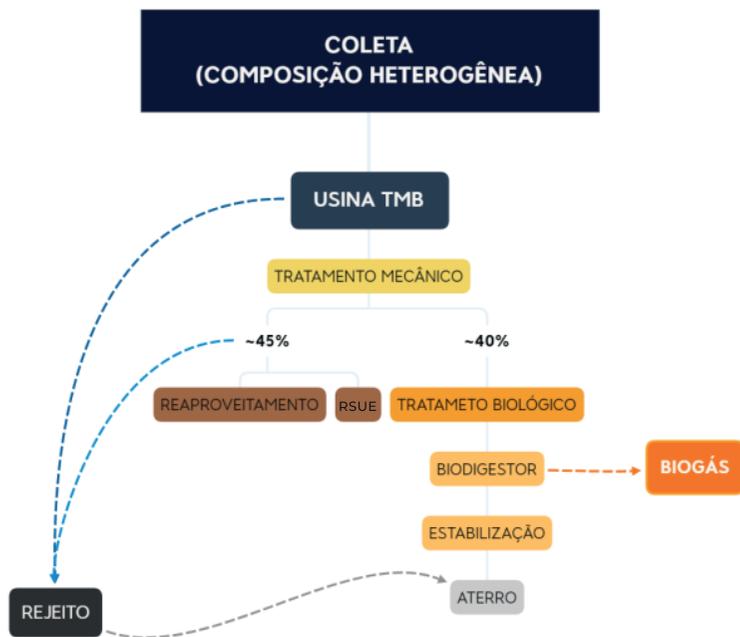
Tecnologias e processos: Separação mecânica, separação manual, separação magnética, peneiramento, biodigestor, compostagem em leiras para secagem, lagoas de estabilização de efluente líquido. Conta com aterro de rejeitos.

Modelo: Parceria Pública Privada (PPP) entre a Prefeitura de Piracicaba e Piracicaba Ambiental/ENOB.

Operação: Capacidade de processamento de até 2000 toneladas/dia. Atualmente processa 400 toneladas diárias, atendendo toda a da demanda municipal.

Investimento: Investimento inicial de R\$ 250 milhões e contrato de PPP por 20 anos, firmado em 2012, no valor de R\$ 1,8 bilhão.

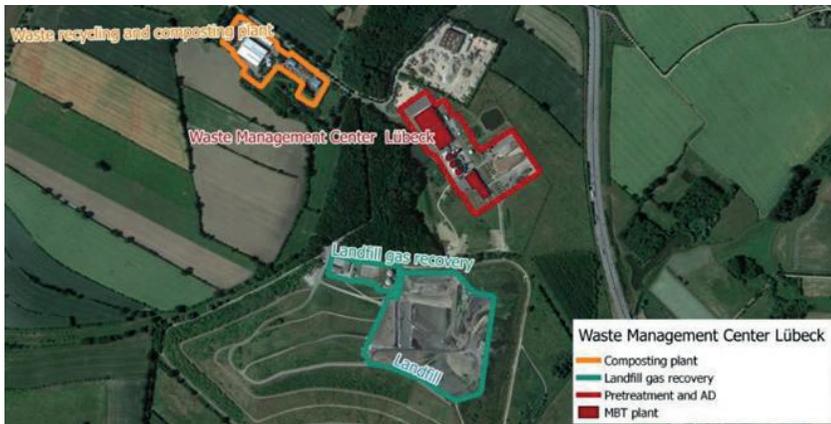
Figura 18. Fluxograma do funcionamento da planta TMB Ecopark Piracicaba



Fonte. Elaboração própria.

Entsorgungszentrum Lübeck GmbH – Operadora de Resíduos de Lübeck

Figura 19. Raabrede - Lübeck, Alemanha.



Fonte. Tuhh, Infranova e AU, 2018.

Tecnologias e processos: Separação mecânica, separação magnética, peneiramento, biodigestor, unidade de geração CHP, compostagem, estação de tratamento de efluentes. O centro de gerenciamento conta com aterro sanitário.

Modelo: Subsidiária da empresa de gerenciamento de resíduos de Lübeck.

Operação: Capacidade de processamento de até 100.000 toneladas/ano. Tratamento feito em duas linhas de tratamento: RSU com coleta seletiva efetiva e RSU com composição heterogênea. O município conta com um sistema de identificação de lixeiras que diferencia os resíduos em resíduo

de poda, orgânico (restos de alimento e ervas) e residual (fraldas, cigarros, resíduos de varrição).

Investimento: Investimento inicial de € 30 milhões realizado pela operadora de resíduos do município.

Figura 20. Fluxogramas da unidade de TMB em Lübeck, AL por tipo de entrada do resíduo.

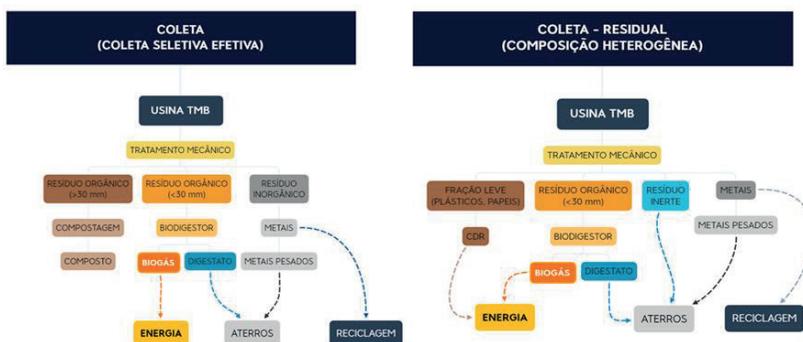


Figura 16. Adaptado de Tuhh, Infranova e AU, 2018.

2.4 · Gás de aterro sanitário

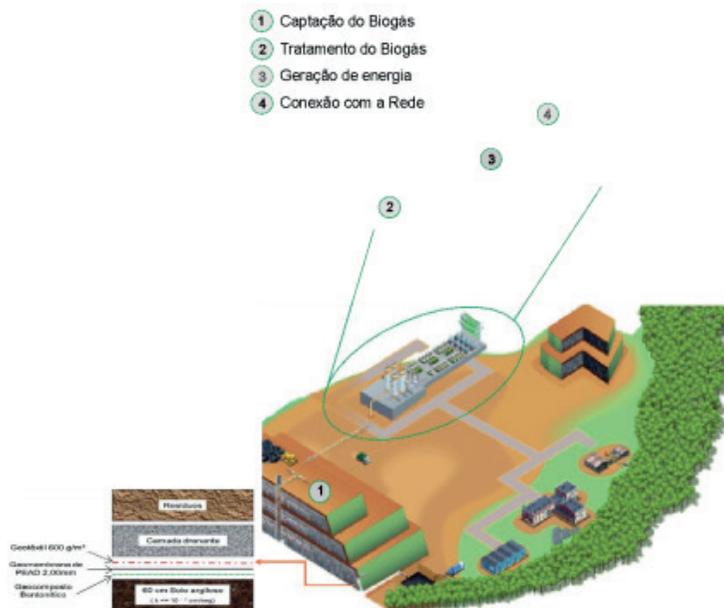
· O que é?

Os resíduos sólidos urbanos gerados nas residências têm em sua gravimetria, ou seja, em sua composição, em média, de 50 a 58% de material orgânico. Estes resíduos são coletados e destinados de forma ambientalmente adequada para Aterros Sanitários. Esta rota tecnológica no Brasil é preferencial em função de o país ter dimensões continentais, com grande extensão territorial além de ser uma técnica, se comparada a

outras existentes, de menor custo com efetiva eficácia. Os Aterros Sanitários são obras de Engenharia construídas rigorosamente com técnicas que protegem o lençol freático e o meio ambiente não havendo, em nenhuma hipótese, exposição a riscos ou danos.

Ao serem enterrados, bactérias anaeróbicas decompõem os resíduos orgânicos e produzem o biogás = metano e dióxido de carbono. A ação ocorre, via de regra, a partir de 5 a 6 meses após o aterramento. Este Gás, chamado Gás de Aterro (LFG – na sigla em inglês) é o gás que captado acionará os geradores e produzirá energia denominada Energia Limpa ou Energia Verde.

Figura 21. Fases do processo de Geração de Energia a partir do biogás.



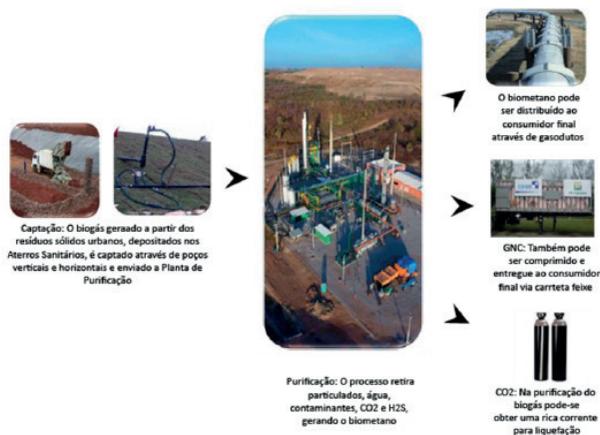
Fonte. : Solvi – UVE Caieiras

A geração de gases nos aterros sanitários, além de todas as obras de engenharia necessárias como sistema de captação, monitoramento através de medições diárias, entre outras ações, requer, por parte do operador, várias análises feitas diariamente e acompanhamento permanente de todo o sistema.

A geração de energia, a partir do biogás, é a transformação de um passivo ambiental em um ativo energético estável e altamente competitivo. A cadeia de gás, biometano, produz a energia renovável. Reduz impactos ambientais como os provocados pela disposição incorreta dos resíduos e pela emissão de gases de efeito estufa.

A geração do biogás não se destina unicamente a transformação em energia elétrica. No Brasil já temos exemplos, como é o caso da cidade de Fortaleza, onde os gases capturados no Aterro Sanitário passam por um processo de purificação e é distribuído ao consumidor final através de gasodutos conforme ilustração abaixo:

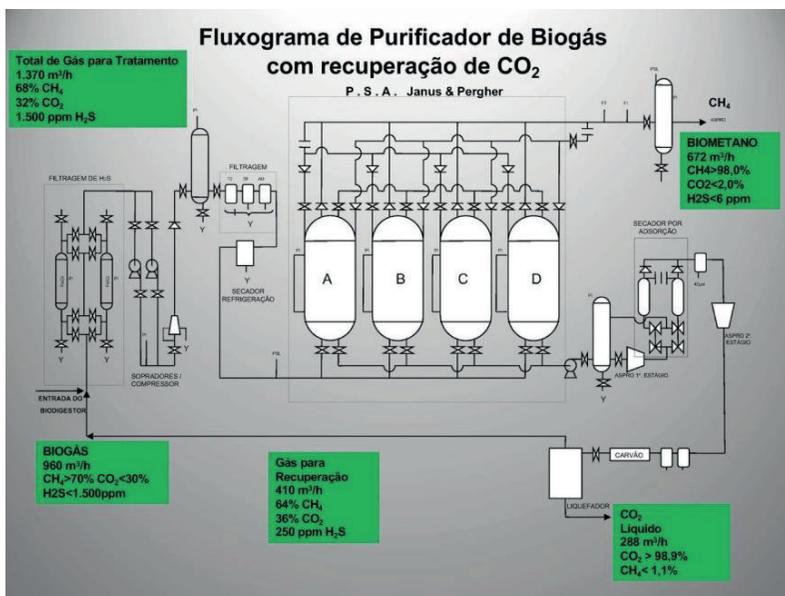
Figura 22. Fluxograma do negócio.



Fonte. Ecometano.

É importante considerar, ainda, que o Biometano já vem sendo usado, em importante escala, como combustível para veículos de transporte pesado. Em estudos já comprovados, a substituição do óleo diesel pelo biometano reduz as emissões de gases de efeito estufa em até 300% o que é bastante vantajoso para o meio ambiente além de considerar que, sob o ponto de vista de economia, é altamente positivo. Deixa-se de usar combustíveis fósseis para utilizar combustíveis verdes. A própria Abiogás já desenvolveu estudos que mostram estas vantagens. O diesel importado pelo país tem a maior emissão dos GEEs – Gases de efeito estufa). Sua substituição traz ganhos importantíssimo para o país, o consumidor e o meio ambiente. Além de totalmente renovável o custo, em relação ao diesel supera os 50%.

Figura 23. Fluxograma de Purificador de Biogás com recuperação de CO₂.



Fonte. Cruzeiro do Sul Engenharia e Serviços Ltda.

Em 2019 a Scania, uma das maiores montadoras de veículos pesados e com fábrica no Brasil, começou a desenvolver o modelo G 410 XT 6x4.

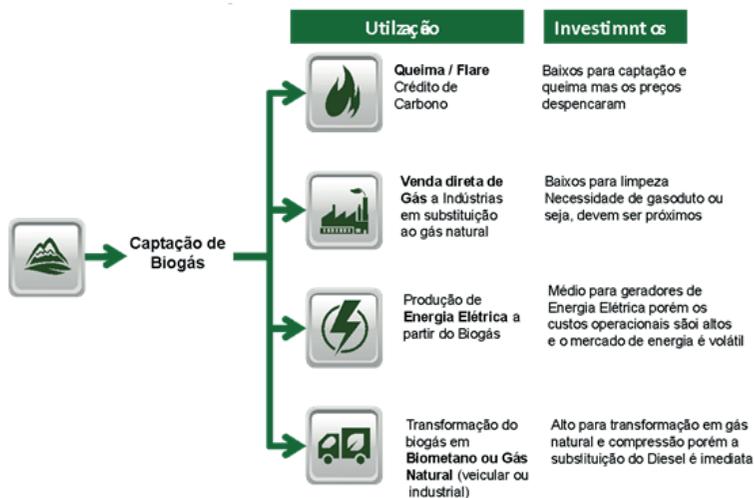
• Materiais de entrada e materiais de saída

Os materiais de entrada para as plantas de produção de metano/biogás são os RSU cuja origem são as residências que, diariamente, descartam para a coleta, transporte e tratamento ambientalmente adequado. Estes materiais são podem ser utilizados em várias rotas tecnológicas, mas, como já afirmado, no Brasil são destinados – majoritariamente – para os Aterros Sanitários. Infelizmente, uma grande parte destes materiais de entrada – por falta de cumprimentos das obrigações impostas pela legislação – ainda são destinados inadequadamente para os chamados lixões que são depósitos a céu aberto que causam enorme dano ao meio ambiente.

No Brasil, com 5.570 municípios uma soma considerável de municípios – mais de 3000 lixões ainda persistem – o que também deve ser considerado como um desperdício pois uma enorme quantidade de materiais de entrada que seriam aproveitados em larga escala na produção de biometano e geração de energia elétrica acaba, além do dano ambiental, por deixar de produzir riqueza e oferecer a oportunidade de o consumir contar com uma forma de energia limpa e renovável.

• Aplicabilidade

Figura 24. Oportunidades e alternativas.



Fonte. Cruzeiro do Sul, Engenharia e Serviços Ltda, 2018.

Todos os Aterros Sanitários são potenciais fornecedores. O que não se pode é confundir os lixões como sendo uma fonte de fornecimento dos materiais de entrada.

3. Análise dos potenciais e desafios técnicos e financeiros

3.1 • Tratamento térmico

• Aspectos de ordem técnica

Os fatores técnicos principais de uma planta de incineração são: emissões atmosféricas, poder calorífico inferior e quantidade e constância do envio de resíduos, cujos aspectos são apresentados a seguir.

Emissões atmosféricas

As emissões atmosféricas são um aspecto sensível desse tipo de tecnologia, pois variam de acordo com a entrada de materiais em virtude das diferentes características físico-químicas. Nesse sentido, a incorporação da tecnologia de incineração requer a priorização de sistemas modernos, que garantam o **tratamento dos gases gerados tendo como base a legislação pertinente**.

No Brasil, a legislação que trata sobre os procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico, incluindo os valores de emissões permitidos de dioxinas e furanos é a Resolução CONAMA 316/2002. Para o estado de São Paulo, a Resolução SMA 79/2009 estabelece requisitos e limites de emissão relativos ao funcionamento e ao

licenciamento de instalações de valorização energética de resíduos sólidos.

Poder calorífico inferior (PCI)

O poder calorífico dos resíduos de entrada são um fator extremamente importante para um incinerador manter uma alta eficiência e um bom funcionamento. Valores baixos diminuem a capacidade da queima e liberam mais gases, acarretando uma combustão não autotérmica, ou seja, que requer combustível adicional, o que também aumenta os custos de operação da planta. Conforme mencionado anteriormente, o poder calorífico mínimo dos resíduos deve ser de 6 MJ/kg em todas as estações e um valor médio inferior de 7 MJ/kg/ano.

Resíduos orgânicos possuem menor poder calorífico devido ao seu conteúdo de água, enquanto alguns resíduos recicláveis secos possuem um maior poder calorífico. Por sua vez, resíduos comerciais e industriais possuem poder calorífico variável e devem ser cuidadosamente avaliados. No Brasil, cerca de 50% dos resíduos são orgânicos e 30% correspondem à fração reciclável (IPEA, 2012). Esses percentuais, porém, podem variar de acordo com a região do país e com o município. Por essa razão e visando **garantir que os valores mínimos sejam alcançados, uma análise da composição gravimétrica prévia é necessária e indispensável.**

Quantidade e constância do envio de resíduos

Para uma planta de incineração se manter funcionando, é necessária uma quantidade mínima de resíduos por dia e de uma alimentação constante, com poucas paradas no ano para manutenção. Por essa razão, o volume mínimo constante deve ser assegurado.

Aspectos de ordem financeira

Assim como para qualquer outra forma de destinação final de resíduos, a questão financeira representa um aspecto-chave para o sucesso de uma planta de incineração. A análise da sustentabilidade econômico-financeira é fundamental e diretamente relacionada com sua viabilização, já que se trata de custos consideráveis para implantação e operação.

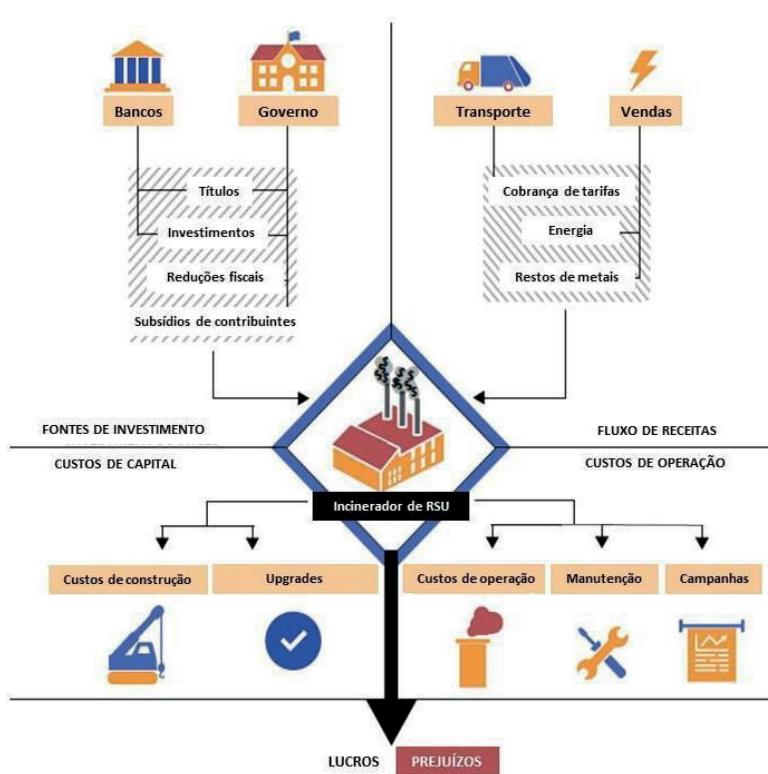
Nesse sentido, cabe destacar que para a construção da planta, investimentos/financiamentos públicos e privados, bem como PPPs podem ser uma opção, e para o funcionamento, manutenção e upgrades, a implantação de taxas e/ou tarifas, a venda do excedente da energia elétrica gerada, calor ou vapor, a venda de sobras metálicas do processo, sempre em conjunto, e subsídios locais ou internacionais podem ser uma solução se bem estudadas e aproveitadas.

Formatos regionalizados também são uma maneira de possibilitar a segurança financeira, já que os gastos poderão

ser divididos entre os municípios atendidos, e o aumento da capacidade de processamento de resíduos também, uma vez que os custos operacionais e investimentos específicos por tonelada de resíduos diminuem conforme a capacidade da planta aumenta.

O esquema a seguir ilustra a estrutura de financiamento de uma planta de incineração (Figura 25)

Figura 25. Mapa conceitual da estrutura de financiamento de um incinerador de RSU



Com o novo marco do saneamento, instituído pela Lei nº 14.026 de 15 de julho de 2020, as dificuldades enfrentadas pelo Brasil na gestão de resíduos sólidos por falta de recursos financeiros podem ser superadas, visto que os serviços públicos de saneamento básico, incluindo os de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, terão a sustentabilidade econômico-financeira possibilitada por meio da cobrança pela prestação de serviço.

Os custos de implantação desse tipo de tecnologia podem ser verificados nas tabelas abaixo, que trazem os valores levantados pelo BNDES (2014) e ABRELPE (2015) para a realidade brasileira (Tabela 6).

Tabela 7. Custos para implantação e operação de unidades de recuperação energética por incineração no Brasil.

Capacidade máxima	Potência térmica instalada	Potência elétrica	Custos totais de investimentos por planta	Custos totais de operação e manutenção (R\$/ano)
650 t/dia	60 MW	15 MW	R\$ 280.000.000,00	R\$ 23.000.000,00
1.300 t/dia	120 MW	30 MW	R\$ 480.000.000,00	R\$ 40.330.000,00

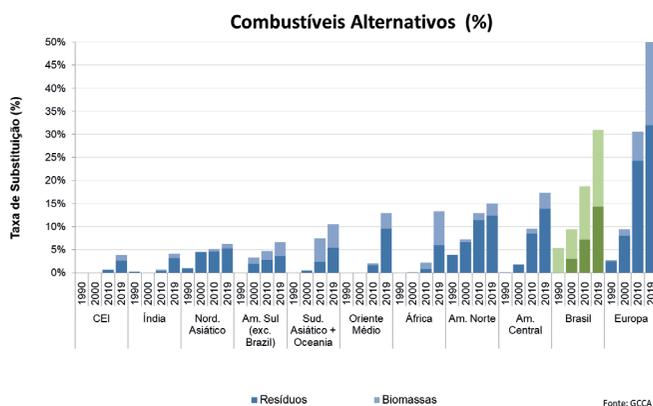
Fonte. ABRELPE, 2015; BNDES, 2014.

3.2 · Coprocessamento

O uso de combustíveis alternativos pela indústria do cimento tem ganhado relevância no Brasil nos últimos anos,

representando atualmente cerca de 30% de sua matriz energética. Existe, contudo, um grande potencial a ser explorado, principalmente se comparado a países desenvolvidos, com destaque aos da União Europeia (UE). Lá, o percentual de utilização de combustíveis alternativos atinge em média 50% de substituição térmica. Em países como Alemanha e República Tcheca, esse índice já alcança mais de 60%.

Gráfico 7. Taxa de substituição por combustíveis alternativos – Europa/Brasil.



Fonte. Global Cement and Concrete Association - GCCA, 2019.

A busca por combustíveis alternativos com menores fatores de emissão que os combustíveis convencionais têm sido uma importante ferramenta do setor para a redução de suas emissões de CO₂, especialmente nos últimos 20 anos. Mas esta transição energética exigiu investimentos em adequação e adaptação do processo produtivo da indústria cimenteira, além do aperfeiçoamento no monitoramento e controle.

No período de 2000 a 2019, a indústria coprocessou cerca de 20 milhões de toneladas de resíduos de diversas tipologias, diminuindo suas emissões ao mesmo tempo em que reduziu o passivo ambiental destes resíduos.

• Aspectos de ordem técnica

- A tecnologia já está bem aprimorada (vide taxas europeias de substituição energética);
- O grande desafio continua sendo a redução da umidade, já que usualmente o lixo no Brasil não é triado previamente;
- O Brasil é um país de território continental, fazendo com que a característica do RSU seja diferente em muitas regiões, daí a importância de um estudo gravimétrico de qualidade ser essencial para projetar a UP-RSUE mais adequada.
- O grande desafio é transformar o RSU de baixa qualidade em um material de qualidade e com energia suficiente para ser utilizado nas fábricas de cimento.

• Característica do RSU -Sem qualquer tipo de tratamento prévio

- Cloro: 0,5% a 1,5%
- Umidade: 30% a 60%
- Poder calorífico: 1.400 kcal/kg a 2.400 kcal/kg (Base úmida)

Tabela 8. Parâmetros de qualidade do RSUE para utilização na indústria do cimento

	Poder calorífico (Kcal/Kg)	Umidade (%)	Granulometria (mm) *	Cloro (%)
Pré-calcinador	> 3.500	< 25	< 50	< 0,5
Queimador principal	> 4.500	< 15	< 25	< 0,5

* Garantia de densidade uniforme

Fonte. ABCP, 2019.

Observações

- A depender da característica do RSU de entrada, será necessário contar com um sistema de secagem, porém, como já citado anteriormente, em países emergentes esta solução ainda não tem demonstrado viabilidade econômica;
- Quanto melhor for o poder calorífico do resíduo, maior será a capacidade de substituição térmica na fábrica de cimento;
- Além do aspecto técnico, umas das formas convencionais para aumentar o poder calorífico é a incorporação do resíduo industrial e comercial não perigoso ao processo;
- Na média, um forno de cimento tem capacidade para consumir de 30 mil a 35 mil toneladas de RSUE por ano.

Figura 26. Resíduo Sólido Urbano para fins energéticos - RSUE



Fonte: Roadmap Tecnológico do Cimento: Potencial redução das emissões de carbono da Indústria do Cimento - Brasil até 2050. Edição 2019.

· Aspectos financeiros

- É muito importante conjugar esforços para desenvolver tecnologias e tratamentos complementares ao coprocessamento, para que em conjunto possam viabilizar projetos em diferentes regiões. É o caso, por exemplo, da logística reversa dos recicláveis e do biogás para a fração orgânica;
- Fomentar linhas de crédito mais competitivas e acessíveis, com a finalidade de atrair investimentos da iniciativa privada;

- Incorporar os resíduos industriais e comerciais não perigosos que possuem um bom poder calorífico;
- O custo logístico para transportar o RSUE é bastante elevado devido à baixa densidade do material; ou seja, como é muito leve, transportá-lo para distâncias superiores a 150 km não costuma ser atrativo;
- Para que os projetos se tornem viáveis, é necessário que a cidade ou consórcio de cidades gerem ao menos 250 t/dia de Resíduo Sólido Urbano Bruto;
- Implementação de taxa ou tarifa que garanta a sustentabilidade econômico-financeira e segurança jurídica dos projetos.

Estimativa de custos para Unidade de Preparo de Resíduos Sólidos Urbanos (UP-RSUE)

A estimativa de custos para a implantação de uma UP-RSUE depende diretamente da característica dos resíduos e, por consequência, da tecnologia que será empregada, a fim de determinar o potencial de taxa de desvio dos aterros. Assim, os dados a seguir não podem ser empregados de forma absoluta.

Tabela 9. Parâmetros de investimentos para a produção de RSUE

RSU	RSUE	Perfil	CAPEX (Investimento em Milhões)		OPEX
			Linha Básica	Linha Completa	
250 mil t/ano	50 mil t/ano de RSUE	Pré -calcinador	U\$ 3 a U\$ 4	U\$ 8 a U\$ 11	U\$ 10 a U\$ 15 por tonelada de RSUE
500 mil t/ano	100 mil t/ano de RSUE	50% via pré -calcinador 50% via queimador principal	U\$ 4 a U\$ 7	U\$ 15 a U\$ 22	U\$ 10 a U\$ 15 por tonelada de RSUE
1 milhão t/ano	200 mil t/ano de RSUE	50% via pré -calcinador 50% via queimador principal	U\$ 10 a U\$ 14	U\$ 28 a U\$ 40	U\$ 10 a U\$ 15 por tonelada de RSUE

Fonte. ABCP, 2020.

Observações

- Gastos com obra civil e terreno não inclusos.
- Não considerado o investimento para sistema de secagem, caso seja necessário.
- O custo do triturador já está contemplado na planta, podendo ser instalado em módulo à parte, de acordo com a especificação do projeto, fazendo com que o custo de investimento seja menor.

Estimativa de custos para adaptação das cimenteiras para recebimento do RSUE simples com triagem manual dos recicláveis

Para que o RSUE seja utilizado pelas cimenteiras, é necessário

que as fábricas realizem investimentos consideráveis em adaptações internas. Usualmente, é preciso construir um sistema de armazenagem adequado, de injeção e de dosagem do RSUE para ser coprocessado nos fornos pelo queimador principal ou pelo pré-calcinador. Os investimentos variam conforme a necessidade de equipamentos, a distância entre a área de armazenagem e o ponto de entrada no forno, a quantidade a ser consumida e os tipos de equipamentos e de injeção (pneumática ou por correias) definidos.

Outro importante e fundamental investimento são os sistemas de controle e monitoramento do processo, de forma a atender às exigências técnicas ambientais. Para assegurar que não haja impacto no processo de produção, muitas vezes é necessário alocar recursos em laboratório, a fim de garantir o controle de qualidade do RSUE. Também será necessária a instalação de um sistema anti-incêndio, primordial para a segurança da operação.

Após um patamar de substituição térmica de 35%, baseado na utilização de combustíveis alternativos em geral e de diversas fontes, os fornos estarão muito próximos das capacidades de purga do aporte de cloro introduzidos. Dessa forma, a maioria dos fornos irá necessitar de um sistema que aumente a sua pré-disposição a um aporte maior de cloro, denominado by pass de cloro, de forma a permitir a retirada, do sistema do forno, do pó com mais elevado teor de cloro, viabilizando a condução do processo de clinquerização.

Tabela 10. Investimentos na fábrica de cimento para utilização do RSUE

Recebimento – RSUE (t/ano)	Utilização via	CAPEX (Milhões)
30 mil	Pré -calcinador	U\$ 3.5 a U\$ 5.0
60 mil	50% via pré -calcinador 50% via queimador principal Pode ser necessária a instalação de purga de cloro (by-pass).	U\$ 9.5 a U\$ 12.0

Equivalência: 1 USD = 5 BRL

Fonte. ABCP, 2020.

Tabela 11. Investimento em sistema de monitoramento de emissão e laboratório na fábrica de cimento para utilização do RSUE

Investimento	CAPEX (Milhões)
Sistema de monitoramento de emissões	U\$ 1.0
Laboratório – Análises Físicas e Químicas do RSUE	U\$ 0.7

Equivalência: 1 USD = 5 BRL

Fonte. ABCP, 2020.

3.3 · Digestão anaeróbia

· Aspectos de ordem técnica

Como apresentado, a digestão anaeróbia de RSU requer a separação da fração orgânica desse substrato. Para tanto, deve-se prever no projeto a implantação de coleta seletiva ou triagem e separação na planta.

Um aspecto interessante a se considerar é que, com uma fração orgânica mais pura na entrada nos biodigestores, obtém-se um digestato mais puro, o que representa um biofertilizante que pode ser aplicado em cultivos e jardins da cidade, por exemplo. Havendo a possibilidade de valorização do digestato, com a existência de mercado para este produto, aumenta a viabilidade do projeto como um todo.

A depender da aplicação energética do biogás pode-se optar por diferentes arranjos possíveis para consolidar um projeto de digestão anaeróbia.

Garantia de substrato:

- Cooperativas
- Parceria Público-Privada

Eletricidade e calor:

- Cogeração, com autoconsumo de energia e calor no próprio processo e venda de excedentes.

- Mini e microgeração distribuída, no escopo do sistema de compensação de energia elétrica da REN ANEEL nº482/2012.

- Venda de energia no mercado livre ou mesmo no mercado regulado.

Distribuição de gás

- Purificação do biogás bruto a um padrão ANP, de forma a ser comercializado como equivalente ao gás natural (gasodutos, gasodutos dedicados, caminhões feixe) e como combustível veicular.

De ordem financeira (fontes de financiamento e oportunidades de mercado)

A quantidade de resíduos orgânicos nos RSU e o clima quente do país são condições que tornam a digestão anaeróbia particularmente interessante. As práticas atuais de gerenciamento de resíduos, principalmente a falta de separação na fonte, dificultam a aceitação e a operação estável da tecnologia, mas integrada ao planejamento completo da gestão de RSU, a digestão é alternativa viável para a recuperação energética de resíduos.

A análise de viabilidade econômica de um projeto de biogás deve ser realizada não somente tendo em vista os custos com projeto, instalação e operação e a receita da comercialização da energia ou combustível, mas também tendo em mente todos os custos evitados com tratamento, transporte e disposição

final do resíduo a ser tratado, a aplicação do biofertilizante, bem como demais benefícios, como a redução de custos com o consumo de energia da unidade e a extensão da vida útil de aterros.

Lembrando que o investimento vai depender de diversas variáveis (localização, capacidade instalada, tecnologia empregada, valor calorífero do substrato, aplicação do biogás), abaixo é apresentada uma tabela com referência de custos para as condições de países emergentes como o Brasil. Ressalta-se, ainda, que há uma variação entre possíveis valores dadas as diferentes tecnologias que podem ser empregadas, possíveis receitas (venda de recicláveis e rejeitos para CDR, por exemplo) e a manutenção que cada processo escolhido pode demandar.

Tabela 12. Estimativa de custo da digestão anaeróbia em países emergentes – R\$.

Investimento Inicial (R\$)	CAPEX por ton e ano de input de resíduos	OPEX por ton	Custos totais por ton	Receitas por ton*	Custo por ton de resíduo alocado**	Obs.
42-71 MM	42-68	35-54	78-120	28-57	45-60 (eletricidade)	Capacidade de 50.000 a 150.000 t/a, 20 anos operando, tx. juros 6% ao ano

*Receitas na forma de substituição de combustíveis fósseis. Sem subsídios.

** Custos a serem cobertos por taxas adicionais, subsídios etc.

Existem linhas de financiamento que podem contemplar projetos de gerenciamento de resíduos no Brasil e estão listadas no Anexo 2.

4. Onde está o potencial?

Consultar a Plataforma SINIR+ do Ministério do Meio Ambiente clicando no link a seguir:

<https://www.sinir.gov.br/mapas/atlas-de-recuperacao-energetica/>

5. Materiais de referência

ABRELPE. Estimativas dos custos para viabilizar a universalização da destinação adequada de resíduos sólidos no Brasil. 2015. São Paulo, Brasil. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/estimativa-dos-custos-para-viabilizar-a-universalizacao-da-destinacao-adequada-de-residuos-solidos-no-brasil/>>. Acesso em 29 jul. 2020.

BASE LUNAR PRODUTORA. TMB - TRATAMENTO MECÂNICO E BIOLÓGICO. Youtube, 29 setembro de 2017. Disponível em <<https://www.youtube.com/watch?v=wVbHR-zxLJU>>. Acesso em: 03 agosto de 2020.

BRASIL. Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás: Viabilidade econômica de projetos de valorização integrada de RSU com produção de biogás – Brasília, DF, 2016CNI - Confederação Nacional da Indústria. Recuperação Energética de Resíduos Sólidos: um guia para tomadores de decisão. 2019. Brasília, Brasil. 111 p.: il.

CONSORCI PER AL TRACTAMENT DE RESIDUS SÒLIDS URBANS DEL MARESME. Situación en el Maresme. [s.d]. Disponível em:<<http://www.cresidusmaresme.com/sec-Situacion-en-el-Maresme-1170.html>>. Acesso em 28 jul. 2020.

CONSORCI PER AL TRACTAMENT DE RESIDUS SÒLIDS

RIMA - Relatório de Impacto Ambiental. Projeto URE de Barueri Tratamento Térmico de Resíduos Sólidos Urbanos para Geração de Energia. 2012. Processo 18. CETESB. São Paulo, Brasil.

THE NEW SCHOOL. U.S. Municipal Solid Waste Incinerators: An Industry in Decline. 2019. Tishman Environment and Design Center.

Disponível em:

<https://static1.squarespace.com/static/5d14dab43967cc000179f3d2/t/5d5c4bea0d59ad00012d220e/1566329840732/CR_GaiaReportFinal_05.21.pdf> Acesso em 22 jul. 2020.

TUHH, INFRANOVA, AU. A Decentralized Management Scheme for Innovative Valorization of Urban Bio-Waste: Report on results for household food waste collection and decentralized shredding in the Lübeck case. Alemanha. 72 p. Disponível em: <<http://www.decisive2020.eu/wp-content/uploads/2018/03/Report-on-results-for-household-food-waste-collection-and-decentralised-shredding-in-the-%E2%80%9CL%C3%BCbeck-case%E2%80%9D.pdf>>

WORLD BANK. Technical Guidance Report: Municipal Solid Waste Incineration. 2000. The World Bank Washington, D.C. 103 P. Disponível em: <Waste Incineration and Informal Livelihoods: A Technical Guide on Waste-to-Energy Initiatives> Acesso em 29 jul. 2020.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR16849 DE 02/2020. Resíduos sólidos urbanos para fins energéticos -

Requisitos. Disponível em:

<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?Q=d3kyZzJDdTZUMUVjUmJJZnBLa1FISjRpWjhXbGJuakRUNDRCN2NBYNFwOD0=>

Roadmap Tecnológico do Cimento, Edição 2019. Disponível em:

<https://abcp.org.br/roadmap-tecnologico-do-cimento-brasil-ebo-ok/>

Anexo 1 - Principais pontos fortes e fracos das tecnologias de digestão anaeróbia

Tecnologia		Pontos Fortes	Pontos Fracos
Via seca	Dranco	<p>Agitação via recirculação por bombas hidráulicas</p> <p>Inexistência de elementos internos ao reator, reduzindo problemas e demanda de manutenção</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Necessidade de correção do teor de matéria seca com adição de materiais de entrada adquiridos • Necessidade de constante recirculação do substrato • Substrato introduzido por bombas pistão: limpeza manual diária • Níveis muito altos de impurezas no RSU exigem pré-tratamento
	Kompogas	<p>Sistema de agitação eficiente, apesar da presença de elementos mecânicos internos</p> <p>Experiência no mercado</p> <p>Experiência com diferentes tipos de substrato</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema de agitação mecânico e interno ao reator - manutenção exige interrupção do processo • Possibilidades de falhas no sistema de extração - necessário procedimento manual de desobstrução da tubulação • Níveis muito altos de impurezas no RSU exigem prétratamento
	Laran	<p>Sistema de extração eficiente</p> <p>Experiência no mercado</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema de agitação mecânico e interno ao reator - manutenção exige interrupção do processo • Sistema de extração por bomba de vácuo - exige tanques e equipamentos adicionais • Níveis muito altos de impurezas no RSU exigem prétratamento

Tecnologia		Pontos Fontes	Pontos Fracos
Via seca	Valorga	<p>Engenharia do reator permite a instalação de plantas com elevada capacidade instalada</p> <p>Agitação pneumática, sem elementos mecânicos</p> <p>Maior simplicidade construtiva que as tecnologias secas tradicionais</p>	<ul style="list-style-type: none"> · Sistema de agitação via injeção de biogás comprimido demanda limpeza manual diária (desobstrução - canais de injeção) · Necessidade de constante recirculação do substrato · Substrato introduzido por bombas pistão: limpeza manual diária · Níveis muito altos de impurezas no RSU exigem pré-tratamento
Via extra-seca	Bekon	<p>Níveis de desempenho comprovados em escala real</p> <p>Processo biológico robusto</p> <p>Aquecimento do piso</p> <p>Introdução de ar pelas laterais</p> <p>Os túneis possuem porta inteiriça, com abertura para cima, evitando acidentes</p> <p>Não utiliza gasômetro para acumulação do biogás, reduzindo custos da instalação</p>	<ul style="list-style-type: none"> · Deficiência no processo de aeração do material · Emissões fugitivas de metano
	Kompoferm Plus	<p>Níveis de desempenho comprovados em escala real</p> <p>Processo biológico robusto</p> <p>Suporta maiores teores de impróprios se comparada com outras tecnologias</p> <p>Introdução de ar pela base do reator ao final do processo: secagem prévia do material antes de sua remoção</p>	<ul style="list-style-type: none"> · As grades laterais tendem a colmatar ao longo do tempo, prejudicando o fluxo do lixiviado - necessária limpeza periódica · Emissões fugitivas de metano

Tecnologia		Pontos Fontes	Pontos Fracos
Via extra-seca	Kompoferm Plus	Porta inteiriça facilitando a vedação Grade lateral e canaletas ao longo dos túneis - auxiliam a drenagem do lixiviado	
	BIOferm System	Níveis de desempenho comprovados em escala real Processo biológico robusto Canaletas frontal e transversal ao reator para coleta do lixiviado	<ul style="list-style-type: none"> · Deficiência no processo de aeração do material · Emissões fugitivas de metano
Via úmida	Úmida contínua	<p>Alta taxa de produção de biogás</p> <p>Alta estabilidade do processo</p>	<ul style="list-style-type: none"> · Separação e preparação de substratos muito exigentes · Maior desgaste dos equipamentos mecânicos · Fluxo homogeneizado exige volume de armazenamento · Consumo elevado de água

Fonte. Brasil, 2015.

Anexo 2

Instituição financeira e linha	Objetivo
BNDES – Fundo Clima: Subprograma Energias Renováveis	Apoio a investimentos em geração e distribuição local de energia renovável, no desenvolvimento tecnológico e na cadeia produtiva do setor de energias renováveis
BNDES – Fundo Clima Subprogramas resíduos sólidos	Apoio a projetos de racionalização da limpeza urbana e disposição adequada de resíduos sólidos
BNDES - Fundo Clima: Subprograma Cidades Sustentáveis e Mudança do Clima	Apoio a projetos que aumentem a sustentabilidade das cidades, melhorando sua eficiência global e reduzindo o consumo de energia e de recursos naturais
BNDES – Fundo Clima: Subprograma Gestão e Serviços de Carbono	Apoio a projetos que melhorem a gestão de emissões de carbono ou que efetivamente reduzam as emissões de gases de efeito estufa
BNDES – FINEM: Meio Ambiente	Financiamento a investimentos em sustentabilidade
BNDES – Finem Geração de energia BNDES - Finem: Meio Ambiente & Redução do uso de recursos naturais	Financiamento a partir de R\$ 10 milhões para expansão e modernização da infraestrutura de geração de energia a partir de fontes renováveis e termoelétricas a gás natural no País Financiamento a partir de R\$ 10 milhões para investimentos em ecoeficiência e em produtos ou processos que utilizem insumos provenientes de fontes renováveis como matérias primas, ou que possua um menor impacto ambiental (exclusive cana-de-açúcar)
BNDES Finem – Meio Ambiente & Produtos e processos sustentáveis	Financiamento a partir de RS 10 milhões para investimentos em produtos ou processos que utilizem insumos provenientes de fontes renováveis como matérias-primas ou que possuam um menor impacto socioambiental
BRDE – Agence Française de Developpment - & Produtos e processos sustentáveis	Essa linha apoia o desenvolvimento de projetos sustentáveis e ecológicos, como agricultura sustentável, energia limpa e renovável, gestão eficiente de resíduos, gestão de recursos hídricos, entre outros

FRENTE BRASIL DE
RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA
DE RESÍDUOS

fbrer

DESTINAÇÃO ADEQUADA E SUSTENTÁVEL