

III-1208 – PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEIS DERIVADOS DE RESÍDUOS SÓLIDOS A PARTIR DE RSU: UMA ANÁLISE A PARTIR DA NBR 16849/2020

Adjane Damasceno de Oliveira⁽¹⁾

Engenheira ambiental. Doutoranda em Engenharia Civil na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

Ricardo Valadão de Carvalho

Engenheiro ambiental. Mestre em Engenharia Ambiental e Sanitária pela Universidade Federal de Goiás (UFG).

Rafaella de Moura Medeiros

Engenheiro mecânico e químico industrial. Doutor em Engenharia Mecânica. Professor da Universidade de Pernambuco (UPE). Coordenador do Laboratório de Combustíveis e Energia da UPE.

Sérgio Peres Ramos da Silva

Engenheiro mecânico e químico industrial. Doutor em Engenharia Mecânica. Professor da Universidade de Pernambuco (UPE). Coordenador do Laboratório de Combustíveis e Energia da UPE.

José Fernando Thomé Jucá

Engenheiro civil. Doutor pela Universidade Politécnica de Madrid. Professor titular na UFPE. Coordenador do Grupo de Resíduos Sólidos da UFPE.

Endereço⁽¹⁾: Rua Fortaleza, 389, Alto da Glória – Goiânia - GO - CEP: 74815-710 - Brasil - Tel: (62) 99629-2828 - e-mail: adjanededeoliveira@gmail.com

RESUMO

O aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos (RSU) como fonte de energia e calor é uma realidade em muitos países, diversificando matrizes energéticas dominadas predominantemente por combustíveis fósseis. As tecnologias waste-to-energy (WtE) para RSU vem se consolidando no cenário global, no entanto, no Brasil há ainda um emprego insipiente deste tipo de solução. A heterogeneidade dos RSU é um dos pontos de fragilidade, desta forma, a aplicação de tratamentos mecânicos e/ou biológicos contribui para produção de um material com características mais homogêneas e com maior controle de qualidade: os combustíveis derivados de resíduos sólidos (CDR). Neste sentido, estabelecer um padrão de qualidade para produção e uso dos combustíveis produzidos a partir de resíduos contribui para a proteção do meio ambiente e para estabelecer uma qualidade mínima para aproveitamento energético da parcela de resíduos para a qual a recuperação de materiais não é viável. Desta forma, este estudo analisou um sistema de produção de CDR discutindo os dados a partir das especificações e critérios estabelecidos na NBR 16849 e comparando as exigências no cenário brasileiro e internacional apresentando as diferenças entre os sistemas de padronização de combustíveis produzidos principalmente a partir de RSU, identificando as fragilidades do sistema brasileiro e oportunidades de melhoria na busca da construção de um arcabouço que dê suporte e segurança na produção e consumo deste combustível. O processo produtivo brasileiro estudado aproveita a parcela de rejeitos do tratamento mecânico de RSU para produção de CDR misturando-os com resíduos industriais. Os rejeitos utilizados para produção do combustível representam uma média de 10,4% do total de RSU recebido. O produto final é composto cerca de 19% de rejeitos de RSU. Não há legislação federal que trate dos combustíveis produzidos a partir de resíduos sólidos, no entanto, tem-se a NBR 16849, que aborda este material denominando-o resíduo sólido urbano energético (RSUE). Os resultados mostram que norma brasileira é um marco inicial para padronização do CDR produzido no território nacional, mas considerando que a normalização internacional versa sobre este tema a mais tempo e vem sendo aprimorada ao longo dos anos por meio de estudos técnicos e da experiência no setor, recomenda-se que um nivelamento as exigências internacionais, o que também inclui a nomenclatura adotada para este combustível alternativo, e ressalta a necessidade de legislações federais tanto para produção quanto para consumo do CDR.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduos sólidos urbanos; combustíveis derivados de resíduos; energia dos resíduos, aproveitamento energético; normalização; padronização; qualidade.

INTRODUÇÃO

É consenso que não há uma única forma de fazer com que se cumpra as prioridades na gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos previstas na Lei Federal nº 12305: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final (BRASIL, 2010). As soluções precisam ser integradas, articuladas e projetadas em escala regional para que o cenário em que somente os rejeitos sejam aterrados torne-se uma realidade no território brasileiro.

Aspectos sociais, econômicos, tecnológicos e ambientais devem ser considerados na escolha das melhores rotas de destinação a serem empregadas para garantir eficiência na recuperação de materiais e de energia, de forma a promover a circularidade em busca de um desenvolvimento que resulte em menor impacto ambiental possível. A recuperação energética tem potencial para contribuir com a melhoria desta gestão e, além disso, é uma alternativa dentre as diretrizes estabelecidas pela política nacional de resíduos sólidos brasileira. Pode ser aplicada tanto para os resíduos secos quanto para os resíduos biodegradáveis.

Para os resíduos biodegradáveis esta recuperação pode ser realizada por digestão anaeróbia produzindo biogás, que pode ser utilizado tanto para geração de energia elétrica ou térmica bem como para produção de combustíveis automobilísticos. Para os demais resíduos, exceto a parcela passível de reciclagem, pode-se utilizar um processo de valorização de forma a adequar parâmetros para viabilização do seu uso para aplicação em tecnologias como pirólise, gaseificação, incineração ou qualquer processo térmico que vise produzir energia térmica e elétrica a partir do calor obtido na queima dos resíduos.

As discussões em torno da mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e a adesão de compromissos rumo a neutralidade de carbono ressaltam a necessidade de busca de fontes alternativas no setor de energia e o aproveitamento energético de resíduos sólidos como fonte de eletricidade e calor é uma realidade em muitos países, diversificando matrizes energéticas dominadas predominantemente por combustíveis fósseis.

Por outro lado, no setor de resíduos sólidos há o desafio de implantação e manutenção de uma gestão eficiente e que promova a ordem de prioridade que se inicia na prevenção da geração até a destinação final adequada, promovendo a recuperação de materiais e energia e reduzindo o montante encaminhado para disposição final.

Assim, estabelece-se um ponto de convergência entre estes dois setores para saneamento de questões de relevante impacto ambiental, econômico e social. As tecnologias waste-to-energy (WtE) para RSU vem se consolidando no cenário global. A maioria dos países desenvolvidos já as incorporaram tratando quantidades relevantes de resíduos, principalmente como forma de obter maior segurança energética, enquanto países em desenvolvimento como Índia, Brasil, Indonésia e México avançam lentamente neste caminho devido ao orçamento insuficiente e as estratégias adotadas para o gerenciamento dos resíduos (SHARMA; JAIN, 2020).

A seleção de um processo de tratamento adequado em um caso específico resulta das condições financeiras e de infraestrutura, das quantidades de resíduos e, acima de tudo, da composição dos resíduos (FRICKE; SANTEN; WALLMANN, 2005). As tecnologias WtE podem oferecer soluções sustentáveis para os rejeitos, para os quais não há mais possibilidade de reutilização ou reciclagem (BIANCO; PANEPINTO; ZANETTI, 2022). A Figura 1 ilustra a quantidade de energia recuperada dos RSU em diferentes países.

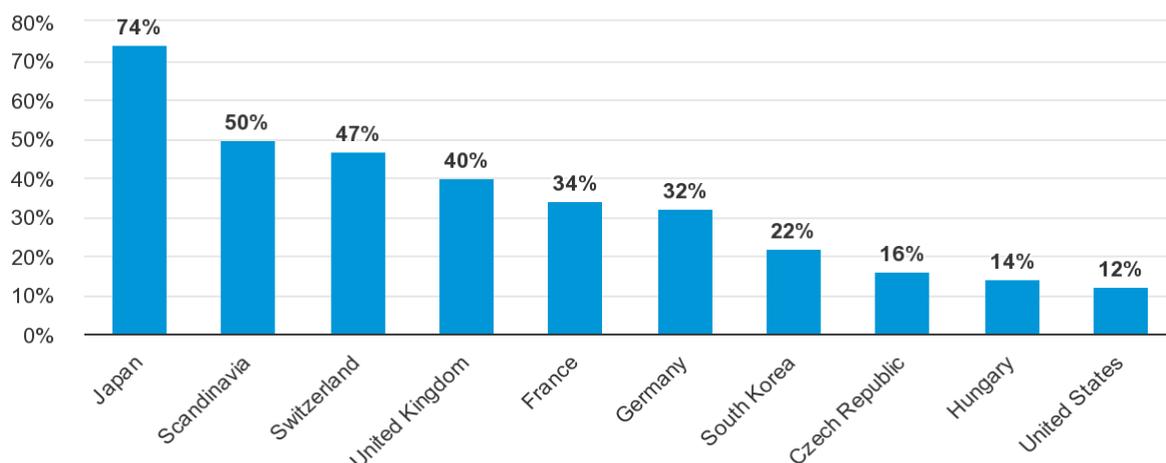


Figura 1: Porcentagem de energia recuperada de RSU via plantas de WtE em países selecionados.
Fonte: EIA (2021).

Desde que aplicada a hierarquia dos resíduos, as tecnologias WtE não concorrem com o aumento da reciclagem e compostagem dos RSU. Na Europa, de 1995 a 2020, a proporção de resíduos municipais reciclados e compostados cresceu de 12% e 7% para 30% e 18%, respectivamente, e a incineração também aumentou de 15% para 27% e o montante enviado para aterro passou de 61% para 23 (Figura 2) (EUROSTAT, 2022). Uma economia moderna de reciclagem depende de opções de tratamento ecologicamente corretas e acessíveis para os resíduos resultantes dos processos de reciclagem (QUICKER; CONSONNI; GROSSO, 2020).

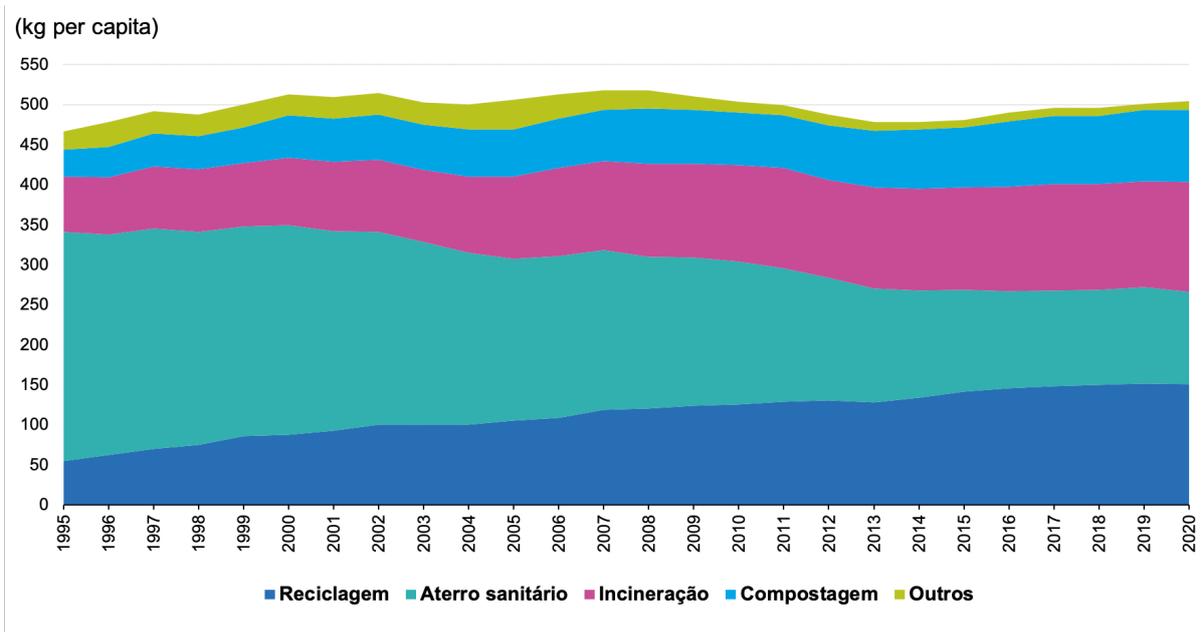


Figura 2: Tratamento de resíduos municipais – União Europeia – 1995-2020.
Fonte: EUROSTAT (2022).

De acordo com dados de 2019, a Europa possui 499 plantas de WtE para destinação de resíduos não perigosos, que tratam 99 milhões de toneladas de resíduos, sendo a França o país com maior número de unidades, 124, ou seja 14,5% das plantas da Europa (CEWEP, 2022).

Nos EUA apenas 13% dos RSU são utilizados para recuperação de energia e 53% são depositados em aterros. Existem 86 instalações WtE que utilizam principalmente tecnologias de “mass burning” e de CDR e estão concentradas no Nordeste do país (predominantemente em Nova York) e no Estado da Flórida. Para o resto do país, a maior parte dos RSU é depositado em aterros sanitários equipados com recuperação de gás, que é fornecido para residências ou utilizado para geração de eletricidade (MUKHERJEE et al., 2020).

Tecnologias WtE são neutras em carbono quando se trata da combustão das frações biogênicas, tais como papel, madeira e resíduos alimentares. Se aterrado, a degradação de tais frações liberaria metano, um gás de efeito estufa mais significativo que o CO₂, em situações em que a captura total do gás do aterro não é alcançável. Obviamente, a combustão de resíduos plásticos liberará CO₂ fóssil, mas as emissões economizadas dos combustíveis fósseis deslocados estão sendo compensadas, e isto é especialmente relevante para instalações WtE de alta eficiência (QUICKER; CONSONNI; GROSSO, 2020).

No Brasil, a gestão de resíduos está focada principalmente na eliminação dos RSU por meio disposição em aterros sanitários, no entanto, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) abre as possibilidades para o salto tecnológico e a introdução de tecnologias mais avançadas de recuperação de materiais e energia, de forma a reduzir a disposição em aterros sanitários (BERNSTAD SARAIVA; SOUZA; VALLE, 2017). No

entanto, no há ainda um emprego insipiente deste tipo de solução. A heterogeneidade dos RSU é um dos pontos de fragilidade, e neste sentido, a aplicação de tratamentos mecânicos e/ou biológicos contribui para recuperação da parcela reciclável e para produção de um material com características mais homogêneas e com maior controle de qualidade: os combustíveis derivados de resíduos/rejeitos sólidos (CDR) ou combustíveis sólidos recuperados (CSR).

Obter um material que atenda padrões preestabelecidos é uma forma de garantir uma queima segura e que cause menor impacto ambiental, o que pode tornar o CDR/CSR uma opção mercadológica. No entanto, a produção e uso deste material atualmente encontra-se em desenvolvimento inicial no mercado brasileiro em termos de regulamentação, discussão e investimentos, no que se refere ao seu uso como matéria-prima para substituição dos combustíveis convencionalmente utilizados.

Os CDRs/CSRs podem ser fontes de energia térmica e/ou elétrica e podem ser usados tanto em sistemas de mono-incineração (por exemplo, na geração de energia) quanto em sistemas de co-incineração (por exemplo, na indústria cimenteira). Os requisitos de qualidade e a terminologia utilizada para este combustível podem variar e a fim de utilizar o este material de forma eficiente, é necessário definir padrões e introduzir medidas de garantia de qualidade específicas (FLAMME; GEIPING, 2012).

Tanto o CDR quanto o CSR denotam misturas de resíduos combustíveis de alto valor calorífico separadas do montante de rejeitos (VELIS et al., 2010) preparadas (processadas, homogeneizadas e com qualidade superior que podem ser comercializadas entre produtores e usuários) a partir de resíduos não-perigosos (RADA; ANDREOTTOLA, 2012) tais como RSU, resíduos comerciais ou volumosos e é composto por componentes biogênicos (40-80%) como papel, papelão, têxteis e madeira (LUZ et al., 2015). No entanto, o CSR refere-se a um combustível derivado de resíduos preparado para atender requisitos de especificação de qualidade (LUZ et al., 2015; VELIS et al., 2010) e classificação estabelecidos pela norma (RADA; ANDREOTTOLA, 2012; PSOMOPOULOS, 2014) e ser utilizado para recuperação de energia (RADA; ANDREOTTOLA, 2012; VELIS et al., 2010).

No Brasil, o uso de resíduos de biomassa como cavaco de madeira e bagaço de cana-de-açúcar já é comumente aceito, mas não há legislação federal específica que trate de combustíveis produzidos a partir de resíduos, ou uma definição nacional para o termo. No entanto, o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares) descrever que CDR é um combustível produzido a partir de RSU e que pode ser utilizado em fornos e centrais de energia termelétricas substituindo combustíveis fósseis e, também, como insumo e matéria-prima secundária para cimenteiras (BRASIL, 2022b).

No âmbito estadual, a resolução SIMA nº47 do Estado de São Paulo enquadra como combustível convencional aqueles a base de biomassa como madeira, cavaco, tora, lenha, serragem ou a mistura destes, balaço de cana-de-açúcar, palha de vegetais e define como CDR os combustíveis alternativos preparado a partir de resíduos sólidos não perigosos e que podem ser utilizados em fornos e caldeiras industriais ou em unidades de tratamento térmico de resíduos (ESTADO DE SÃO PAULO, 2020).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou em 2020 a NBR 16849 referente ao aproveitamento energético de RSU, mas que não incorpora a nomenclatura utilizada internacionalmente ou a denominação usual utilizada no território nacional. O combustível produzido a partir de resíduos é denominado resíduo sólido urbano para fins energéticos (RSUE) definido como “resíduos sólidos urbanos, com ou sem incorporação de outros resíduos sólidos, resíduos agrossilvopastoris ou resíduos classe II elegíveis, utilizados em processos de recuperação energética de maneira controlada” (ABNT, 2020).

Este artigo analisou um sistema de produção de CDR, discutindo os dados a partir das especificações e critérios estabelecidos na NBR 16849, e comparando as exigências no cenário brasileiro e internacional de forma a compreender melhor as diferenças entre os sistemas de padronização de combustíveis produzidos principalmente a partir de RSU, identificando as fragilidades do sistema brasileiro e oportunidades de melhoria na busca da construção de um arcabouço técnico que dê suporte e segurança na produção e consumo deste combustível.

MATERIAIS E MÉTODOS

Em busca de uma análise da produção de CDR a partir das recomendações impostas pela NBR brasileira, realizou-se um estudo de caso em uma unidade que produz CDR a partir de RSU e resíduos sólidos industriais (RSI). Foram realizados levantamentos de entradas e saídas do processo a fim de averiguar o fluxo de produção do sistema e análises laboratoriais dos lotes produzidos.

Os dados obtidos foram discutidos com base na NBR, avaliando os parâmetros exigidos para elegibilidade dos resíduos utilizados para produção e os parâmetros estabelecidos para este combustível de forma a averiguar o quão a NBR pode contribuir para desenvolvimento deste mercado e ser um documento balizador para os produtores e consumidores deste do material produzido.

Para realizar a discussão sobre oportunidades de melhorias a serem aplicadas a norma brasileira de forma a contribuir para a produção e uso do CDR no cenário nacional, fez-se a comparação entre a norma brasileira e a norma europeia tendo em vista o desenvolvimento deste setor no território europeu.

RESULTADOS

A unidade de recuperação de materiais (*material recovery facility – MRF*) estudada produz o CDR a partir de RSU e RSI não-perigosos. O objetivo de incorporar os RSI é melhorar as propriedades dos RSU, viabilizando a recuperação de energia dos materiais que antes seriam encaminhados para disposição final. Os RSU provenientes da coleta convencional (sem separação na fonte geradora) passam por um processo de triagem mecânica que resulta em 3 frações (Figura 3): resíduos orgânicos biodegradáveis, resíduos recicláveis e rejeitos. Os resíduos orgânicos biodegradáveis são enviados para o aterro sanitário energético, em que há recuperação do biogás gerado na decomposição dos resíduos biodegradáveis.

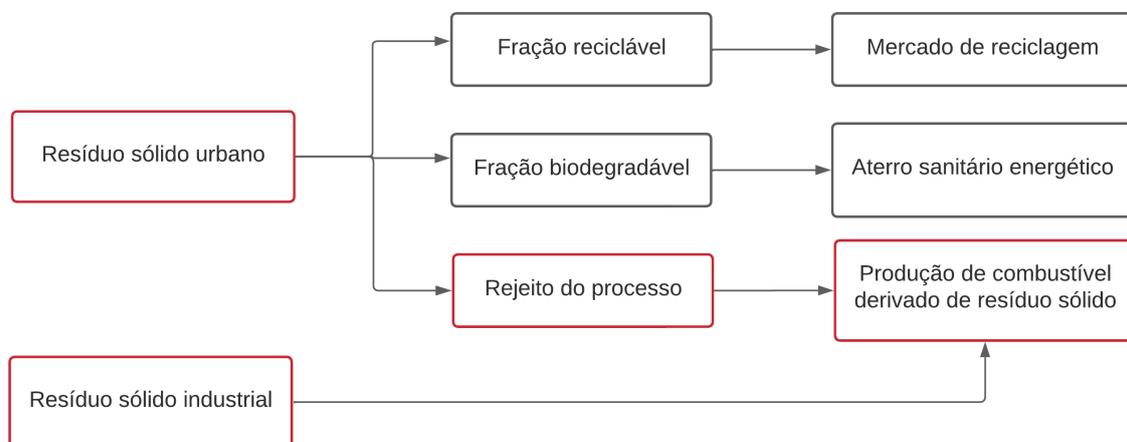


Figura 3: Fluxo de produção de CDR – visão geral.

Os resíduos recicláveis são prensados e enviados para reciclagem e os rejeitos mais os RSI são utilizados para produção do CDR. A unidade é composta por um sistema de triagem mecanizada, em que inicialmente o RSU é processado em um rasga saco para rompimento dos recipientes de acondicionamento. O resíduo passa por uma peneira rotativa de malha de 80mm. Os resíduos com menos de 80mm são classificados como orgânicos biodegradáveis e são dispostos em aterro sanitário. Os resíduos com dimensão maior que 80mm seguem no processo e passam por um separador balístico para classificação dos materiais com superfície plana (2D) como papeis e plásticos filme e não planos (3D) como garrafas PET.

Estes materiais após classificados são encaminhados para leitores ópticos de luz infravermelha próxima (Near infrared – NIR). O equipamento é programado para separação do material de interesse para reciclagem e, também, para retirada do PVC, de forma a reduzir o teor de cloro presente no CDR. Posteriormente o resíduo reciclável recuperado passa por uma cabine de seleção/separação manual e então está apto para prensagem, armazenamento e encaminhamento para o mercado de reciclagem.

Os rejeitos são misturados com o RSI e triturados em uma dimensão de 50mm. Extraí-se os metais com auxílio de sistema de imãs e o resíduo passa por uma segunda peneira rotativa de 50mm. O material menor que 50mm é armazenado, passa pelo controle de qualidade por meio de análises laboratoriais de PCS, teor de cloro e teor de umidade e caso atenda os requisitos exigidos pela cimenteira é realizada a expedição para o uso nos fornos de produção de clínquer.

O processo recebe, em média, 200 toneladas/dia de RSU e cerca de 1500 toneladas/mês de RSI, o que representa uma média de cerca de 60 toneladas/dia. Entretanto, a recepção diária de RSI não é contínua porque a geração diária não tem um comportamento regular como RSU, portanto, a dosagem diária adicionada ao processo variará de acordo com as cargas enviadas pelos geradores. Em 2021 foram produzidas 24.346 toneladas de CDR, considerando as cargas que foram classificadas como elegíveis e encaminhadas para usuários finais. A Tabela 1 apresenta o total de material processado de agosto a novembro de 2021.

Tabela 1: Montante de resíduos processados na unidade de tratamento mecanizada – agosto-novembro/2021.

Período	Total processado (t/mês)	%RSU	%RSI
Agosto/ 2021	5.774	76	24
Setembro/2021	5.878	74	26
Outubro/2021	5.767	73	27
Novembro/2021	4.382	76	24
Total	21.802	75	25

O quantitativo das parcelas triadas de RSU por um período de uma semana estão na Tabela 2. A parcela de resíduos orgânicos biodegradáveis é a mais representativa e os rejeitos correspondem a fração que é encaminhada para a produção de CDR. Assim, apesar do maior montante de resíduos processados serem representados por RSU (Tabela 1), a parcela encaminhada para produção de CDR corresponde a uma média de 10,4% do total recebido.

Tabela 2: Percentual das frações do RSU processado na unidade de tratamento mecânico.

Fração	Dia 1 (%)	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	MÉDIA
Biodegradável	77,52	80,11	73,64	75,14	70,27	79,69	76,06
Volumoso	7,21	2,92	6,22	3,47	8,62	4,06	5,42
Reciclável	5,63	7,84	5,61	11,10	10,15	8,48	8,14
Rejeito	9,65	9,13	14,53	10,30	10,96	7,78	10,39

Avaliando as porcentagens das frações resultantes do processamento mecânico (Tabela 2), observa-se que se difere da composição gravimétrica dos RSU quando se compara aos dados do Planares em que o percentual de matéria orgânica biodegradável é de 45,3% e de recicláveis (metais, vidro, plástico e papel/papelão) corresponde a 32,2% (BRASIL, 2022).

A Tabela 3 apresenta o percentual de RSI e RSU utilizado para a produção de CDR durante o período de uma semana. Nos dias 2 e 5 o CDR foi produzido somente com o RSI. Nestas datas houve recebimento do RSU, mas a fração de RSU não foi incorporada ao combustível na data de processamento devido a problemas operacionais. Apesar da quantidade de RSU recebida, a parcela deste resíduo que compõe o CDR representa uma média de 19%.

Tabela 3: Produção de CDR: percentual de rejeito de RSU e RSI processados

	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Média semanal
RSI (%)	81,35	100,00	67,52	68,09	100,00	55,06	92,76
Rejeito RSU (%)	18,65		32,48	31,91		44,94	18,85
Produção de CDR (T)	128,57	58,59	46,71	82,64	62,38	22,65	401,54

Em termos de normalização, considerando que o RSUE corresponde ao combustível que atende padrões da norma brasileira, representa, portanto, ao que a norma internacional chama de CSR, do inglês, *solid recovered fuel* – SRF. A norma brasileira que trata da recuperação energética de resíduos é relativamente recente, publicada em 2020, e a primeira norma europeia para requisitos e classes de CSR, CEN/TS 15359, foi publicada em 2006, sendo atualizada em 2011 e posteriormente substituída pela EN ISO 21640 em 2021.

A garantia de qualidade da CSR tem sido um desafio na Europa desde o início dos anos 90. Foram elaboradas diretrizes específicas na Alemanha, Finlândia, Itália e Suíça que definem padrões de qualidade em vários campos de aplicação. A fim de criar uma estrutura comparável de regras dentro da Europa, o Comitê Europeu de Normalização (CEN) fundou o Comitê Técnico CEN/TC 343 "Combustíveis Sólidos Recuperados" em 2002. Sua missão era padronizar a produção e o uso do CSR na Europa (FLAMME; GEIPING, 2012).

O CEN/TC 343 conta atualmente com 34 normas publicadas sobre o tema (Figura 4). Dentre estas, há normas da International Organization for Standardization – ISO. O Brasil, por meio da ABNT, também é membro da ISO, mas as normas sobre recuperação energética de resíduos sólidos não foram publicadas pela entidade brasileira.



Figura 4: Normalização europeia referente a combustíveis sólidos recuperados – CSR.

Na Europa o CSR tem o status de resíduos e a Comissão Europeia não pretendem alterar este status. O Comitê Europeu de Normalização (CEN) anunciou que não financiaria grupos de trabalho temáticos se o material não tivesse mais o status de resíduo. Opinião oposta à dos produtores e usuários potenciais para os quais o interesse seria obter um status de produto já que isto implicaria na supressão de procedimentos visando a classificação das instalações para receber CSR e a supressão dos investimentos necessários para a adaptação dos sistemas de tratamento de gases de combustão. Entretanto, o status do produto acrescentaria novas restrições administrativas e técnico-econômicas ligadas a novos procedimentos e testes de qualificação de produtos (RECORD, 2008).

No Brasil, o nome RSUE tem objetivo de manter o status de resíduo ao material, no entanto, considerando que a nomenclatura de combustível adotada pela literatura, legislação e normalização técnica internacional, considera-se que uma nova nomenclatura não coopera com o cenário, mas traz um novo elemento para discussão e torna a difusão da norma no meio técnico mais difícil ao vincular o nome do combustível a apenas

os RSU quando pode ser instrumento de normalização para resíduos não perigosos processados para aproveitamento energético.

Quanto a elegibilidade do resíduo a ser utilizado para produção do RSUE/CSR, a norma brasileira determina que cada lote de combustível produzido deve conter em sua composição pelo menos 50% de RSU, o que justifica a nomenclatura do combustível brasileiro de resíduos urbanos para fins energéticos (RSUE). No entanto, é possível incrementos maiores de outros resíduos não perigosos, desde que a sua utilização seja justificada ambiental, técnica e economicamente. Os resíduos Classe II, exceto RSU, destinados a preparação do RSUE são considerados elegíveis desde que estejam listados na norma ou se enquadrem nos seguintes critérios: sejam classe II; tenham PCI maior ou igual a 2750 kcal.kg⁻¹ na base seca (11,5 MJ.kg⁻¹); concentração de cloro menor ou igual a 3% e concentração de mercúrio menor ou igual a 1 mg.kg⁻¹.

Tanto na norma brasileira quanto na europeia, os materiais aceitos para a produção do combustível são aqueles que não são adequados para reciclagem. A norma europeia (EN ISO 21640/2021) não limita, em porcentagem, a fonte dos resíduos para produção do CSR, mas lista as seguintes fontes de material de entrada para produção de CSR, desde que sejam classificadas como não-perigosas (AFNOR, 2021a):

- Resíduos industriais;
- Resíduos de construção e demolição
- Resíduos de instalações de gerenciamento de resíduos
- Resíduos de instalações de reciclagem
- Resíduos sólidos urbanos e resíduos comerciais similares
- Resíduos sólidos não especificados na lista.

Existem resíduos que podem ser comuns a todos os tipos de processos produtivos e que, desde que haja uma separação adequada na fonte geradora, permitem que este material seja enviado para um fluxo que o reutilize da melhor maneira possível, considerando as características de cada resíduo gerado, mas que não estão especificadas nas subcategorias de listagem de ambas as normas.

No que tange a legislação, no Brasil somente o Estado de São Paulo possui regulamento específico para produção e uso do CDR: Resolução SIMA nº 047/2020. Verifica-se que a norma paulista adota a nomenclatura diferente da norma brasileira. De acordo com esse documento os RSI e os resíduos gerados em estações de tratamento de água e efluentes são considerados elegíveis para o preparo de CDR desde que sejam classe II (não perigosos); não apresentem líquidos livres, e apresentem PCI igual ou maior e teor de cloro igual ou menor que o limite máximo exigido no CDR, em função do tipo de fonte de aplicação do combustível (Tabela 4).

Tabela 4: Critérios para utilização do CDR no Estado de São Paulo

Tipologias de fontes	PCI _{bs} (MJ.kg ⁻¹)*	Cl _{bs} (%)
Caldeiras industriais a biomassa entre 50 e 100 t.h ⁻¹ de vapor	≥ 10	≤ 0,3
Caldeiras industriais a biomassa > 100 t.h ⁻¹ de vapor	≥ 10	≤ 0,6
Fornos de produção de clínquer	≥ 12	≤ 1,0
Pirólise	≥ 10	NA
Gaseificação	≥ 10	NA
Unidade de recuperação energética	NA	NA
Fornos industriais com uso de biomassa e sem contato com a matéria prima.	**	≤ 0,6

(NA) não aplicável

(*) PCI avaliado caso a caso, devendo ser superior ao PCI da biomassa utilizada como combustível convencional.

(**) PCI do CDR deverá ser igual ou superior ao combustível convencional normalmente utilizado, devendo comprovar que há redução de consumo do combustível convencional.

Fonte: ESTADO DE SÃO PAULO (2020).

A norma europeia e a norma brasileira utilizam um sistema de classificação deste combustível alternativo baseado em três características: a característica econômica (poder calorífico inferior), a característica técnica (teor de cloro) e a característica ambiental (teor de mercúrio) (ABNT, 2020; AFNOR, 2021a). A norma brasileira distribui os parâmetros em 3 classes (Tabela 5). A norma europeia possui 5 classes (Tabela 6) para a

CSR. A norma europeia considera uma gama mais ampla de valores para todos os parâmetros. Se o material não enquadrar na classificação das tabelas, não pode ser considerado RSUE/CSR.

As normas diferem-se não somente pelo número de classes, uma vez que se nota diferenças nas exigências requeridas para análise de 2 dos 3 parâmetros de classificação: a norma brasileira requer PCI na base seca e a norma europeia conforme recebido. Já para o cloro, a norma brasileira exige que seja realizado conforme recebido e a norma europeia na base seca. Estas exigências alteram resultados, já que se considerar que conforme recebido refere-se a análise realizada em base úmida, os valores de PCI tendem a diminuir e os teores de cloro tendem a aumentar. Além disso, norma europeia correlaciona o parâmetro de mercúrio com o potencial energético e os limites para o mercúrio devem ser apresentados em mg/MJ. Para a norma brasileira, os resultados devem ser apresentados em mg/kg.

As Tabelas 5 e 6 mostram que para o cloro, os valores da classificação europeia podem variar no intervalo de 0,2% a 3% enquanto na norma brasileira eles começam variam de 0,5% a 3%. A norma europeia é mais restritiva para os níveis mais altos de classificação; assim, a classe 1 da norma europeia exige um CSR de qualidade mais alta do que a norma brasileira.

Tabela 5: Limites para a classificação do resíduo sólido urbano energético (RSUE) – Brasil – NBR 16849/2020.

Unidade	Medida estatística	Classes		
Poder Calorífico Inferior PCI (base seca)		P1	P2	P3
MJ/kg	Limite inferior da média (P ≥ 95%)	PCI ≥ 20	20 > PCI ≥ 15	15 > PCI ≥ 10
Teor de cloro (como recebido)		C1	C2	C3
%	Limite superior da média (P ≥ 95%)	CI ≤ 0,5	0,5 < CI ≤ 1,5	1,5 < CI ≤ 3,0
Teor de mercúrio (como recebido)		H1	H2	H3
mg/kg	Média aritmética	Hg ≤ 0,1	0,1 < Hg ≤ 2,5	2,5 < Hg ≤ 0,5
	Percentil de 80	Hg _{p80} ≤ 0,2	0,2 < Hg _{p80} ≤ 0,5	0,5 < Hg _{p80} ≤ 1,0

Fonte: ABNT (2020).

Tabela 6: Classificação dos combustíveis sólidos recuperados (CSR) - Europa/França - NF EN ISO 21640/2021.

Característica de classificação	Medida estatística	Unidade	Classes				
			1	2	3	4	5
PCI (como recebido)	Média	MJ/kg	≥ 25	≥ 20	≥ 15	≥ 10	≥ 3
Cloro (base seca)	Média	% em massa	≤ 0,2	≤ 0,6	≤ 1	≤ 1,5	≤ 3
Mercúrio (como recebido)	Mediana	Mg/MJ	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 0,05	≤ 0,1	≤ 0,15
	Percentil de 80	Mg/MJ	≤ 0,04	≤ 0,06	≤ 0,1	≤ 0,2	≤ 0,3

Fonte: AFNOR (2021a).

A Tabela 7 apresenta resultados médios das análises laboratoriais do CDR de uma unidade brasileira produzido durante o período de uma semana. Os parâmetros determinados são aqueles exigidos pelo consumidor do material, no entanto, são insuficientes para determinação da classe deste produto já que não há valores de PCI e mercúrio, e, portanto, adota-se para este combustível, a denominação de CDR, já que os dados não permitem enquadrá-lo nas normas. Mas é possível averiguar que o teor de cloro, que é um parâmetro ambiental, encontra-se dentro dos limites estabelecidos entre as classes 1 e 2, tanto na norma europeia quanto na norma brasileira.

Tabela 7: Valores de poder calorífico superior, cloro, umidade e cinzas - CDR.

Parâmetro	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6
PCS _{bu} (MJ.kg ⁻¹)	17,1	17,87	17,02	16,45	17	24,65
Cloro _{bu} (%)	0,49	0,75	0,42	0,29	0,36	0,32
Cloro _{bs} (%)	0,37	0,58	0,31	0,19	0,26	0,26

Parâmetro	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6
Umidade (%)	23,88	22,64	25,34	32,67	27,93	17,23
Cinzas (%)	9,99	10,23	11,74	12,01	8,25	7,55

bu: base úmida; bs: base seca

O fato de possuir uma classificação dentro da norma não significa que o produto esteja adequado para uso como combustível. Na Itália, por exemplo, nem todas as 125 classes possíveis são adequadas para classificar o CSR como combustível, mas apenas combinações dos seguintes: 1, 2 ou 3 para PCI e Cloro, e 1 ou 2 para mercúrio (DI LONARDO et al., 2016). Essas características são escolhidas para dar uma imagem imediata e simplificada do combustível em questão e as classes também impõem limitações ao que pode ser chamado de CSR. O combustível fora dos limites das classes não deve ser definido como CSR. A classificação em si pode não ser suficiente para um usuário ou outros interessados. O nível de informação detalhada necessária depende de vários fatores diferentes. Tais fatores podem ser: o uso final do produto, as exigências legislativas, o caráter do material de entrada e a tecnologia utilizada tanto na produção quanto no uso final da CSR (AFNOR, 2021a).

O Quadro 1 mostra as especificações obrigatórias para os lotes de RSUE e CSR, conforme normas brasileira e europeia, respectivamente. No entanto, são especificações em termos de informações, mas não a valores limites exigidos para teor de umidade e teor de cinzas, por exemplo.

Quadro 1: Especificações obrigatórias para lotes de RSUE/CSR – BRASIL/EUROPA

BRASIL	EUROPA
Código de classe	Código de classe
Indicação do número de amostras	
Tipo de preparo do combustível	
Origem dos resíduos processados	Origem
Formato predominante das partículas	Formato das partículas
Tamanho das partículas	
	Diâmetro das partículas
Teor de cinzas	Teor de cinzas
Teor de umidade	Teor de umidade
	Poder calorífico inferior
	Propriedades químicas: cloro e metais pesados

Um outro ponto interessante que difere ambas as normas é a definição da quantidade de resíduo que apresenta um lote, o que é um requisito importante, uma vez que é usado para fins de coleta de amostras para classificação e caracterização do material. A norma brasileira determina que a unidade de produção de RSUE deve ter controle de fabricação garantindo informações adequadas que determinem o tamanho máximo dos lotes a serem produzidos, mas não há definição do tamanho máximo do lote como unidade de caracterização. No que se refere a unidade de produção de CDR estudada, após a produção, o material é armazenado no formato cônico e cada monte representa um lote de CDR (Figura 5). A norma europeia define um tamanho máximo de lote como 1500 toneladas, com um número mínimo de incrementos, para formar uma amostra composta e um número mínimo de medições a serem realizadas (AFNOR, 2021a).

No que se refere ao sistema de amostragem, a NBR 16849 define um número mínimo de 10 amostras por lote, mas não especifica o tipo de amostra. Se o número de amostras for inferior a 10, deve ser indicado que este é um período inicial de caracterização do material. Ela também define que o plano de amostragem deve fornecer a frequência mínima de amostragem e até que os resultados da caracterização do conteúdo PCI, cloro (Cl) e mercúrio (Hg) do lote RSU sejam obtidos, uma amostra representativa do material deve ser analisada a cada

500 toneladas ou uma por dia (o que for maior) (ABNT, 2020). No que se refere a normalização europeia, há uma norma, EN ISO 21645, que trata especificamente dos métodos de amostragem para CSR, trazendo em seu escopo tópicos referentes a definição de lote e delimitação do tamanho de um lote, além de determinação de: procedimentos de amostragem; número de incrementos; quantidade mínima de amostra e de incrementos para a adequada caracterização do material (AFNOR, 2021b).



Figura 5: Material produzido na unidade brasileira estudada: cada monte representa um lote de CDR.

Ademais, nota-se que a União Europeia possui todo um aparato normativo para classificação e caracterização do CSR (Figura 4) que trata de assuntos que vão desde vocabulário aos materiais e métodos para análise. No Brasil, para a área de resíduos no geral, ainda falta esse aparato em termos de normalização de métodos analíticos aplicados ao tema, o que resulta em uso de metodologias internacionais ou adaptação de métodos aplicados outras áreas como água, esgoto e solos, por exemplo.

Ainda na Europa, países como a Alemanha e Itália possuem normas específicas sobre as características do CSR. A norma alemã RAL-GZ 724 e a norma italiana UNI 9903, levam em consideração além de limites para os parâmetros da norma europeia, teor de umidade e cinzas, e, também, elementos traço, com diferentes valores que dependem do uso e dos resíduos utilizados para compor o combustível (MARTIGNON, 2020). A França instituiu legislação referente a produção e uso do CSR a qual determina que o PCI deve ser superior a 12 MJ/kg; mercúrio inferior a 3 mg/kg (base seca); cloro inferior a 15000 mg/kg (base seca); bromo inferior a 15000 mg/kg (base seca) e o total de halogênios (bromo, cloro, flúor e iodo) inferior a 20000 mg/kg (base seca). A legislação se aplica à combustão por oxidação ou outros processos de tratamento térmico, tais como pirólise, gaseificação ou tratamento de plasma usando CSR como combustível regular ou adicional e onde os produtos destes processos são usados diretamente como combustível (RÉPUBLIQUE FRANÇAISE, 2016).

CONCLUSÕES

As normas são referências técnicas tanto para classificar quanto para caracterizar o combustível produzido a partir dos resíduos e estabelecem padrões de trabalho para que todos os entes envolvidos possam atuar com segurança no setor.

Conclui-se que a norma brasileira é um marco inicial de uma ferramenta útil e balizadora para os produtores, consumidores, órgãos licenciadores, reguladores e a sociedade em geral, no entanto, alguns pontos ainda precisam de aprimoramento e para isso, a discussão e estudo do material produzido no país se faz necessário, para que o documento seja adequado e aplicável a realidade brasileira, alinhando os setores ambientais e técnicos quanto as exigências mínimas para a produção e uso do CDR/CSR/RSUE.

Por fim, comparando a União Europeia e o Brasil, em termos de normas, nota-se que este quesito tem grande influência nos caminhos a serem seguidos para a gestão dos resíduos. Portanto, o Brasil, que se encontra em fase inicial no uso de tecnologias WtE para RSU, precisa se equipar de uma estrutura que dê segurança a todas as partes envolvidas para desenvolvimento do setor.

Considerando que a normalização internacional versa sobre este tema a mais tempo e vem sendo aprimorada ao longo dos anos por meio de estudos técnicos e da experiência no setor, recomenda-se que um nivelamento as exigências internacionais, o que também inclui a nomenclatura adotada para este combustível alternativo, e ressalta a necessidade de instituição de legislações federais tanto para produção quanto para consumo do CDR/CSR.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 16849 - Resíduos sólidos urbanos para fins energéticos - requisitos. 1e. Rio de Janeiro: ABNT, 2020. <https://doi.org/10.02.2020>.
2. ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION - AFNOR. ISO 21645 - Combustibles solides de récupération - Spécifications et classes. AFNOR, 2021a.
3. ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION - AFNOR. ISO 21640 - Combustibles solides de récupération – Méthodes d'échantillonnage. AFNOR, 2021b.
4. BERNSTAD SARAIVA, A.; SOUZA, R. G.; VALLE, R. A. B. Comparative lifecycle assessment of alternatives for waste management in Rio de Janeiro – Investigating the influence of an attributional or consequential approach. *Waste Management*, vol. 68, p. 701–710, 1 Oct. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.002>.
5. BIANCO, I.; PANEPINTO, D.; ZANETTI, M. Environmental impacts of electricity from incineration and gasification: How the lca approach can affect the results. *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 92, 1 Jan. 2022. <https://doi.org/10.3390/su14010092>.
6. BRASIL. Lei nº 12305 de 02 de agosto de 2020. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. . Diário Oficial da União. República Federativa do Brasil. Brasil: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm, 2010. Available at: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Accessed on: 11 Apr. 2023.
7. BRASIL. Plano Nacional de Resíduos Sólidos - Planares. Brasília: MMA, 2022. Available at: https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/agendaambientalurbana/lixao-zero/plano_nacional_de_residuos_solidos-1.pdf. Accessed on: 17 Sep. 2022.
8. CONFEDERATION OF EUROPEAN WASTE ENERGY PLANTS - CEWEP. Waste-to-Energy Plants in Europe in 2019. 2022. Confederation of European Waste Energy Plants - CEWEP. Available at: <https://www.cewep.eu/waste-to-energy-plants-in-europe-in-2019/>. Accessed on: 17 Sep. 2022.
9. DI LONARDO, M. C.; FRANZESE, M.; COSTA, G.; GAVASCI, R.; LOMBARDI, F. The application of SRF vs. RDF classification and specifications to the material flows of two mechanical-biological treatment plants of Rome: Comparison and implications. *Waste Management*, vol. 47, p. 195–205, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.018>.
10. ESTADO DE SÃO PAULO. Resolução SIMA nº 47 de 06 de agosto de 2020: Estabelece diretrizes e condições para o licenciamento de unidades de preparo de Combustível Derivado de Resíduos Sólidos - CDR e da atividade de recuperação de energia proveniente do uso de CDR. 2020. Secretaria de Estado de Infraestrutura e Meio Ambiente - SIMA. Available at: [http://www.mpsp.mp.br/portal/page/portal/cao_urbanismo_e_meio_ambiente/legislacao/leg_estadual/leg_est_resolucoes/Resol-SIMA-047-2020_Licenciamento_Unidades_Preparo_Combustivel_Derivado_Residuos_Solidos_\(CDR\)_Revoga_Resol75-08.pdf](http://www.mpsp.mp.br/portal/page/portal/cao_urbanismo_e_meio_ambiente/legislacao/leg_estadual/leg_est_resolucoes/Resol-SIMA-047-2020_Licenciamento_Unidades_Preparo_Combustivel_Derivado_Residuos_Solidos_(CDR)_Revoga_Resol75-08.pdf). Accessed on: 17 Sep. 2022.
11. EUROSTAT. Municipal waste statistics. 2022. EUROSTAT. Available at: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics#Municipal_waste_treatment. Accessed on: 17 Sep. 2022.
12. FLAMME, S.; GEIPING, J. Quality standards and requirements for solid recovered fuels: A review. *Waste Management & Research*, vol. 30, no. 4, p. 335–353, 2012. <https://doi.org/10.1177/0734242X12440481>.

13. FRICKE, K.; SANTEN, H.; WALLMANN, R. Comparison of selected aerobic and anaerobic procedures for MSW treatment. *Waste Management*, vol. 25, no. 8, p. 799–810, Oct. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.12.018>.
14. LUZ, F. C.; ROCHA, M. H.; LORA, E. E. S.; VENTURINI, O. J.; ANDRADE, R. V.; LEME, M. M. V.; DEL OLMO, O. A. Techno-economic analysis of municipal solid waste gasification for electricity generation in Brazil. *Energy Conversion and Management*, vol. 103, p. 321–337, 6 Jul. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.074>.
15. MARTIGNON, G. P. Trends in the use of solid recovered fuels. IEA Bioenergy, 2020. .
16. MUKHERJEE, C.; DENNEY, J.; MBONIMPA, E. G.; SLAGLEY, J.; BHOWMIK, R. A review on municipal solid waste-to-energy trends in the USA. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 119, 1 Mar. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109512>.
17. QUICKER, P.; CONSONNI, S.; GROSSO, M. The Zero Waste utopia and the role of waste-to-energy. *Waste Management and Research*, vol. 38, no. 5, p. 481–484, 1 May 2020. <https://doi.org/10.1177/0734242X20918453>.
18. RADA, E. C.; ANDREOTTOLA, G. RDF/SRF: Which perspective for its future in the EU. *Waste Management*, vol. 32, no. 6, p. 1059–1060, Jun. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.02.017>.
19. RECORD. Combustibles solides de récupération: etat des lieux et perspectives. *RECORD*, vol. n°06-0225/1A, p. 1–186, 2008. .
20. RÉPUBLIQUE FRANÇAISE. Arrêté du 23 mai 2016 relatif à la préparation des combustibles solides de récupération en vue de leur utilisation dans des installations relevant de la rubrique 2971 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement. 2016. République Française. Available at: <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000032575887/>. Accessed on: 17 Sep. 2022.
21. SHARMA, K. D.; JAIN, S. Municipal solid waste generation, composition, and management: the global scenario. *Social Responsibility Journal*, vol. 16, no. 6, p. 917–948, 31 Jul. 2020. <https://doi.org/10.1108/SRJ-06-2019-0210>.
22. U. S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION - EIA. Biomass explained - waste-to-energy (municipal solid waste). 2021. U. S. Energy Information Administration - EIA. Available at: <https://www.eia.gov/energyexplained/biomass/waste-to-energy.php>. Accessed on: 17 Sep. 2022.
23. VELIS, C. A.; LONGHURST, P. J.; DREW, G. H.; SMITH, R.; POLLARD, S. J. T. Production and quality assurance of solid recovered fuels using mechanical-biological treatment (MBT) of waste: A comprehensive assessment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 40, no. 12, p. 979–1105, 2010. <https://doi.org/10.1080/10643380802586980>.