

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Natalia Citti de Castro Divino

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE REJEITOS DAS ASSOCIAÇÕES DE
CATADORES COMO COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUO - CDR**

Florianópolis

2020

Natalia Citti de Castro Divino

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE REJEITOS DAS ASSOCIAÇÕES DE
CATADORES COMO COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUO - CDR**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em
Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro
Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina
como requisito para a obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Sanitária e Ambiental
Orientador: Eng. Eduarda Piaia

Florianópolis

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Citti de Castro Divino, Natalia
AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE REJEITOS DAS ASSOCIAÇÕES DE
CATADORES COMO COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUO - CDR /
Natalia Citti de Castro Divino ; orientador, Eduarda
Piaia, 2020.
76 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental,
Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

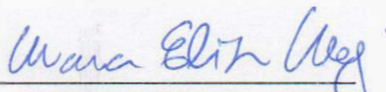
1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Resíduos Sólidos
Urbanos, Recuperação Energética. I. Piaia, Eduarda . II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Sanitária e Ambiental. III. Título.

Natalia Citti de Castro Divino

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE REJEITOS DAS ASSOCIAÇÕES DE
CATADORES COMO COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUO - CDR**

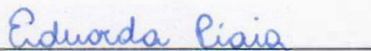
Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental

Florianópolis, 02 de março de 2020.



Prof^a. Maria Eliza Magri, Dra.
Coordenador do Curso


Banca Examinadora:



Eng^a. Eduarda Piaia
Orientadora



Luiza Knierim Correia
Avaliadora



Bruno Vieira Luiz
Avaliador

Este trabalho é dedicado aos meus colegas de classe e aos meus queridos pais.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo avaliar o potencial da fração de rejeitos proveniente da coleta seletiva do Município de Florianópolis como uma fonte alternativa de combustível e avaliar as emissões provenientes da combustão deste. Para tanto, foi determinada a composição gravimétrica dos rejeitos tendo por base o Plano Municipal de Coleta Seletiva de Florianópolis. Com o levantamento da composição gravimétrica obteve-se a quantidade de rejeitos gerada no ano de 2014, bem como a participação de cada material para com a composição do rejeito. Para avaliar o potencial energético dos rejeitos a serem empregados como Combustível Derivado de Resíduo – CDR, foi calculado o poder calorífico deste. O cálculo do poder calorífico foi estimado via análise da composição elementar das frações do rejeito e com o auxílio dos modelos de Dulong Modificado, Lloyd e Davenport e Boye. Os resultados obtidos por estes modelos mostraram que o CDR pode suprir entre 30 a 40% da demanda por energia da Universidade Federal de Santa Catarina. As emissões foram estimadas por meio da aplicação da metodologia da AP-42 da Agência de Proteção Ambiental Americana e foram comparadas com o exposto na Resolução CONAMA 316 de 2002. Com exceção do monóxido de carbono, os poluentes avaliados apresentaram em concentrações abaixo do limite máximo permitido na legislação vigente, portanto, estando em conformidade.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos. Rejeito. Combustível Derivado de Resíduo - CDR. Emissões.

ABSTRACT

The aim of this paper is to evaluate the potential of a specific fraction of waste from the selective collection of the Municipality of Florianópolis as an alternative fuel source and to evaluate the emissions from its combustion. For this purpose, the gravimetric composition of the waste was determined based on the Municipal Plan of Selective Collection of Florianópolis. With the gravimetric composition survey, the amount of waste generated in 2014 determined, as well as the participation of each material in relation to the waste composition. To assess the energy potential of the waste to serve as Refuse-Derived Fuel - RDF, its calorific value was estimated. The calorific value was estimated by analyzing the elemental composition of the waste fractions and with the aid of the Modified Dulong, Lloyd and Davenport and Boye models. The results obtained by these models showed that the RDF could supply between 30 and 40% of the energy demand at the Federal University of Santa Catarina (UFSC). Emissions were estimated by applying the methodology of AP-42 from the United States Environmental Protection Agency and were compared with the limits established in CONAMA 316/2002. Except from carbon monoxide, the pollutants evaluated presented concentrations below the maximum limit allowed in the current legislation, therefore, being in conformity.

Keywords: Solid Waste. Refuse-Derived Fuel - RDF. Emissions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Índice de cobertura da coleta seletiva de recicláveis nos municípios de SC.	21
Figura 2 - Índice de cobertura da coleta seletiva de recicláveis nas regiões integradas de RS.	22
Figura 3 - Tipos de coleta de recicláveis executados nas áreas urbanas de SC.	24
Figura 4 - Tipos de coleta de recicláveis executados nas áreas rurais de SC.....	25
Figura 5 – Hierarquia do gerenciamento dos resíduos sólidos.....	28
Figura 6 – Processos de produção de CDR.	34
Figura 7 – Fluxograma do processo de amostragem.	45

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Composição do CDR por contribuição de cada fração.	48
Gráfico 2 – PCI Individual.	58
Gráfico 3 – Contribuição em (%) ao PCI total.	59
Gráfico 4 – PCI Individual.	60
Gráfico 5 – Variação do PCI individual.	61
Gráfico 6 – Contribuição em (%) ao PCI total.	62
Gráfico 7 – PCI Individual.	63
Gráfico 8 – Variação do PCI individual.	64
Gráfico 9 – Contribuição em (%) ao PCI total.	65
Gráfico 10 – Comparativos das emissões.	68

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Legislações e outros dispositivos legais.	39
Quadro 2 - Estimativa populacional e de geração de resíduos da coleta seletiva.	43
Quadro 3 – Composição gravimétrica dos resíduos da coleta seletiva de Florianópolis referente ao ano de 2014.....	46
Quadro 4 - Composição gravimétrica dos rejeitos provenientes da coleta seletiva de Florianópolis referente ao ano de 2014.	47
Quadro 5 – Análise elementar e análise imediata de algumas das frações que compõe o CDR.....	49
Quadro 6 – Fatores de emissão.....	55
Quadro 7 – Limite de emissões atmosféricas para o tratamento térmico em (mg/Nm ³) de resíduos de acordo com a Resolução CONAMA 316 de 2002.	56
Quadro 8 – Emissões atmosféricas para o tratamento térmico de resíduos em (g/ton) considerando-se a Resolução CONAMA 316 de 2002.	56
Quadro 9 – Resultado da determinação do PCI pela equação de Dulong Modificada.	57
Quadro 10 – Resultado da determinação do PCI pela equação de Lloyd e Davenport.	60
Quadro 11 – Resultado da determinação do PCI pela equação de Boye.	63
Quadro 12 – Resultados das estimativas das emissões.	66
Quadro 13 – Comparativo entre as emissões estimadas e o exposto na Resolução CONAMA 316 de 2002.....	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abreviaturas

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRELPE Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública de Resíduos Especiais

ACMR Associação de Coletores de Materiais Recicláveis de Florianópolis/SC

ASTM *American Society for Testing and Materials*

CDR Combustível Derivado de Resíduo

Comcap Autarquia de Melhoramentos da Capital

CTR Centro de Transferência de Resíduos Sólidos

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

MB *Mass Burn*

MMA Ministério do Meio Ambiente

NBR Norma Brasileira Regulamentadora

PCI Poder Calorífico Inferior

PCS Poder Calorífico Superior

PERS-SC Plano Estadual de resíduos Sólidos de Santa Catarina

PEV Ponto de Entrega Voluntária

PMCS Plano Municipal de Coleta Seletiva

PMF Prefeitura Municipal de Florianópolis

PNRS Política Nacional de Resíduos Sólidos

RDF *Refuse Derived Fuel*

RS Resíduos Sólidos

RSU Resíduos Sólidos Urbanos

SMHS Secretaria Municipal de Habitação e Saneamento

UFSC Universidade Federal de Santa Catarina

US EPA *United States Environmental Protection Agency*

WTE *Waste to Energy*

Químicos

As Arsênico

CB Clorobenzeno

Cd Cádmio

CN Cianetos

Co Cobalto

CO Monóxido de Carbono

CO₂ Dióxido de Carbono

CPs Clorofenols

Cr Cromo

Cu Cobre

F Fluoretos

H Hidrogênio

H₂O Água

HBr Brometo de Hidrogênio

HCl Ácido Clorídrico

HF Fluoreto

Hg Mercúrio

Mn Manganês

MP Material Particulado

N Nitrogênio

N₂O Óxido Nitroso

Ni Níquel

NO Óxido Nítrico

NO₂ Dióxido de Nitrogênio

NO_x Óxidos de Nitrogênio

O Oxigênio

O₂ Gás Oxigênio

PAHs Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos

Pb Chumbo

PCBs Bifenilos Policlorados

PCDD Dibenzo-p-dioxinas Policloradas

PCDF Dibenzofuranos Policlorados

Pd Paládio

Pt Platina

Rh Ródio

Sb Antimônio

Se Selênio

Sn Estanho

SO₂ Ácido Sulfídrico

SO₃ Trióxido de Enxofre

Te Telúrio

Tl Tálho

V Vanádio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	17
2.1	OBJETIVO GERAL.....	17
2.1.1	Objetivos Específicos.....	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1	RESÍDUOS SÓLIDOS.....	18
3.2	COLETA SELETIVA NO ÂMBITO ESTADUAL.....	20
3.3	TRATAMENTO E DESTINAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ..	26
3.4	RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	27
3.5	COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUOS – CDR.....	30
3.5.1	Categorias de CDR e tipo de processamento	31
3.6	EMISSÕES ATMOSFÉRICAS	35
3.6.1	Óxidos de nitrogênio (NO_x).....	36
3.6.2	Monóxido de carbono (CO)	36
3.6.3	Gases ácidos.....	37
3.6.4	Material particulado (MP).....	37
3.6.5	Metais.....	37
3.6.6	Compostos orgânicos.....	38
3.7	CONTEXTO LEGAL.....	38
4	METODOLOGIA.....	42
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	42
4.2	COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA DOS RSU PROVENIENTES DA COLETA SELETIVA.....	44
4.3	DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO INFERIOR – PCI.....	48
4.4	ESTIMATIVA DAS EMISSÕES.....	53
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	57
5.1	DETERMINAÇÃO DO PCI	57

5.2	ESTIMATIVA DAS EMISSÕES.....	65
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	69
	REFERÊNCIAS.....	71

1 INTRODUÇÃO

A geração de resíduos sempre foi algo inerente aos seres humanos, e ocorre desde que viviam como nômades, porém, desde que passaram a viver em sociedade, isso por volta de 10 mil anos a.C., é notável o aumento na geração dos resíduos. Com o passar dos séculos e o desenvolvimento das cidades, algumas destas foram adotando políticas sanitárias, no entanto, a vasta maioria apenas passou a considerar os resíduos sólidos e as questões sanitárias de um modo geral, quando estes se tornaram um problema. Isto ocorreu até a Revolução Industrial (WILSON, 2007; WORRELL e VESILIND, 2011 apud DEUS, BATTISTELLE, SILVA, 2015).

O agravamento relacionado as questões ambientais e aos resíduos sólidos passaram a ganhar destaque apenas após a Revolução Industrial. Isso devido ao crescimento desenfreado da economia e da população, o que associado a falta de planejamento culminou no agravamento das questões acerca dos resíduos sólidos (MAMEDE, 2013).

De acordo com Pereira e Curi (2011), o aumento da população e, por conseguinte, o aumento pela demanda de alimentos e bens de consumo, implicam cada vez mais no processamento de matéria-prima, logo, gerando maiores quantidades de resíduos. Os autores ainda pontuam, a dificuldade de se apontar uma atividade humana que não seja geradora de resíduos, ou que não cause interferências no meio.

Com uma população de 500.973 hab no ano de 2019, o Município de Florianópolis gerou um total de 212.303 toneladas de resíduos sólidos urbanos, proveniente tanto da coleta convencional como da coleta seletiva. Desse total, 11.301 toneladas foram proveniente da coleta seletiva na modalidade porta a porta e 6.271,5 toneladas provenientes de pontos de entrega voluntária, eco pontos dentre outros. Como resultado do programa de reciclagem e do serviço de prestado pelas associações de catadores, 7,15% do total de 212.303 toneladas de resíduos sólidos foram desviados do aterro sanitário (PMF, 2019).

O princípio dos 3R's (reduzir, reutilizar e reciclar), e a hierarquia do gerenciamento do resíduos sólidos a qual visa a não geração e redução na geração dos resíduos; a reutilização; reciclagem; recuperação; e, tratamento e disposição final dos resíduos sólidos. Mesmo seguindo o princípio dos 3R's integralmente, ainda restará uma fração de material a qual não é passível de reutilização nem reciclagem, a esta fração denomina-se rejeito. Isto pode ocorrer devido ao fato de o material ser constituído de mais de um tipo de material, por exemplo, algum material plástico que possua dois ou mais plásticos em sua composição, por

falta de tecnologia e/ou mercado disponíveis para a reciclagem, dentre outros fatores. Essa fração de rejeito é normalmente encaminhada para aterro sanitário para que seja realizada a sua disposição final.

No entanto, dada a necessidade por alternativas ao aterro sanitário e a demanda por fontes alternativas de energia renovável, este trabalho visa apresentar e propor o uso dessa fração de rejeitos para recuperação energética através da tecnologia do CDR (combustível derivado de resíduo). Para tanto, será verificado se os rejeitos, pós-seleção de recicláveis, possuem potencial para serem utilizados como fonte energética alternativa.

2 OBJETIVOS

Nas seções abaixo estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos deste TCC.

2.1 OBJETIVO GERAL

Determinar o poder calorífico teórico da fração rejeitos oriunda da coleta seletiva do município de Florianópolis para utilização como combustível derivado de resíduos e avaliar as emissões atmosféricas provenientes da queima do CDR.

2.1.1 Objetivos Específicos

- Quantificar os rejeitos da coleta seletiva no município de Florianópolis por meio de pesquisa bibliográfica;
- Caracterizar fisicamente (composição gravimétrica) os rejeitos da coleta seletiva de Florianópolis por meio de pesquisa bibliográfica;
- Aplicar metodologia de balanço de massa para cálculo do poder calorífico teórico dos rejeitos;
- Aplicar metodologia da AP 42 da US EPA para determinação das emissões provenientes da queima do CDR.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica tem por finalidade apresentar a fundamentação teórica necessária para o embasamento do estudo desenvolvido à cerca da temática. A fins de elucidar os conceitos acerca da temática e fornecer embasamento teórico, serão abordados na revisão bibliográfica os conceitos e definição dos resíduos sólidos; bem como será apresentado um panorama geral quanto ao gerenciamento dos resíduos sólidos no estado de Santa Catarina, com enfoque na coleta seletiva; alternativas ao tratamento e disposição final dos resíduos sólidos, apresentando os resíduos como uma fonte de recuperação energética, e o CDR como uma alternativa ao tratamento e disposição final dos resíduos em aterro sanitário.

3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS

Oriundos das mais diversas atividades, os resíduos sólidos possuem vasta diversidade e compreendem restos de comida, eletrônicos, materiais plásticos, papelão, galhos de árvores, baterias, palha de milho, resíduos de construção civil, remédios, sucatas, produtos químicos perigosos, aparas de couro, de cana, lâmpada, peças anatômicas, lodos provenientes de estações de tratamento de água e de esgoto, material radioativo, dentre outros (SOUTO; POVINELLI, 2013, p. 565). Ainda, segundo Souto e Povinelli (2013, p. 565) não obstante a vasta diversidade dos resíduos há de considerar-se uma constante mudança em suas características, na composição de suas frações, e até mesmo variação na quantidade de resíduo gerada haja vista que estas acompanham o comportamento da sociedade, bem como tendências tecnológicas e aspectos culturais a exemplo dos telefones celulares e computadores, que culminaram no descarte de grandes quantidades destes aparelhos.

Os resíduos sólidos segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) através da Norma Brasileira Regulamentadora, NBR 10004, de 2004 são definidos como sendo os resíduos provenientes de atividade agrícola, industrial, hospitalar, doméstica, comercial, de serviços de varrição, os lodos oriundos dos sistemas de tratamento de água e efluentes, além de determinados resíduos que são gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, assim como líquidos os quais seu lançamento na rede de esgoto ou nos corpos hídricos se torne inviável em decorrência de peculiaridades (ABNT, 2004).

É importante frisar que são considerados resíduos sólidos não apenas os resíduos que se apresentam em seu estado físico sólido, podendo, portanto, um resíduo sólido apresentar-se

em estado físico semissólido, líquido, ou ainda em estado gasoso de forma contida (EPA, 2016). Os resíduos em estado gasoso de forma contida são incluídos na definição de resíduos sólidos estabelecida pela Lei nº 12.305 de 2010 a qual institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e define em seu inciso XVI, artigo 3º resíduos sólidos como sendo:

[...] material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (BRASIL, 2010).

Os resíduos sólidos podem ser divididos em duas classes pela NBR 10004, de 2004 são elas as dos resíduos classe I – Perigosos e dos resíduos classe II – Não Perigosos, esta última é subdividida entre os resíduos classe II A – Não inertes e os resíduos classe II B – Inertes. De acordo com sua periculosidade; essa classificação se dá de acordo com sua atividade ou processo de origem, suas características, seus constituintes, bem como a partir da comparação destes constituintes com os de resíduos cujos impactos à saúde e ao meio ambiente são conhecidos (ABNT, 2004).

A fração dos resíduos sólidos que não está passível a reutilização ou reciclagem e que, portanto, é encaminhada para tratamento e disposição final é denominada rejeito. A Política Nacional dos Resíduos Sólidos em seu inciso XV, artigo 3º define os rejeitos como sendo:

[...] resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010).

Para Campani (2016, p. 16) o resíduo tão somente passa a ser designado como rejeito quando este passa a ser dissociado de valor seja ele econômico, material, ou ainda energético, ou seja, quando este deixa de ser incorporado e/ou aproveitado em outros processos.

Ressalta-se, que no presente estudo será tratado como rejeito a fração dos resíduos recicláveis não aproveitada pelos triadores nas associações de catadores de materiais recicláveis do município de Florianópolis. Seguindo este viés, apresenta-se a seguir a definição de rejeito segundo o Plano Municipal de Coleta Seletiva de Florianópolis (PMF, 2016, p. 26) o qual define o rejeito como sendo representado pela “[...] soma de todos os materiais que não incluam entre os papéis, plástico, vidros e metais”.

O enfoque deste estudo se dará nos rejeitos dos resíduos de recicláveis, se tratando, portanto de resíduos classe II, não perigosos e não inertes.

3.2 COLETA SELETIVA NO ÂMBITO ESTADUAL

O Plano Estadual de Resíduos Sólidos de Santa Catarina (PERS-SC), publicado em 2017, em seu volume I, define que a coleta seletiva ou coleta diferenciada consiste na segregação prévia realizada pelo próprio gerador o qual separa os resíduos recicláveis secos, dos orgânicos e dos rejeitos (PERS, 2017, p. 127). A coleta seletiva é de responsabilidade do poder público sendo este o titular dos serviços de manejo dos resíduos sólidos (MMA, [201-]).

O Ministério do Meio Ambiente define a coleta seletiva como:

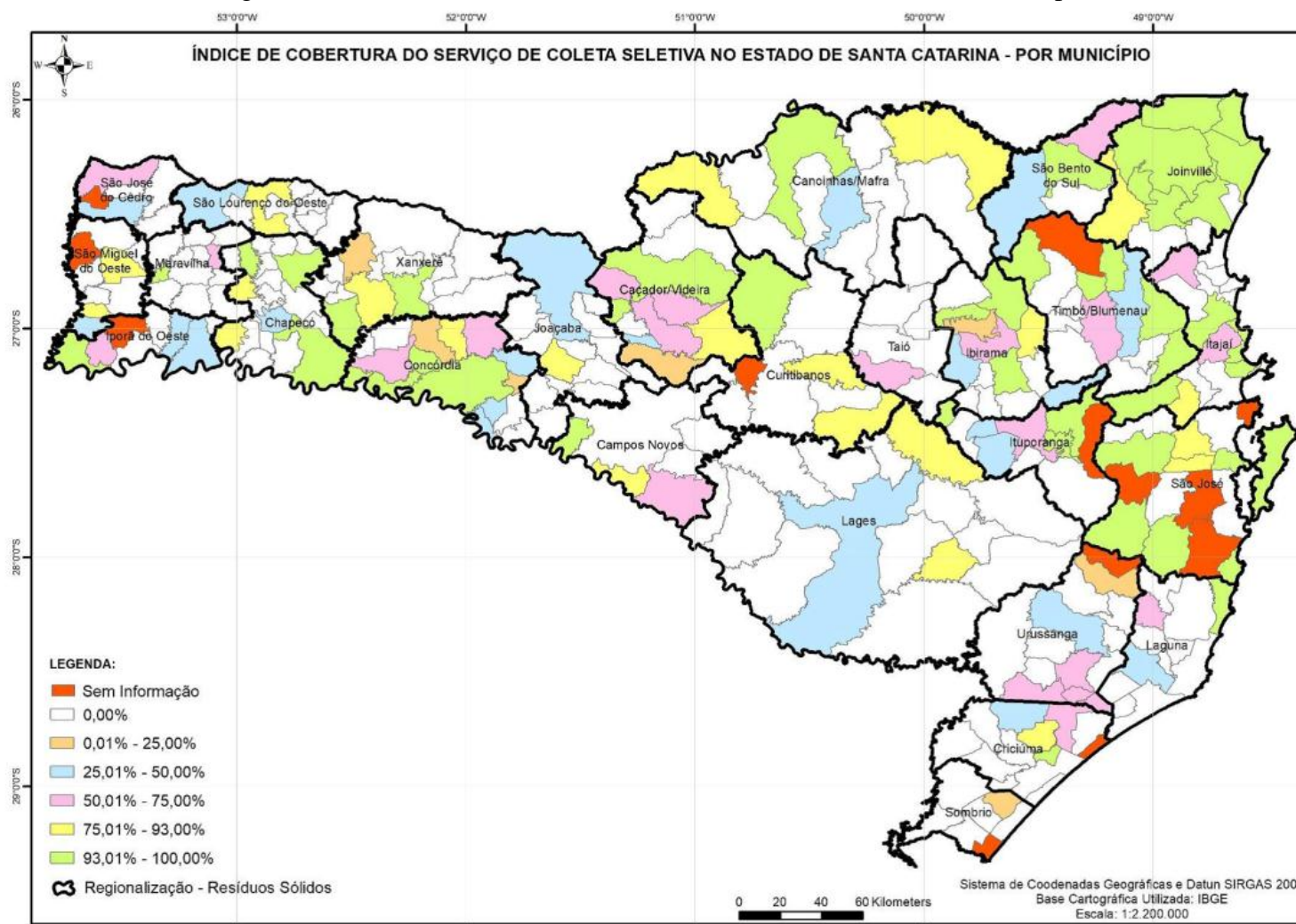
[...] a coleta diferenciada de resíduos que foram previamente separados segundo a sua constituição ou composição. Ou seja, resíduos com características similares são, selecionados pelo gerador (que pode ser o cidadão, uma empresa ou outra instituição) e disponibilizados para a coleta separadamente (MMA, [201-]).

Conforme apresentado no PERS-SC (2017, p. 151) diversos são os fatores que influenciam e motivam a realização da coleta seletiva, esses fatores vão desde a falta de locais adequados para a disposição dos resíduos; fatores sanitários, haja vista que o manejo e disposição inadequada dos resíduos está ligada à saúde ambiental; até fatores sociais uma vez que a coleta seletiva é, em parte, responsável pela integração da cidadania dos catadores e também pela geração de empregos. Fatores econômicos uma vez que quando reciclado, o resíduo deixa de ser destinado ao aterro, logo diminuindo a demanda por espaço para a devida disposição e também diminuindo a demanda por matéria prima uma vez que os recicláveis reintegram a cadeia de produção.

Dos 295 municípios do Estado de Santa Catarina, apenas 165 prefeituras realizam a coleta seletiva, cobrindo, portanto, 58,89%¹ da população do Estado (PERS-SC, 2017, p. 151). A Figura 1 e a Figura 2, retratam a cobertura da coleta seletiva de recicláveis por município e por região integrada de resíduos sólidos apresentadas no Plano Estadual de Resíduos Sólidos de Santa Catarina (2017).

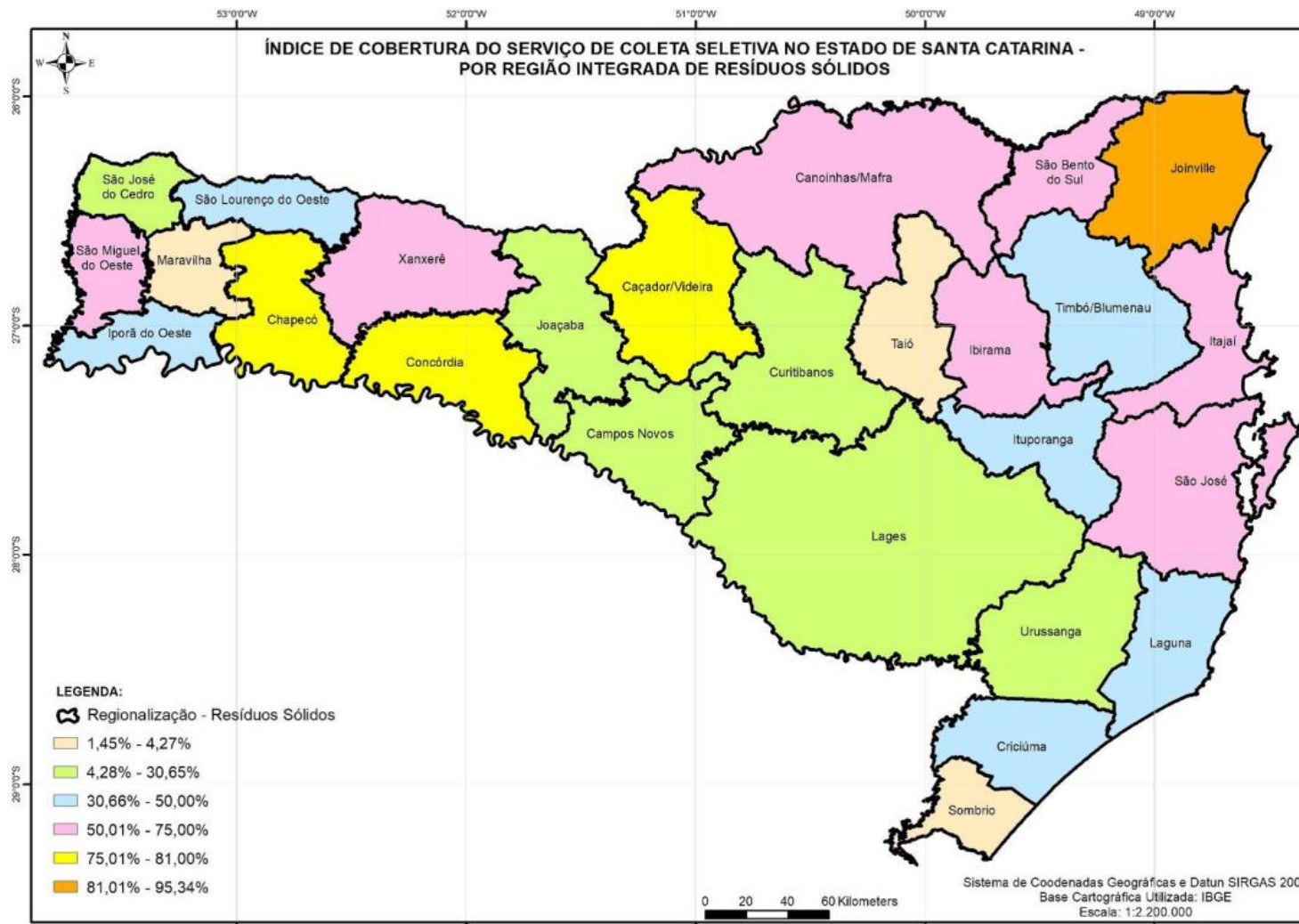
¹ Para o cálculo do índice apresentado o PERS-SC (2017, p. 151) utilizou como base as informações de 95,59% dos municípios catarinenses, uma vez que não foram obtidas informações acerca da coleta seletiva de recicláveis de 13 municípios do Estado.

Figura 1 - Índice de cobertura da coleta seletiva de recicláveis nos municípios de SC.



Fonte: Plano Estadual de Resíduos Sólidos de Santa Catarina (2017)

Figura 2 - Índice de cobertura da coleta seletiva de recicláveis nas regiões integradas de RS.



Fonte: Plano Estadual de Resíduos Sólidos de Santa Catarina (2017)

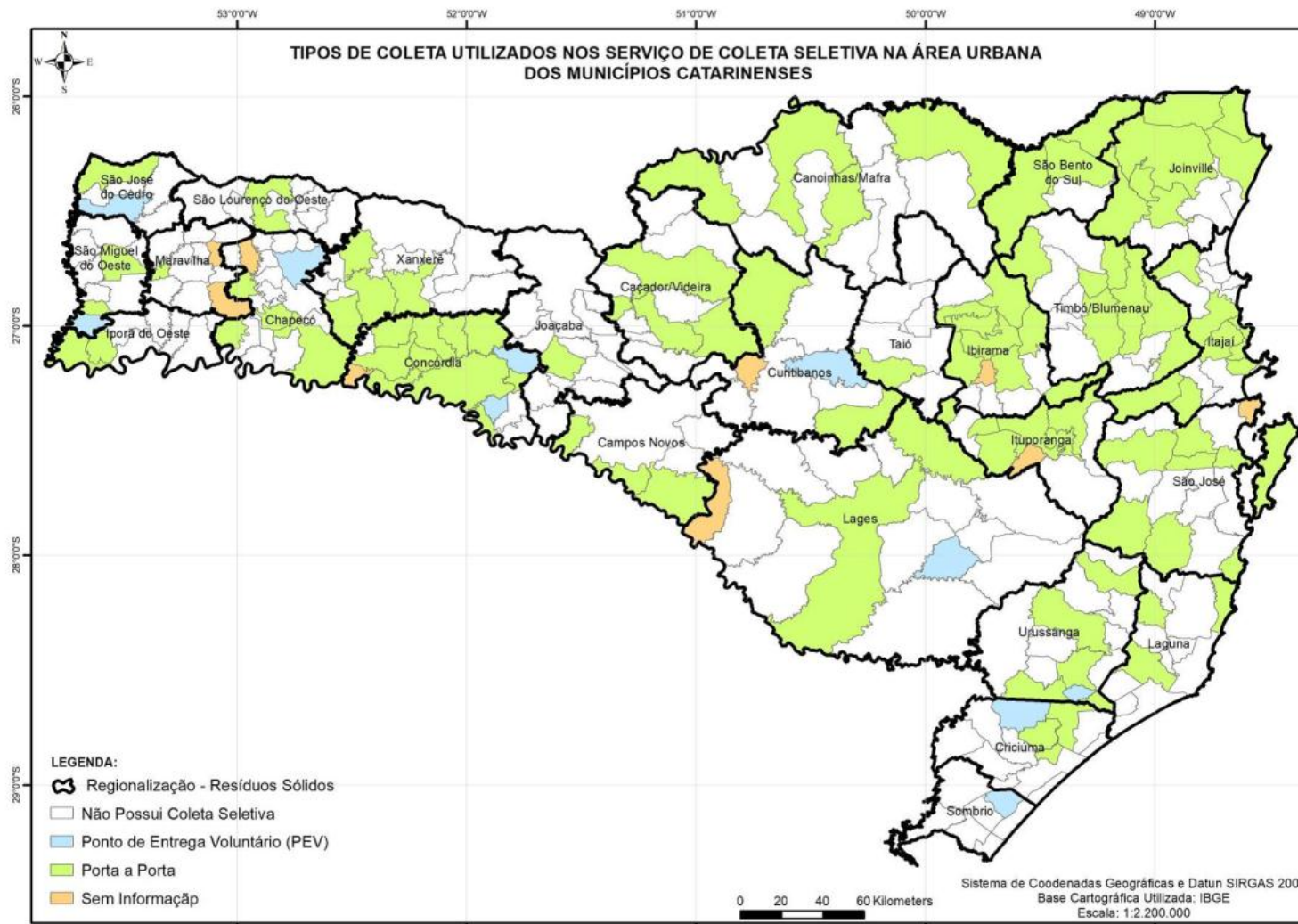
A coleta seletiva ocorre por duas vias principais: a coleta porta a porta e os Pontos de Entrega Voluntária (PEVs). A coleta porta a porta, como a própria terminologia diz, é realizada de porta a porta, ou seja, o gerador separa as frações dos resíduos os quais são dispostos na frente das residências e/ou comércio e são coletados por caminhões ou outros veículos. A coleta desses resíduos pode ser realizada tanto pelo prestador de serviços de manejo dos resíduos sólidos, sejam eles o poder público ou a iniciativa privada, ou ainda pelas cooperativas ou associações de catadores de recicláveis. Por outro lado, os PEVs consistem em pontos de entrega alocados estrategicamente, tais como próximos a conjuntos de residências e/ou instituições para que neles sejam depositados os resíduos segregados, que posteriormente são coletados pelo poder público (MMA, [201-]).

No que tange o âmbito estadual há a predominância da coleta seletiva porta a porta no meio urbano, a qual se dá em 90,91% dos municípios da zona urbana; já no meio rural verifica-se um equilíbrio no tipo de coleta realizada, uma vez observado que a coleta porta a porta representa 58,02% da coleta de recicláveis e a coleta por intermédio dos PEVs representa 41,98% da coleta de recicláveis (PERS-SC, 2017, p. 154)².

Na Figura 3 e na Figura 4 são apresentados os tipos de cobertura de coleta de recicláveis nos municípios do meio urbano e do meio rural, respectivamente.

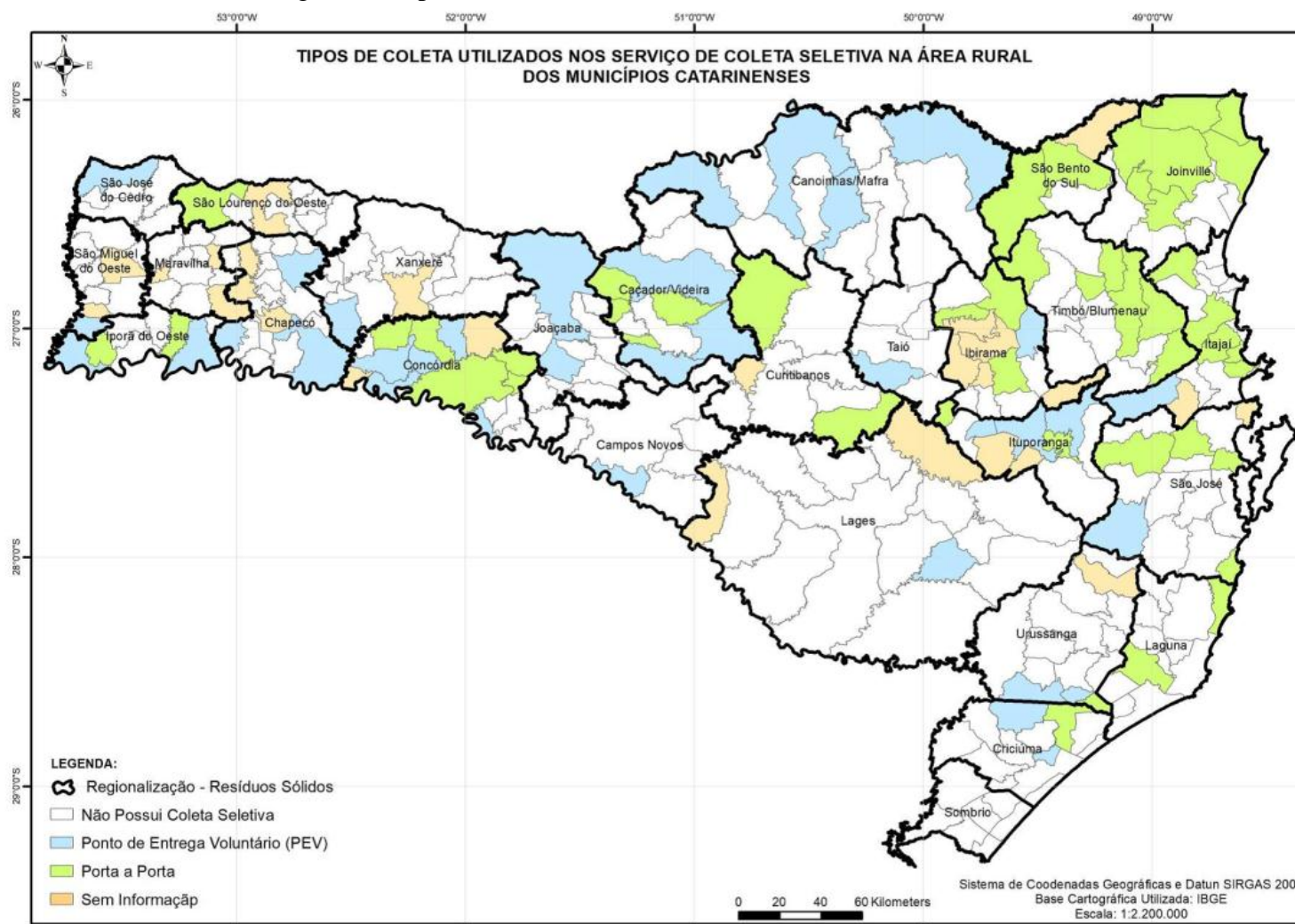
² É importante frisar que os percentuais apresentados no PERS-SC (2017, p. 154) referem-se tão somente ao universo das modalidades identificadas em cada município, não incluindo os números relativos aos municípios que não disponibilizaram tais informações.

Figura 3 - Tipos de coleta de recicláveis executados nas áreas urbanas de SC.



Fonte: Plano Estadual de Resíduos Sólidos de Santa Catarina (2017)

Figura 4 - Tipos de coleta de recicláveis executados nas áreas rurais de SC.



Fonte: Plano Estadual de Resíduos sólidos de Santa Catarina (2017)

Há de se considerar ainda, que uma fração dos resíduos da coleta seletiva não é passível de reciclagem, por vezes materiais não recicláveis como guardanapo sujo ou papéis molhados são descartados junto ao resíduo reciclável, além dos materiais que apesar de serem recicláveis, porém não há mercado para a compra do resíduo. Essa fração de resíduo é, portanto, denominada rejeito e atualmente é encaminhada para tratamento e disposição final em aterro sanitário. No entanto, esta poderia ser utilizada para recuperação energética o que nos introduz ao conceito de CDR o qual será discutido mais adiante.

3.3 TRATAMENTO E DESTINAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Diversas são as maneiras de se lidar com o gerenciamento dos resíduos sólidos sendo que estas vêm se desenvolvendo diferentemente ao redor do mundo. Segundo publicação da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública de Resíduos Especiais (ABRELPE, 2012) é notável o avanço por parte dos países desenvolvidos em relação à gestão dos RSU comparado aos países em desenvolvimento. Pontuando-se três fases pelas quais os países desenvolvidos já passaram no tocante ao gerenciamento dos resíduos sólidos. A primeira fase constituísse meramente na disposição final dos resíduos sólidos; já na segunda fase surgem os conceitos de reutilização e reciclagem dos resíduos sólidos; e por fim, na terceira fase, fase está onde encontram-se alguns países desenvolvidos busca-se pela redução da geração de resíduos desde o início da cadeia produtiva de bens e materiais até o consumidor final. No que se refere aos países em desenvolvimento, alguns encontram-se em estado transição da primeira para a segunda fase do gerenciamento dos RSU onde começam a ser adotados e implementados os conceitos de reutilização e reciclagem. Já no Brasil, após instituída a PNRS por meio da Lei nº 12.305 de 2010 nota-se que se almeja que sejam seguidas as tendências mundiais no tocante à destinação e disposição final dos RSU.

Haja vista o princípio dos 3 R's (Reduzir, Reutilizar, Reciclar) que vige hoje no Brasil, ressalta-se que antes de se buscar por quais quer alternativas de destinação e disposição final para os RSU deve ser pretendida ao máximo a redução da geração de RSU. Tal qual é instituído pelo Decreto nº 7.404, de 2010 em seu título IV, artigo 35º o qual estabelece o seguinte: “na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deverá ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos”.

Assim, a fim de se cumprir ao disposto na legislação vigente e se atender à crescente onda de urbanização culminando no aumento considerável da geração de resíduos sólidos; concomitantemente a demanda por novas alternativas energéticas, se faz repensar em alternativas aos aterros sanitários. Há de se considerar ainda a dificuldade naquilo que compete a disponibilidade de grandes áreas no meio urbano para a execução dos aterros, e se considerar também os altos custos envolvidos tanto no manejo, quanto na manutenção destes.

Portanto, da demanda por novas alternativas para a disposição final dos resíduos sólidos urbanos transcendendo os aterros sanitários, e da necessidade de se explorar novos potenciais energéticos, há de se considerar a utilização dos RSU como uma fonte alternativa de combustível. Tão somente se pretenderá à utilização dos RSU como fonte energética quando estes não mais forem passíveis de reutilização e/ou reciclagem. Deste modo, buscando-se então promover a recuperação dos resíduos como alternativa previa ao tratamento e disposição final da fração de rejeitos destes.

3.4 RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Mesmo quando se segue integralmente a hierarquia do gerenciamento dos resíduos sólidos, ou seja, a não geração e redução; reutilização; e reciclagem, ainda assim pode restar uma fração de RS, sendo esta passível apenas de recuperação, e.g. pode ser recuperado via transformação em energia, e/ou então ser encaminhada para tratamento e disposição final (MÜNSTER; LUND, 2010).

A geração de energia térmica e elétrica a partir dos RS data do início do século XIX (McDOUGALL et al., 2001). A conversão da fração de resíduos sólidos não passível de reutilização e reciclagem em energia, calor ou combustível pode se dar por intermédio de uma variada gama de processos que inclui desde a combustão, gasificação, pirolise, digestão anaeróbia e a recuperação do biogás formado nos aterros sanitários, sendo esta conversão denominada recuperação energética dos resíduos, waste to energy (WTE) na sigla em inglês (EPA, 2016).

De acordo com Moratorio, Rocco e Castelli Lemez (2012) os processos de recuperação energética dos RS podem se dar por duas vias de conversão, a biológica ou a térmica.

A conversão biológica se dá por meio de degradação biológica dos resíduos, e é realizada por bactérias, via digestão anaeróbia. Este é o processo que ocorre nos aterros

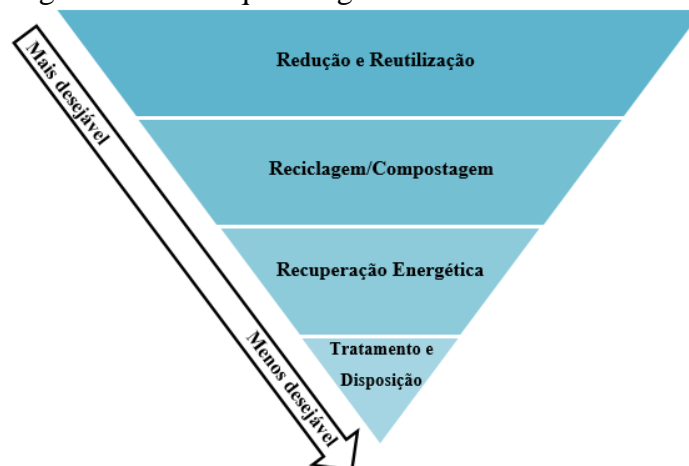
sanitários e é responsável pela geração de biogás (MORATORIO; ROCCO; CASTELLI LEMEZ 2012).

Já em se tratando dos processos de conversão térmica, estes consistem basicamente em submeter os RSU a reações químicas de ordem inorgânica, de modo que sejam convertidos em produtos sólidos, líquidos e gasosos. Essas reações podem ocorrer por meio de combustão, pirólise e gaseificação. As reações químicas que ocorrem nos processos de combustão e gaseificação são reações exotérmicas, portanto, ocorre a liberação de energia de maneira direta. No entanto, no processo de pirólise tem-se reação do tipo endotérmica, sendo que o poder calorífico é extraído dos gases derivados da pirolise (MORATORIO; ROCCO; CASTELLI LEMEZ, 2012). No tocante ao presente estudo, é avaliada a recuperação energética a partir da via de conversão térmica através da combustão dos RSU.

Apesar de estar abaixo da redução, reutilização e reciclagem na cadeia hierárquica de gerenciamento dos resíduos sólidos (Figura 5) a recuperação energética está acima do tratamento e disposição final dos RSU. Deste modo, aproveita-se para destacar que a queima controlada, ou seja, combustão dos RSU não apenas reduz o volume de RSU encaminhado para os aterros sanitários como também pode recuperar energia a partir do processo de queima desses resíduos (EPA, 2016).

As vantagens da recuperação dos RSU são reiteradas por Finkelstein et al. (1994), o qual salienta que alguns dos aspectos positivos quando se considera a incineração como uma alternativa à disposição dos resíduos sólidos urbanos são a diminuição significativa tanto do volume quanto do peso destes, além é claro, do potencial energético gerado, sendo este último, o de maior relevância para o presente estudo.

Figura 5 – Hierarquia do gerenciamento dos resíduos sólidos.



Fonte: Adaptado EPA (2015)

Considerada uma fonte de energia renovável, a conversão dos resíduos não reutilizáveis/recicláveis em eletricidade e calor além de reduzir as emissões de carbono uma vez que esta supre parte da demanda de energia gerada por combustíveis fósseis, reduz a geração de metano nos aterros sanitários considerando que a quantidade de RSU encaminhada à estes diminui consideravelmente. Após a recuperação do RSU em energia, resta uma fração de cerca de dez por cento do volume deste em forma de cinzas, sendo que estas devem ser encaminhadas para aterro sanitário onde se dará então, sua disposição final (EPA, 2015).

Nesse viés, Mokrzycki e Bocheńczyk (2003) destacam que um dos principais métodos para a utilização dos resíduos é aplica-los como fonte de energia. No entanto, para serem utilizados como combustível os resíduos devem possuir conteúdo químico energético, ou seja, poder calorífico satisfatório. O conteúdo energético dos resíduos depende basicamente da fração orgânica que os compõe e do seu teor de umidade. Para se empregar a energia química dos resíduos de forma mais eficiente, combustíveis alternativos vêm sendo desenvolvidos, sendo que essa variância consiste basicamente nas diferentes composições dos resíduos e nos processos de tratamento a que são submetidos.

No tocante ao processo de incorporação dos RSU como combustível, a Agência de Proteção Ambiental do Estados Unidos (EPA, 2016), aponta três tipos de tecnologias mais comuns empregadas na combustão dos RSU's, a fim de se promover recuperação energética deste, são elas as unidades de incineração; os sistemas modulares; e os sistemas de geração de combustíveis derivados de resíduos, ao quais serão descritos a seguir:

- Unidades de incineração, de queima em massa do inglês *mass burn* (MB) - os resíduos utilizados na queima em massa são encaminhados para as câmaras de combustão controlada sem que haja um processamento primário destes, salvo exceções em que se realiza a retirada de materiais muito volumosos a fim de não se prejudicar a eficiência do processo de combustão. As unidades de incineração de queima em massa dos RSU são constituídas basicamente por uma câmara única onde em condição de saturação de ar é realizada a combustão controlada dos resíduos. O excesso de ar promove condições ideais para que ocorra a mistura dos resíduos e possibilita ainda que a turbulência gerada promova uma queima mais homogeneia dos resíduos.
- Sistemas modulares - os sistemas modulares, de maneira análoga aos sistemas de MB, promovem a queima dos RSU sem que haja o processamento prévio

destes. Estes se diferem dos sistemas de queima massiva por serem de menor dimensão, podendo ainda por vezes serem portáteis.

- Sistemas de incineração de combustíveis derivados de resíduos - utilizam-se de equipamentos mecânicos para picar e separar os materiais não combustíveis, produzindo então uma mistura de material que pode ser utilizados como único combustível de alimentação ou então ser empregado em conjunto ou em substituição aos combustíveis fósseis.

Neste estudo será avaliada a fração de rejeito oriunda das associações de catadores de materiais recicláveis para transformação em CDR – Combustíveis Derivados de Resíduos ou RDF (Refuse Derived Fuels) na sigla em inglês. Reiterasse que será considerado como rejeito a fração dos recicláveis que seja considerada como não aproveitável pelos triadores devido à questões de viabilidade econômica, falta de mercado, ou questões que concernem a viabilidade tecnológica para reciclagem destes materiais.

3.5 COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUOS – CDR

De modo geral, uma vasta parte dos resíduos sólidos apresenta um poder calorífico da ordem de 25 – 50% quando comparado ao poder calorífico do carvão. Para a maioria dos RS o poder calorífico exato é função do teor de carbono que compõe o material. O teor de umidade é bastante variável e pode sofrer alterações significativas em decorrência do processamento, manuseio e armazenamento. Já no tocante ao teor de cinzas, este fica geralmente em torno de 20 – 40%, considerado baixo. (MANSER e KEELING, 1996 apud McDOUGALL et al., 2001).

É possível realizar a queima de RSU com uma vasta composição sem que seja necessária a utilização de um combustível auxiliar. No entanto, para melhorar a qualidade do combustível e potencializar a sua eficiência se faz necessário o processamento deste a fins de se diminuir o teor de umidade e de cinzas, haja vista que a água e a fração de materiais não combustíveis (inertes) presentes no RS não contribuem para o poder calorífico deste (McDOUGALL et al., 2001).

O MB e o CDR são ambas tecnologias de tratamento dos resíduos as quais possibilitam ainda a recuperação energética destes, seja na forma de energia térmica ou elétrica. Essas tecnologias se diferem principalmente em como os RSU são empregados sendo que no MB os resíduos são empregados sem que haja o processamento prévio destes, já no

caso do CDR o RSU passa por processamento. O processamento dos RSU varia, sendo que este pode ser submetido desde a simples remoção de materiais volumosos e trituração; até um processamento mais rebuscado, deste modo, permitindo que o CDR seja empregado em conjunto com o carvão (FINKELSTEIN, et al., 1994).

O CDR é constituído basicamente de RSU o qual é submetido a processos de melhoria com o objetivo de se controlar a umidade, a presença de materiais não combustíveis, além da granulometria deste, ressalta-se que essas características são ajustadas de acordo com a destinação do combustível. Quando não se faz necessário o controle do teor de umidade e a percentagem de material não combustível, isto em decorrência da aplicação pretendida para o CDR, o RSU pode ser submetido apenas ao processo de trituração (HASSELRIIS, 2013). McDougall et al. (2001) aponta no entanto, que para se obtenha um CDR

De boa qualidade é de suma importância que os RS sejam submetidos à um rigoroso processamento. Deste modo, de maneira simplificada, o CDR pode ser descrito como a fração segregada de RSU processado a qual possui alto poder calorífico associado (GALLARDO, et al., 2014).

De forma direta, Mamede (2013) descreve a tecnologia do CDR como consistindo-se basicamente na separação e seleção mecânica da fração combustível do RSU à qual é submetida a tratamento térmico, por conseguinte, valorizando parte dos fluxos de resíduo através da recuperação de energia.

Hajinezhad, Halimehjani e Tahani (2016) apontam ainda que além de fornecer energia o CDR pode ser utilizado/incorporado em cimenteiras, na indústria de papel, madeireiras além de centrais térmicas e queimadores de resíduos.

3.5.1 Categorias de CDR e tipo de processamento

Assim, a partir da ideia geral da tecnologia do CDR e das características do combustível conforme fora abordado outrora, pode-se partir para a classificação deste combustível. Nithikul (2007) explicita as 7 categorias de CDR de acordo com a classificação da ASTM através da normativa E856-83 (Standard Definitions of Terms and Abbreviations Relating to Physical and Chemical Characteristics of Refuse Derived Fuel) que os classifica quanto as suas características físicas e químicas, conforme se segue:

- CDR-1: Os resíduos utilizados na forma em que foram descartados;
- CDR-2: Também chamado de CDR grosso (*coarse*), os resíduos são processados para granulometria grossa com ou sem separação de metais ferrosos, de modo que 95%, em peso, passe por uma malha quadrada de 6 polegadas;
- CDR-3: Também chamado de CDR fluff, os resíduos são processados a fim de se separar vidros, metais e materiais inorgânicos, os resíduos são então triturados, de modo que 95%, em peso, passe por uma malha quadrada de 2 polegadas;
- CDR-4: Também chamado de CDR em pó, são os resíduos combustíveis transformados em pó, de modo que 95%, em peso, passem através de uma malha 10 (0,035 polegadas);
- CDR-5: Também chamado de CDR densificado, são os resíduos combustíveis comprimidos sob a forma de pellets, *slugs*, cubetas ou briquetes;
- CDR-6: Também chamado de CDR *slurry*, são os resíduos combustíveis transformados em combustível líquido;
- CDR-7: Também chamados de CDR *syngas*, são os resíduos combustíveis transformados em combustível gasoso.

De acordo com Rama (Diaz et al., 2006 apud 2010) os CDR também podem ser classificados em 3 categorias quanto a sua a sua forma. São elas: *fluff*, a qual é composta pelos materiais soltos e facilmente transportados pelo ar devido à sua baixa densidade, ficando em torno de 0,15 – 0,25; *pellets*, com dimensão tipicamente inferior a 25 mm, os pellets constituem-se em um aglomerado de material solto que pode se apresentar em forma de cilindros, discos ou cubos; briquetes (briquette), de dimensão superior a 25 mm, os briquetes constituem-se em um aglomerado de material solto que se apresenta em forma cilíndrica (Diaz et al., 2006 apud Rama, 2010).

Conforme exposto, o processo produtivo do CDR tem por principal objetivo a separação dos materiais indesejados além de conferir ao combustível características específicas que atendam às necessidades da aplicação pretendida. Logo, pode se dizer que o processamento do CDR constitui-se basicamente em submeter o material combustível a etapas sucessivas de tratamento como separação, classificação, secagem, redução de tamanho,

trituração, peneiramento e densificação (CAPUTO e PELAGAGGE, 2002 apud MAMEDE, 2013).

Conforme ressaltado por Rama (2010), não há, no entanto, uma padronização para o processo de produção do CDR dadas as características do material combustível e sua vasta aplicabilidade. Rama (2010, p. 23) ainda destaca que:

“na concepção de uma linha de produção é essencial manter presente que os resíduos são misturas heterogêneas de materiais, por vezes muito complexas. A produção deve portanto começar pela homogeneização dos materiais de partida, a matéria prima, através de tecnologias relevantes e aplicáveis”.

Há de se considerar ainda, a configuração da planta de processamento, ou seja o arranjo bem como a quantidade de equipamentos empregados na produção do CDR podem causar um impacto significativo na qualidade final deste e no balanço de massa (CAPUTO e PELAGAGGE, 2002 apud MAMEDE, 2013). Assim, a configuração da planta de processamento e produção do CDR deve ser pensada de maneira criteriosa, considerando-se os aspectos do RS a ser processado e das características desejadas para o produto final.

McDougall et al. (2001) aponta ainda que existem dois processos básicos de CDR, sendo que cada processo produz um produto distinto o CDR grosseiro e o CDR densificado.

O CDR densificado é produzido na forma de pellets. Antes de ser peletizado o material é seco, a fim de se reduzir o teor de umidade, logo, conferindo estabilidade ao material, de modo que possa ser transportado, manuseado e armazenado como os demais combustíveis sólidos. O CDR densificado pode ser queimado sozinho ou então em co-combustão com outro combustível sólido. No entanto, por ser mais processado, haja vista o processo de secagem e peletização, o processo de produção do CDR densificado implica, portanto, em um maior gasto energético (McDOUGALL et al., 2001).

No tocante ao CDR grosseiro, este passa apenas por processo de trituração. Requer menos processamento que o CDR densificado, porém, não pode ser armazenado por longos períodos, uma vez que este não é seco. É um combustível recomendado para uso local na produção de energia elétrica e/ou térmica (McDOUGALL et al., 2001).

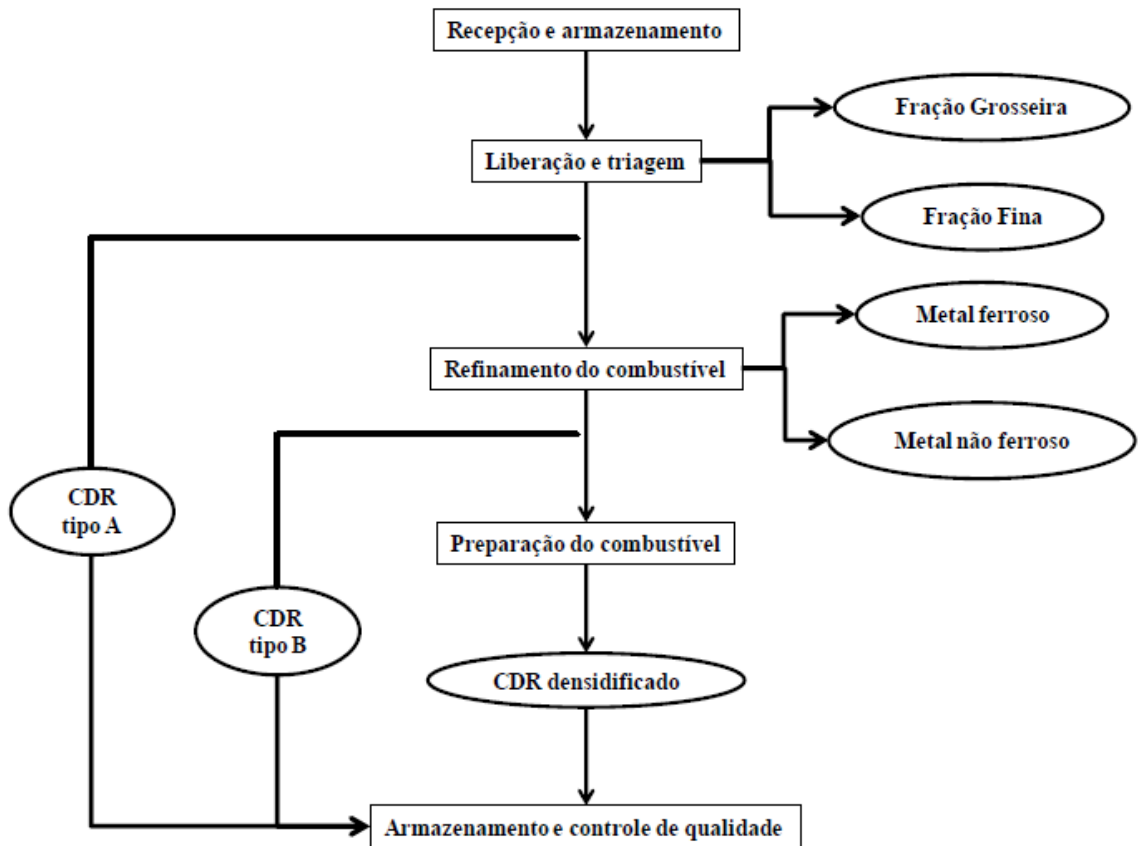
Mamede (2013) divide o processo básico de produção do CDR em cinco etapas, são elas:

- Recepção e armazenamento;
- Liberação e triagem;
- Refinamento do combustível;
- Preparação e combustível; e,

- Armazenamento e controle de qualidade.

As etapas do processo básico de produção do CDR são ilustradas na Figura 6 abaixo.

Figura 6 – Processos de produção de CDR.



Fonte: Mamede (McDougall et al., 2001 apud 2013)

Segundo Mamede (2013), no que compete ao CDR grosseiro do tipo A, este consiste no CDR que após os processos de recepção e armazenamento, é visualmente inspecionado, nessa etapa se dá a retirada de materiais volumosos que possam danificar os equipamentos, os resíduos são então, liberados e submetidos ao processo de triagem. No processo de triagem é realizada a retirada das frações finas e das frações grossas que compõem o CDR. A fração fina constitui-se basicamente de cinzas, material putrescível, areia, e cacos de vidro, além de ser rica em umidade. Já a fração grosseira é composta principalmente por grandes pedaços de papelão, papel e plástico filme. A fração restante é, portanto, o CDR tipo A. É importante ressaltar que no processo de produção do CDR tipo A não é realizada a retirada de metais, bem como outros materiais não combustíveis (MAMEDE, 2013).

Ainda de acordo com Mamede (2013), o CDR grosseiro do tipo B pode ser descrito como o CDR do tipo A o qual é submetido à processo de refinamento. Logo, após o processo

de triagem o CDR é submetido aos processos de redução de tamanho bem como, classificação e separação magnética. Para a redução de tamanho o CDR passa por um triturador. Já na etapa de classificação, a qual consiste em separação por densidade, tem-se a separação das frações pesada, consiste basicamente de metais e plásticos grosseiros, da fração leve, fração combustível, a qual consiste de materiais como plástico filme papel. Posteriormente ao processo de classificação, é realizada a remoção dos metais ferrosos, a qual pode ser realizada com o auxílio de um separador magnético, bem como a remoção dos materiais não ferrosos, que pode ser realizada utilizando-se um separador de corrente de Foucault (MAMEDE, 2013). “Fração leve, juntamente com o que restou da separação magnética e/ou pela corrente de Foucault pode ser utilizado como uma forma mais refinada de CDR grosseiro [... do tipo B]” (MAMEDE, 2013).

3.6 EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

De modo geral, as tecnologias de recuperação energética a partir dos RSU, *Waste to Energy*, geram em seus sistemas subprodutos como lixiviado, cinzas de caldeira, metais ferrosos e não ferrosos, resíduos do sistema de tratamento de gases de combustão, e emissões gasosas na atmosfera (ABRELPE, 2012).

A redução do volume e peso somados ao potencial de recuperação energética dos resíduos tornam a tecnologia dos CDR bastante atrativa quando comparada aos aterros sanitários. No entanto, conforme aludido, as tecnologias de recuperação energética geram subprodutos, rejeitos dentre os quais estão as emissões de gases na atmosfera.

Portanto, há de se levar em conta a emissão de gases como CO₂, CO, NO_x e SO, os quais são subprodutos da queima do CDR e representam um problema ambiental (GERA e GAUTAM, 1993). Gera e Gautam salientam que esses problemas são agravados pela presença de certos resíduos perigosos altamente regulamentados, como dioxinas e furanos no fluxo de escape (1993, p. 2353, tradução nossa)³.

Ainda, segundo EPA (1993), os poluentes emitidos da combustão do CDR variam de acordo com a composição do RSU e as condições de combustão, sendo os poluentes mais comuns os óxidos de nitrogênio (NO_x); monóxido de carbono (CO); gases ácidos, ácido

³ No original: These problems are compounded by the presence of certain highly regulated hazardous wastes such as, dioxins and furans in the exhaust stream.

clorídrico (HCl) e ácido sulfídrico (SO₂); material particulado (MP); metais como cádmio (Cd), chumbo (Pb), mercúrio (Hg), arsênico (As), níquel (Ni), cromo (Cr), dentre outros; além de compostos orgânicos tóxicos como as dibenzo-p-dioxinas policloradas (PCDD), ou dioxinas, e os dibenzofuranos policlorados (PCDF), ou furanos.

Nos próximos tópicos são discutidos os mecanismos de emissão dos principais poluentes emitidos da queima do CDR.

3.6.1 Óxidos de nitrogênio (NO_x)

De acordo com EPA (1996), os óxidos de nitrogênio são produtos de todos os processos de combustão oxidativa dos combustíveis. Óxido nítrico (NO) é o principal componente dos óxidos de nitrogênio. No entanto, dióxido de nitrogênio (NO₂) e óxido nitroso (N₂O) também são formados, porém em menor quantidade. Sendo a composição desses componentes denominada NO_x. Os NO_x são formados durante o processo de combustão em decorrência da oxidação do nitrogênio presente nos resíduos, e em decorrência da fixação do nitrogênio atmosférico. A oxidação do nitrogênio presente no resíduo ocorre em temperaturas relativamente baixas, abaixo dos 1900 °C, ao passo que a fixação do nitrogênio gasoso ocorre à temperaturas mais elevadas. Em decorrência de os fornos de combustão dos RSU operar em temperaturas relativamente baixas, isto implica, que cerca de 70 – 80% dos NO_x formados durante a combustão estão associados ao nitrogênio presente nos RS (EPA, 1996).

3.6.2 Monóxido de carbono (CO)

Conforme exposto pela EPA (1996), as emissões de monóxido de carbono são resultantes da oxidação incompleta do carbono presente nos RSU, ou seja, quando estes não são oxidados à CO₂. Altas concentrações de CO indicam que os gases não foram mantidos a uma temperatura suficientemente alta na presença de O₂ por tempo suficiente para que ocorresse a oxidação do CO em CO₂. No decorrer da queima do RSU ocorre a liberação de CO, hidrogênio (H₂), além de hidrocarbonetos que não queimaram. O ar em excesso então reage com os gases de escape do leito do forno para converter CO, H₂, CO₂ e H₂O. Adicionar muito ar ao processo na zona de combustão diminui a temperatura dos gases e acaba por retardar as reações de oxidação. Por outro lado, se ar for adicionado em baixas quantidades, a

probabilidade de ocorrer uma mistura incompleta aumenta, acarretando no aumento do escape dos hidrocarbonetos não queimados. Ambas as condições implicam no aumento das concentrações de emissão de CO (EPA, 1996).

3.6.3 Gases ácidos

A EPA (1996) aponta o HCl e o SO₂ como os gases ácidos de maior preocupação em se tratando da combustão dos RSU. Outros gases como o fluoreto (HF), o brometo de hidrogênio (HBr), e o trióxido de enxofre (SO₃) também são produto da combustão dos RSU, porém, estes se apresentam em concentrações bastante baixas. As concentrações de HCl e SO₂ presentes nos gases da combustão dos RSU estão diretamente relacionadas à concentração de cloro e enxofre na composição dos resíduos. As emissões de HCl e SO₂ da combustão dos RSU depende da forma química dos compostos de cloro e enxofre presente nos resíduos; da disponibilidade de materiais alcalinos nas cinzas provenientes do processo de combustão, a qual age como adsorvente; bem como do tipo de sistema de controle de emissões adotado. As maiores fontes de cloro nos RSU são os plásticos e papeis, já o enxofre está presente em vários dos materiais que compõem os RSU, no giz de quadro, pneus e cascalho de asfalto, por exemplo (EPA, 1996).

3.6.4 Material particulado (MP)

A quantidade de MP liberada pelo forno de um combustor de resíduos depende das características dos RSU, bem como da natureza física, design e operação do combustor. Sob condições normais de combustão as cinzas provenientes da fração inorgânica, e dos constituintes não combustíveis nos fornos de combustão dos RSU são liberadas nos gases de emissão. A maior parte do MP é capturado pelas tecnologias de controle de poluição, e, portanto, não é liberada na atmosfera (EPA, 1996).

3.6.5 Metais

Metais estão presentes em uma vasta gama de materiais que compõem os RSU, incluem papeis, jornal, madeira, baterias e latas. Os metais presentes nos RSU liberados por meio da combustão são emitidos em associação com MP, isso ocorre com metais como As,

Cd, Cr, e Pb por exemplo, ou então na forma de vapor, caso do Hg. Em decorrência da variabilidade na composição dos RSU, as concentrações de metais nas também é bastante variável e independe do tipo de combustor (EPA, 1996).

3.6.6 Compostos orgânicos

Compostos como as dioxinas, furanos, clorobenzeno (CB), bifenilos policlorados (PCBs), clorofenols (CPs), e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs), estão presentes nos RSU ou então podem ser formados durante o processo de combustão e/ou em processos de pós-combinação. A presença de compostos orgânicos nos gases de emissão pode se dar na fase de vapor ou então este pode condensar ou ser absorvido por partículas finas (EPA, 1996).

O controle dos compostos orgânicos é alcançado através do correto design e operação tanto do combustor como dos equipamentos empregados para o controle da poluição atmosférica (EPA, 1996).

3.7 CONTEXTO LEGAL

Com a promulgação da Política Nacional de Resíduos Sólidos as responsabilidades acerca do gerenciamento dos resíduos sólidos passam a ser de todos, sociedade civil e estado, ou seja, todos os geradores passam a ser responsáveis. Tornando a PNRS um marco na maneira como lidamos com os resíduos sólidos.

O conhecimento e entendimento das legislações é de fundamental importância para tratarmos de todos os aspectos acerca da temática. Neste estudo, há de se considerar as legislações que concernem ao gerenciamento e gestão dos resíduos sólidos, além das legislações que abordam as tecnologias de alternativas energéticas, bem como as legislação que tratam diretamente do CDR.

No Quadro 1 são exibidas algumas das legislações pertinentes acerca da temática discutida. Além das legislações nacionais, são expostas algumas das normativas europeias que tratam das especificações dos tipos de CDR, processos de amostragem e os requisitos de qualidade.

Quadro 1 – Legislações e outros dispositivos legais.

Legislação	Conteúdo
Portaria Interministerial nº 274, de 30 de abril de 2019	Propõe a modificação da Política Nacional de Resíduos Sólidos e a inclusão dos CDRs como alternativa para o tratamento dos resíduos sólidos, nos termos do artigo 9º, parágrafo 1º.
Decreto nº 7.404, de 23 dezembro de 2010	Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências.
Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010	Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.
Resolução CONAMA nº 316, de 29 de outubro de 2002	Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos.
Decreto nº 3.272, de 19 de maio de 2010	Fixa os critérios básicos sobre os quais devem ser elaborados os Planos de Gerenciamento de Resíduos Sólidos - PGRS referentes a resíduos sólidos urbanos municipais, previstos nos arts. 265 e 266 da Lei nº 14.675, de 13 de abril de 2009, que institui o Código Estadual do Meio Ambiente.
Lei nº 15.112, de 19 de janeiro de 2010	Dispõe sobre a proibição de despejo de resíduos sólidos reaproveitáveis e recicláveis em lixões e aterros sanitários
Lei nº 13.517, de 04 de outubro de 2005	Dispõe sobre a Política Estadual de Saneamento e estabelece outras providências
ABNT NBR 10004/2004	Resíduos Sólidos – Classificação
ABNT NBR 10007/2004	Amostragem de Resíduos Sólidos
EN 15357:2011	Solid recovered fuels – Terminology, definitions and descriptions
EN 15358: 2011	Solid recovered fuels – Quality management systems
CEN/TR 15441:2006	Solid recovered fuels – Guidelines on occupational health aspects
EN 15590:2011	Solid recovered fuels – Determination of potential rate of microbial self heating using the real dynamic respiration index (not under mandate)
CEN/TR 15508:2006	Key properties on solid recovered fuels to be used for establishing a classification system
EN 15359:2011	Solid recovered fuels – Specifications and classes
CEN/TR 14980:2004	Solid recovered fuels – Report on relative difference between biodegradable and biogenic fractions of SRF

Legislação	Conteúdo
CEN/TR 15591:2007	Solid recovered fuels – Determination of the biomass content based on the 14C method
EN15440:2011	Solid recovered fuels – Method for the determination of biomass content
EN15442:2011	Solid recovered fuels – Methods for sampling
EN15443:2011	Solid recovered fuels – Methods for the preparation of the laboratory sample
EN15413:2011	Solid recovered fuels – Methods for the preparation of the test sample from the laboratory sample
CEN/TR 15716:2008	Solid recovered fuels – Determination of combustion behaviour (not under mandate)
EN15400:2011	Solid recovered fuels – Determination of calorific value
CEN/TS 15401:2010	Solid recovered fuels – Determination of bulk density
EN15402:2011	Solid recovered fuels – Determination of content of volatile matter
EN15403:2011	Solid recovered fuels – Determination of ash content
CEN/TR 15404:2010	Solid recovered fuels – Methods for the determination of ash melting behaviour by using characteristic temperatures
CEN/TS 15405:2010	Solid recovered fuels – Determination of density of pellets and briquettes
CEN/TS 15406:2010	Solid recovered fuels – Determination of bridging properties of bulk material
CEN/TS 15414:2010	Parte 1: Solid recovered fuels – Determination of moisture content using the oven dry method: Determination of total moisture by a reference method
	Parte 2: Solid recovered fuels – Determination of moisture content using the oven dry method: Determination of total moisture by a simplified method
EN15414-3:2011	Solid recovered fuels – Determination of moisture content using the oven dry method: Moisture in general analysis sample
EN15415-1:2011	Solid recovered fuels – Determination of particle size distribution – Part 1: Screen method for small dimension particles
CEN/TS 15639:2010	Solid recovered fuels – Determination of mechanical durability of pellets
CEN/TS 15412:2010	Solid recovered fuels – Methods for the determination of metallic aluminium FprEN Solid recovered fuels 15415-2:2012 – Determination of particle size distribution – Part 2: Maximum projected length method (manual) for large dimension particles 2: Maximum projected length method (manual) for large dimension particles

Legislação	Conteúdo
15415-3:2012	Determination of particle size distribution – Part 3: Method by image analysis for large dimension particles
EN15407:2011	Solid recovered fuels – Methods for the determination of carbon (C), hydrogen (H) and nitrogen (N) content
EN15408:2011	Solid recovered fuels – Methods for the determination of sulphur (S), chlorine (Cl), fluorine (F) and bromine (Br) content
EN 15410:2011	Solid recovered fuels – Method for the determination of the content of major elements (Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, P, Si, Ti)
EN15411:2011	Solid recovered fuels – Methods for the determination of the content of trace elements (As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Tl, V and Zn)

Fonte: Elaboração própria

4 METODOLOGIA

A metodologia exposta no presente estudo tem por finalidade assistir na determinação do poder calorífico da fração de rejeitos proveniente da coleta seletiva do município de Florianópolis, bem como na estimativa das emissões atmosféricas decorrentes da queima deste combustível.

A composição dos RSU é bastante heterogênea e apresenta variação significativa de um local para outro, haja vista a influência de fatores como clima e a cultura local. Assim, para se ter bom entendimento quanto a qualidade do CDR disponível, é de suma importância, o conhecimento da composição gravimétrica dos RSU, em especial da fração de interesse, neste caso os rejeitos da coleta seletiva do município. Há de se considerar também, as emissões provenientes da queima do combustível, de modo a se atender ao exposto na legislação vigente e não causar prejuízos à saúde humana e ao meio ambiente.

Para tanto, na metodologia é abordada a área de estudo, composição gravimétrica dos RSU da coleta seletiva, o método imediato aplicado para a determinação do PCI do CDR, bem como aquilo que concerne as emissões atmosféricas, a metodologia AP-42 da EPA.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Localizado da Região Sul do país, o Município de Florianópolis tem uma área territorial de 674.844 km² (IBGE 2018), e de acordo o IBGE a população estimada para o ano de 2019 foi de 500.973 habitantes. Florianópolis também recebe diariamente residentes de municípios vizinhos, em sua maioria da região metropolitana, que constituem por sua vez a população pendular. Essa população pendular também impacta nas demandas da cidade, logo, tendo influência no gerenciamento dos RSU (SCHRAMM, 2015).

Deste modo, para uma melhor visualização do potencial da utilização dos rejeitos como CDR, são apresentados no Quadro 2 uma estimativa populacional, bem como dos resíduos da coleta seletiva para o período de 2014 – 2019.

Quadro 2 - Estimativa populacional e de geração de resíduos da coleta seletiva.

Ano	População urbana (hab) ¹	Resíduos da coleta seletiva atual (ton) ²
2014	461.524	12.000
2015	469.690	12.127
2016	477.798	11.701
2017	485.838	11.270
2018	492.877	10.356
2019	500.973	11.301

Fonte: ¹ IBGE (2014 a 2019); ² PMF (2016)

Os serviços de limpeza pública e coleta de resíduos sólidos da Capital são de responsabilidade da Autarquia de Melhoramentos da Capital - Comcap, personalidade jurídica de direito público criada em 13 de julho de 2017 em readequação da Companhia Melhoramentos da Capital, contratada pela Prefeitura Municipal de Florianópolis, sua acionista majoritária. A Comcap é responsável pela coleta e destinação de aproximadamente 203 mil toneladas de resíduos sólidos urbanos por ano, ou seja, em torno de 16 mil toneladas por mês, ou 600 toneladas por dia e atua no município há 48 anos. A gestão dos RSU são de competência da Secretaria Municipal de Habitação e Saneamento – SMHS e a gestão de competência da Comcap. Portanto, a Comcap é responsável por serviços como a coleta convencional e seletiva, serviço de varrição, roçagem e capina, além da remoção de entulhos dentre muitos outros serviços (PMF, [201?]).

No que concerne a coleta seletiva na área de estudo, de acordo com o PMCS (Florianópolis, 2014), a coleta seletiva de resíduos em Florianópolis teve início no ano de 1986 abrangendo as comunidades do Monte Verde, Mocotó e da Avenida Beira Mar Norte. Ainda, segundo dados do PMCS cerca de 70% da população do município é atendida pelo sistema de coleta do tipo porta a porta, e cerca de 22% por sistemas como depósitos comunitários ou então por meio de coleta em ruas gerais.

São recolhidos pelo sistema de coleta seletiva do município materiais recicláveis secos, sem que haja segregação prévia destes, sendo então encaminhados para o Centro de Triagem de Materiais Recicláveis localizado no Centro de Transferência de Resíduos Sólidos (CTReS) no bairro Itacorubi. Os resíduos da coleta seletiva são então encaminhados para triagem nas associações de catadores, e.g. ACMR (Associação de Coletores de Materiais Recicláveis de Florianópolis/SC) lotada no próprio CTReS, ou então são encaminhados à

galpões de triagem com parceria firmada junto a Autarquia de Melhoramentos da capital (Comcap), (Florianópolis, 2014).

As associações desempenham papel fundamental no gerenciamento dos RSU do município. De acordo com o site da prefeitura de Florianópolis, os materiais da coleta seletiva formal são doados as 14 associações de triadores, sendo a ACMR a de maior porte, portanto, a que absorve maior parte dos materiais, mais de 50%.

É nas associações que ocorre a triagem e separação dos materiais recicláveis da coleta seletiva. Os materiais após serem processados e beneficiados, são então comercializados pelas associações com as 29 indústrias de reciclagem. Ainda, de acordo com dados da Prefeitura de Florianópolis, 7,15% dos RSU coletados no ano de 2019 foram desviados dos aterros sanitários em decorrência da coleta seletiva formal e do papel desempenhados pelas associações [2019?].

Após a separação dos recicláveis sobra a fração de rejeitos, composta por materiais que não possam ser reciclados ou que no momento não haja comércio na região para que sejam reciclados, portanto, são encaminhados para tratamento e disposição final em aterro sanitário. É essa fração que propomos que seja processada em CDR permitindo assim a recuperação energética dos rejeitos.

4.2 COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA DOS RSU PROVENIENTES DA COLETA SELETIVA

Conforme abordado na revisão bibliográfica, dada a heterogeneidade e variação na composição dos RSU a determinação gravimétrica da fração de rejeito é de suma importância para se determinar as características do CDR. É através do conhecimento da composição gravimétrica que se avalia o potencial energético do CDR independente do processo de geração da energia. “Esses parâmetros determinam a quantidade de energia possível de ser recuperada a partir dos RSU” (ASSAMOI; LAWRYSHYN, 2012 apud SCHRAMM, p. 61, 2015).

Para a análise da composição gravimétrica dos rejeitos provenientes da coleta seletiva de Florianópolis foi utilizado como base o Plano Municipal de Coleta Seletiva do Município de Florianópolis – PMCS publicado em 2016. O PMCS realizou no ano de 2014 um levantamento da geração de resíduos e da composição gravimétrica dos RSU provenientes da coleta convencional e da coleta seletiva.

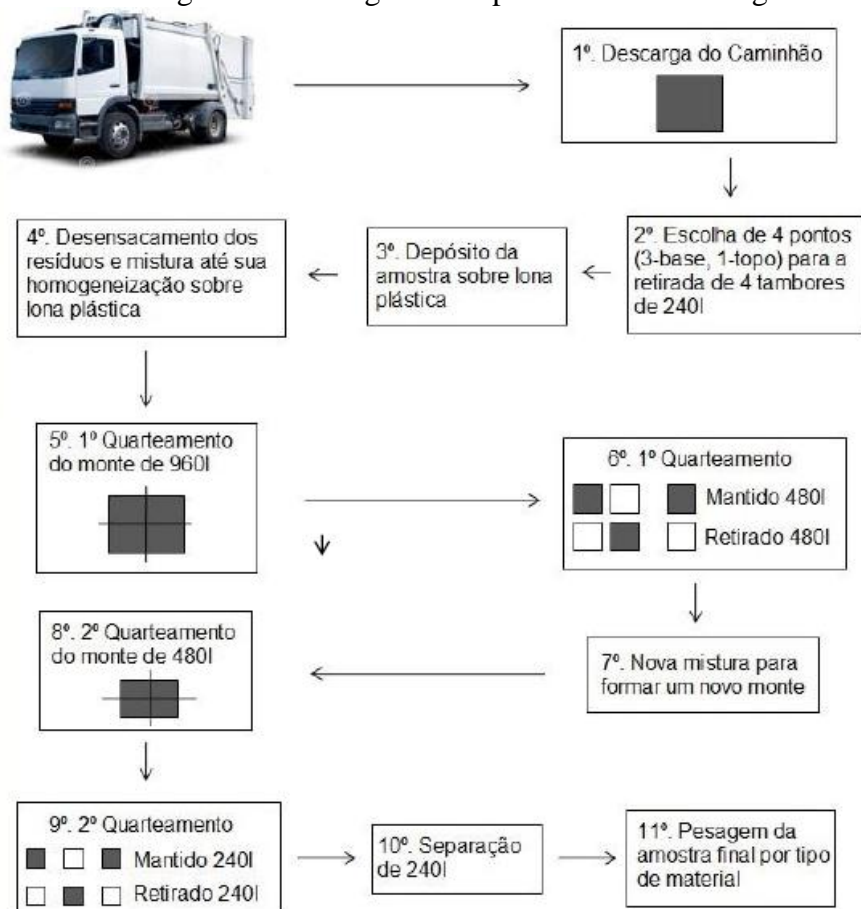
O estudo da caracterização dos resíduos para o PMCS foi realizado pela empresa Ampla Consultoria. Para composição do estudo foram analisados 20 roteiros da coleta convencional e 10 da coleta seletiva foram analisados roteiros com características diferentes entre si, de modo a se permitir a extrapolação dos resultados para os roteiros com características similares que não foram contemplados no levantamento. Assim, obteve-se uma estimativa das características qualitativas dos resíduos para o município.

Para a amostragem dos resíduos o estudo seguiu as diretrizes da NBR 10.007 de 2004 a qual dispõe sobre a amostragem de resíduos sólidos. Foi realizado o método do quarteamento o qual é definido como:

Processo de divisão em quatro partes iguais de uma amostra pré-homogeneizada, sendo tomadas duas partes opostas entre si para constituir uma nova amostra e descartadas as partes restantes. As partes não descartadas são misturadas totalmente e o processo de quarteamento é repetido até que se obtenha o volume desejado (ABNT, 2004).

O processo de amostragem dos resíduos da coleta seletiva está exposto no fluxograma da Figura 7.

Figura 7 – Fluxograma do processo de amostragem.



Fonte: PMF, 2016

Os resultados para a composição gravimétrica dos resíduos da coleta seletiva são exibidos no Quadro 3.

Quadro 3 – Composição gravimétrica dos resíduos da coleta seletiva de Florianópolis referente ao ano de 2014.

Produto	Sub-produto	Percentual total	Peso total (kg)
Resíduo orgânico	Poda e capina	0,18%	17.106
	Alimentos	1,12%	107.079
Papel		2,91%	277.809
Papelão		9,14%	872.527
Papel misto		26,80%	2.559.350
Plásticos moles	PEAD	0,28%	26.336
	PVC	0,47%	44.564
	PEBD	10,24%	977.327
	PP	0,18%	16.713
	OS	0,06%	5.641
	EPS	0,00%	0
	Plástico metalizado	0,56%	53.084
Plásticos duros	PET	5,39%	514.378
	PEAD	2,26%	215.925
	PVC	0,41%	38.712
	PEBD	0,10%	9.983
	PP	3,56%	340.135
	PS	1,00%	95.151
	EPS	0,38%	36.397
	Plástico metalizado	0,00%	55
	Outros	0,19%	18.443
Vidro		16,73%	1.597.210
Tetrapack		2,69%	256.894
Metais	Alumínio	1,35%	129.192
	Ferro	2,14%	204.109
	Outros	0,00%	0
Madeira		0,12%	11.521
Têxteis, trapo, couro		2,95%	281.717
Tóxicos		0,40%	38.205
Infectantes		1,64%	156.353
Fraldas e resíduo sanitário		0,81%	77.544
Resíduos da construção civil		0,08%	7.816
Borracha		0,24%	22.982
Eletrônicos		4,48%	428.021
Outros		1,15%	110.278
Total		100%	9.548.557

Fonte: PMF, 2016

Para a composição qualitativa dos rejeitos, adotou-se como rejeito os seguintes produtos: resíduo orgânico; madeira; têxteis e couro; borracha; sanitários; plástico metalizados e materiais plásticos com dois ou mais tipos de plásticos em sua composição. Além desses materiais também foi considerada uma porcentagem de 24% dos materiais recicláveis, de modo a reputar o citado por Mamede, o qual pontua que eficiência da técnica de segregação manual dos resíduos recicláveis é de 76%, portanto, a fração restante é descartada como rejeito (EPA, 1991 apud 2013). Não foram considerados os resíduos da construção civil e os resíduos da categoria outros pois não conferem características de interesse para a composição do CDR. Há de se considerar ainda que os resíduos sanitários foram considerados na fração de orgânico.

Logo, a composição gravimétrica dos rejeitos da coleta seletiva é apresentado no Quadro 4.

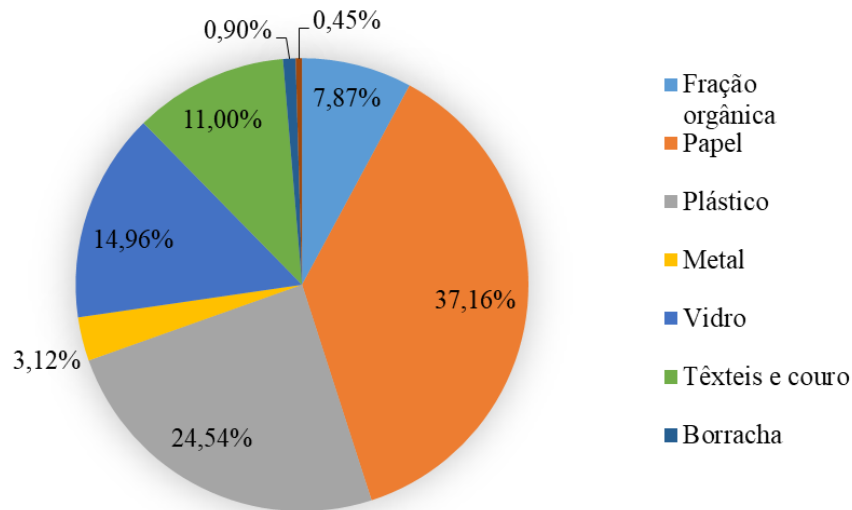
Quadro 4 - Composição gravimétrica dos rejeitos provenientes da coleta seletiva de Florianópolis referente ao ano de 2014.

Composição gravimétrica da fração de rejeito		
Fração gravimétrica	Peso total (kg)	(%)
Fração orgânica	201.729	7,87
Papel	951.979	37,16
Plástico	628.685	24,54
Metal	79.992	3,12
Vidro	383.330	14,96
Têxteis e couro	281.717	11,00
Borracha	22.982	0,90
Madeira	11.521	0,45
Total	2.561.936	100

Fonte: Elaboração própria

No Gráfico 1 é apresentada a contribuição de cada fração do rejeito para a composição do CDR.

Gráfico 1 – Composição do CDR por contribuição de cada fração.



Fonte: Elaboração própria

Com a composição gravimétrica dos rejeitos é possível prosseguir com a determinação do potencial energético através do poder calorífico.

4.3 DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO INFERIOR – PCI

De acordo com Kami (2019), para a estimativa do poder calorífico dos CDR é necessário, primeiro de tudo, a análise elementar e imediata das frações que compõem o combustível, as quais são de extrema importância para os cálculos de energia.

Da análise elementar determina-se as frações dos elementos constituintes dos materiais presentes no CDR. São elementos de interesse o carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N), oxigênio (O₂), e o enxofre (S) (KAMI, 2019).

Segundo Kami (2019), a análise imediata tem por finalidade a determinação do teor de umidade (W), teor de cinzas (Cz), material volátil (MV), e o carbono fixo (CF).

Os valores de referência para a análise elementar e imediata são encontrados na bibliografia e podem apresentar variações.

No Quadro 5 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.

Quadro 5 – Análise elementar e análise imediata de algumas das frações que compõe o CDR.

Fração Gravimétrica	Análise elementar					Análise imediata			
	C	H	O	N	S	Cz/inertes	W	MV	CF
Fração orgânica	0,48	0,064	0,376	0,026	0,004	5	0,7	21,4	3,6
Papel	0,434	0,058	0,443	0,003	0,002	6	0,1	75,6	8,4
Plástico	0,6	0,072	0,228	0	0	10	0,05	83	2
Metal	0,045	0,006	0,043	0,001	0	90,5	0,02	0	0
Vidro	0,005	0,001	0,004	0,001	0	98,9	0,011	0	0
Têxteis e couro	0,48	0,064	0,4	0,022	0,002	3,2	0,1	66	17,5
Borracha	0,697	0,087	0	0,02	0,016	20	0,012	83,9	4,9
Madeira	0,495	0,06	0,427	0,002	0,001	1,5	0,2	68,1	0

Fonte: Jimenez, 2016 apud Kami, 2019

A partir da análise elementar e imediata dos materiais de interesse é possível estimar o poder calorífico destes. Sendo o “poder calorífico, definido como a energia (bruta, líquida ou sob outra condição pré-definida) disponível em uma unidade de massa de um combustível” (POLI et al., p. 12, 2013).

Neste estudo foi determinado o Poder Calorífico Inferior – PCI, definido como o “calor liberado pela queima de uma unidade de massa do combustível, a uma pressão constante de uma atmosfera, permanecendo a água no estado vapor” (ABNT, 2004 apud POLI, p. 16, 2013).

O PCI pode ser estimado a partir do Poder Calorífico Superior – PCS, entalpia de vaporização da água e o teor de umidade do material de interesse. Abaixo são apresentadas as equações para a determinação do PCI de acordo com o teor de umidade. As equações foram extraídas de Kami (2019).

Para combustíveis com baixo teor de umidade o PCI é dado por:

$$\text{PCI úmido} = \text{PCS base seca} - W \cdot h_{LV} \quad (1)$$

Onde,

PCI úmido: poder calorífico inferior na condição úmida em (kcal/kg).

PCS base seca: poder calorífico superior na condição seca em (kcal/kg).

W: teor de umidade em (%).

h_{LV} : entalpia de vaporização da água a 25°C (kcal/kg).

São considerados com baixo teor de umidade os combustíveis com $W < 0,03$ (POLI et al., 2013).

Para combustíveis com alto teor de umidade o PCI é dado por:

$$\text{PCI úmido} = (1-W) \cdot \text{PCS base seca} - W \cdot h_{LV} \quad (2)$$

Onde,

PCI úmido: poder calorífico inferior na condição úmida em (kcal/kg).

PCS base seca: poder calorífico superior na condição seca em (kcal/kg).

W: teor de umidade em (%).

h_{LV} : entalpia de vaporização da água a 25°C (kcal/kg).

São considerados com alto teor de umidade os combustíveis com $W > 0,03$ (POLI et al., 2013).

Para combustíveis contendo hidrogênio o PCI é dado por:

$$\text{PCI úmido} = (1-W) \cdot \text{PCS base seca} - [(1 - W) \cdot 9 \cdot H + W] \cdot h_{LV} \quad (3)$$

Onde,

PCI úmido: poder calorífico inferior na condição úmida em (kcal/kg).

PCS base seca: poder calorífico superior na condição seca em (kcal/kg).

W: teor de umidade em (%).

h_{LV} : entalpia de vaporização da água a 25°C (kcal/kg).

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

A maioria dos combustíveis possui hidrogênio em sua composição o que gera uma quantidade de água adicional quando este reage com oxigênio durante a combustão (POLI, 2013).

Considerando a entalpia da água a 25°C $h_{LV} = 584,2$ kcal/kg podemos reescrever a equação (3) como (POLI, 2013):

$$\text{PCI úmido} = (1-W) \cdot \text{PCS base seca} - [(1 - W) \cdot 9 \cdot H + W] \cdot 584,2 \quad (4)$$

Deste modo, Poli et al. (2013) de maneira mais exemplificada descreve a equação do PCI úmido a ser adotada para os resíduos sólidos como: “PCI úmido = [energia total da fração seca] – [entalpia (energia) de vaporização da parcela de água impregnada no combustível] – [entalpia (energia) de vaporização da água adicional formada pelo Hidrogênio]”, uma vez que estes possuem alto teor de umidade e hidrogênio.

Assim, o PCI foi estimado por dedução a partir da composição elementar. Para tanto, a fins de comparação, foram utilizadas as equações de Dulong Modificada, Llyod & Davenport e Boye & Dodô extraídas de Poli et al. (2013).

Dulong Modificada

Através da equação de Dulong modificada pode-se obter os valores de PCS, conforme se segue:

$$\text{PCS base seca [kcal/kg]} = 7831 * \text{Corg} + 35932 * (\text{H} - \text{O}/8) + 2212 * \text{S} - 3545 * \text{Cinorg} + 1187 * \text{O} + 578 * \text{N} \quad (5)$$

Onde,

PCS base seca: Poder Calorífico Superior dos RSU (kcal/kg).

Corg: % em massa e em base seca de Carbono orgânico.

Cinorg: % em massa e em base seca de Carbono inorgânico.

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.

De acordo com Poli et al. (2013) a parcela referente ao carbono inorgânico não participa da combustão, portanto, se incorpora as cinzas. Isso porque esta fração é correspondente ao carbono mineralizado, principalmente na forma de carbonatos. Esta fração situa-se entre 0.8 – 1%, logo possui pouca influência, sendo de cerca de 32 kcal de um total de 3.500 kcal. “Portanto, ainda que esse parâmetro não tenha sido ensaiado, a parcela de 3545*Cinorg será considerada igual a 32 cal” (POLI et al., 2013).

Deste modo, considerando-se as equações 4 e 5 o PCI pela equação de Dulong Modificada é dado por:

$$PCI_w \text{ [kcal/kg]} = (1 - W) * [7831 * C + 35932 * (H - O/8) + 2212 * S + 1187 * O + 578 * N - 32] - [(1 - W) * 9 * H + W] * 583,2 \quad (6)$$

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.

De acordo com Kami (CHANG et al., 2007; KOMILIS et al., 2012 apud 2019) Os resultados obtidos por meio do modelo de Dulong Modificado além de produzir resultados muito próximos aos dos ensaios experimentais, é também uma forma bastante econômica e rápida para se estimar o poder calorífico do CDR. Kami (2019) salienta que a determinação da composição gravimétrica pode implicar em incertezas em decorrência da heterogeneidade dos RSU.

Lloyd e Davenport

Por meio da equação de Lloyd e Davenport pode-se obter os valores de PCS, conforme se segue:

$$PCS \text{ base seca [kcal/kg]} = (1 - W) * [8546 * C + 27126 * H - 2018 * O + 1419 * N + 2672 * S] \quad (7)$$

Deste modo, considerando-se as equações 4 e 7 o PCI pela equação de Lloyd e Davenport é dado por:

$$PCI_w \text{ [kcal/kg]} = (1 - W) * [8546 * C + 27126 * H - 2018 * O + 1419 * N + 2672 * S] - [(1 - W) * 9 * H + W] * 583,2 \quad (8)$$

Onde,

PCS base seca: Poder Calorífico Superior dos RSU (kcal/kg).

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.

Boye

Por meio da equação de Boye pode-se obter os valores de PCS, conforme se segue:

$$\text{PCS base seca [kcal/kg]} = 8400 \cdot C + 27766 \cdot H - 2649 \cdot O + 1500 \cdot N + 2672 \cdot S \quad (9)$$

Deste modo, considerando-se as equações 4 e 9 o PCI pela equação de Boye é dado por:

$$\text{PCI}_w \text{ [kcal/kg]} = (1 - W) \cdot [8400 \cdot C + 27766 \cdot H - 2649 \cdot O + 1500 \cdot N + 2672 \cdot S] - [(1 - W) \cdot 9 \cdot H + W] + 583,2 \quad (10)$$

Onde,

PCS base seca: Poder Calorífico Superior dos RSU (kcal/kg).

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.

Assim, a partir da composição gravimétrica dos rejeitos da coleta seletiva e da análise elementar e imediata destas frações, com o auxílio das equações acima expostas, determinou-se o PCI do CDR.

4.4 ESTIMATIVA DAS EMISSÕES

Para estimar as emissões provenientes da combustão do CDR foi aplicada a metodologia AP-42 da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA). Por meio de fatores de emissão característicos da fonte de emissão é possível estimar a quantidade de poluentes emitida.

Os fatores de emissão são valores representativos que podem ser associados a quantidade de um poluente relacionado a uma atividade e que é emitido para a atmosfera. Esses fatores geralmente são expressos como a massa do poluente em unidade de massa, volume, distância, ou duração da atividade de emissão dos poluentes. Tais fatores facilitam a estimativa das emissões de várias fontes de poluição atmosférica. Na maioria dos casos, esses fatores são obtidos a partir da média dos dados disponíveis, portanto, assume-se que são representativos a longo termo (EPA, 2010).

A equação geral para a estimativa de emissões é expressa a seguir.

$$E = A * EF \quad (10)$$

Onde,

E: Emissão (g/ton).

A: Taxa de atividade (ton).

EF: Fator de emissão (kg/mg).

Para o presente estudo foram considerados os seguintes poluentes: MP, SO₂, NO₂, CO, HCL, dioxnas, As, Ni, Cd, Hg e Pb. Os fatores de emissão característicos da combustão do CDR foram retirados do quadro da AP-42 Cap. 2, seção 2-1 e são apresentados no Quadro 6.

Quadro 6 – Fatores de emissão.

Poluente	Sem dispositivo de controle	SD/Filtros de tecido
	Fator de emissão (kg/mg)	Fator de emissão (kg/mg)
MP total	3,48 E+01	6,64 E-02
SO _x (SO ₂)	1,95 E+00	2,21 E-01
NO _x (NO ₂)	2,51 E+00	2,51 E+00
CO	9,6 E-01	9,6 E-01
CCI (HCl)	3,49 E+00	2,64 E-02
Dioxinas	4,73 E-06	1,22 E-08
Arsênio (As)	2,97 E-03	2,59 E-06
Níquel (Ni)	2,18 E-03	3,15 E-05
Cádmio (Cd)	4,37 E-03	1,66 E-05
Mercúrio (Hg)	2,8 E-03	1,46 E-04
Chumbo (Pb)	1,00 E-01	5,19 E-04

Fonte: EPA, 1996

Ressaltamos que foram realizadas estimativas da emissões para dois cenários, sem dispositivo de controle da poluição atmosférica e com dispositivo de controle composto por *Spray drying* e filtros manga.

As emissões foram calculadas considerando-se uma taxa de execução de 1 tonelada de CDR.

A fins de comparação, foi realizado o cálculo das emissões para os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos conforme a Resolução CONAMA 316 de 2002, haja vista que estes estão expressos em miligrama por normal metro cúbico (mg/Nm³) (Quadro 7). Para o cálculo dos fatores de emissão foi considerado o volume médio de emissão de uma planta de incineração na Europa o qual segundo Leme (2010) é de 5.500 Nm³/ton de CDR.

Deste modo, foram obtidos os seguintes fatores de emissão conforme exposto no Quadro 8. Ressalta-se que foram resumidos no Quadro 8 as emissões para os poluentes cujo fator de emissão consta na AP-42 da EPA, portanto, alguns dos poluentes não são exibidos.

Quadro 7 – Limite de emissões atmosféricas para o tratamento térmico em (mg/Nm³) de resíduos de acordo com a Resolução CONAMA 316 de 2002.

Poluente	(mg/Nm ³)	Poluente	(mg/Nm ³)	Poluente	(mg/Nm ³)
MP total	70	Classe I		Classe III	
SO _x (SO ₂)	280	Arsênio (As)		Antimônio (Sb)	
NO _x (NO ₂)	560	Cobalto (Co)	0,28	Chumbo (Pb)	
CO	123	Níquel (Ni)	no total	Cromo (Cr)	
CCI (HCl)	80	Telúrio (Te)		Cianetos (CN)	
CFI (HF)	5	Selênio (Se)		Cobre (Cu)	
Dioxinas	0,0005	Classe II		Estanho (Sn)	7,00
		Cádmio (Cd)	1,4	Fluoretos (F)	no total
		Mercúrio (Hg)	no total	Manganês (Mn)	
		Tálio (Tl)		Platina (Pt)	
				Paládio (Pd)	
				Ródio (Rh)	
				Vanádio (V)	

Fonte: CONAMA 316 de 2002

Quadro 8 – Emissões atmosféricas para o tratamento térmico de resíduos em (g/ton) considerando-se a Resolução CONAMA 316 de 2002.

Poluente	Emissão (g/ton)
MP total	385
SO _x (SO ₂)	1540
NO _x (NO ₂)	3080
CO	676,5
CCI (HCl)	440
Dioxinas	0,00275
Arsênio (As)	1,54
Níquel (Ni)	
Cádmio (Cd)	7,7
Mercúrio (Hg)	
Chumbo (Pb)	38,5

Fonte: Elaboração própria

Deste modo, foram calculadas as emissões para a queima do CDR com e sem sistema de controle de poluição atmosférica e estas foram comparadas com as emissões equivalentes da Resolução CONAMA 316 de 2002.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 DETERMINAÇÃO DO PCI

Conforme aludido anteriormente, foi determinado o potencial energético da fração de rejeitos dos resíduos da coleta seletiva. Haja vista que considerou-se a utilização dos rejeitos tal qual são disponibilizados após a separação dos recicláveis, o CDR é, portanto, CDR-1 segundo classificação da ASTM.

Para a determinação do PCI do CDR foram utilizadas as equações de Dulong Modificada, Lloyd e Davenport e Boye a fins de comparação. Os resultados para cada um dos modelos utilizados é apresentado a seguir.

- Dulong Modificada

No Quadro 9 estão exibidos os valores de PCI obtidos pela equação de Dulong Modificada.

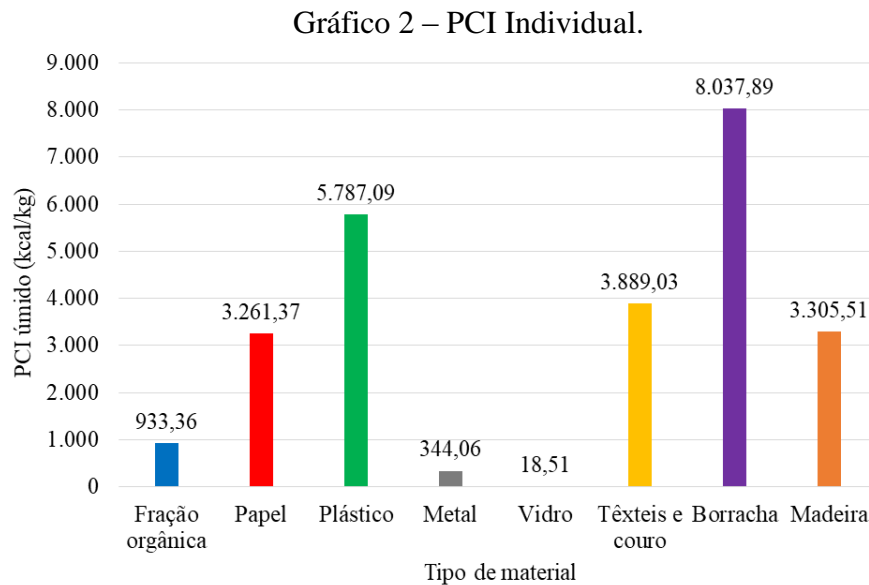
Quadro 9 – Resultado da determinação do PCI pela equação de Dulong Modificada.

Fração Gravimétrica	Peso total (kg)	Peso total (%)	PCI _{úmido} Individual (kcal/kg)	PCI _{úmido} Individual (kJ/kg)	Contribuição ao PCI _{úmido} Total (kJ/kg)	Contribuição em % ao PCI _{úmido} Total
Fração orgânica	201.729	7,87	933,36	3.905,16	307,50	2,27
Papel	951.979	37,16	3.261,37	13.645,57	5.070,50	37,48
Plástico	628.685	24,54	5.787,09	24.213,17	5.941,78	43,92
Metal	79.992	3,12	344,06	1.439,53	44,95	0,33
Vidro	383.330	14,96	18,51	77,43	11,59	0,09
Têxteis e couro	281.717	11,00	3.889,03	16.271,70	1.789,28	13,23
Borracha	22.982	0,90	8.037,89	33.630,52	301,68	2,23
Madeira	11.521	0,45	3.305,51	13.830,24	62,19	0,46
Total	2.561.936	100,00		0,00	13.529,46	100

Fonte: Elaboração própria

É possível observar da análise da coluna 4 do quadro, “PCI úmido Individual (kcal/kg)” que os materiais com PCI mais alto são as borrachas, os plásticos, os papéis, madeira e os têxteis e couros. Isso ocorre pois esses materiais têm uma maior concentração de carbono em sua composição elementar, além de possuírem menor teor de umidade quando comparados aos demais materiais, sendo este último fator o de maior impacto no valor do PCI

para a maioria dos materiais. Para melhor exemplificar, o PCI de cada material é exposto no Gráfico 2.



Fonte: Elaboração própria

Após a determinação do PCI úmido Individual, ou seja, o PCI de cada um os materiais foi verificada a contribuição de cada um desses materiais para com o PCI total em função de sua participação na composição gravimétrica do CDR.

Deste modo, apesar de a borracha ter um PCI individual bastante elevado, da ordem de 33.500 kJ/kg, em função da participação deste material na composição gravimétrica ser de 0,90%, sua contribuição ao PCI total foi de apenas 301,68 kJ/kg.

O material com maior contribuição ao PCI total do CDR foi plástico, isto em função de seu alto PCI individual, da ordem de 24.000 kJ/kg, e de sua participação na composição gravimétrica representando 24,54%, assim, sua contribuição para o PCI total foi de 5.941,78 kJ/kg.

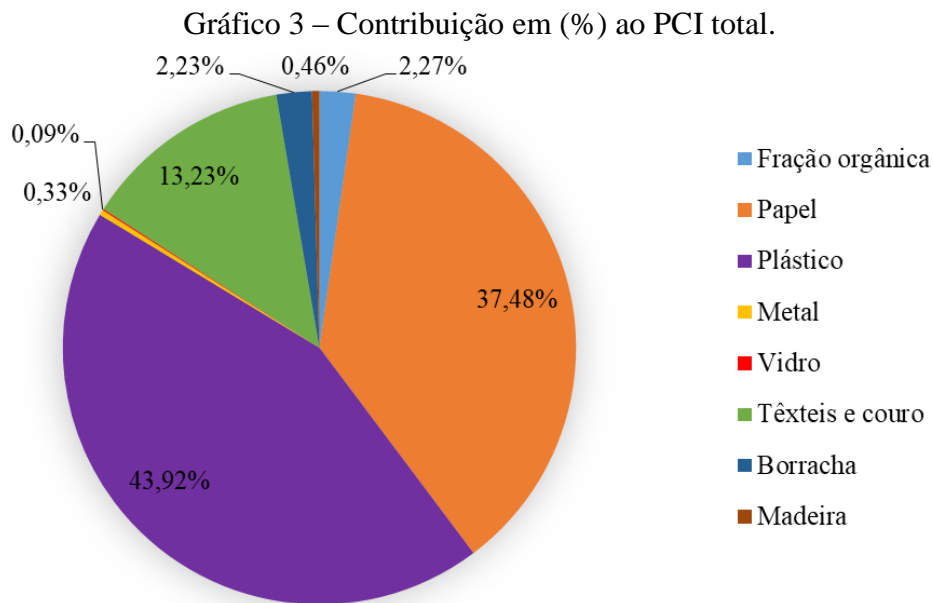
O papel apesar de apresentar a maior contribuição para a composição gravimétrica 37,16%, apresenta um PCI de cerca de 50% do PCI do plástico, portanto, sua contribuição ao PCI total é inferior à do plástico, logo, contribuindo com 5.070,50 kJ/kg.

A menor contribuição foi a do vidro, que apesar de representar 14,96% da composição gravimétrica do CDR, possui o menor PCI individual de apenas 77,43 kJ/kg, portanto, sua contribuição ao PCI total foi de apenas 11,59 kJ/kg. Em contraste com o metal cuja contribuição para a composição gravimétrica do CDR foi de cerca de 5 vezes menor que

a do vidro, no entanto, apresentou uma contribuição ao PCI total CDR de 44,95 kJ/kg, cerca de 4 vezes maior que a do vidro.

Deste modo, fica evidenciado a importância da composição gravimétrica do resíduo para com a qualidade do CDR.

O Gráfico 3 apresenta a contribuição em (%) de cada material ao PCI total do CDR. Essa contribuição se dá em função do PCI individual de cada material e sua participação na composição gravimétrica do resíduo a ser utilizado como CDR.



Fonte: Elaboração própria

O PCI total do CDR obtido pela equação de Dulong Modificada foi de 13.529,46 kJ/kg. Deste modo, considerando-se que a quantidade de rejeito da coleta seletiva gerada ao longo de 1 ano seja de cerca de 2.500.000 kg, é possível em 1 ano gerar 9.395.461,68 kWh.

Considerando-se que o consumo médio de energia elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC entre os anos de 2013 – 2018 foi da ordem de 26.000.000 kWh, verifica-se que o CDR poderia suprir cerca de 37% da demanda de energia ao longo de 1 ano (UFSC, [2018?]).

- Lloyd e Davenport

No Quadro 10 estão exibidos os valores de PCI obtidos pela equação de Lloyd e Davenport.

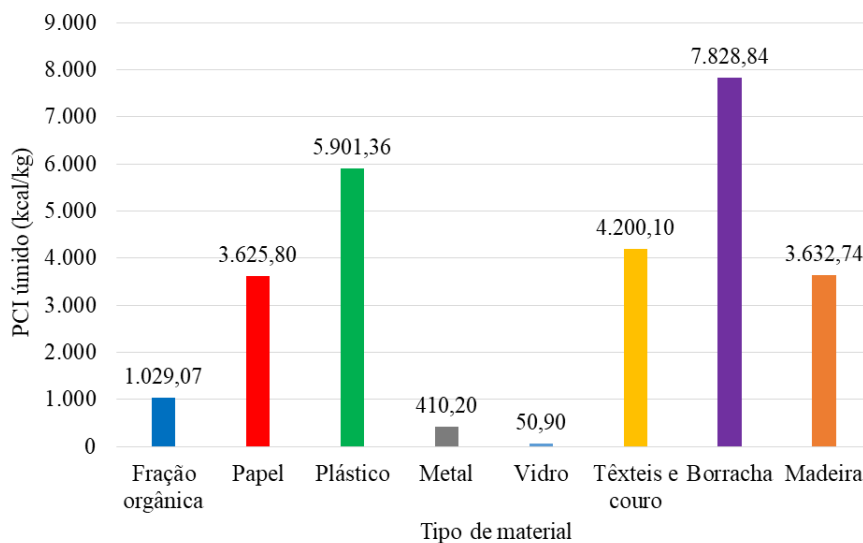
Quadro 10 – Resultado da determinação do PCI pela equação de Lloyd e Davenport.

Fração Gravimétrica	Peso total (kg)	Peso total (%)	PCI _{úmido} Individual (kcal/kg)	PCI _{úmido} Individual (kJ/kg)	Contribuição ao PCI _{úmido} Total (kJ/kg)	Contribuição em % ao PCI _{úmido} Total
Fração orgânica	201.729	7,87	1.029,07	4.305,63	339,03	2,35
Papel	951.979	37,16	3.625,80	15.170,35	5.637,09	39,10
Plástico	628.685	24,54	5.901,36	24.691,30	6.059,11	42,03
Metal	79.992	3,12	410,20	1.716,30	53,59	0,37
Vidro	383.330	14,96	50,90	212,97	31,87	0,22
Têxteis e couro	281.717	11,00	4.200,10	17.573,24	1.932,40	13,41
Borracha	22.982	0,90	7.828,84	32.755,87	293,84	2,04
Madeira	11.521	0,45	3.632,74	15.199,39	68,35	0,47
Total	2.561.936	100			14.415,27	100

Fonte: Elaboração própria

Análogo aos resultados obtidos pela equação de Dulong Modificada, é possível observar que os materiais com PCI mais alto são as borrachas, os plásticos, os papéis, madeira e os têxteis e couros. Para melhor exemplificar, o PCI de cada material é exposto no Gráfico 4.

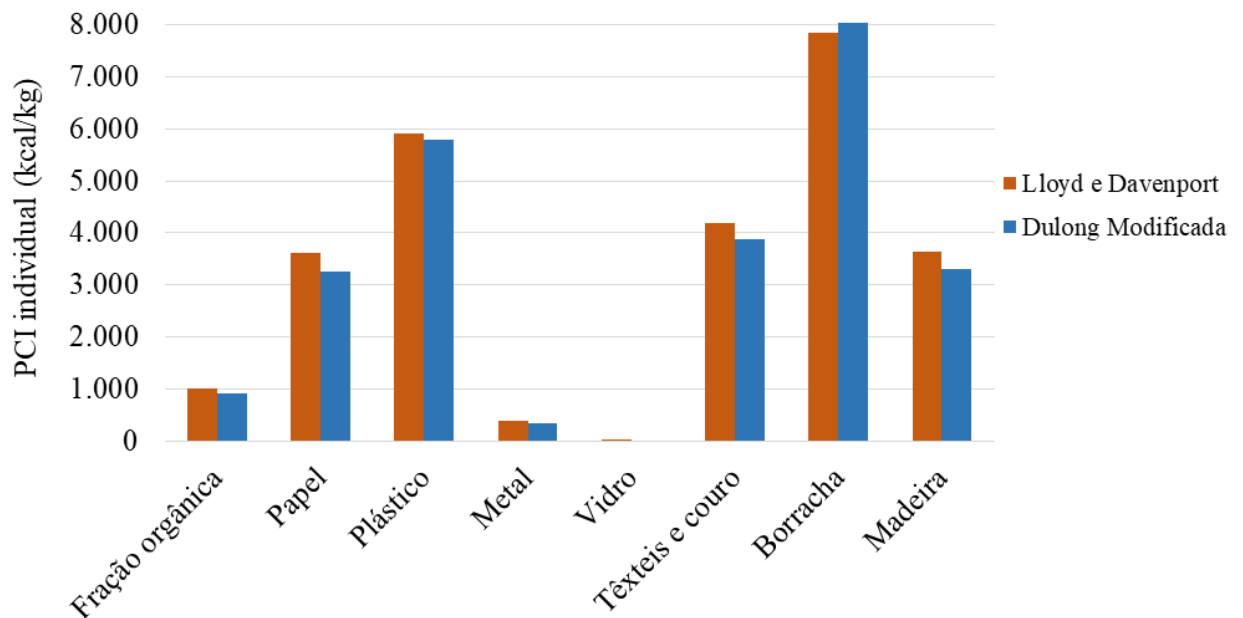
Gráfico 4 – PCI Individual.



Fonte: Elaboração própria

Quando aplicada a equação de Lloyd e Davenport é possível observar que houve uma certa variação no PCI individual dos materiais, quando comparados ao PCI individual obtido pela equação de Dulong, isso se deve ao fato de o peso atribuído aos elementos elementares ser diferente. O Material que apresentou maior variação em seu PCI foi o vidro o qual teve um aumento de cerca de 63%, seguido do metal que apresentou um aumento de aproximadamente 16%, já o PCI da borracha diminuiu em quase 3%. No Gráfico 5 é possível observar a variação do PCI individual para cada material com relação aos PCIs individuais obtidos pela equação de Dulong Modificada.

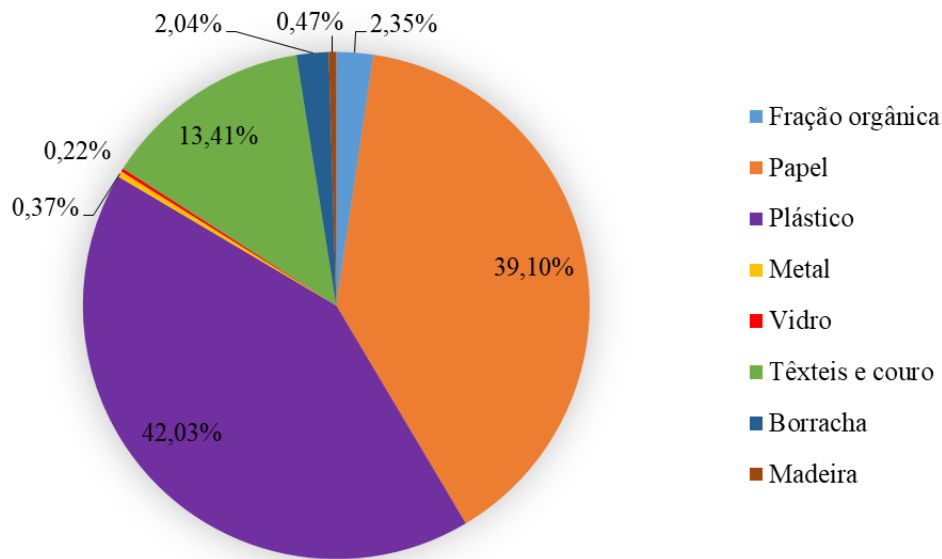
Gráfico 5 – Variação do PCI individual.



Fonte: Elaboração própria.

O Gráfico 6 apresenta a contribuição em (%) de cada material ao PCI total do CDR. Essa contribuição se dá em função do PCI individual de cada material e sua participação na composição gravimétrica do resíduo a ser utilizado como CDR.

Gráfico 6 – Contribuição em (%) ao PCI total.



Fonte: Elaboração própria

Apesar de observada uma certa variação nos PCIs individuais as contribuições em porcentagem para com o PCI total são semelhantes, bem como o PCI total apresentou uma pequena variação. Sendo o PCI do CDR calculado com a equação de Lloyd e Davenport de 14.415,27 kJ/kg, ou seja, a diferença para com o PCI total obtido pela equação de Dulong Modificada foi de 885,80 kJ/kg.

Deste modo, com um PCI total de 14.415,27 kJ/kg, podem ser gerados 10.258.609,41 kWh, portanto, podendo atender o equivalente à 40% da demanda da UFSC durante o período de 1 ano.

- Boye

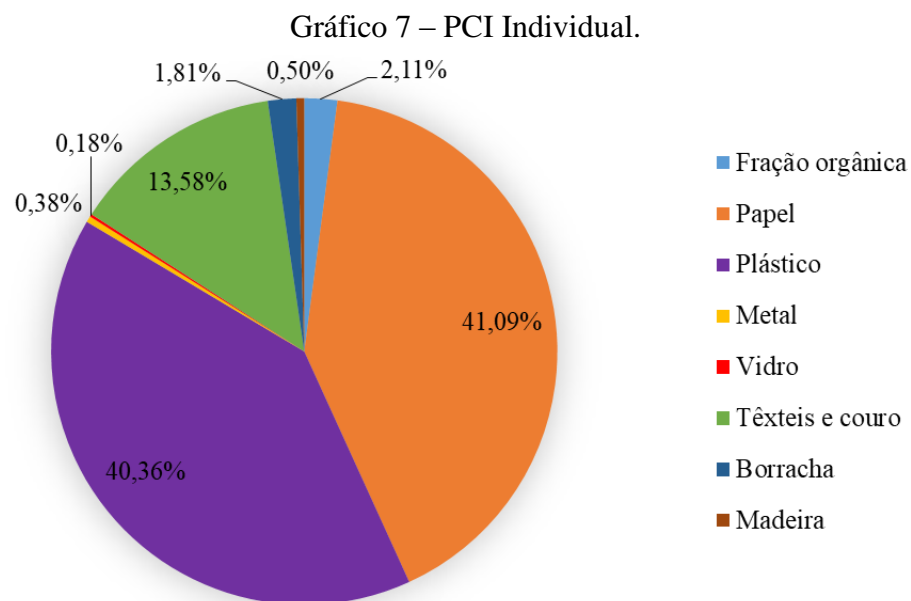
No Quadro 11 estão exibidos os valores de PCI obtidos pela equação de Boye.

Quadro 11 – Resultado da determinação do PCI pela equação de Boye.

Fração Gravimétrica	Peso total (kg)	Peso total (%)	PCI _{úmido} Individual (kcal/kg)	PCI _{úmido} Individual (kJ/kg)	Contribuição ao PCI _{úmido} Total (kJ/kg)	Contribuição em % ao PCI _{úmido} Total
Fração orgânica	201.729	7,87	715,49	2.993,61	235,72	2,11
Papel	951.979	37,16	2.957,59	12.374,57	4.598,21	41,09
Plástico	628.685	24,54	4.399,82	18.408,86	4.517,43	40,36
Metal	79.992	3,12	329,38	1.378,14	43,03	0,38
Vidro	383.330	14,96	31,42	131,44	19,67	0,18
Têxteis e couro	281.717	11,00	3.302,66	13.818,32	1.519,50	13,58
Borracha	22.982	0,90	5.398,26	22.586,31	202,61	1,81
Madeira	11.521	0,45	2.962,36	12.394,49	55,74	0,50
Total	2.561.936	100			11.191,91	100

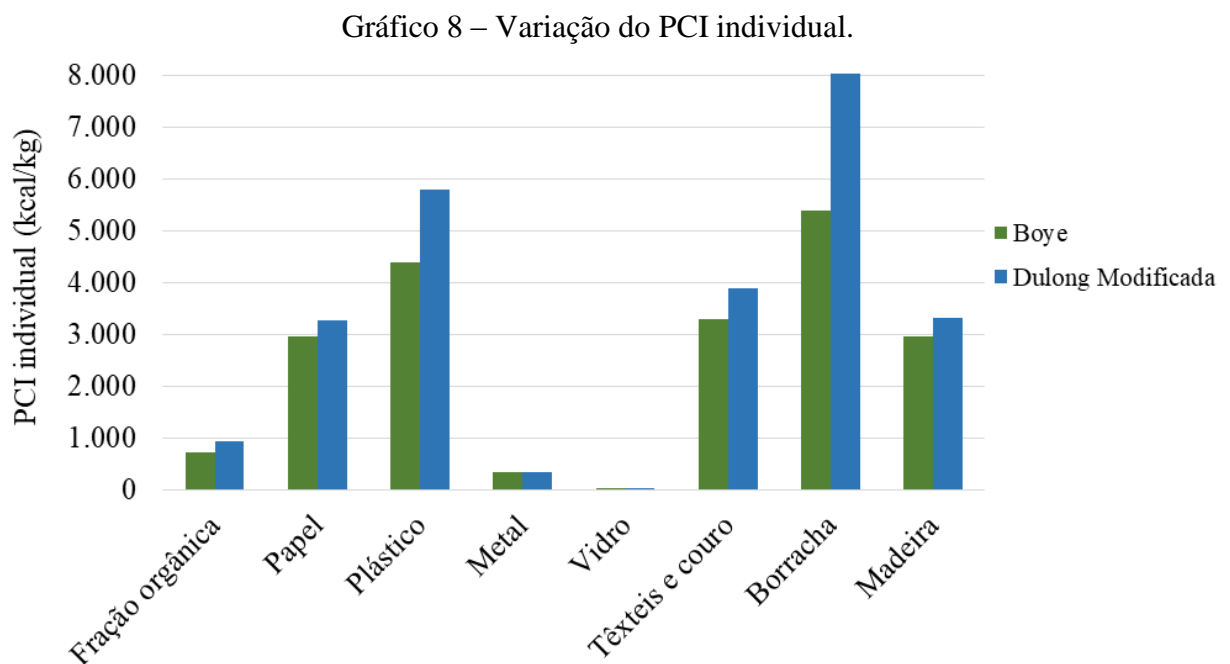
Fonte: Elaboração própria

Análogo aos resultados obtidos pela equação de Dulong Modificada, é possível observar que os materiais com PCI mais alto são as borrachas, os plásticos, os papéis, madeira e os têxteis e couros. Para melhor exemplificar, o PCI de cada material é exposto no Gráfico 7.



Fonte: Elaboração própria

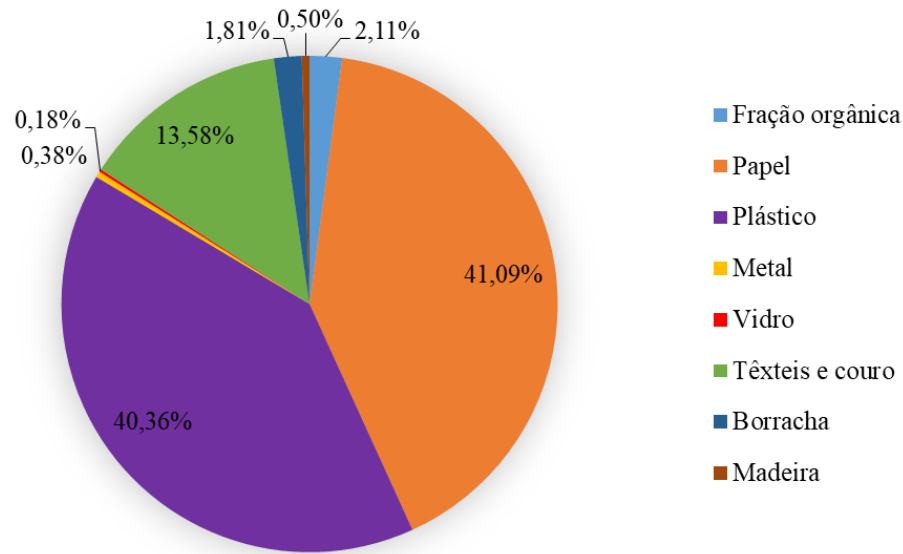
Quando aplicada a equação de Boye é possível observar que houve uma certa variação no PCI individual dos materiais, quando comparados ao PCI individual obtido pela equação de Dulong, isso se deve ao fato de o peso atribuído aos elementos elementares ser diferente. Com exceção do vidro o qual apresentou um aumento da ordem de 41% em seu PCI, todos os materiais apresentaram redução em seu PCI pela equação de Boye. O material que apresentou maior variação em seu PCI foi a borracha a qual teve uma redução de cerca 49%. No Gráfico 8 é possível observar a variação do PCI individual para cada material com relação aos PCIs individuais obtidos pela equação de Dulong Modificada.



Fonte: Elaboração própria.

O Gráfico 9 apresenta a contribuição em (%) de cada material ao PCI total do CDR. Essa contribuição se dá em função do PCI individual de cada material e sua participação na composição gravimétrica do resíduo a ser utilizado como CDR.

Gráfico 9 – Contribuição em (%) ao PCI total.



Fonte: Elaboração própria

Foi verificada uma variação significativa nos PCIs individuais, o que refletiu no valor do PCI total. O PCI do CDR calculado com a equação de Boye foi de 11.191,91 kJ/kg, ou seja, a diferença para com o PCI total obtido pela equação de Dulong Modificada foi de 2.337,55 kJ/kg.

Deste modo, com um PCI total de 11.191,91 kJ/kg, podem ser gerados 7.964.709,50 kWh, portanto, podendo atender o equivalente à 30% da demanda da UFSC durante o período de 1 ano.

5.2 ESTIMATIVA DAS EMISSÕES

Conforme abordado na metodologia, as estimativas das emissões para a queima do CDR foram calculadas com os fatores de emissão da AP-42. Para fins de comparação com o exposto na legislação vigente, a CONAMA 316 de 2002, os limites estabelecidos nesta foram convertidos de mg/Nm³ para g/ton considerando-se uma taxa de emissão de 5.500 Nm³/ton.

As estimativas das emissões da queima do CDR foram calculadas para duas situações sem e com dispositivo de controle. Para a primeira situação não foi considerado nenhum dispositivo de controle de poluição ATM, ou seja, as emissões são para efluente gasoso lançado sem nenhum tipo de tratamento. No entanto, ressalta-se que na prática isto não deve acontecer a fins de cumprimento com as legislações ambientais. Já na segunda situação, foram considerados dois dispositivos de controle filtros manga e o *spray drying*.

O Quadro 12 apresenta de maneira sintetizada os resultados das emissões para as duas situações adotadas.

Quadro 12 – Resultados das estimativas das emissões.

Poluente	Sem dispositivo de controle	SD/Filtros de tecido
	Emissão (g/ton)	Emissão (g/ton)
MP total	34800	66,4
SO _x (SO ₂)	1950	221
NO _x (NO ₂)	2510	2510
CO	960	960
CCI (HCl)	3490	26,4
Dioxinas	0,00473	0,0000122
Arsênio (As)	5,15	0,03409
Níquel (Ni)		
Cádmio (Cd)	7,17	0,1626
Mercúrio (Hg)		
Chumbo (Pb)	100	0,519

Fonte: Elaboração própria

Analisando o Quadro 12 é possível observar que com a adoção dos dispositivos de controle de poluição atmosférica é significativa a redução da emissão da maioria dos poluentes, com exceção dos NO_x e do CO os quais não foram reduzidos com os dispositivos de controle adotados. A redução média foi de 99,24%, sendo que o poluente que apresentou maior redução na emissão foi o MP uma redução de 99,81%, e o com menor redução foi o SO_x com uma redução de 88,67%. Isso porque quando associados, os filtros manga e o *spray drying* promovem a remoção de MP, metais, gases ácidos, dioxinas e furanos e SO₂ (EPA, 1996).

Os resultados do comparativo das emissões estimadas com o limite exposto na legislação vigente são exibidos no Quadro 13.

Quadro 13 – Comparativo entre as emissões estimadas e o exposto na Resolução CONAMA 316 de 2002.

Poluente	Sem dispositivo de controle	SD/Filtros de tecido	CONAMA 316/2002
	Emissão (g/ton)	Emissão (g/ton)	Emissão (g/ton)
MP total	34800	66,4	385
SO _x (SO ₂)	1950	221	1540
NO _x (NO ₂)	2510	2510	3080
CO	960	960	676,5
CCI (HCl)	3490	26,4	440
Dioxinas	0,00473	0,0000122	0,00275
Arsênio (As)	5,15	0,03409	1,54
Níquel (Ni)			
Cádmio (Cd)	7,17	0,1626	7,7
Mercúrio (Hg)			
Chumbo (Pb)	100	0,519	38,5

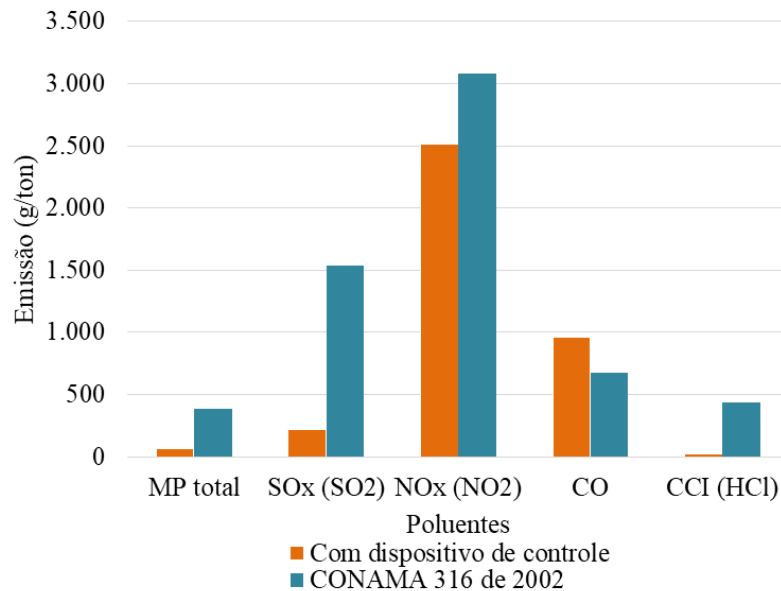
Fonte: Elaboração própria

Do Quadro 13 pode se verificar que com exceção do CO, os demais poluentes apresentaram-se em concentração dentro do limite estabelecido pela legislação vigente, isso para o caso das emissões considerando-se o uso conjunto dos dispositivos de controle do tipo filtro manga e *spray drying*. É importante ressaltar que podem ser adotados outros dispositivos de controle, no entanto, optou-se pelo filtro manga e o *spray drying*, pois além de serem os mais comuns foram os que apresentaram os menores fatores de emissão, de modo que estes são os mais eficientes no tratamento das emissões provenientes da queima do CDR.

O

Gráfico 10 ilustra o comparativo entre as emissões estimadas adotando-se o uso de dispositivos de controle e as emissões segundo a Resolução CONAMA 316 de 2002.

Gráfico 10 – Comparativos das emissões.



Fonte: Elaboração própria

Os metais e as dioxinas foram omitidos no

Gráfico 10, devido as suas baixas concentrações as quais não se ajustaram a escala, no entanto, pontua-se que esses poluentes apresentaram-se em concordância com o exposto na legislação.

Reitera-se que o poluente CO apresentou-se acima do limite máximo permitido pela CONAMA 316 de 2002. Salienta-se, no entanto, que a emissão de CO pode e deve ser controlada por meio do controle da injeção de ar durante o processo de combustão do CDR, conforme foi aludido na revisão bibliográfica, tanto oxigênio em excesso quanto a deficiência deste durante o processo de combustão elevam as emissões de CO.

Não é comum a ocorrência de altas concentrações de CO em ambientes externo. Porém, quando as concentrações de CO nos ambientes externos está elevada, está pode implicar em complicações para alguns grupos de pessoas com problemas cardíacos. Quando em um ambiente com elevadas concentrações de CO este grupo de pessoas pode ter a quantidade de oxigênio transportada para coração reduzida e dores no peito, essa condição é conhecida como angina (EPA, 2016).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Da busca por soluções imediatas, muitas vezes impensadas a longo prazo e até mesmo de modo realista e praticável, é que surgem os maiores desafios hoje encarados acerca da gestão dos resíduos sólidos. Quando se trata dos resíduos sólidos há de se considerar os processos e escalas geração e a hierarquia de seu gerenciamento.

Conforme abordado na revisão bibliográfica, a hierarquia dos resíduos sólidos visa nesta ordem de prioridade: a não geração, redução; reutilização; reciclagem; recuperação; e por fim, tratamento e disposição final dos resíduos sólidos. Deste modo, dada a demanda por novas alternativas energéticas, bem como a necessidade de explorar alternativas ao aterro sanitário, faz um considerar a recuperação energética dos resíduos sólidos. Além de ser uma fonte de energia renovável, o CDR ainda reduz significativamente a quantidade de resíduos encaminhadas para os aterros sanitários.

Conforme verificado nos resultados o CDR proveniente da fração de rejeitos da coleta seletiva do Município de Florianópolis teria a capacidade de atender algo entre 30 a 35% da demanda energética da UFSC. No entanto, devemos considerar que estamos avaliando um município com baixa densidade populacional, quando comparado à outras capitais como São Paulo, Rio de Janeiro e Brasília, as quais possuem população na casa dos milhões. Deve-se considerar também, que neste estudo foram avaliados apenas os rejeitos provenientes da coleta seletiva, podendo ainda ser explorada a utilização de materiais selecionados da coleta convencional os quais atendam as especificações do CDR. Sendo a proposição de um consórcio dentre os municípios da região da Grande Florianópolis, uma alternativa para se aumentar a geração de CDR, de modo a viabilizar o processo de recuperação energética.

No tocante as emissões foi verificado que com a adoção de dispositivos de controle de poluição atmosférica as emissões de poluentes podem ser reduzidas de maneira significativa, de modo a satisfazer o exposto na legislação vigente. Isso com a exceção de um poluente, o CO cuja a formação e emissão podem ser controladas através do controle do processo de combustão.

Assim, evidencia-se o potencial do CDR como uma alternativa energética viável do ponto de vista do potencial energético oferecido pela composição deste, bem como, do ponto

de vista ambiental naquilo que concerne não apenas a quantidade de resíduos passível de ser desviada dos aterros sanitários, mas também com relação ao impacto da qualidade do ar tendo por base as emissões provenientes da combustão do CDR. Salienta-se no entanto, a necessidade de um estudo mais aprofundado para a avaliação dos impactos ambientais, incluindo o tocante a qualidade do ar.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Norma Brasileira nº NBR 10.004, de 31 de maio de 2004. **Resíduos Sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro, RJ.

_____. Norma Brasileira nº NBR 10.007, de 31 de maio de 2004. **Amostragem de Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro, RJ.

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Recuperação Energética**. Resíduos Sólidos Urbanos. Brasil, 2012.

BRASIL. **Decreto nº 7.404**, de 23 de dezembro de 2010. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências. Brasília, DF, 23 dez. 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/Decreto/D7404.htm>. Acesso em: 13 nov. 2019.

_____. **Lei nº 12.305**, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF, 02 ago. 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em: 13 nov. 2019.

_____. **Resolução CONAMA nº 316**, de 29 de outubro de 2002. Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos. Brasília, DF, 29 out. 2002. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=338>>. Acesso em: 10 dez. 2019.

_____. Ministério do Meio Ambiente. **Coleta Seletiva**. [201-]. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/catadores-de-materiais-reciclaveis/reciclagem-e-reaproveitamento.html>>. Acesso em: 03 dez. 2019.

CAMPANI, Darci Barnech. A política nacional de resíduos sólidos e a sustentabilidade de nossa sociedade. In: AMARO, Aurélio Bandeira; VERDUM, Roberto. **Política Nacional de Resíduos Sólidos e suas interfaces com o espaço geográfico**: entre conquistas e desafios. Porto Alegre: Letra1, 2016, p. 13-21.

DEUS, Rafael Mattos; BATTISTELLE, Rosane Aparecida Gomes; SILVA, Gustavo Henrique Ribeiro. Resíduos sólidos no Brasil: contexto, lacunas e tendências. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s.l.], v. 20, n. 4, p.685-698, dez. 2015. FapUNIFESP (SciELO).. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v20n4/1413-4152-esa-20-04-00685.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2020.

EPA. Environmental Protection Agency. **Criteria for the Definition of Solid Waste and Solid and Hazardous Waste Exclusions**. 2016. Disponível em:<

<https://www.epa.gov/hw/criteria-definition-solid-waste-and-solid-and-hazardous-waste-exclusions>>. Acesso em: 03 nov. 2019.

_____ AP 42, Fifth Edition, Volume I, Chapter 2: Solid Waste Disposal. 2.1 Refuse Combustion, maio 1993.

_____ AP 42, Fifth Edition, Volume I, Chapter 2: Solid Waste Disposal. 2.1 Refuse Combustion, Final Section - Supplement B, out. 1996.

_____ **Basic Information of Air Emissions Factors and Quantification.** 201. Disponível em:< <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/basic-information-air-emissions-factors-and-quantification>>. Acesso em: 01 jan. 2020.

_____ **Energy Recovery from the Combustion of Municipal Solid Waste (MSW).** 2016. Disponível em:< <https://www.epa.gov/smm/energy-recovery-combustion-municipal-solid-waste-msw>>. Acesso em: 01 jan. 2020.

_____ **Sustainable Materials Management: Non-Hazardous Materials and Waste Management Hierarchy.** 2015. Disponível em:< <https://www.epa.gov/smm/sustainable-materials-management-non-hazardous-materials-and-waste-management-hierarchy>>. Acesso em: 01 jan. 2020.

FINKELSTEIN, A.; R. KLICIUS. **National Incinerator Testing and Evaluation Program: the Environmental Characterization of Refuse-Derived Fuel (RDF) Combustion Technology - mid-Connecticut Facility**, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EPA/600/R-94/140 (NTIS PB96-153432), 1994.

FLORIANÓPOLIS, Prefeitura Municipal de. **Plano Municipal de Coleta Seletiva: Produto 01. Relatório Parcial 1 – Diagnóstico contendo: origem e volume dos resíduos, formas de destinação e disposição final adotadas e o modelo atual de coleta seletiva.** Florianópolis: Prefeitura, 2014. 165 p. Disponível em: <http://www.pmf.sc.gov.br/arquivos/arquivos/pdf/24_08_2016_15.21.39.ef559b0ca6f64db680871cece918378.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2020.

_____ **Plano Municipal de Coleta Seletiva: Produto 01. Relatório Parcial 2 – Caracterização dos Resíduos Sólidos da Coleta Convencional e Seletiva.** Florianópolis: Prefeitura, 2016. 175 p. Disponível em: <http://www.pmf.sc.gov.br/arquivos/arquivos/pdf/24_08_2016_15.27.09.9b56b5b392c9a3ed272b055da90b836c.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2020.

_____ **Autarquia de Melhoramentos da Capital Comcap.** Disponível em:< <http://www.pmf.sc.gov.br/entidades/comcap/index.php?cms=apresentacao&menu=1&submenu=sobre>>. Acesso em: 10 fev. 2020.

_____ **Valorização de Resíduos Sólidos.** Disponível em:< <http://www.pmf.sc.gov.br/entidades/comcap/index.php?cms=valorizacao+de+residuos+solido+s&menu=6&submenuid=1414>>. Acesso em: 10 fev. 2020.

GALLARDO, Antonio et al. Analysis of refuse-derived fuel from the municipal solid waste reject fraction and its compliance with quality standards. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 83, p.118-125, nov. 2014. Elsevier BV. Disponível em: <<https://www-sciencedirect.ez46.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0959652614008221?via%3Dihub>>. Acesso em: 07 nov. 2019.

GERA, Dinesh; GAUTAM, Emissions from RDF/coal blended fuel combustion. **Chemosphere**, [s.l.], v. 27, p.2353-2363, ago. 1993. Elsevier BV. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0045653593902587>>. Acesso em: 07 nov. 2019.

HASSELRIIS, Flyod; MAHONEY, Patrick F.. Waste-to-Energy using Refuse-Derived Fuel. In: M. KALTSCHMITT et al. **Renewable Energy Systems**, doi 10.1007/978-1-4614-5820-3, New York : Springer Science+Business Media, 2013, p. 1561-1603.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em:<<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/downloads-estatisticas.html> >. Acesso em: 22 jan. 2020.

KAMI, Eduardo Choozo Arenas. **Análise Termoeconômica de Sistema Híbrido Solar Térmico Integrado à Unidade de Recuperação Energética de Resíduos Sólidos Urbanos**. 2019. p. 240. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.

LEME, Marcio Montagnana Vicente. **Avaliação das Opções Tecnológicas para Geração de Energia Através dos Resíduos Sólidos Urbanos: Estudo de Caso**. 2010. p. 138. Dissertação Mestrado em Engenharia da Energia – Universidade Federal de Itajubá, Campinas, 2010.

MAMEDE, M. C. S. **Avaliação Econômica e Ambiental do Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos no Brasil**. 2013. p. 123. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

MCDUGALL, F. et al. **Integrated Solid Waste Management: a life cycle inventory**. 2. ed. Oxford: Blackwell Science Ltd., 2001. 520 p.

MOKRZYCKI, Eugeniusz; BOCHEŃCZYK, Alicja Uliasz-. Alternative fuels for the cement industry. **Applied Energy**, [s.l.], v. 74, n. 1-2, p.95-100, jan. 2003. Elsevier BV. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261902001356>>. Acesso em: 11 dez. 2019.

MORATORIO, D.; ROCCO, I.; CASTELLI LEMEZ, M. Conversión de residuos sólidos urbanos en energía. **Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica**, v. 10, p. 115–126. ago. 2012. Disponível em: <<https://www.mendeley.com/catalogue/conversi%C3%B3n-residuos-s%C3%B3lidos-urbanos-en-energ%C3%ADa/>>. Acesso em: 12 de set. 2019.

MÜNSTER, Marie; LUND, Henrik. Comparing Waste-to-Energy Technologies by applying energy system analysis. **Waste Management**.v. 30, p. 1251-1263, 2010. Elsevier BV. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X09002748>>. Acesso em: 14 dez. 2019.

NITHIKUL, Jidapa. **Potential of Refuse Derived Fuel Production from Bangkok Municipal Solid Waste**. 2013. p. 75. Thesis (Master of Engineering in Environmental Engineering and Management) – Asian Institute of Technology School of Environment, Resources and Development Thailand, 2007.

PEREIRA, SS., e CURI, RC. **Modelos de gestão integrada dos resíduos sólidos urbanos: a importância dos catadores de materiais recicláveis no processo de gestão ambiental**. In: LIRA, WS., and CÂNDIDO, GA., orgs. *Gestão sustentável dos recursos naturais: uma abordagem participativa* [online]. Campina Grande: EDUEPB, 2013, pp. 149-172. Disponível em: <<http://books.scielo.org/id/bxj5n/pdf/lira-9788578792824-06.pdf>>. Acesso em 16 jan. 2020.

Plano Estadual de Resíduos Sólidos de Santa Catarina: contrato administrativo n. 012/2016./ Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável, Diretoria de Saneamento e Meio Ambiente. Florianópolis: SDS, 2018.

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*. Disponível em: <<https://revista.pgsskroton.com/index.php/rcext/article/view/2217>>. Acesso em: 28 dez. 2019.

RAMA, Antônio Carlos Canaveira deOliveira. **Análise da Viabilidade de Produção de Combustíveis Derivados de Resíduos**. 2010. p. 119. Projeto de Mestrado em Gestão – Instituto Universitário de Lisboa, 2010.

SCHRAMM, Júlia Santos. **Análise Preliminar do Potencial Energético e do Processo de Incineração como Alternativa na Gestão De Resíduos Sólidos Urbanos em Florianópolis**. 2017. 117 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

SOUTO, Gabriel D'Arrigo de Brito; POVINELLI, Jurandy. Resíduos sólidos. In: **Engenharia Ambiental : conceitos, tecnologia e gestão**[S.l: s.n.], 2013.

UFSC. Universidade Federal de Santa Catarina. **Energia Velha**. Disponível em:<<https://ufscsustentavel.ufsc.br/energia-velha/>>. Acesso em: 11 jan. 2020.

