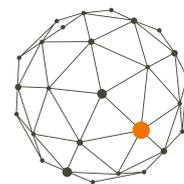


Volume 1

APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL: **Potencial energético por arranjo tecnológico**



Instituto 17

Este documento é um produto do Programa de Energia para o Brasil (BEP) do governo britânico e executado por um consórcio de organizações liderado pela *Adam Smith International* (ASI) e com a participação do Instituto 17 (i17), *Carbon Limiting Technologies* (CLT), hubz e Fundação Getúlio Vargas (FGV).

Para mais informações, acesse:

<https://www.ukbrep.org/pt/home> e <http://i17.org/>



**Adam Smith
International**



Instituto 17



EQUIPE TÉCNICA PROGRAMA DE ENERGIA PARA O BRASIL:

Diretores de Programa: Gilberto de Martino Jannuzzi (ASI) / Zane Kanderian (ASI)

Gerentes de Programa: Louise Hill (FCDO-UK) / Fernanda Guedes (ASI)

Conselheira Estratégica: Elbia Gannoum (ASI)

Coordenação Técnica: Alessandro Sanches Pereira (i17)

Líder em Aproveitamento Energético de Resíduos: Leidiane Ferronato Mariani (i17)

Líder da equipe: Vanice Helen Nakano (i17)

Responsável técnico: Vanice Helen Nakano (i17)

Equipe técnica do i17: André Cestonaro do Amaral, Brenda Monteiro Rodrigues, Deisi Cristina Tâpparo, Gladis Maria Backes Bühring, Guilherme Novaes Silva Pinto, Jacqueline Rutkowski, Jessica Yuki de Lima Mito, Maria Eduarda Cação Rosa, Eduarda Piaia, Evandro José Lopes, Patrícia Maehata, Norberto Schutz Cruzeiro, Marilyn Mariano dos Santos, Laiete Soto Messias, Lorena Gonzaga Dobre Batista, Júlio Rietow, Izabelly Cassia May, Luis Cesar da Costa Junior, Luiz Gustavo Silva de Oliveira, Rodrigo Bins, Paulo Eichler

Revisoras do ASI: Luiza Bazan (Gerente Monitoramento e Avaliação), Suzanne Maia (Conselheira em Inclusão Social e Igualdade de Gênero) e Marta Telles (Gerente de Comunicação e Inclusão)

Revisora editorial: Claudete Debértolis Ribeiro

Projeto gráfico e editoração: TXT Conteúdo e **dad**esign

Informações Legais

- Essa publicação está sob a licença [Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional \(CC BY 4.0\)](#).
- Todas as indicações, dados e resultados deste estudo foram compilados e cuidadosamente revisados pelos autores. Nem Instituto 17 ou os autores podem ser responsabilizados por qualquer reivindicação, perda ou prejuízo direto ou indireto resultante do uso ou confiança depositada sobre as informações contidas neste estudo, ou direta ou indiretamente resultante de eventuais erros, imprecisões ou omissões de informações nele presentes.
- A duplicação ou reprodução de todo ou partes do estudo (incluindo a transferência de dados para sistemas de armazenamento de mídia) e distribuição para fins não comerciais é permitida, desde que o Instituto 17 seja citado como fonte da informação. Para outros usos comerciais, incluindo duplicação, reprodução ou distribuição de todo ou partes deste estudo, é necessário o consentimento escrito do Instituto 17.

Ficha catalográfica:

Instituto 17

Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos no Brasil: Potencial energético por arranjo tecnológico. Programa de Energia para o Brasil – BEP (Brasil). Relatório técnico 06-2022. São Paulo/SP: Instituto 17, 2022.

Waste to Energy in Brazil: energy potential from municipal solid waste by technological arrangement. Brazil Energy Programme – BEP (Brazil). Technical report 06-2022. São Paulo: Instituto 17, 2022.

115 p. il. color.

ISBN 978-65-997883-4-5

1. Energia; 2. CDRU; 3. Reciclagem; 4. Transição energética;
5. Gestão de resíduos urbanos.

PREFÁCIO

Nas últimas décadas, o aumento populacional global e o crescimento econômico têm acarretado diversos desafios relacionados à gestão dos resíduos gerados. O Resíduo Sólido Urbano (RSU), sua gestão e destinação final configuram assim, tanto no Brasil como em todo o mundo, um tema da maior importância, com implicações ambientais e de saúde pública. Por outro lado, e tendo em vista os avanços tecnológicos observados, os resíduos podem também representar um recurso para aproveitamento energético.

No âmbito de um processo evolutivo visando a uma economia de caráter circular, somando-se a esforços de redução e reutilização dos resíduos, bem como ao aprimoramento da qualidade da sua destinação final, o aproveitamento energético compõe o rol de estratégias de gestão eficiente do RSU, podendo contribuir para reforçar a oferta de energia próxima aos centros de consumo, com impactos sociais e ambientais muito positivos.

Dentro do Programa de Energia para o Brasil (BEP), constituído a partir de uma estratégica parceria entre o Reino Unido e o Brasil, com foco no desenvolvimento sustentável, foram desenvolvidos estudos e produzidas informações valiosas que identificam o potencial de arranjos tecnológicos para o aproveitamento energético de RSU no país, além de apontarem o potencial de ganhos de eficiência e redução da pegada de carbono que esse aproveitamento pode vir a ter. São iniciativas como essa, quando executadas de forma sinérgica e colaborativa pelos setores público e privado, que serão capazes de fortalecer a posição de liderança do Brasil no movimento de transição energética global em direção a uma economia inclusiva de baixo carbono.

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) orgulha-se pelo apoio dado ao Instituto 17, no âmbito do BEP, ao longo desse trabalho que reuniu especialistas em tema tão relevante para o desenvolvimento dessa solução energética e ambiental para o país. O diálogo e colaboração entre as instituições públicas brasileiras e o programa britânico viabilizou ao BEP constituir-se como um projeto bem-sucedido no que diz respeito ao avanço do entendimento sobre as energias limpas e sustentáveis.

Nesse sentido, com essas duas publicações da série "Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil", disponibiliza-se conhecimento para o melhor entendimento do potencial desses arranjos tecnológicos e para melhor nortear o desenvolvimento de políticas públicas nesse tema. Em última instância, esperamos que o amadurecimento sobre os desafios e oportunidades contribua para acelerar a destinação de investimentos para uma maior integração entre o setor energético e o setor de resíduos do Brasil.

Thiago Barral

Presidente

Empresa de Pesquisa Energética

APRESENTAÇÃO

Como parte do apoio do Programa de Energia para o Brasil (BEP) do governo britânico ao processo de transição energética do Brasil para uma economia inclusiva de baixo carbono, a frente de Aproveitamento Energético de Resíduos (*Waste-to-Energy*), liderada pelo Instituto 17, tem avançado na contribuição ao desenvolvimento do setor. O BEP foi implementado pelo consórcio liderado pela *Adam Smith International*, em parceria com o Instituto 17, a *Carbon Limiting Technologies*, a Hubz e a Fundação Getúlio Vargas.

Ao longo do segundo ano de implementação do BEP (agosto/2021 a maio/2022), foi dado um enfoque especial ao estudo e a proposições para o aproveitamento energético do resíduo sólido urbano (RSU) do país. Dentre os resultados obtidos estão:

1. Estimativa do potencial de aproveitamento de RSU para reciclagem e estimativa do potencial de aproveitamento energético de RSU.
2. Geração de indicadores ambientais de tecnologias para aproveitamento energético de RSU, baseados em casos reais e em projetos, a partir da técnica de Avaliação de Ciclo de Vida Ambiental (ACV).

A presente publicação demonstra os resultados relacionados à estimativa do potencial de aproveitamento energético de RSU do Brasil, por meio de arranjos tecnológicos entre as tecnologias de biodigestão¹, coprocessamento de Combustível Derivado de Resíduo Sólido Urbano (CDRU) na indústria de cimento, incineração, gaseificação ou caldeiras industriais. Objetiva-se contribuir com informações que subsidiem o desenvolvimento de estratégias capazes de apoiar os tomadores de decisão dos setores público e privado no que se refere ao aproveitamento do RSU como uma fonte alternativa de energia e como contribuição à gestão de resíduos no país. Destaca-se que as informações apresentadas a seguir não são soluções prontas, ou seja, não devem ser encaradas como definições e indicações prescritivas, mas sim como possibilidades existentes que precisam ser consideradas e avaliadas conforme as necessidades e as realidades locais e/ou regionais, cuja escolha final deve ser sempre precedida de diagnóstico e discussão com os mais diversos agentes envolvidos.

¹ Em complemento à Publicação *Biogás no Brasil: Potencial a curto prazo*.

AGRADECIMENTOS

As instituições partes do consórcio de implementação do Programa de Energia para o Brasil (BEP): *Adam Smith International*, *Carbon Limiting Technologies*, hubz e Fundação Getúlio Vargas e, em especial, o Instituto 17, responsável pela execução do componente de Aproveitamento Energético de Resíduos do BEP, agradecem ao governo do Reino Unido pela confiança na execução do Programa.

Também estendem o agradecimento às instituições que apoiaram a elaboração deste estudo: Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos e Efluentes (ABETRE), Associação Brasileira de Biogás (ABiogás), Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos (ABREN), Babcock & Wilcox, Caldema Equipamentos Industriais, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), CTRPE – Central de Tratamento de Resíduos (Ecoparque-PE), Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Unidade Meio Ambiente (Embrapa Meio Ambiente), Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Energia Limpa Brasil, Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais (FEAM/MG), *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ), HPB Engenharia e Equipamentos, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), Ministério da Economia (ME), Ministério de Minas e Energia (MME), PRCZ Consultores Associados, Usina São Martinho, Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente do Estado de São Paulo (SIMA/SP), Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC) e GEF Biogás Brasil, projeto liderado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), implementado pela Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial (UNIDO), tendo como Comitê Diretor do Projeto o Centro Internacional de Energias Renováveis (CIBiogás), Itaipu Binacional, MME, Ministério do Meio Ambiente (MMA), e MAPA.

Devem também ser destacados, aqui, todos os membros da equipe de Aproveitamento Energético de Resíduos do i17 no âmbito do BEP, os quais, durante a execução do projeto, dedicaram seu tempo e conhecimento para a elaboração de uma análise de excelência técnica e relevância social. Nossos agradecimentos a todos e a todas.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	9
1 APROVEITAMENTO ENERGÉTICO E O PANORAMA DO RSU NO BRASIL: CONTEXTUALIZAÇÃO E ASPECTOS METODOLÓGICOS	11
2 POTENCIAL BRASILEIRO DE APROVEITAMENTO DE RSU PARA A RECICLAGEM E DE SEU REJEITO PARA O APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE CDRU	17
3 POTENCIAL BRASILEIRO DE RECICLAGEM DA FRAÇÃO ORGÂNICA PELA BIODIGESTÃO	22
4 ARRANJOS TECNOLÓGICOS PARA O APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RSU	27
4.1 Arranjo tecnológico: biodigestão da fração orgânica e coprocessamento do CDRU na indústria cimenteira	29
4.2 Arranjo tecnológico: biodigestão da fração orgânica e incineração do CDRU	32
4.3 Arranjo tecnológico: biodigestão da fração orgânica e gaseificação do CDRU	35
4.4 Arranjo tecnológico: biodigestão da fração orgânica e consumo do CDRU em caldeiras industriais	38
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
6 REFERÊNCIAS	45
GLOSSÁRIO	55
PERGUNTAS E RESPOSTAS	57

APÊNDICE I	62
METODOLOGIA APLICADA AO CÁLCULO DO RSU DISPONÍVEL PARA RECICLAGEM E PARA APROVEITAMENTO ENERGÉTICO	62
APÊNDICE II	67
METAS DO PLANO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS – PLANARES	67
APÊNDICE III	70
RESULTADOS DAS ESTIMATIVAS DO POTENCIAL DE CDRU A PARTIR DOS REJEITOS DE COOPERATIVAS DE CATADORES	70
APÊNDICE IV	70
ANÁLISE DE PROCESSOS DE COMBUSTÃO INDUSTRIAL COM FOCO NO CDRU	70
APÊNDICE V	74
METODOLOGIA APLICADA AO CÁLCULO DO POTENCIAL DE CONSUMO DE CDRU PELA INDÚSTRIA CIMENTEIRA	74
APÊNDICE VI	82
METODOLOGIA APLICADA À DEFINIÇÃO DAS REGIONAIS	82
APÊNDICE VII	86
METODOLOGIA APLICADA AO CÁLCULO DO POTENCIAL DE CONSUMO DE CDRU PELA GASEIFICAÇÃO	86
APÊNDICE VIII	88
METODOLOGIA APLICADA AO CÁLCULO DO POTENCIAL DE CONSUMO DE CDRU PELA INCINERAÇÃO	88

APÊNDICE IX	90
METODOLOGIA APLICADA AO CÁLCULO DO POTENCIAL DE CONSUMO DE CDRU POR CALDEIRAS INDUSTRIAIS A BIOMASSA	90
APÊNDICE X	96
METODOLOGIA APLICADA AO CÁLCULO DO POTENCIAL DE CONSUMO DE CDRU POR CALDEIRAS INDUSTRIAIS A CARVÃO MINERAL	96
APÊNDICE XI	98
SUÉCIA COMO REFERÊNCIA NA SEGREGAÇÃO DA FRAÇÃO ORGÂNICA DE RSU	98
APÊNDICE XII	100
POTENCIAL DA ROTA TECNOLÓGICA DE COPROCESSAMENTO DE CDRU NA INDÚSTRIA CIMENTEIRA	100
APÊNDICE XIII	104
POTENCIAL DA ROTA TECNOLÓGICA DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE CDRU PELA INCINERAÇÃO	104
APÊNDICE XIV	106
POTENCIAL DA ROTA TECNOLÓGICA DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE CDRU PELA GASEIFICAÇÃO	106
APÊNDICE XV	108
POTENCIAL DA ROTA TECNOLÓGICA DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE CDRU EM CALDEIRAS INDUSTRIAIS	108

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIOGÁS	Associação Brasileira de Biogás
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABREN	Associação Brasileira de Recuperação Energética
ACV	Análise de Ciclo de Vida
AER	Aproveitamento Energético de Resíduos
BEP	<i>Brazil Energy Programme</i> (Programa de Energia para o Brasil)
BFB	<i>Bubbling Fluidized Bed</i> (Leito Fluidizado Borbulhante)
CaO	Óxido de Cálcio
CDR	Combustível Derivado de Resíduo
CDRU	Combustível Derivado de Resíduo Sólido Urbano
CEASA	Centro Estadual de Abastecimento
CFB	<i>Circulating Fluidized Bed</i> (Leito Fluidizado Circulante)
CFC	Clorofluorcarboneto
Cl	Cloro
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DF	Distrito Federal
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPI	Equipamento de Proteção Individual
FORSU	Fração Orgânica do Resíduo Sólido Urbano
GEE	Gases do Efeito Estufa
GESI	<i>Gender Equality and Social Inclusion</i> (Igualdade de Gênero e Inclusão Social)
GW	Gigawatt
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFC	<i>International Finance Corporation</i> (Corporação Financeira Internacional)
INSS	Instituto Nacional do Seguro Social

J	Joule
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MTR	Manifesto de Transporte de Resíduo
MW	Megawatt
NBR	Norma Técnica Brasileira
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PCC	<i>Pulverized coal combustion</i> (combustão de carvão mineral pulverizado)
PCI	Poder Calorífico Inferior
PERS	Política Estadual de Resíduos Sólidos
Planares	Plano Nacional de Resíduos Sólidos
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PVC	Policloreto de Vinila
RDF	<i>Recovered Derived Fuel</i> (Combustível Derivado de Resíduo)
RSU	Resíduo Sólido Urbano
RSUe	Resíduo Sólido Urbano para fins energéticos
S	Enxofre
SIMA	Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente do Estado de São Paulo
SINIR	Sistema Nacional de Informações Sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SRF	<i>Solid Recovered Fuel</i> (Combustível Sólido Recuperado)
TJ	Terajoule
URE	Unidade de Recuperação Energética
UTB	Usina Termelétrica a Biogás
UTMB	Unidade de Tratamento Mecânico Biológico
W2E	<i>Waste to Energy</i>

1

APROVEITAMENTO ENERGÉTICO E O PANORAMA DO RSU NO BRASIL: CONTEXTUALIZAÇÃO E ASPECTOS METODOLÓGICOS

O crescimento populacional, aliado à urbanização e à industrialização, leva a um maior consumo de produtos e, por consequência, à geração de resíduos, evidenciando os desafios da gestão do resíduo sólido urbano (RSU). Dados mais recentes do cenário da destinação do RSU brasileiro revelam que, dos 82 milhões de toneladas de RSU gerado em 2020, cerca de 7,8% ou 6,4 milhões de toneladas foram descartadas sem controle². Dos 75,6 milhões de toneladas coletadas (92,2% do RSU gerado), pouco mais de 30 milhões, ou 36,6% do RSU gerado, ainda seguem para disposição final inadequada, em aterros controlados e lixões a céu aberto (ABRELPE, 2021).

² Em 2020, a taxa de coleta correspondia a 92,2% (ABRELPE, 2021).

De acordo com a ordem de prioridade da gestão de resíduos³ da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), a disposição final cabe somente para rejeitos que não puderam ser evitados nem aproveitados pelas etapas anteriores de reutilização, reciclagem e tratamento. No entanto, o aterramento segue sendo o caminho mais curto, porém menos eficiente e distante dos princípios da economia circular para a solução da destinação final de resíduos no país. É compreensível que o aterro sanitário tenda a ser a alternativa mais acessível⁴ para localidades que enviam, anualmente, os 30 milhões de toneladas de resíduos para lixões ou aterros controlados. No entanto, o atendimento à ordem de prioridade e a adoção de boas práticas e de soluções mais eficientes devem ser mandatários principalmente para a outra parcela dos municípios, ou seja, a que tem acesso a aterros sanitários e, assim, deve focar na recuperação de resíduos⁵ e desviar, ao máximo, resíduos sólidos da disposição final.

O aproveitamento energético é uma das práticas que podem contribuir para a recuperação de resíduos e ajudar no tratamento e redução de resíduos a serem encaminhados para aterros sanitários. Isto ocorre porque o aproveitamento energético de resíduos (AER) engloba tanto a recuperação de resíduos, por meio da reciclagem da fração orgânica durante a produção de biogás, como o tratamento e a redução de volumes de resíduos destinados ao aterro sanitário via recuperação energética. A **Figura 1** ilustra como esses conceitos permeiam a ordem de prioridade da gestão de resíduos sólidos. O AER se faz presente nas etapas de: reciclagem da fração orgânica⁶ pela biodigestão, que recupera nutrientes ao produzir biogás e digestato; e de tratamento, quando há a recuperação energética⁷ da fração residual⁸, que pode ser transformada em combustível derivado de resíduo (CDR) ou combustível derivado de RSU (CDRU)⁹. Ao se efetivarem as medidas que visam ao AER, somente os rejeitos demandarão disposição em aterros sanitários, o que, de fato, corresponderá à menor parcela e à última etapa da ordem de prioridade da gestão de resíduos.

³ Ordem de prioridade (ou hierarquia) da gestão de resíduos, prevista na Lei Federal nº 12.305/2010 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Artigo 9º: Na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (BRASIL, 2010b).

⁴ Acessível do ponto de vista econômico, técnico e até mesmo de conhecimento.

⁵ Baseado na Meta 4 - Indicador Global 4 do Planares, recuperação de resíduos visa à "redução da quantidade de resíduos e rejeitos encaminhados para disposição final ambientalmente adequada", por meio de medidas para: encerramento de áreas de disposição final inadequadas; fortalecimento das cadeias de logística reversa; e estímulo à reciclagem, ao tratamento biológico e à recuperação energética de RSU (BRASIL, 2022b).

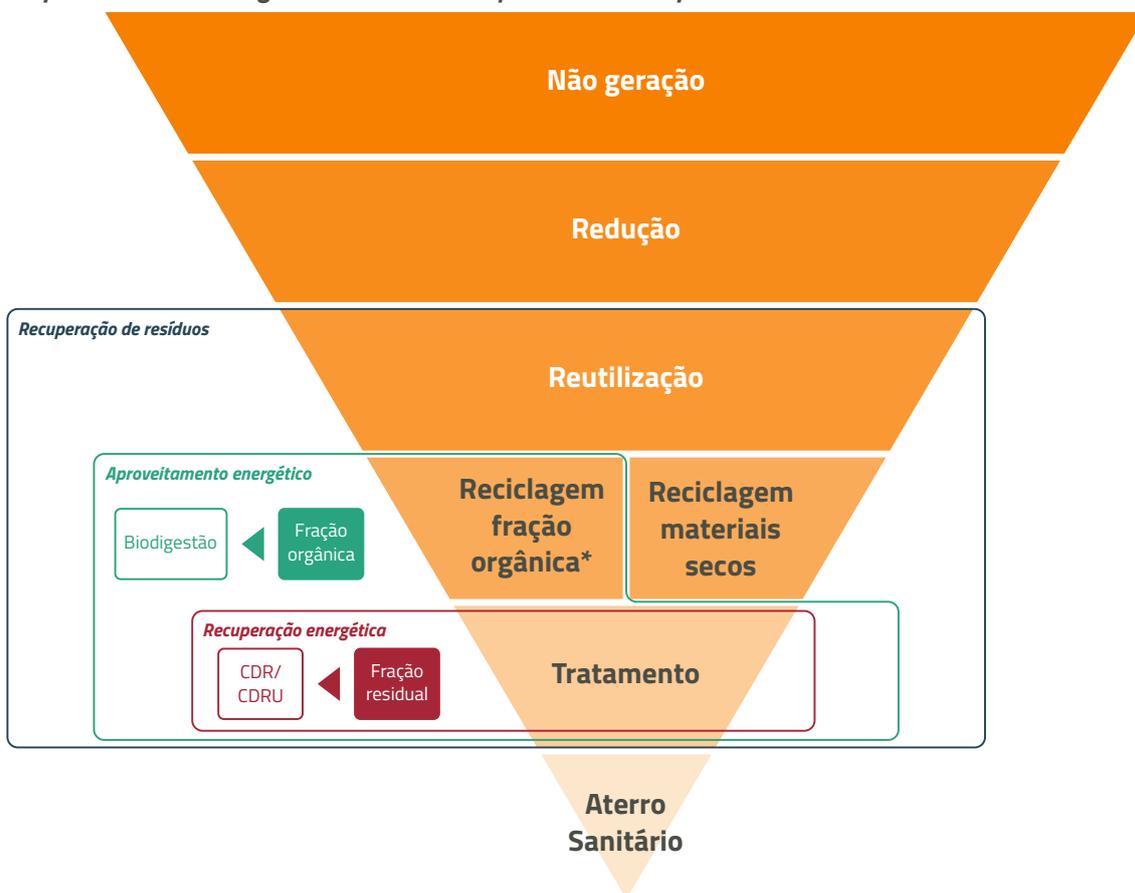
⁶ Reciclagem da fração orgânica de RSU, conforme meta 7 do Planares, ocorre por meio de rotas tecnológicas como a compostagem e a digestão anaeróbia. A digestão anaeróbia, ou biodigestão, promove o aproveitamento energético pela produção do biogás (BRASIL, 2022b). Definição de fração orgânica de RSU: resíduo de origem animal ou vegetal, por exemplo, restos de alimentos e podas, que em ambientes naturais equilibrados se degradam espontaneamente, promovendo a reciclagem dos nutrientes nos processos da natureza (MMA, 2022).

⁷ A partir da definição de Usina de Recuperação Energética de Resíduos Sólidos Urbanos (URE): qualquer unidade dedicada ao tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com recuperação de energia gerada pela combustão, com vistas à redução de volume e periculosidade, preferencialmente associada à geração de energia térmica ou elétrica (BRASIL, 2019).

⁸ Parcela de RSU pós segregação de recicláveis secos e orgânicos, que não possua viabilidade de ser reciclada devido a barreiras tecnológicas, de mercado ou logística, mas pode ser transformada em CDRU.

⁹ O CDR e o CDRU são combustíveis para uso específico de processos industriais que podem assegurar seu correto tratamento, como, por exemplo: fornos de clínquerização da indústria cimenteira, incineradores, gaseificadores, caldeiras industriais de leito fluidizado.

Figura 1
O aproveitamento energético de resíduos conforme ordem de prioridade da PNRS.



*A compostagem também é uma forma de Reciclagem da fração orgânica, sem aproveitamento energético.

O AER pode ser considerado um elemento impulsionador para a transição da economia linear para uma economia circular, na qual os recursos extraídos transitam por muitos ciclos de vida e são renovados como insumos industriais, em vez de se tornarem rejeitos ao final de seu primeiro uso como produto ou embalagem (GIZ-LAFARGEHOLCIM, 2020). Como exemplo, pode-se citar o coprocessamento na indústria cimenteira, que além de promover a substituição de combustível fóssil, não gera subprodutos (cinzas, no caso) e ainda contribui para a economia de matérias-primas, visto que a parcela inorgânica dos resíduos é incorporada ao clínquer¹⁰. Outro exemplo é a biodigestão, que gera não só o biogás, seu principal produto, mas também o digestato, que contém os nutrientes da matéria-orgânica degradada e pode ser utilizado como biofertilizante¹¹.

¹⁰Clínquer: Produto intermediário do processo de fabricação do cimento, resultante de processo termoquímico, cuja principal matéria-prima é o calcário.

¹¹O uso do digestato como biofertilizante depende da qualidade do substrato. Por essa razão, é primordial a segregação da fração orgânica dos rejeitos para se evitar a contaminação e garantir o uso nobre do digestato.

Uma pequena parcela de rejeitos de processos de aproveitamento energético ainda dependerá da disposição final, tais como: os rejeitos da produção de CDRU, possíveis rejeitos do processo de biodigestão¹² e da recuperação energética (incineração, gaseificação ou caldeiras industriais). Assim, embora o AER não garanta a extinção total de aterros, contribui para o desenvolvimento do conceito de aterro mínimo¹³.

Para a economia circular, a prioridade é evitar a produção de materiais que geram resíduos não aproveitáveis (rejeitos), por meio da inovação em design, do desenvolvimento de tecnologias apropriadas e da estruturação da cadeia produtiva da reciclagem¹⁴ no país. Enquanto esses materiais ainda prevalecem, deve-se trabalhar com a integração de tecnologias em busca do objetivo comum: atendimento à ordem de prioridade da gestão de resíduos. Como exemplo dessa possibilidade de integração, cita-se o caso da triagem dos recicláveis secos¹⁵, que gera uma parcela de resíduos que não possui valor de mercado. Essa parcela, que para a reciclagem é um rejeito, pode ser aproveitada para a produção de CDRU, ao invés de ser disposta em aterros. Outro exemplo é a possibilidade de integração de tecnologias para o aproveitamento da fração orgânica do RSU para a produção de biogás e digestato (reciclagem de nutrientes) e da fração residual para a produção de CDRU, processos estes que são o foco do presente documento.

Ao se associar o conceito de aterro mínimo com a disponibilidade de RSU em centros urbanos e com a oportunidade de transformá-los em fonte energética, torna-se relevante uma pesquisa acerca do AER no Brasil. O potencial de aproveitamento energético do RSU brasileiro foi calculado com base em dados da segregação dos recicláveis secos, da segregação da fração orgânica para a biodigestão e da fração residual para a recuperação energética em forma de CDRU. As tecnologias de recuperação energética consideradas foram: o coprocessamento na indústria cimenteira e a incineração¹⁶, que são as mais desenvolvidas dentro e fora do país, respectivamente; e a gaseificação e o uso de CDRU em caldeiras industriais¹⁷ como tecnologias incipientes, com pouca experiência registrada e necessidade de pesquisa e desenvolvimento. Os resultados apresentados dizem respeito aos seguintes arranjos tecnológicos: biodigestão + coprocessamento na indústria cimenteira, biodigestão + incineração, biodigestão + gaseificação e biodigestão + caldeiras industriais.

¹² Materiais misturados à fração orgânica que não são substratos para o processo do digestato proveniente de RSU de coleta indiferenciada etc.

¹³ Aterro mínimo: Objetiva promover o aproveitamento energético dos resíduos, aumentar a vida útil dos aterros existentes e reduzir a necessidade de áreas para construção de novos aterros sanitários (SIMA, 2021).

¹⁴ A reciclagem de embalagens pode ser considerada como medida de conservação de energia, e pode ser beneficiada pelo Programa de Eficiência Energética (PEE) da ANEEL (ANEEL, 2022).

¹⁵ Materiais recicláveis, como plástico, papel, papelão, metais, vidros etc.

¹⁶ A incineração pode tratar o RSU bruto, sem qualquer pré-tratamento, ou seja, não é necessário transformar a fração residual em um combustível homogêneo ou com baixo teor de umidade ou livre de elementos como Cl e S. No entanto, ao longo desta publicação, para melhor fluidez da discussão, será utilizado o termo CDRU como sinônimo de fração residual de RSU para a incineração.

O cálculo dos potenciais de AER¹⁸ partiu da massa total coletada e destinada corretamente para aterros sanitários, pois entende-se que os municípios que ainda encaminham seus resíduos para disposição inadequada não possuem recursos técnicos e financeiros para a imediata implantação do aproveitamento energético, já que o aterro sanitário é considerado a solução mais barata, em um curto prazo, entre as possibilidades de destino adequado¹⁹. Outras premissas adotadas, como por exemplo, dados de população estimada, metas de reciclagem²⁰ do Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares²¹), diferenças de qualidade de CDRU entre as tecnologias consumidoras e disponibilidade de RSU no entorno de plantas industriais, são apresentados ao longo do documento e detalhadas no **APÊNDICE I**.

Devido à importância da regionalização de municípios na gestão de resíduos sólidos, a estimativa do potencial do aproveitamento energético de RSU partiu do agrupamento²² de municípios ao redor de aterros sanitários, indústrias de cimento e caldeiras industriais. A massa de RSU ao redor de aterros sanitários gerou o potencial de aproveitamento dos arranjos biodigestão + incineração e biodigestão + gaseificação. Para os arranjos biodigestão + coprocessamento na indústria cimenteira e biodigestão + caldeiras industriais, foi feita uma análise da disponibilidade de RSU ao redor de fábricas e do potencial de consumo de CDRU por cada tecnologia. Uma questão que deve ser destacada é que uma mesma localidade pode apresentar potencial de aproveitamento energético para todos os arranjos tecnológicos apresentados. Por essa razão, para a correta interpretação dos resultados, os potenciais de aproveitamento energético dos diferentes arranjos não devem ser somados entre si.

¹⁷ O estudo considerou caldeiras de leito fluidizado a biomassa e carvão mineral, e caldeiras a carvão pulverizado.

¹⁸ É importante ressaltar que os valores do potencial de AER por arranjo tecnológico são uma fotografia do RSU gerado em 2020, caso o montante total desse tivesse sido aproveitado energeticamente.

¹⁹ A consideração somente da massa atualmente destinada para aterros sanitários visa fornecer uma estimativa de potencial mais conservadora, considerando a realidade brasileira. Essa abordagem não valida o envio de RSU para aterros sem o cumprimento das etapas da PNRS.

²⁰ Com base na taxa de 20% de recuperação de recicláveis secos do Planares (meta 2040). Detalhes no APÊNDICE I.

²¹ Instrumento estabelecido no Artigo 8º da PNRS. Essa versão, que foi fruto de consulta pública em 2020, foi publicada em forma de Decreto em abril de 2022 (Decreto nº 11.043 de 13 de abril de 2022). Um compilado das metas mais relevantes para a discussão da presente publicação pode ser consultado no APÊNDICE II.

²² Ao conjunto de municípios formado denominou-se, aqui, de "regional". Tais regionais, que resultaram de um trabalho de georreferenciamento realizado para todo o país, não possuem qualquer relação com consórcios municipais já existentes.

A partir do contexto abordado, o objetivo desta publicação é fornecer informações para tomadores de decisão em níveis estratégicos, dos setores público e privado, em relação à gestão de resíduos sólidos, como contribuição à transição energética para uma economia de baixo carbono. Os potenciais apresentados retratam números para macro análises, que podem servir de base para o planejamento dos setores e para o desenvolvimento de políticas públicas. É importante destacar que variações entre os resultados e a realidade são esperadas, uma vez que peculiaridades locais e aspectos tecnológicos²³ e econômicos não foram objeto do estudo. O conteúdo, aqui exposto, não atende necessidades de escolha entre os arranjos tecnológicos, nem busca comparar os diferentes arranjos tecnológicos. A definição pela melhor solução passa por uma série de análises em âmbito local, cujo objetivo é a identificação das demandas e das especificidades de cada município ou consórcio.

A temática referente à gestão de resíduos sólidos urbanos é complexa, além de demandar de muitas discussões e de estudos aprofundados. Em função disso, a presente publicação apresenta uma seção dedicada a “Perguntas e Respostas”, cujo foco é tentar esclarecer questionamentos comuns, no âmbito do setor de gestão de resíduos, que não puderam ser abordados ao longo do texto principal, mas que não deixam de ter grande relevância durante a tomada de decisão e, desse modo, deverão merecer destaque em discussões e estudos futuros.

²³Exemplo de premissas adotadas para o estudo, que variam localmente e de acordo com o projeto: gravimetria do RSU, arranjos e características tecnológicas, como eficiências, configurações e modelos.

2

POTENCIAL BRASILEIRO DE APROVEITAMENTO DE RSU PARA A RECICLAGEM E DE SEU REJEITO PARA O APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE CDRU

A PNRS é uma realidade há mais de 10 anos no país, entretanto, seus princípios, objetivos e instrumentos ainda necessitam de muito desenvolvimento para que a gestão sustentável de resíduos sólidos se torne realidade. Ainda que o respeito à ordem de prioridade da gestão de resíduos seja um desafio para um país com realidades regionais tão distintas, o atendimento à hierarquia foi premissa básica para a realização deste estudo, iniciando-se pelo cálculo do potencial técnico de reciclagem no país.

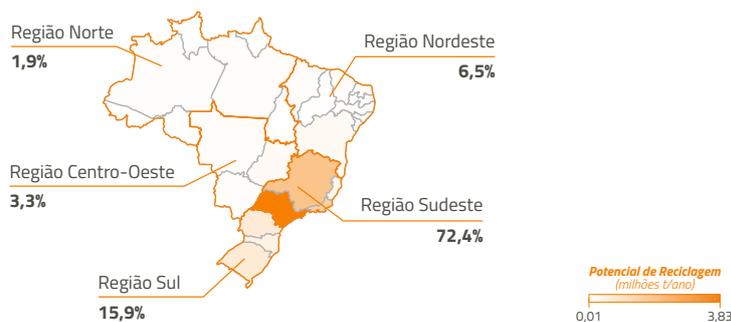
A coleta seletiva, que possibilita a separação na fonte de geração do resíduo é de extrema importância para viabilizar a comercialização dos materiais recicláveis. Um material de entrada contaminado (com resíduos orgânicos e com resíduos não passíveis de reciclagem) implica em maiores custos de triagem, com maquinário e com recursos humanos, e, conseqüentemente, em maiores quantidades de rejeitos a serem transportados para disposição final.

Nesse sentido, este trabalho calculou o potencial de reciclagem a partir dos resíduos recicláveis secos passíveis de separação na fonte. Para tal, tomou-se como base a massa de RSU gerada pela população em 2020, considerando-se os índices de coleta e disposição final adequada por região do Brasil²⁴, e a taxa de recuperação de recicláveis secos de 20%²⁵ (referência da meta estabelecida pelo Planares²⁶).

O potencial total de reciclagem estimado para o Brasil chega a 10,17 milhões de t/ano, o que assinala a perspectiva de estruturação do setor e a oportunidade de criação de novas organizações de catadores²⁷, conforme estabelece a Meta 5 do Planares, que prevê a formalização de catadores no sistema municipal, com contratos de prestação de serviços (com meta nacional de aproximadamente 42% em médio prazo e 95% em longo prazo), e considera, também, a ampliação da capacidade de processamento de cooperativas e associações já existentes (**Figura 2**).

Figura 2
Potencial de reciclagem no Brasil, a partir dos resíduos recicláveis passíveis de separação na fonte do RSU coletado e disposto adequadamente (ano base 2020).

Região	Potencial de reciclagem no Brasil (milhões t/ano)*	% em relação ao RSU gerado em 2020	% em relação ao RSU coletado em 2020
Centro-Oeste	0,34	6%	6%
Nordeste	0,66	3%	4%
Norte	0,19	3%	4%
Sudeste	7,36	18%	19%
Sul	1,62	19%	20%
Total	10,17	13%	14%



*Baseado na massa de RSU gerada em 2020, coletada e disposta adequadamente.

²⁴ Essa premissa foi adotada para todo o estudo realizado. Partiu-se do princípio de que o RSU não coletado e depositado inadequadamente em aterros controlados ou lixões não faria parte dos cálculos de potencial de aproveitamento energético.

²⁵ A metodologia e o detalhamento dos cálculos estão demonstrados no APÊNDICE I.

²⁶ Corresponde à meta para o ano de 2040, da meta 6, indicador global 6 - percentual de recuperação de materiais recicláveis. Foram consideradas, para o potencial, as metas por região do Brasil. Outros detalhes sobre as metas do Planares encontram-se no APÊNDICE II.

²⁷ Empreendimentos incentivados pela PNRS e pelo Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022, que a regulamenta, e retratados pela Meta 5 do Planares, conforme já mencionado. De acordo com o Decreto, o sistema de coleta seletiva dos municípios deve priorizar a participação de organizações de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis de pessoas físicas com baixa renda, com o intuito de formalizar a contratação e fortalecer o empreendedorismo, a inclusão social e a emancipação econômica (BRASIL, 2022a).

Entende-se que o atingimento dessas taxas depende: do desenvolvimento de políticas públicas que priorizem a economia circular dos produtos; do incentivo ao consumo sustentável; e da correta separação de resíduos recicláveis. Tais políticas devem possibilitar que municípios e consórcios possam gerenciar seus resíduos com foco em sua valorização.

O incentivo às organizações de catadores é uma das mais importantes formas de expandir o reaproveitamento dos recicláveis para a cadeia produtiva. Criação de empregos, oportunidades de empreendedorismo e inclusão de pessoas de baixa renda ou de comunidades que residem no entorno dos lixões abertos e aterrados são benefícios que podem ser gerados. Entre os exemplos de incentivo às organizações de catadores estão: a capacitação; o apoio na gestão da organização e da estruturação física e de maquinário; e a viabilização da contratação dessas entidades e pessoas locais como prestadoras de serviço de coleta de recicláveis. Ainda que os atuais destinos dos recicláveis, ou seja, as indústrias que beneficiam os materiais, estejam concentrados nas regiões Sul e Sudeste, as metas e os incentivos à reciclagem devem ocorrer em todas as regiões do país, conforme previsto no Planares. O desenvolvimento do mercado consumidor de recicláveis é consequência da disponibilidade econômica desse material. No entanto, o incentivo à coleta seletiva deve caminhar junto ao apoio para a estruturação da cadeia de recicláveis como um todo, para que o mercado consumidor desse material possa se estabilizar e, assim, perpetuar o ciclo da reciclagem.

Apesar da vasta possibilidade de reintrodução de diferentes tipos de recicláveis na cadeia produtiva, uma fração destes acaba não tendo viabilidade de venda, seja por motivos logísticos, tecnológicos ou de mercado, assim, passa a ser considerada como rejeito do processo, cujo destino mais comum são os aterros. No entanto, trata-se de um material com valor energético e potencial de transformação em CDRU. Estima-se que 20% dos materiais recicláveis que chegam às associações e cooperativas de catadores são considerados rejeitos do processo, e desses 20%, cerca de 60% possuem potencial energético para a produção de CDRU (PIAIA, 2021). A **Tabela 1** apresenta o potencial²⁸ de produção de CDRU a partir desses rejeitos, com base no potencial de recicláveis apresentado na **Figura 2**. No **APÊNDICE III**, podem ser observados: a potencial quantidade de rejeitos e o potencial de produção de CDRU nas cooperativas, por estado.

²⁸ A população considerada para o cálculo foi a do ano 2020, devido à disponibilidade da informação por município, demonstrando que, se for considerado o crescimento populacional, este potencial poderá ser ainda maior. Mesmo com o aumento das taxas de reciclagem no decorrer dos anos, a disponibilidade de rejeitos para a produção de CDRU se mantém alta, tendo em vista os avanços que devem ocorrer na gestão de RSU no país, o que contribui para o aumento dos percentuais de resíduos coletados e encaminhados para disposição final ambientalmente adequada e, conseqüentemente, disponíveis para a reciclagem e aproveitamento energético.

Tabela 1

Potencial de produção de CDRU do rejeito do processo de triagem de recicláveis secos, a partir do potencial de reciclagem no Brasil.

Região	Potencial de CDRU do processo de triagem de recicláveis secos (milhão t/ano)*
Centro-Oeste	0,04
Nordeste	0,08
Norte	0,02
Sudeste	0,91
Sul	0,02
Total	1,25

A **Tabela 1** evidencia que as regiões Sudeste e Sul apresentam maior potencial de produção de CDRU, vinculado às metas mais altas do Planares, bem como, ao maior volume de RSU coletado e destinado adequadamente.

Esse potencial de produção de CDRU a partir de rejeitos da triagem de recicláveis indica uma possibilidade de integração entre as organizações de catadores e a cadeia do aproveitamento energético de RSU. Tal integração pode se dar pela parceria entre plantas de aproveitamento energético e organizações de catadores que atuam no mesmo site ou nas proximidades, reduzindo, assim, os custos logísticos; ou pela possibilidade de as cooperativas produzirem o CDRU a partir de seus rejeitos, agregando mais uma renda pela venda desse material.

Vale salientar que há, também, estudos que apresentam taxas de reciclagem 20% superiores à média em comunidades atendidas por plantas de aproveitamento de CDRU (CNI, 2019), como é o caso da Suécia, que, entre os anos de 1975 e 2020, alterou o cenário do gerenciamento de seus resíduos sólidos. O Relatório de Gestão de Resíduos da Suécia, de 2020, evidencia o crescimento da reciclagem e do tratamento biológico, acompanhado do aumento do aproveitamento energético pela incineração. No mesmo período, foi possível observar uma queda no volume de resíduos enviados para aterros sanitários (AVFALL SVERIGE, 2021) (maiores detalhes no **APÊNDICE XI**). Tais exemplos reforçam a hipótese de que o avanço do aproveitamento energético de RSU no país pode não ser uma ameaça ao desenvolvimento da reciclagem, mas sim um impulsionador, se, como nos casos citados, forem introduzidas e fortalecidas, ao mesmo tempo, políticas de desenvolvimento da reciclagem.

As políticas públicas necessárias para esse visado desenvolvimento devem ir muito além das medidas focadas em logística reversa, pois é primordial o apoio e o incentivo à formalização de catadores em organizações. Tal formalização traz proteção a essas pessoas no que diz respeito: à segurança no trabalho; ao acesso a equipamentos de proteção individual (EPIs); a um local apropriado de trabalho; à aposentadoria pelo Instituto Nacional do Seguro Social (INSS) e à garantia de pagamento regular pelos serviços prestados. Outro benefício é a possibilidade de cadastro ou convênio das instituições com as prefeituras municipais, o que assegura o recebimento de recicláveis oriundos da coleta seletiva municipal. Desse modo, como previsto na meta 5 do Planares, políticas públicas devem favorecer e estruturar a contratação das cooperativas e associações de catadores como prestadores de serviços de coleta e triagem de recicláveis²⁹.

Cabe destacar, ainda, que a formação de redes de associações e cooperativas, na cadeia da reciclagem, possibilita/oportuniza o aumento de escala e do valor de venda dos materiais, reduzindo, assim, a dependência de intermediários (atravessadores). Essas são condições essenciais para a inclusão socioproductiva desse público vulnerável, uma vez que amplia a sustentabilidade dos seus empreendimentos cooperativos e, ao mesmo tempo, a sustentabilidade dos sistemas de gestão municipal de RSU como um todo (RUTKOWSKI, J. E.; RUTKOWSKI, 2015, 2017).

²⁹ A contratação direta de organizações de catadores pelas prefeituras municipais, com dispensa de licitação, é autorizada pelo Art. 24, Inciso XXVII, da Lei nº 8.666/1993 (BRASIL, 1993). Esse modelo facilitado já é uma realidade em diferentes municípios brasileiros, dentre estes, nos municípios de Londrina/PR e Itaúna/MG (RUTKOWSKI, RUTKOWSKI, 2015).

3

POTENCIAL BRASILEIRO DE RECICLAGEM DA FRAÇÃO ORGÂNICA PELA BIODIGESTÃO

O setor de saneamento, no Brasil, apresenta grandes oportunidades relacionadas ao aproveitamento energético de biogás da fração orgânica de RSU, por meio do processo de digestão anaeróbia. A adoção desse modelo promove: a oferta de energia; a diversificação da matriz energética; a destinação e o tratamento adequados em relação aos resíduos; a redução da sobrecarga de diversos aterros sanitários e a prolongação de sua vida útil. Outro fator importante é que a biodigestão é uma forma de reciclagem de materiais orgânicos, processo pelo qual se dá o aproveitamento energético, via geração do biogás, e a reciclagem de materiais, via produção de digestato (uma fonte de nutrientes para fertilizantes).

A viabilidade da implantação da biodigestão anaeróbia passa, obrigatoriamente, pela segregação da fração orgânica. A segregação da fração orgânica deve ser, portanto, priorizada, como o é no caso dos materiais recicláveis secos. Essa segregação, idealmente, deve ser realizada na fonte, para garantir a não contaminação por outros rejeitos. A Suécia é um exemplo de sucesso na separação de resíduos orgânicos na fonte, com uma média de separação nacional de 42%, que chega a ser de até 75% em alguns municípios (AVFALL SVERIGE, 2021). No entanto, sabe-se que tal medida depende de tempo, de políticas públicas e de uma grande mobilização da população e de governos. Uma forma de se iniciar tal prática, em curto prazo, é por meio dos grandes geradores, como restaurantes, CEASAs e supermercados. A segregação mecânica de resíduos da coleta indiferenciada³⁰ pode, em alguns casos, ser utilizada em uma segunda etapa, para assegurar o cumprimento da PNRS³¹ a curto e médio prazos. Esse tipo de separação também apresenta seus desafios, pois demanda alto investimento para implantação e operação, bem como, escala para a viabilização, mas pode ser uma solução para grandes centros, onde a questão de logística de coleta é complexa.

³⁰ Coleta convencional do RSU, sem separação na fonte.

³¹ *Lei 12.305, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos*: "Art. 9º. Na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

Art. 25. O poder público, o setor empresarial e a coletividade são responsáveis pela efetividade das ações voltadas para assegurar a observância da Política Nacional de Resíduos Sólidos e das diretrizes e demais determinações estabelecidas nesta Lei e em seu regulamento.

Art. 30. É instituída a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, a ser implementada de forma individualizada e encadeada, abrangendo os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, os consumidores e os titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos, consoante as atribuições e procedimentos previstos nesta Seção.

Art. 35. Sempre que estabelecido sistema de coleta seletiva pelo plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos e na aplicação do art. 33, os consumidores são obrigados a:

I - acondicionar adequadamente e de forma diferenciada os resíduos sólidos gerados;

II - disponibilizar adequadamente os resíduos sólidos reutilizáveis e recicláveis para coleta ou devolução.

Parágrafo único. O poder público municipal pode instituir incentivos econômicos aos consumidores que participam do sistema de coleta seletiva referido no caput, na forma de lei municipal.

Art. 36. No âmbito da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, cabe ao titular dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos, observado, se houver, o plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos:

I - adotar procedimentos para reaproveitar os resíduos sólidos reutilizáveis e recicláveis oriundos dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos;

II - estabelecer sistema de coleta seletiva;

III - articular com os agentes econômicos e sociais medidas para viabilizar o retorno ao ciclo produtivo dos resíduos sólidos reutilizáveis e recicláveis oriundos dos serviços de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos;

IV - realizar as atividades definidas por acordo setorial ou termo de compromisso na forma do § 7º do art. 33, mediante a devida remuneração pelo setor empresarial;

V - implantar sistema de compostagem para resíduos sólidos orgânicos e articular com os agentes econômicos e sociais formas de utilização do composto produzido;

VI - dar disposição final ambientalmente adequada aos resíduos e rejeitos oriundos dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos.

Art 42. O poder público poderá instituir medidas indutoras e linhas de financiamento para atender, prioritariamente, às iniciativas de:

I - prevenção e redução da geração de resíduos sólidos no processo produtivo;

II - desenvolvimento de produtos com menores impactos à saúde humana e à qualidade ambiental em seu ciclo de vida;

III - implantação de infraestrutura física e aquisição de equipamentos para cooperativas ou outras formas de associação de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis formadas por pessoas físicas de baixa renda;

IV - desenvolvimento de projetos de gestão dos resíduos sólidos de caráter intermunicipal ou, nos termos do inciso I do caput do art. 11, regional;

V - estruturação de sistemas de coleta seletiva e de logística reversa;

VI - descontaminação de áreas contaminadas, incluindo as áreas órfãs;

VII - desenvolvimento de pesquisas voltadas para tecnologias limpas aplicáveis aos resíduos sólidos;

VIII - desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos.

O Brasil tem um potencial de aproveitamento de, aproximadamente, 24,5 milhões t/ano³² de resíduos orgânicos provenientes do RSU destinado adequadamente para aterros sanitários, montante equivalente ao potencial de produção³³ de 1,9 bilhão de Nm³_{biogás}/ano³⁴ (INSTITUTO 17, 2021). Os estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro apresentam destaque em relação aos demais estados, cujos resultados estão relacionados ao número de habitantes e ao alto nível de acesso aos serviços de saneamento (INSTITUTO 17, 2021).

A **Figura 3** apresenta o potencial de biogás e a quantidade de plantas de biodigestão que podem ser instaladas no Brasil, em relação aos locais que possuem aterros sanitários.

Figura 3
Potencial de biogás da fração orgânica de RSU.

Região do Brasil	Potencial de fração orgânica de RSU* (mil t/ano)	Potencial de biogás (mil Nm ³ /ano)	Potencial quantidade de plantas de biogás (unidades)
Centro-Oeste	1.271	98.657 – 5,19%	45 – 5,55%
Nordeste	3.046	236.405 – 12,44%	58 – 7,15%
Norte	917	71.139 – 3,74%	13 – 1,60%
Sudeste	16.263	1.262.086 – 66,42%	431 – 53,14%
Sul	2.989	231.983 – 12,21%	264 – 32,55%
Total	24.486	1.900.270 – 100%	811 – 100%

Volume de biogás



Quantidade de plantas



*Baseado na massa de RSU gerada em 2020, coletada e disposta adequadamente.
Fonte: (INSTITUTO 17, 2021).

O volume potencial de biogás observado acima é equivalente ao potencial de geração de 3,9 TWh/ano de energia elétrica; tomando-se como exemplo São Paulo, pode-se afirmar que o potencial de geração pode suprir 9,5% do consumo de energia do estado, que, em 2019, foi de 40,9 TWh (EPE, 2020), enquanto o consumo nacional de energia elétrica foi de 482 TWh (EPE, 2020). Dessa forma, o potencial de geração de energia elétrica pela digestão anaeróbia da fração orgânica do RSU representa, aproximadamente, 1% da demanda energética brasileira. Já o mesmo potencial de biogás é equivalente ao potencial de geração de 1,3 bilhão de Nm³_{biometano}/ano³⁵, montante que pode suprir 9,52% do consumo de diesel em São Paulo, que, em 2021, foi de 12,6 bilhões de litros, e 2% do consumo nacional, que foi de 58,8 bilhões de litros em 2019 (EPE, 2020).

³² Nas premissas adotadas, a fração orgânica proveniente do RSU variou de 53 a 57%, conforme a região do Brasil (ABRELPE; ABIOGÁS, 2018). E assumiu-se uma eficiência na separação de 85% (Brasil, 2022c).

³³ Os resultados completos e a metodologia adotada, para a estimativa do potencial da fração orgânica de RSU, podem ser conferidos na publicação: *Biogás no Brasil. Potencial a curto prazo*.

³⁴ Considerou-se, nas estimativas, a destinação da fração orgânica dos resíduos para biodigestores, desconsiderando a captação de biogás em aterros.

³⁵ A estimativa do potencial de produção de biometano foi calculada por extrapolação do potencial de produção de biogás da fração orgânica de RSU, considerando 60% de metano contido no biogás e sua conversão a 90% de metano.

Outra discussão relevante, a partir dos resultados do potencial de produção de biogás da fração orgânica de RSU, é o potencial de plantas que podem ser instaladas no Brasil (811), as quais se concentram na região sudeste (53,14%) e sul (32,55%), mas que podem se tornar alternativas de instalação em municípios com baixa geração de RSU. O processo de digestão anaeróbia pode ser conduzido em diferentes configurações, com ou sem adição de água e de forma contínua ou batelada. A definição do arranjo tecnológico dependerá das condições e da qualidade da fração orgânica segregada.

A instalação de Usinas Termelétricas a Biogás (UTB) é exemplo de um potencial modelo sustentável, aliado aos requisitos da PNRS, que possibilita a essas unidades atuarem em favor da segurança energética do país, além de gerarem outros benefícios³⁶ sociais, econômicos e ambientais no território.

Nomenclaturas específicas para usinas de biogás, como UTB, ainda não são amplamente utilizadas e definidas em portarias, ao contrário do que ocorre com as Unidades de Recuperação Energética (UREs). A definição do conceito de UTB pode contribuir para a expansão do mercado de biogás, tornando-o uma alternativa reconhecida na matriz energética brasileira, e não apenas um processo de tratamento de resíduos. O setor de biogás requer uma legislação clara e própria, que identifique esse modelo e permita que as unidades de biogás acessem vantagens específicas, tais como: i) linhas de financiamento, ii) leilão dedicado e iii) licenciamento ambiental ágil.

Contudo, ainda há a necessidade de integração da digestão anaeróbia em diferentes soluções que realizam o aproveitamento energético de outras frações, de modo a tornar a gestão de resíduos mais adequada às metas de desenvolvimento social, econômico e ambiental do país. As possibilidades de arranjos tecnológicos serão discutidas no próximo capítulo.

³⁶ O processo de digestão anaeróbia e a geração de subprodutos, como o biogás e biofertilizante, possibilitam a redução de passivos ambientais (solo, ar e água). E além de o biogás ser uma fonte de energia renovável, limpa, contínua e flexível, contribui com a matriz energética brasileira e para a diversificação de receita onde é aplicado.

Além dos benefícios diretos provenientes da geração de biogás, deve-se mencionar o potencial de aproveitamento do digestato ou material digerido. O digestato pode ser utilizado como material de cobertura no aterro sanitário, de modo a atender a PNRS, que exige a estabilização da matéria orgânica antes da disposição; ou pode ser utilizado para fins agronômicos, desde que o substrato seja livre de contaminação e que passe por processos para remoção de fragmentos inertes. Assim como a qualidade da fração orgânica do RSU vai determinar a configuração do sistema de digestão anaeróbia, também determinará o uso final do digestato. É fundamental que o digestato seja utilizado como um elemento adicional para suprimir a demanda nacional por fertilizantes, considerando que o Brasil depende, extremamente, da importação desses produtos. A alta dependência externa, cerca de 80% do consumo brasileiro (BRASIL, 2021b), deixa o país em situação vulnerável, trazendo risco de escassez de nutrientes. O Brasil, no ano de 2020, consumiu, aproximadamente, 5,3 milhões de toneladas de fertilizantes nitrogenados e cerca de 6 milhões de fertilizantes fosfatados (BRASIL, 2021b). Ao se considerar a composição de nutrientes do digestato/composto, o potencial de substituição de fertilizantes químicos³⁷ é de 177,8 mil toneladas de fertilizante nitrogenado e 1,5 mil toneladas de fertilizante fosfatado. Estes números equivalem a 3,4% e 0,03% do consumo nacional de fertilizantes nitrogenados e fosfatados, respectivamente, em 2020.

O aproveitamento de biogás de aterros não foi o foco do presente estudo, mesmo assim, é relevante destacar que, atualmente, não há mecanismos que obriguem os aterros em operação a captar e aproveitar essa fonte energética. Em 2018, aproximadamente 42 milhões de toneladas de RSU (59% do volume de RSU gerado no Brasil) foram destinadas a aterros sanitários, os quais, em sua maioria, queimam o biogás gerado em *flare*. Nos aterros sanitários que fazem o aproveitamento, 9% do biogás foi utilizado para a geração de energia elétrica, e menos de 2%, para a produção de biometano (ABRELPE; ABILOGÁS, 2018). Segundo dados do Cibiogás, em 2021, aproximadamente 68 plantas que utilizam fontes de substrato do RSU ou do esgoto doméstico estavam em operação, com uma produção de 1,7 bilhão de Nm³biogás/ano (CIBIOGÁS, 2022a). Deste montante, aproximadamente 74,7% do biogás (1,3 bilhão de Nm³biogás) foi utilizado para a geração de energia elétrica, e 24,9% (434,37 milhões de Nm³biogás) foram purificados e transformados em biometano (CIBIOGÁS, 2022b). É importante salientar que as emissões de GEE em aterros sanitários ocorrem de maneira difusa, sendo emitidas para a atmosfera. O Brasil precisa tratar dessa fonte energética tão rica, que, ao ser desperdiçada, representa uma grave contribuição para o aquecimento global.

³⁷ A estimativa do potencial de substituição de fertilizantes foi calculada por extrapolação dos dados da quantidade da fração orgânica de RSU e da equivalência em relação aos fertilizantes, do inventário da publicação "[Biogás no Brasil: Potencial de descarbonização a curto prazo](#)".

4

ARRANJOS TECNOLÓGICOS PARA O APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RSU

Se o Brasil pudesse recuperar todo o montante de RSU que atualmente é destinado a aterro sanitário, garantindo a reciclagem de secos e orgânicos e aproveitando energeticamente o que poderia virar combustível, quanto isso representaria para a gestão de resíduos e para a matriz energética brasileira?

O aproveitamento energético de resíduos contribui para a minimização de impactos em diferentes processos produtivos, além de **promover a economia circular** quando aplicado a frações não recicláveis de resíduos, conforme a ordem de prioridade estabelecida na PNRS e as normas ambientais vigentes, levando em consideração os aspectos sociais (GIZ, 2017; PLANSAB, 2019).

Uma vez garantida a **segregação dos materiais recicláveis na fonte**, por meio da **implantação de políticas públicas de coleta seletiva das três diferentes frações³⁸** e com a **correta destinação desses materiais para instalações de pré-beneficiamento para a reciclagem**, o aproveitamento energético torna-se uma importante solução para a gestão de resíduos da fração orgânica e do restante do RSU que ainda possui valor energético e pode ser transformado em CDRU.

³⁸ Recicláveis secos, orgânicos e fração residual.

Uma vez assegurada a reciclagem das frações secas e orgânicas do RSU, a utilização da energia presente na parcela restante (fração residual do RSU) deve ser vislumbrada como uma solução integrada, não somente para a gestão de resíduos, mas também para a transição energética.

Os capítulos seguintes apresentam, portanto, o potencial dos possíveis arranjos tecnológicos³⁹ para o aproveitamento do CDRU, por meio das rotas térmicas, juntamente com a rota da biodigestão da fração orgânica do RSU, apresentada no capítulo anterior. As rotas térmicas consideradas para aproveitamento do CDRU foram: coprocessamento na indústria cimenteira, incineração - tecnologias maduras e plenamente desenvolvidas -, bem como gaseificação e caldeiras industriais (a biomassa e a carvão mineral⁴⁰). Ainda que essas últimas sejam propostas embrionárias, visto que há pouca experiência registrada a respeito, são alternativas que valem ser consideradas e estruturadas pela parcela relevante que seus potenciais apresentaram.

O potencial de aproveitamento de RSU para a reciclagem, apresentado anteriormente, serviu de premissa para o cálculo dos potenciais de aproveitamento energético. A massa de RSU considerada foi a gerada em 2020, tendo como base os índices de cobertura de coleta e de disposição adequada em aterros sanitários para cada região do Brasil⁴¹.

³⁹ Esses arranjos são factíveis de serem desenvolvidos, por exemplo, em Centrais de Tratamento de Resíduos, os também chamados ecoparques, que agregam, inclusive, a reciclagem, com a atuação de cooperativas/associações de catadores, e resíduos de outras origens. Como exemplos, há a planta em operação do Ecoparque-PE (<http://ecoparquepe.com.br/>) e o estudo feito para a cidade de São Paulo, que prevê um tratamento mecânico biológico, com biodigestão seca, produção de CDR e segregação de resíduos recicláveis secos (ABRELPE, 2020b).

⁴⁰ A análise de uma matriz multicritério buscou selecionar indústrias e tecnologias com maior possibilidade de consumo de CDRU. Critérios como experiências registradas, legislação existente, necessidade de adequação de equipamentos, são exemplos. O resultado foi: indústria cimenteira, incineração, gaseificação e caldeiras a biomassa e a carvão mineral. A matriz completa está no APÊNDICE IV.

⁴¹ A Metodologia detalhada está no APÊNDICE I.

4.1 Arranjo tecnológico: biodigestão da fração orgânica e coprocessamento do CDRU na indústria cimenteira

A alta demanda energética da indústria de cimento estimula a busca contínua por combustíveis alternativos mais baratos e eficientes. Desde os anos de 1970, fornos de cimento na Europa, Japão, Estados Unidos, Canadá e Austrália vêm utilizando diversos tipos de resíduos como combustíveis alternativos. O uso de resíduos na produção de cimento, com recuperação simultânea de energia e reciclagem de material, conhecido como coprocessamento, contribui para a realização dos objetivos da economia circular (SNIC, 2019).

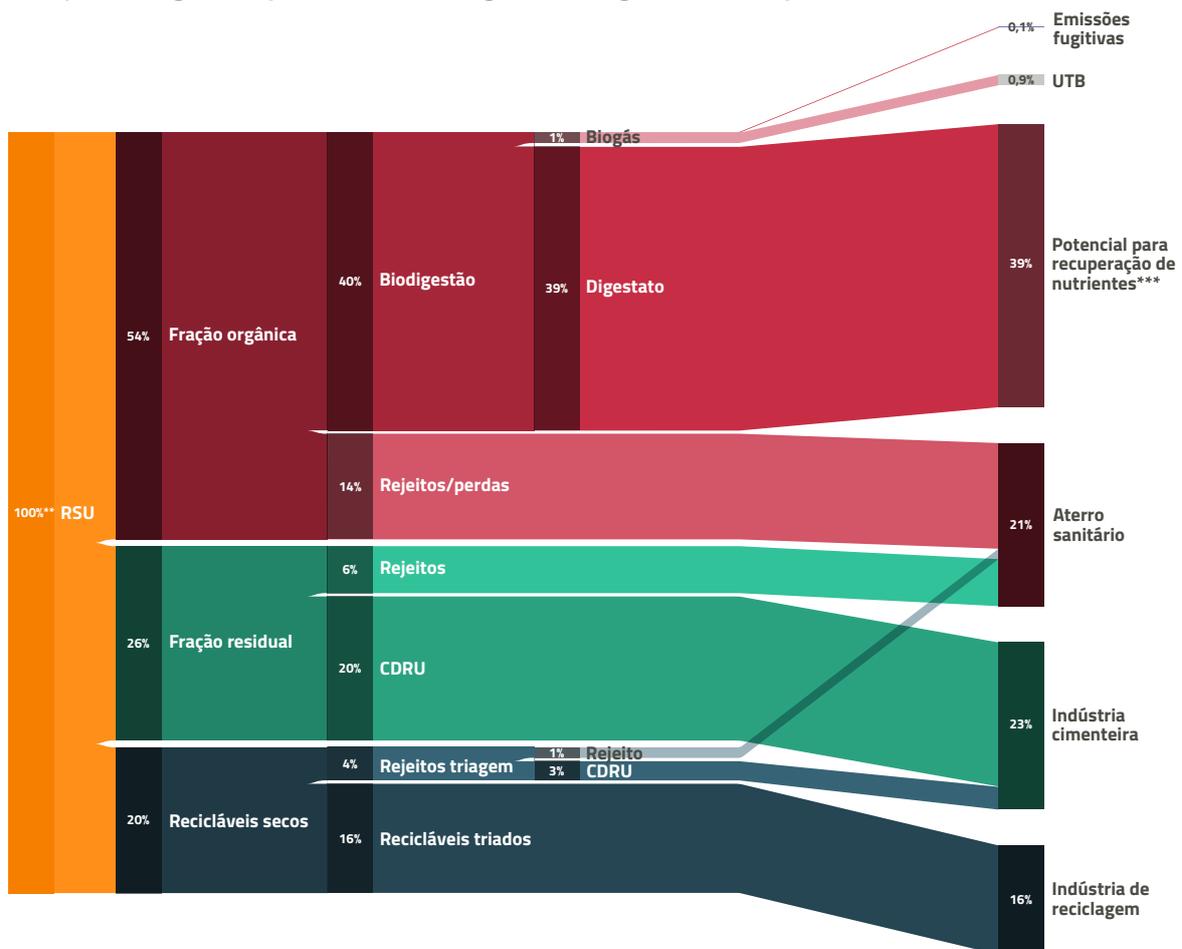
O potencial de aproveitamento energético do arranjo biodigestão + coprocessamento, na indústria cimenteira, partiu do cálculo do potencial de consumo de CDRU pela indústria cimenteira. A partir da massa de RSU bruto, que dá origem ao CDRU calculado, estimou-se a fração orgânica e o potencial de biogás correspondente. A estimativa de consumo de CDRU foi baseada nas projeções da necessidade de uso de combustíveis alternativos pela indústria do cimento, definidas no *Roadmap* Tecnológico do Cimento, como parte do compromisso de redução de CO₂ do setor (SNIC, 2019). Para atingir as metas de descarbonização definidas pelo *Roadmap*, o setor cimenteiro projeta aumentar a substituição de combustíveis para 35% até 2030 e para 55% até 2050 (SNIC, 2019)⁴², sendo que o combustível mais promissor para contribuir com essas metas é o CDRU⁴³. Para o cálculo do potencial de aproveitamento energético do RSU por esse arranjo, foi considerado que recicláveis secos não compõem a massa de CDRU, que corresponde a cerca de 20% do RSU bruto. No **APÊNDICE V** são apresentados mais detalhes da metodologia adotada para o cálculo do potencial de consumo de CDRU no Brasil e por regiões.

⁴² A substituição energética atual está em 28% (ABCP, 2021).

⁴³ Seu grande potencial está relacionado a um ambiente de intensas pressões para reduzir ou eliminar a disposição ambientalmente inadequada de RSU, além da grande disponibilidade e descentralização ao longo do território nacional (SNIC, 2019).

A integração das rotas é ilustrada no diagrama de Sankey (**Figura 4**). Parte-se do RSU bruto para os diferentes usos de suas frações: recicláveis secos, fração orgânica e fração residual. Recicláveis secos têm como destino: a indústria de reciclagem, a produção de CDRU com parte dos rejeitos da triagem e o aterro de rejeitos sem valor. Para a fração orgânica, são previstas: a biodigestão e uma parcela de perdas (rejeitos e ineficiência de separação) encaminhada para aterro. O fluxo da biodigestão finaliza-se com: o uso do biogás para a produção de biometano ou de energia elétrica; a perda de uma fração para a atmosfera; e o destino do digestato para uso como fertilizante na agricultura, como cobertura de aterro ou como CDR (também chamado de bioCDR). Por fim, a fração residual é direcionada para a produção de CDRU para a indústria cimenteira, e o rejeito é destinado ao aterro sanitário. Destaca-se que não há saída de cinzas do coprocessamento, visto que a parcela inorgânica do CDRU é incorporada ao clínquer.

Figura 4
Arranjo tecnológico de aproveitamento energético "biodigestão + CDRU para indústria cimenteira"*:



*Os valores foram estimados para o presente estudo e podem variar significativamente conforme manejo, tecnologia e característica do RSU.

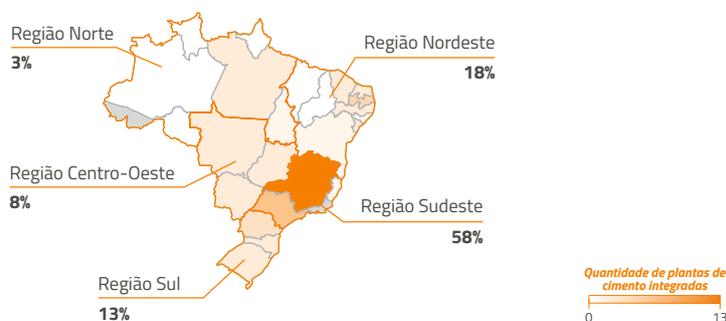
**Representação dos percentuais em massa, a partir do RSU bruto.

***Teor de sólidos do digestato de biodigestor CSTR: 20%. Uso pode variar entre cobertura de aterro, fertilizante ou bioCDR.

A **Figura 5** apresenta o potencial do arranjo entre o coprocessamento de CDRU na indústria cimenteira e o aproveitamento da fração orgânica para biodigestão. Atualmente, há 55 plantas de cimento integradas⁴⁴, distribuídas pelo Brasil, conforme o mapa. A quantidade de CDRU que esse setor projeta consumir até 2030⁴⁵ totaliza cerca de 1,4 milhão de t/ano⁴⁶. Esse montante reflete a possibilidade de aproveitamento de 3,5 milhões de t/ano de fração orgânica de RSU, para a produção de 324 milhões de Nm³/ano de biogás. Somados, CDRU e biogás apresentam um potencial de aproveitamento de quase 5 milhões de t/ano de resíduos e de recuperação de 29 mil TJ/ano de energia⁴⁷, o que equivale a cerca de 17% do consumo de coque⁴⁸ pela indústria. A região Sudeste destaca-se pelo maior potencial de aproveitamento energético de RSU (58%) pelo arranjo biodigestão + CDRU para cimenteiras, principalmente devido ao elevado número de plantas localizadas no estado de MG, em comparação aos demais estados brasileiros.

Figura 5
Arranjo tecnológico biodigestão + coprocessamento na indústria cimenteira.

Região do Brasil	Potencial de aproveitamento fração orgânica e CDRU (milhões t/ano)	Potencial de recuperação de energia (TJ/ano)
Centro-Oeste	0,42	2595
Nordeste	0,88	5512
Norte	0,14	891
Sudeste	2,88	16748
Sul	0,63	3758
Total	4,96	29.505



⁴⁴ As plantas de cimento podem ser divididas em dois grupos: plantas integradas e plantas de moagem. A planta integrada produz o clínquer e o cimento. A planta de moagem recebe o clínquer e aditivos para a produção (moagem) do cimento. Somente a planta integrada possui demanda intensa de energia térmica, pelo processo de clínquerização, e, portanto, pode realizar o coprocessamento de resíduos substitutos de combustíveis em seus fornos.

⁴⁵ O APÊNDICE XII apresenta mais detalhes do potencial de aproveitamento energético do CDRU pela indústria cimenteira. O potencial, até 2050, chega a 3 milhões de toneladas de CDRU.

⁴⁶ Vale esclarecer que o potencial de coprocessamento de CDRU apresentado não considerou a quantidade já destinada a fornos, visto que é uma prática recente com poucos números publicados. O município de Cantagalo, no Rio de Janeiro, é registrado como o pioneiro a destinar CDRU para a indústria de cimento, prática esta iniciada em 2008 (GLOBO ECOLOGIA, 2009). Segundo o Panorama do Coprocessamento (ABCP, 2021), plantas localizadas no estado de São Paulo e Paraíba começaram a coprocessar o CDRU em 2019. No ano de 2020, o CDRU contribuiu com 2,75% da energia proveniente de combustíveis alternativos coprocessados nos fornos brasileiros.

⁴⁷ Considerando biogás para a produção de biometano a um PCI de 9200 kcal/Nm³.

⁴⁸ Projeção da energia necessária para a produção de clínquer, pela indústria cimenteira, em 2030, é de 178 mil TJ/ano. Cálculo detalhado no APÊNDICE V.

Ao se ter ciência do quanto a indústria cimenteira pode consumir de CDRU⁴⁹, é preciso analisar se há um montante suficiente de RSU em regiões próximas a este mercado consumidor. Analisou-se, portanto, o potencial de disponibilidade de CDRU em um raio de 100 km ao redor das plantas de cimento integradas, o que resultou em 4,4 milhões t/ano de CDRU. De maneira geral⁵⁰, pode-se concluir que o setor cimenteiro pode consumir pelo menos 31% do potencial de CDRU disponível nas proximidades das indústrias. Isso reforça a necessidade de desenvolvimento de outros mercados consumidores de CDRU, como caldeiras, gaseificadores e incineradores, de modo a contribuir para a destinação de RSU do país, pois há localidades em que a disponibilidade de RSU é superior ao que pode ser aproveitado pelas fábricas de cimento.

4.2 Arranjo tecnológico: biodigestão da fração orgânica e incineração do CDRU

Nesta seção, é apresentado o potencial de geração de energia elétrica pelo arranjo biodigestão da fração orgânica e incineração do CDRU. Muito embora incineradores de resíduos sejam projetados para receber RSU bruto, para o cálculo deste potencial considerou-se a separação prévia dos resíduos orgânicos, tal como os potenciais estimados para o coprocessamento e a gaseificação – ambos capazes de consumir a fração orgânica seca na composição do CDRU. Essa premissa de segregação dos orgânicos e dos materiais recicláveis do RSU atende à PNRS no que diz respeito à etapa de reciclagem preceder a etapa de tratamento. A biodigestão da fração orgânica permite maior flexibilidade do uso energético pela possibilidade de produção de biometano, além de garantir o aproveitamento dos nutrientes presentes na matéria orgânica.

O diagrama de Sankey apresenta a integração da incineração com a biodigestão (**Figura 6**). O fluxo de recicláveis, assim como no arranjo com o coprocessamento na indústria cimenteira, atende às metas do Planares, tendo como destinos: a indústria de reciclagem, a produção de CDRU proveniente de parte dos rejeitos da triagem e o aterramento de rejeitos sem valor. As diferenças em relação ao arranjo anterior aparecem a partir do destino do rejeito e de perdas pela eficiência da separação da fração orgânica. Nesse caso, tal parcela passa a compor a fração residual para a recuperação energética, o CDRU⁵¹. A parcela de rejeitos (inertes) da fração residual é menor, o que aumenta a massa de CDRU que pode ser enviada à incineração. Por fim, cinzas e escória geradas no processo são direcionadas ao aterro⁵².

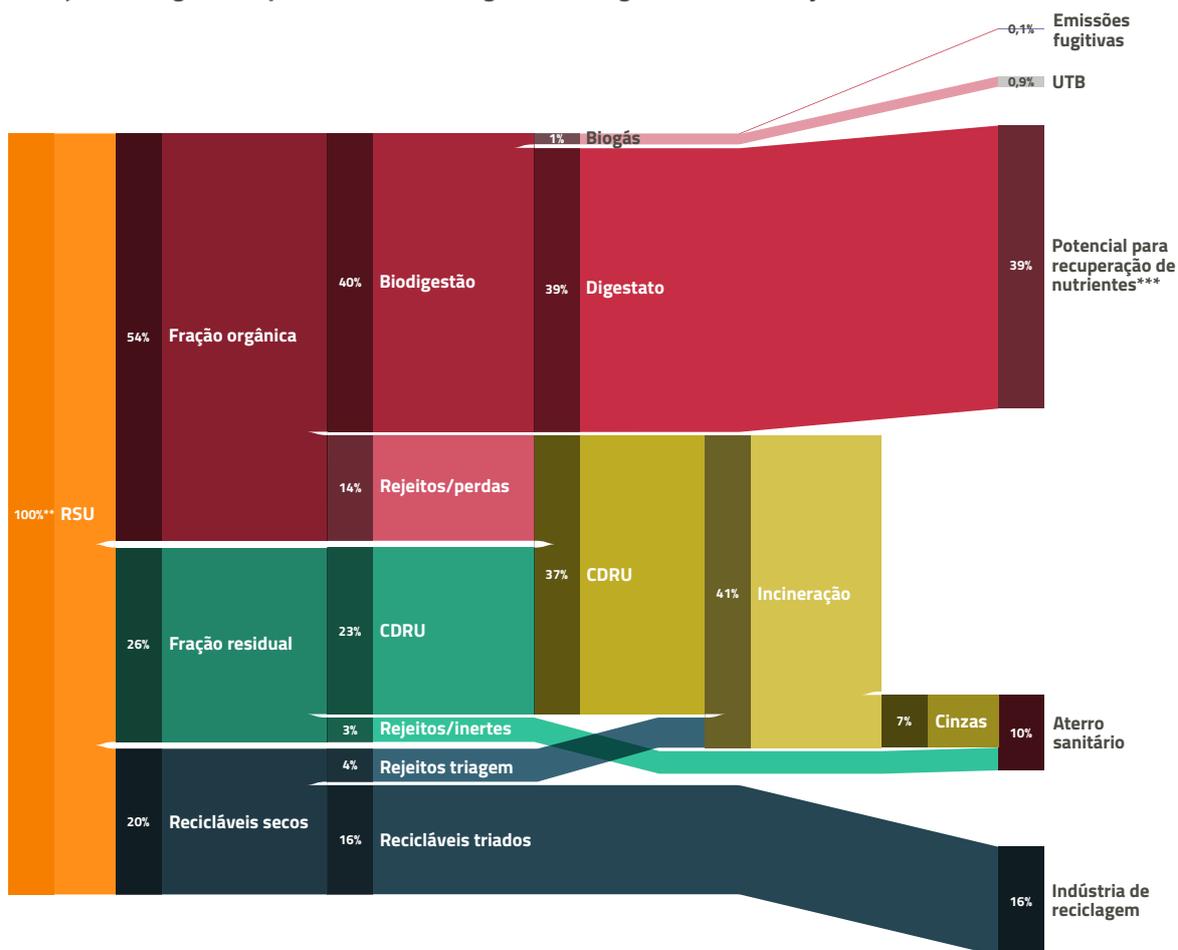
⁴⁹ CDRU com a qualidade necessária para o coprocessamento, que corresponde a, aproximadamente, 20% do RSU, dependendo da gravimetria do RSU e do processo de separação e produção do CDRU.

⁵⁰ Detalhes do potencial de disponibilidade de CDRU para a indústria cimenteira encontram-se no APÊNDICE XII.

⁵¹ A incineração e a gaseificação são instalações aptas a receber um material de qualidade inferior (maior umidade, menor poder calorífico e mais heterogêneo) ao CDRU consumido por cimenteiras e caldeiras industriais.

⁵² Conforme análise de ciclo de vida realizada para o projeto da Central de Tratamento de Resíduos Consimares (INSTITUTO 17, 2022).

Figura 6
Arranjo tecnológico de aproveitamento energético "biodigestão + incineração"*



*Os valores foram estimados para o presente estudo e podem variar significativamente conforme manejo, tecnologia e característica do RSU.

**Representação dos percentuais em massa, a partir do RSU bruto.

***Teor de sólidos do digestato de biodigestor CSTR: 20%. Uso pode variar entre cobertura de aterro, fertilizante ou bioCDRU.

A regionalização é fator fundamental para a gestão de resíduos, o que não é diferente para a incineração, principalmente em municípios que, sozinhos, não possuem CDRU suficiente para viabilizar o aproveitamento energético. Por essa razão, a estimativa do potencial desse arranjo partiu da disponibilidade de CDRU em regionais⁵³ formadas ao redor dos aterros sanitários no Brasil e da escala mínima para a operação de um incinerador com recuperação energética. A partir do total de CDRU, estimou-se a fração orgânica equivalente para a produção de biogás. Para o potencial de incineração, foi considerada a potência instalada de um incinerador de 10 MW, com capacidade aproximada de consumir cerca de 470 t/dia de CDRU⁵⁴, sendo este CDRU resultante da segregação prévia de recicláveis e orgânicos. A metodologia detalhada e demais premissas adotadas podem ser verificadas no **APÊNDICE VIII**. Os resultados do potencial da rota tecnológica da incineração estão apresentados no **APÊNDICE XIII**.

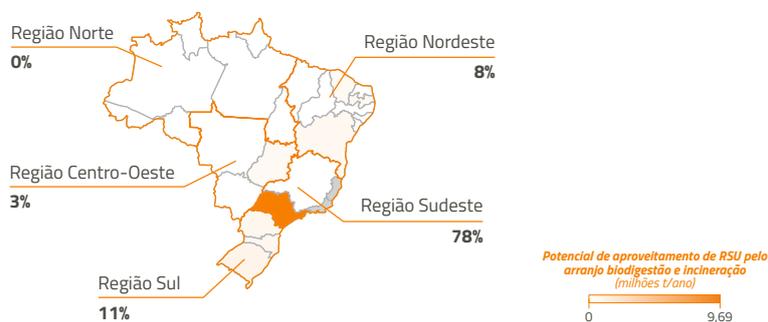
⁵³ A estimativa do potencial de aproveitamento energético teve como corte somente o RSU coletado e destinado a aterros sanitários. Para o estudo da regionalização de municípios, considerou-se como ponto de referência os municípios que possuem aterros sanitários – chamados de municípios sede. Aos grupos de municípios dentro de um raio de 100 km ao redor dos municípios-sede, deu-se o nome de “regionais”. A estimativa do potencial de incineração e gaseificação partiu do total de CDRU disponível em cada regional. A metodologia é detalhada no APÊNDICE VI.

⁵⁴ Premissas: 2,326 MWh/t (SUANI TEIXEIRA COELHO, VANESSA PECORA GARCILASSO, MARILIN MARIANO DOS SANTOS; FARAGO ESCOBAR, DANILO PERECIN; -USP, 2020), Fator de capacidade de geração elétrica de 90%, Eficiência de conversão de 20% (MME/EPE, 2014). Mais detalhes no APÊNDICE VIII.

O potencial do arranjo tecnológico de incineração de CDRU e biodigestão é apresentado na **Figura 7**. Foi considerado que a fração orgânica do RSU das regionais⁵⁵ com potencial para incineração é reciclada através da biodigestão. O potencial de geração de energia elétrica pelo biogás, dessas possíveis regionais, é de, aproximadamente, 2,2 TWh/ano, o que eleva o potencial de geração elétrica no Brasil, que é de 3,1 TWh/ano, somente com a incineração, para 5,3 TWh/ano, com o arranjo tecnológico com o biogás. Além disso, se esse biogás for direcionado para a produção de biometano, o potencial energético do arranjo tecnológico será de 3,1 TWh/ano de energia elétrica, que, somados aos 692 milhões de Nm³/ano de biometano, equivalem a 640,7 milhões de L/ano de diesel. Novamente, a região com maior potencial de aproveitamento energético de RSU é a Sudeste, que representa 8% do total para o arranjo biodigestão + incineração, com um destaque para o estado de São Paulo (**Figura 7**). Esses valores resultam da maior geração de RSU do país e dos altos índices de coleta e disposição final adequados, que refletem diretamente no potencial de disponibilidade de RSU para o aproveitamento energético. Já a região Norte não apresentou escala mínima de disponibilidade de CDRU para um incinerador, considerando as premissas adotadas neste estudo.

Figura 7
Arranjo tecnológico biodigestão + incineração.

Região do Brasil	Potencial de aproveitamento fração orgânica e CDRU* (milhões t/ano)	Potencial de geração de energia elétrica do arranjo (TWh/ano)
Centro-Oeste	0,46	0,14
Nordeste	1,53	0,49
Norte	-	-
Sudeste	14,08	4,06
Sul	2,02	0,6
Total	18,09	5,3



*Baseado na massa de RSU gerada em 2020, coletada e disposta adequadamente.

⁵⁵ Regionais formadas por municípios localizados no raio de 100 km ao redor de aterros sanitários, conforme detalhado nos APÊNDICES I e VI.

4.3 Arranjo tecnológico: biodigestão da fração orgânica e gaseificação do CDRU

A gaseificação pode ser definida como uma oxidação parcial de um combustível, que, ao ser tratado em condições subestequiométricas, leva à produção de um gás que pode ser aplicado de diferentes formas, seja para a produção direta de energia (como um gás combustível) ou para a síntese de outros subprodutos e químicos (syngás) (RECARI *et al.*, 2017). A gaseificação é considerada uma tecnologia imatura para o tratamento de RSU no Brasil e no mundo. Alto custo de instalação, tecnologias não comprovadas e rendimentos de energia baixos são exemplos de barreiras ao futuro comercial da gaseificação. Apesar desses desafios, o mercado da gaseificação apresenta potencial como contribuição para: compromissos relativos às mudanças climáticas, necessidades de recursos de baixo carbono e desafios do suprimento de energia (WORLD WASTE TO ENERGY, 2022). Além disso, a possibilidade de atender regiões de médio porte torna essa tecnologia uma importante alternativa a ser desenvolvida como complementação da gestão de RSU, em médio e longo prazos.

Tal qual para a incineração, a disponibilidade de CDRU para a gaseificação partiu da regionalização⁵⁶ de municípios localizados em um raio de 100 km ao redor de aterros sanitários. Foi considerado que o CDRU é produzido a partir da separação dos recicláveis na fonte⁵⁷ e da separação da fração orgânica úmida. O módulo gaseificador⁵⁸, objeto deste estudo, opera com 86 t/dia de CDRU, com potência elétrica projetada de 3,0 MW, sendo a potência elétrica exportável de 2,5 MW. O potencial da rota tecnológica da gaseificação de CDRU é apresentado no **APÊNDICE XIII**.

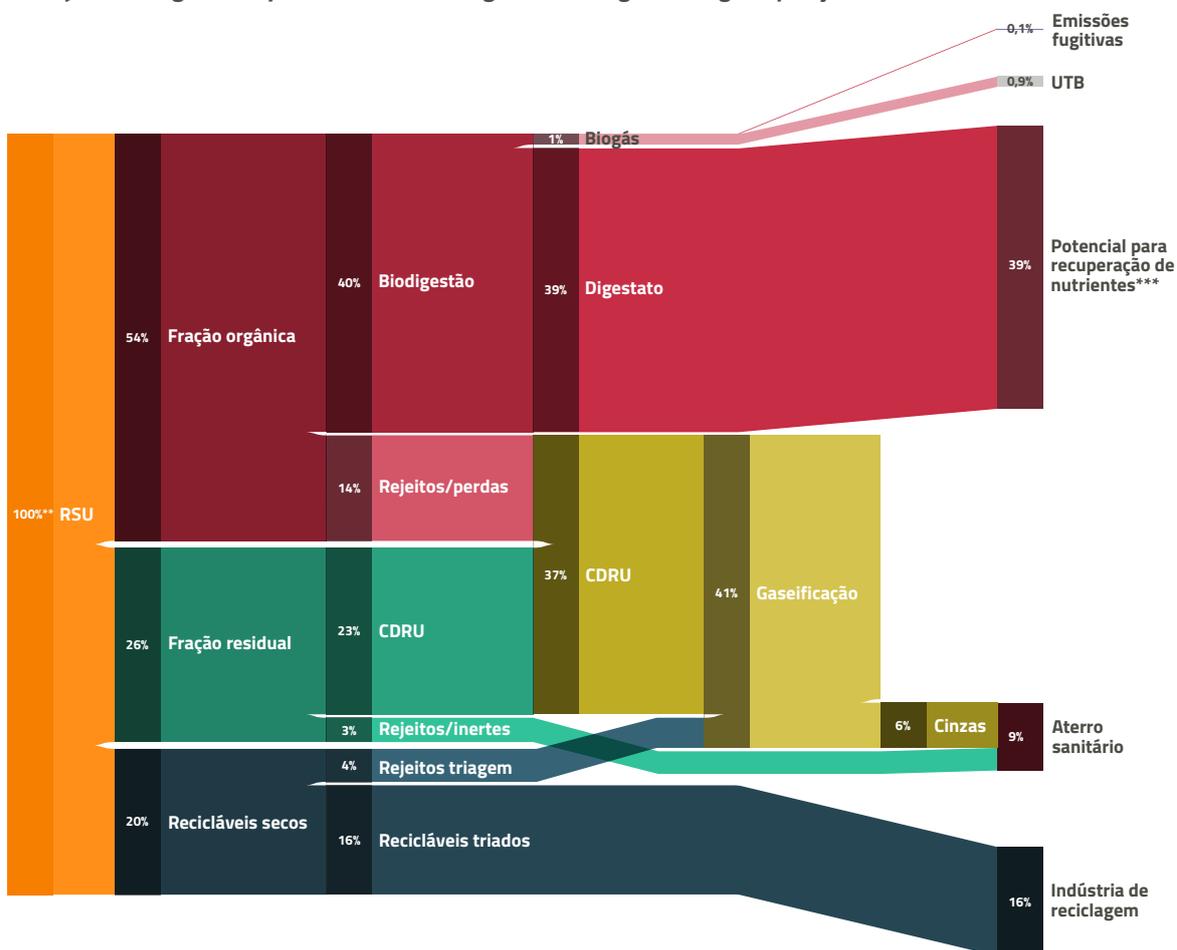
Abaixo, apresenta-se o fluxo das matérias, por meio do diagrama de Sankey, para o arranjo tecnológico biodigestão + gaseificação (**Figura 8**). O diagrama é equivalente ao do arranjo anterior, biodigestão + incineração, em que os rejeitos dos processos de triagem de recicláveis secos e a segregação dos orgânicos são direcionados à recuperação energética, ou seja, são agregados à composição do CDRU. A disposição em aterro, nesse caso, também só ocorre para possíveis rejeitos inertes, cinzas e escórias.

⁵⁶ O APÊNDICE VI apresenta, de forma mais detalhada, a metodologia adotada para a definição das regionais.

⁵⁷ Conforme a Meta 6, Indicador global - Percentual de recuperação de materiais recicláveis, do Planares, para 2040, em detalhe no APÊNDICE II.

⁵⁸ Mais detalhes das premissas adotadas podem ser vistos no APÊNDICE VII.

Figura 8
Arranjo tecnológico de aproveitamento energético "biodigestão + gaseificação"*.



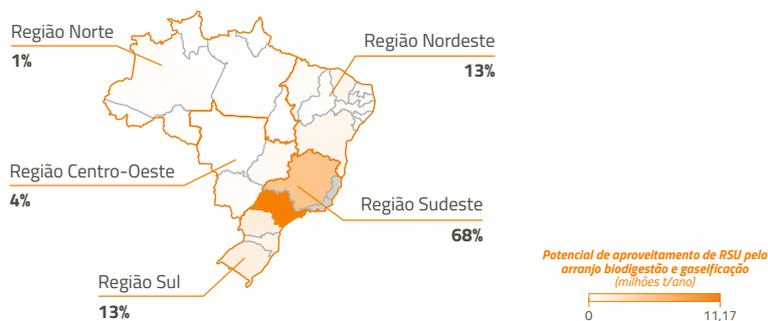
*Os valores foram estimados para o presente estudo e podem variar significativamente conforme manejo, tecnologia e característica do RSU.
**Representação dos percentuais em massa, a partir do RSU bruto.
***Teor de sólidos do digestato de biodigestor CSTR: 20%. Uso pode variar entre cobertura de aterro, fertilizante ou bioCDR.

Apresenta-se, a seguir, o potencial do arranjo tecnológico da gaseificação de CDRU e da biodigestão da fração orgânica do RSU. A partir das regionais formadas ao redor de aterros sanitários com potencial para a gaseificação, considerou-se o potencial da fração orgânica separada para a produção de biogás. Somados, CDRU e fração orgânica ultrapassam um total de 30 milhões de t/ano que podem ser aproveitados energeticamente por esse arranjo, por possibilitarem a geração de: mais de 10 TWh/ano de energia elétrica (**Figura 9**); ou ainda, 7,5 TWh/ano pela gaseificação; e mais de 1 bilhão Nm³/ano de biometano, o que equivale a 0,92 bilhão L/ano de diesel. Do mesmo modo que o arranjo biodigestão + incineração, o potencial desse arranjo é reflexo da geração de RSU e dos índices de coleta e destinação adequados.

Vale destacar que a estimativa do potencial da gaseificação não se limitou a um máximo de módulos por regional. Evidentemente, localidades mais populosas apresentaram um elevado número de módulos gaseificadores, como, por exemplo, as regionais das cidades de São Paulo e Rio de Janeiro, que totalizaram 83 e 41 módulos, respectivamente. Ainda que a instalação desse elevado número de módulos possa ser incongruente, não coube a este estudo estipular um número máximo de plantas por área que uma região pode receber, tampouco se determinou a população máxima que cada rota tecnológica consegue atender, por se entender que tal definição compete a estudos locais específicos. Por essa razão, este documento apresenta os potenciais de aproveitamento energético a partir de escalas mínimas de operação, e não de escalas máximas para instalação.

Figura 9
Arranjo tecnológico biodigestão + gaseificação.

Região do Brasil	Potencial de aproveitamento fração orgânica e CDURU* (milhões t/ano)	Potencial de geração de energia elétrica do arranjo (TWh/ano)
Centro-Oeste	1,2	0,45
Nordeste	4,15	1,62
Norte	0,46	0,17
Sudeste	21,05	7,25
Sul	3,9	1,37
Total	30,77	10,86



*Baseado na massa de RSU gerada em 2020, coletada e disposta adequadamente.

Vale reforçar que o presente estudo não visa proclamar esse arranjo tecnológico como certo de ocorrer nos próximos anos. O objetivo foi considerar e trazer para discussão tecnologias que possam atender regionais fora do raio de cimenteiras e que não haja escala o suficiente para incineradores. O arranjo tecnológico da biodigestão + gaseificação atende essa lacuna, mas ainda carece de mais desenvolvimento e avanço na curva de aprendizagem para ser considerado uma solução para produção de energia a partir do RSU brasileiro.

4.4 Arranjo tecnológico: biodigestão da fração orgânica e consumo do CDRU em caldeiras industriais

A substituição de combustíveis tradicionais por combustíveis alternativos, provenientes de resíduos, que resguardam as melhores práticas para a segurança ambiental, ocupacional e de processo, é uma prática que pode ser replicada para outras indústrias, além da indústria cimenteira, que já adota essa prática por meio do coprocessamento de resíduos em seus fornos de clínquerização. Estudos, como o de Sampaio (2014) e experiências internacionais, como as da Alemanha e da Itália (CHRISTOPHE CORD'HOMME, 2018; WEBER *et al.*, 2020), demonstram a viabilidade de queima combinada⁵⁹ de combustíveis tradicionais, como o bagaço e o carvão mineral, com o CDRU. A participação do CDRU varia entre 5 e 10% nesses casos estudados. A limitação refere-se à própria curva de aprendizagem, que precisa ser estabelecida para a superação de barreiras tecnológicas, como: riscos de corrosão da caldeira⁶⁰, requisitos de qualidade do CDRU, características físicas, como a densidade e a distribuição granulométrica de partículas do CDRU a serem devidamente compatibilizadas ao tipo da caldeira, entre outros. Existem, também, as barreiras de mercado, como a disponibilidade de CDRU no entorno das indústrias e o custo compatível ao dos combustíveis tradicionais; além das barreiras ambientais, como a necessidade de tratamento de odores provenientes do armazenamento do CDRU e a adequação dos equipamentos de controle e monitoramento de emissões atmosféricas, devido aos novos poluentes provenientes da queima do CDRU, como, por exemplo, dioxinas e furanos.

O diagrama do arranjo tecnológico que prevê o aproveitamento energético da fração orgânica do RSU, pela biodigestão, e do CDRU, pela queima combinada em caldeiras industriais⁶¹, é semelhante ao arranjo da biodigestão + coprocessamento na indústria cimenteira, pois a qualidade do CDRU para ambos os processos é equivalente (**Figura 10**). A triagem dos recicláveis secos gera uma parcela de rejeitos que possui características apropriadas para a transformação em CDRU. A biodigestão recebe a fração orgânica e produz o biogás para uso energético e o digestato para uso como fertilizante, cobertura de aterro ou bioCDR. Por fim, a fração residual é processada a CDRU para a substituição parcial de biomassa ou carvão mineral, em caldeiras industriais. As cinzas podem ser consideradas um subproduto, por serem utilizadas em outros processos, como na fabricação de cimento, tijolos ou telhas.

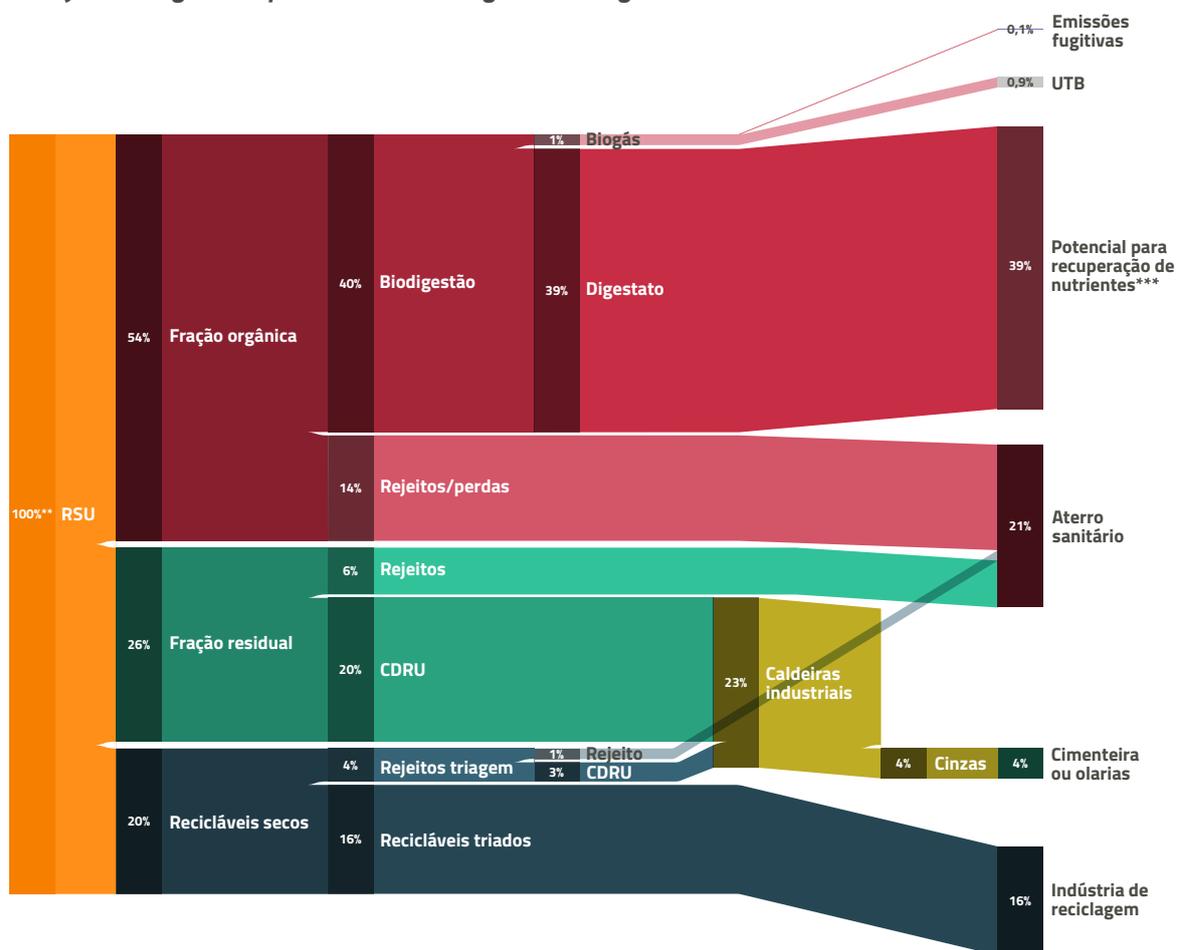
⁵⁹ Queima combinada: combustão com a participação de mais de um combustível.

⁶⁰ A presença de compostos de cloro e enxofre no CDRU aumentam a taxa de incrustações e de corrosão nas partes metálicas da caldeira.

⁶¹ Caldeiras a biomassa e carvão mineral com sistema de combustão de leito fluidizado (BFB e CFB) e carvão mineral pulverizado (PCC).

Figura 10

Arranjo tecnológico de aproveitamento energético "biodigestão + caldeiras industriais"*



*Os valores foram estimados para o presente estudo e podem variar significativamente conforme manejo, tecnologia e característica do RSU.

**Representação dos percentuais em massa, a partir do RSU bruto.

***Teor de sólidos do digestato de biodigestor CSTR: 20%. Uso pode variar entre cobertura de aterro, fertilizante ou bioCDR.

Abaixo, são apresentados os resultados do potencial de aproveitamento energético do arranjo biodigestão + caldeiras industriais. A soma do potencial de uso de CDRU em caldeiras industriais⁶² e do potencial de biometano, que pode ser produzido a partir da fração orgânica, evidencia que a energia recuperada do RSU, por esses processos, pode ultrapassar 31 mil TJ/ano, o que equivale a evitar o envio de 5 milhões t/ano⁶³ de resíduos para aterros sanitários (**Figura 11**).

⁶²As metodologias e os resultados detalhados do potencial de consumo de CDRU em caldeiras industriais e metodologia encontram-se nos APÊNDICES IX, X e XIV.

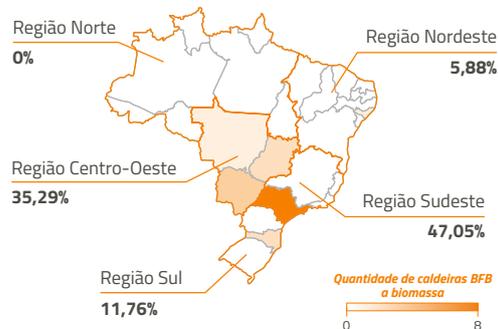
⁶³814 mil t/ano (caldeiras a biomassa) + 704 mil t/ano (caldeiras a carvão mineral).

Figura 11

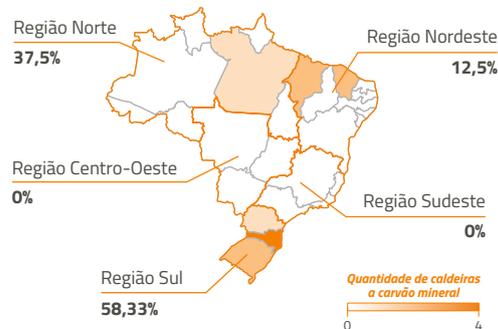
Arranjo tecnológico biodigestão + caldeiras industriais.

Região do Brasil	Potencial de fração orgânica e CDRU (milhões t/ano)	Potencial de recuperação de energia (TJ/ano)
Centro-Oeste	1,23	6.350
Nordeste	0,89	6.563
Norte	0,34	2.646
Sudeste	1,15	5.887
Sul	1,42	10.438
Total	5,01	31.884

Caldeiras BFB a Biomassa



Caldeiras a carvão Mineral



Um destaque deve ser dado para o uso da biomassa passível de ser deslocada pelo CDRU, que foi estimado em 1,3 milhão de toneladas/ano. Uma possibilidade é o bagaço ser aproveitado por outras usinas que não podem consumir o CDRU por limitações tecnológicas, como, por exemplo, as caldeiras a grelha. Esse potencial pode gerar cerca de 527 GWh/ano, o que corresponde, aproximadamente, a 4,6% e 19,8% da energia gerada nos estados de São Paulo⁶⁴ e Goiás⁶⁵, respectivamente.

Outra relevante alternativa é o uso do bagaço para a produção de etanol de segunda geração⁶⁶. Com base na economia de bagaço estimada, há a oportunidade de se gerar, aproximadamente, 208 mil m³ de etanol de segunda geração, advindos do bagaço de cana-de-açúcar deslocado. Segundo dados da Petrobras (2014), o etanol de segunda geração possui a mesma qualidade do etanol convencional e pode contribuir para um aumento de 40% na produção de etanol, sem ampliação da área plantada.

⁶⁴ A geração de energia elétrica a partir da biomassa, no estado de São Paulo, foi de 11.248 GWh, ano base 2018 (CEISE, 2019).

⁶⁵ A geração de energia elétrica a partir da biomassa, no estado de Goiás, foi de 2.654 GWh, ano base 2018 (CEISE, 2019).

⁶⁶ Produção de etanol 2G: 0,16 m³/t bagaço (JOPPERS et al., 2017).

5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O AER é um importante caminho para o cumprimento da PNRS, pois complementa e traz benefícios para as etapas da reciclagem, quando da fração orgânica, e do tratamento da fração residual, por meio da recuperação energética do CDRU. Tal prática é capaz de reduzir o envio de rejeitos para disposição final, aumentando a vida útil de aterros sanitários e diminuindo a necessidade de novas áreas para a esse fim. Além desses benefícios, ainda contribui para a diversificação da matriz energética do país, por meio da geração de energia renovável, e para a diminuição da dependência de combustíveis fósseis, reduzindo, conseqüentemente, as emissões de gases de efeito estufa (INSTITUTO 17, 2022)⁶⁷.

O atendimento à PNRS deve ser premissa para toda proposta de solução de gestão de resíduos. Prioritariamente, a segregação na fonte deve ser estruturada e incentivada para garantir a fração de recicláveis secos para triagem e reciclagem, e a fração orgânica para compostagem ou biodigestão. Para tal, é necessário iniciar discussões para o estabelecimento de metas que limitem o envio de ambas as frações – recicláveis secos e orgânicos – a aterros, bem como, ao tratamento térmico junto à fração residual e ao CDRU. Embora a fração orgânica de RSU em aterro sanitário permita a recuperação de uma parcela do biogás gerado, os nutrientes presentes nessa massa são desperdiçados. O mesmo desperdício ocorre com o uso da fração orgânica seca no processo de combustão. Além disso, da mesma forma que uma cadeia estruturada dos recicláveis secos possibilita a inclusão social e o trabalho digno, quando dentro de cooperativas e associações, a fração orgânica do RSU também pode promover esse benefício, ao ser mais um nicho de atividade a ser explorado. Da mesma forma, vale mencionar o risco que o Brasil sofre com a dependência de importação de fertilizantes, risco este evidenciado pelo anúncio de suspensão de exportação desse insumo pela Rússia – 2º maior produtor mundial – decorrente do conflito na Ucrânia (GIELOW, 2022). É primordial que o país passe a reconhecer o digestato da biodigestão como uma fonte adicional para suprimir a demanda nacional por fertilizantes. Incentivar a pesquisa para acelerar o desenvolvimento desse subproduto deve fazer parte da agenda, não somente dos setores de saneamento e energético, como também do setor agrícola.

⁶⁷ Informações detalhadas nas publicações “Biogás no Brasil: Potencial de descarbonização” e “Aproveitamento energético de RSU no Brasil: potencial de descarbonização por arranjo tecnológico” disponíveis em: https://mailchi.mp/117.org/publicacoes_biogas_no_brasil_bep.

Para destacar a necessidade de valorização da fração orgânica de resíduos, é indispensável estabelecer casos de sucesso como referência para facilitar a compreensão de onde é possível chegar e, a partir disso, determinar metas estruturadas por políticas públicas. O exemplo da Suécia⁶⁸, como já citado, merece destaque. Seu histórico revela o aumento da reciclagem, do tratamento biológico e do aproveitamento energético pela incineração à medida que o aterramento diminuiu ao longo dos anos. Esse exemplo é uma reafirmação do que já foi discutido ao longo do presente documento, ou seja, de que o AER contribui para o aumento dos níveis de reciclagem, bem como, para a redução do aterramento. Evidentemente, é preciso investir em ações conjuntas, ou seja, no avanço da coleta seletiva de recicláveis secos, no aproveitamento de orgânicos de grandes geradores, em programas de comunicação e educação ambiental, pesquisa e desenvolvimento, entre outros, a fim de alcançar níveis satisfatórios de gestão de resíduos. Estudos pilotos devem ser realizados para: averiguar a taxa potencial de eficiência de coleta seletiva e triagem no Brasil e compreender e mensurar as dificuldades para traçar metas⁶⁹ reais de separação de orgânicos, na fonte, para o país. Tudo isso objetiva o respeito à PNRS, de maneira a expandir a reciclagem de secos e orgânicos e aproveitar, energeticamente, a fração residual que necessita de tratamento.

Foi nesse contexto que o presente documento apresentou possibilidades de integração de tecnologias para o aproveitamento da fração orgânica e da fração residual (como CDRU) do RSU, com o objetivo de fornecer amplitude para análises relacionadas à gestão de resíduos, sem o compromisso com a profundidade necessária para estudos focados no desenvolvimento de projetos⁷⁰. Sem direcionar decisões, os resultados, aqui apresentados, apontam caminhos possíveis a partir do conhecimento do potencial de AER do que hoje é destinado a aterros sanitários no Brasil. A estimativa do potencial brasileiro de reciclagem dos resíduos secos precedeu os demais potenciais e resultou em 10 milhões de toneladas⁷¹ de materiais que podem ser reintroduzidos no ciclo produtivo. Os arranjos tecnológicos biodigestão + coprocessamento na indústria cimenteira, biodigestão + incineração, biodigestão + gaseificação e biodigestão + caldeiras industriais resultaram em potenciais que variam de 5 a 30 milhões t/ano de resíduos, somando-se a fração orgânica e o CDRU, que podem ser transformados em energia. O potencial energético, por sua vez, para os arranjos biodigestão + coprocessamento na indústria cimenteira e biodigestão + caldeiras industriais, resultou em cerca de 30 mil TJ/ano⁷² cada, e entre 5 e 10 TWh/ano⁷³ para os arranjos biodigestão + incineração e biodigestão + gaseificação.

⁶⁸ Mais detalhes no APÊNDICE XI.

⁶⁹ Pode-se adotar como referência para a meta de limite máximo de envio de orgânicos para aterros e tratamentos térmicos, eficiências de unidades de separação mecanizada, que podem variar, por exemplo, de 70 a 85% (BRASIL, 2022c; INSTITUTO 17, 2022).

⁷⁰ A este estudo não coube a abordagem de aspectos econômico-financeiros de cada rota tecnológica, tampouco de barreiras geográficas, logísticas ou mesmo tecnológicas. A decisão pelo melhor arranjo tecnológico para determinada localidade deve ser tomada a partir de uma análise criteriosa e profunda, levando em considerações as especificidades locais e/ou regionais e sempre com base em diagnóstico atualizado em consonância com o plano de gerenciamento de resíduos e demandas do mercado local.

⁷¹ Com base na taxa de 20% de recuperação de recicláveis secos do Planares (meta 2040). Detalhes no APÊNDICE I.

⁷² O que equivale a cerca de 17% da energia necessária à indústria cimenteira para a produção de clínquer, cuja projeção para 2030 é de 178 mil TJ/ano.

⁷³ O que equivale de 1 a 2% do consumo nacional de energia elétrica, que, em 2019, foi de 482 TWh (EPE, 2020).

Embora a biodigestão, a gaseificação e as caldeiras industriais sejam ainda incipientes como soluções para o RSU brasileiro, a discussão acerca dos potenciais desses arranjos é válida, pois abre importantes possibilidades de fortalecimento e complementariedade dos setores de saneamento e energia. Conforme visto, o potencial do arranjo biodigestão + caldeiras industriais equivale ao potencial da biodigestão + coprocessamento na indústria cimenteira, com capacidade de aproveitar 5 milhões de t/ano de resíduos. Nesse sentido, outra relevante discussão é a que trata da importância de se priorizar parques industriais em operação dentre as alternativas de aproveitamento energético do CDRU. A possibilidade de complementar e reduzir o uso de combustíveis fósseis e economizar biomassa para fins mais nobres, além de destinar resíduos a instalações já existentes, constitui uma solução perspicaz para várias localidades do país. Deve-se considerar essa solução como uma alternativa primária à implantação de novas instalações dedicadas ao tratamento de CDRU que tendem a gerar novos impactos ambientais na localidade. A grande maioria dos municípios, no entanto, não possui, em suas proximidades, um parque industrial passível de consumir tal combustível, enquanto outros apresentam potencial de disponibilidade de CDRU superior à capacidade de consumo pelas indústrias locais. Em tais casos, o arranjo biodigestão + incineração deve ser considerado como solução para os grandes centros urbanos. Já o arranjo tecnológico biodigestão + gaseificação pode ser uma possibilidade em localidades em que não há escala para a incineração. Portanto, o fato de esses arranjos ainda se encontrarem no início da curva de aprendizagem tecnológica não deve constituir fator limitante para o apoio à pesquisa e ao desenvolvimento dos mesmos para o aproveitamento energético de RSU.

Por fim, espera-se que os resultados desta publicação sirvam de base para discussões entre agentes dos meios público, privado, acadêmico e sociedade civil organizada, visando ao desenvolvimento do setor, à colaboração para a divulgação de conhecimento e à troca de experiências e produção de conteúdos com foco na expansão de todas as oportunidades econômicas, sociais e ambientais que essas iniciativas de valorização do RSU podem gerar.

6

REFERÊNCIAS

ABCP, Associação Brasileira de Cimento Portland. **Panorama do Coprocessamento Brasil 2021 (Ano base 2020)**. São Paulo, Brasil: ABCP, 2021. Disponível em: <https://coprocessamento.org.br/sobre/panorama/>

ABRELPE. **Estudo da viabilidade para a construção de um ecoparque na zona sul da cidade de São Paulo**. São Paulo, Brasil: ABRELPE, 2020a.

ABRELPE, Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama Dos Resíduos Sólidos No Brasil 2018/2019**. São Paulo: ABRELPE, 2019. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>

ABRELPE, Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020**. São Paulo: ABRELPE, 2020b. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>

ABRELPE, Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2021**. São Paulo, Brasil: ABRELPE, 2021. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2021/>

ABRELPE; ABIOGÁS. **Infográfico ABRELPE ABIOGÁS**. São Paulo, Brasil: ABiogás, 2018. Disponível em: <https://abiogas.org.br/infograficos-abiogas-abrelpe-rsu/>

ABREN. **Saneamento Energético no Brasil**. Brasília, Brasil: ABREN, 2021. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1cKqidWkUOc5vdLkgfNH9nNOjRqED7spt/view>

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Brasília, Brasil: ANEEL, 2008. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/49034/mod_resource/content/1/atlas3ed.pdf

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **D.O.U. 27/12/2017 - Edição: 247 - Seção: 1**. Brasil: DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO, 2017.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Eficiência Energética**. Brasília/DF, Brasil: ANEEL, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/eficiencia-energetica>

ANICER. **Relatório Anual**. Rio de Janeiro/RJ, Brasil: Associação Nacional da Indústria Cerâmica, 2015. Disponível em: <https://www.anicer.com.br/>

ARNIKA *et al.* **The polyvinyl chloride debate: Why PVC remains a problematic material Executive Summary**. Europa: ARNIKA Foundation, 2021.

AVFALL SVERIGE. **Swedish Waste Management 2020**. Baltzarsgatan/Malmö, Suécia: AVFALL SVERIGE, 2021.

AVFALL SVERIGE. **Swedish waste statistics - 2019**. Malmö, Suécia: AVFALL SVERIGE, 2020.

BRASIL. **Artigo 24 da Lei 12.305/2010**. Brasília/DF, Brasil: Casa Civil, 2010a. Disponível em: <https://bit.ly/32Cbpxr>

BRASIL. **Decreto No 10.936, DE 12 de janeiro de 2022**. Regulamenta a Lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília/DF, Brasil: Presidência da República, 2022a. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2022/Decreto/D10936.htm#art9

BRASIL. **Decreto no 11.043, de 13 de abril de 2022**. Aprova o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares). Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Qualidade Ambiental, 2022b. p. 187. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/D11043.htm

BRASIL. **Ferramenta de Rotas Tecnológicas e Custos para Manejo de RSU**. Brasília/DF, 2022c. Disponível em: https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/protegeer/ferramenta-de-rotas-tecnologicas-e-custos-para-manejo-de-rsu-e-manual-do-usuario-200b/FerramentaRotaseCustosV.1.01_Mai.2022.xlsm/view. Acesso em: 15 maio 2022.

BRASIL. **Lei No 12.305, de 2 de Agosto de 2010**. Versão 12.305. Brasília, Brasil: Casa Civil, 2010b.

BRASIL. **Lei No 14.299, de 5 de janeiro de 2022**. Brasília/DF, Brasil: Presidência da República, 2022d. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/L14299.htm

BRASIL. **Lei No 8.666, de 21 de junho de 1993**. Brasília/DF, Brasil: Presidência da República, 1993. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l8666cons.htm

BRASIL. **Manifesto de Transporte de Resíduos: Perguntas Frequentes**. Brasília/DF, 2021a. Disponível em: <https://sinir.gov.br/manifesto-de-transporte-de-residuos/72-manifesto-de-transporte-de-residuos-mtr/485-mtr-faq>.

BRASIL. Plano nacional de fertilizantes 2050. **Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos**, Brasília, DF, Brasil, v. 1, p. 195, 2021b.

BRASIL. **Portaria interministerial N° 274**. Brasília/DF, Brasil: Ministério do Meio Ambiente, 2019. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-interministerial-no-274-de-30-de-abril-de-2019-86235505>

CASTELLAN, J.L.; CHAZAN, D. T.; D'ÁVILA, M. L. Dessulfuração em Termoelétricas a Carvão O Caso da Usina de Candiota II. **II Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica**, [s. l.], v. II, 2006.

CCEE. **Relatório de Eficiência Energética**. São Paulo, Brasil: Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, 2021.

CEISE. **Produção de energia por biomassa cresce**. Sertãozinho/SP, 2019. Disponível em: <http://www.ceisebr.com/conteudo/producao-de-energia-por-biomassa-cresce.html>. Acesso em: 13 fev. 2022.

CHRISTOPHE CORD'HOMME. **WASTE IS A RENEWABLE: Do We Need Pretreatment or Refuse Derived Fuel for Energy-from-Waste?**. Paris, França: CNIM Group (Constructions Industrielles de la Méditerranée), 2018. Disponível em: https://www.vivis.de/wp-content/uploads/WM9/2019_WM_449-466_Cordhomme.pdf

CIBIOGÁS, Centro Internacional de Energias Renováveis - Biogás. **Panorama do biogás no Brasil - 2021**. Foz do Iguaçu/PR, Brasil: CIBiogás, 2022a.

CIBIOGÁS. **Relatório BiogasMap das Plantas em operação de RSU e esgoto - Panorama do Biogás 2021**. Foz do Iguaçu/PR, Brasil: BiogasMap, 2022b.

CNI - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Recuperação energética de resíduos sólidos: um guia para tomadores de decisão**. Brasília, Brasil: CNI, 2019.

COBRAZIL. **UTE PAMPA SUL É COBRAZIL EM AÇÃO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA E DESENVOLVIMENTO SOCIAL**. Belo Horizonte/MG, 2019. Disponível em: <https://www.cobrazil.com.br/ute-pampa-sul-e-cobrazil-em-acao-para-geracao-de-energia-e-desenvolvimento-social/>. Acesso em: 8 fev. 2022.

CONVALE. **Estruturação do Sistema de Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)**. Brasil: Consórcio Vital, 2021.

CORTEZ, Cristiane Lima; GOLDEMBERG, José. **Combustíveis Alternativos na Indústria de Cimento (Projeto Roadmap Brazil)**. São Paulo: ABCP/SNIC, 2016.

CSI. **Guidelines for Emissions Monitoring and Reporting in the Cement Industry**. Switzerland: World Business Council for Sustainable Development, 2012.

DISTRITO FEDERAL. **Lei No 6.819, DE 29 de março de 2021. Altera a Lei no 5.418, de 24 de novembro de 2014, que dispõe sobre a Política Distrital de Resíduos Sólidos e dá outras providências, para proibir o uso de tecnologia de incineração no processo de destinação final dos**. Brasília/DF, Brasil: Sistema Integrado de Normas Jurídicas do DF, 2021. Disponível em: http://www.sinj.df.gov.br/sinj/Norma/e4df5de2145140c980dd004ad1d5dd15/Lei_6819_2021.html

EPE. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2020 - Ano base 2019**. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anoario-estatistico-de-energia-eletrica>

GIELOW, Igor. **Rússia pede suspensão da exportação de fertilizantes devido à guerra na Ucrânia; Bolsonaro fica sob pressão**. São Paulo/SP, 2022. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/mercado/2022/03/russia-pede-suspensao-da-exportacao-de-fertilizantes-devido-a-guerra-na-ucrania-bolsonaro-fica-sob-pressao.shtml>. Acesso em: 6 mar. 2022.

GIZ-LAFARGEHOLCIM. **Guidelines on Pre- and Co-processing of Waste in Cement Production**. Alemanha: GIZ, 2020.

GIZ. **Opções em Waste-to-Energy na Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos. Um guia para tomadores de decisão em países emergentes ou em desenvolvimento**. Eschborn, Alemanha: GIZ, 2017.

GLOBO ECOLOGIA. **O valor do resíduo descartado no dia a dia – Globo Ecologia**. Santos, São Paulo, 2009. Disponível em: <https://coprocessamento.org.br/o-valor-do-residuo-descartado-no-dia-a-dia-globo-ecologia/>. Acesso em: 22 fev. 2022.

HORA, André Barros da; MELO, Luciane. **Panoramas setoriais - mudanças climática: papel e celulose.** Rio de Janeiro: BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2016. Disponível em: [https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/7158/2/Panoramas setoriais_mudanças climáticas_2016_P_BD.pdf](https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/7158/2/Panoramas_setoriais_mudanças_climáticas_2016_P_BD.pdf)

HPB. **ALUNORTE.** Sertãozinho/SP, 2006. Disponível em: <https://www.hpb.com.br/casos/alunorte/>. Acesso em: 8 fev. 2022.

HPB SIMISA. **Caldeiras de Leito Fluidizado.** Ribeirão Preto/SP: 12 Seminário Brasileiro Agroindustrial, 2011. Disponível em: http://www.stab.org.br/12sba/05_JOAOACENSO_DEDINI.pdf

HYDRO. **Hydro vai investir em projeto de substituição de combustível na Alunorte.** Brasil, 2021. Disponível em: <https://www.hydro.com/pt-BR/imprensa/noticias/2021/hydro-to-invest-in-alunorte-fuel-switch-project/>. Acesso em: 8 fev. 2022.

IAB, Instituto Aço Brasil. **A Siderurgia em Números 2020.** Rio de Janeiro/RJ, Brasil: Instituto de Aço Brasil, 2021. Disponível em: https://institutoacobrasil.net.br/site/wp-content/uploads/2019/08/AcoBrasil_Mini_anuario_2019.pdf

IBA - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Relatório Anual 2020. **Associação Brasileira de Proteína Animal**, [s. l.], p. 160, 2020. Disponível em: <http://abpa-br.org/relatorios/>

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estimativas de População: Tabela 6579 - População residente estimada.** Brasil, 2020. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6579>.

IFC. **Increasing the Use of Alternative Fuels at Cement Plants.** Washington, D.C: IFC - International Finance Corporation, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1596/28134>

INSTITUTO 17. **Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos no Brasil: Potencial de descarbonização por arranjo tecnológico.** São Paulo/SP, Brasil: Instituto 17, 2022.

INSTITUTO 17. **Biogás no Brasil: Potencial Oferta a Curto Prazo.** São Paulo/SP: Programa de Energia para o Brasil – BEP, 2021. Disponível em: <http://i17.org/>

INTERNATIONAL, COAL. **Doosan Babcock Strengthens Foothold in Latin America with £75 Million Contract.** [S. l.], 2009. Disponível em: <https://mqworld.com/2009/01/14/doosan-babcock-strengthens-foothold-in-latin-america-with-75-million-contract/>. Acesso em: 8 fev. 2022.

JOPPERT, Caio L. *et al.* *Energetic shift of sugarcane bagasse using biogas produced from sugarcane vinasse in Brazilian ethanol plants.* **Biomass and Bioenergy**, Reino Unido, v. 107, p. 63–73, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.09.011>

KARSTENSEN, Kare Helge. *Formation, release and control of dioxins in cement kilns.* **Chemosphere**, Reino Unido, v. 70, n. 4, p. 543–560, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.06.081>

LOPES, E. J.; OKAMURA, L. A.; YAMAMOTO, C. I. *Formation of dioxins and furans during municipal solid waste gasification.* **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, Reino Unido, v. 32, n. 1, p. 87–97, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20150321s00003163>

LOPES, Luciana. **Gestão e gerenciamento integrados dos resíduos sólidos urbanos: alternativas para pequenos municípios.** 110 f. 2006. – USP: Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas – FFLCH, São Paulo, Brasil, 2006.

MINAS GERAIS. **Lei Estadual no 21.557, de 22 de dezembro de 2014. Acrescenta dispositivos à Lei no 18.031, de 12 de janeiro de 2009 – que dispõe sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos.** Minas Gerais, Brasil: Estado de Minas Gerais, Brasil, 2014. Disponível em: <https://www.almg.gov.br/consulte/legislacao/completa/completa.html?tipo=LEI&num=21557&ano=2014>

MITSUBISHI POWER. **Bubbling Fluidized Bed (BFB) Boilers.** Londres, 2022. Disponível em: <https://power.mhi.com/products/boilers/lineup/bfb>. Acesso em: 10 jan. 2022.

MMA, Ministério do Meio Ambiente. **Gestão de Resíduos Orgânicos.** Brasília, DF, 2022. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/gestao-de-residuos-orgânicos.html#o-que-sao-residuos-organicos>. Acesso em: 15 jan. 2022.

MMA. **RESOLUÇÃO CONAMA/MMA No 499, DE 6 DE OUTUBRO DE 2020.** Brasil: DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO, 2020.

MME/EPE. **Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos - Nota Técnica DEA 18/14.** Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia; Empresa de Pesquisa Energética, 2014. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/DEA_18_-_Inventário_Energético_de_Resíduos_Sólidos_Urbanos%5B1%5D.pdf

MME. **Geração e Energia Elétrica**. Brasília/DF, 2021a. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/energia-eletrica/energia-1/geracao-e-energia-eletrica>. Acesso em: 8 fev. 2022.

MME. **Portaria MME no 540/2021**. Brasil: Ministério de Minas e Energia, 2021b. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-publica-detalhamento-do-programa-para-uso-sustentavel-do-carvao-mineral-nacional/programa-para-uso-sustentavel-do-carvao-mineral-nacional.pdf>

N + P GROUP. **N + P Alternatives fuels**. [S. l.]: N + P Group, 2021.

NATURVÅRDSVERKET, SWEDISH ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Dados Internos: Percentual de coleta seletiva de resíduos orgânicos na Suíça.pdf**. Suíça: NATURVÅRDSVERKET, SWEDISH ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2022.

ONLINE, Cana. **Vantagens da caldeira de leito fluidizado borbulhante**. Ribeirão Preto/SP, 2014. Disponível em: <http://www.canaonline.com.br/conteudo/vantagens-da-caldeira-de-leito-fluidizado-borbulhante.html>. Acesso em: 10 jan. 2022.

PETROBAS. **Conheça o etanol produzido com bagaço de cana**. Brasília/DF, 2014. Disponível em: <https://petrobras.com.br/fatos-e-dados/conheca-o-etanol-produzido-com-bagaço-de-cana.htm>.

PIAIA, Eduarda. **Uso de rejeitos da coleta seletiva de materiais Recicláveis para a produção de combustível derivado de resíduos - CDR**. 133 f. 2021. - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/229208/PGEA0715-D.pdf?sequence=1&isAllowed=y> - Página 75 e 76

PLANSAB, Plano Nacional de Saneamento Básico. **Caderno Temático 3: Recuperação Energética de Resíduos Sólidos Urbanos**. Brasília/DF, Brasil: PLANSAB, 2019. Disponível em: https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/Arquivos_PDF/plansab/3-CadernotematicoRecuperacaoEnergeticadeRSU.pdf

POWERGEN INTERNATIONAL. **Foster Wheeler to design and supply CFB boiler islands for Brazilian Alumina Refinery**. Dallas, Texas, 2006. Disponível em: <https://www.power-eng.com/coal/foster-wheeler-to-design-and-supply-cfb-boiler-islands-for-brazilian-alumina-refinery/#gref>. Acesso em: 8 fev. 2022.

PROBIOGÁS. **O estado da arte da tecnologia de metanização seca.** In: Brasília: Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ)*, 2015.

PVC, Instituto Brasileiro do. **O que é PVC?** São Paulo/SP, 2021. Disponível em: <https://pvc.org.br/o-que-e-pvc/>. Acesso em: 16 fev. 2022.

RAHMAN, Azad *et al.* **Impact of Alternative Fuels on the Cement Manufacturing Plant Performance: An Overview.** Queensland, Australia: *Procedia Engineering*, 2013.

RAHMAN, Md Mizanur *et al.* *Hybrid application of biogas and solar resources to fulfill household energy needs: A potentially viable option in rural areas of developing countries.* **Renewable Energy**, Reino Unido, v. 68, p. 35–45, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.01.030>

RECARI, J *et al.* *Torrefaction of a solid recovered fuel (SRF) to improve the fuel properties for gasification processes.* **Applied Energy**, Reino Unido, v. 203, p. 177–188, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.014>

RUTKOWSKI, Jacqueline. **Tecnologia Social da Coleta Seletiva Solidária : melhores práticas na prestação de serviço de coleta por catadores de materiais recicláveis.** Brasil: XI Seminário Nacional de Resíduos Sólidos: desafios para implantação da política nacional, 2014.

RUTKOWSKI, Jacqueline Elizabeth; RUTKOWSKI, Emília Wanda. *Expanding worldwide urbansolid waste recycling: The Brazilian social technology in wastepickers inclusion.* **Waste Management & Research**, [s. l.], v. 22, n. DOI: 10.1177/0734242X15607424., p. 12, 2015.

RUTKOWSKI, Jacqueline Elizabeth; RUTKOWSKI, Emília Wanda. *Recycling in Brasil: Paper and plastic supply chain.* **Resources**, [s. l.], v. 6, n. 3, p. 1–15, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/RESOURCES6030043>

SAMPAIO, Raquel Paschoal. **Estudo de caso dos possíveis efeitos deletérios causados pelo combustível derivado de resíduo (CDR) em caldeiras voltadas a produção de energia elétrica queimando principalmente bagaço de cana.** 1–137 f. 2014. - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

SEADE. **Investimentos para atividade canavieira crescem em 12% na região de Araçatuba.** [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.seade.gov.br/investimentos-para-atividade-canavieira-crescem-em-12-na-regiao-de-aracatuba/>. Acesso em: 15 jan. 2022.

SECRETARIA DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E DO TURISMO. **Com apoio do Estado, usina térmica vai transformar resíduos sólidos sem poluir o meio ambiente.** [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.sedest.pr.gov.br/Noticia/Com-apoio-do-Estado-usina-termica-vai-transformar-residuos-solidos-sem-poluir-o-meio>. Acesso em: 12 fev. 2022.

SEPE. **Modelagem Técnica e Operacional UTBMs no DF- Consulta Pública.** Distrito Federal: SEPE, 2021.

SEYRING, Nicole *et al.* **Assessment of separate collection schemes in the 28 capitals of the EU Final Report CLIENT European Commission Directorate-General Environment Report title Final Report.** Comissão Europeia: *Copenhagem Resource Institute*, 2015.

SIMA. **Resolução Sima No 047, De 06 De Agosto De 2020.** Brazil: SIMA, 2020.

SIMA, Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente do Estado de São Paulo. **São Paulo apresenta soluções de Bioenergia para Desenvolvimento Sustentável em evento internacional.** São Paulo, 2021. Disponível em: <https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/2021/06/sao-paulo-apresenta-solucoes-de-bioenergia-para-desenvolvimento-sustentavel-em-evento-internacional/>. Acesso em: 15 jan. 2022.

SNIC. **Roadmap Tecnológico do Cimento: Potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050.** Rio de Janeiro: SNIC, 2019.

SNIS. **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) - ano base 2019.** Brasília/DF, Brasil: SNIS, 2020a. Disponível em: www.snis.gov.br

SNIS. **Série Histórica 2019 - Indicadores água e esgoto.** Brasil, 2020b. Disponível em: <http://app4.mdr.gov.br/serieHistorica/#>. Acesso em: 23 jan. 2022.

SUANI TEIXEIRA COELHO, VANESSA PECORA GARCILASSO, MARILIN MARIANO DOS SANTOS, Javier; FARAGO ESCOBAR, DANILO PERECIN, Diego Bonfim de Souza. -- São Paulo: IEE-; -USP. **Atlas de bioenergia do Estado de São Paulo**. [S. l.: s. n.], 2020.

TAIHEIYO ENGINEERING. *Taiheiyo Chlorine Bypass System*. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.taiheiyo-eng.co.jp/en/engineering/taiheiyo-chlorine-bypass-system.html>. Acesso em: 22 jan. 2022.

TEC, Tecnologia em Calor. **Tabela - Poder Calorífico Inferior**. São Paulo/SP, Brasil: TEC Tecnologia em Calor, 2021. Disponível em: <http://www.ecoverden.com.br/files/tabelaPoderCalorificoGrifado.pdf>

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno. **Energia termelétrica: gás natural, biomassa, carvão, nuclear**. Rio de Janeiro: EPE - Empresa de Pesquisa Energética, 2016.

UNFCCC. *Glasgow Climate Pact - Glasgow Climate Change Conference - October/November 2021 decisions*. Glasgow: UNFCCC, 2021.

WEBER, Kathrin *et al.* *Status of waste-to-energy in Germany, Part I – Waste treatment facilities*. **Waste Management and Research**, [s. l.], v. 38, n. 1_suppl, p. 23–44, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0734242X19894632>

WEG. **Geração de Energia Elétrica com RSU – Resíduos Sólidos Urbanos**. Jaraguá do Sul - SC, Brasil: WEG, 2019.

WORLD WASTE TO ENERGY. *The Future of Gasification*. Brighton, 2022. Disponível em: <https://www.worldwastetoenergy.com/the-future-of-gasification/>. Acesso em: 20 mar. 2022.

ZOCCHIO, Guilherme. **Oligopólio da laranja une produtor e trabalhador em críticas. Brasil, 2018**. Disponível em: <https://reporterbrasil.org.br/2018/06/o-oligopolio-que-manda-e-desmanda-na-industria-da-laranja/>. Acesso em: 10 ago. 2021.

GLOSSÁRIO

APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS – AER

Prática que permite a transformação do resíduo em energia, por meio de processos como por exemplo a digestão anaeróbia, a combustão e a gaseificação.

BIOGÁS

Fonte renovável de energia, produzida por meio do processo de digestão anaeróbia de matéria-orgânica (substrato). É composto, majoritariamente, por metano e dióxido de carbono e, em menor concentração, por nitrogênio, oxigênio, sulfeto de hidrogênio, entre outros gases*. O biogás, que pode ser usado na geração de energia elétrica, térmica ou veicular. É uma fonte que fomenta o desenvolvimento sustentável, em diversos processos produtivos, e promove diversos benefícios ambientais, sociais e econômicos.

* A composição do biogás varia de acordo com o tipo, a origem e o manejo do substrato a ser utilizado; o biogás de origem urbana, por exemplo, tem, em sua composição, siloxanos.

COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUO – CDR

Geralmente, se refere à fração segregada de alto poder calorífico de resíduos comerciais ou industriais (SNIC, 2019). Possui característica de material seco triturado de granulometrias diversas. De acordo com a necessidade do processo a ser utilizado para seu consumo, pode apresentar diferentes qualidades e ser equiparado aos combustíveis comercialmente usuais na Europa: o SRF (*Solid Recovered Fuel*) ou o RDF (*Refuse Derived Fuel*).

COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUO URBANO – CDRU

Combustível derivado de resíduos (CDR) originários de resíduo sólido urbano (RSU). Para coprocessamento na indústria cimenteira, sugere-se como parâmetro de referência o PCI acima de 10 MJ/kg (conforme ABNT NBR 16849, SIMA 47/2020 e (GIZ, 2017), sendo idealmente superior a 15 MJ/kg, além de rigorosa observância dos teores de mercúrio e cloro (GIZ, 2017). Para outros tratamentos térmicos, como gaseificação ou incineração, sugere-se como referência PCI acima de 7 MJ/kg (GIZ, 2017).

CLÍNQUER

Produto intermediário do processo de fabricação do cimento, resultante de processo termoquímico, cuja principal matéria-prima é o calcário.

CLINQUERIZAÇÃO

Parte do processo produtivo do cimento, em que o óxido de cálcio (CaO) reage a altas temperaturas (entre 1400 e 1500°C), com sílica, alumina e óxido ferroso, para formar os silicatos e aluminatos que geram o clínquer (RAHMAN, A. et al., 2013).

CONCEITO DE ATERRO MÍNIMO

Recurso que objetiva promover o aproveitamento energético dos resíduos, aumentar a vida útil dos aterros existentes e reduzir a necessidade de áreas para a construção de novos aterros sanitários (SIMA, 2021).

COPROCESSAMENTO

Destinação final ambientalmente adequada que envolve o processamento de resíduos sólidos como substituto parcial de matéria-prima e/ou de combustível no sistema forno de produção de clínquer, na fabricação de cimento (MMA, 2020).

DIGESTATO

Subproduto da digestão anaeróbia, que pode ser sólido ou líquido, com características agronômicas interessantes para a nutrição do solo.

ECOPARQUE

Instalações que segregam, processam e transformam as diferentes frações do RSU em produtos de valor agregado (materiais recicláveis, resíduos orgânicos para biodigestão e resíduos para produção de CDRU).

FRAÇÃO RESIDUAL DO RSU	Parcela do RSU pós segregação de recicláveis secos e orgânicos, que não possui viabilidade de ser reciclada devido a barreiras tecnológicas, de mercado ou logística, mas pode ser transformada em CDRU.
PLANTAS DE CIMENTO	Podem ser divididas em dois grupos: plantas integradas e plantas de moagem. A planta integrada produz o clínquer e o cimento. A planta de moagem recebe o clínquer e aditivos para a produção (moagem) do cimento. Somente a planta integrada possui demanda intensa de energia térmica, devido ao processo de clinquerização, e, portanto, pode realizar o coprocessamento de resíduos substitutos de combustíveis em seus fornos.
QUEIMA COMBINADA	Combustão com a participação de mais de um de combustível (RAHMAN, M. M. et al., 2014)
RECICLAGEM	Processo de transformação dos resíduos sólidos que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas à transformação em insumos ou novos produtos, observadas as condições e os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes mencionados na PNRS (BRASIL, 2010b).
REJEITO	Resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentam outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010b). Acrescenta-se a este conceito: os materiais de baixo valor na cadeia da reciclagem, o que inviabilizaria seu transporte e triagem, e aqueles para os quais não existem tecnologias para reaproveitamento (LOPES, 2006).
ROADMAP DO CIMENTO	Mapeamento da situação atual e tendências futuras da indústria brasileira do cimento, concentrando-se nas estratégias de mitigação do carbono gerado na fabricação do mesmo, com foco nas emissões diretas provenientes do processo produtivo, no consumo de energia e nas emissões indiretas, advindas do consumo de energia elétrica dentro da unidade fabril (SNIC, 2019).
SOLID RECOVERED FUEL – SRF	Combustível produzido a partir de resíduos não perigosos, de acordo com as especificações da norma europeia EN15359, mais eficiente que o RDF e por um processo mais refinado de fabricação. Possui controle de qualidade principalmente para o poder calorífico e para o teor de cloro e mercúrio, além de outros metais, o que proporciona essa classificação a esse tipo de combustível.
REFUSE DERIVED FUEL – RDF	Equivalente ao CDR, ou seja, material triturado produzido a partir de RSU, usado para gerar energia em instalações de recuperação energética.
RESÍDUO SÓLIDO URBANO – RSU:	Resíduos compostos por resíduos domiciliares, originários de atividades domésticas em residências urbanas, e por resíduos de limpeza urbana, originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas (BRASIL, 2010a).
USINA TERMOELÉTRICA A BIOGÁS – UTB	Unidade que transforma resíduos orgânicos em biogás, por meio do processo de biodigestão, para a geração de energia elétrica.
UNIDADE DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA – URE	Qualquer unidade dedicada ao tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com recuperação de energia térmica gerada pela combustão, com vistas à redução de volume e periculosidade, preferencialmente associada à geração de energia térmica ou elétrica (BRASIL, 2019).
UNIDADE DE TRATAMENTO MECÂNICO BIOLÓGICO – UTMB	Sistema de tratamento de resíduos sólidos que combina processos de triagem com processos biológicos, com o intuito de: processar diversos tipos de resíduos, incluindo o RSU; recuperar materiais; e proporcionar o aproveitamento energético de resíduos e a estabilização da fração orgânica úmida com a produção de composto, combustível derivado de resíduos e/ou biogás (SIMA, 2020).

PERGUNTAS E RESPOSTAS

1. No contexto do aproveitamento de resíduos, como ficam os catadores?

As cooperativas e associações que atuam com materiais recicláveis, no Brasil, têm um papel importante na base do processo de aproveitamento de resíduos. Devido à baixa adesão à coleta seletiva nos municípios brasileiros – em torno de 40%, segundo dados do Sistema Nacional de Informações em Saneamento (2018) –, esse grupo se torna essencial para a separação de resíduos que podem ou não ser reaproveitados. Entre as formas de ampliar essa prática de segregação na fonte e, conseqüentemente, melhorar os índices de reciclagem no Brasil, estão as políticas públicas, a estruturação da coleta seletiva pelas prefeituras e o apoio às cooperativas e associações. Os municípios devem ser incentivados a contratar cooperativas e associações como prestadores de serviço de coleta de recicláveis, enquanto as plantas de aproveitamento energético de resíduos devem incluir, em seus modelos de negócio, o trabalho dessas entidades. Uma maneira de prever essa relação é garantir tal obrigação via contrato/licitação, por exemplo.

2. Quanto mais recicláveis, menos resíduos para o aproveitamento energético. Quanto mais resíduos para o aproveitamento energético, menos recicláveis. Essas atividades concorrem entre si? Como equilibrar isso?

O principal objetivo é garantir o respeito à hierarquia definida pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e suas diretrizes. As políticas públicas devem incentivar a coleta seletiva. Os municípios precisam apoiar, estruturar e acompanhar as cooperativas e associações de catadores/as de materiais recicláveis para que estas possam atuar com efetividade na coleta e na segregação de recicláveis. Porém, contratos devem garantir que o aproveitamento energético, por meio da rota térmica, ocorra somente no caso de resíduos que não possuem valor agregado para a reciclagem, de modo a não criar conflito de interesse entre a cadeia da reciclagem, da qual fazem parte as cooperativas/associações de catadores, e o processo de aproveitamento energético. Nesse contexto, deverá ser encaminhado para aproveitamento via rota térmica somente o que não seja viável para a reciclagem, preferencialmente via catadores.

É importante que se tenha ciência de que o aproveitamento energético não é um concorrente da reciclagem, mas uma alternativa complementar aos demais processos que compõem a gestão integrada e sustentável de RSU. Não é só o aumento do volume de recicláveis que viabiliza, de fato, a reciclagem. É preciso um esforço de planejamento que conte com: a mobilização da sociedade, roteiros para a coleta de porta em porta, a elaboração de rotas e logística e o estabelecimento de relação com os principais geradores de resíduos, entre outros fatores (RUTKOWSKI, J. E.; RUTKOWSKI, 2017).

3. Indústrias de reciclagem (que utilizam materiais para a manufatura de novos produtos) estão mais concentradas nas regiões Sul e Sudeste do Brasil. Nesse contexto, faria sentido estabelecer percentuais de reciclagem para as outras regiões do país?

Sim, uma vez que as indústrias se desenvolvem a partir da disponibilidade de resíduos em determinada região. Nesse sentido, pode-se citar a grande oferta de resíduos recicláveis que seria criada pela regionalização de municípios, o que levaria o mercado consumidor de materiais recicláveis a perceber a disponibilidade de matéria-prima e, conseqüentemente, a se estruturar rapidamente para absorver o material ofertado.

4. A reciclagem é prioritária, conforme determina a legislação. No entanto, pode haver materiais que não se mostram economicamente viáveis para serem reciclados. Além disso, pode haver casos em que a reciclagem se mostra ambientalmente desfavorável, por aumentar o impacto ao se comparar aos causados pelo uso de matérias virgens. Como tratar/conduzir essa discussão?

Os benefícios sociais devem ser levados em consideração para que uma decisão seja tomada. Se a atividade for desenvolvida por cooperativas ou associações, nas quais os trabalhadores têm condições de trabalho seguro e decente, a escolha pelo processo de reciclagem garante benefícios que podem tornar os possíveis impactos negativos uma questão secundária. A viabilidade econômica de um reciclável depende de inúmeros fatores, mas, principalmente, da existência de mercado consumidor na região. Assim, é um fator mutável que não define, de forma isolada, o destino do resíduo. A análise do ciclo de vida (ACV) dos recicláveis é um tema bastante relevante no processo de tomada de decisão, o que acarreta a necessidade de mais investimentos e foco neste tipo de estudo. Há casos⁷⁴, por exemplo, em que o impacto causado pelo resíduo reciclável se apresentou maior que o do resíduo sendo destinado ao aterro. Esses estudos apontam o transporte do resíduo até o mercado consumidor, além dos processos de consumo de água e de energia do material a ser reciclado, por exemplo, no plástico, como causas do aumento do impacto. Desta forma, conforme já abordado na pergunta 3, é uma questão de tempo e escala para que esse mercado se aproxime da origem dos resíduos segregados, o que contribuirá para a redução do impacto, nesses casos.

5. Ao se garantir a separação dos recicláveis e da fração orgânica, sobra muito pouca fração residual. Não seria melhor enviar essa parcela para aterro, ao invés de incinerar ou comprocessar?

Aparentemente é pouco, quando se avalia um só município, mas, quando se extrapola para todo o país, os números apresentados, nesta publicação, revelam que essa fração residual pode gerar energia e, ainda, reduzir a necessidade de mais áreas para aterros sanitários. Vale lembrar que a energia proveniente do CDRU pode contribuir para que a matriz energética brasileira dependa, cada vez menos, de combustíveis fósseis.

6. Como separar a fração orgânica do RSU de maneira eficiente e economicamente viável?

A segregação na fonte é, sem dúvida, a melhor solução, por ser mais efetiva e barata. Não se pode afirmar que seja fácil, nem que seja de rápida implementação, assim como não é com os recicláveis. Iniciativas de coleta de resíduos orgânicos como um serviço já são realidade em municípios como Rio de Janeiro (Ciclo Orgânico⁷⁵) e Curitiba (Composta Mais⁷⁶), com retorno do composto gerado ao contratante. Na cidade de Ponta Grossa/PR⁷⁷ 2021, foi instalada uma UTB em que ocorre a coleta seletiva e a separação mecanizada dos resíduos, e, após esses processos, a fração orgânica é encaminhada aos biodigestores. Outra iniciativa que pode dar muitos frutos é iniciar a segregação de orgânicos na fonte de grandes geradores, como restaurantes, CEASAs e supermercados. É possível contar com a separação mecânica em unidades de tratamento específicas para receber o RSU e transformá-lo em material passível de aproveitamento energético. Ainda que seja uma alternativa que demanda alto investimento de implantação e operação, bem como, de escala, para a viabilização, pode ser uma solução para grandes centros, onde a questão de logística de coleta é mais complexa. No Brasil, ainda não há plantas como essa em operação, que inclui a separação da fração orgânica para a biodigestão, mas já há projetos em desenvolvimento, como no caso do consórcio CONVALE/MG (CONVALE, 2021), no Distrito Federal, em fase de consulta pública (SEPE, 2021), e em São Paulo (ABRELPE, 2020a).

7. Qual será o destino do digestato da biodigestão do RSU proveniente da separação mecânica, ou seja, do RSU com chance de contaminação?

A qualidade do digestato será determinante em relação ao seu uso final. Ao se comparar a qualidade do digestato com a separação mecanizada (chances de contaminação) com o da separação de orgânicos na fonte, sem contaminação com outros resíduos, a qualidade é inferior, e, por consequência, as possibilidades de uso são menores. O digestato com chances de contaminação pode ser utilizado como cobertura de aterro ou, ainda, como um bioCDRU com aproveitamento energético. Já quando a segregação é adequada e apresenta uma qualidade alta de resíduos orgânicos, o digestato pode ser utilizado como biofertilizante, após processo de maturação. Neste caso, um dos processos que podem ser utilizados para a maturação é a compostagem controlada em túneis ou galpões condicionados, seguida por uma segunda maturação ao ar livre e, posteriormente, por um processo de peneiramento e refino para a remoção de eventuais materiais impróprios e inertes (PROBIOGÁS, 2015). Outra tecnologia de pós-tratamento (maturação/secagem) do digestato é o sistema de leiras cobertas com membranas semi-impermeáveis, que será implementado no Distrito Federal (SEPE, 2021). Além disso, se o digestato for líquido, como no caso da UTB de Ponta Grossa/PR⁷⁸, o mesmo deve ser armazenado em lagoa para posterior uso como fertilizante. As etapas de pós-tratamento visam a aumentar a qualidade do composto e a adequar sua utilização como fertilizante.

⁷⁴ Informações mais detalhadas podem ser acessadas na publicação de *Aproveitamento energético de RSU no Brasil: Potencial de descarbonização por arranjo tecnológico*.

⁷⁵ *Ciclo Orgânico - Fazemos a coleta e compostagem de resíduos orgânicos* (cicloorganico.com.br).

⁷⁶ *Compostagem e Coleta de Resíduo Orgânico em Curitiba | COMPOSTA+* (compostamais.com).

⁷⁷ *Ponta Grossa inaugura primeira usina termelétrica pública do Brasil | Prefeitura Municipal de Ponta Grossa*.

⁷⁸ *PGA - Usina Termelétrica a Biogás - Ponta Grossa Ambiental* (pgambiental.com.br).

8. Por que raio de 100 km no cálculo de municípios regionalizados?

É uma distância média estimada por este trabalho, mas também baseada no estudo do IFC sobre CDRU para coprocessamento (IFC, 2017). É importante destacar que este é um número utilizado somente para a compreensão da dimensão do potencial que o Brasil possui para aproveitar energeticamente o RSU. Trata-se, portanto, de um número orientativo em nível de Brasil, já que a regionalização é um importante caminho para a gestão de resíduos. As regionais formadas foram resultado de um trabalho de georreferenciamento, mediante premissas únicas para todo o país. Logicamente, não foram consideradas as especificidades de cada local, pois isso implicaria em mais variáveis e, assim, dificultaria as comparações. Desse modo, para que não houvesse mais de um parâmetro de definição das regionais formadas, este trabalho não levou em consideração os consórcios municipais já existentes.

9. Por que o potencial de incineração apresentado considera a separação da fração orgânica do RSU, se o incinerador é projetado para receber o RSU bruto?

Este estudo considerou como principal premissa o cumprimento da PNRS. Assim como no caso dos materiais recicláveis, como plástico, metal e papelão, a fração orgânica também pode ser reciclada, por meio da compostagem ou mesmo da biodigestão. Portanto, ainda que a incineração possa tratar termicamente os orgânicos do RSU, a reciclagem deve ser adotada como um passo anterior. Para que o potencial reflita essa condição ideal para a fração orgânica, bem como um potencial conservador para a incineração, esse percentual foi deduzido das estimativas do potencial apresentado neste estudo.

10. O Cloro presente no CDRU, que é um problema na indústria cimenteira, também será um problema nas caldeiras. Como resolver?

Por meio de controle de qualidade para atendimento às normas (exemplo SIMA 47/20 e ABNT NBR 16849) ou de acordos com a indústria consumidora. Controlar a alimentação do CDRU, em substituição ao combustível principal, conforme a qualidade do material recebido, também garante a segurança no processo. Em um horizonte de longo prazo, se o mercado entender essa oportunidade, pode-se considerar a adequação de equipamentos, para possibilitar o aumento do consumo de CDRU, a exemplo do ocorrido no setor cimenteiro, que desenvolveu uma solução para o Cloro, o "*chroline by pass system*" (TAIHEIYO ENGINEERING, 2021).

11. Qual a probabilidade de desenvolvimento de políticas para a redução da fabricação de produtos com PVC e outros polímeros clorados? Ou deve-se contar com a melhoria da eficiência de tecnologias para a separação desses materiais?

O policloreto de vinila (PVC) é um polímero que contém, em peso, 43% de eteno derivado do petróleo e 57% de cloro, obtido através da eletrólise do sal marinho (PVC, 2021). Apesar de sua ampla utilização, é foco de discussões⁷⁹ e estudos devido aos riscos ambientais e à saúde, decorrentes de compostos emitidos em seu processo produtivo, uso e destinação final, como, por exemplo, dioxinas e furanos ou ftalatos. Não se pode afirmar que haverá uma proibição ao uso do PVC, mas, assim como já ocorreu com asbestos (amianto) e clorofluorcarbonetos (CFCs), é uma possibilidade. No mercado, são oferecidas tecnologias para a separação de PVC do CDR. No entanto, há limites de eficiência na separação, o que acaba por não garantir a total eliminação desse polímero no produto final. Portanto, o controle do teor de cloro no CDRU, o controle da alimentação para a queima e o controle de emissões são os procedimentos que garantem a segurança do processo produtivo, no caso de fornos de clínquer e caldeiras, e de poluentes como as dioxinas e furanos.

12. Dioxinas e Furanos são poluentes de grande periculosidade que podem ser formados durante a combustão de resíduos. Como garantir a segurança na queima de CDRU?

A formação de dioxinas ocorre por mecanismos complexos, que envolvem matéria orgânica, oxigênio e cloro. A incineração exige cuidados específicos em relação ao controle operacional e ao tratamento dos gases de exaustão. Nos últimos anos, os avanços no desenvolvimento de sistemas de filtros capazes de reduzir emissões recolocaram a incineração na agenda das discussões (MME/EPE, 2014). A respeito da contribuição das cimenteiras para a emissão de dioxinas e furanos, os inventários demonstram que este tipo de indústria gera taxas de emissão bem abaixo do limite legal. A formação de dioxinas e furanos ocorre à medida que os gases de escape se resfriam, na faixa de 450 °C para 200 °C. Assim, o resfriamento rápido dos gases de escape, em temperaturas menores que 200 °C, garante um nível de emissão baixo (0.1 ng TEQ/Nm³). Nos fornos modernos, com pré-aquecimento e pré-calcinação, essa característica é inerente ao processo (CSI, 2012; KARSTENSEN, 2008). No que diz respeito à emissão de furanos no processo de gaseificação e combustão integrada, estudos demonstram que as emissões estão abaixo dos limites máximos permitidos pelas leis brasileiras e internacionais. Compostos de enxofre e nitrogênio, provenientes da matéria orgânica do RSU, podem contribuir para suprimir a formação de dioxinas e furanos durante o processo de gaseificação (LOPES, E. J.; OKAMURA; YAMAMOTO, 2015). Por fim, no que diz respeito ao uso de CDRU em caldeiras, estudos demonstram que a utilização de até 10% de CDRU em consórcio com o bagaço de cana-de-açúcar não traz impacto adicional para as emissões atmosféricas (SAMPAIO, 2014). Vale lembrar que, se a planta utilizar CDRU como queima combinada, os requisitos legais serão mais restritivos, tanto em frequência como em poluentes a serem monitorados. Esse ponto é discutido, mais detalhadamente, na questão seguinte.

⁷⁹Exemplo: Publicação da Health Care without Harm Europe "The polyvinyl chloride debate: Why PVC remains a problematic material" (ARNIKA et al., 2021)

13. Ao se considerar a composição do RSU, em que há a possibilidade de presença de pilhas, baterias e lâmpadas, por exemplo, as emissões atmosféricas da queima de CDRU serão mais poluentes do que a da queima de biomassa. Como controlar essas emissões para não acarretar a diminuição da qualidade do ar no entorno das plantas consumidoras de CDRU?

O primeiro passo é a definição de limites para a emissão de poluentes por meio de resoluções, tal como já estabelecido pelas resoluções SIMA 47/2020, CONAMA 499/202, CONAMA 316/202 e CONAMA 436/11, por exemplo. Para o atendimento desses limites, a indústria terá que se adaptar aos novos tipos de poluentes, por meio da instalação de equipamentos para controle de emissões atmosféricas. Neste sentido, também é imprescindível o monitoramento contínuo ou periódico (conforme o tipo de poluente) para garantir o atendimento aos limites estabelecidos pelas resoluções e pelas condicionantes para o licenciamento ambiental dos equipamentos consumidores de CDRU, além da adoção de medidas mitigadoras, estabelecidas ainda na fase de licenciamento ambiental prévio. Vale ressaltar que monitoramento e equipamentos de controle de emissões atmosféricas apresentam custos relevantes, que devem ser criteriosamente calculados a fim de garantir a sustentabilidade financeira da prática de consumo de CDRU na planta.

14. Fornos e caldeiras param para manutenção ao longo do ano, o que fazer com o CDRU durante essas paradas?

Faz parte do projeto de operação da planta o planejamento da manutenção dos equipamentos, bem como, o gerenciamento de estoque e produção da planta. Assim, as unidades terão que considerar, nas estimativas, que o local tenha capacidade para armazenar o CDRU durante as paradas programadas, tal como ocorre, atualmente, com o coprocessamento, em que há paradas programadas para a manutenção dos fornos de clínquer.

15. Tecnologias para o aproveitamento energético de RSU demandam altos investimentos que oneram o modelo e, consequentemente, atingem os municípios, que terão que contribuir com a tarifa de gestão do resíduo, pelo uso do serviço. Por que um município, ou consórcio, deve adotar essa solução, ao invés do aterro sanitário, que já é ambientalmente adequado?

O aterro sanitário aparenta ser uma solução mais barata do que a do aproveitamento energético, pois algumas localidades possuem áreas que podem ser compradas por um baixo custo. No entanto, nessa conta não entra a desvalorização dessa região por receber esse passivo ambiental e não se leva em consideração as possíveis contaminações do solo e do lençol freático provenientes de vazamentos (uma realidade muito comum, mas pouco divulgada), além dos impactos não locais, mas de extrema relevância, como o aquecimento global. Os aterros são minas de emissão de metano⁸⁰ (poluente 34 vezes mais intensivo, como gás de efeito estufa, do que o gás carbônico). Desse modo, soluções para o RSU, que visam à redução da demanda por aterros, merecem ser estudadas e cuidadosamente consideradas, pois, ao gerarem energia a partir dos resíduos, apresentam como vantagens: a possibilidade de receitas, que, por sua vez, podem colaborar para a redução da tarifa; e a melhoria das condições ambientais nas áreas em que serão inseridas.

⁸⁰Dados detalhados e divulgados na Publicação *Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos: Potencial descarbonização*.

16. Tecnologias de aproveitamento energético demandam grande escala para se tornarem viáveis. Nesse sentido, o aproveitamento energético não seria um contrassenso em relação à sustentabilidade, visto que o objetivo primordial da PNRS é a não geração e conseqüente redução de RSU?

É urgente a necessidade de políticas públicas que invistam e estruturam a educação para que práticas de não geração, redução e reciclagem de resíduos sejam incorporadas pela sociedade. Por outro lado, há a realidade de grandes centros urbanos que já se encontram saturados pela atual geração de RSU e, assim, demandam soluções imediatas para esse problema. Desse modo, não se pode aguardar mudanças de hábito por parte da população para, só então, procurar alternativas mais sustentáveis que do que a do aterramento do RSU. São ações que não concorrem, mas que se complementam: educação ambiental e valorização do resíduo por meio da reciclagem e do aproveitamento energético. Deve-se considerar que o crescimento populacional tenderá ao aumento do volume de resíduos. Os grandes centros urbanos, principalmente, mesmo que consigam instituir políticas públicas para melhor gerenciamento do RSU (não geração, redução etc.), demandarão alternativas que não sejam a do aterro sanitário. O aproveitamento energético pode contribuir como solução e garantia do cumprimento da hierarquia da PNRS.

17. Para viabilizar a tecnologia, é necessária a regionalização de municípios. Existe algum impasse para transferir resíduos entre estados?

É necessário verificar a legislação de cada estado, que pode definir critérios ou restrições de recebimento de resíduos em seu território. Além disso, a partir de 1º de junho de 2021, entrou em vigor, no Brasil, o preenchimento da ferramenta Manifesto de Transporte de Resíduo (MTR), do Sistema Nacional de Informações Sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR) (BRASIL, 2021a). O MTR consiste em um documento obrigatório, que deve acompanhar o transporte e a destinação de qualquer tipo de resíduo. O cadastramento, nesse sistema, é obrigatório para qualquer empresa que gere resíduos e que opte por encaminhá-los para destinadores devidamente licenciados, o que inclui transportadores, destinadores e armazenadores temporários. Todos os destinadores localizados em outros estados devem estar cadastrados no sistema MTR, para que o gerador possa emitir o respectivo MTR.

18. Em relação ao aquecimento global e à descarbonização, qual é a vantagem de substituir outros combustíveis pelo CDRU, considerando-se que o CDRU possui, em sua composição, plásticos e material de origem fóssil?

Embora uma fração do CDRU seja de origem fóssil, este material já teve um outro uso antes de se tornar combustível, o que torna a utilização do CDRU uma vantagem em relação ao combustível tradicional. Além disso, com a utilização do CDRU evita-se a produção e o transporte do combustível fóssil, no caso do coque de petróleo, fazendo com que o impacto evitado seja maior. Essa discussão é aprofundada na publicação sobre a descarbonização por meio do aproveitamento energético de RSU⁸¹.

19. Quais os riscos ao se utilizar CDRU em equipamentos, como fornos e caldeiras, por exemplo? Quais as vantagens, para a indústria, em assumir esses riscos?

Por mais que haja especificação e controle de qualidade, o CDRU está sujeito à heterogeneidade. Teor de umidade, Cl ou S fora da especificação podem gerar sérios problemas ao processo, colocando em risco a qualidade do produto final, inclusive. A presença de Cl em concentrações acima da recomendada pelo fabricante do equipamento pode acelerar problemas de corrosão nos equipamentos. Por essa razão, são necessários estudos e pesquisas mais aprofundados sobre o tema, para melhor compreensão dos limites possíveis e para a quantificação dos riscos e benefícios da co-combustão com CDRU. Com conhecimento, os riscos podem ser mensurados e melhor administrados. Ainda assim, para que seja interessante tal prática, o CDRU deve apresentar vantagens econômicas para compensar os riscos assumidos. Conforme apresentado no capítulo das caldeiras a biomassa, a possibilidade de economia de bagaço para um fim mais nobre, como, por exemplo, o etanol 2G, pode se mostrar interessante para o negócio. Outra importante alternativa é abrir o caminho para a discussão sobre pagamento por serviços ambientais e pela contribuição com a destinação de resíduos, por exemplo.

⁸¹ Os resultados completos e a metodologia adotada para a estimativa do potencial, a curto prazo, da fração orgânica de RSU, podem ser conferidos na publicação *Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos: Potencial descarbonização*.

APÊNDICE I

METODOLOGIA APLICADA AO CÁLCULO DO RSU DISPONÍVEL PARA RECICLAGEM E PARA APROVEITAMENTO ENERGÉTICO

No que se refere à gestão de resíduo sólido urbano (RSU), a regionalização apresenta grande importância para a viabilização técnica e econômica de soluções, por meio do ganho de escala, eficiência e universalização de serviços. Por essa razão, considerou-se a população ao redor de aterros sanitários, plantas de cimento e caldeiras industriais a biomassa e carvão mineral (BFB, CFB e PCC⁸²), a fim de identificar regiões que possuem escala mínima para empreendimentos de produção e consumo de CDRU. A metodologia está descrita no **APÊNDICE VI**.

A partir da população dessas regionais formadas, pôde-se, então, iniciar a estimativa do potencial de RSU disponível para aproveitamento energético. A base metodológica foi a mesma adotada para o potencial de Biogás de RSU, disponível na publicação *Biogás no Brasil: Potencial a curto prazo*⁸³.

Para o cálculo do RSU disponível para aproveitamento energético, foram utilizados dados da população de cada município brasileiro, fornecidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) para o ano de 2020. Dados regionais de geração per capita de resíduos gerados, de resíduos coletados e da porcentagem de disposição final ambientalmente adequada (que corresponde à massa total coletada e destinada corretamente para aterros sanitários) foram publicados no *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020* (ABRELPE, 2020b). A **Tabela I** apresenta o resumo dos dados utilizados.

⁸² Circulating fluidized bed (CFB) e bubbling fluidized bed (BFB), Pulverized Coal Combustion (PCC).

⁸³ Confira os dados completos da publicação *Biogás no Brasil: Potencial a curto prazo*.

Tabela I

População estimada em 2020, geração per capita de RSU coletado e % de RSU disposto adequadamente no Brasil.

Região	Estado	População estimada em 2020**	Geração per capita de resíduos coletados (kg/hab/dia)*	Geração per capita de resíduos coletados (kg/hab/ano)*	Disposição final adequada (%)*
Centro-Oeste	Distrito Federal	3.055.149	0,93	339,1	41,3%
	Goiás	7.113.540	0,93	339,1	
	Mato Grosso do Sul	2.809.394	0,93	339,1	
	Mato Grosso	3.526.220	0,93	339,1	
Nordeste	Alagoas	3.351.543	0,77	281,4	35,6%
	Bahia	14.930.634	0,77	281,4	
	Ceará	9.187.103	0,77	281,4	
	Maranhão	7.114.598	0,77	281,4	
	Paraíba	4.039.277	0,77	281,4	
	Pernambuco	9.616.621	0,77	281,4	
	Piauí	3.281.480	0,77	281,4	
	Rio Grande do Norte	3.534.165	0,77	281,4	
	Sergipe	2.318.822	0,77	281,4	
	Acre	894.470	0,72	262,4	
Amazonas	4.207.714	0,72	262,4		
Amapá	861.773	0,72	262,4		
Pará	8.690.745	0,72	262,4		
Rondônia	1.796.460	0,72	262,4		
Roraima	631.181	0,72	262,4		
Tocantins	1.590.248	0,72	262,4	72,7%	
Espírito Santo	4.064.052	1,21	440,9		
Minas Gerais	21.292.666	1,21	440,9		
Rio de Janeiro	17.366.189	1,21	440,9		
São Paulo	46.289.333	1,21	440,9	70,6%	
Paraná	11.516.840	0,72	264,6		
Rio Grande do Sul	11.422.973	0,72	264,6		
Santa Catarina	7.252.502	0,72	264,6		

Fonte: (**IBGE 2020 e *ABRELPE 2020b).

A partir da quantidade de RSU destinada adequadamente, calculou-se a fração orgânica e os recicláveis. O cálculo da fração orgânica⁸⁴ foi baseado nos percentuais por região, disponíveis no Infográfico da Abiogás com Abrelpe (ABRELPE; ABIOGÁS, 2018). Os recicláveis foram calculados a partir das metas regionais do Planares para o ano 2040⁸⁵.

Tabela II

Fração orgânica por região e Meta de Percentual de recuperação de materiais recicláveis.

Região do Brasil	% fração orgânica	Recuperação de materiais recicláveis (%) Meta Planares
Centro-Oeste	55	14,7%
Nordeste	53	11,5%
Norte	53	11,2%
Sudeste	57	25,8%
Sul	53	28,7%
Total	54,2	20%

Fonte: (ABRELPE; ABIOGÁS, 2018; BRASIL, 2022b).

⁸⁴ Esse valor foi a base do cálculo do Potencial de Biogás.

⁸⁵ Meta 6, Indicador global - Percentual de recuperação de materiais recicláveis. Optou-se por considerar a Meta do Planares, por ser um dado regionalizado; e a meta 2040 é o que se pode atingir a longo prazo.

Definidas as parcelas de fração orgânica e recicláveis, considerou-se as possíveis ineficiências de separação e os rejeitos desses processos, visto que o acesso à fração orgânica do RSU necessita de uma separação (na fonte ou em tratamento mecânico). Para essa separação, foi considerada uma eficiência de separação de 85%⁸⁶, e a partir desse montante, foi calculado o potencial do biogás de RSU⁸⁷. A parcela restante, pós separação das frações de recicláveis secos e orgânicos, foi então considerada a fração residual do RSU, que pode ser transformada em CDRU.

Os rejeitos da triagem realizada em Associações e Cooperativas de Catadores de Materiais Recicláveis também foram tratados na estimativa. Na estimativa, considerou-se que, de todo o material da coleta seletiva de recicláveis que chega nas cooperativas ou associações, 20,45% não possuem valor para venda, sendo considerados rejeitos. Desse montante, 60,29% são compostos por materiais com potencial calorífico, como papéis e plásticos (PIAIA, 2021). Estudos apontam que, por meio da “Coleta Seletiva Solidária”, houve redução no volume de rejeitos: em Natal/RN, a taxa de rejeito está abaixo de 10%; em Londrina/PR, em torno de 15%; e em Itaúna/MG, a taxa de rejeito, que era de 70%, está em 30% (RUTKOWSKI, J., 2014).

A **Tabela III** apresenta os parâmetros de separação utilizados por este estudo para a estimativa do potencial de CDRU. A tabela completa, com os resultados do potencial de CDRU em cooperativas, está no **APÊNDICE III**.

Tabela III

Percentuais de rejeito da triagem para a estimativa do potencial de disponibilidade de CDRU.

Uso do CDRU	Quantidade %
Rejeitos nas Associações de Catadores	20,45%
Rejeitos das Associações que podem virar CDR	60,29%

⁸⁶ Premissa baseada na Ferramenta de Rotas Tecnológicas e Custos para Manejo de RSU MDR/ProteGEEr (BRASIL, 2022c).

⁸⁷ Outros detalhes sobre o potencial de biogás, acesse: [Biogás no Brasil: Potencial a curto prazo](#).

As regionais ao redor de aterros sanitários foram a base para o cálculo do potencial de gaseificação e incineração. As regionais ao redor de plantas de cimento e caldeiras, naturalmente, foram a base para o cálculo do potencial de consumo de CDRU por essas indústrias. A partir desse ponto, houve a diferenciação de parâmetros, conforme a finalidade de uso do CDRU. Para cimenteira e caldeiras industriais, estimou-se que um percentual de 20%⁸⁸ de RSU pode produzir um CDRU com a qualidade necessária para esses processos. A estimativa do CDRU para incineração e gaseificação considerou a fração residual do RSU, somada ao CDRU de cooperativas, reduzindo-se uma parcela de 3% de perdas e inertes. O potencial de disponibilidade de CDRU, nas regionais formadas ao redor de aterros com potencial de gaseificação e incineração, em cada estado, é apresentado na **Tabela IV**.

Tabela IV

Potencial de disponibilidade de CDRU nas regionais formadas ao redor de aterros⁸⁹.

Região	Estado	Quantidade de regionais ao redor de aterros	Potencial de CDRU disponível (t/ano)
Centro-Oeste	Distrito Federal	1	217.934
	Goiás	2	231.384
	Mato Grosso do Sul	9	114.472
	Mato Grosso	4	133.124
Nordeste	Alagoas	1	132.740
	Bahia	8	469.398
	Ceará	4	393.378
	Maranhão	3	181.522
	Paraíba	3	325.144
	Pernambuco	4	251.310
	Piauí	3	103.361
	Rio Grande do Norte	4	170.802
	Sergipe	1	100.601
	Norte	Acre	1
Amapá		1	31.054
Amazonas		4	123.485
Pará		3	73.049
Rondônia		2	47.911
Tocantins		4	57.949
Sudeste	Espírito Santo	1	272.016
	Minas Gerais	18	1.838.987
	Rio de Janeiro	11	1.431.840
	São Paulo	2	3.991.044
Sul	Paraná	7	592.933
	Rio Grande do Sul	4	540.504
	Santa Catarina	8	391.352
Brasil		113	12.242.587

⁸⁸ Baseado no estudo de análise de ciclo de vida de planta de produção de CDRU (INSTITUTO 17, 2022).

⁸⁹ Os resultados completos, contendo o nome das cidades onde se localiza o "município sede" de implantação das plantas de CDRU, estão apresentados no APÊNDICE VI.

A potencial disponibilidade de CDRU ao redor de cimenteiras e caldeiras é apresentada nas **Tabela V** e **Tabela VI**, respectivamente.

Tabela V

Potencial de disponibilidade de CDRU nas regionais formadas ao redor de cimenteiras⁹⁰.

Região	Estado	Quantidade de regionais ao redor de aterros	Potencial de CDRU disponível (t/ano)
Centro-Oeste	Distrito Federal	1	125.370
	Goiás	1	106.288
	Mato Grosso do Sul	1	22.202
Nordeste	Alagoas	1	67.346
	Bahia	1	24.552
	Ceará	1	39.717
	Paraíba	1	142.711
	Pernambuco	1	26.483
	Rio Grande do Norte	1	25.623
	Sergipe	1	45.144
Norte	Pará	1	25.088
	Tocantins	1	15.423
Sudeste	Espírito Santo	1	229.498
	Minas Gerais	6	1.174.933
	Rio de Janeiro	1	198.143
	São Paulo	1	1.860.383
Sudeste	Paraná	1	171.096
	Rio Grande do Sul	1	36.544
	Santa Catarina	1	160.206
Brasil		24	4.496.751

Tabela VI

Potencial de disponibilidade de CDRU nas regionais formadas ao redor de caldeiras a leito fluidizado e carvão pulverizado.

Região	Estado	Quantidade de regionais ao redor de caldeiras	Potencial de CDRU disponível (t/ano)
Centro-Oeste	Goiás	1	14.777
	Mato Grosso do Sul	1	25.274
Nordeste	Alagoas	1	35.694
	Ceará	1	52.137
	Maranhão	1	26.171
Norte	Pará	1	37.735
Sudeste	São Paulo	2	209.929
Sul	Paraná	1	39.345
	Rio Grande do Sul	1	10.032
	Santa Catarina	3	96.507
Brasil		13	547.601

⁹⁰ Os resultados completos, contendo o nome das cidades onde se localiza o "município sede" de implantação das plantas de CDRU, estão apresentados no APÊNDICE VI.

APÊNDICE II

METAS DO PLANO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS – PLANARES

O Planares é um plano elaborado pela União, sob a coordenação do Ministério do Meio Ambiente (MMA) (BRASIL, 2010b), que, em seu Artigo 8º, estabelece planos para os resíduos sólidos como seu primeiro instrumento. No Planares, estão contidos os principais dados e informações sobre a gestão de resíduos sólidos do país, assim como, metas, diretrizes e ações para que seja cumprida a ordem de prioridades da gestão e do gerenciamento de resíduos sólidos. Em 2020, o Governo Federal publicou a versão preliminar do Planares para consulta pública, cujas principais metas, com influência direta no avanço do aproveitamento energético do país, são apresentadas a seguir.

Vale ressaltar que o documento final, considerando as sugestões advindas da consulta pública, conforme determina a legislação brasileira vigente, foi publicado pelo governo brasileiro em abril de 2022.

A Meta 4 – Reduzir a quantidade de resíduos e rejeitos encaminhados para disposição final ambientalmente adequada estabelece que **48,1%** da massa total de RSU deve ser recuperada até 2040, em âmbito nacional. Esse percentual leva em conta as medidas para o encerramento de áreas de disposição final inadequadas, juntamente com o fortalecimento das cadeias de logística reversa e estímulo à reciclagem, com o tratamento biológico e com a recuperação energética de RSU, sendo **20%** correspondentes ao percentual de recuperação de materiais recicláveis (Meta 6, Indicador global 6); **13,5%**, ao percentual da massa total destinada para tratamento biológico (Meta 7, Indicador global 7); e **14,6%**, à recuperação energética (Meta 9, Indicador global 9). A **Tabela VII** apresenta as metas traçadas por região, para os anos de 2028 e 2040, considerando as suas respectivas particularidades de infraestrutura e logística.

Tabela VII

Meta 4, Indicador global - Percentual da massa total recuperada.

Região do Brasil	Massa total recuperada de RSU (%) Meta 2028	Massa total recuperada de RSU (%) Meta 2040
Centro-Oeste	18,5%	33,9%
Nordeste	15,1%	26,6%
Norte	18%	26,2%
Sudeste	26,7%	63,9%
Sul	29,5%	66,7%
Total	22,4%	48,1%

Fonte: BRASIL, (2020).

Como o potencial de oferta e demanda de biogás foi tratado, também, em uma publicação⁹¹ à parte, serão expostas, a seguir, apenas as metas correspondentes à reciclagem e à recuperação energética, uma vez que o potencial de disponibilidade de CDRU é igual ao da massa remanescente de RSU coletada, retiradas as frações orgânicas e recicláveis (**Figura I**). Em outras palavras, o potencial de disponibilidade de CDRU corresponde à fração de resíduos não passível de recuperação por reciclagem (rejeitos), seja por questões de mercado, logística ou de tecnologia, haja vista os muitos materiais que ainda não possuem tecnologia de reciclagem no país. **Assim, o aproveitamento energético de CDRU implica, necessariamente, no fomento à cadeia de reciclagem, de modo a contribuir para o aumento dos índices de recuperação de RSU.**

A taxa nacional de recuperação de recicláveis secos é de 2,2% (SNIS, 2020a). A Meta 6 – Aumentar a recuperação da fração seca do RSU estabelece que o Brasil deve atingir um índice de recuperação de 9,2% de recicláveis secos em relação à massa total de RSU até 2028, e de 20%, até 2040, sendo que as regiões Sudeste e Sul devem atingir índices superiores à média nacional **Tabela VIII**.

Tabela VIII

Meta 6, Indicador global - Percentual de recuperação de materiais recicláveis.

Região do Brasil	Massa total recuperada de RSU (%) Meta 2028	Massa total recuperada de RSU (%) Meta 2040
Centro-Oeste	7%	14,7%
Nordeste	5,6%	11,5%
Norte	5,2%	11,2%
Sudeste	11,4%	25,8%
Sul	14,3%	28,7%
Total	9,2%	20%

Fonte: BRASIL, (2020b).

⁹¹ Para conferir os resultados completos do potencial, a curto prazo, no Brasil, acesse a publicação *Biogás no Brasil: Potencial a curto prazo*.

Para atingir as metas acima citadas, é necessário tornar a cadeia de reciclagem rastreável, o que é possível por meio da inclusão de catadores de materiais recicláveis em meio formal (cooperativas e associações de catadores). A Meta 5 - Promover a inclusão social e emancipação econômica de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis, ao estabelecer o atendimento das necessidades tanto dos municípios quanto dos catadores e ao ir ao encontro das premissas básicas adotadas para o incentivo do aproveitamento energético no país, prevê a inclusão social e a equidade de gênero (do inglês, GESI – *Gender Equality and Social Inclusion*) (**Tabela IX**).

Tabela IX

Meta 5, Indicador global - Percentual dos municípios com presença de catadores com contrato formalizado de prestação de serviços de manejo de materiais recicláveis por cooperativas e associações de catadores.

Região do Brasil	Municípios com contrato de serviços por cooperativas de catadores (%)	
	Meta 2028	Meta 2040
Centro-Oeste	43,9%	95%
Nordeste	39,4%	95%
Norte	39,8%	95%
Sudeste	45,0%	95%
Sul	40,7%	95%
Total	42,1%	95%

Fonte: BRASIL, (2020)(versão preliminar).

Quanto ao percentual correspondente à recuperação da massa total de RSU por tratamento térmico, que equivale a 14,6% da meta geral (Meta 4), o Plano prevê, em sua Meta 9 - Aumentar a recuperação e aproveitamento energético por meio de tratamento térmico de RSU -, que o tratamento térmico será responsável por cerca de 30% de toda a massa desviada da disposição final, devendo chegar a uma potência instalada de 462 MW em 2028 e de 994 até 2040. Vale ressaltar que, devido à falta de dados do setor de aproveitamento energético, foram estabelecidas apenas metas nacionais.

APÊNDICE III

RESULTADOS DAS ESTIMATIVAS DO POTENCIAL DE CDRU A PARTIR DOS REJEITOS DE COOPERATIVAS DE CATADORES

Os cálculos de geração de rejeitos do processo de triagem da coleta seletiva de recicláveis secos e, conseqüentemente, do potencial de CDRU a partir desses rejeitos baseiam-se na estimativa de geração de RSU em cada estado brasileiro, não sendo resultado de dados primários. Tal alternativa decorre do fato de não existirem registros precisos da produção das cooperativas e associações de catadores e catadoras de materiais recicláveis nos 27 estados brasileiros. Na **tabela X** abaixo, constam os resultados das estimativas do potencial de rejeitos do processo de triagem de recicláveis secos, realizado por cooperativas/associações de catadores, e do potencial de produção de CDRU a partir desses rejeitos de triagem.

Tabela X
Potencial de rejeitos da triagem de recicláveis secos em cooperativas/associações de catadores e potencial de produção de CDRU a partir desses rejeitos por estado brasileiro.

Região	Estado	Quantidade de regionais ao redor de aterros	Potencial de CDRU disponível (t/ano)
Centro-Oeste	Distrito Federal	62.896,66	12.862,37
	Goiás	146.447,16	29.948,44
	Mato Grosso do Sul	57.837,28	11.827,72
	Mato Grosso	72.594,64	14.845,60
Nordeste	Alagoas	38.611,50	7.896,05
	Bahia	172.008,61	35.175,76
	Ceará	105.840,17	21.644,31
	Maranhão	81.963,84	16.761,61
	Paraíba	46.534,56	9.516,32
	Pernambuco	110.788,44	22.656,24
	Piauí	37.804,34	7.730,99
	Rio Grande do Norte	40.715,40	8.326,30
Norte	Sergipe	26.714,03	5.463,02
	Acre	9.279,45	1.897,65
	Amazonas	43.651,86	8.926,81
	Amapá	8.940,25	1.828,28
	Pará	90.159,93	18.437,71
	Rondônia	18.636,92	3.811,25
	Roraima	6.548,03	1.339,07
Sudeste	Tocantins	16.497,62	3.373,76
	Espírito Santo	336.088,36	68.730,07
	Minas Gerais	1.760.857,69	360.095,40
	Rio de Janeiro	1.436.146,48	293.691,96
Sul	São Paulo	3.828.028,29	782.831,79
	Paraná	617.461,34	126.270,84
	Rio Grande do Sul	612.428,78	125.241,68
	Santa Catarina	388.834,06	79.516,56
Brasil		10.174.315,67	2.080.647,55



APÊNDICE IV

ANÁLISE DE PROCESSOS DE COMBUSTÃO INDUSTRIAL COM FOCO NO CDRU

O *Quadro I* expõe uma matriz para análise de diferentes critérios a fim de subsidiar a tomada de decisão sobre quais tecnologias e indústrias possuem maior possibilidade de consumo de CDRU. A partir dessa análise, avançou-se nos estudos de potencial, benefícios e arranjos tecnológicos para os processos que se apresentaram mais relevantes e com maiores oportunidades para o desenvolvimento da cadeia de consumo de CDRU, que foram: indústria cimenteira, usinas sucroenergéticas, usinas termelétricas a carvão mineral, gaseificação e incineração.

Quadro 1

Matriz de análise multicritério para tomada de decisão: processos de combustão industrial com foco no CDRU – Parte 1

Critérios	Cimento	Usina sucroenergética	Usinas termelétricas a carvão	Papel e Celulose	Laranja	Milho/Soja	
Características da indústria	Atividade fim	Produção de cimento	Produção de açúcar, etanol e geração de energia elétrica	Geração de energia elétrica	Produção de papel e celulose	Produção de suco e outros produtos (?)	Produção de óleo e outros produtos
	Equipamento	Forno rotativo	Caldeira	Caldeira	Caldeira	Caldeira	Caldeira e secador de grãos
	Combustível tradicional	Coque de petróleo	Bagaço de cana/resíduos de milho	Carvão mineral	Biomassa e Licor negro (HORA; MELO, 2016)	Bagaço de cana, resíduos de laranja, Gás Natural ou óleo combustível	Gás Natural, resíduos agrícolas e óleo diesel
	Quantidade de plantas em operação e escala comercial no Brasil	Cerca de 60 (38 licenciadas para coprocessamento)	Bagaço (394); lixívia (17); milho (17) (TOLMASQUIM, 2016)	12 (TOLMASQUIM, 2016)	Celulose (59); Papel (4190) (IBA - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2020, p. 49)	Cutral, Citrosuco e Louis Dreyfus controlam 80% da produção de suco de laranja no Brasil. (ZOCCHIO, 2018)	Processamento de óleos vegetais: 99 (ABIOVE)
	Distribuição no território nacional	Presente em todas as regiões do país	17 de milho (10 em MT; 5 em GO; 1 em SP e 1 no PR) Cana: vide site https://www.novacana.com/usinas_brasil	RS, SC, PR, CE, MA e PA.	Papel (MS, BA, MA, AM, PA, RO, ES, MG, RJ, SP, PR, RS, SC) Celulose (Todos os estados, menos Amapá)	Principalmente São Paulo e Sudoeste de Minas.	Óleos vegetais: indústria presente em todas as regiões do país (ABIOVE)
Formas de aproveitamento do CDRU	Experiências/projetos com uso do CDRU	Coprocessamento em cimenteiras de SP e PB, desde 2019.	Testes realizados, conforme estudo de Sampaio. Uso consorciado com bagaço. Viável em caldeiras de leito fluidizado BFB.	Exemplos de cases internacionais: Empresa Fusina (Itália)*. Viabilidade em caldeiras de leito fluidizado BFB, ou carvão pulverizado mediante CDRU peletizado ou gasificado.	Não encontrados cases de estudos publicados	Não encontrados cases de estudos publicados	Não encontrados cases de estudos publicados
	Arcabouço legal e regulatório de destaque (licenciamento ambiental, limites de emissões para combustível tradicional e uso de CDRU)	CONAMA 499/20, CONAMA 436/11, CONAMA 382-06, SIMA 47/20 e legislações estaduais	CONAMA 382 e 436, legislações estaduais, SIMA 47/20 (se acima de 50 t/h vapor)	Conama 008/90, legislações estaduais, SIMA 47/20	CONAMA 382 e 436, legislações estaduais, SIMA 47/20 (se acima de 50 t/h vapor)	CONAMA 382 e 436, legislações estaduais, SIMA 47/20 (se acima de 50 t/h vapor)	CONAMA 382 e 436, legislações estaduais, SIMA 47/20 (se acima de 50 t/h vapor)
Pontos de atenção do uso de CDRU	Qualidade exigida para o CDRU	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta
	Nível de adaptação necessária de equipamentos	Alta (sistemas de armazenamento, transporte, injeção e dosagem de CDR)	Em equipamentos existentes há limitações para atender alguns requisitos da SIMA 47 quanto ao intertravamento Granulometria em função do tipo de caldeira (grelha, leito fluidizado)	Em equipamentos existentes há limitações para atender alguns requisitos da SIMA 47 quanto ao intertravamento Granulometria em função do tipo de caldeira (grelha, leito fluidizado)	Em equipamentos existentes há limitações para atender alguns requisitos da SIMA 47 quanto ao intertravamento Granulometria em função do tipo de caldeira (grelha, leito fluidizado)	- Em equipamentos existentes há limitações para atender alguns requisitos da SIMA 47 em função do tipo de caldeira (intertravamento quando grelha e granulometria quando leito fluidizado)	Em equipamentos existentes há limitações para atender alguns requisitos da SIMA 47 quanto ao intertravamento Granulometria em função do tipo de caldeira (grelha, leito fluidizado)

* Co-combustão de carvão e até 10% de CDRU. Possui capacidade de tratamento de 125.000 toneladas por ano.

Quadro II

Matriz de análise multicritério para tomada de decisão: processos de combustão industrial com foco no CDRU – Parte 2

Critérios	Cerâmica		Siderurgia	Ferro-níquel	Gaseificação	Incineração	Termomagnetização
Atividade fim	Cerâmica Estrutural (vermelha: tijolos e telhas etc.	Cerâmica de revestimento e louças sanitárias e de mesa	Produção de ferro e aço	Produção de ferro-níquel	Tratamento de Resíduos	Tratamento de Resíduos	Tratamento de Resíduos
Equipamento	Fornos	Secadores Fornos ⁹²	Fornos de redução de minério	Forno de redução de minério	Gaseificador	Caldeiras tipo grelha móvel (predominante)	Reator (?)
Combustível tradicional	Lenha, resíduos de madeira e gás natural	Gás Natural	Carvão mineral e vegetal como agente redutor	Óleo combustível, biomassa sólida	Carvão Mineral, combustíveis líquidos, dentre outros.	Resíduos Sólidos	-
Quantidade de plantas em operação e escala comercial no Brasil	5600 (ANICER, 2015)		31 usinas (IAB, 2021)	Produção de níquel: mais de 99% Anglo American e Vale	-	Diversas instalações de tratamento de resíduos perigosos e resíduos hospitalares	-
Distribuição no território nacional	CE, ES, GO, MA, MT, MG, PB, PR, PE, RJ, RS, RN, RO, SC, SP, SE	BA, CE, ES, GO, MS, MG, PB, PR, PE, RN, RS, SC, SP, SE	MG SP; RJ; ES; PE; CE; BA; PA; PR; RS vide site https://www.indi.mg.gov.br/minas-gerais/setores-de-destaque/minerometalurgico/	GO, PA	-	-	-
Experiências/projetos com uso do CDRU	São necessários testes para substituição em fornos intermitentes No caso de forno túnel é necessário ter a tecnologia de gaseificação plenamente desenvolvida e comercial	Demanda estudos. É necessário que a tecnologia de gaseificação esteja plenamente desenvolvida em escala comercial. Potencial uso para cogeração (térmica e elétrica)	São necessários estudos para uso do CDRU como agente redutor no alto forno	São necessários estudos para uso do CDRU como agente redutor no forno de redução de minérios	Bragança Paulista (LP), Mafra (módulo de geração energia em obra ⁹³), projetos de gaseificação em grelhas móveis. Projeto financiado por Furnas em Boa Esperança/ MG, em leito fluidizado (não há notícias recentes).	Barueri (LI), Mauá e Caju (LP), Baixada Santista, Diadema, Consimares.	Projeto piloto no PR, porém ainda sem previsão de aproveitamento energético (SECRETARIA DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E DO TURISMO, 2021).
Arcabouço legal e regulatório de destaque (licenciamento ambiental, limites de emissões para combustível tradicional e uso de CDRU)	CONAMA 382, 436, SIMA 47/20 e legislações estaduais	CONAMA 382, 436, SIMA 47/20 e legislações estaduais	CONAMA 382, 436, SIMA 47/20 e legislações estaduais	CONAMA 382, 436, SIMA 47/20 e legislações estaduais	Conama 316/02, Portaria Interministerial nº 274/2019, SIMA 47/20 e legislações estaduais	Portaria Interministerial nº 274/2019, Conama 316/02, SIMA 47/20 Decreto 48107/20 (Minas Gerais), e outras legislações estaduais.	Conama 316/02 e legislações estaduais
Qualidade exigida para o CDRU	Depende de estudos	Depende de estudos	Depende de estudos	-	Baixa	Baixa (fração residual do RSU)	Baixa
Nível de adaptação necessária de equipamentos	Depende do nível de exigência da agência ambiental no que se refere ao intertravamento e ao monitoramento de emissões	Depende do nível de exigência da agência ambiental no que se refere ao intertravamento e ao monitoramento de emissões	Adaptação do sistema de alimentação e depende também do nível de exigência da agência ambiental no que se refere ao intertravamento e ao monitoramento de emissões	Adaptação do sistema de alimentação e depende também do nível de exigência da agência ambiental no que se refere ao intertravamento e monitoramento de emissões	-	-	-

⁹² Na cerâmica de revestimento, devido à necessidade de manter a qualidade do produto, é utilizado combustível gasoso. Assim, para uso nos fornos, é necessário gaseificar o CDRU. No caso do secador, o CDRU seria queimado para gerar gases quentes.

⁹³ Ainda em desenvolvimento em escala piloto/demonstração e necessita de validação em escala comercial.

APÊNDICE V

METODOLOGIA APLICADA AO CÁLCULO DO POTENCIAL DE CONSUMO DE CDRU PELA INDÚSTRIA CIMENTEIRA

O potencial para a recuperação de energia do combustível derivado de RSU foi baseado no *Roadmap Tecnológico do Cimento* (SNIC, 2019). Fazem parte desse trabalho os dados do relatório *Increasing The Use Of Alternative Fuels At Cement Plants: International Best Practice* (IFC, 2017) e da apresentação do 17º Congresso Brasileiro de Cimento *Alternative Fuels in the Cement Industry - Roadmap Project* (CORTEZ; GOLDEMBERG, 2016).

O relatório mencionado (IFC, 2017) lista os critérios usados para o uso de diversos tipos de combustíveis alternativos na indústria de cimento. Os autores enfatizam que "o sucesso de um projeto alternativo de combustível depende de uma combinação de critérios, incluindo regulações existentes sobre resíduos e indústria, fatores econômicos, conhecimento técnico e cooperação entre diferentes setores industriais e instituições públicas". Os principais critérios ligados ao uso de RSU estão resumidos a seguir.

- *A proximidade entre a cidade e a planta de cimento ajuda a criar condições para um projeto viável. Esses critérios podem incluir, por exemplo: uma população entre 0,5 e 1 milhão de habitantes; uma planta de cimento com capacidade de produção de forno de, ao menos, 1 milhão de toneladas/ano de clínquer; e distância menor que 100 km entre a cidade e a planta de cimento.*
- *A planta de cimento oferece uma capacidade de absorção de quantidades extras de cloro (e enxofre); a gestão da planta de cimento oferece grande possibilidade de desenvolvimento técnico de combustíveis alternativos; a empresa de cimento está disposta a pagar um preço razoável pelo CDR em nível de especificação; ou a empresa de cimento prefere estar envolvida no pré-tratamento para ter controle sobre a qualidade do CDR.*
- *Os municípios vêm enfrentando dificuldades ou impossibilidade de abrir novos aterros sanitários ou aumentar a capacidade dos existentes; o contrato com o operador do aterro sanitário não tem incentivos (diretos ou indiretos) para aumentar a quantidade de resíduos aterrados e está aberto a possibilidades de renegociação.*

O potencial de consumo de CDRU foi baseado nas projeções de necessidade de uso de combustíveis alternativos pela indústria do cimento em curto prazo (2030) e a longo prazo (2050). Esses dados são referentes às metas de redução de CO₂ do setor, conforme *Roadmap Tecnológico do Cimento* (SNIC, 2019). Abaixo, descreve-se a sequência metodológica para o potencial de consumo de CDRU no Brasil e, em seguida, por região brasileira. Dados por estado não estão disponíveis em documentos públicos.

O *Roadmap* projeta o crescimento da produção de cimento até 2050. É projetado que o consumo crescerá fortemente até o início da década de 2040 e, após 2045, é esperada uma redução na demanda por cimento. Os dados foram todos calculados para um curto prazo (2030) e para um longo prazo (2050), com base em dados de 2014.

A produção de cimento (Mt/ano), o fator de clínquer (proporção clínquer/ cimento) e a intensidade da energia térmica (GJ/t clínquer) para 2030 e 2050 estão listados na **Tabela XI**.

Tabela XI
Intensidade de energia térmica, Fator Clínquer e Produção de Cimento no Brasil. Dados de 2014 e projeções para 2030 e 2050.

Parâmetros de produção de cimento	2014	2030	2050
Intensidade de energia térmica (GJ/t clínquer)	3,5	3,47	3,22
Fator Clínquer	68%	59%	52%
Produção de Cimento (Mt/ano)	71	87	117

Fonte: SNIC, 2019.

Na **Tabela XII**, é apresentada a quantidade de energia térmica total (TJ/ano) necessária para a produção de clínquer (Mt/ano) para os anos de 2014 (dados realizados) e para projeções para 2030 e 2050.

Tabela XII

Produção de Clínquer e Energia térmica total necessária no Brasil. Dados de 2014 e projeções para 2030 e 2050.

	2014	2030	2050
Produção de Clínquer (Mt)	48,3	51,3	60,8
Energia térmica total (TJ)	168.980	178.115	195.905

Para atingir o “Cenário 2°C”⁹⁴, o setor pretende aumentar o consumo de combustíveis alternativos em 35% até 2030, e em 55% até 2050 (**Tabela XIII**). Esses números foram baseados em tendências internacionais e nas realidades e condições brasileiras.

Tabela XIII

Previsão de uso de combustível alternativo (% de energia térmica). Dados de 2014 e projeções para 2030 e 2050.

	2014	2030	2050
Previsão de uso de combustível alternativo (porcentagem de energia térmica)	14,8%	35%	55%

Fonte: (SNIC, 2019).

A energia térmica total de combustíveis alternativos de coprocessamento para 2014 (dados realizados) e projeções para 2030 e 2050, baseadas na porcentagem de combustível alternativo consumido, foram calculadas em TJ (terajoules) (**Tabela XIV**).

Tabela XIV

Uso de energia de combustíveis alternativos (TJ/ano). Dados realizados de 2014 e projeções para 2030 e 2050.

	2014	2030	2050
Uso de energia de combustíveis alternativos (TJ/ano)	25.009	62.340	107.748

Fonte: (SNIC, 2019).

O *Roadmap* avaliou a possível evolução dos principais tipos de combustíveis alternativos e o respectivo potencial de uso pela indústria de cimento brasileira. O resultado desse estudo está exposto na **Tabela XV**. O *Roadmap* projetou redução de ambos os materiais. Esse estudo considerou que o carvão vegetal (moinha) é coprocessado somente pela região Sudeste.

⁹⁴ Cenário 2°C: objetiva limitar o aumento da temperatura média global em até 2°C e examina meios para alcançar cortes de emissões profundos o suficiente para reduzir, pelo menos para a metade, as emissões globais até 2050.

Tabela XV

Uso de combustível alternativo (porcentagem de energia térmica) por tipo de resíduo. Dados realizados de 2014 e projeções para 2030 e 2050.

Uso de combustível alternativo (% de energia térmica)	2014	2030	2050
BIOMASSA	5,3%	5,4%	11,1%
Carvão vegetal (moinha)	3,8%	0,0%	0,0%
Resíduos agrícolas	1,5%	3,0%	3,7%
Lodo de esgoto	0,0%	2,4%	7,4%
RESÍDUOS	8,3%	29,3%	43,8%
Pneus usados e resíduos de borracha	4,4%	4,9%	5,1%
Resíduos industriais perigosos	3,9%	3,1%	4,0%
Resíduos industriais não perigosos	0,0%	11,4%	17,4%
CDRU	0,0%	9,9%	17,3%

Fonte: CORTEZ; GOLDEMBERG, 2016; SNIC, 2019.

A energia em TJ/ano para cada tipo de resíduo foi calculada na **Tabela XVI**, considerando os dados de porcentagem da **tabela XV** acima e o total de energia de uso de combustível alternativo (TJ).

Tabela XVI

Energia térmica de combustíveis alternativos por tipo de resíduo (TJ/ano). Dados de 2014 e projeções para 2030 e 2050.

Energia Térmica (TJ/ano)	2014	2030	2050
BIOMASSA	8.956	9.618	21.745
Carvão vegetal (moinha)*	6.421	-	-
Resíduos agrícolas	2.535	5.343	7.248
Lodo de esgoto	-	4.275	14.497
RESÍDUOS	14.025	52.188	85.806
Pneus usados e resíduos de borracha	7.435	8.728	9.991
Resíduos industriais perigosos	6.590	5.522	7.836
Resíduos industriais não perigosos	-	20.305	34.087
CDRU	-	17.633	33.892

* Roadmap projetou uma escassez absoluta de resíduos de carvão vegetal para 2030 e 2050.

Fonte: Elaborado a partir de SNIC, 2019.

A projeção do potencial de aumento do uso de combustíveis alternativos na indústria de cimento até 2030 e 2050 é a Energia Térmica Incrementada, calculada na **Tabela XV**, com base em dados de 2014. O incremento para 2050 não é calculado a partir de 2030; em outras palavras, ambos estão relacionados aos dados de 2014.

O lodo de esgoto de estações de tratamento não tem potencial significativo para contribuição térmica. Por conta do seu baixo valor calorífico e de barreiras logísticas, a melhor opção é a biodigestão. Por essa razão, neste relatório, a energia térmica incrementada do lodo de esgoto foi considerada como sendo de energia do CDRU (**Tabela XVII**).

Tabela XVII

Energia térmica incrementada (TJ/ano) por tipo de resíduo para 2030 e 2050, com base em dados de 2014.

Energia Térmica Incrementada (TJ/ano)	2030	2050
BIOMASSA	7.084	19.211
Resíduos agrícolas	2.809	4.714
Lodo de esgoto*	0	0
RESÍDUOS	38.162	71.781
Pneus usados e resíduos de borracha	1.293	2.556
Resíduos industriais perigosos	1.069	1.246
Resíduos industriais não perigosos	20.305	34.087
CDRU**	21.908	48.388
INCREMENTO TOTAL	45.246	90.992

*Lodo de esgoto foi desconsiderado e a energia prevista dessa fonte foi somada ao CDRU.
**Energia somada à energia térmica originalmente prevista do lodo de esgoto.

O potencial por regiões⁹⁵ brasileiras também foi estimado. O *Roadmap* apresenta a intensidade da energia térmica, a proporção de clínquer por cimento (Fator Clínquer) e a porcentagem de produção de cimento por região em 2014 e projeções para 2030 e 2050. A partir desses dados, a produção de clínquer e a energia térmica total foram calculadas (**Tabela XVIII**).

Tabela XVIII

Intensidade de energia térmica, Proporção de clínquer por cimento, Produção de Cimento, Produção de Clínquer e Energia térmica no Brasil. Dados de 2014 e projeções para 2030 e 2050.

Ano	Regiões	Intensidade de Energia Térmica (GJ/t clínquer)	Proporção de clínquer por cimento	Produção de cimento (%)	Produção de cimento (Mt/ano)	Produção de clínquer (Mt/ano)	Energia Térmica Total (TJ/ano)
2014	Norte	3.50	73%	4,6%	3,3	2,4	8.345
	Nordeste		75%	21,8%	15,5	11,6	40.630
	Centro-Oeste		77%	12,1%	8,6	6,6	23.153
	Sudeste		60%	46,0%	32,7	19,6	68.586
	Sul		68%	14,6%	10,4	7,0	24.671
2030	Norte	3.47	70%	6,5%	5,7	4,0	13.736
	Nordeste		63%	24,0%	20,9	13,2	45.646
	Centro-Oeste		63%	12,5%	10,9	6,9	23.774
	Sudeste		55%	42,8%	37,2	20,5	71.065
	Sul		57%	14,2%	12,4	7,0	24.435
2050	Norte	3.22	60%	7,5%	8,8	5,3	16.953
	Nordeste		59%	28,0%	32,8	19,3	62.237
	Centro-Oeste		60%	13,0%	15,2	9,1	29.386
	Sudeste		46%	39,5%	46,2	21,3	68.454
	Sul		54%	14,0%	16,4	8,8	28.482

Fonte: SNIC, 2019.

⁹⁵Potencial calculado por regiões brasileiras, pois as informações por estado e município, necessárias para o cálculo do potencial, não estão disponíveis em documentos públicos.

As projeções para 2030 e 2050 foram baseadas em dados atuais e características regionais. A disponibilidade e o uso de combustíveis de baixo carbono, na produção de cimento no Brasil, apresentam diferenças regionais significativas, que se traduzem em particularidades entre as porcentagens de energia térmica de combustíveis alternativos consumidos em cada uma das regiões (SNIC, 2019). Essa regionalização está diretamente relacionada à disponibilidade de resíduos e sua proximidade com as plantas de cimento. Os dados são apresentados na **Tabela XIX**.

Tabela XIX

Uso de combustíveis alternativos (porcentagem de energia térmica) por regiões brasileiras. Dados de 2014 e projeções para 2030 e 2050.

Região	Uso de combustíveis alternativos (% de energia térmica)		
	2014	2030	2050
Norte	12,5%	18,0%	33,0%
Nordeste	2,5%	21,0%	35,0%
Centro-Oeste	13,5%	30,5%	52,0%
Sudeste	22,0%	48,0%	76,0%
Sul	15,0%	39,0%	62,0%

Fonte: SNIC, 2019.

A **Tabela XX** foi calculada e ajustada com dados da porcentagem de uso de combustíveis alternativos e da energia total para a produção de clínquer por região.

Tabela XX

Substituição térmica (TJ) por região brasileira para 2014, 2030 e 2050.

Região	Energia Térmica (TJ/ano)		
	2014	2030	2050
Norte	1.087	2.449	5.366
Nordeste	1.076	9.493	20.892
Centro-Oeste	3.258	7.181	14.656
Sudeste	15.730	33.781	49.897
Sul	3.858	9.437	16.936

Fonte: Elaborado a partir de SNIC, 2019.

Como no caso do potencial nacional, a energia térmica incrementada por região (**Tabela XXI**) refere-se ao crescimento do uso de CDRU na indústria de cimento, com projeções para 2030 e 2050. Ambas as projeções são baseadas em dados de 2014, sendo assim, o incremento de 2050 não acumulou os valores de 2030.

Tabela XXI

Potencial de Energia Térmica Incrementada (TJ/ano) por região para 2030 e 2050, com base em dados de 2014.

Região	Potencial de Energia Térmica (TJ/ano) pelo coprocessamento de CDRU por Região	
	2030	2050
Norte	1.361	4.278
Nordeste	8.417	19.817
Centro-Oeste	3.922	11.397
Sudeste	24.472	40.589
Sul	5.580	13.079

Fonte: Elaborado a partir de SNIC, 2019.

Estimativa do potencial

De acordo com a modelagem do *Roadmap*, o coprocessamento pode recuperar pelo menos 17,633 TJ/ano de CDRU para a produção de clínquer, até 2030. Contudo, é possível atingir 21,908 TJ/ano, considerando-se que o RSU fornecerá a porcentagem de energia estimada para o coprocessamento de lodo de esgoto, como mostra a **Tabela XXII**.

Tabela XXII

Energia Térmica Incrementada (TJ/ano) para 2030 e 2050, com base em dados de 2014. Considerando o incremento de energia vindo de RSU (CDR).

Energia Térmica (TJ/ano) de CDRU	2030	2050
Energia Incrementada de acordo com o Roadmap	17.633	33.892
Energia Incrementada excluindo o coprocessamento de lodo de esgoto	21.908	48.388

Fonte: Elaborado a partir de SNIC, 2019.

A **Tabela XXIII** mostra o potencial de consumo de CDRU pela indústria de cimento em curto prazo, ou seja, para 2030, e a longo prazo, ou seja, para 2050. Em um curto prazo, ponderando-se que a previsão de energia de lodo de esgoto venha de RSU, que é o considerado a partir desse ponto, a indústria de cimento, no Brasil, pode coprocessar um total de 1,4 milhão de toneladas de CDR. Foi considerado CDRU para pré-calcinador (uso mais comum) com poder calorífico inferior a 15 GJ/t.

Tabela XXIII

Potencial de consumo de CDRU (kt) para 2030 e 2050.

Potencial de consumo de CDRU pela indústria cimenteira (kt)	2030	2050
Potencial de consumo segundo Roadmap	1.176	2.259
Potencial de consumo excluindo coprocessamento de lodo de esgoto	1.461	3.226

A partir desses dados, é possível inferir a porcentagem de RSU coletado e adequadamente destinado, no Brasil (ABRELPE, 2019), que pode ser tratado por coprocessamento (**Tabela XXIV**).

Tabela XXIV

Porcentagem de CDRU (geração em 2018 no Brasil) que pode ser coprocessada pela indústria de cimento, projeções para 2030 e 2050.

Energia Térmica (TJ/ano) de CDRU	2030	2050
% de RSU produzido no Brasil – dados de 2018 ^a	13%	29%

Da mesma forma que, acima, foi calculado o potencial para o Brasil, a porcentagem de energia incrementada estimada pelo *Roadmap*, vinda de RSU, foi adicionada pela porcentagem de esgoto. A **Tabela XXV** mostra a energia potencial de CDRU por região.

Tabela XXV

Potencial energia térmica incrementada (TJ) de CDRU por região para 2030 e 2050, com base em dados de 2014.

Região	Potencial Energia Térmica (TJ) de CDRU – Coprocessamento por região	
	2030	2050
Norte	659	2275
Nordeste	4.076	10.538
Centro-Oeste	1.899	6.061
Sudeste	11.850	21.585
Sul	2.702	6.955

A **Tabela XXVI** mostra o potencial de consumo de CDRU pela indústria de cimento (toneladas/ano) por região brasileira, com projeções para 2030 e 2050. A região Sudeste destaca-se com o maior potencial de coprocessamento, com 790 mil toneladas de CDRU, em 2030, e mais de 1,4 milhão toneladas, em 2050.

Tabela XXVI

Potencial de consumo de CDRU (kt/ano) pelo setor cimenteiro por região em 2030 e 2050.

Região	Potencial de consumo de CDRU por região (kt/ano)	
	2030	2050
Norte	44	152
Nordeste	272	703
Centro-Oeste	127	404
Sudeste	790	1439
Sul	180	464
Brasil⁹⁶	1.412	3.161

⁹⁶ Uma pequena diferença entre o potencial brasileiro estimado e o total por regiões se dá devido à falta de informações precisas e dados regionais sobre porcentagens de resíduos.

APÊNDICE VI

METODOLOGIA APLICADA À DEFINIÇÃO DAS REGIONAIS

Um trabalho de georreferenciamento foi realizado para a definição de regionais formadas por municípios ao redor de aterros sanitários, plantas de cimento e caldeiras. Primeiramente, foram localizados, no mapa, os municípios que abrigam os 811 aterros sanitários existentes no Brasil, denominados de municípios-sede.

A localização das plantas foi feita a partir de pesquisa em bases de dados diversas, como a do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – Resíduos Sólidos, ano-base 2019, e a do Panorama do Coprocessamento 2021 (ABCP, 2021; ANEEL, 2008; CASTELLAN; CHAZAN; D`ÁVILA, 2006; COBRAZIL, 2019; HPB, 2006; HYDRO, 2021; INTERNATIONAL, 2009; MME, 2021a; POWERGEN INTERNATIONAL, 2006; SNIS, 2020b).

Os pontos de localização dos municípios-sede foram inseridos no *software* ArcGIS e foram selecionados todos os municípios que contam com aterros sanitários. Após a definição dos municípios, criou-se um centroide de cada município, que resultou em 765 pontos de localização, pois alguns municípios possuem mais de um aterro sanitário.

Para a definição da área diretamente afetada de cada município, foi fixado um raio de 100 km a partir dos centroides determinados. Devido à grande sobreposição de áreas diretamente afetadas pelos municípios estabelecidos como sede, empregou-se, como município-sede, o com maior população, de modo a evitar sobreposição de áreas. Cada regional foi formada, então, pelo município-sede e todos os municípios diretamente afetados pelo raio. A partir da lista de municípios pertencentes a cada regional, somou-se a população estimada para 2020, pelo IBGE, cujo resultado está apresentado na **Tabela I**. A exclusão de raio que se sobrepôs resultou em 113 municípios-sede com aterros sanitários.

Tabela XXVII

Regionais formadas ao redor de aterros sanitários, seus municípios-sede e população total correspondente, por estado e região do país.

Região	Estado	Município-sede	População estimada em 2020 (nº de habitantes) da regional formada num raio de 100 km
Centro-Oeste	DF	Brasília	4.116.391
	GO	Goianésia	496.920
		Goiânia	3.873.511
	MS	Alcinópolis	146.444
		Chapadão do Sul	182.929
		Sidrolândia	1.561.601
		Três Lagoas	271.202
		Cáceres	198.186
	MT	Colíder	405.620
		Diamantino	120.869
		Juína	109.039
		Matupá	25.766
		Nova Andradina	443.206
		Rondonópolis	441.442
		Sorriso	433.712
Tangará da Serra		336.628	
Nordeste	AL	Arapiraca	3.143.405
	BA	Alcobaça	764.679
		Araci	1.186.076
		Irecê	709.597
		Itatim	696.292
		Lafaiete Coutinho	504.682
		Remanso	191.441
	CE	Salvador	5.985.097
		Vitória da Conquista	1.077.909
		Caucaia	5.204.214
	MA	Jardim	1.213.847
		Mombaça	1.142.989
		Sobral	1.754.516
	PB	Lago do Junco	1.216.198
		Mirador	483.594
	PE	Rosário	2.598.826
		Itaporanga	658.318
		João Pessoa	6.320.620
	PI	Santo André	720.769
		Caruaru	3.597.244
		Ibimirim	920.171
	RN	Petrolina	1.034.003
		Trindade	399.832
SE	Coivaras	1.932.108	
	Parnaguá	291.692	
RN	São Félix do Piauí	223.892	
	Ceará-Mirim	2.222.514	
	Itajá	212.197	
Norte	AM	Mossoró	878.052
		Viçosa	731.979
	AP	Pinhão	2.382.315
		Rio Branco	644.001
	PA	Coari	180.733
		Japurá	93.316
		Manaus	2.663.264
	RO	Tabatinga	206.717
		Macapá	790.659
	TO	Altamira	248.107
Capanema		1.356.306	
Vitória do Xingu		255.484	
TO	Ariquemes	986.630	
	Vilhena	233.229	
	Araguaçu	117.720	
	Araguaína	570.404	
TO	Gurupi	214.542	
	Palmas	572.769	

Região	Estado	Município-sede	População estimada em 2020 (nº de habitantes) da regional formada num raio de 100 km
Sudeste	ES	Serra	3.177.806
		Água Boa	463.640
	MG	Andradas	998.696
		Caratinga	1.657.422
		Contagem	7.503.325
		Formoso	214.569
		Ibertioga	991.856
		Itinga	764.206
		Janaúba	363.803
		Lagoa da Prata	395.927
		Montes Claros	968.081
		Muriae	1.640.145
		Paracatu	157.929
		Patos de Minas	533.682
		Pirapora	166.678
		Rio Vermelho	137.123
		Santa Vitória	697.369
	Uberlândia	1.705.837	
	Varginha	2.123.572	
	RJ	Campos dos Goytacazes	1.677.111
		Rio de Janeiro	15.050.279
	SP	Altair	1.196.985
		Araçatuba	1.942.290
Assis		551.963	
Bauru		2.161.643	
Coronel Macedo		365.441	
Jacupiranga		344.238	
Piracicaba		3.824.404	
Presidente Venceslau		592.821	
Ribeirão Preto		3.989.700	
São Luiz do Paraitinga		1.397.216	
São Paulo	30.258.425		
Sul	PR	Curitiba	4.690.104
		Foz do Iguaçu	1.168.108
		Guarapuava	1.000.177
		Maringá	2.793.852
		Quedas do Iguaçu	579.827
		Telêmaco Borba	449.812
	RS	Umuarama	797.633
		Agudo	988.724
		Bagé	440.304
		Capão da Canoa	285.703
		Caxias do Sul	5.942.505
		Guarani das Missões	780.657
		Passo Fundo	893.997
	SC	Quaraí	283.947
		Rio Grande	848.628
Blumenau		4.244.522	
Chapecó		1.403.911	
Fraiburgo		785.982	
Içara	1.142.385		

O mesmo procedimento foi realizado em relação às 55 plantas de cimento e às 27 plantas com caldeiras industriais (17 a biomassa e 10 a carvão mineral). Na **Tabela XXVIII**, estão relacionados os 27 municípios-sede com plantas de cimento e os 15 com plantas de caldeiras (9 municípios-sede com caldeiras a biomassa e 6 com caldeiras a carvão mineral).

Tabela XXVIII

Regionais formadas ao redor de cimenteiras e caldeiras a biomassa e carvão mineral (BFB, CFB e PCC), seus municípios-sede e população total correspondente, por estado e região do país.

Região	Estado	Município-sede	População estimada em 2020 (nº de habitantes) da regional formada num raio de 100 km	
Centro-Oeste	DF	Brasília	4.475.951	
		Cezarina	3.794.700	
	GO	Chapadão do Céu	235.387	
		Quirinópolis	959.234	
	MS	Bodoquena	262.765	
		Corumbá	183.776	
MT	Rio Brilhante	1.640.611		
	Nobres	792.657		
Nordeste	AL	São Miguel dos Campos	3.366.104	
		São Miguel dos Campos	3.366.104	
	BA	Campo Formoso	1.227.141	
		São Gonçalo do Amarante	4.916.838	
	CE	Sobral	1.985.147	
		São Luís	2.468.081	
	PB	João Pessoa	7.132.958	
		Carnaíba	1.323.670	
RN	Mossoró	1.280.682		
	SE	Laranjeiras	2.256.393	
Norte	PA	Barcarena	3.849.134	
		Capanema	1.356.306	
	TO	Xambioá	833.813	
Sudeste	ES	Cachoeiro de Itapemirim	3.579.930	
		Arcos	651.235	
		Carandaí	2.159.841	
		Itapeva	5.612.989	
		Itaú de Minas	1.887.340	
	MG	Montes Claros	1.034.682	
		Sete Lagoas	6.981.645	
		RJ	Cantagalo	3.090.828
		Cajati	230.972	
		SP	Catanduva	3.041.534
Paraguaçu Paulista	2.703.496			
Votorantim	29.020.025			
PR	Figueira		1.986.972	
Sul	PR	Rio Branco do Sul	4.579.484	
		Candiota	506.632	
	RS	Pinheiro Machado	978.124	
		Capivari de Baixo	2.085.253	
	SC	Curitibanos	1.258.405	
		Pomerode	4.288.001	
		Três Barras	1.530.024	

APÊNDICE VII

METODOLOGIA APLICADA AO CÁLCULO DO POTENCIAL DE CONSUMO DE CDRU PELA GASEIFICAÇÃO

A partir do potencial de disponibilidade de CDRU nas regionais ao redor de aterros sanitários (*Tabela V*), foi estimado o potencial de consumo de CDRU pela tecnologia de gaseificação.

Os módulos⁹⁷ utilizados como base de cálculo podem operar com capacidade de até 86 t/dia de CDRU, capacidade de geração de energia elétrica líquida exportável estimada em 2,5 MW⁹⁸. O CDRU considerado adequado para a gaseificação, com o objetivo de geração de energia elétrica, é resultado da retirada da maior parte da umidade do RSU, ou seja, da separação da fração orgânica úmida. A estimativa do potencial de CDRU considerou a retirada da fração orgânica e dos recicláveis, conforme foi detalhado no **APÊNDICE I**.

Foram consideradas, no potencial de gaseificação, as regionais que possuem quantidade mínima de resíduos para abastecer 1 módulo gaseificador com 86 t/dia de CDRU (*Tabela XXIX*).

⁹⁷ Gaseificador industrial de grelhas móveis. Módulo disponível no mercado e ofertado pela empresa WEG S/A (gaseificação, combustão, caldeira e turbogerador). Tecnologia desenvolvida pela empresa brasileira Energia Limpa do Brasil LTDA em parceria com a Universidade Federal do Paraná. Tecnologia instalada e testada em escala industrial, em um anexo ao aterro sanitário da cidade de Mafra/SC, e em processo de Licença de Instalação em Bragança Paulista/SP.

⁹⁸ Potência de geração instalada de 3,3 MW, para operar uma média de 3,0 MW. Previsto consumo de 0,5 MWh. Para o cálculo, utilizou-se 2,5 MWh de geração exportável. Ciclo termodinâmico a vapor do tipo Rankine, com turbina a vapor de condensação associada a cada módulo de gaseificação, operando nas seguintes condições: Vapor (14 t/h; 418 oC @ 41 kgf/cm²) (WEG, 2019).

Tabela XXIX

Potencial de consumo de CDRU pela gaseificação, por regionais.

Região	UF	Município Sede	População estimada em 2020 (nº de habitantes)	RSU coletado e destinado adequadamente (t/ano)	Potencial de consumo de CDRU pela gaseificação (t/ano)	Potencial de geração de energia elétrica/ano (TWh/ano)	Potencial módulos gaseificadores	
Centro-Oeste	DF	Brasília	4.116.391	576.494	217.934	0,14	7	
	GO	Goiânia	3.873.511	542.479	205.075	0,13	7	
	MS	Sídlândia	1.561.601	218.700	82.676	0,05	3	
Nordeste	AL	Arapiraca	3.143.405	314.454	132.740	0,08	4	
	BA	Alcobaça	764.679	76.495	32.291	0,02	1	
		Araci	1.186.076	118.650	50.086	0,03	2	
		Salvador	5.985.097	598.725	252.739	0,16	8	
		Vitória da Conquista	1.077.909	107.830	45.518	0,03	1	
	CE	Caucaia	5.204.214	520.609	219.764	0,14	7	
		Jardim	1.213.847	121.428	51.258	0,03	2	
		Mombaça	1.142.989	114.340	48.266	0,03	2	
	MA	Sobral	1.754.516	175.515	74.090	0,05	2	
		Lago do Junco	1.216.198	121.664	51.358	0,03	2	
	PB	Rosário	2.598.826	259.976	109.743	0,07	3	
		João Pessoa	6.320.620	632.290	266.908	0,17	9	
	PE	Caruaru	3.597.244	359.854	151.905	0,10	5	
		Ibimirim	920.171	92.050	38.857	0,02	1	
	PI	Petrolina	1.034.003	103.438	43.664	0,03	1	
		Coivaras	1.932.108	193.280	81.589	0,05	3	
	RN	Ceará-Mirim	2.222.514	222.331	93.852	0,06	3	
Mossoró		878.052	87.837	37.078	0,02	1		
SE	Pinhão	2.382.315	238.317	100.601	0,06	3		
Norte	AM	Manaus	2.663.264	246.315	104.602	0,07	3	
	PA	Capanema	1.356.306	125.439	53.270	0,03	2	
	RO	Ariquemes	986.630	91.249	38.751	0,02	1	
Sudeste	MG	ES	Serra	3.177.806	1.018.596	272.016	0,17	9
		Água Boa	463.640	148.613	39.687	0,02	1	
		Andradas	998.696	320.116	85.487	0,05	3	
		Caratinga	1.657.422	531.261	141.873	0,09	5	
		Contagem	7.503.325	2.405.073	642.274	0,40	20	
		Ibertioga	991.856	317.924	84.901	0,05	3	
		Itinga	764.206	244.954	65.415	0,04	2	
		Lagoa da Prata	395.927	126.908	33.891	0,02	1	
		Montes Claros	968.081	310.303	82.866	0,05	3	
		Muriae	1.640.145	525.723	140.394	0,09	4	
		Patos de Minas	533.682	171.063	45.682	0,03	1	
		Santa Vitória	697.369	223.531	59.694	0,04	2	
		Uberlândia	1.705.837	546.779	146.017	0,09	5	
	Varginha	2.123.572	680.678	181.775	0,11	6		
	RJ	Campos dos Goytacazes	1.677.111	537.572	143.558	0,09	5	
		Rio de Janeiro	15.050.279	4.824.131	1.288.282	0,81	41	
	SP	Altair	1.196.985	383.675	102.460	0,06	3	
		Araçatuba	1.942.290	622.571	166.257	0,10	5	
		Assis	551.963	176.923	47.247	0,03	2	
		Bauru	2.161.643	692.881	185.034	0,12	6	
		Piracicaba	3.824.404	1.225.853	327.363	0,21	10	
		Presidente Venceslau	592.821	190.019	50.745	0,03	2	
		Ribeirão Preto	3.989.700	1.278.836	341.513	0,21	11	
São Luiz do Paraitinga		1.397.216	447.856	119.600	0,08	4		
Sul	PR	São Paulo	30.258.425	9.698.863	2.590.078	1,63	83	
		Curitiba	4.690.104	876.147	242.250	0,15	8	
		Foz do Iguaçu	1.168.108	218.211	60.334	0,04	2	
		Guarapuava	1.000.177	186.841	51.661	0,03	2	
		Maringá	2.793.852	521.913	144.306	0,09	5	
	RS	Umuarama	797.633	149.004	41.199	0,03	1	
		Agudo	988.724	184.701	51.069	0,03	2	
		Caxias do Sul	5.942.505	1.110.105	306.939	0,19	10	
		Guarani das Missões	780.657	145.833	40.322	0,03	1	
		Passo Fundo	893.997	167.005	46.176	0,03	1	
SC	Rio Grande	848.628	158.530	43.833	0,03	1		
	Blumenau	4.244.522	792.909	219.235	0,14	7		
	Chapecó	1.403.911	262.261	72.514	0,05	2		
	Fraiburgo	785.982	146.827	40.597	0,03	1		
Itajaí	1.142.385	213.406	59.006	0,04	2			
Total geral			172.878.072	39.044.152	11.388.165	7,15	363	

APÊNDICE VIII

METODOLOGIA APLICADA AO CÁLCULO DO POTENCIAL DE CONSUMO DE CDRU PELA INCINERAÇÃO

Como no caso do potencial de gaseificação, a estimativa do potencial de incineração partiu da disponibilidade de CDRU das regionais ao redor dos aterros sanitários.

Para esse cálculo, levou-se em conta que um incinerador tem um potencial de 10 MW, com capacidade para tratar 470 t/dia de CDRU, considerando a retirada da fração orgânica e dos recicláveis (em detalhes no **APÊNDICE I**) e mediante as premissas apresentadas na **Tabela XXX**.

Tabela XXX

Premissas para o cálculo do potencial preliminar de incineração de CDRU.

Premissa	Valor	Referência
Potência mínima para viabilidade econômica	10 MW	(SUANI TEIXEIRA COELHO, VANESSA PECORA GARCILASSO, MARILIN MARIANO DOS SANTOS; FARAGO ESCOBAR, DANILO PERECIN; -USP, 2020)
Eficiência de conversão elétrica	20%	(MME/EPE, 2014)
Fator de capacidade (FC) – geração elétrica	90%	(MME/EPE, 2014)
Poder calorífico inferior (PCI) médio	2000 kcal/kg	(SUANI TEIXEIRA COELHO, VANESSA PECORA GARCILASSO, MARILIN MARIANO DOS SANTOS; FARAGO ESCOBAR, DANILO PERECIN; -USP, 2020)
	2,326 MWh/t	
Operação	24 h/dia	(SUANI TEIXEIRA COELHO, VANESSA PECORA GARCILASSO, MARILIN MARIANO DOS SANTOS; FARAGO ESCOBAR, DANILO PERECIN; -USP, 2020)
	7.884 h/ano	

Foram desconsideradas as regionais de Minas Gerais e do Distrito Federal por estas possuírem legislações que restringem a tecnologia de incineração em seus territórios. No Distrito Federal, a Lei 6.819, de 29 de março de 2021, proíbe o uso de incineração no processo de destinação final dos resíduos sólidos urbanos oriundos do sistema de coleta do serviço de limpeza urbana (DISTRITO FEDERAL, 2021), enquanto no estado de Minas Gerais a proibição é pautada na Lei Estadual 21.557, de 22 de dezembro de 2014 (MINAS GERAIS, 2014).

A seguir, são apresentadas as regionais com potencial para a instalação de, ao menos, uma planta de incineração com 10 MW de capacidade instalada, a partir das premissas acima e do potencial de disponibilidade de CDRU (*Tabela XXXI*).

Tabela XXXI

Potencial de consumo de CDRU pela incineração, por regionais.

Região	UF	Município Sede	População estimada em 2020 (nº de habitantes)	Potencial de consumo de CDRU pela incineração (t/ano)	Potencial de geração de energia elétrica (TWh/ano)	Potencial quantidade de incineradores
Centro-Oeste	GO	Goiânia	3.873.511,00	205.075,41	0,10	1
	BA	Salvador	5.985.097,00	252.739,08	0,12	1
Nordeste	CE	Caucaia	5.204.214,00	219.763,90	0,10	1
	PB	João Pessoa	6.320.620,00	266.907,56	0,12	2
	ES	Serra	3.177.806,00	272.015,61	0,13	2
Sudeste	RJ	Rio de Janeiro	15.050.279,00	1.288.282,19	0,60	8
	SP	Bauru	2.161.643,00	185.033,53	0,09	1
		Piracicaba	3.824.404,00	327.363,47	0,15	2
		Ribeirão Preto	3.989.700,00	341.512,57	0,16	2
		São Paulo	30.258.425,00	2.590.077,57	1,20	15
Sul	PR	Curitiba	4.690.104,00	242.250,38	0,11	1
	RS	Caxias do Sul	5.942.505,00	306.938,63	0,14	2
	SC	Blumenau	4.244.522,00	219.235,45	0,10	1
Total geral			94.722.830,00	6.717.195,34	3,12	39

APÊNDICE IX

METODOLOGIA APLICADA AO CÁLCULO DO POTENCIAL DE CONSUMO DE CDRU POR CALDEIRAS INDUSTRIAIS A BIOMASSA

A estimativa do potencial de consumo de CDRU por caldeiras a biomassa partiu do mapeamento das caldeiras a leito fluidizado existentes no país. O presente estudo teve acesso aos dados das caldeiras fabricadas pela Empresa HPB Engenharia e Equipamentos Ltda., com tecnologia Babcock&Wilcox, que representam a maioria⁹⁹ das caldeiras a leito fluidizado em operação no setor sucroenergético (*Tabela XXXII*).

Tabela XXXII

Caldeiras de leito fluidizado (BFB) a biomassa, fabricadas pela empresa HPB¹⁰⁰, com tecnologia Babcock&Wilcox, instaladas no Brasil.

Caldeira de leito fluidizado (BFB) a biomassa	UF	Ano de início da operação	Potência ¹⁰¹ (MW _{térmico})	Geração de vapor (kg/h)	Pressão de operação (kgf/cm ²)	Temperatura de vapor (°C)	Combustível ¹⁰²
Caldeira 1	GO	2022	264	275.000	68	515	Bagaço de cana-de-açúcar
Caldeira 2	GO	2017	385	400.000	67	520	Bagaço de cana-de-açúcar
Caldeira 3	MS	2014	308	320.000	68	520	Bagaço de cana-de-açúcar
Caldeira 4	MS	HOLD	387	400.000	105	545	Bagaço de cana-de-açúcar
Caldeira 5	MS	2014	387	400.000	105	545	Bagaço de cana-de-açúcar
Caldeira 6	AL	2014	193	200.000	68	525	Bagaço de cana-de-açúcar
Caldeira 7	SP	2021	155	160.000	70	530	Bagaço de cana-de-açúcar
Caldeira 8	SP	2014	189	200.000	62	490	Bagaço de cana-de-açúcar
Caldeira 9	SP	HOLD	194	200.000	67	530	Bagaço de cana-de-açúcar
Caldeira 10	SP	2012	145	150.000	66	525	Bagaço de cana-de-açúcar
Caldeira 11	SP	2023	436	450.000	104	545	Bagaço de cana-de-açúcar
Caldeira 12	SP	2012	290	300.000	67	525	Bagaço de cana-de-açúcar
Caldeira 13	SP	2012	145	150.000	66	525	Bagaço de cana-de-açúcar
Caldeira 14	SP	2009	118	130.000	45	430	Bagaço de cana-de-açúcar
Caldeira 15	SC	2011	81	85.000	88	515	Casca, lascas de madeira, óleo combustível
Caldeira 16	SC	2007	149	160.000	63	470	Casca, lascas de madeira, óleo combustível
Caldeira 17	MT	2022	66	70.000	68	490	Cavacos de madeira, resíduos florestais, bambu e resíduos agrícolas

⁹⁹ Este trabalho não acessou dados de 1 (uma) caldeira BFB tecnologia Foster.

¹⁰⁰ O nome das usinas e dos municípios foram ocultados para a proteção dos dados das companhias.

¹⁰¹ Carga térmica associada ao fluxo de vapor que sai da caldeira.

¹⁰² Para as caldeiras que utilizam mais de um combustível, utilizou-se somente o primeiro da lista, ou seja, casca e cavacos de madeira.

A partir dos dados das caldeiras BFB, foram estimados os seguintes parâmetros do processo para o período de safra e entressafra: consumo de biomassa, consumo de CDRU (a 10% de substituição térmica), economia de biomassa com o uso de CDRU e energia elétrica produzida com a economia de biomassa. Ainda que a operação da usina, durante a safra e a entressafra, não seja padrão em todas as plantas, o mesmo cálculo foi utilizado para as caldeiras que consomem diferentes biomassas, que não o do bagaço de cana-de-açúcar, como madeira, considerando-se apenas a diferença do poder calorífico de cada combustível, conforme apresentado na **Tabela XXXIII** abaixo.

Tabela XXXIII
Poder calorífico inferior dos combustíveis biomassa e CDRU.

Poder calorífico inferior (base úmida)	GJ/t	Referências
Bagaço de cana-de-açúcar	6,96	SAMPAIO, 2014
Cavaco de madeira/lenha	10,04	TEC, 2021
Casca de árvore	9,21	TEC, 2021
CDRU	11,79	SAMPAIO, 2014

A **Tabela XXXIV** lista a eficiência e a substituição térmica da biomassa pelo CDRU, adotadas para todas as caldeiras. Considerou-se que a caldeira opera ao longo da entressafra¹⁰³, parando somente 30 dias ao ano¹⁰⁴ para manutenção (totalizando 7920 horas de operação/ano). Os valores foram estimados com base em SAMPAIO (2014) e (HPB SIMISA, 2011).

Tabela XXXIV
Parâmetros de Eficiência e substituição térmica adotados.

Parâmetro	Valor
Eficiência da caldeira	90%
Substituição térmica da biomassa pelo CDRU	10% do MWt térmico
Horas de operação no período de safra	5000 h
Horas de operação no período de entressafra	2920 h
Consumo específico de combustível a 90% de eficiência ¹⁰⁵	0,47 kg biomassa/kg vapor

¹⁰³ Considerando que, na entressafra, o vapor gerado é reduzido, pois é direcionado somente para a geração de energia elétrica.

¹⁰⁴ Há caldeiras a leito fluidizado que são projetadas para operar ao longo de todo ano, com o estoque de bagaço planejado para este fim.

¹⁰⁵ A partir do consumo de bagaço de cana de 142.467 kg/h e da produção de vapor de 300.000 kg/h (SAMPAIO, 2014).

A estimativa do consumo de biomassa para cada caldeira foi feita com base na geração de vapor (listadas na **Tabela XXXIV**) e do consumo específico de combustível (**Tabela XXXV**). Como 10% da energia térmica é fornecida pelo CDRU, foram calculados o consumo horário e total de CDRU, bem como, a economia de biomassa horária e total para o período de safra (**Tabela XXXV**).

Tabela XXXV

Valores estimados de potencial consumo e economia de combustíveis (biomassa e CDRU) para o período de safra.

Usina	Potencial no período de safra				
	Consumo de biomassa (t/h)	Consumo de CDRU (10% substituição) t/h	Economia de biomassa (t/h)	Economia total de biomassa (t)	Consumo total de CDRU (t)
Caldeira 1	130,6	7,7	13,1	65.297,4	38.551,6
Caldeira 2	190,0	11,2	19,0	94.978,0	56.075,0
Caldeira 3	152,0	9,0	15,2	75.982,4	44.860,0
Caldeira 4	190,0	11,2	19,0	94.978,0	56.075,0
Caldeira 5	190,0	11,2	19,0	94.978,0	56.075,0
Caldeira 6	95,0	5,6	9,5	47.489,0	28.037,5
Caldeira 7	76,0	4,5	7,6	37.991,2	22.430,0
Caldeira 8	95,0	5,6	9,5	47.489,0	28.037,5
Caldeira 9	95,0	5,6	9,5	47.489,0	28.037,5
Caldeira 10	71,2	4,2	7,1	35.616,8	21.028,1
Caldeira 11	213,7	12,6	21,4	106.850,3	63.084,4
Caldeira 12	142,5	8,4	14,2	71.233,5	42.056,3
Caldeira 13	71,2	4,2	7,1	35.616,8	21.028,1
Caldeira 14	61,7	3,6	6,2	30.867,9	18.224,4
Caldeira 15	40,4	3,4	4,0	20.182,8	17.187,6
Caldeira 16	76,0	6,5	7,6	37.991,2	32.353,1
Caldeira 17	33,2	2,6	3,3	16.621,2	12.974,7
TOTAL	1923,3	117,2	192,3	961.652,3	586.116,0

A geração de vapor estimada na entressafra é 2/3 da geração do período da safra. Essa condição foi adotada com base nos estudos da caldeira referenciada por SAMPAIO (2014). A geração de vapor dessa caldeira nominal, no período de safra, é de 300 t/h, e no período de entressafra, de 200 t/h de vapor (HPB SIMISA, 2011). Essa diferença se deve à não utilização de vapor na usina de açúcar e álcool, sendo esse vapor somente direcionado para a geração de energia elétrica. Assim como no período de safra, foi considerada a substituição térmica de 10% da biomassa pelo CDRU. A partir dessas premissas, o consumo de combustíveis (biomassa e CDRU) no período de entressafra foi estimado em 2/3 do consumo na safra, conforme detalhado na **Tabela XXXVI**.

Tabela XXXVI

Valores estimados de potencial consumo e economia de combustíveis (biomassa e CDRU) para o período de entressafra.

Usina	Potencial no período de entressafra				
	Consumo de biomassa (t/h)	Consumo de CDRU (t/h)	Economia de biomassa (t/h)	Economia total de biomassa (t)	Consumo total de CDRU (t)
Caldeira 1	87,1	5,1	8,7	25.422,4	15.009,4
Caldeira 2	126,6	7,5	12,7	36.978,1	21.831,9
Caldeira 3	101,3	6,0	10,1	29.582,5	17.465,5
Caldeira 4	126,6	7,5	12,7	36.978,1	21.831,9
Caldeira 5	126,6	7,5	12,7	36.978,1	21.831,9
Caldeira 6	63,3	3,7	6,3	18.489,1	10.915,9
Caldeira 7	50,7	3,0	5,1	14.791,2	8.732,8
Caldeira 8	63,3	3,7	6,3	18.489,1	10.915,9
Caldeira 9	63,3	3,7	6,3	18.489,1	10.915,9
Caldeira 10	47,5	2,8	4,7	13.866,8	8.187,0
Caldeira 11	142,5	8,4	14,2	41.600,4	24.560,9
Caldeira 12	95,0	5,6	9,5	27.733,6	16.373,9
Caldeira 13	47,5	2,8	4,7	13.866,8	8.187,0
Caldeira 14	41,2	2,4	4,1	12.017,9	7.095,4
Caldeira 15	26,9	2,3	2,7	7.857,8	6.691,7
Caldeira 16	50,7	4,3	5,1	14.791,2	12.596,1
Caldeira 17	22,2	1,7	2,2	6.471,2	5.051,5
TOTAL	1.282,2	78,1	128,2	374.403,3	228.194,5

O potencial consumo de CDRU e a potencial economia de biomassa, ao longo do ano, são detalhados na **Tabela XXXVII**, a seguir:

Tabela XXXVII

Potencial de consumo total CDRU (t/ano) e de economia total de biomassa (t/ano).

Usina	Potencial nos períodos de safra e entressafra		
	Consumo de CDRU no ano (t)	Aporte potência térmica do CDRU (TJ/ano)	Economia total de biomassa (t/h)
Caldeira 1	53.561	632	90.720
Caldeira 2	77.907	919	131.956
Caldeira 3	62.326	735	105.565
Caldeira 4	77.907	919	131.956
Caldeira 5	77.907	919	131.956
Caldeira 6	38.953	459	65.978
Caldeira 7	31.163	367	52.782
Caldeira 8	38.953	459	65.978
Caldeira 9	38.953	459	65.978
Caldeira 10	29.215	345	49.484
Caldeira 11	87.645	1.034	148.451
Caldeira 12	58.430	689	98.967
Caldeira 13	29.215	345	49.484
Caldeira 14	25.320	299	42.886
Caldeira 15	23.879	282	28.041
Caldeira 16	44.949	530	52.782
Caldeira 17	18.026	213	23.092
TOTAL	814.311	9.602	1.336.055

Para a determinação do potencial de geração de energia elétrica, tomou-se como base a usina estudada por Sampaio (2014), cuja potência elétrica é de 62,43 MW e a potência térmica é de 290 MW_{térmico} (resultando em uma eficiência de 21,53%), e o output térmico da biomassa é de 1,83 MW_{térmico}/t_{biomassa}/h. Embora esses parâmetros não retratem a realidade das várias usinas devido às diferenças de suas plantas de geração de energia elétrica, essa eficiência e esse *output* térmico foram utilizados para todas as caldeiras, por serem as referências publicadas.

A economia anual de biomassa foi multiplicada pelo output térmico (MW_{térmico}/t_{biomassa}*h⁻¹) e pela eficiência de geração de energia elétrica, resultando no potencial de energia elétrica gerada, a partir da economia de biomassa (MWh/ano) (**Tabela XXXVIII**).

Tabela XXXVIII

Potencial de consumo total CDRU (t/ano) e de economia total de biomassa (t/ano).

Usina	Consumo de CDRU no ano (t)
Caldeira 1	35,78
Caldeira 2	52,04
Caldeira 3	41,63
Caldeira 4	52,04
Caldeira 5	52,04
Caldeira 6	26,02
Caldeira 7	20,82
Caldeira 8	26,02
Caldeira 9	26,02
Caldeira 10	19,52
Caldeira 11	58,55
Caldeira 12	39,03
Caldeira 13	19,52
Caldeira 14	16,91
Caldeira 15	11,06
Caldeira 16	20,82
Caldeira 17	9,11
TOTAL	526,92

APÊNDICE X

METODOLOGIA APLICADA AO CÁLCULO DO POTENCIAL DE CONSUMO DE CDRU POR CALDEIRAS INDUSTRIAIS A CARVÃO MINERAL

A estimativa do potencial de consumo de CDRU por caldeiras a carvão mineral partiu do mapeamento das caldeiras a carvão pulverizado e a leito fluidizado (BFB e CFB¹⁰⁶), em operação no país, e em várias bases de dados: (ANEEL, 2008; CASTELLAN; CHAZAN; D'ÁVILA, 2006; COBRAZIL, 2019; HPB, 2006; HYDRO, 2021; INTERNATIONAL, 2009; MME, 2021a; POWERGEN INTERNATIONAL, 2006; TOLMASQUIM, 2016).

Tabela XXXIX

Caldeiras a carvão mineral em operação no Brasil, fabricante, localidade e capacidade instalada (MW).

Usina	Sistema de combustão	Sistema de combustão	Município	UF	Capacidade instalada (MW)
Jorge Lacerda UTLA1	Carvão pulverizado	MAN	Capivari de Baixo	SC	2 x 50
Jorge Lacerda UTLA2	Carvão pulverizado	Ansaldo Meccanico Nuclear - Babcock & Wilcox	Capivari de Baixo	SC	2 x 66
Jorge Lacerda UTLB	Carvão pulverizado	Skoda	Capivari de Baixo	SC	2 x 131
Jorge Lacerda UTLC	Carvão pulverizado	Skoda	Capivari de Baixo	SC	1 x 363
Candiota III	Carvão pulverizado	Harbin Boiler	Candiota	RS	350
Pecém I	Carvão pulverizado	Doosan Babcock	São Gonçalo do Amarante	CE	2 x 360
Pecém II	Carvão pulverizado	Doosan Babcock	São Gonçalo do Amarante	CE	1 x 360
Itaqui	Carvão pulverizado	Doosan Babcock	São Luís	MA	1 x 360
Hydro / Alunorte* ¹⁰⁷	C.F.B.	HPB - Babcock & Wilcox	Barcarena	PA	103
Alumar*	C.F.B.	Foster Wheeler	São Luís	MA	75
Pampa Sul	C.F.B.	DongFang	Candiota	RS	345
Figueira	B.F.B.	Thermax (TBWES)	Figueira	PR	21

* Geração de energia elétrica para autoconsumo.

¹⁰⁶ CFB: Circulating fluidized bed, em português, leito fluidizado circulante.

¹⁰⁷ Não foi encontrada capacidade instalada da caldeira BFB da Hydro/Alunorte para estimar o potencial.

A partir das eficiências¹⁰⁸ das caldeiras, foi calculada a energia proveniente do combustível em MW. Estimou-se o aporte de potência térmica do CDRU em GJ/ano, considerando 5% de substituição térmica. Com base no PCI do CDRU em *pellets* (20 GJ/t, baseado em N + P GROUP, (2021)), chegou-se ao potencial consumo de CDRU em *pellets* em toneladas.

Tabela XL

Eficiência das caldeiras em operação no Brasil, aporte de potência térmica do combustível (MW), aporte de potência do CDRU (GJ/ano) e potencial de consumo de CDRU em pellets (t/ano).

Usina	Capacidade instalada da usina (MW)	Eficiência estimada	Aporte de potência térmica do combustível (MW)	Aporte potência térmica do CDRU (GJ/ano)	Consumo pellets de CDRU (t/h)	Consumo pellets de CDRU (t/ano)
Jorge Lacerda UTLA1	100	26%	382	577.099	3	28.855
Jorge Lacerda UTLA2	132	30%	443	669.071	4	33.454
Jorge Lacerda UTLB	262	28%	937	1.416.317	8	70.816
Jorge Lacerda UTLC	363	34%	1.068	1.614.757	10	80.738
Candiota III	350	36%*	975	1.474.916	9	73.746
Pecém I	720	35%*	2.057	3.110.400	19	155.520
Pecém II	360	35%*	1.029	1.555.200	9	77.760
Itaqui	360	35%*	1.029	1.555.200	9	77.760
Hydro / Alunorte	103	50%*	206	311.472	2	15.574
Alumar*	75	50%*	150	226.800	1	11.340
Pampa Sul	345	36%	958	1.449.000	9	72.450
Figueira	21	25%	84	127.008	1	6.350

*Eficiência estimada.

O CDRU em formato de *pellets* seco possui PCI mais elevado (que se assemelha ao PCI do carvão mineral) e sua característica física permite a moagem com o carvão mineral, o que possibilita também o seu consumo em caldeiras a carvão pulverizado. É importante destacar que, no Brasil, ainda não há esse tipo de CDR/CDRU em produção.

¹⁰⁸ Eficiência das caldeiras foram determinadas a partir de pesquisa nos documentos: (ANEEL, 2017; CCEE, 2021; MME, 2021b, p. 10). Para as caldeiras que não apresentam sua eficiência publicada, adotou-se 50% para as caldeiras de leito fluidizado e 35% para caldeiras a carvão pulverizado, tendo como base caldeiras equivalentes e experiência dos consultores.

APÊNDICE XI

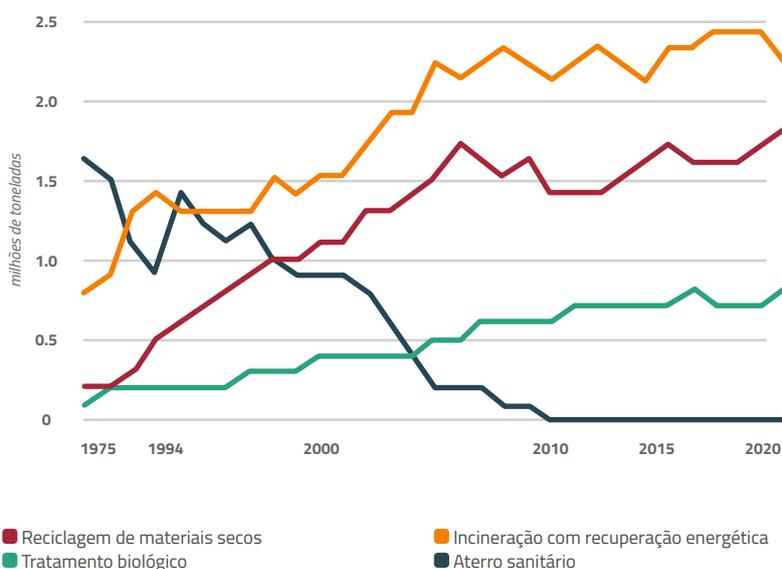
SUÉCIA COMO REFERÊNCIA NA SEGREGAÇÃO DA FRAÇÃO ORGÂNICA DE RSU

Este apêndice referencia, integralmente, o Relatório de Gestão de Resíduos da Suécia de 2020 – “*Swedish Waste Management 2020*” (AVFALL SVERIGE, 2021) e objetiva compilar informações relevantes para exemplificar as possibilidades de segregação e aproveitamento do RSU e seus benefícios.

A quantidade de resíduos sólidos urbanos tratada em 2020, na Suécia, foi de 4.839.430 toneladas, sendo que 37% foram destinadas à reciclagem, 16% para tratamento biológico, 46% para recuperação energética e 0,9% para disposição final em aterro sanitário. Ainda, o tratamento biológico por digestão anaeróbia e compostagem cresceu 13% em relação a 2019, devido ao aumento: da separação de resíduos na fonte, tanto de restos de alimentos quanto de embalagens; do número de municípios aderentes à coleta seletiva; e da coleta de resíduos de jardim para a compostagem.

O relatório demonstra que a curva de crescimento da reciclagem e do tratamento biológico acompanhou o desenvolvimento do aproveitamento energético ao longo dos anos (**Figura II**).

Figura II
Histórico do gerenciamento de resíduos na Suécia, 1975 a 2020.



Fonte: adaptado de AVFALL SVERIGE (2021).

Quanto aos dados de coleta seletiva de resíduos orgânicos (restos de alimentos e resíduos de jardim), nota-se que a eficiência de separação média nacional é de 42%, chegando em até 75%¹⁰⁹ em municípios com sucesso nos programas de incentivo à separação pelos munícipes (AVFALL SVERIGE, 2020). Na região de VafabMiljö, ao redor de Västerås, por exemplo, o percentual de residências agregadas que participam do sistema de segregação de resíduos alimentares, na fonte, é de cerca de 90%. No entanto, é importante mencionar que a eficiência de segregação é sujeita a falhas. O que é considerado como rejeito ainda contém material com valor, ou seja, cerca de 30% são classificados como resíduos orgânicos; 30%, como materiais recicláveis (principalmente embalagem), sendo que apenas 30% são, efetivamente, rejeitos.

Ressalta-se que a coleta seletiva de orgânicos ainda não foi implementada em 20% dos municípios suecos, portanto, a média nacional tenderá a subir ao longo dos próximos anos (NATURVÅRDSVERKET, 2022).

¹⁰⁹ 75% dos resíduos orgânicos (resto de alimentos) disponíveis são recolhidos separadamente e tratados biologicamente, principalmente por digestão anaeróbia. Resultado de um programa que iniciou na década de 90.

APÊNDICE XII

POTENCIAL DA ROTA TECNOLÓGICA DE COPROCESSAMENTO DE CDRU NA INDÚSTRIA CIMENTEIRA

A **Figura III** mostra o potencial de consumo de CDRU pelo coprocessamento em indústrias cimenteiras, o equivalente em energia térmica (TJ) ¹¹⁰ e o atual número de plantas de cimento integradas ¹¹¹, isto é, plantas que possuem um ou mais fornos de clínquerização.

Figura III

Potencial de consumo de CDRU pela indústria cimenteira no Brasil.

Região do Brasil	Potencial de consumo de CDRU pela indústria cimenteira (milhões t)	Potencial de energia térmica do CDRU (TJ) para coprocessamento	Plantas de cimento integradas
Centro-Oeste	0,13	1.899	8
Nordeste	0,27	4.076	14
Norte	0,04	659	3
Sudeste	0,79	11.850	23
Sul	0,18	2.702	7
Total	1,41	21.186	55

Potencial demanda por CDRU pela indústria cimenteira



Plantas de cimento integradas por região



¹¹⁰ Transformações de unidade de energia 1 TJ = 1.000.000.000.000 J = 0,2777777778 GWh = 277,777778 MWh = 277.777,78 kWh = 238.902.957.618,62 cal.

¹¹¹ Plantas de cimento podem ser divididas em dois grupos: plantas integradas e plantas de moagem. A planta integrada produz o clínquer e o cimento. A planta de moagem recebe o clínquer e aditivos para a produção (moagem) do cimento. Somente a planta integrada possui demanda intensa de energia térmica, devido ao processo de clínquerização, e, portanto, pode aproveitar a energia dos resíduos em seus fornos.

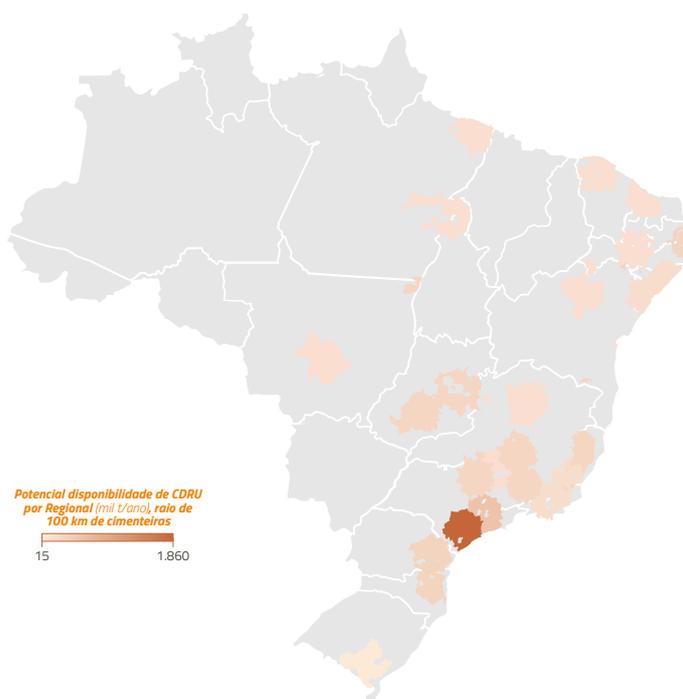
A quantidade de CDRU que a indústria cimenteira projeta consumir até 2030 totaliza cerca de 1,4 milhão de t/ano. A energia total de 21 mil TJ que o CDRU pode fornecer poderá substituir, termicamente, cerca de 12% do coque de petróleo a ser utilizado pelo setor cimenteiro. A região Sudeste é a que possui maior potencial em consumo de CDRU (790 mil/t), o que corresponde à possibilidade de substituição térmica a partir do CDRU de 11.850 TJ via coprocessamento.

I. POTENCIAL DE DISPONIBILIDADE DE CDRU PARA A INDÚSTRIA DO CIMENTO

Uma vez conhecido o mercado consumidor, é necessário verificar a disponibilidade de CDRU. O potencial de disponibilidade de CDRU para coprocessamento é apresentado a seguir. As premissas adotadas para a estimativa desse potencial foram baseadas nos critérios definidos pelo *Roadmap* do Cimento, cujos detalhes são apresentados nos **APÊNDICES IV** e **V**. Foram criadas “regionais” de municípios localizados em um raio de 100 km ao redor de municípios que possuem plantas de cimento integradas. Três regionais¹¹², cuja soma das populações dos municípios não atingiu ao menos 500 mil habitantes – escala mínima de viabilidade¹¹³, foram descartadas. Na **Figura IV**, é possível visualizar as 24 regionais resultantes dessa estimativa.

Figura IV

Regionais do coprocessamento - Municípios em um raio de 100 km ao redor de plantas de cimento e o potencial de CDRU disponível por região.



¹¹² Cajati (SP), Bodoquena e Corumbá (MS).

¹¹³ De acordo com o relatório *Increasing the Use of Alternative Fuels at Cement Plants* (IFC, 2017), que lista os critérios usados para o uso de diversos tipos de combustíveis alternativos na indústria de cimento.

Dentre as regionais demonstradas na **Figura IV**, as que apresentam menor potencial de disponibilidade de CDRU em seu entorno encontram-se nas regiões Nordeste e Centro-Oeste. A título de exemplo do potencial da proposta, o mapa da **Figura V** apresenta a regional de Campo Formoso, que tem potencial para atender a cimenteira instalada no estado da Bahia. Dentro do raio de 100 km, estão os municípios de: Andorinha, Antônio Gonçalves, Caém, Caldeirão Grande, Casa Nova, Filadélfia, Itiúba, Jacobina, Jaguarari, Juazeiro, Mirangaba, Morro do Chapéu, Ourolândia, Pindobaçu, Ponto Novo, Saúde, Senhor do Bonfim, Sento Sé, Sobradinho, Umburanas e Várzea Nova (Bahia) e Petrolina (Pernambuco). Juntos, tais municípios representam uma população de 1.227.141 habitantes, com estimativa de 123 mil t/ano de RSU enviados para aterros, que podem ser convertidos em 25 mil t/ano de CDRU, para coprocessamento, na cimenteira localizada em Campo Formoso.

Figura V
Municípios no entorno da fábrica de cimento localizada em Campo Formoso - BA.



O potencial de disponibilidade de CDRU, nessa regional, representa cerca de 9% do potencial de consumo de CDRU pelo setor cimenteiro na região Nordeste, que é de 272 mil t/ano. Ao se somar o potencial de disponibilidade de CDRU para as 7 regionais do Nordeste, obtém-se 372 mil t/ano, que representam um valor 27% acima do potencial de consumo para coprocessamento nos fornos de cimento.

O painel da **Figura VI** refere-se à distribuição do potencial de disponibilidade de CDRU para coprocessamento ao redor do país. O potencial de consumo de 1,4 milhão t/ano de CDRU equivale a 31% do potencial de CDRU¹¹⁴ que pode ser produzido no Brasil pelas regionais formadas (**Figura VI**), que é cerca de 4,4 milhões t/ano. Isso reforça a necessidade de desenvolvimento de outros mercados consumidores de CDRU, como caldeiras, gaseificadores e incineradores, de modo a contribuir com a destinação de RSU do país.

Figura VI

Potencial de disponibilidade de CDRU para coprocessamento por Região.

Região	Potencial de disponibilidade de CDRU (milhões t/ano)	Quantidade de regionais com população acima de 500 mil habitantes
Centro-Oeste	0,25	3
Nordeste	0,37	7
Norte	0,04	2
Sudeste	3,46	9
Sul	0,37	3
Total	4,50	24

Potencial de disponibilidade de CDRU para coprocessamento



Quantidade de regionais com população acima de 500 mil habitantes



¹¹⁴ CDRU com a qualidade necessária para o coprocessamento, que corresponde a, aproximadamente, 20% do RSU, dependendo da gravimetria do RSU e do processo de separação e produção do CDRU.

APÊNDICE XIII

POTENCIAL DA ROTA TECNOLÓGICA DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE CDRU PELA INCINERAÇÃO

O potencial de geração de energia elétrica pela incineração de CDRU seguiu as metodologias descritas nos **APÊNDICES VI e VIII**. Os resultados desse potencial e a quantidade total de unidades de recuperação energética (URE), considerando as metas regionais de recuperação de resíduos recicláveis do Planares, são apresentados na **Figura VII**.

Figura VII

Potencial de Incineração de CDRU no Brasil a partir da regionalização de municípios.

Região do Brasil	Potencial de consumo de CDRU pela incineração (milhões t/ano)	Potencial de capacidade elétrica instalada - Incineração (MW)	Potencial de geração de energia elétrica (TWh/ano)	Potencial de quantidade de URE - Incineradores
Centro-Oeste	0,21	12,1	0,1	1
Nordeste	0,74	43,62	0,34	4
Norte	-	0	0	0
Sudeste	5	295,23	2,33	30
Sul	0,77	45,33	0,36	5
Total	6,72	396,28	3,12	39

Potencial de consumo de CDRU pela incineração por região



Potencial quantidade de URE - Incineradores



Conforme pode ser verificado na **Figura 10**, o Brasil possui potencial para a instalação de 39 plantas de incineração¹¹⁵. Esse número é inferior ao potencial de 94 plantas calculado pela ABREN (ABREN, 2021), devido às diferenças entre as premissas adotadas, principalmente em relação à quantidade de RSU para o cálculo (coletado e destinado adequadamente) e à incineração de CDRU ao invés de RSU brutos. Vale ressaltar que um estudo não invalida o outro, mas se complementam.

A quantidade de CDRU¹¹⁶ que as UREs equipadas com incineradores podem consumir totaliza cerca de 6,7 milhões de t/ano. Essa quantia equivale a 39,9% do que pode ser produzido no Brasil (cerca de 16,8 milhões t/ano) por regionais formadas ao redor de aterros sanitários. O potencial de geração de energia elétrica, por essas potenciais UREs, totaliza 3,12 TWh/ano, o que equivale a 0,65% do consumo nacional de energia elétrica (que em 2018 foi de 482 TWh/ano), demonstrando que, embora seja uma alternativa para a gestão do RSU, a incineração contribui pouco para a matriz energética brasileira. Isso reforça a possibilidade de desenvolvimento de outros mercados consumidores de CDRU, como a indústria cimenteira, caldeiras e gaseificadores, conforme já apresentado neste documento.

Como as principais premissas se baseiam, principalmente, em índices populacionais e índices de geração per capita e de coleta com destinação adequada (aterros sanitários), a região Sudeste apresenta os melhores índices de potencial de capacidade de energia elétrica instalada (MW), conseqüentemente, de potencial de geração de energia elétrica (GWh/ano) e de potencial para URE (74% do total).

A região Nordeste, apesar de apresentar o segundo maior índice populacional do Brasil (IBGE, 2020), possui baixos índices de coleta e destinação adequada de RSU, logo, baixa disponibilidade de CDRU e baixo potencial para incineração. Quanto ao Centro-Oeste, os 3% correspondem somente ao potencial de uma URE, que poderia ser localizada no estado de Goiás. A região Norte não apresentou escala mínima de disponibilidade de CDRU para um incinerador, considerando as premissas adotadas neste estudo.

¹¹⁵ Foi desconsiderado o potencial do Distrito Federal e do estado de Minas Gerais devido às legislações locais. Lei nº 6.819, de 29 de março de 2021, fica proibida a incineração no processo de destinação final do RSU oriundos do sistema de coleta do serviço de limpeza urbana do Distrito Federal (DISTRITO FEDERAL, 2021). Lei Estadual nº 21.557, de 22 de dezembro de 2014, que altera a Política Estadual de Resíduos Sólidos (PERS), proíbe a utilização da tecnologia de incineração no processo de destinação final do RSU oriundos do sistema de coleta do serviço público de limpeza urbana nos municípios (MINAS GERAIS, 2014). A proibição também abrange as concessões públicas para empreendimentos que promovam o aproveitamento energético a partir da incineração de RSU oriundos da coleta convencional.

¹¹⁶ Considerando a retirada de recicláveis e fração orgânica, conforme detalhado na metodologia, do APÊNDICE I.

APÊNDICE XIV

POTENCIAL DA ROTA TECNOLÓGICA DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE CDRU PELA GASEIFICAÇÃO

O potencial de geração de energia elétrica pela gaseificação de CDRU e a quantidade total de plantas de gaseificação, que foram calculados a partir do potencial de disponibilidade de CDRU nas regionais formadas, são apresentados na **Figura VIII**.

Figura VIII

Potencial de Gaseificação de CDRU no Brasil a partir da regionalização de municípios.

Região do Brasil	Potencial de consumo de CDRU pela gaseificação (milhões t/ano)	Potencial capacidade elétrica instalada - Gaseificação (GW)	Geração de energia elétrica (TWh/ano)	Quantidade de módulos gaseificadores
Centro-Oeste	0,51	0,05	0,32	16
Nordeste	1,88	0,18	1,18	60
Norte	0,2	0,02	0,12	6
Sudeste	7,38	0,71	4,64	235
Sul	1,42	0,14	0,89	45
Total	11,39	1,09	7,15	363

Potencial de consumo de CDRU pela gaseificação por regiões



Um potencial de 363 módulos gaseificadores, espalhados por todo o território nacional, podem consumir cerca de 11 milhões de t/ano de CDRU e gerar, aproximadamente, 7,15 TWh/ano de energia elétrica. Observa-se que o Sudeste apresenta maior expressividade, representando 65% do potencial de produção de energia e consumo de CDRU pela gaseificação. No outro extremo, está a região Norte, que apresenta o menor potencial de gaseificação (2%). Esses resultados estão diretamente relacionados aos índices de coleta e disposição adequada de RSU – premissas adotadas para o cálculo do potencial –, que afetam diretamente a disponibilidade de CDRU para a gaseificação.

Com relação ao potencial de disponibilidade e de consumo de energia elétrica, tomando-se como exemplo o estado de São Paulo, pode-se inferir que o potencial de geração de 3,23 TWh pela gaseificação pode suprir 7,9% do consumo de energia em residências do estado de São Paulo, que, em 2019, foi de 40,9 TWh (EPE, 2020). No mesmo ano, o consumo nacional de energia elétrica foi de 482 TWh (EPE, 2020) e, desta forma, o potencial de geração de energia elétrica pela gaseificação representa 1,48% da demanda do mercado brasileiro.

Vale salientar que essa tecnologia ainda não está consolidada em escala comercial para a geração de energia elétrica a partir de RSU. Esse estudo visa destacar a gaseificação como uma alternativa que demanda pesquisa e desenvolvimento, sendo uma possível solução complementar à gestão de resíduos no país no médio e longo prazos.

APÊNDICE XV

POTENCIAL DA ROTA TECNOLÓGICA DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE CDRU EM CALDEIRAS INDUSTRIAIS

A seguir, são apresentados os resultados do potencial da rota tecnológica de aproveitamento energético de uso de CDRU em caldeiras industriais a biomassa, do tipo leito fluidizado borbulhante, e caldeiras industriais a carvão mineral, dos tipos leito fluidizado e carvão pulverizado. Tal qual a gaseificação, essa rota tecnológica é incipiente como solução para o RSU brasileiro. É necessário o aprofundamento de pesquisas para o desenvolvimento dessa alternativa de consumo de CDRU.

I. POTENCIAL CONSUMO DE CDRU POR CALDEIRAS A BIOMASSA DO TIPO LEITO FLUIDIZADO BORBULHANTE

Com base nas experiências publicadas, foi calculado o potencial de consumo de CDRU por caldeiras a biomassa, tipo leito fluidizado borbulhante¹¹⁷ (BFB), atualmente em operação no Brasil. As premissas adotadas e a descrição da metodologia encontram-se no **APÊNDICE IX**. Abaixo, é apresentado o potencial de consumo de CDRU¹¹⁸, em toneladas/ano e o equivalente em TJ/ano, para substituição de 10% da energia térmica proveniente de biomassa nas 17 caldeiras estudadas neste trabalho, e o potencial de economia de biomassa resultante dessa substituição. Ressalta-se que a região Norte não apresenta potencial por não existirem, atualmente, caldeiras a leito fluidizado instaladas para a queima de bagaço ou lenha.

¹¹⁷ Caldeira de leito fluidizado borbulhante, do inglês bubbling fluidized bed (BFB): Nesse tipo de caldeira, o combustível é introduzido no leito composto por material inerte (usualmente areia) que se comporta como um fluido, mantido em suspensão devido à injeção de ar ascendente sob alta pressão. O leito é mantido em altas temperaturas, permitindo um processo de combustão eficiente (MITSUBISHI POWER, 2022; ONLINE, 2014).

¹¹⁸ PCI: 11,79 GJ/t, equivalente a 2.818 kcal/kg base úmida (SAMPALHO, 2014).

Figura IX

Potencial de consumo de CDRU e economia de biomassa por caldeiras BFB no Brasil por ano.

Região do Brasil	Potencial de consumo de CDRU por caldeiras BFB a biomassa (mil t/ano)	Energia térmica do CDRU (TJ/ano)	Potencial economia de biomassa com a substituição pelo CDRU (mil t/ano)
Centro-Oeste	367,6	4.335,1	615,2
Nordeste	39,0	459,3	66,0
Sudeste	338,9	3.996,3	574,0
Sul	68,8	811,6	80,8
Total	814,3	9.602,3	1.336,1

Potencial de consumo de CDRU por caldeiras BFB a biomassa por região



Quantidade de caldeiras BFB a biomassa por região



A quantidade de CDRU passível de ser aproveitada energeticamente por caldeiras a leito fluidizado BFB, no Brasil, é de, aproximadamente, 814 mil toneladas anuais. É notório o destaque das regiões Centro-Oeste e Sudeste em relação ao potencial de produção de energia elétrica a partir da substituição do bagaço de cana por CDRU, as quais somam, aproximadamente, 90% do potencial de consumo de CDRU. Este destaque se deve ao número de caldeiras instaladas nas regiões e à participação do estado de São Paulo no setor sucroenergético, que é responsável por 55% da produção do país (SEADE, 2021). O aporte de energia térmica que esse potencial de CDRU pode fornecer é superior a 9 mil TJ, que, por sua vez, poderia gerar uma economia de mais de 1,3 milhão de toneladas de biomassa anuais.

II. POTENCIAL CONSUMO DE CDRU POR CALDEIRAS A CARVÃO MINERAL DOS TIPOS LEITO FLUIDIZADO E CARVÃO PULVERIZADO

Atualmente, o Brasil possui capacidade instalada de geração de energia elétrica de 3.228 MW por térmicas a carvão mineral. Em 2019, a geração elétrica a partir do carvão mineral foi de 15.327 GWh, representando 2,4% da energia gerada no país (EPE, 2020). A Lei nº 14.299, sancionada em janeiro de 2022, cria o Programa de Transição Energética Justa para a região carbonífera de Santa Catarina, alinhado à valorização dos recursos energéticos e minerais e à neutralidade de carbono a ser atingida em conformidade com as metas definidas pelo Governo Federal. O programa tem como objetivo o descomissionamento, até 2040, da atividade de geração termelétrica a carvão mineral nacional, sem abatimento da emissão de gás carbônico (CO₂), com consequente finalização da exploração desse minério na região para este fim, que corresponde a, aproximadamente, 27% da capacidade de geração termoelétrica a carvão mineral do país (BRASIL, 2022d).

Além disso, a pressão para a redução do uso de combustíveis fósseis ficou ainda mais fortalecida com a COP26 (26ª Convenção Quadro das Nações Unidas Sobre Mudanças Climáticas). Os países comprometeram-se a acelerar o desenvolvimento, a implantação e a disseminação de tecnologias de baixa emissão de GEE, com a redução gradativa da energia advinda do carvão mineral e de subsídios aos combustíveis de origem fóssil (UNFCCC, 2021). A substituição, ainda que parcial, de carvão mineral por CDRU, em caldeiras de geração de vapor para uso industrial ou geração de energia elétrica, já é realidade em países da Europa, como Itália e Alemanha (CHRISTOPHE CORD'HOMME, 2018; WEBER *et al.*, 2020). Essa alternativa pode ser considerada como uma transição até que a indústria possa adaptar as caldeiras, com conversão total de combustíveis menos poluentes e mais eficientes.

O presente trabalho estimou o potencial de consumo de CDRU por caldeiras com tecnologias capazes de consumir esse material, que são as caldeiras do tipo leito fluidizado¹¹⁹ e a carvão pulverizado¹²⁰, localizadas, principalmente, nos estados do Sul, mas também com plantas no Norte e Nordeste. Diferentemente do que ocorre com as caldeiras a biomassa, que podem ser mais facilmente adaptadas para o consumo de CDRU, a substituição do carvão mineral apresenta mais limitações. Primeiramente, o Poder Calorífico Inferior (PCI) do carvão mineral é mais elevado que o do bagaço, na ordem de 4.500 kcal/kg, o que implica em uma substituição térmica máxima de 5%. Outra questão é a necessidade de moagem do CDRU para possibilitar a injeção com o carvão mineral, principalmente nas caldeiras em que o sistema de combustão é do tipo pulverizado. Para tal, é necessário o processamento do CDRU em pellet seco, o que eleva, por consequência, seu poder calorífico. A metodologia detalhada encontra-se no **APÊNDICE X**.

¹¹⁹ *Circulating fluidized bed (CFB) e bubbling fluidized bed (BFB).*

¹²⁰ *Sistema de combustão do tipo pulverizado (PCC - Pulverized Coal Combustion).*

Figura X

Potencial de consumo de CDRU por caldeiras a carvão mineral no Brasil.

Região do Brasil	Potencial de consumo de CDRU por caldeiras a carvão mineral (mil t/ano)	Aporte de potência térmica do CDRU (TJ/ano)	Quantidade de caldeiras a carvão
Nordeste	233	4.665	4
Norte	104	2.093	2
Sul	366	7.328	7
Total	704	14.087	13

Potencial de consumo de CDRU por caldeiras a carvão mineral por região



Quantidade de caldeiras a carvão mineral por região



O potencial de consumo de CDRU por caldeiras a carvão mineral do tipo leito fluidizado e a carvão pulverizado, conforme calculado, é de 704 mil t/ano. Essa quantidade de CDRU pode fornecer 14 mil TJ/ano de energia térmica, substituindo até 5% de carvão mineral nessas caldeiras, sendo que esses 5% equivalem a 466 MW da potência instalada das plantas estudadas.

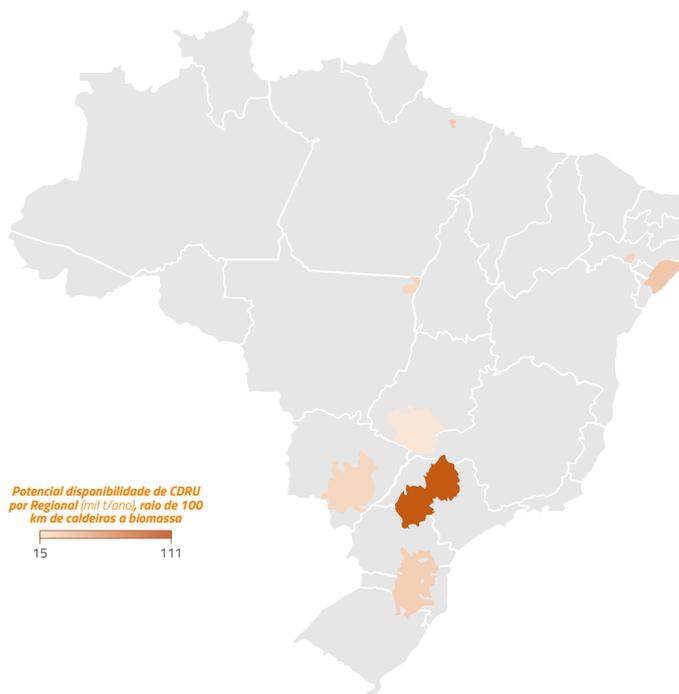
III. POTENCIAL DE DISPONIBILIDADE DE CDRU PARA CALDEIRAS A BIOMASSA DO TIPO LEITO FLUIDIZADO BORBULHANTE

Uma vez conhecido o potencial de consumo de CDRU pelas usinas que possuem caldeiras a leito fluidizado, é necessário averiguar se existe RSU para tal finalidade nas proximidades dessas indústrias. Como estipulado no estudo da indústria cimenteira, foi estabelecido um raio de 100 km em torno da localização das caldeiras a biomassa para a determinação do potencial de produção e utilização de CDRU, se o RSU fosse destinado para esses locais. Para as caldeiras a biomassa de leito fluidizado, foram estabelecidas 9 regionais, sendo que 2 foram descartadas por possuírem população menor do que 500 mil habitantes¹²¹. Os resultados obtidos podem ser observados na **Figura XI**.

¹²¹ 500 mil habitantes é a escala mínima viável considerável (IFC, 2017) para a produção de CDRU com características equivalentes às exigidas pelo coprocessamento em fornos de cimento: CDRU homogêneo com baixa umidade e controle de PCI mínimo, baixo teor de Cl, S e metais pesados. As mesmas premissas foram adotadas para a produção de CDRU para caldeiras. As regionais descartadas tinham população inferior a 400 mil habitantes, e seus municípios sede eram Chapadão do Céu/GO e Vera/MT.

Figura XI

Regionais de caldeiras a biomassa - Municípios em um raio de 100 km ao redor de caldeiras a biomassa e o potencial de CDRU disponível por região.



A regional com maior potencial de disponibilidade de CDRU foi a da cidade de Catanduva, estado de São Paulo, com disponibilidade de 111 mil t/ano. Essa regional possui 3 caldeiras a leito fluidizado, totalizando um potencial de consumo de 203 mil t/ano de CDRU. Dentre as regionais estabelecidas, a que apresentou menor potencial foi a do município de Quirinópolis, em Goiás, com potencial de 15 mil t/ano. As duas usinas, nessa região, podem consumir até 131 mil toneladas anuais de CDRU.

Conforme pode ser verificado na **Tabela XI**, o maior potencial de disponibilidade regional de CDRU concentra-se na região Sudeste, tendo em vista a localização das caldeiras atualmente em funcionamento no país. A **Tabela XI** refere-se: à distribuição do potencial de disponibilidade de CDRU para a utilização em caldeiras a biomassa ao redor do país, e à quantidade de regionais formadas com população acima de 500 mil habitantes.

Tabela XI

Potencial de disponibilidade de CDRU para caldeiras a biomassa.

Região do Brasil	Potencial disponibilidade de CDRU (mil t/ano)	Quantidade de regionais com população acima de 500 mil habitantes
Centro-Oeste	40	2
Nordeste	36	1
Sudeste	210	2
Sul	55	2
Total	341	7

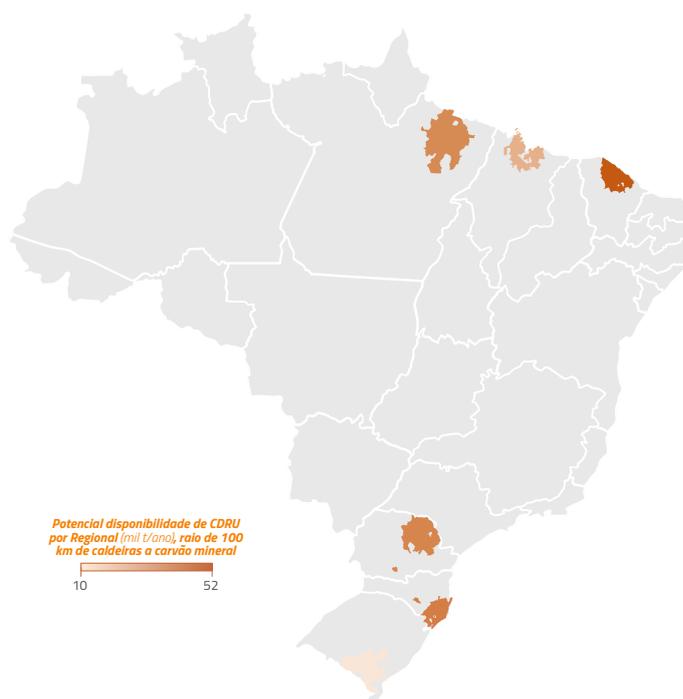
O potencial de disponibilidade de CDRU pode suprir, parcialmente, o potencial de consumo de CDRU pelas caldeiras, o que equivale a cerca de 41% desse consumo. A disponibilidade de CDRU está diretamente ligada à população dos municípios afetados em um raio de 100 km no entorno das caldeiras, os quais, em geral, se localizam distante dos grandes centros urbanos. Os parâmetros considerados, como a característica do CDRU (que equivale a cerca de 20% do RSU brutos), o raio adotado de 100 km, entre outros fatores, demanda estudos aprofundados e específicos, como gravimetria do RSU e logística dessas localidades, por exemplo. Possivelmente, a disponibilidade é superior à apresentada neste documento, que optou por adotar parâmetros conservadores para absorver diferenças locais, inerentes ao extenso território brasileiro.

IV. POTENCIAL DE DISPONIBILIDADE DE CDRU PARA CALDEIRAS A CARVÃO MINERAL

Para as caldeiras a carvão mineral, foram estabelecidas 6 regionais. Os dados podem ser observados na **Figura XII**. A regional com maior potencial de disponibilidade de CDRU para caldeiras a carvão mineral é a do município de São Gonçalo do Amarante, Ceará, com capacidade de 52 mil t/ano. A regional com menor potencial de disponibilidade, dentre os locais analisados, é a do município de Candiota, no Rio Grande do Sul, com capacidade de 10 mil t/ano de CDRU.

Figura XII

Regionais de caldeiras a carvão mineral - Municípios em um raio de 100 km ao redor de caldeiras a carvão mineral e o potencial de CDRU disponível por região.



A **Tabela XLI** demonstra o potencial de disponibilidade de CDRU para a utilização em caldeiras a carvão mineral ao redor do país. Nas regiões Centro-Oeste e Sudeste, destaca-se a ausência de potencial de disponibilidade de CDRU, tendo em vista a inexistência de caldeiras a carvão mineral, nessas regiões, para a utilização do combustível produzido.

Tabela XLI

Potencial de disponibilidade de CDRU para caldeiras a carvão mineral.

Região do Brasil	Potencial disponibilidade de CDRU (mil t/ano)	Quantidade de regionais com população acima de 500 mil habitantes
Nordeste	78	2
Norte	38	1
Sul	91	3
Total	207	6

Ao se comparar o consumo (**Figura X**) e a disponibilidade (**Tabela XLI**) de CDRU por caldeiras a carvão mineral no Brasil, observa-se que a região Norte é a que possui maior potencial para suprir, parcialmente, o potencial de consumo por CDRU, representando cerca de 37%; seguida pela região Nordeste, com 33%; e pela região Sul, com 25%. A partir das premissas adotadas, o Brasil possui potencial para suprir 29% do potencial de consumo de caldeiras a carvão mineral, o que ocorre devido às caldeiras não estarem próximas a centros com alta densidade populacional. A partir da possibilidade apresentada, reforça-se, aqui, a necessidade de aprofundamento dos estudos para melhor aferição desses resultados, considerando as peculiaridades locais das características do RSU, as distâncias a serem percorridas, bem como, as tecnologias adotadas.

ISBN: 978-65-997883-4-5

CRL



9 786599 788345