



POTENCIALIDADES DO USO ENERGÉTICO DE COMBUSTÍVEIS DERIVADOS DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (CDR_u) NA INDÚSTRIA BRASILEIRA

Eduarda Piaia (*), Armando Borges de Castilhos Júnior, Willian César Nadaleti, Carolina da Silva Silva, Paula Lemões Haertel

* Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Laboratório de Pesquisa em Resíduos Sólidos, eduardapiaia@gmail.com.

RESUMO

A gestão dos resíduos sólidos e a sua consequente disposição final em aterros sanitários traduzem-se em grandes desafios da atualidade, principalmente pela velocidade de consumo dos materiais, e seu respectivo descarte, e pela necessidade de extensas áreas para instalação de aterros. Diante disso, após o cumprimento das etapas de não geração, redução, reutilização e reciclagem, uma alternativa para os resíduos sólidos é a sua utilização como combustível derivado de resíduos (CDR). A utilização de CDR ao redor do mundo já é uma realidade e no Brasil está sendo incentivada, principalmente após o ano de 2019. Desta forma, o presente artigo visa analisar o Poder Calorífico Inferior (PCI) dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) para sua utilização como CDR e as respectivas emissões atmosféricas evitadas ao substituir os combustíveis convencionais por combustível alternativo, neste caso o CDR. Foram utilizadas as informações constantes no Balanço Energético Nacional para verificar o consumo dos combustíveis convencionais do setor cimenteiro, setor siderúrgico e setor de cerâmica. Para a determinação do PCI foi utilizada a fórmula de Dulong modificada e para a determinação das emissões atmosféricas evitadas foi utilizado o Escopo 1, aba Combustão Estacionária, da Ferramenta GHG Protocol. Como principais resultados tem-se que o PCI obtido através da fórmula de Dulong modificada para o CDR é superior ao PCI dos combustíveis convencionais, tornando-se alternativa vantajosa para substituição. Com relação às emissões de CO₂ equivalentes evitadas, o setor cimenteiro foi o que apresentou melhores resultados, com diminuição de até 64,21%. No setor da cerâmica, a substituição do combustível convencional por CDR apresentou resultados negativos para as emissões de CO₂ equivalente, uma vez que a lenha utilizada como principal combustível é considerado um biocombustível que, portanto, possui menor potencial de emissões de CO₂ equivalentes. Para o setor siderúrgico também houve redução das emissões de CO₂ comparando o uso de combustíveis convencionais e os diferentes cenários de substituição, porém há necessidade de verificar se o CDR não interferiria na qualidade do produto final.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduos Sólidos Urbanos, Indústria, Combustível Alternativo, CDR.

ABSTRACT

The waste management and its consequent final disposal in landfills are huge challenges nowadays. Mainly due to velocity of consumption of materials and the respective disposal, and the need for extensive areas to install landfills. In face of this, after completing the steps of non-generation, reduction, reuse and recycling, an alternative to the solid waste is the use as Solid Recovered Fuel (SRF). The use of SRF around the world is a reality and in Brazil is being encouraged mainly after 2019. Thus, this article aims to analyze the lower heating value (LHV) of Municipal Solid Waste (MSW) for its use as SRF and the respective atmospheric emissions avoided when replacing conventional fuels with alternative fuels, in this case the SRF. The information contained in the National Energy Balance was used to verify the consumption of conventional fuels in the cement sector, the steel sector and the ceramics sector. For the determination of the LHV, the modified Dulong formula was used and for the determination of the avoided atmospheric emissions, Scope 1, tab Stationary Combustion, of the GHG Protocol Tool, Brazilian version, was used. The main results are that the LHV obtained through the modified Dulong formula for the SRF is superior to the LHV of conventional fuels, making it an advantageous alternative for substitution. Regarding the equivalent CO₂ emissions avoided, the cement sector was the one with the best results, with a decrease of up to 64.21%. In the ceramics sector, the substitution of conventional fuel for SRF presented negative results for CO₂ equivalent emissions, since the firewood used as the main fuel is considered a biofuel that has less potential for equivalent CO₂ emissions. For the steel sector, there was also a reduction in CO₂ emissions comparing the use of conventional fuels and the different substitution scenarios, however there is a need to verify whether the SRF would not interfere with the quality of the final product.

KEY WORDS: Municipal Solid Waste, Industry, Alternative Fuel, SRF.

INTRODUÇÃO

A busca por combustíveis alternativos que causem menores impactos ambientais tem se tornado frequente ao redor do mundo. Uma das opções são os Combustíveis Derivados de Resíduos (CDR), os quais podem ser produzidos a partir de diferentes tipos de resíduos sólidos que outrora seriam encaminhados para aterros sanitários. Conforme definição dada



pela Resolução SIMA nº 047/2020, CDR é o combustível alternativo preparado a partir de resíduos sólidos, comercializável em substituição a combustíveis convencionais, para ser utilizado em fornos e caldeiras industriais ou em unidade de tratamento térmico de resíduos, de maneira a não causar perdas de eficiência de processos produtivos nem prejuízo à qualidade de produtos, sem causar impactos ambientais adicionais em comparação aos impactos gerados pelo uso exclusivo de combustíveis convencionais (SIMA, 2020).

Dentre as matérias primas que podem ser utilizadas na fabricação de CDR estão os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), os quais são resultado das atividades desenvolvidas pela população dos municípios e também pelos serviços de limpeza pública. Com a utilização do CDR produzido a partir de RSU, o chamado CDRu, diminui-se a área ocupada por aterros sanitários, tendo em vista que os resíduos serão transformados em combustível e não dispostos em extensas áreas de terra, as quais tem se tornado um grande desafio no Brasil, principalmente no que tange à disponibilidade de áreas próximas dos grandes centros urbanos. Além disso, os aterros sanitários necessitam de cuidados adicionais após o encerramento de sua vida útil, tornando a alternativa da recuperação energética através do CDRu muito vantajosa. Além disso, os resíduos encaminhados para aterros, na maioria das vezes possuem Poder Calorífico elevado, o que caracterizaria um desperdício de matéria-prima combustível.

Usualmente, o CDR pode ser utilizado como fonte de energia para diversos processos produtivos, dentre os quais pode-se citar: conversão térmica integrada, co-combustão em caldeiras a carvão, coprocessamento em fornos de cimento e co-gaseificação com carvão ou biomassa (REZA et al., 2013). Independente do processo produtivo em que o CDR será utilizado, alguns requisitos de qualidade devem ser observados, tais como: poder calorífico, baixo teor de cloro e tamanho de grão bem definido.

Um dos principais combustíveis convencionais amplamente empregado no setor energético é o coque de petróleo, sendo que 75% da produção mundial deste produto vem do próprio setor. As refinarias de petróleo utilizam 40% da produção mundial de coque, seguida pela indústria de cimento com 16%, pela geração de energia, com 14% do consumo, sendo que os 5% restantes são consumidos por outras indústrias com fins energéticos (SANTOS, 2007). Tendo em vista o alto valor associado à aquisição do coque, a utilização de CDR oportuniza uma diminuição de custos para qualquer processo produtivo em que for empregado.

Além disso, a substituição de combustíveis convencionais por CDR contribui para evitar emissões de gases do efeito estufa. Os tipos de poluentes emitidos e a taxa de emissão vão variar dependendo das características operacionais do sistema e da composição química das matérias-primas e combustíveis utilizados, como por exemplo, a indústria de cimento, que é caracterizada pelo seu elevado potencial poluidor e que apesar do processo de fabricação do cimento não produzir resíduos sólidos, já que as cinzas provenientes da queima dos combustíveis no forno rotativo são incorporadas no clínquer, ainda assim há uma alta emissão de poluentes gasosos e material particulado (BELATO, 2013).

Os gastos de energia térmica referente à produção de cimento Portland, por exemplo, estão diretamente ligados com o tipo de processo e tecnologia utilizada. O processo de via úmida possui um alto consumo de energia, mais de 6.000 MJ/t clínquer, porém, um consumo de energia que fique abaixo de 3.000 MJ/t clínquer, pode ser alcançado adotando o processo de via seca com o uso de pré-calcinador ligado a um forno rotativo de alta capacidade, com baixa umidade e boa capacidade de queima da farinha (CEMBUREAU, 2009). O **Quadro 1** demonstra os consumos de energia de cada tipo de processo:

Quadro 1- Consumo de energia do processo por tipo de forno rotativo de clínquer.

Fonte: US EPA (2010).

Forno Rotativo	Consumo de Energia MJ/Ton. de Cimento
Via Úmida	5802
Via Seca	4326
Com Pré-aquecedor	3693
Com Pré-aquecedor e Pré-calcinador	3270

Com o advento do novo Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES), que cita diversas vezes o termo CDR, e da Portaria Interministerial nº 274, de 30 de abril de 2019, que propõe a modificação da Política Nacional de Resíduos Sólidos e a inclusão do CDR como alternativa para o tratamento dos resíduos sólidos, nos termos do artigo 9º, parágrafo 1º, cabe a necessidade de pesquisar acerca da temática CDR e os processos produtivos onde poderão ser utilizados.



OBJETIVOS

Estimar o poder calorífico inferior (PCI) teórico e emissões atmosféricas evitadas de um blend de resíduos sólidos urbanos para utilização como combustível derivado de resíduos urbanos (CDRu) na indústria brasileira.

METODOLOGIA

Para a composição do *blend* de resíduos que se tornará combustível é apresentada a composição gravimétrica dos RSU. No Brasil, uma das fontes de dados referente à composição dos resíduos sólidos provenientes da coleta seletiva é a pesquisa Ciclossoft (CEMPRE, 2018), realizada a cada dois anos, com ampla participação dos municípios brasileiros. A **Figura 1** demonstra os resultados obtidos na pesquisa realizada no ano de 2018:

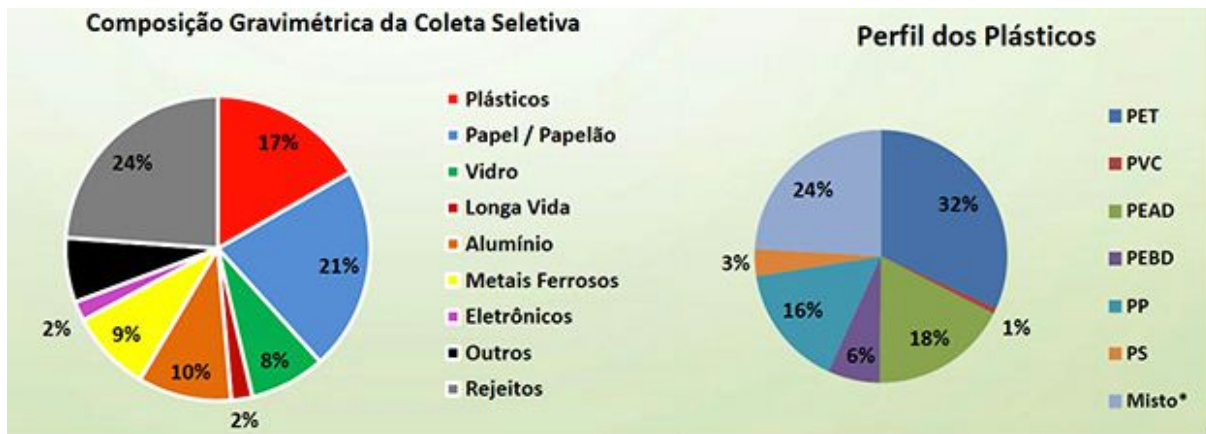


Figura 1 - Composição Gravimétrica dos resíduos destinados a coleta seletiva de acordo com a pesquisa Ciclossoft. Fonte: CEMPRE (2018).

A porcentagem de rejeitos nos resíduos da coleta seletiva corresponde a 24% do peso total, ou seja, a quantidade de resíduos que não são efetivamente reciclados e são encaminhados para aterros sanitários. Como os rejeitos da coleta seletiva são compostos, em sua maioria, por materiais que não possuem alternativa para reciclagem ou não possuem compradores, estes podem representar uma alternativa de combustível para diferentes processos produtivos, tendo em vista que os rejeitos compostos por plásticos, isopor e papeis, por exemplo, possuem elevado poder calorífico.

De acordo com o Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos do Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (SNIS), no ano de 2018 o Brasil coletou 42.747.732 toneladas de resíduos domésticos e de limpeza pública, dos quais 1.667.615,20 toneladas foram coletadas por serviços de coleta seletiva de resíduos domésticos.

Uma vez que 24% dos resíduos recicláveis coletados sejam considerados rejeitos, 400.227,65 toneladas sendo rejeitos e teriam como destinação final o aterro sanitário. Entretanto, se este montante for trabalhado adequadamente, pode se tornar CDRu e substituir parcialmente os combustíveis convencionais de processos produtivos que necessitam de energia térmica, tais como fabricação de cimento, caldeiras industriais e usinas de recuperação de energia.

Para a determinação do PCI associado ao *blend* de resíduos é necessário o conhecimento da análise elementar, cujo resultado são as frações dos elementos constituintes dos materiais presentes no CDRu. Os elementos de maior interesse são o carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N), oxigênio (O) e enxofre (S), uma vez que esses elementos serão utilizados diretamente na equação de determinação do PCI.

Na **Tabela 1** são apresentados os valores de base para a análise elementar em porcentagem e em base seca, e para a análise imediata em porcentagem e base úmida para as frações gravimétricas do rejeito da coleta seletiva:

Tabela 1 - Análise elementar e análise imediata de algumas das frações que compõem o CDRu. Fonte: Kami, 2019.

Fração Gravimétrica	Análise elementar (%)					Análise imediata (%)			
	C	H	O	N	S	Cz/inertes	W	MV	CF
Papel	43,4	5,8	44,3	0,3	0,2	6,0	10,0	75,6	8,4
Plástico	60,0	7,2	22,8	0,0	0,0	10,0	5,0	83,0	2,0



Metal	4,5	0,6	4,3	0,1	0,0	90,5	2,0	0,0	0,0
Vidro	0,5	0,1	0,4	0,1	0,0	98,9	1,1	0,0	0,0

Onde C = Carbono, H = Hidrogênio, O = Oxigênio, N = Nitrogênio, Cz = Cinzas, W = Umidade, MV = Material volátil, CF = Carbono fixo.

A partir da análise elementar e imediata dos materiais presentes nos resíduos é possível estimar o PCI desses através da fórmula de Dulong Modificada (Equação 1) (POLI et al., 2013). Optou-se por esta equação devido a mesma apresentar resultados muito próximos de resultados experimentais.

PCI_w [kcal/kg] = (1 - W)*[7831*C + 35932*(H - O/8) + 2212*S + 1187*O + 578*N - 32] - [(1 - W)*9*H + W]*583,2 (Equação 1)

Onde:

PCI_w: Poder Calorífico Inferior dos RSU na condição de umidade “W” (Kcal/Kg).

C: % em massa e em base seca de Carbono.

H: % em massa e em base seca de Hidrogênio.

O: % em massa e em base seca de Oxigênio.

S: % em massa e em base seca de Enxofre.

N: % em massa e em base seca de Nitrogênio.

As emissões atmosféricas evitadas serão calculadas através da ferramenta GHG Protocol, utilizada para entender, quantificar e gerenciar emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) que foi originalmente desenvolvida nos Estados Unidos, em 1998. A ferramenta foi adaptada para a realidade brasileira e possui três escopos: Escopo 1 referente as emissões diretas; Escopo 2 referente a aquisição de energia; Escopo 3 referente as emissões indiretas.

Nesse estudo será utilizado o Escopo 1, referente a combustão estacionária. De acordo com o Programa Brasileiro GHG Protocol (2018), as emissões de GEE estacionária são provenientes da queima de combustíveis, quando a energia gerada pela combustão é utilizada para produzir vapor d’água ou energia elétrica. São exemplos as caldeiras, fornos, queimadores, entre outros.

Serão calculadas as emissões de Dióxido de Carbono (CO₂) equivalente do combustível convencional (como, por exemplo, gás natural, coque de petróleo, coque de carvão mineral, óleo diesel, lenha, entre outros) utilizado no processo produtivo analisado e as emissões de CO₂ equivalente caso o combustível convencional fosse substituído pelo CDRu. Para os dados de consumo de cada combustível convencional será utilizado o Balanço Energético Nacional (BEN), publicado no ano de 2020 tendo como base o ano de 2019 e elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética e Ministério de Minas e Energia.

Serão estipulados três cenários de emissões: o primeiro com 60% de substituição do combustível convencional por CDRu, o segundo com 80% de substituição e o terceiro com 100% de substituição. Para esta substituição, será adotado o combustível que é mais empregado no processo produtivo, conforme informações retiradas do Balanço Energético Nacional. Para cálculo das emissões associadas ao CDRu no Escopo 1 da Ferramenta GHG, será considerado o combustível Resíduos Municipais (fração não-biomassa). As emissões atmosféricas evitadas serão o resultado da subtração entre as emissões de CO₂ equivalente obtidas para o combustível convencional e para os diferentes cenários de substituição do CDRu.

Para a análise constante neste artigo no que tange à substituição de combustíveis convencionais por combustível alternativo, neste caso o CDRu, serão utilizados os setores cimenteiro, siderúrgico e cerâmico, os quais foram escolhidos tendo em vista que necessitam de energia térmica em seus processos produtivos.

RESULTADOS

Dentre as análises a serem efetuadas para a transformação de RSU em CDRu está a análise de Poder Calorífico, pois apenas materiais com Poder Calorífico satisfatório podem ser utilizados. Na

Tabela 2 estão exibidos os valores de PCI obtidos pela equação de Dulong Modificada:



Tabela 2 - Resultado da determinação do PCI pela equação de Dulong Modificada

Fração Gravimétrica	Peso total (kg)	(%)	Contribuição ao PCIúmido Total (kJ/kg)	% do PCIúmido Total	PCIúmido Individual (kcal/kg)	PCIúmido Individual (kJ/kg)
Papel	192.109.271	29,00	3957,22	38,05	3261,37	13645,57
Plástico	168.095.612	25,00	6053,29	58,20	5787,09	24213,17
Metal	176.100.165	26,00	374,28	3,60	344,06	1439,53
Vidro	132.075.124	20,00	15,49	0,15	18,51	77,43
Total	668.380.172	100	10400,27	100		

Os plásticos representam a maior contribuição ao PCI do *blend* de resíduos, seguido dos papeis. Importante ressaltar que a composição gravimétrica e uma determinação precisa da análise elementar dos resíduos contribui significativamente para a determinação mais próxima do real do poder calorífico.

Analisando o PCI do combustível convencional mais empregado em cada processo produtivo analisado tem-se que o PCI do coque de petróleo utilizado no setor cimenteiro é 8.390 kcal/kg, o PCI do coque de carvão mineral utilizado na indústria siderúrgica é de 6.900 kcal/kg e o PCI da lenha comercial utilizada na indústria cerâmica é de 3.100 kcal/kg (EPE, 2020). Desta forma, pode-se observar que o PCI do CDRu apresentado na

Tabela 2 poderia suprir a quantidade de energia requerida por todos os processos produtivos.

De acordo com o BEN, a indústria cimenteira consumiu 3.163.218,39 m³ coque de petróleo, o que equivale a 70,6% das fontes de combustível para a indústria cimenteira, que também é composta por carvão mineral, óleo combustível, eletricidade, carvão vegetal e outras (EPE, 2020). Incluído na fonte outras pode-se citar o coprocessamento de resíduos, prática comum no Brasil a partir da edição da Resolução CONAMA nº 264/1999 que versa sobre o licenciamento de coprocessamento de resíduos em fornos rotativos de produção de clínquer. Através dos mais de 3 milhões de metros cúbicos de coque de petróleo consumidos em 2019 estima-se uma geração de 12.684.540,46 toneladas de CO₂ equivalente no setor cimenteiro.

Para o setor de ferro-gusa e aço a matriz de combustíveis utilizados é mais diversificada, sendo composta principalmente por coque de carvão mineral e carvão vegetal, representando 60,9% das fontes de combustível. Os demais combustíveis, em menores porcentagens são: gás natural, carvão mineral, óleo diesel, biodiesel, óleo combustível, gás liquefeito de petróleo, gás de coqueria, eletricidade e alcatrão (EPE, 2020). No ano de 2019 foram consumidas 9.868.115,94 toneladas de coque de carvão mineral e 4.489.164,09 toneladas de carvão vegetal (EPE, 2020), as quais, juntamente com os demais combustíveis, representam uma geração de 69.083.993,17 toneladas de CO₂ equivalente para o setor siderúrgico no ano. Além das emissões de GEE, de acordo com o Balanço Energético Nacional, em 2014 o setor industrial consumiu aproximadamente 85% do total de carvão vegetal produzido, sendo que 4,3 milhões de toneladas foram para a produção de ferro-gusa e aço, porém, quando o carvão vegetal é de origem ilegal, há a emissão de aproximadamente 5 toneladas de gás carbônico ocasionada pela retirada indevida das árvores (ABRAF, 2009); conseqüentemente há a ausência de novos plantios e de todo o ciclo da fotossíntese diferente no caso do carvão vegetal de florestas plantadas onde o processo de supressão e plantio florestal é contínuo.

Outro ponto importante, é que utilizar o carvão vegetal no Brasil pode ser considerado uma anomalia, quando extraído a partir de desmatamento, porém, já existem vários projetos de incentivos governamentais para a sua produção e utilização a partir de flores de reflorestamento, o florestas

Já o carvão vegetal como combustível para produção de ferro gusa no Brasil é uma anomalia”, certamente considerando o desmatamento desenfreado promovido pelas grandes empresas, todavia a partir da criação do “Novo Código Florestal”, as empresas siderúrgicas, metalúrgicas, dentre outras que consomem grandes quantidades de carvão vegetal são obrigadas a apresentarem um Plano de Suprimento Sustentável (PSS), como garantia de utilização exclusiva de florestas plantadas, ou um Plano de Manejo Florestal Sustentável (PMFS) que posteriormente será integrante do processo de licenciamento ambiental do empreendimento.

Outro setor que necessita de combustíveis em seu processo produtivo é o setor de cerâmica, apresentando como principal combustíveis a lenha e o gás natural, representando 79,4% dos combustíveis empregados (EPE, 2020). Também são utilizados carvão vapor, óleo diesel, biodiesel, óleo combustível, gás liquefeito de petróleo e outros derivados de petróleo



não especificados (EPE, 2020). Em 2019, foram geradas cerca de 2.917.407,18 toneladas de CO₂ equivalente referente ao consumo de 6.712.903 toneladas de lenha e 1.419.318 m³ de gás natural e dos demais combustíveis utilizados na indústria da cerâmica.

Conforme pode ser observado nos parágrafos anteriores, o consumo energético nacional para as indústrias cimenteiras, siderúrgica e cerâmica traduz-se em um grande consumo de combustíveis fósseis ou que necessitam de extensas áreas para produção e podem acarretar em desmatamentos ilegais, como é o caso da lenha e do carvão vegetal. Este consumo acarreta em uma elevada emissão de gases do efeito estufa, cuja redução faz-se necessária diante dos cenários futuros de aumento da temperatura do planeta. Diante disto, a **Tabela 3** apresenta os três processos produtivos analisados e as respectivas emissões evitadas para cada cenário proposto:

Tabela 3 - Emissões de CO₂ equivalente para cada cenário de substituição de combustíveis

Processo Produtivo	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Cimenteira	7.797.622,1	6.168.649,2	4.539.676,0
Siderúrgica	56.595.364,0	52.432.487,0	48.269.611,0
Cerâmica	6.327.728,53	7.464.502,20	8.601.275,88

Conforme pode ser verificado na **Tabela 3**, a indústria siderúrgica apresenta as maiores emissões de CO₂ equivalente, o que está associado principalmente ao tipo de combustível convencional mais utilizado, neste caso o coque de carvão mineral. O coque de carvão mineral é produzido a partir de misturas de carvões minerais de diferentes locais através de destilação do carvão, que garante elevada resistência mecânica e altos teores de carbono (SOUSA, 2015). Devido ao seu processo produtivo, o coque de carvão mineral gera produtos como amônia, sulfetos, monóxido de carbono, dióxido de carbono e cianetos de hidrogênios, os quais são extremamente nocivos ao meio ambiente e contribuem para o efeito estufa (SOUSA, 2015).

Após o setor siderúrgico está o setor cimenteiro, cujas emissões estão associadas principalmente à utilização de coque de petróleo, um combustível fóssil com elevado poder calorífico composto basicamente de carbono, hidrogênio, enxofre, nitrogênio, cloretos e oxigênio. Uma das alternativas do setor para a redução das emissões de GEE é o uso de combustíveis alternativos, como o CDRu por exemplo, em substituição aos combustíveis fósseis não renováveis (VISED; PECCHIO, 2019).

Utilizando-se os resultados identificados acima é possível calcular as emissões de CO₂ equivalente evitadas para cada cenário de substituição de combustíveis convencionais por CDRu e processo produtivo (**Tabela 4**):

Tabela 4 - Emissões de CO₂ equivalente evitadas com a substituição dos combustíveis

Processo Produtivo	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Cimenteira	4.886.918,33	6.515.891,29	8.144.863,98
Siderúrgica	12.488.629,49	16.651.505,98	20.814.382,18
Cerâmica	-3.410.321	-4.547.095	-5.683.869

Comparando os dados da **Tabela 3** e da **Tabela 4** observa-se que para o Cenário 1 de emissões, correspondente a 60% de substituição do combustível convencional, no setor Cimenteiro houve uma redução nas emissões de CO₂ equivalente igual a 38,53%, enquanto para o Cenário 2 a redução foi de 51,37% e para o Cenário 3 de 64,21%, o que indica a grande vantagem em substituir combustíveis tradicionais por CDRu em termos de emissões atmosféricas. Este resultado vai de encontro aos esforços que a indústria cimenteira vem empregando desde 2014 para redução da emissões de GEE, sendo que a substituição do coque de petróleo por combustíveis alternativos possui potencial de mitigar até 13% das emissões cumulativas até 2050 (VISED; PECCHIO, 2019). O CDRu representa um grande potencial em virtude das pressões ambientais para a diminuição ou extinção de aterros em um futuro próximo, porém fatores como necessidade de um eficiente sistema de coleta seletiva e triagem dos materiais recicláveis, distância das fábricas em referência aos grandes centros geradores de resíduos, além de fatores técnicos como a presença de elevados teores de cloro, podem tornar-se empecilhos para utilização do CDRu na indústria cimenteira (VISED; PECCHIO, 2019).

Com relação a indústria siderúrgica, a redução das emissões de CO₂ equivalente para o Cenário 1 foi de 18,08%, para o Cenário 2 foi de 24,10% e para o Cenário 3 foi de 30,13%, caracterizando a indústria siderúrgica também vantajosa para a substituição dos combustíveis convencionais por CDRu.

Com relação à indústria cerâmica observa-se que houve aumento das emissões de CO₂ equivalente de 53,89% para o Cenário 1, 60,92% para o Cenário 2 e 66,08% para o Cenário 3 o que pode ser explicado devido ao principal combustível utilizado no processo produtivo da indústria cerâmica, a lenha, ser considerado como biocombustível na Ferramenta GHG



Protocol, enquanto o CDRu é considerado um combustível fóssil, o que influencia nos fatores de emissão associados a cada combustível. Apesar da lenha ser considerada um biocombustível é preciso garantir que a mesma seja proveniente de locais de reflorestamento autorizados e que apresentem Documento de Origem Florestal.

Em estudo conduzido por Reza et al. (2013) observou-se que preparando CDRu a partir de 100.000 toneladas anuais de RSU haveria uma diminuição de 3,5 hectares de terra destinados a aterros sanitários. Além disso, a diminuição de áreas requeridas para aterros sanitários contribui para a redução significativa da poluição do ar local, bem como os riscos de poluição do solo e da água, além da geração de lixiviados a serem tratados (REZA et al., 2013).

A opção pela produção de CDRu como alternativa aos aterros sanitários e a consequente redução de áreas destinadas a este fim contribui para a diminuição de emissões de CO₂ equivalente, principalmente devido ao metano, associado aos componentes biodegradáveis presentes nos RSU tais como resíduos orgânicos, que é 21 vezes mais poluente do que o CO₂ (REZA et al. 2013).

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

- A fração dos plásticos presente nos RSU representa o maior Poder Calorífico Inferior, com cerca 24.213,17 kJ/kg, seguido dos papeis com 13.645,57 kJ/kg;
- O Poder Calorífico Inferior total do *blend* de resíduos é de 10.400,27 kJ/kg;
- O setor cimenteiro emitiu 12.684.540,46 toneladas de CO₂ equivalente no ano de 2019, enquanto a emissão do setor siderúrgico foi de 69.083.993,17 toneladas de CO₂ equivalente e no setor de cerâmica foi de 2.917.407,18 toneladas de CO₂ equivalente;
- Para os três cenários de substituição dos principais combustíveis convencionais por CDRu, o setor que mais apresentou reduções das emissões de toneladas de CO₂ equivalente foi o cimenteiro, com a possibilidade de redução de até 64,21%;
- Pesquisas mais aprofundadas acerca do setor de ferro-gusa e aço para verificar se a utilização de CDR não impactaria na qualidade do metal produzido. Da mesma forma, são necessárias pesquisas extensas no setor de cerâmica sobre a utilização de CDRu, uma vez que foi o processo produtivo que apresentou desvantagens com relação à substituição do combustível convencional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BELATO, Mariana Natale. **Análise da geração de poluentes na produção de cimento Portland com o coprocessamento de resíduos industriais**. 2013.
2. BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2018**. Brasília: SNS/MDR, 2019. 247 p. Disponível em: http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/rs/2018/Diagnostico_RS2018.pdf. Acesso em: 26 ago. 2020.
3. CEMBUREAU – **European Cement Association**. “Sustainable Cement Production – Coprocessing of alternative fuels and raw materials in the European cement industry”. [S.l.]: CEMBUREAU, 2009. Disponível em: < <http://www.cembureau.be/sustainable-cementproduction-coprocessing-alternative-fuels-and-raw-materials-cement-industry>>. Acesso em: setembro de 2020.
4. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE (Brasil). **Balço Energético Nacional 2020: Ano base 2019 / Empresa de Pesquisa Energética**. – Rio de Janeiro : EPE, 2020. 264 p.
5. COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA A RECICLAGEM. **Pesquisa anual sobre coleta seletiva - Ciclossoft**. São Paulo: Cempre, 2018. 8 p. Disponível em: <http://cempre.org.br/ciclossoft/id/9>. Acesso em: 25 ago. 2020.
6. GENON, Giuseppe; BRIZIO, Enrico. Perspectives and limits for cement kilns as a destination for RDF. **Waste Management**, [S.L.], v. 28, n. 11, p. 2375-2385, nov. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2007.10.022>.



7. VISEDO, Gonzalo; PECCHIO, Marcelo. (org.). **Roadmap Tecnológico do Cimento**: potencial de redução das emissões de carbono da indústria de cimento brasileira até 2050. Rio de Janeiro: Snic, 2019. 64 p. Disponível em: https://coprocessamento.org.br/wp-content/uploads/2019/11/Roadmap_Tecnologico_Cimento_Brasil_Book-1.pdf. Acesso em: 15 out. 2020.
8. KAMI, Eduardo Choozo Arenas. **ANÁLISE TERMOECONÔMICA DE SISTEMA HÍBRIDO SOLAR TÉRMICO INTEGRADO À UNIDADE DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**. 2019. 240 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/199000/PEMC1954-D.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Acesso em: 26 ago. 2020.
9. **US EPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY**. “Alternative Control Techniques Document Update – NOX Emissions from New Cement 169 Kilns”. US EPA, 2007. 116 p. Acesso em: setembro de 2020.
10. POLI, Dora de Castro Rubio et al. Uma avaliação das metodologias para determinação do poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos. **Waste Management**. v. 8, n. 8, p. 09-31, 2013. Revista de Ciências Exatas e Tecnologia.
11. PROGRAMA BRASILEIRO GHG PROTOCOL. **NOTA TÉCNICA Definição das categorias emissões de gases de efeito estufa (GEE) de Escopo 1 – versão 4.0**. São Paulo: Ghg Protocol, 2018. 4 p. Disponível em: http://mediadrawer.gvces.com.br/ghg/original/ghg-protocol_nota-tecnica_categorias_escopo-1_v4.pdf. Acesso em: 09 set. 2020.
12. SECRETARIA DE ESTADO DE INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE (SIMA). **Resolução nº 47**, de 29 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. São Paulo, SP, Disponível em: <https://smastr16.blob.core.windows.net/legislacao/sites/40/2020/08/resolucao-sima-047-2020-republicacao-processo-cetesb-1321-2019-diretrizes-e-condicoes-para-o-licenciamento-de-unidades-de-preparo-de-cdr-republicacao.pdf>. Acesso em: 06 out. 2020.
13. REZA, Bahareh et al. Environmental and economic aspects of production and utilization of RDF as alternative fuel in cement plants: A case study of Metro Vancouver Waste Management. **Resources, Conservation And Recycling**, [s.l.], v. 81, p.105-114, dez. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.10.009>.
14. SANTOS, A. R. “A Geração de Coque de Petróleo Devido ao Processo de Petróleos Pesados e Seu Uso na Produção de Clínquer de Cimento Portland”. 2007. Tese (Doutorado) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.
15. CEMBUREAU – European Cement Association. “Sustainable Cement Production – Coprocessing of alternative fuels and raw materials in the European cement industry”. [S.l.]: CEMBUREAU, 2009. Disponível em: <<http://www.cembureau.be/sustainable-cementproduction-coprocessing-alternative-fuels-and-raw-materials-cement-industry>>. Acesso em: setembro de 2020.