



**Projetos de *Clean Development Mechanism* como
Instrumento de Melhoria na Disposição final de
Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil**

Por

Eduardo Francesco Trotta

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Economia e Gestão do
Ambiente pela Faculdade de Economia do Porto

Orientado por:

Prof.^a Dr.^a Maria Cristina Guimarães Guerreiro Chaves

2018

Agradecimentos

À minha orientadora, Professora Maria Cristina Chaves, pela paciência e tempo despendido, além de sugestões importantes que foram fundamentais para conclusão desta dissertação.

A todos os professores do curso que contribuíram indiretamente para esta dissertação com as diversas aulas ministradas no decorrer desses dois anos, que acabaram por suscitar ideias para o desenvolvimento deste estudo.

Aos meus colegas e amigos que transformaram esses dois anos de mestrado em uma experiência engrandecedora tanto na questão acadêmica como na questão pessoal.

Aos meus pais que sempre me apoiaram.

Resumo

O objetivo dessa dissertação é sugerir melhorias, relacionadas a gestão dos resíduos no Brasil, particularmente em sua destinação final e nas diversas formas de tratamento. A gestão de resíduos sólidos urbanos é certamente um dos grandes desafios que os países em desenvolvimento enfrentam. Diversos problemas ambientais e sociais estão associados à crescente quantidade de RSU. No Brasil, a sociedade moderna, influenciada principalmente por um estilo de vida voltado para o consumo, acaba por agravar ainda mais o problema da geração de resíduos. Paralelo a isso, encontramos uma grande dificuldade em dar uma destinação correta aos resíduos gerados, fazendo com que ainda hoje, seja perfeitamente comum encontrar localidades que tenham como destinação final dos RSU os lixões.

Este estudo, em sua primeira parte, explicita os diversos conceitos inerentes aos resíduos sólidos urbanos, abordando as principais formas de gerenciamento e tratamento existentes, bem como os processos de formação e recuperação energética do biogás gerado nos aterros. A seguir, este trabalho dedica-se a apresentar os mecanismos de flexibilização instituídos pelo Protocolo de Kyoto, garantindo uma atenção especial ao Clean Development Mechanism (CDM) e ao Mercado de Carbono. A ideia é fornecer uma breve explanação para que se possa adentrar no aproveitamento do CDM em projetos de melhoria na gestão dos resíduos, principalmente quanto a destinação final e as diversas formas de tratamento empregadas. Além disso, surge a possibilidade do aproveitamento energético do biogás, evitando assim sua liberação na atmosfera, mitigando os efeitos do mesmo para o aquecimento global.

Esta dissertação apresentará ainda o cenário atual concernente aos resíduos no Brasil, garantindo sempre que possível um enfoque especial ao estado do Rio de Janeiro. Nesse ponto, será feita uma análise dos projetos de CDM em aterros existentes no País, como também, a contribuição desses na mitigação das emissões de GEE.

Com o objetivo de analisar as diversas questões abordadas no decorrer deste estudo, foi realizada uma visita técnica a um projeto de CDM em aterro sanitário, trazendo assim, uma conexão entre a teoria e a prática. Esses projetos têm revelado particular importância para o desenvolvimento no Brasil de atividades que permitam uma destinação adequada aos resíduos, sendo interessante a sua replicação para outras localidades do país.

Palavras-chave: GEE. Gestão Integrada. Prevenção. CDM. Energia.

Abstract

The aim of this dissertation is to suggest improvements related to waste management in Brazil, particularly in its final disposal and in the various forms of treatment. Municipal Solid Waste Management is certainly one of the major challenges facing developing countries. Several environmental and social problems are associated with the increasing quantity of MSW. In Brazil, modern society, influenced mainly by a lifestyle oriented towards consumption, ends up aggravating even more the problem of waste generation. In the same way, we find a great difficulty in giving a correct destination to the waste generated. So that even today, it is perfectly common to find localities that have final disposal of the MSW the open dumps.

This study, in its first part, explains the various concepts inherent to municipal solid waste, addressing the main forms of management and treatment existing, as well as the processes for the formation and energy recovery of the landfill gas (LFG). Next, this work is dedicated to presenting the Flexibility Mechanisms established by the Kyoto Protocol, ensuring special attention to the Clean Development Mechanism (CDM) and the Carbon Market. The idea is to provide a brief explanation so that the use of the CDM in projects of improvement in the waste management, mainly as far as the final disposal and the several forms of treatment employed. In addition, there is the possibility of the waste to energy project utilization, thus avoiding the methane release into the atmosphere, mitigating its effects on global warming.

This dissertation will also present the current scenario regarding waste management in Brazil, guaranteeing whenever possible a special focus on the state of Rio de Janeiro. At this point, an analysis of CDM projects in landfills in the country will be carried out, as well as their contribution to the mitigation of GHG emissions.

With the purpose of analyzing the various issues addressed during this study, a technical visit to a CDM project in sanitary landfill was carried out, thus bringing about a connection between theory and practice. These projects have shown importance for the development in Brazil of activities that allow adequate disposal of waste, and it is interesting to replicate it to other locations in the country.

Key-words: GHG. Integrated management. Prevention. CDM. Energy.

Índice

Resumo	i
Abstract.....	ii
Índice de Figuras	iv
Índice de Gráficos.....	v
Índice de Tabelas.....	vi
Introdução.....	1
Capítulo 1. Gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos.....	4
1.1 Resíduos Sólidos.....	4
1.2 Gestão Integrada dos Resíduos Sólidos	7
1.3 Destinações Finais dos Resíduos Sólidos	11
1.4 Recuperação Energética dos Resíduos Sólidos	14
1.4.1 Formação e Recuperação Energética do Biogás nos Aterros Sanitários.....	15
1.5 Métodos de Quantificação do Metano	18
Capítulo 2. Mecanismos de Flexibilização do Protocolo de Kyoto	21
2.1 Conceito de Carbono Equivalente.....	21
2.2 Mecanismos de Flexibilização do Protocolo de Kyoto.....	22
2.2.1 Mercado de Carbono	22
2.2.2 Clean Development Mechanism – CDM	23
2.3 O Uso do CDM para Recuperação Energética do Biogás	25
2.3.1 Metodologia de Baseline Adotada	26
2.4 Mercado de Carbono: Uma Análise Histórica dos Preços.....	28
2.4.1 Consequência da Baixa de Preços das RCEs para a Rentabilidade do CDM	36
Capítulo 3. Panorama Atual no Brasil	37
3.1 Panorama Atual dos Resíduos Sólidos	37
3.2 Panorama Atual do Aproveitamento Energético em Aterros Sanitários.....	39
3.3 Ambiente Regulatório – Resíduos e Energia.....	40
3.4 Projetos de CDM em Aterros Sanitários no Brasil	42
Capítulo 4. Estudo de Caso.....	48
4.1 O caso NovaGerar	49
Conclusão	54
Bibliografia	58
Anexos.....	65

Índice de Figuras

Figura 1: Etapas do Gerenciamento dos Resíduos.....	5
Figura 2: Hierarquia da Gestão dos Resíduos.	8
Figura 3: Ciclo de um Projeto de CDM.	24
Figura 4: Cenário sem Projeto de CDM.....	27
Figura 5 Cenário com Projeto de CDM.....	27
Figura 6: Disposição Final dos Resíduos no Estado do Rio de Janeiro (T/Dia).....	38
Figura 7: Total de Usinas de Biogás em Aterros Sanitários.....	39
Figura 8: Localização do Aterro Sanitário de Adrianópolis.	48

Índice de Gráficos

Gráfico 1: Série Histórica de Flutuação do Preço das RCEs e EUAs.	29
Gráfico 2: Série Histórica da Flutuação no Preço das RCEs.....	29
Gráfico 3: Correlação nos Preços RCE/EUA.....	30
Gráfico 4: Taxa de Crescimento do PIB (anual).....	31
Gráfico 5: Participação das Energias Renováveis no Consumo da União Europeia.....	32
Gráfico 6: Série Histórica de Flutuação do Preço do Gás Natural.....	34
Gráfico 7: Variação da Cotação do Ativo Euro Stoxx 50.	35
Gráfico 8: Total de Projetos de CDM por Regiões Geográficas no Brasil.....	45
Gráfico 9: Total de Projetos de CDM nos Estados Brasileiros.....	45
Gráfico 10: Total de Projetos de CDM no Decorrer do Anos.	43

Índice de Tabelas

Tabela 1: Potencial de Aquecimento Global dos GEE.....	22
Tabela 2: Número de Municípios por Tipo de Destinação Final.	37
Tabela 3: Total de Resíduos Gerados e Coletados no Estado do Rio de Janeiro.	38
Tabela 4: Particularidades dos Projetos de CDM no Brasil.	44
Tabela 5: Análise dos Projetos de CDM em Aterros Sanitários no Brasil.....	46

Introdução

Um dos grandes desafios enfrentados na atualidade passa por encontrar soluções para uma destinação apropriada dos resíduos produzidos. Nos países em desenvolvimento, o rápido crescimento populacional, as mudanças no estilo de vida e o crescimento desordenado das cidades, sem a elaboração de um Plano Diretor concomitante a uma gestão dos resíduos eficaz, agrava significativamente essa questão. Devido a isso, é importante entender que todas as etapas que abrangem o gerenciamento desses resíduos, começando em sua concepção até à disposição final necessitam de medidas conjuntas entre a sociedade e os governantes.

Importante destacar que desde o tempo antigo, o Homem tinha por costume o descarte dos resíduos produzidos de uma forma muito oportuna: despejando em qualquer local, situação essa, que infelizmente, ainda é vista nos dias de hoje, principalmente nos países em desenvolvimento. Fato é, que as ações do Homem sempre produziram resíduos. Porém, devido ao tamanho relativamente pequeno da população na época, bem como por suas características nômades, esta produção não gerava grandes complicações, tendo se tornado uma questão relevante após a urbanização e o desenvolvimento dos centros urbanos.

Com a Revolução Industrial, iniciava-se um período de desenvolvimento industrial e econômico, onde os grandes aglomerados urbanos começaram a se formar, promovendo diversas alterações demográficas que não seriam acompanhadas pela evolução na gestão dos resíduos, majorando assim os problemas. Nesse ponto, seja no passado, seja no presente, a inexistência de medidas eficazes no tratamento e gestão dos resíduos acaba por impactar o meio ambiente, pela contaminação da água, solo e atmosfera, afetando ainda a saúde pública.

Nos dias atuais, o que vemos são os aterros emergindo como o principal meio de destinação final para os resíduos produzidos. Muito embora a situação dos mesmos não possa ser comparada com o que se praticava no passado, algumas consequências continuam sendo inevitáveis como a geração de gases do efeito estufa (GEE) e a lixiviação, ambos ocasionados pelo processo de decomposição dos resíduos. A grande diferença nesse caso, é que os aterros sanitários modernos são dotados de sistemas de controle e mitigação, evitando assim, a migração de gás e lixiviação para além dos limites do mesmo.

Em tempos onde as mudanças climáticas se apresentam como um grande problema a ser enfrentado, existe uma necessidade cada vez maior de se entender o impacto da gestão

dos resíduos nas emissões de gases de efeito estufa. Nessa perspectiva, o Acordo de Paris surge como um possível divisor de águas, destinando a todos os participantes que ratificaram o acordo, metas de redução desses gases, fazendo com que a destinação correta dos resíduos acabe por colaborar de forma significativa nos objetivos estabelecidos. No caso específico do Brasil, as metas são desafiadoras. De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2015), o País assume o compromisso de reduzir as emissões dos GEE em 37% até 2025, podendo chegar até 43% em 2030 admitindo como base o ano de 2005.

Em sua grande maioria, projetos de aterros sanitários, bem como outras formas de tratamento, requerem investimentos iniciais bastante elevados, o que acaba por inviabilizar ou ao menos dificultar que países em desenvolvimento com uma carência de recursos financeiros possam realizá-los na escala necessária para que se consiga destinar de maneira adequada os resíduos gerados.

Nesta dissertação, foi considerado o panorama atual brasileiro na gestão dos resíduos sólidos urbanos, dando um enfoque especial ao Estado do Rio de Janeiro. Serão apresentados, diversos aspectos e conceitos ligados ao desenvolvimento sustentável, atendendo aos princípios estabelecidos no Protocolo de Kyoto e no Acordo de Paris. Dentre as suas diversas diretrizes destacam-se a redução da emissão dos gases de efeito estufa e a substituição de uma matriz energética essencialmente fóssil para o uso de energias renováveis.

Dessa forma, este trabalho tem entre os seus objetivos, analisar a contribuição dos projetos de Clean Development Mechanism (CDM) na redução das emissões dos GEE no Brasil, principalmente nas destinações finais, tendo em vista que grande parte das emissões atribuídas aos resíduos sólidos ocorrem nessa etapa. Pretende-se ainda, identificar oportunidades para o uso do CDM no aproveitamento energético nessas destinações. Além disso, serão apresentados os trâmites necessários para realização desses projetos, bem como as etapas a serem seguidas.

Como estudo de caso, foi abordado o caso real do aterro NovaGerar, considerado o primeiro projeto de CDM registrado, trazendo assim, informações importantes sobre o funcionamento na prática, identificando ainda, a real possibilidade de replicação do *case* para outros vazadouros existentes no Estado. Por fim, espera-se que ao final deste estudo seja possível propor soluções ou simplesmente, melhorias para o tratamento dos resíduos sólidos no Brasil, principalmente no que tange o aproveitamento do CDM nesses projetos.

Este trabalho foi elaborado através de uma pesquisa qualitativa, adotando o processo de revisão bibliográfica de importantes autores e de informações divulgadas por entidades privadas e públicas do Brasil e do exterior. No primeiro capítulo, serão abordados conceitos ligados aos resíduos, além de detalhes referentes às diversas formas de tratamento e disposição final existentes nos dias de hoje. O que se espera é elucidar os conceitos que serão apresentados no decorrer do estudo. Além disso, dá-se um enfoque bastante particular ao aproveitamento energético em aterros sanitários, tendo como objetivo pormenorizar o processo de formação do metano e apresentar os diversos métodos existentes para quantificação do mesmo, visando identificar a viabilidade ou não do aproveitamento energético em aterros.

No segundo capítulo serão apresentados conceitos referentes aos mecanismos de flexibilização instituídos pelo Protocolo de Kyoto, em especial o Clean Development Mechanism. Será ainda abordado, o mercado de carbono e as particularidades que o envolvem, sendo realizada uma breve análise do momento atual e do histórico de variações e os devidos motivos que levaram o mercado a realidade vista atualmente.

Por sua vez, o terceiro capítulo apresentará o panorama atual brasileiro no que concerne o tratamento dos resíduos, a geração energética advinda do mesmo e o cenário legal com a apresentação da legislação inerente ao assunto abordado neste estudo, assim como o panorama relativo ao papel do CDM neste país.

Por fim, o quarto capítulo irá apresentar o estudo de caso, explicitando de forma pormenorizada questões relacionadas aos projetos de CDM, bem como detalhes acerca da operação do aterro visitado, que demonstrará na prática a literatura apresentada nos capítulos anteriores. O último capítulo apresentará as principais conclusões.

O estudo sempre que possível será apoiado com a elaboração de gráficos visando o melhor entendimento e a confirmação de informações publicadas pelos diversos autores citados neste trabalho. Admite-se ainda que ao final desta dissertação, seja possível sugerir melhorias relacionadas com a gestão dos resíduos no Brasil, principalmente em sua destinação final e nas diversas formas de tratamento existentes.

Capítulo 1. Gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos

A gestão dos resíduos sólidos continua a ser um grande desafio nas áreas urbanas em todo o mundo, principalmente nas cidades em rápida expansão dos países em desenvolvimento. O gerenciamento indevido dos resíduos pode acarretar diversos riscos à sociedade, tornando-se um problema tanto na saúde pública como na questão ambiental, não esquecendo, dos aspectos econômicos e sociais. Neste capítulo serão apresentados alguns conceitos referentes aos resíduos sólidos com intuito de fornecer uma base teórica para o entendimento do que será apresentado no decorrer deste estudo. Além disso, serão explicitados os processos de formação e recuperação do biogás nos aterros sanitários, bem como formas de quantificação do metano, principal gás presente nessas destinações.

1.1 Resíduos Sólidos

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) abarcam itens do dia-a-dia, como embalagens de produtos, itens de vestuário, sobras de comida, jornais, eletrodomésticos, tintas e baterias, que a longo prazo, podem causar problemas ambientais e de saúde pública (Farrell & Jones, 2009; Singh et al., 2017).

Segundo Ikhlayel (2018), os resíduos integram qualquer processo de produção e estão associados a todos os produtos, indo da extração das matérias-primas até que o mesmo alcance o final de sua vida útil. E acrescenta que a produção e o desenvolvimento industrial contemporâneo dependem fortemente do uso extensivo de recursos naturais para atender à procura do mercado, com isso, existe uma grande dificuldade de reverter a tendência no aumento da geração dos resíduos. Hong et al. (2017) e Ramachandra et al. (2018), definem os RSU como resíduos não líquidos oriundos da atuação humana e dos animais que acabam sendo descartados devido a sua inutilidade. Estes incluem frações orgânicas e inorgânicas, como: resíduos de cozinha, embalagens de produtos, restos de jardinagem, tecidos, garrafas, papel, latas, baterias, etc.

O escopo desta dissertação abrange os resíduos sólidos urbanos gerados em áreas residenciais, comerciais e institucionais que incluem residências, escritórios, escolas, lojas, etc. Não fazendo parte, portanto, resíduos perigosos originados em hospitais e algumas indústrias. A classificação desses resíduos sólidos, quanto a sua periculosidade e origem, pode

ser consultada no Anexo I na Fig. I e Fig. II respectivamente, onde se apresenta a sua descrição pormenorizada.

Segundo ElSaid e Aghezzaf (2018), a gestão desses resíduos gera uma grande preocupação para cidades do mundo todo, particularmente comunidades urbanas com economias em desenvolvimento, que em sua maioria necessitam de melhores práticas nos sistemas de gerenciamento dos resíduos. Cucchiella et al. (2017), acrescentam que a gestão dos RSU tem sido apontada como um dos problemas globais que devem ser enfrentados para se atingir as metas de sustentabilidade.

O gerenciamento dos resíduos é um processo complexo porque envolve muitas tecnologias e diversas etapas. Entre elas pode-se destacar, o controle de geração de resíduos, coleta, transferência, transporte, triagem, transformação e disposição final. Todos esses processos devem ser realizados dentro das diretrizes legais e sociais existentes com a finalidade de mitigar riscos ambientais e à saúde (Techobanglous, 2002; Ramachandra et al. 2018).



Figura 1: Etapas do Gerenciamento dos Resíduos.
Adaptado de Techobanglous (2002) e Ramachandra et al. (2018)

Como vemos na Figura 1, todo o processo começa com a geração dos resíduos, que engloba as atividades em que os materiais ou produtos passam a não ter qualquer utilidade, sendo descartados em seguida. O importante nessa etapa é entender que o conceito de útil ou não para determinado produto varia de pessoa para pessoa. Outro ponto a se destacar, é o fato dessa atividade possuir pouco ou nenhum controle, uma vez que cabe a pessoa decidir

sobre o destino do produto. O que pode haver é o estímulo, seja ele financeiro ou apenas motivacional, para o reaproveitamento do bem, evitando assim o seu descarte.

Logo a seguir, chegamos a coleta, que inclui a recolha de resíduos sólidos e materiais recicláveis e o transporte destes materiais para uma instalação de processamento, uma estação de transferência ou um aterro sanitário. O processo de transporte pode envolver duas etapas: a primeira, uma possível transferência de resíduos do veículo de coleta de menor porte para um equipamento de transporte maior. A segunda, compreende o transporte dos resíduos, geralmente percorrendo longas distâncias, para um processamento ou disposição final. Embora o transporte por veículos motorizados seja o mais comum, algumas regiões podem adotar outros meios como os vagões e as barcaças para o transporte de resíduos. A triagem consiste na segregação dos resíduos sólidos para que tenham a destinação correta. Nessa etapa, vidros, papéis e plásticos são separados e compactados para que possam ser reciclados. Essa separação pode ser feita de forma manual ou automaticamente. Ocorre em instalações de recuperação de materiais (centros de reciclagem), estações de transferência, usinas de incineração e na disposição final.

Os processos de transformação são usados com intuito de obter a redução do volume dos resíduos que teriam como destino os aterros sanitários. A fração orgânica de RSU pode ser transformada por diversos processos biológicos e químicos. Segundo Techobanglous (2002), o processo de transformação química mais comum é a combustão, usado diversas vezes em conjunto com a recuperação de energia. O processo de transformação biológica mais utilizado é a compostagem aeróbia. ElSaid e Aghezzaf (2018), afirmam que, dentre os diversos processos enumerados acima, a recuperação energética através da incineração e na disposição final nos aterros sanitários seriam de extrema importância para o gerenciamento dos resíduos.

Por fim, como mencionado, o aterro é considerado a destinação final dos RSU, sejam eles resíduos residenciais coletados e transportados diretamente para um aterro sanitário, resíduos oriundos da incineração, da compostagem ou outras substâncias de várias instalações de processamento de resíduos sólidos. Importante destacar que um aterro sanitário moderno não é um “lixão”, mas sim um método de descarte de resíduos sólidos que tem como objetivo dar o destino adequado para os resíduos evitando riscos para a saúde pública.

1.2 Gestão Integrada dos Resíduos Sólidos

Segundo Techobanglous (2002), gestão integrada de resíduos admite como definição ser a aplicação de métodos, tecnologias e planos de gestão apropriados para alcançar metas e objetivos inerentes ao gerenciamento de resíduos. Como várias leis estaduais e federais são adotadas e alteradas com o passar do tempo, a gestão tende a estar em constante evolução visando acompanhar as mudanças nos regulamentos. Por sua vez, o Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2018) adota a seguinte definição: *“conjunto de ações voltadas para a busca de soluções para os resíduos sólidos, de forma a considerar as dimensões política, econômica, ambiental, cultural e social, com controle social e sob a premissa do desenvolvimento sustentável”*.

Ripa et al. (2017), complementam que a gestão de RSU pode permitir um aumento significativo da eficiência no uso dos recursos, recuperando energia e materiais através dos resíduos que seriam descartados em aterros sanitários, substituindo assim, combustíveis fósseis e materiais virgens por fontes renováveis. Além disso, uma boa gestão deve incentivar inovações tecnológicas voltadas para segregação da parcela orgânica e recuperação de energia dos resíduos, estimulando assim, a criação de fontes bioenergéticas.

Segundo Singh et al. (2017), diversas maneiras de gerenciar RSU são sugeridas, incluindo redução na fonte, reciclagem e incineração. ElSaid e Aghezaf (2018), apontam outras opções básicas de gerenciamento: além da redução na fonte e reciclagem, compostagem, recuperação energética e aterros sanitários. Cossu (2016) e Nabavi-Pelesaraei et al. (2017), complementam que a adoção de algumas dessas etapas tende a reduzir drasticamente a quantidade de resíduos destinadas aos aterros, que seria a última parte do processo.

As etapas acima citadas podem ser visualizadas na Figura 2 e fazem parte do que podemos chamar de “Hierarquia da gestão dos Resíduos” que consiste na adoção de cinco opções para tratamento dos RSU, elencadas das mais favoráveis para as menos favoráveis, com objetivo de reduzir os impactos ambientais. Diversos estudos fazem menção a essa hierarquia, alguns deles acabam por adotar diferentes termos que ao final representam basicamente o mesmo processo. De uma maneira geral as etapas podem ser enumeradas como: Redução na fonte (prevenção), Reutilização, Reciclagem e Compostagem, Recuperação energética e a Disposição Final nos aterros sanitários (Psomopoulos et al., 2009; Van Ewijk & Stegemann, 2016; Wang et al., 2016; Cucchiella et al., 2017; Jouhara et al., 2017; Djuric Ilic et al., 2018).

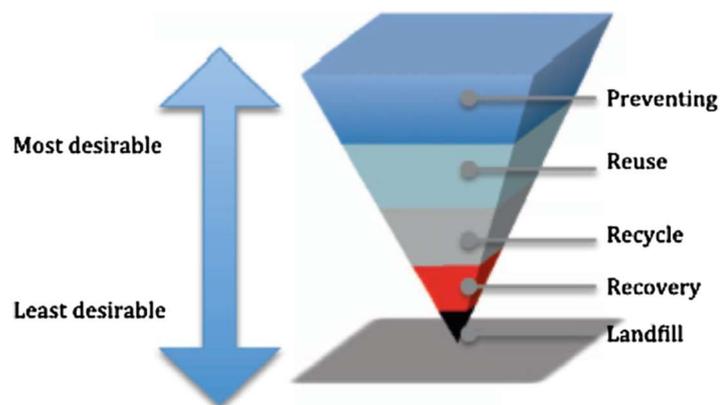


Figura 2: Hierarquia da Gestão dos Resíduos.
 Fonte: Cucchiella et al. (2017)

A seguir, serão pormenorizadas algumas dessas opções.

Redução na fonte

De acordo com Techobanglous (2002), o custo total de um sistema de gestão de RSU está associado à coleta, transporte, processamento e disposição final desses materiais. A redução da fonte pode diminuir os custos da gestão desses resíduos em todas as etapas, uma vez que diminui o montante dos resíduos que serão gerenciados. Van Ewijk e Stegemann (2016), complementam que a redução na fonte tem dois aspectos principais: a redução da necessidade de matéria-prima e a redução na geração de resíduos. Ambos estão diretamente relacionados, uma vez que a geração de resíduos provém de insumos da matéria-prima.

A redução da fonte que tem como propósito a diminuição no volume dos resíduos gerados é sem dúvida um dos pontos fundamentais de uma estratégia de gerenciamento de resíduos. Pode e deve ser praticada por todos, principalmente pelos consumidores, que possuem papel decisivo nesse processo, seja comprando menos, usando produtos de forma mais eficiente, adquirindo produtos usados ou simplesmente exercendo seu papel de consumidor e optando por produtos de empresas *eco-friendly*. O maior benefício da adoção de uma redução da fonte eficaz é a menor geração de resíduos que precisariam ser reciclados ou enviados para aterros sanitários e incineradores. Infelizmente nos dias de hoje o que vemos são produtos condicionados para ter um tempo curto de vida útil, justamente para estimular sua troca e conseqüentemente aumentar o consumo e lucro das empresas.

Reciclagem

Segundo Monteiro (2001), reciclagem consiste no processo de seleção dos diversos materiais presentes nos resíduos domiciliares como vidros, papéis, metais e plásticos, com o objetivo de reintroduzi-los no ciclo de produção. Com isso, os resíduos retornam ao ciclo produtivo, evitando o seu descarte e contribuindo para o incremento da vida útil dos aterros sanitários. Diversas vantagens podem ser relacionadas ao processo de reciclagem, destacando-se: mitigação no uso dos recursos naturais, redução no uso de energia e transporte (tendo em vista a redução da quantidade de material que demandaria aterros), geração de emprego e rendimento.

Techobanglous (2002), afirma que a reciclagem pode ser considerada uma das mais importantes práticas do gerenciamento de resíduos, pois, através dela, é possível retornar matérias-primas para o mercado, separando produtos reutilizáveis do resto da corrente de resíduos municipais. Os benefícios da reciclagem são muitos, entre eles podemos destacar: economia de recursos finitos, diminuição da necessidade de mineração de materiais virgens (o que diminui o impacto ambiental para mineração e processamento, e reduz a quantidade de energia consumida), o incremento da vida útil dos aterros. A reciclagem também pode melhorar a eficiência e a qualidade das cinzas dos incineradores e instalações de compostagem, removendo materiais não combustíveis, como metais e vidro.

Importante destacar que a reciclagem necessita de programas e políticas que facilitem o processo para a população. Segundo Techobanglous (2002), exemplos incluem o recolhimento dos resíduos para residências de uma forma regular, uso de máquinas de venda reversa automática, centros de entrega fácil com horas convenientes para comunidades rurais e para produtos mais especializados. Mesmo com programas convenientes, a educação pública é um componente crucial para aumentar a quantidade de reciclagem. Com o objetivo de se avançar para além de uma mera vontade de coletar materiais descartados para reciclagem, se faz necessário uma mudança cultural para que os consumidores passem a optar por produtos reciclados.

Segundo Ripa et al. (2017), os RSU podem conter materiais que em teoria poderiam ser reciclados, se estivessem perfeitamente separados e limpos, mas na maioria das vezes esses materiais apresentam um grau de contaminação elevado, inviabilizando economicamente o processo. Muito disso se deve à ausência de uma consciência ambiental da população ou simplesmente uma carência de informação quanto ao funcionamento do

processo de reciclagem. Portanto, o investimento em educação passa a ser tarefa crucial para lograr êxito não somente nesta etapa, mas em todo processo de gerenciamento dos resíduos.

Compostagem

Jouhara et al. (2017) e Wei et al. (2017) definem compostagem como um método de reciclagem de resíduos baseado na degradação biológica da matéria orgânica em condições aeróbias, produzindo como produto um composto que uma vez incorporado ao solo, em condições adequadas, aumenta sua fertilidade.

Segundo Jara-Samaniego et al. (2017), a compostagem realizada de maneira correta, pode constituir um método viável para a gestão de resíduos orgânicos, principalmente em países em desenvolvimento, devido ao baixo custo operacional e à geração de rendimento, com baixo impacto ambiental. As tecnologias de compostagem podem constituir uma possibilidade interessante para o gerenciamento da fração orgânica dos resíduos nesses países, devido à sua simplicidade e rápida implementação. Além disso, esta tecnologia implica custos menores em comparação com outras opções, que exigiram recursos econômicos mais altos para sua inicialização e manutenção.

De acordo com Techobanglous (2002), a compostagem pode causar problemas sem os controles adequados. Por exemplo, as águas subterrâneas podem ser contaminadas caso restos de grama, folhas ou outros resíduos de quintal contenham pesticidas ou fertilizantes e sejam compostados em solos arenosos ou outros permeáveis. A contaminação do ar por substâncias voláteis também pode acontecer, embora represente uma possibilidade menor.

Incineração

Segundo Sakai et al. (1996), os objetivos da incineração de RSU, são esterilizar os resíduos e reduzir o volume de material destinado a eliminação final. Grande parte das novas instalações de incineração são projetadas para recuperação energética, seja eletricidade ou geração de vapor para aquecimento urbano e industrial. Li et al. (2003), Cucchiella et al. (2014) e Tozlu, et al. (2016), acrescentam que com a incineração dos RSU muitas vantagens são obtidas, como reduções significativas do volume (90%) e massa (70%), desinfecção completa e recuperação energética.

Segundo Zhang et al. (2010), pode ser considerada uma importante ferramenta de um plano integrado de gestão de resíduos para as grandes cidades onde espaços para aterros são escassos. Por sua vez, Techobanglous (2002), afirma que instalações de incineração são

atraentes pelo fato de reduzirem o volume dos resíduos drasticamente. A redução de volume de resíduos por si só, pode tornar atraente o alto custo de capital dos incineradores, principalmente em situações de superlotação dos aterros ou quando o mesmo se encontra distante do ponto de geração. Outra vantagem, passa pela recuperação de energia, seja sob a forma de vapor ou eletricidade. Além disso, a cinza gerada pelo processo de incineração conta com a possibilidade de reutilização em materiais de construção, principalmente na fabricação de cimento.

Segundo Nabavi-Pelesaraei et al. (2017), a incineração é um método de gerenciamento de RSU bastante interessante para resíduos que não podem ser reciclados. A incineração tem sido amplamente empregada no descarte dos resíduos, pois permite grande redução no volume e recuperação de energia. Devido a essa redução, a incineração tende a ter uma maior aceitação em países com espaço limitado para aterros sanitários.

Para Techobanglous (2002), as principais restrições aos incineradores são o custo, o grau de exigências relativamente alto para operá-los de forma segura e econômica, e o fato da população ser extremamente cética em relação à sua segurança, nesse ponto é importante destacar que um dos motivos do alto custo está justamente na exigência de modernos sistemas de filtro que eliminam boa parte dos poluentes, evitando possíveis danos à saúde e ao ambiente. Segundo Psomopoulos et al. (2009), as emissões de substâncias tóxicas e perigosas como o mercúrio e as dioxinas foram drasticamente reduzidas com a evolução da tecnologia, mitigando assim, possíveis danos à saúde pública. Ao analisar a questão energética, as incineradoras apresentam emissões bem menores quando comparadas às instalações de geração de eletricidade a partir de combustíveis fósseis, com exceção do gás natural, além disso, por reduzirem a quantidade de resíduos remetidos aos aterros sanitários, acabam por diminuir as emissões de GEE no geral.

1.3 Destinações Finais dos Resíduos Sólidos

Segundo Monteiro et al. (2001), embora alguns estudos possam considerar usinas de incineração, centros de compostagem e reciclagem como destinação final dos resíduos, a verdade, é que estes são sistemas de tratamento e beneficiamento dos RSU, e não eliminam a necessidade do uso de aterros para a destinação dos resíduos gerados. Dessa forma podemos considerar as seguintes formas de disposição final dos resíduos:

A) Lixão

Lixão é um termo utilizado no Brasil para designar uma área de disposição final inadequada sem qualquer cuidado de preservação ambiental e de engenharia sanitária, com os resíduos permanecendo expostos a céu aberto. Quase sempre se originam nas cercanias de centros urbanos, devido à indiferença do poder público que não fornece as condições necessárias para uma destinação eficiente dos resíduos. Não contam com qualquer sistema para tratamento dos lixiviados, que adentram no solo carregando substâncias nocivas para os aquíferos. Mosquitos, pássaros e roedores, conhecidos vetores de diversas doenças, convivem com crianças e adultos que fazem desse ambiente sua principal fonte de recursos, recolhendo comida e materiais recicláveis para sobreviver.

Segundo Techobanglous (2002), em países subdesenvolvidos, o gerenciamento eficiente na disposição final dos resíduos gerados, progride de uma forma variável, dependendo dos recursos disponíveis e das normas regulatórias nacionais. A necessidade de melhorar a disposição final dos resíduos advém da consolidação da população em zonas urbanas, sem a infraestrutura necessária para lidar com os resíduos gerados. Isso tende a criar uma necessidade cada vez maior de melhores práticas na eliminação dos resíduos, uma vez que os despejos não controlados nas áreas urbanas acabam por originar os lixões, se tornando uma fonte significativa de poluição do ar e contaminação da água.

Segundo Greedy (2016), os lixões continuam sendo a prática de disposição final mais comum em boa parte dos países em desenvolvimento, chegando muitas vezes a compreender 90% do total das instalações de descarte dos resíduos. E complementa que ao longo do tempo, com desenvolvimento econômico nesses países, os lixões tendem a ser gradativamente transformados em aterros sanitários, sendo adotadas ainda, medidas de proteção ambiental, seguindo a evolução das práticas de gestão de resíduos dos países desenvolvidos.

B) Aterro controlado

Segundo Monteiro et al. (2001), é uma etapa compreendida entre o lixão e o aterro sanitário. Basicamente, a principal diferença do aterro controlado em relação ao aterro sanitário é a ausência de coleta e tratamento do lixiviado, bem como a captura e queima ou aproveitamento do metano gerado no processo de decomposição. Excetuando isso, o aterro controlado tem de ser concebido e explorado de maneira similar a um aterro sanitário.

Geralmente é uma parte adjacente ao lixão que foi remediada, tendo como objetivo a adoção de medidas que mitiguem possíveis impactos nocivos ao ambiente e à saúde, como, o cobrimento diário dos resíduos com terra, além da impermeabilização do solo para evitar a contaminação dos lençóis freáticos.

C) Aterro sanitário

Segundo Renou (2008), o método de aterro sanitário para a eliminação dos resíduos, continua sendo amplamente aceito e utilizado devido aos seus benefícios econômicos. Pesquisas comparando os diversos meios de destinação dos RSU mostraram que o mais barato, no que tange à exploração e custos de instalação, é o aterro sanitário. Chakma e Mathur (2017), complementam que o aterro é a principal estratégia utilizada para destinar os resíduos gerados, uma vez que geralmente é um método mais econômico para gerenciar os resíduos em comparação com outras formas como a incineração.

Segundo Lou e Nair (2009), o impacto dos aterros nas mudanças climáticas reside em suas emissões de CO₂ e CH₄, juntamente com vários outros componentes gasosos. Estes gases são o subproduto da decomposição anaeróbia dos resíduos orgânicos e tendem a se acumular nos aterros sanitários. Devido a isso, boa parte dos aterros conta com sistemas para mitigação de tais impactos, a coleta dos gases é realizada por meio de dutos tendo como objetivo evitar que os mesmos sejam liberados na atmosfera sem qualquer tratamento. No decorrer deste trabalho, serão apresentadas de forma pormenorizada o processo de formação e recuperação desses gases, com o seu possível aproveitamento energético.

Techobanglous (2002), afirma que no passado, o termo aterro sanitário era usado para indicar o local em que os resíduos despejados eram apenas cobertos no final da operação de cada dia. Hoje, ao mencionarmos aterro sanitário, fazemos referência a uma instalação de engenharia, projetada e operada para minimizar possíveis danos à saúde e impactos ambientais. Segundo Nabavi-Pelesaraei et al. (2017), o aterro sanitário deve possuir isolamento da parte inferior, sistemas de recolha e tratamento de gás e lixiviados. Menciona ainda, que mesmo que essas medidas sejam adotadas em sua totalidade, ajudando a controlar as emissões dos gases e do lixiviado de maneira significativa, o sistema de aterros sanitários necessita de permanente controle com o objetivo de evitar ou mitigar qualquer tipo de ameaça ao meio ambiente.

El-Fadel (1997), acrescenta que mesmo adotando uma destinação correta para os resíduos como no caso dos aterros sanitários, algumas consequências são inevitáveis como a

geração de gases como metano e dióxido de carbono e a lixiviação, ambos ocasionados pela decomposição microbiana. A grande diferença nesse caso, é que os aterros sanitários são dotados de sistemas de controle e mitigação, evitando assim a migração de gás e lixiviação para além dos limites do aterro. Dessa forma, os aterros também podem se transformar em uma fonte de recurso. A possibilidade do aproveitamento do biogás originado no processo de decomposição dos resíduos para utilização como fonte de energia, já ocorre em diversos aterros, sendo extremamente aconselhável tanto pelo lado econômico como pelo lado ambiental o aproveitamento desses gases para produção de energia. Após o encerramento, os aterros podem ser transformados em áreas recreativas, como parques e campos de golfe.

Cucchiella et al. (2017), apresenta em seu artigo um estudo demonstrando o empenho da União Europeia na redução da remessa dos resíduos para os aterros. No Anexo II, Fig. III, podemos visualizar que países como Alemanha, Bélgica, Suécia, Dinamarca, Holanda e Áustria destinam quantidades inferiores a 4% dos seus resíduos para os aterros, dando preferência aos métodos citados anteriormente como reciclagem, compostagem e incineração. Por outro lado, 13 dos 28 países destinam mais de 50% dos resíduos para os aterros. Portanto, apesar dos grandes esforços para diminuição na geração de RSU e a adoção de outras formas de gerenciamento como a reciclagem, compostagem e incineração, o aterro permanecerá como principal elemento do gerenciamento de RSU por um longo período (Broun & Sattler, 2016; Greedy, 2016).

1.4 Recuperação Energética dos Resíduos Sólidos

Diversos são os métodos de se extrair energia dos resíduos gerados em grandes quantidades em todos os países. A hierarquia da gestão dos resíduos confere destaque a recuperação energética inserindo-a dentre as cinco opções de tratamento propostas, evidenciando, portanto, a importância dada a questão a ser abordada neste tópico. As modernas tecnologias, altamente eficientes são essenciais para atender uma necessidade cada vez maior de geração de energia em países com economias em crescimento e reduzir as emissões de GEE. Segundo Tozlu et al. (2016), embora existam diversas tecnologias, os métodos de incineração e os aterros sanitários são os preferidos em todo o mundo devido aos seus potenciais de produção de energia. Dessa forma, os resíduos sólidos podem se tornar um importante recurso energético, transformando algumas das atividades de tratamento dos RSU em oportunidades para uma produção sustentável de energia.

Segundo Bove e Lunghi (2006), a recuperação energética originada pelos resíduos representa uma maneira importante de redução na quantidade de energia a ser produzida com combustíveis fósseis, ou seja, fontes de energia não renováveis. Não somente isso, representa ainda receitas econômicas interessantes para os administradores das instalações que a realizam. Para Zhou et al. (2018), nas últimas décadas, o foco vem mudando de um mero descarte dos resíduos em aterros para o desenvolvimento de uma economia circular centrada na recuperação de recursos e energia. O aproveitamento energético torna-se uma parte fundamental da gestão moderna de resíduos, reduzindo não somente a emissão dos GEE como também a dependência de combustíveis fósseis.

Segundo Tozlu et al. (2016), existem basicamente três tipos de tecnologias para recuperação energética através dos resíduos: (1) métodos de conversão térmica (incineração, pirólise e gaseificação), (2) conversão bioquímica (digestão anaeróbia e compostagem), (3) aterro sanitário. Porém, como visto anteriormente, incineração e aterro sanitário são os métodos preferidos no que tange o aproveitamento energético.

O presente estudo irá debruçar sua atenção sobre o aproveitamento energético em aterros sanitários, tendo em vista que por questões “culturais” a incineração é praticamente inexistente no Brasil, reduzindo-se basicamente ao tratamento de resíduos perigosos como os hospitalares, diferentemente do que é visto em países desenvolvidos, nomeadamente os europeus que têm nesse tratamento um importante aliado na gestão dos resíduos sólidos.

1.4.1 Formação e Recuperação Energética do Biogás nos Aterros Sanitários

Os resíduos sólidos contribuem de forma bastante significativa nas emissões de gases de efeito estufa, principalmente através dos processos de decomposição. A maioria dessas emissões tem origem nos aterros sanitários, que continuam a ser a principal estratégia de eliminação de resíduos (Lou & Nair, 2009; Yang et al., 2018). Segundo Choi et al. (2017), os aterros são a maior fonte de emissões de GEE, respondendo por aproximadamente 83% do setor de resíduos e emitindo aproximadamente 18% de todo o metano. De acordo com Techobanglous (2002), o biogás originado nos aterros compreende uma série de gases presentes em grandes quantidades (os gases principais) e em quantidades muito pequenas os gases dos vestígios. Os principais gases são produzidos a partir da decomposição da fração orgânica biodegradável dos RSU. Os gases de vestígio, embora presentes em pequenas percentagens, tendem a ser tóxicos, gerando riscos para a saúde da população em geral.

Dentre os diversos gases encontrados em aterros, alguns se destacam. A distribuição percentual tem em sua maioria, o metano (45–60%) e o dióxido de carbono (40–50%), o restante corresponde ao óxido nitroso e outros gases de vestígio (Broun & Sattler 2016; Majdinasab et al., 2017).

Algumas variáveis ambientais afetam o processo de geração do metano nos aterros sanitários. Entre as diversas variáveis podemos destacar: pH, temperatura, umidade, composição dos resíduos. Além disso, a forma como os aterros são construídos e operados afetam diretamente na produção do metano (Kumar et al., 2004; Li et al., 2015; Wang et al., 2016; Majdinasab et al., 2017). Segundo Bove e Lunghi (2006), a presença desses gases nos aterros pode acarretar dois grandes problemas: A possibilidade de combustão do metano e o aumento do efeito estufa devido à libertação dos diversos gases na atmosfera. Em contrapartida, a valorização do biogás como fonte de energia mitiga os dois problemas anteriormente mencionados, além de contribuir para diminuição do uso de combustível fóssil. Segundo Choi et al. (2017), devido a isso, alguns países têm incorporado diversos mecanismos, como o aproveitamento do biogás na recuperação de energia, mitigando assim os efeitos nocivos de sua liberação na atmosfera. E complementam que uma vez que os resíduos são produzidos continuamente, eles acabam sendo considerados uma fonte renovável de energia. Hoje em dia, boa parte dos modernos aterros sanitários contam com um tratamento inicial que consiste na queima direta do gás liberado em flares. Contudo, poucos aterros possuem um sistema de recuperação energética.

Segundo Wang et al. (2016), o aproveitamento energético nos aterros pode representar um importante aliado na redução da dependência de combustíveis fósseis. Além disso, tem o benefício adicional de reduzir as emissões de GEE, mitigando a liberação do metano. Rajaeifar et al. (2017), acrescentam que a recuperação energética gera diversos benefícios como: o estabelecimento de recursos energéticos renováveis, redução das emissões de CO₂ originadas na produção de energias fósseis e a redução das emissões de CH₄ dos aterros. Li et al. (2015) e Krause et al. (2016), complementam que projetos de aproveitamento do biogás que capturam e utilizam o CH₄ como uma fonte de energia na geração de eletricidade ou calor fornecem benefícios tanto energéticos quanto ambientais.

Importante destacar o fato de que como a maioria dos aterros, especialmente aqueles que ainda estão recebendo resíduos, não possuem 100% de cobertura do sistema de captura do biogás, a eficiência da recolha acaba por variar de 50 a 95 por cento, assumindo como

média de captura do gás 75%. Portanto, 25% do gás gerado pelo aterro é liberado sem qualquer tratamento para a atmosfera (Leme et al., 2014; EPA, 2017).

Para Li et al. (2015), o biogás pode ser usado em uma variedade de projetos de energia, incluindo geração de eletricidade, calor e energia combinados, uso direto e como combustível alternativo para veículos. Dessa forma, os projetos diferem entre si dependendo de como o biogás será utilizado. Um projeto de geração de eletricidade usa tecnologias como motores, turbinas, microturbinas ou células de combustível para gerar eletricidade a partir do biogás. A energia gerada é usada no local ou transmitida pela rede elétrica e vendida aos consumidores. Um projeto de uso direto tem como finalidade o aproveitamento do biogás no aquecimento de caldeiras, fornos, estufas ou outras aplicações térmicas. Uma usina de cogeração tem como objetivo tanto a produção de energia térmica quanto a geração de eletricidade e pode ser especialmente atraente por sua eficiência.

Segundo Bove e Lunghi (2006), a recuperação energética em aterros sanitários pode ser obtida através de quatro maneiras diferentes: (1) Combustão direta em aquecedores ou fornos; (2) Armazenamento de energia química, conseguido através de um processo de conversão (conversão em biodiesel, metanol etc.); (3) Purificação do gás e introdução na rede de distribuição de gás natural; (4) Geração de energia elétrica.

No Anexo III, Fig. IV, é possível visualizar de forma simples o processo de aproveitamento energético do biogás, começando pela captura através de tubulações verticais e horizontais inseridas no aterro sanitário, seguindo para o processamento do biogás onde o mesmo recebe tratamento para o uso final em diversas atividades como: geração de energia elétrica, térmica, combustível veicular (Li et al., 2015; EPA, 2017).

Devido ao alto custo para recuperação do biogás e consequente aproveitamento energético nos aterros, dois fatores se tornam importantes para viabilidade dos projetos: A possibilidade de venda da energia gerada por um preço que cubra os custos da operação e dos investimentos realizados, bem como o uso do CDM para o aporte financeiro necessário.

Segundo Majdinasab et al. (2017), para recuperar o biogás, a primeira e mais importante etapa é obter uma estimativa apropriada de sua geração nos aterros. Para isso, vários modelos de geração utilizam diferentes abordagens. No entanto, o objetivo final da modelagem do biogás é oferecer a máxima precisão para estimar sua geração. Krause et al. (2016), complementam dizendo que para otimizar a coleta e o uso do biogás, os proprietários e operadores do aterro devem estimar a taxa de geração do CH₄ para um determinado local e prever como essa taxa mudará ao longo do tempo. Tais cálculos são um passo necessário

para a adequação as conformidades regulatórias, bem como na elaboração dos sistemas de coleta e controle de gás e avaliação do potencial de recuperação de energia.

Portanto, o uso de métodos de quantificação, que veremos a seguir, se tornam fundamentais para mensuração do potencial energético e consequente viabilidade dos projetos. Além disso, é de suma importância que projetos de aproveitamento do biogás em aterros estejam interligados ao sistema de energia urbana, a rede de distribuição de gás ou estejam próximos do usuário final da energia gerada, para que seja possível a comercialização do excedente de energia gerada nos aterros.

1.5 Métodos de Quantificação do Metano

Aterros sanitários são a terceira maior fonte antropogênica de metano, sendo, portanto, um importante contribuinte de gases de efeito estufa para a atmosfera (Du et al., 2017; Singh et al., 2017). Dessa forma, estimar a produção de CH₄ e avaliar sua contribuição para as emissões globais de GEE passa a ser uma tarefa importante. Além disso, quantificar o metano que será produzido durante a vida útil de um aterro é fundamental para que se analise a viabilidade econômica do aproveitamento energético do biogás.

Kumar et al. (2016) e Majdinasab et al. (2017), corroboraram o fato de os aterros serem uma das maiores fontes de emissão de CH₄ e acrescentam que modelos de quantificação são uma importante ferramenta para mensurar as taxas de geração e as emissões totais de metano em um aterro. Esses modelos possuem várias aplicações, incluindo o dimensionamento do sistema de coleta do biogás, servindo para avaliar os benefícios de projetos de recuperação e medindo e controlando as emissões gasosas. Segundo Majdinasab et al. (2017), os modelos de quantificação de gás de aterro utilizam vários parâmetros diferentes para projetar a geração de CH₄ a partir de uma quantidade específica de resíduos descartados durante determinado período em um aterro sanitário.

Porém, há de se destacar a falta de precisão dos diversos modelos matemáticos utilizados para essa quantificação. Segundo Thompson et al. (2009), municípios e empresas são relutantes por diversas vezes em investir em projetos de recuperação de metano devido à alta incerteza na estimativa das taxas de produção de gás e do rendimento total do gás, que são necessários para determinar com precisão o prazo de retorno do capital investido e dos custos operacionais de qualquer projeto. Majdinasab et al. (2017), afirmam que o principal

problema em projetar e operar um sistema de coleta do biogás está na incerteza quanto às taxas de geração do mesmo.

Krause et al. (2016), pontuam a dificuldade de se estimar o potencial de geração de metano em um aterro devido às variações espaciais e temporais nos locais de despejo e a composição heterogênea dos resíduos. A previsão da produção do biogás é ainda mais complicada pela degradação aeróbia prévia, pelas fugas nas emissões de gases que escapam para a atmosfera sem que sejam coletados e pela inibição química imprevista no ambiente do aterro sanitário. Choi et al. (2017), complementam que a quantidade e a composição dos resíduos depositados, as práticas de manejo dos aterros sanitários e as condições climáticas estão relacionadas à decomposição dos resíduos, dificultando a estimativa das quantidades de metano geradas pelos aterros.

No capítulo 4, será apresentado o caso prático do aterro NovaGerar, onde poderemos entender o impacto econômico que a imprecisão dos modelos de quantificação pode causar em projetos dessa natureza.

Dentre os diversos modelos existentes para quantificação do metano em aterros sanitários, dois se destacam como os melhores métodos, desde que os dados disponíveis sejam adequados: o modelo LandGEM, adotado pela US EPA e o IPCC Model (Kumar & Sharma, 2014). A maioria dos modelos existentes se baseiam na modelagem de primeira ordem sendo amplamente utilizados por avaliadores, projetistas e operadores de aterros (Majdinasab et al., 2017). Segundo Choi et al. (2017), o First order decay foi aplicado em 38 dos 41 países¹ do Anexo I nas submissões nacionais de inventário de GEE até 2012.

Neste trabalho será feita a opção pelo IPCC Model tendo em vista sua compatibilidade com o Programa Brasileiro GHG Protocol e com a metodologia adotada para quantificação de metano do estudo de caso abordado nesta dissertação.

First-Order Decay

First-order decay ou decaimento de primeira ordem é o modelo que serve como base para a metodologia adotada pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

¹ Turquia e Belarus fizeram uso do método MB; Mônaco não possui aterro sanitário, os resíduos são enviados para a França. Considera-se Estados Unidos da América entre os 41 países.

(IPCC), na quantificação do CH₄ em aterros sanitários. Diversos estudos na literatura fazem uso desse modelo, o mesmo inclusive é usado em projetos de CDM.

As Diretrizes do IPCC (2006) fornecem dois métodos de estimativa das emissões de metano a partir da disposição dos resíduos: o método Simple Mass Balance (MB) e o método First-order decay. O método MB estima as emissões de metano assumindo que todo o CH₄ é liberado no mesmo ano da eliminação dos resíduos. O First-order decay leva em conta o elemento tempo no processo de degradação e estima as emissões anuais refletindo o processo de decaimento que pode levar anos, até décadas. Todavia, segundo o IPCC (2006), a utilização do método MB é fortemente desencorajada, pois produz resultados qualitativamente inferiores que o método First-order decay, que produz estimativas mais precisas quanto as emissões.

Este método admite o pressuposto de que o componente orgânico degradável dos resíduos decai vagorosamente no decorrer dos anos, período esse, em que o CH₄ e CO₂ são constituídos. Mantendo-se inalteradas as condições, a taxa de produção de CH₄ irá depender exclusivamente do montante de carbono existente no resíduo. Devido a isso, as emissões de CH₄ admitem valores maiores nos anos iniciais após a deposição e vão reduzindo progressivamente à medida que o carbono degradável nos resíduos é absorvido pelas bactérias responsáveis pela decomposição. As diversas fórmulas e equações existentes nesse modelo podem ser consultadas no Anexo IV.

Devido à complexidade dos modelos matemáticos e numéricos, foram desenvolvidos diversos modelos empíricos simplificados. Alguns desses modelos são integrados a programas especiais de software para facilitar seu uso, como no caso do IPCC, que elaborou uma planilha (IPCC Waste Model), com a finalidade de facilitar o cálculo das emissões de metano originadas nos aterros sanitários.

Importante destacar que ao nos depararmos com diversos estudos relacionados com os GEE, nos defrontamos quase sempre com o termo CO₂ equivalente, dessa forma, no próximo capítulo daremos ênfase não somente a essa questão como todo processo relacionado com os mecanismos de flexibilização do protocolo de Kyoto, principalmente na questão do CDM que pode se tornar uma ótima ferramenta na otimização da conversão de antigos aterros sanitários em modernas instalações geradoras de energia.

Capítulo 2. Mecanismos de Flexibilização do Protocolo de Kyoto

Segundo a United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC, 2018a), “o Protocolo de Kyoto é um acordo internacional vinculado à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, que compromete suas Partes estabelecendo metas de redução de emissões dos gases causadores do efeito estufa.” “O Protocolo admite que os países desenvolvidos são os grandes responsáveis pelos níveis atuais de emissões”. Portanto, obriga esses países a reduzirem essas emissões, adotando o preceito conhecido como “responsabilidade comum, mas diferenciada”.

2.1 Conceito de Carbono Equivalente

O Protocolo de Kyoto abrange não somente o dióxido de carbono, comumente mencionado, como também diversos outros gases do efeito estufa. Desta forma, para que houvesse uma maneira de quantificar o total de emissões para conversão em créditos de carbono, se fez necessário a adoção de um conceito visando a representação desses gases em uma unidade comum. Dessa maneira, surge o termo carbono equivalente que pode ser definido como a representação dos múltiplos GEE na forma de CO₂.

Para tanto, conhecer o potencial de aquecimento passa a ser tarefa importante. Segundo a EPA (2018), o mesmo foi desenvolvido para permitir a comparação dos impactos do aquecimento global dos diferentes gases. O Global Warming Potential (GWP), faz menção a capacidade GEE absorverem calor na atmosfera em determinado período (100 anos), comparando-os ao poder de absorção do calor pelo CO₂. Dessa maneira, para que seja realizado o cálculo do carbono equivalente, multiplica-se a quantidade de um determinado gás pelo seu GWP.

Importante destacar que os valores referentes aos potenciais de aquecimento global dos principais gases são atualizados no decorrer dos anos, a Tabela 1 ilustra de forma prática essa evolução. As informações foram retiradas do IPCC Fifth Assessment Report (2014), se tratando, portanto, da atualização mais recente efetuada por esta organização.

GAS	GWP values for 100-year time horizon		
	Second Assessment Report (SAR)	Fourth Assessment Report (AR4)	Fifth Assessment Report (AR5)
CO ₂	1	1	1
CH ₄	21	25	28
N ₂ O	310	298	265

Tabela 1: Potencial de Aquecimento Global dos GEE.
 Fonte: IPCC (2014)

Verifica-se que os principais GEE quantificados pelo Protocolo de Kyoto, admitem variações no decorrer dos anos. Essas atualizações são de extrema importância para quantificar com exatidão a contribuição dos diferentes gases no agravamento do efeito de estufa.

2.2 Mecanismos de Flexibilização do Protocolo de Kyoto

Segundo a UNFCCC (2018a), com a intenção de facilitar os países a alcançarem as metas estabelecidas no objetivo de mitigar as emissões de GEE, o Protocolo de Kyoto instituiu três instrumentos de flexibilização. Dos três mecanismos, dois serão brevemente abordados neste trabalho: o Clean Development Mechanism (CDM) e os Emissions trading.

2.2.1 Mercado de Carbono

O mercado de carbono admite como definição ser o local onde as emissões de carbono são negociadas, ou seja, todas as operações relacionadas aos créditos de carbono são efetuadas. Segundo Newell et al. (2013), os mercados de carbono são hoje o maior representante de mercados ambientais ou de comércio de emissões do mundo, tanto em volume quanto em valor de mercado. E complementa que diversos são os mercados existentes, destacando-se nesse cenário Europa, Califórnia, Canada, Nova Zelândia. Fan et al. (2017), mencionam ainda o lançamento do mercado de carbono na China com a promessa de se tornar o maior do mundo.

Muito embora o foco do estudo seja a análise do mercado do CDM, entender o EU Emissions Trading Scheme (EU ETS), considerado o mercado mais importante existente, com maior volume de negócios e maior liquidez (Zeng et al., 2017), passa a ser tarefa fundamental, tendo em vista a ligação existente entre ambos. Segundo Newell et al. (2013),

o EU ETS tem sido o principal comprador de créditos do CDM. Seu uso, no entanto, é limitado por regulamento a uma fração do limite de cada estado membro. Uma vez que existe a permissão de se “importar” os créditos gerados pelo CDM, as Reduções Certificadas de Emissões (RCEs), portanto, podem ser adquiridas como compensação ao mercado europeu.

No decorrer deste trabalho será apresentado em detalhes a variação histórica nos preços dos principais ativos do mercado de carbono, RCE ligada ao CDM e as European Union Allowance (EUA) ligadas ao EU ETS, demonstrando de forma pormenorizada uma possível correlação existente entre ambos e os motivos das oscilações existentes em seus preços.

2.2.2 Clean Development Mechanism – CDM

Definido no Protocolo de Kyoto em seu artigo 12, tem como sua finalidade central, permitir que um país que possua compromisso para redução das emissões dos GEE, possa implementar projetos que objetivem a redução da emissão desses gases em países em desenvolvimento. Segundo a UNFCCC (2018a), o CDM foi projetado para atender a basicamente dois objetivos: fornecer ajuda aos países desenvolvidos a cumprirem seus compromissos de mitigação das emissões; e estimular o desenvolvimento sustentável em países subdesenvolvidos. Define ainda, que os projetos devem abranger áreas como: eficiência energética, energia renovável, florestação e reflorestamento, mitigação do gás metano e substituição de combustível.

As reduções nas emissões oriundas dos projetos de CDM precisam ser certificadas por entidades operacionais indicadas pela Conferência das Partes, ademais, outras duas diretrizes importantes constantes no artigo 12 do protocolo merecem destaque, são elas: (1) a participação de todas as partes deve ser voluntária; (2) uma parcela correspondente a 2% do total das RCEs referente aos projetos certificados deve ser o principal meio de captar recursos para o “fundo de adaptação” da UNFCCC usado para arcar com despesas administrativas e no auxílio de programas e projetos em países em desenvolvimento na questão das mudanças climáticas. (United Nations, 1998)

Segundo a UNFCCC (2018b), sete etapas devem ser percorridas para que se concretize a emissão das RCEs. Todas essas etapas fazem parte do ciclo de projeto do CDM e podem ser visualizadas na Figura 3:



Figura 3: Ciclo de um Projeto de CDM.

Fonte: UNFCCC (2018b)

Segundo a UNFCCC (2018b), o primeiro passo consiste na elaboração do projeto pelo participante, fazendo uso de um formulário específico (CDM-PDD) onde devem constar informações detalhadas sobre o futuro projeto. Existe a opção da adoção de uma metodologia de monitoramento e baseline existente ou a possibilidade de se propor uma nova. Sendo interesse do participante adotar uma nova metodologia, a mesma deverá ser submetida pela Entidade Operacional Designada (EOD), ao Conselho Executivo para análise e possível aprovação antes que seja validada. Por outro lado, se a opção adotada for o uso de uma metodologia aprovada previamente, a EOD pode prosseguir com a validação do projeto e enviar o CDM-PDD solicitando o seu cadastro.

Na segunda etapa, cabe a Autoridade Nacional Designada (AND), sendo essa, parte envolvida do processo, a elaboração de uma carta contendo as informações que o país ratificou o Protocolo de Kyoto, que sua participação no projeto acontece de forma voluntária, bem como uma declaração de que o projeto em análise contribui para o desenvolvimento sustentável. Como mencionado no parágrafo anterior, o PDD deve ser validado por uma EOD credenciada de natureza privada. No Anexo V, Fig. V e Fig. VI, foram disponibilizadas informações acerca da AND no Brasil, bem como a listagem completa de todas as EOD credenciadas no momento. A validação é um processo independente onde ocorre uma avaliação do projeto, certificando que o mesmo cumpre os

requisitos necessários estabelecidos pelo Protocolo de Kyoto. Os objetivos dessa etapa são confirmar que o projeto segue a metodologia aprovada e que o PDD apresentado pelos participantes do projeto determinará reduções de emissões realistas.

O registro do projeto consiste na aceitação formal pelo Conselho Executivo do projeto validado anteriormente, essa etapa é necessária para que se avance as etapas subsequentes como a verificação, certificação e consequente emissão das RCEs. Importante destacar que existe a possibilidade de alguma das partes ou ainda três membros do Conselho Executivo solicitarem a revisão do projeto, caso isso não ocorra, o mesmo é registrado. A etapa do monitoramento cabe exclusivamente ao participante do projeto, que deve realizar o monitoramento das emissões seguindo os parâmetros acordados na metodologia aprovada.

A verificação é a etapa onde a EOD audita se as reduções nas emissões aconteceram na quantidade reivindicada pelo participante em determinado período. Não existe uma obrigatoriedade para que essa etapa ocorra. No capítulo 3, elabora-se de forma pormenorizada um estudo evidenciando que diversos projetos analisados jamais passaram por uma verificação. Além disso, não existe um prazo estipulado para que seja solicitada a verificação, dessa forma o que vemos são projetos que realizam a cada dois meses e projetos que aguardam diversos anos para realizar o processo. Fato é, que a etapa da verificação é pré-requisito para que aconteça a certificação, processo pelo qual a EOD atesta por escrito que a atividade do projeto atingiu em determinado período as reduções das emissões reivindicadas. Esse documento atende pelo nome de relatório de monitoramento e pode ser consultado de forma individualizada na página de cada projeto no site da UNFCCC².

Por fim, o projeto entra em sua última etapa, a Emissão das RCEs. Depois de realizada a verificação e consequente certificação, a EOD envia ao Conselho Executivo o relatório de monitoramento solicitando a emissão das RCEs. Tal qual acontece na etapa do registro, existe a possibilidade de alguma das partes ou ainda três membros do Conselho Executivo solicitarem a revisão do pedido de emissão, caso isso não ocorra, a emissão é realizada.

2.3 O Uso do CDM para Recuperação Energética do Biogás

A execução de projetos de coleta e consequente utilização do metano em aterros constitui um ponto de partida válido para introduzir e desenvolver atividades no setor de

² <https://cdm.unfccc.int/Projects/projsearch.html>

energias renováveis nos países em desenvolvimento, alcançando ao mesmo tempo diversas benesses como: exploração de combustíveis não fósseis, redução de emissão de GEE, proteção ambiental, créditos RCEs a serem negociados, transferência de tecnologia e geração de emprego.

A ideia da diminuição do impacto causado pelos resíduos, principalmente no que concerne os gases liberados em seu processo de decomposição, paralelo ao aproveitamento desses gases para geração de energia, tornam a possibilidade desses projetos extremamente atraente, exceto por uma questão, o valor do investimento inicial. Nesse ponto, levando-se em consideração a atual situação financeira do Brasil, entende-se que exista a possibilidade do uso do CDM para financiar os pesados investimentos necessários para instalação de centrais de aproveitamento e geração de energia oriunda do biogás nos aterros sanitários. Importante destacar que as vantagens do CDM para a disposição final não se resumem à criação de aterros; abrangem ainda a melhoria dos aterros existentes e a remediação dos vazadouros.

2.3.1 Metodologia de Baseline Adotada

Segundo a UNFCCC (2016), diversas metodologias podem ser usadas em projetos de aterros sanitários, porém, a grande maioria dos projetos fazem uso da metodologia ACM0001, nomeada “Consolidated Baseline and Monitoring Methodology for Landfill Gas Project Activities”. Ao analisarmos os projetos de aterros sanitários disponibilizados na UNFCCC (2017), identificamos que dos 49 existentes no Brasil, 43 adotaram a metodologia supracitada. Em escala mundial, dos 260 projetos existentes, 204 fizeram uso da metodologia ACM0001. Importante destacar que projetos mais antigos como o caso estudado NovaGerar faziam uso de outras metodologias (AM0002,0003,0010 e 0011) que acabaram descontinuadas e substituídas pela metodologia ACM0001 na renovação dos respectivos PDDs “project design document”. Dessa forma, será apresentada neste trabalho apenas a metodologia consolidada evitando o excesso de informação, facilitando assim o entendimento comum.

A seguir é possível visualizar os dois possíveis cenários existentes nessa metodologia. A Figura 4 representa o cenário de baseline, onde o biogás do aterro sanitário é liberado na atmosfera sem qualquer tratamento. Por sua vez, a Figura 5 demonstra o cenário com a existência de um projeto de mitigação, onde o biogás do aterro é capturado e queimado;

podendo ainda ser usado na produção de energia; ou ser fornecido para consumidores através de rede de distribuição de gás natural, caminhões ou dutos dedicados.



Figura 4: Cenário sem Projeto de CDM.

Fonte: UNFCCC (2016)



Figura 5 Cenário com Projeto de CDM.

Fonte: UNFCCC (2016)

O monitoramento é tarefa crucial para averiguar se o resultado esperado foi atingido. As RCEs somente serão emitidas se comprovado, através de medições, a redução nas emissões de GEE. Dessa forma, a metodologia ACM0001 monitora os seguintes fatores: quantidade de gás de aterro capturado (vazão); temperatura do gás de aterro; fração de metano no gás de aterro; pressão no gás do aterro; se aplicável, geração de eletricidade usando gás de aterro.

No capítulo 4, onde será abordado o estudo de caso dessa investigação, serão exibidas algumas imagens relacionadas a visita realizada ao aterro NovaGerar, exemplificando na prática como funciona o sistema de monitoramento dos elementos supracitados em um aterro.

2.4 Mercado de Carbono: Uma Análise Histórica dos Preços

Nesse tópico iremos analisar de forma breve o mercado de carbono, onde as RCEs são transacionadas, principalmente quanto aos motivos da depreciação dos principais ativos. Diversos autores admitem uma forte correlação entre as RCEs e EUAs (Mansanet-Bataller et al., 2011; Koop & Tole, 2013; Zhang & Huang, 2015; Kanamura, 2016). Na medida que as RCEs são permitidas como compensação para que as empresas atinjam sua meta de redução de emissões dentro do EU ETS, esses dois mercados podem ter uma forte relação quanto a variação de seus preços. Além disso, é notório o papel predominante na condução das relações exercido pelos EUAs (Mansanet-Bataller et al., 2011; Kanamura, 2016).

Newell et al. (2013), afirmam que o EU ETS tem sido o principal comprador de créditos do CDM. Por isso, variações nos preços dos ativos tendem a admitir uma ligação. Koop e Tole (2013), acrescentam que o objetivo do EU ETS e mercados de compensação de carbono passa por alcançar reduções de CO₂ de uma maneira economicamente eficiente e que a existência de mercados financeiros eficientes para o comércio de licenças de carbono é necessária para alcançar tais objetivos.

De acordo com dados divulgados pela Comissão Europeia (2018), o EU ETS pode ser considerado o maior sistema de comércio de emissões do mundo, respondendo por mais de 75% do comércio internacional de CO₂. Além disso, limita emissões em mais de 11.000 empresas e companhias aéreas operando em 31 países do continente Europeu, cobrindo assim cerca de 45% dos GEE emitidos no continente.

O mercado dos RCEs pode ser dividido basicamente em duas maneiras, primário e secundário. O mercado primário envolve um maior risco, afinal as RCEs ainda não foram emitidas, existindo assim, o risco de o projeto não entregar o que foi prometido em termos de redução nas emissões, ou ainda, o projeto sequer ser aprovado pelo Conselho Executivo. Por sua vez, no mercado secundário o risco é praticamente nulo uma vez que as emissões já foram verificadas e as RCEs emitidas, não havendo assim, risco de entrega do que foi prometido.

O Gráfico 1 apresenta a série histórica de flutuação do preço das RCEs e EUAs no mercado secundário no período compreendido entre 2008 e 2018. Para tanto, foram coletados os valores de ambos os títulos no primeiro dia útil de cada mês no mercado futuro, apresentando assim de forma robusta dados importantes para o entendimento das variações ocorridas, bem como uma possível correlação entre os dois ativos.



Gráfico 1: Série Histórica de Flutuação do Preço das RCEs e EUAs.
Elaboração própria com base em EEX (2018)

O Gráfico 2 possui exatamente os mesmos valores do Gráfico 1 quanto aos preços da RCE, porém, com intuito de gerar uma melhor percepção das variações ocorridas, foi realizada uma ampliação destacando o período a partir de 2013.

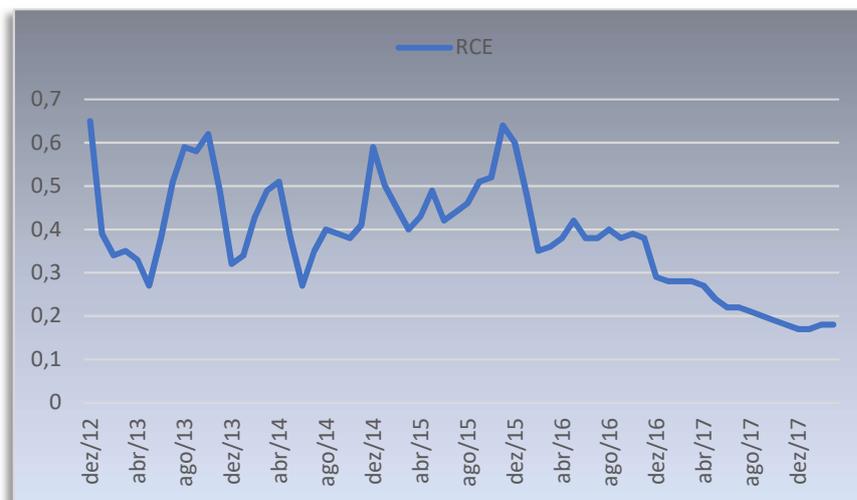


Gráfico 2: Série Histórica da Flutuação no Preço das RCEs.
Elaboração própria com base em EEX (2018)

Com base no comportamento das curvas visualizadas no Gráfico 1, fica evidenciado uma forte correlação que pôde ser comprovada através de uma análise para o período em causa, chegando ao valor de 0,9504. O Gráfico 3 evidencia essa correlação entre as duas variáveis, muito próxima do um. Portanto, é notória a forte ligação existente entre os dois ativos, o que não é de surpreender, tendo em conta que os dois representam o carbono.

Dessa forma, passa a ser uma tarefa de suma importância entender o funcionamento de ambos os mercados tendo em vista sua forte correlação quanto aos preços.

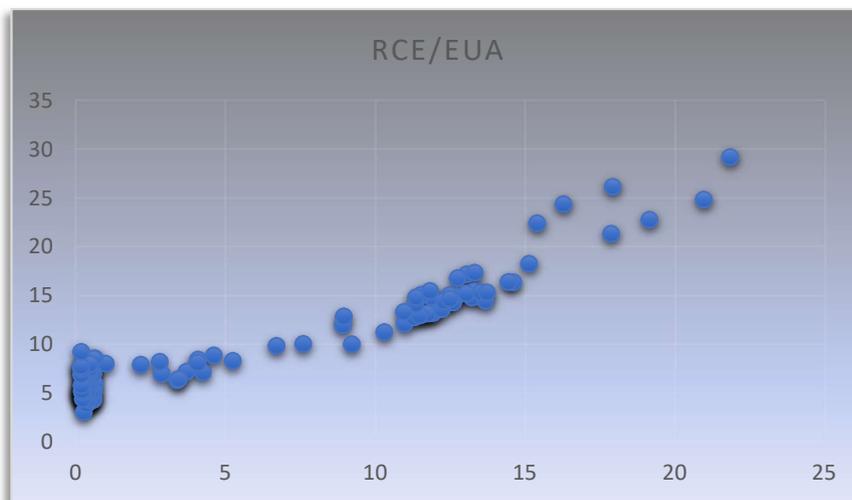


Gráfico 3: Correlação nos Preços RCE/EUA
Elaboração própria com base em EEX (2018)

Analisando o Gráfico 1 podemos identificar dois períodos de grande queda no valor de mercado, diversos autores expõem diferentes motivos para tal acontecimento. A primeira grande queda, iniciada em meados de 2008, pode ser atribuída a grande recessão econômica que assolou o mundo, diminuindo a produção industrial que reflete diretamente no PIB (Gráfico 4) e consequentemente diminuindo as emissões de carbono. Porém, creditar toda a flutuação existente no preço do carbono a uma variação na atividade econômica tende a ser uma análise extremamente simplista. A literatura que será apresentada demonstra que além dos indicadores da atividade econômica, variações nos preços das principais fontes energéticas, bem como seu consumo, mudanças na legislação, políticas de incentivo as energias renováveis e o excesso de permissões concedidas afetaram e ainda afetam o preço do carbono da mesma forma.

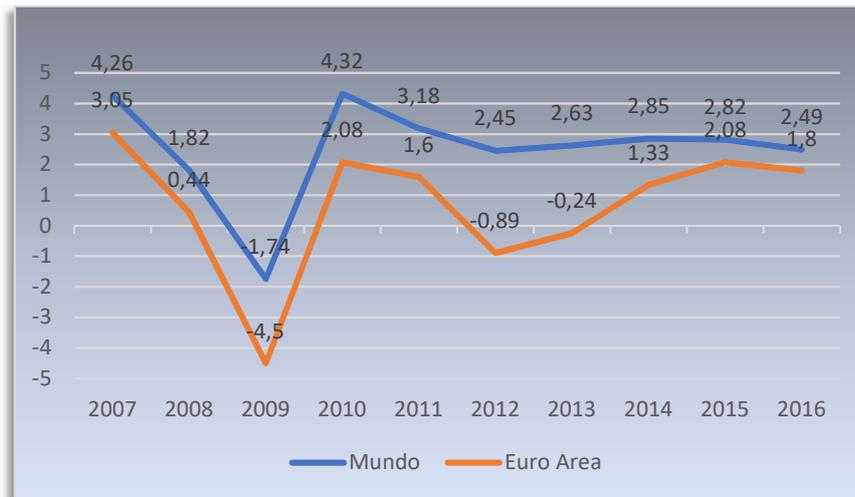


Gráfico 4: Taxa de Crescimento do PIB (anual).
 Elaboração própria com base em World Bank (2018)

Segundo Trotter et al. (2015), a queda drástica nos preços das RCEs no mercado secundário entre 2008 e 2013, pode ser atribuída a uma combinação de fatores, começando pelo excesso de licenças de emissão concedidas aos países, uma oferta que segundo o autor fazia com que fosse necessário um esforço diminuto para o cumprimento da meta de redução estabelecida, além disso, menciona a incerteza política quanto ao futuro do comércio de emissões, dificuldades econômicas após a crise financeira de 2008 e restrições à “importação” sobre créditos de RCEs para a União Europeia, que é considerada uma das principais compradoras de créditos de carbono. Koop e Tole (2013); Ibrahim e Kalaitzoglou (2016), corroboram com a ideia que os problemas gerados pela distribuição generalizada de licenças para as empresas e as incertezas quanto ao futuro afetam diretamente o preço dos RCEs.

Michaelowa (2014), complementa que por vários anos, o CDM funcionou como um elo de fato para os diversos Emission Trading Schemes em todo o mundo. Esse link foi enfraquecido pelas múltiplas restrições de acesso para RCEs introduzidas no decorrer dos anos pelos principais ETs (U.E, Nova Zelândia, Canadá e Califórnia). Essas restrições de acesso podem ser quantitativas, ou seja, introduzir uma cota máxima para uso de RCEs; ou qualitativas, isto é, estão ligadas as características de geração das RCEs como tipo de projeto, localização ou tempo de registro do projeto. Nazifi (2013), conclui em seu estudo que a falta de condições competitivas nos mercados, restrições de acesso ao uso e à disponibilidade de RCEs, mudanças regulatórias relativas tanto aos EUAs quanto aos RCEs e incerteza em relação ao CDM podem explicar uma parcela significativa na queda dos preços.

Conforme analisado anteriormente, existe uma correlação entre a variação nos preços das RCEs e EUAs, dessa forma, entender os motivos da depreciação no mercado EU ETS tende a fornecer importante informação para entendimento do que ocorre com os créditos de CDM. Segundo Koch et al. (2014), a crise econômica reduziu a produção das empresas cobertas pelo EU ETS, o que acarretou uma diminuição das emissões de CO₂ e consequentemente uma redução na demanda por EUAs. Porém, outros fatores estruturais também são relevantes para a formação de preços. A queda nos preços das EUAs, que em meados de 2008 admitia um preço de quase 30 €/tCO₂ passando a valer menos de 5 €/tCO₂ em meados de 2013, pode ser justificada por dois fatores: a recessão econômica e as políticas de incentivo às energias renováveis culminando com o crescimento na participação do consumo energético da União Europeia.

Com o objetivo de alcançar as metas estipuladas na diretiva 2009/28/CE, que entre diversas obrigações, exigia uma participação de 20% das energias renováveis até 2020 aos países da União Europeia, os Estados-Membros lançaram generosos mecanismos de apoio para estimular a implantação das renováveis (Feed-in tariff), o que contribuiu de forma eficaz para uma acentuada expansão da capacidade eólica e solar no setor da eletricidade. Nesse ponto, Koch et al. (2014), sugere que as políticas sobrepostas funcionam como objetivos opostos, uma vez que as injeções de renováveis reduzem as emissões de CO₂ dentro do EU ETS e, portanto, reduzem a demanda e o preço das EUAs.

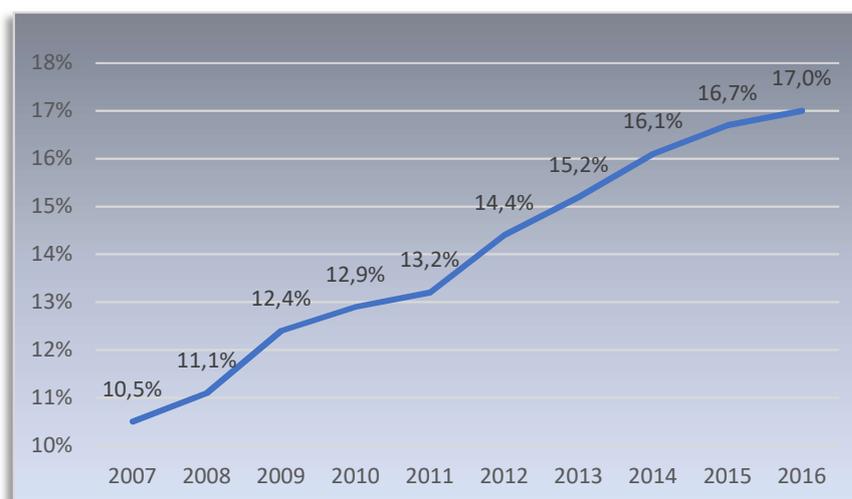


Gráfico 5: Participação das Energias Renováveis no Consumo da União Europeia.
Elaboração própria com base em Eurostat (2018)

O Gráfico 5 apresenta a evolução da participação das energias renováveis no consumo total dos 28 países membros da União Europeia. Nele é possível visualizar a evolução constante das renováveis ocorrida nos últimos 10 anos.

Hammoudeh et al. (2014) e Dhamija et al. (2017), afirmam que as diversas variações dos preços do petróleo bruto, gás natural e carvão, bem como da eletricidade, afetam diretamente o preço das permissões de emissão de CO₂. Não somente isso, citam ainda que variações na temperatura também afetam o preço do carbono porque mudam a demanda de energia. Por exemplo, invernos frios implicam maior uso de aquecimento e, portanto, maior necessidade de geração de energia. Mais produção de energia será alcançada com mais uso de combustível e, conseqüentemente, mais emissões de CO₂. Isso aumenta a demanda por licenças, o que, por sua vez, aumenta seu preço.

Chevalier (2011), tem um entendimento similar, em seu estudo, a atividade econômica e o preço da energia são considerados importantes vetores na alteração do preço dos EUAs. Complementa ainda, que a atividade econômica tem relação direta com a produção industrial, uma vez que a atividade econômica estimula a demanda por bens de produção industrial. Por sua vez, as empresas que se enquadram na regulamentação do EU ETS precisam produzir mais, visando atender a demanda dos consumidores, acarretando assim em um aumento nas emissões de CO₂. Isso resulta em uma demanda maior de permissões para cobrir as emissões industriais, ocasionando o aumento do preço do carbono. Zeng et al. (2017) e Zhao et al. (2018), partilham do mesmo pensamento ao afirmarem que a demanda por recursos depende de seus preços. Acredita-se que quando o carvão sobe de preço, as empresas que o usam como matéria-prima resistirão à produção ou buscarão energia alternativa para controlar o aumento do custo, fazendo com que o mercado de emissões tenda a recuar devido à queda na demanda. Segundo Newell et al. (2013), o setor de energia é uma área particularmente importante e também preocupante devido à sua grande parcela de participação nas emissões.

Sanin et al. (2015), definem em seu estudo alguns fatores interessantes que tiveram influência na variação do preço dos RCEs e EUAs no período entre 2008 e 2013. Nesse período o gás natural ficou mais barato do que o carvão na maior parte do tempo, tornando-se a fonte preferida de geração de energia. Esse fenômeno explica o impacto negativo, tendo em vista que o gás natural é menos poluente do que o carvão, o que leva a uma diminuição na demanda por licenças que induz uma redução no preço do CO₂. Aatola et al. (2013) e Dhamija et al. (2017), corroboram afirmando que o gás desempenha um papel importante e

crescente no Mix energético europeu e que diversas usinas de energia elétrica (termoelétrica) podem usar carvão ou gás natural podendo alternar entre esses combustíveis quando necessário. Dessa forma, variações no preço de qualquer um dos elementos tende a afetar o outro. A geração de eletricidade a partir do carvão é mais barata que a do gás natural, mas o carvão é quase duas vezes mais intensivo em carbono que o gás. Portanto, uma relação entre a troca desses combustíveis e o preço do carbono não deve ser descartada.

Com o objetivo de verificar as informações supracitadas por Aatola et al., 2013; Sanin et al., 2015 e Dhamija et al., 2017, foi elaborado o Gráfico 6 com a variação no preço do gás natural em dólar americano no período de 2008 até 2018. Os dados e valores fixados no Henry Hub negociados na Bolsa Mercantil de Nova York (NYMEX) foram coletados na U.S Energy Information Administration (EIA, 2018), e colaboram com a informação referente a queda do preço do gás natural no período condizente com as quedas nos RCEs e EUAs. Não somente isso, com objetivo de identificar essa possível correlação existente entre esses dois ativos e o gás natural, foi realizada uma análise quanto a variação dos preços. A mesma admitiu um índice de correlação de 0,7419 quando comparados os preços dos EUAs e gás natural e 0,6508 quando comparadas as RCEs com o mesmo gás natural. Embora esses valores não admitam uma correlação tão forte quanto a existente entre RCEs e EUAs, demonstram que os ativos analisados possuem realmente um considerável índice de correlação.

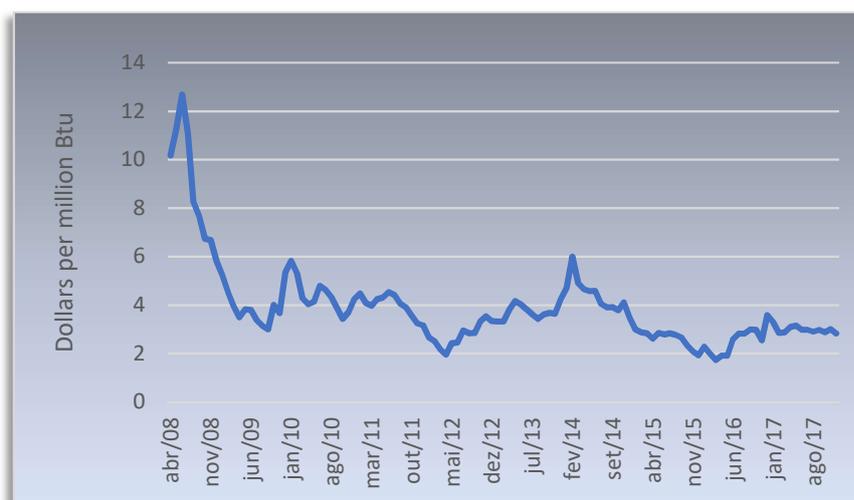


Gráfico 6: Série Histórica de Flutuação do Preço do Gás Natural.
Elaboração própria com base em EIA (2018)

Segundo Dhamija et al. (2017), o preço das licenças de emissão de CO₂ no âmbito do EU ETS é fortemente influenciado por decisões institucionais. Como em qualquer outro mercado, os participantes reagem à chegada de notícias, assim, qualquer intervenção política do regulador no EU ETS tem um impacto imediato sobre o preço do carbono. Newell et al. (2013), elucida que as revisões de políticas e mudanças regulatórias não podem ser evitadas, mas os governos devem se esforçar para torná-las transparentes e ordenadas. Órgãos reguladores, tribunais, legisladores e bancos centrais enfrentam a necessidade de tomar decisões de modo a permitir a todos os participantes igual acesso às informações, bem como a notificação antecipada da sequência e do momento do processo decisório.

Creti et al. (2012), faz ainda uma ligação interessante entre a variação no preço do carbono e índice Euro Stoxx 50. Esse índice tem por objetivo mensurar a performance das 50 maiores empresas entre os 19 maiores setores da zona do Euro. O Gráfico 7 foi elaborado através do levantamento da cotação histórica nos últimos 10 anos do papel na bolsa alemã de Frankfurt. Podemos identificar claramente um padrão de variação similar ao ocorrido nos preços das RCEs e EUAs, admitindo assim uma certa ligação entre os índices.

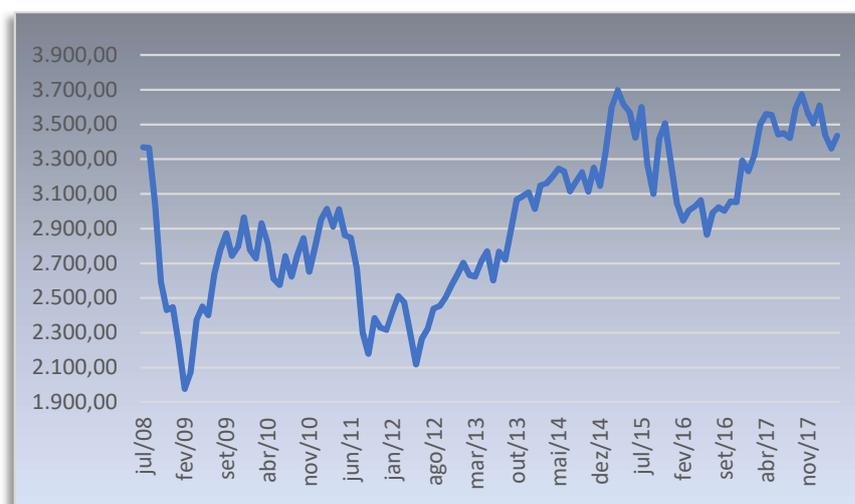


Gráfico 7: Variação da Cotação do Ativo Euro Stoxx 50.
Elaboração própria com base em Börse Frankfurt (2018)

Porém, há de se destacar as diversas mudanças ocorridas principalmente na fase 3 do EU ETS, iniciada em 2013. Segundo a Comissão Europeia (2018), a fase atual apresenta mudanças significativas se comparada as fases anteriores. Três fatores merecem destaque entre as mudanças ocorridas: (1) A existência de um único limite de emissões para toda União Europeia, alterando o antigo sistema de limites nacionais; (2) O leilão passa a ser o

mecanismo padrão na atribuição das licenças, alterando a atribuição gratuita, criticada por diversos autores citados nesse estudo; (3) Mais setores e gases incluídos.

Segundo Dhamija et al. (2017), a alocação durante as duas primeiras fases era majoritariamente gratuita de acordo com alguns benchmarks preexistentes de emissões, havendo uma grande mudança na fase atual com as permissões por leilão. Ainda segundo o autor, o EU ETS foi ampliado na fase atual para incluir principalmente setores industriais intensivos em energia como: petroquímicos e alumínio; além das emissões de óxido nítrico oriundas da fabricação dos ácidos; e as emissões do PFC do setor de alumínio.

2.4.1 Consequência da Baixa de Preços das RCEs para a Rentabilidade do CDM

O grande problema da queda nos preços das RCEs é interferir na adicionalidade dos projetos. Muitas vezes, a implementação de determinado projeto não é economicamente atraente, mas devido a possibilidade de receitas futuras derivadas das RCEs, esse projeto garante sua viabilidade. Devido a depreciação desse ativo, a maioria dos projetos não conseguem ser viáveis, dependendo de outras fontes de rendimento para sua concretização.

Portanto, o valor adicional advindo da comercialização dos créditos de CO₂ aumenta os retornos financeiros do projeto a um nível suficiente que justifique os diversos riscos existentes em investimentos com um prazo alongado, como por exemplo: a alocação de recursos financeiros em projetos de coleta e consequente aproveitamento do biogás em aterros. Esse papel fundamental que os créditos de CO₂ desempenham na definição dos investimentos em projetos e também nas suas viabilidades indicam que nos patamares encontrados atualmente, dificilmente essa viabilidade será garantida pelo valor das receitas oriundas das RCEs.

Após análise dos tópicos citados nos dois primeiros capítulos, entende-se como interessante analisar a situação brasileira nas questões supracitadas, dessa forma no próximo capítulo poderemos observar diversos assuntos tratados até o momento neste trabalho aplicados ao Brasil, podendo entender como se aplicam de forma empírica.

Capítulo 3. Panorama Atual no Brasil

Neste capítulo iremos abordar o cenário atual brasileiro concedendo um enfoque ao Estado do Rio de Janeiro com relação aos diferentes temas abordados nesta dissertação. Será possível identificar diversas particularidades acerca dos resíduos sólidos urbanos através de dados atuais coletados em entidades público e privadas atuantes nessa área. Além disso, informações relacionadas ao aproveitamento energético nos aterros e a legislação inerente ao assunto estarão presentes nesta seção.

3.1 Panorama Atual dos Resíduos Sólidos

Uma vez que destacamos a importância de mensurar o potencial energético nos aterros sanitários, e identificamos as principais formas de se calcular esse potencial, precisamos detalhar agora o cenário atual dos resíduos sólidos no Brasil, com objetivo de identificar o verdadeiro potencial existente oriundo dos resíduos urbanos gerados.

O Brasil possui hoje 5.570 municípios, segundo dados divulgados pela ABRELPE (2016), 2.239 adotam os aterros sanitários como disposição final para os resíduos gerados, 1.772 utilizam aterros controlados e 1.559 recorrem ainda hoje aos lixões (Tabela 2). Logo, cerca de 60% dos municípios brasileiros tem uma destinação inadequada para os resíduos produzidos, uma vez que apenas os aterros sanitários podem ser considerados uma destinação correta. É possível verificar inclusive um aumento na destinação incorreta dos resíduos. Ao compararmos os anos de 2015 e 2016 podemos identificar uma diminuição dos municípios que enviam seus resíduos para os aterros sanitários, em contrapartida, o número de municípios que remeteram os RSU para os lixões sofreu um aumento, que embora seja pequeno em termos percentuais, indica a manutenção e agravamento da situação encontrada no Brasil atualmente.

Disposição Final	Brasil 2015 Municípios	%	Regiões 2016					Brasil 2016	
			Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sudeste	Sul	Municípios	%
Aterro Sanitário	2.244	40,30%	92	458	161	822	706	2.239	40,20%
Aterro Controlado	1.774	31,85%	112	500	148	644	368	1.772	31,81%
Lixão	1.552	27,85%	246	836	158	202	117	1.559	27,99%
Brasil	5.570	100%	450	1.794	467	1.668	1.191	5.570	100%

Tabela 2: Número de Municípios por Tipo de Destinação Final.

Fonte: ABRELPE (2016)

Segundo a ABRELPE (2015), o total de RSU gerados no Brasil em 2015 atingiu o montante de 79,9 milhões de toneladas. Ao analisarmos os valores para o Estado Rio de Janeiro na Tabela 3, identificamos que foram geradas 22.213 toneladas de RSU diariamente, desse total, 21.895 toneladas foram recolhidas. Portanto 318 toneladas de resíduos não são coletadas todo dia, o que demonstra uma falha no sistema.

População Total		RSU Gerado (t/dia)		RSU Coletado			
				(Kg/hab/dia)		(t/dia)	
2014	2015	2014	2015	2014	2015	2014	2015
16.461.173	16.550.024	21.834	22.213	1,307	1,323	21.518	21.895

Tabela 3: Total de Resíduos Gerados e Coletados no Estado do Rio de Janeiro.

Fonte: ABRELPE (2015)

Porém, o ponto que gera maior preocupação pode ser visualizado na Figura 6. Segundo dados da ABRELPE (2015), menos de 70% dos resíduos coletados no Estado tem a destinação correta. Os outros 30% tem como destino aterros controlados e lixões, fazendo com que todos os dias 6.874 toneladas de resíduos tenham como disposição final locais inapropriados, impactando negativamente tanto o ambiente quanto a saúde da população. Há de se destacar que o Rio de Janeiro apresenta um dos melhores sistemas quando comparado com outros estados do Brasil, onde a média de destinação correta atinge a marca de apenas 58,7%.

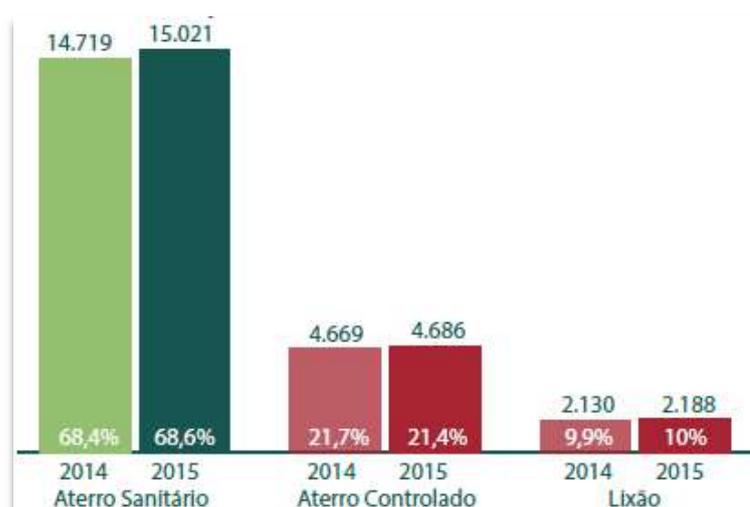


Figura 6: Destinação Final dos Resíduos no Estado do Rio de Janeiro (T/Dia).

Fonte: ABRELPE, 2015

O setor de resíduos, segundo o Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2016), responde por pouco mais de 4% da totalidade das emissões de GEE no Brasil. Ao considerarmos apenas o Estado do Rio de Janeiro, esse número sofre um grande aumento, respondendo por cerca de 14% de todas as emissões existentes.

Abordando a questão da reciclagem, encontramos uma grande dificuldade de encontrar números confiáveis do panorama atual brasileiro. Diferentemente da Europa, o Brasil carece de informações que possam nortear políticas públicas, bem como mensurar a eficácia das estratégias existentes. Segundo dados do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2017), o País recicla apenas 13% dos resíduos sólidos gerados, quando comparado aos países desenvolvidos, notadamente no continente europeu. Conseguimos assim visualizar o enorme desafio a ser enfrentado pelo país.

3.2 Panorama Atual do Aproveitamento Energético em Aterros Sanitários

Segundo dados divulgados no Banco de Informações de Geração (BIG, 2018), o Brasil conta atualmente com 19 usinas de biogás oriundas dos resíduos sólidos urbanos que contribuem com 131.931 KW na matriz energética brasileira (Figura 7).

Fonte de Combustíveis Utilizados no Brasil - Operação				
Fonte Nível 2	Quantidade	Potência Outorgada(kW)	Potência Fiscalizada(kW)	%
Biogás - RU	19	131.931	128.851	97,99
Carvão - RU	1	2.700	2.700	2,01
Total	20	134.631	131.551	100

Figura 7: Total de Usinas de Biogás em Aterros Sanitários.

Fonte: BIG (2018).

O Brasil ainda recupera apenas uma pequena fração do potencial energético produzido a partir do biogás emitido pelos aterros sanitários. Fato é, que encontramos nessas informações um gigantesco potencial não aproveitado, tendo em vista que os números indicam uma parcela mínima de aterros que fazem uso do biogás para geração de energia.

No que segue, faz-se uma breve introdução ao funcionamento do mercado elétrico no Brasil, com objetivo de auxiliar na avaliação da viabilidade dos projetos de recuperação energética nos aterros. Identificar a real possibilidade de venda do excedente de energia produzido por determinado aterro pode ser o diferencial entre a viabilidade ou não de um

projeto. Segundo a ABRACEEL (2018), o mercado brasileiro de energia nos dias de hoje é dividido basicamente em duas formas de comercialização:

(1) O Ambiente de Contratação Regulada, onde a contratação é compulsória sendo a distribuidora, escolhida mediante a localização geográfica do consumidor final. Os consumidores desse ambiente são conhecidos como cativos. As tarifas não podem ser negociadas e são definidas pela ANEEL através de leilões. Fazem parte desse ambiente todos os consumidores residenciais, bem como alguns comércios e indústrias.

(2) Ambiente de Contratação Livre, onde os consumidores contam com a possibilidade de escolha dos fornecedores que os irão atender. De forma livre, fornecedores e consumidores negociam as condições do contrato de energia. Para que o usuário, notadamente consumidores livres e especiais, possa optar por esse regime, é necessário cumprir alguns requisitos³.

Segundo informações da ABRACEEL (2018), cerca de 60% da energia utilizada pelas indústrias no Brasil advém do mercado livre de energia. Nesse mercado, segundo informações da CCEE (2018), existem 7.062 agentes divididos entre consumidores livres e especiais, comercializadores, geradores e distribuidores. Desses, importa destacar os consumidores livres e especiais que respondem por 867 e 4.529 respectivamente, o que demonstra um grande potencial de negócios para revenda do excedente energético produzido nos aterros sanitários. Tal informação, somada a algumas leis relacionadas a comercialização do biogás que veremos no próximo tópico, são de extrema importância, pois tendem a garantir um cenário positivo para possíveis investidores.

3.3 Ambiente Regulatório – Resíduos e Energia

Tão importante quanto ter uma breve visão sobre o funcionamento do setor energético brasileiro, o entendimento da base legal é fundamental para garantir a segurança necessária para que investimentos ocorram no setor. Dessa forma, será abordada a legislação pertinente que abrange não somente os resíduos sólidos urbanos, como a comercialização de recursos energéticos no Brasil, particularmente na questão do biogás.

³ Consumidores livres: apresentam um consumo superior a 3.000 kW, podendo adquirir energia de qualquer procedência. Consumidores especiais: apresentam um consumo entre 500 kW e 3.000 kW, tendo como opção a aquisição de energia oriunda de usinas solares, biomassa, eólica e pequenas centrais hidroelétricas.

No que concerne aos RSU, foi instituída a lei com maior impacto ao meio ambiente, abordando diretamente o assunto tratado nesta dissertação. Atendendo pelo número 12.305/2010, a Política Nacional de Resíduos Sólidos⁴ (PNRS), conta com diversas diretrizes relacionadas a gestão dos RSU, abarcando desde a geração até sua destinação final. Alguns pontos merecem destaque, entre eles podemos citar o artigo 9º que trata da gestão dos resíduos, enfatizando algumas prioridades que já foram vistas no capítulo 1 sob o título de hierarquia da gestão dos resíduos: *“não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos”*. No mesmo artigo em seu parágrafo 1º a lei é taxativa *“Poderão ser utilizadas tecnologias visando à recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, desde que tenha sido comprovada sua viabilidade técnica e ambiental e com a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental”*.

Em seu artigo 15º, nos incisos IV e V destacamos respectivamente dois pontos aderentes ao tema deste estudo *“metas para o aproveitamento energético dos gases gerados nas unidades de disposição final de resíduos sólidos”*; *“metas para a eliminação e recuperação de lixões, associadas à inclusão social e à emancipação econômica de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis”*

Cabe destacar que a dilação para fechamento dos lixões, ou segundo a lei, *“disposição final ambientalmente adequada”*, terminava em agosto de 2014, porém, o que se observa em 2018 é um número alarmante de lixões existentes tendo inclusive aumentado no último ano. Devido a isso, tramita no congresso brasileiro o projeto de lei (PLS 425/2014), para mudança no prazo para o encerramento dos lixões. Após ter sido aprovado no Senado Federal, seguiu em 2015 para aprovação da Câmara dos Deputados. O projeto tem como propósito definir novos prazos mediante o tamanho da população dos municípios. Dessa forma, olhando os dois extremos, capitais e grandes centros teriam até julho de 2018 e cidades com menos de 50 mil habitantes teriam até julho de 2021 para adequação a lei.

A PNRS instituiu ainda dois importantes mecanismos: *“Responsabilidade Compartilhada pelo Ciclo de Vida dos Produtos”* e a *“Logística Reversa”*.

Acerca da Responsabilidade Compartilhada, no seu artigo 31º, a lei 12.305/2010 designa *“aos fabricantes, distribuidores, importadores e comerciantes tarefas como: investimento no desenvolvimento, na fabricação e na colocação no mercado de produtos, que sejam aptos, após o uso pelo consumidor, à reutilização, à reciclagem ou a outra forma de destinação ambientalmente adequada; cuja fabricação e uso gerem a menor quantidade de resíduos sólidos possível”*.

⁴ A lei em sua totalidade pode ser acessada em: www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm

Em relação a logística reversa, no artigo 33º “*São obrigados a estruturar e implementar sistemas de logística reversa, mediante retorno dos produtos após o uso pelo consumidor, de forma independente do serviço público de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos, os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes*”. Nesse ponto, o consumidor tem papel fundamental, tendo em vista que cabe exclusivamente a ele a tarefa de iniciar o processo reverso, devolvendo o produto após seu uso para os comerciantes e distribuidores.

No tocante a comercialização dos recursos energéticos, algumas leis merecem destaque. No dia 29/06/2017, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), aprovou a resolução nº 685/2017, estabelecendo regras no sentido de controlar a qualidade e a especificação do biometano originado nos aterros sanitários (ANP, 2017). Tal medida, é de suma importância⁵ pois permite que o produto possa ser injetado na rede de distribuição, sendo comercializado em substituição ao gás natural no uso veicular, bem como em instalações industriais, comerciais e residenciais. Para tanto, é necessário que o produtor obtenha a aprovação do controle de qualidade da ANP. Além disso, a Lei 6361/12, que institui a Política Estadual de Gás Natural Renovável no estado do Rio de Janeiro, tem entre suas diretrizes algumas vantagens para os produtores de biometano. Em seu artigo 3º, a lei obriga a aquisição de forma compulsória de todo o biometano produzido no Estado pelas concessionárias de distribuição de gás (AGENERSA, 2018).

3.4 Projetos de CDM em Aterros Sanitários no Brasil

Segundo dados divulgados pela UNFCCC (2017), o Brasil conta hoje com 49 projetos relacionados com aterros sanitários. Ao analisarmos individualmente os dados relativos aos projetos, conseguimos entender a importância do CDM no combate ao aquecimento global. Hoje, os 49 projetos existentes permitem deixar de emitir 12.485.634 milhões de toneladas de CO₂ eq. ano. Esse número corrobora para a importância de uma

⁵ Uma situação que ilustra a importância da lei pode ser vista no caso do aterro sanitário do município de São Pedro da Aldeia, localizado no Rio de Janeiro. A empresa Dois Arcos Gestão de Resíduos, administradora do aterro recebeu no dia 21/09/2017, a primeira autorização para comercializar o biometano, que já era produzido desde 2014, mas por ausência de uma legislação era descartado. Dessa forma 10.000 m³ de biometano devem ser comercializados diariamente para postos de combustível e indústrias através de caminhões-tanque (Globo, 2017; PMSPA, 2017).

destinação correta, pois demonstra que mesmo uma pequena parcela, quando comparada ao total de aterros existente no País, pode contribuir de forma significativa na mitigação.

No Gráfico 8 podemos observar a distribuição temporal dos 49 projetos existentes no decorrer dos anos. É possível identificar uma grande queda nos últimos anos que pode ser explicada devido aos valores atuais das RCEs, fator esse decisivo para viabilidade dos projetos.

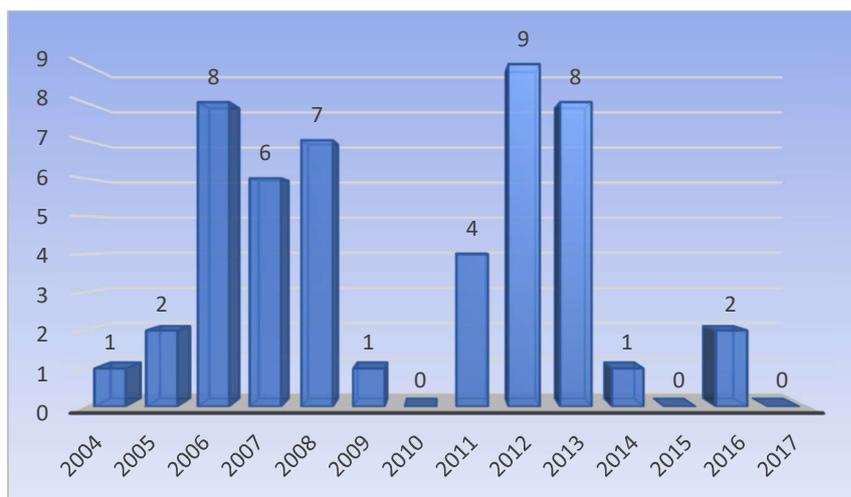


Gráfico 8: Total de Projetos de CDM no Decorrer do Anos.

Fonte: Elaboração própria com base em UNFCCC (2017)

A Tabela 4 ilustra alguns dados importantes acerca dos projetos de CDM existentes no Brasil. Nela podemos identificar a contribuição dos projetos na redução das emissões em cada uma das cinco regiões do país, bem como mensurar a representatividade desse montante no total de emissões relacionadas exclusivamente aos resíduos. Merece atenção o fato da região centro-oeste, que possui a maior percentagem de emissões per capita, não ter qualquer projeto. Embora esse número de emissões não possa ser explicado de maneira concreta, admite-se que tal valor seja fruto de uma alta renda per capita, essa por sua vez tende a gerar um maior consumo que acarreta em uma maior produção de resíduos. Segundo dados do IBGE (2018), os três estados pertencentes a essa região, somados ao Distrito Federal, fazem parte das maiores rendas per capita entre os estados brasileiros.

Tal fato pode ser corroborado analisando os números das demais regiões. É possível visualizar a região sudeste, notadamente uma das mais ricas do país, apresentar uma alta emissão per capita. Essa questão se repete com a região sul. Em contrapartida, as regiões norte e nordeste, reconhecidamente mais pobres que as demais, apresentam valores de emissão per capita bem abaixo das outras.

Ao abordamos a situação do número de projetos existentes, observamos a região sudeste concentrando o maior número de projetos, muito à frente das restantes nesse quesito. No decorrer do estudo será pormenorizada a distribuição dos projetos entre os estados brasileiros.

Região	CDM	T CO ₂ eq	População	Total Emissão	Emi:Pop	% Emissão
Sul	7	832.273	29.644.948	13.849.205	46,7%	6%
Sudeste	30	8.181.730	86.949.714	47.436.754	54,6%	17%
Centro-Oeste	0	-	15.875.907	9.695.263	61,1%	
Nordeste	9	2.009.273	57.254.159	17.935.627	31,3%	11%
Norte	3	1.462.358	17.936.201	3.048.864	17,0%	48%
Total	49	12.485.634	207.660.929	91.965.713	44,3%	14%

Tabela 4: Particularidades dos Projetos de CDM no Brasil.

Elaboração própria com base em UNFCCC (2017), IBGE (2017) e SEEG (2016)⁶

Onde:

- CDM:** Número de projetos de CDM em aterros sanitários por região;
T CO₂eq: Total de emissões de GEE evitadas segundo os projetos de CDM;
População: População existente em cada região;
Total Emissão: Total de emissão de GEE no setor de resíduos em cada região;
Emi: Pop: Razão existente entre o total das emissões e a população;
% Emissão: Percentagem emissões evitadas pelo total emitido em cada região.

Os Gráficos 9 e 10 apresentam informações referentes aos projetos de CDM existentes no Brasil. No Anexo VI, é possível consultar o total de emissões evitadas por cada projeto segundo seus respectivos PDDs.

O Gráfico 9 apresenta a distribuição espacial dos projetos nas diferentes regiões do Brasil. Nele é possível identificar a região sudeste com o maior número de projetos, por sua vez, a região centro-oeste aparece com nenhum. Verifica-se no Gráfico 10 o total de projetos existentes nos estados brasileiros. É possível identificar uma grande concentração de projetos no estado de São Paulo, por sua vez, o Rio de Janeiro, objeto de estudo dessa dissertação aparece com 5 projetos.

⁶ Os dados referentes aos projetos de CDM, TCO₂eq foram coletados na UNFCCC (2017). Os dados acerca da população total, bem como sua divisão pelas regiões geográficas do Brasil foram levantados junto ao IBGE (2017). Por fim, os dados referentes ao total de emissão podem ser consultados através do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2016).

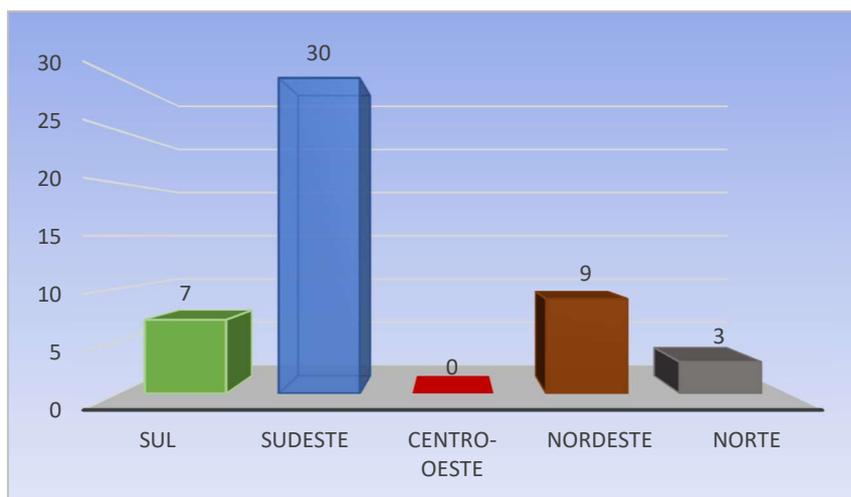


Gráfico 9: Total de Projetos de CDM por Regiões Geográficas no Brasil.

Fonte: Elaboração própria com base em UNFCCC (2017)

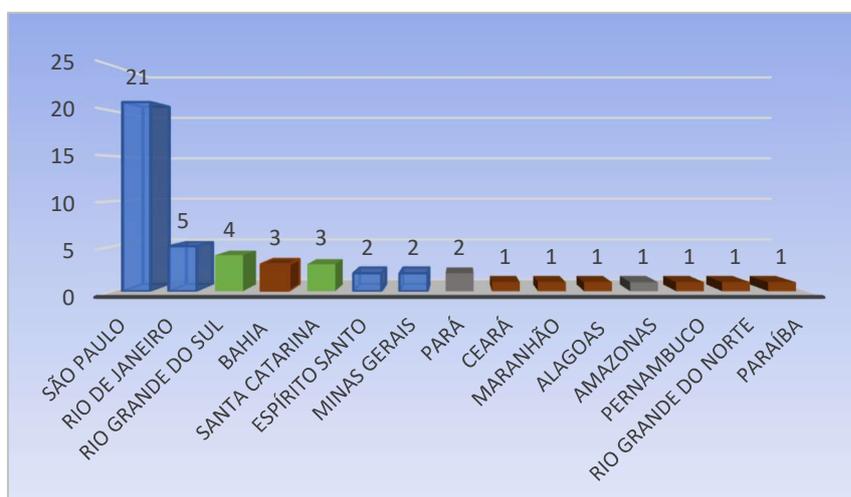


Gráfico 10: Total de Projetos de CDM nos Estados Brasileiros.

Fonte: Elaboração própria com base em UNFCCC (2017)

Com o objetivo de fornecer de forma pormenorizada detalhes dos projetos de CDM em aterros sanitários existentes no Brasil, foi feita uma pesquisa detalhada, dedicando-se a averiguar na prática se os valores referentes a diminuição das emissões propostas nos 49 projetos aconteceram realmente. A Tabela 5 apresenta os valores fornecidos nos projetos, os valores verificados após o monitoramento e a percentagem de quanto foi atingido. Em destaque, podemos observar ainda as informações referentes ao projeto de CDM objeto de estudo deste trabalho (NovaGerar, Rio de Janeiro).

PROJETO	ESTIMATIVA	VERIFICADO	ANO	%	LOCALIZAÇÃO
CTR Maceio Landfill Gas Project	116,336				Alagoas
Manaus Landfill Gas Project	1.031,574	531,567	2017	51,53%	Amazonas
Salvador da Bahia Landfill Gas Management Project	532,351	544,764	2008	102,33%	Bahia
Canabrava Landfill Gas Project	202,867	14,421	2007	7,11%	Bahia
Feira de Santana Landfill Gas Project	42,572	22,204	2009	52,16%	Bahia
Oeste de Caucaia Landfill Project Activity	523,569				Ceará
Brazil MARCA Landfill Gas to Energy Project	231,405	59,861	2011	25,87%	Espirito Santo
CTR VV Landfill emission reduction project	94,454	47,006	2010	49,77%	Espirito Santo
CTR Rosario Landfill Gas Project	63,981				Maranhão
Exploitation of the biogas from Controlled Landfill in S	134,160	141,301	2015	105,32%	Minas Gerais
MACAÚBAS LANDFILL GAS PROJECT	377,528				Minas Gerais
Aurá Landfill Gas Project	320,151	274,621	2016	85,78%	Pará
CPTR Marituba landfill gas project	110,633				Pará
PROBIOGAS-JP – João Pessoa Landfill Gas Project	211,150	19,859	2011	9,41%	Paraíba
CTR Candeias Landfill Gas Project	155,112	138,906	2015	89,55%	Pernambuco
Brazil NovaGerar Landfill Gas to Energy Project	210,812	159,563	2016	75,69%	Rio de Janeiro
Itaoca Landfill Gas Project	25,887				Rio de Janeiro
Gramacho Landfill Gas Project	313,751				Rio de Janeiro
CTDR Bob Ambiental landfill gas project	77,851				Rio de Janeiro
Dois Arcos Landfill Gas Project Activity	60,283				Rio de Janeiro
Natal Landfill Gas to Energy Project	161,335				Rio Grande do Norte
Central de Resíduos do Recreio Landfill Gas Project	506,798	345,473	2016	68,17%	Rio Grande do Sul
ITVR Sao Leopoldo landfill gas project	33,141				Rio Grande do Sul
Rio Grande landfill gas project	11,436				Rio Grande do Sul
CTR da Caturrita landfill gas project	31,957				Rio Grande do Sul
Proactiva Tijuquinhas Landfill Gas Capture and Flari	131,194	215,623	2012	164,35%	Santa Catarina
SANTECH – Saneamento & Tecnologia Ambiental L	39,478				Santa Catarina
Canhanduba Landfill Project	78,269				Santa Catarina
Onyx Landfill Gas Recovery Project – Trêembé, Bra	70,063	42,613	2007	60,82%	são Paulo
Bandeirantes Landfill Gas to Energy Project (BLFGE)	250,268	168,400	2017	67,29%	são Paulo
ESTRE's Paulínia Landfill Gas Project (EPLGP)	365,368	455,212	2016	124,59%	são Paulo
Caieiras landfill gas emission reduction	1.213,522	831,758	2016	68,54%	são Paulo
Landfill Gas to Energy Project at Lara Landfill, Mauá,	751,148	485,374	2009	64,62%	são Paulo
São João Landfill Gas to Energy Project (SJ)	816,940	370,520	2011	45,35%	são Paulo
Anaconda Landfill Gas Project	120,423	30,263	2010	25,13%	são Paulo
Quitaúna Landfill Gas Project (QLGP)	118,034				são Paulo
ESTRE Itapevi Landfill Gas Project (EILGP)	104,923	91,408	2012	87,12%	são Paulo
URBAM/ARAUNA - Landfill Gas Project (UALGP)	116,909	110,122	2012	94,19%	são Paulo
Embralixo/Araúna - Bragança Landfill Gas Project	66,399	52,702	2010	79,37%	são Paulo
ESTRE Pedreira Landfill Gás Project (EPLGP)	601,625	797,662	2013	132,58%	são Paulo
Terrestre Ambiental Landfill Gás Project	113,834	116,550	2010	102,39%	são Paulo
Alto-Tietê landfill gas capture project	480,595	226,331	2010	47,09%	são Paulo
CTL Landfill Gas Project	737,221	629,706	2018	85,42%	são Paulo
CGR Guatapara Landfill Project	211,924				são Paulo
ENGEPE & BEGREEN CDM Project at UTGR – Jamb	106,154				são Paulo
Constroeste Landfill Gas to Energy Project	156,203				são Paulo
Proactiva CGA Iperó Landfill Gas to Energy Project	114,937				são Paulo
ESTRE Piratininga Landfill Gas Project	68,899				são Paulo
CGR CATANDUVA LANDFILL GAS PROJECT	70,210				são Paulo
TOTAL	12.485,634	6.923,790			

Projetos			Projetos Monitorados		
Monitorados	27	55%	Sim	6	22%
Não Monitorados	22	45%	Não	21	78%
Total	49	100%	Total	27	100%

Tabela 5: Análise dos Projetos de CDM em Aterros Sanitários no Brasil.

Fonte: Elaboração Própria com base em UNFCCC (2017)

Na tabela é possível observar que dos 49 projetos existentes, 27 tiveram pelo menos uma vez algum monitoramento, ou seja, 55% dos projetos foram monitorados. Porém, dos 27 projetos monitorados apenas 6 atingiram ou superaram o que foi proposto em termos de redução nos projetos, ou seja 78% dos projetos não obtiveram êxito no que foi proposto. Essas informações corroboram com o fato explicitado anteriormente onde foram abordados os métodos de quantificação do metano em aterros sanitários (item 1.5) e as dificuldades encontradas em obter exatidão nessa tarefa. Outra questão que essa imprecisão acarreta, afeta diretamente o mercado de carbono, especialmente o primário, onde um dos grandes riscos encontrados está justamente na divergência existente entre o que projeto declara como mitigação dos gases e o que acontece na prática. Como demonstrado na tabela, o que se vê na prática são estimativas extremamente elevadas quando comparadas com o que é realmente entregue.

Em destaque na Tabela 5, observa-se ainda as informações referentes ao projeto de CDM objeto de estudo deste trabalho. O mesmo entrega cerca 75% do que foi proposto em termos de redução das emissões, ficando aquém do que foi estabelecido na elaboração de seu PDD.

No próximo capítulo poderemos observar em detalhes essa e diversas outras particularidades acerca deste projeto.

todos os assuntos relacionados ao CDM. Além disso, informações específicas concernentes à concepção do projeto foram coletadas nos respectivos PDD, Relatório de Monitoramento e Relatório de Validação (UNFCCC, 2018c).

4.1 O caso NovaGerar

Segundo consta em sua mais recente validação, datada em 22/11/2011, fazem parte do projeto na qualidade de participantes: (1) NovaGerar Eco Energia Ltda.; (2) Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento (BIRD); (3) Ministério de Infraestrutura e Meio Ambiente da Holanda (IenM).

De acordo com informação constante no PDD, o projeto contempla investimentos em sistemas de recolha do gás e do lixiviado, bem como uma central de energia para o aproveitamento do biogás recuperado. O aterro sanitário teve seu início em fevereiro de 2003. Nessa época recebia aproximadamente 2.000 toneladas de RSU diariamente, hoje esse número atinge 4.500 toneladas, depositadas diariamente por caminhões que ao chegar são obrigados a passar por uma pesagem que irá quantificar o valor a ser pago pelo despejo dos resíduos. Importante destacar que antes de sua inauguração, existia em um terreno adjacente o lixão da Marambaia, inaugurado em 1986 tendo sua atividade encerrada em fevereiro de 2003, recebendo nesse período por volta de 700 mil toneladas de resíduos. O projeto de captura do biogás gerado contempla tanto Adrianópolis como Marambaia iniciando suas operações em 15/03/2007 e 17/05/2007 respectivamente. Há de se mencionar, porém, que devido ao baixo fluxo e a qualidade do gás (percentagem de metano) no aterro da Marambaia a operação se tornou economicamente inviável, sendo a atividade de extração e captura do biogás descontinuada em 2010.

Em sua elaboração, o projeto possuía duas fases distintas: a primeira tinha como objetivo a instalação de um sistema de recolha do biogás que através de uma rede composta por dutos, transportavam o mesmo para um sistema de tratamento na qual a umidade e impurezas eram removidas seguindo assim, para a queima do metano no flare, mitigando o efeito nocivo das emissões. A operação do aterro foi dividida ainda em 4 células para destinação dos resíduos, denominadas sub-aterros. A segunda etapa abarcava a geração de energia oriunda do biogás, reduzindo as emissões de CO₂ associadas ao uso da eletricidade da rede. A primeira fase encontra-se em completo funcionamento, por outro lado o uso do biogás na geração eletricidade não foi concretizado. Segundo Ivan Machado, devido ao custo para aquisição dos equipamentos para geração de energia, o mesmo foi terceirizado cabendo

à empresa subcontratada a instalação de todo o maquinário. Dessa forma, na atualidade, todo o metano capturado é queimado em flares, aguardando o momento em que a empresa terceirizada concretize a parte que lhe cabe.

O projeto tem entre seus objetivos, melhorar a qualidade do meio ambiente e a saúde local. Problemas como o chorume que escoava do lixão da Marambaia afetando a qualidade do solo e os lençóis freáticos e as emissões de metano, até então descontroladas que ofereciam riscos ao meio ambiente e a qualidade do ar na região, foram extremamente mitigados com o início da operação do aterro sanitário em 2003. Além disso, mesmo que de forma reduzida, o projeto tem um impacto positivo no emprego local, uma vez que postos de trabalho foram criados para o funcionamento das operações diárias no aterro.

A atividade do projeto possui um período de creditação que pode ser renovado duas vezes, o primeiro período teve seu início em 01/07/2004 encerrando o prazo em 30/06/2011. O mesmo encontra-se agora no segundo período de creditação, iniciado em 01/07/2011 sendo seu encerramento até 30/06/2018, cumprindo o prazo usual de 7 anos. Segundo o entrevistado, uma empresa de consultoria especializada em projetos de CDM foi contratada visando a captação de um novo parceiro para renovação do período final de créditos dos próximos 7 anos.

No capítulo 1 abordamos a questão da quantificação do metano e sua importância para elaboração de qualquer projeto de aterro sanitário. No caso prático NovaGerar, a quantificação efetuada por 3 diferentes empresas, apontava para uma vazão de cerca de 6.000 (Nm³/h). Com base nessas informações, a empresa adquiriu toda o maquinário baseado nos dados do estudo, todavia, ao iniciar a operação do aterro verificou-se uma vazão superior, atingindo 7.200 (Nm³/h), vazão essa existente até os dias atuais. Dessa forma, um novo maquinário, com capacidade superior, precisou ser adquirido, já que o antigo não supria as necessidades existentes no momento. No Anexo VII, Fig. VII é possível visualizar detalhes do monitoramento da vazão. No momento da imagem, apenas as linhas 3 e 4 estavam operando, possuindo respectivamente uma vazão de 1.617 (Nm³/h) e 5.621 (Nm³/h).

Portanto, parece razoável que no momento da quantificação do metano, a empresa operadora do aterro, visando evitar possíveis riscos de um custo futuro na aquisição de novos equipamentos, admita uma margem de erro, optando por maquinários que atendam a vazões superiores as estipuladas nos estudos de quantificação do CH₄, tendo em vista, que conforme mencionado na literatura apresentada, tais estudos carecem de precisão em suas análises.

Ainda no capítulo 1, foi apresentado o processo de formação do metano em aterros sanitários, bem como a composição média dos gases constituintes. Na literatura pesquisada, as taxas admitiam valores que variavam entre 45% e 60% de metano na composição total do biogás. No caso prático, é possível verificar no Anexo VII, Fig. VIII a percentagem de metano em 53%, corroborando com o que foi apresentado anteriormente. Nesse ponto, segundo o entrevistado, para que seja viável o aproveitamento energético do biogás, é necessário um percentual mínimo de 50% de metano no gás coletado.

No capítulo 2, abordamos questões importantes referente aos trâmites percorridos em processos de CDM. Quase em sua totalidade essas etapas são realizadas antes do projeto entrar em atividade, cabendo depois de seu início as etapas de monitoramento e emissão das RCEs. Dessa forma, mesmo sendo citadas todas as etapas do processo, o enfoque será dado nas questões ativas dos trâmites. A etapa da elaboração do projeto (PDD), é de única responsabilidade do responsável pelo aterro, não cabendo aqui grandes detalhes, muito embora todas as informações possam ser consultadas na página do projeto⁷. A avaliação da Autoridade Nacional Designada (AND), tem como seu representante no Brasil a Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima. No Anexo V, Fig. V, podemos consultar detalhes dos responsáveis pelo processo.

A validação efetuada pela EOD é a próxima etapa a ser concluída. Diversas são as entidades existentes, dessa forma, foi disponibilizado no Anexo V, Fig. VI, a listagem de todas as EOD filiadas ao CDM. No caso específico do projeto NovaGerar, a empresa Spanish Association for Standardization and Certification (AENOR) foi a responsável pelo processo de validação do novo PDD em 2011, correspondente ao segundo período de validação. De acordo com a empresa, a validação envolveu um estudo do PDD e documentação associada, metodologia aprovada, entrevistas com integrantes do projeto e a resolução de questões pendentes, terminado com a elaboração de um relatório final de validação e parecer. Esse relatório de validação contém diversas informações referentes ao processo, das quais podemos destacar: o cenário de baseline original, reduções estimadas nas emissões e o plano de monitoramento. Além disso, menciona as qualificações dos membros da equipe de validação e uma listagem das pessoas entrevistadas no processo. Ao final, soluções corretivas foram solicitadas que acabaram por resultar em uma nova versão do PDD original. Por fim, a entidade atestou que o projeto cumpria todos as condições

⁷ www.cdm.unfccc.int/Projects/DB/DNV-CUK1095236970.6/view

necessárias da UNFCCC para projetos de CDM e todos os critérios relevantes do país anfitrião, recomendando, portanto, a renovação de um novo período de creditação.

Destacamos ainda no capítulo 2, informações relacionadas ao monitoramento que tem entre seus objetivos, fiscalizar através de computadores as seguintes informações: a vazão e composição da entrada do gás no sistema, bem como a composição e temperatura de queima na saída. Essas informações podem ser visualizadas novamente na Fig. VII, Anexo VII. Contudo, por se tratar de um flare aberto, temperatura e composição de queima na saída não podem ser auferidos, como resultado, o valor a ser recebido do crédito de carbono corresponde a apenas 50%, caso tivesse um flare fechado com medição o valor chegaria a 98%⁸. Importante destacar que ao analisar o PDD e até mesmo o relatório de monitoramento do ano de 2016, nos deparamos com a informação da existência de uma flare fechado. Porém, devido a dificuldades na manutenção o mesmo foi substituído por um flare aberto (Anexo VII, Fig. IX). As leituras dos dados e monitoramento são atualizadas e remetidas a cada 5 minutos para um centro de dados externo do programa de gerenciamento AEMS (Automated Extraction Monitoring System), fabricado e gerido por uma entidade independente. Os participantes do projeto podem aceder a todas as informações a qualquer momento em qualquer lugar através do site do programa que analisa e calcula todos os dados relacionados ao gerenciamento da instalação, operação e controle da redução de emissão de créditos de carbono.

No monitoramento existe ainda o desconto das emissões correspondentes ao que foi consumido de energia no período para manutenção das atividades do aterro, esse valor é descontado do crédito a ser recebido. A empresa faz uso da energia elétrica da rede e ocasionalmente de um gerador a diesel. O último monitoramento realizado no aterro, seguindo a metodologia ACM0001, já elucidada no segundo capítulo, abrange o período de 01/01/2016 até 31/08/2016 totalizando 244 dias. Esse foi o sexto monitoramento realizado no segundo período de creditação, atingindo uma redução nas emissões de 106.667 TCO₂eq no período ou de aproximadamente 13.550 TCO₂eq por mês. Porém, esses valores devem sofrer uma forte mudança na próxima verificação realizada. Segundo informações colhidas no dia da visita ao aterro, o processo de captura do metano foi otimizado permitindo uma maior coleta, garantindo uma redução de aproximadamente 21.000 TCO₂eq mês. Importante destacar, que todos os equipamentos críticos, relacionados ao projeto de CDM em aterros

⁸ O valor não atinge 100% devido ao desconto de 2% destinado ao fundo de adaptação.

sanitários estão sujeitos a manutenção e testes regulares, de acordo com as especificações técnicas dos fabricantes, com a finalidade de garantir exatidão na mensuração dos dados e bom desempenho. Portanto, a calibração de equipamentos como: os aferidores de vazão e sistemas de análise do gás, deve ser realizada periodicamente de acordo com as especificações técnicas.

Para que aconteça a emissão dos RCEs, é necessária a realização de uma auditoria com a finalidade de verificar a veracidade na redução das emissões reivindicadas. Importante destacar que não existe a obrigatoriedade de realização da mesma, mas os RCEs somente serão emitidos após a sua realização. Geralmente são realizadas anualmente, embora não exista prazo definido, de tal forma que caso exista interesse, pode-se auditar inclusive mensalmente. O principal motivo para que isso não ocorra está no custo, pois cada auditoria consome cerca de R\$ 50.000 (€ 12.500), pagos com crédito de carbono⁹.

O processo de auditoria é realizado por uma equipe, composta por três elementos, sendo dois deles auditores indicados pelo CDM e um terceiro na qualidade de consultor, vinculado ao Banco Mundial. Todos os dados do monitoramento são verificados, levando geralmente dois a três dias para a conclusão. Especificamente neste caso, coube à empresa norueguesa TUV NORD realizar a etapa de Verificação e Certificação. Após essa etapa, cabe ao Conselho Executivo ratificar a veracidade das informações presentes na primeira auditoria. Somente após a conclusão de todas essas etapas acontece a emissão dos RCEs.

Importante ressaltar um dos grandes problemas enfrentados na atualidade por todos os projetos de CDM, o preço dos RCEs. Esse problema foi explicado em detalhes no capítulo 2, onde foram abordados detalhes do mercado de carbono, e principalmente os motivos para queda do preço. O caso específico estudado não foge à regra, muito embora os valores atuais não possam ser revelados por uma questão de confidencialidade, o efeito visto no mercado de carbono pode ser replicado no caso prático.

⁹ O valor é descontado do total de RCEs que se tenha a receber.

Conclusão

Nas últimas décadas, o rápido crescimento populacional e econômico, atrelado a uma forte urbanização nos países em desenvolvimento, acarretou o aumento da geração dos resíduos, agravando diversos problemas existentes. Nesses países, uma grande parte dos resíduos sólidos urbanos ainda é descartada em vazadouros, que acabam por se tornar fontes importantes de GEE, ricos em CH₄, com alto potencial de aquecimento global. Além disso, essa disposição incorreta acaba por causar inúmeros impactos, seja na questão ambiental, seja na saúde pública.

Esta investigação teve como principal objetivo analisar a viabilidade e importância do uso do CDM em melhorias nas destinações finais dos resíduos sólidos gerados no Brasil. Nomeadamente, procurou-se mensurar a real contribuição desses projetos na mitigação das emissões de GEE na atmosfera. Para tanto, foi apresentado no decorrer deste estudo, uma literatura que amparada por diversos dados coletados em entidades públicas e privadas no Brasil e exterior, evidenciaram a importância dos projetos de CDM na mitigação dos efeitos nocivos gerados pela destinação incorreta dos resíduos.

Nesse ponto, há de se destacar que a análise individual dos projetos de CDM em aterros sanitários realizada nesta dissertação, identificou grandes divergências entre os números da redução nas emissões dos GEE apresentados nos projetos e o que realmente acontecia na realidade. Tal informação, afeta diretamente o mercado de carbono, principalmente o mercado primário onde o grande risco existente é relacionado diretamente com uma discrepância entre o que consta nos projetos e o que é entregue verdadeiramente.

Os números levantados demonstraram que apenas 55% dos projetos passaram pela etapa de monitoramento. Desses, 78% apresentaram valores inferiores ao que foi proposto na formatação de seus projetos, chegando algumas vezes, a apresentar valores inferiores a 10% do que se propunha a atingir. Esses dados são de extrema relevância pois apontam para um grande problema apresentado neste trabalho: a dificuldade de mensuração na produção de metano em aterros sanitários. Este estudo entende que devido à discrepância entre os números propostos e o que realmente é evitado nas emissões, o Conselho Executivo do CDM deveria adotar como regra, a obrigatoriedade do monitoramento desses projetos ao menos uma vez, com o intuito de verificar a eficiência dos mesmos na prática, corrigindo assim, possíveis distorções em projetos futuros. Devido a essa ausência de monitoramento, esta pesquisa não pôde ser realizada em sua plenitude, deixando de averiguar 45% dos

projetos, impossibilitando assim, a mensuração de forma precisa dos resultados obtidos pelos CDM nos aterros sanitários brasileiros em sua totalidade.

A dificuldade na quantificação do metano gerado ficou evidenciada também no caso prático apresentado, onde apesar da existência de três estudos de empresas distintas, os valores mensurados não corresponderam à realidade, impactando diretamente no custo do projeto. Esse fato foi abordado em detalhes como um dos maiores problemas na concepção dos aterros sanitários, sendo citado por diversos autores que evidenciaram a dificuldade de quantificação da produção de metano neste tipo de destinação dos resíduos. Esta mensuração, conforme demonstrado no decorrer do estudo, é parte fundamental para avaliação da viabilidade do aproveitamento energético em aterros. Portanto, a carência de informações precisas, afeta não somente a confiabilidade do que é proposto nos projetos, como também o planejamento e a análise financeira dos mesmos.

Embora os números de projetos implementados tenham apresentado uma acentuada queda, se comparados com anos anteriores, não se pode afirmar que o CDM esteja com os dias contados, uma vez que, em outros momentos, a ausência de projetos também ocorreu. O que existe, e pode ser claramente identificado no estudo, é uma depreciação do valor de mercado das RCEs, confirmada na análise efetuada ao abordarmos o histórico de preços no mercado de carbono, particularmente quanto ao mercado secundário. Esse efeito tende a inviabilizar diversos projetos uma vez que o rendimento obtido através das RCEs influi diretamente na adicionalidade dos mesmos.

A legislação mereceu certo destaque neste trabalho. Políticas de incentivo ao aproveitamento energético em aterros devem ser estimuladas pelo poder público, seja através de incentivos financeiros ou deduções fiscais visando um incremento na atividade. Importantes conquistas legais foram alcançadas nos últimos anos, dentre as quais, a possibilidade de comercialização do biometano produzido nos aterros. Essa legislação tende a ser extremamente importante, pois cria um enorme mercado consumidor para o biometano gerado, uma vez que praticamente toda a frota de táxis e diversos automóveis utilizam como combustível o gás natural no Brasil. Outro caso impactante pode ser observado na lei estadual do Rio de Janeiro que obriga a aquisição da totalidade do biometano produzido nos aterros pelas concessionárias de distribuição de gás natural. Tal legislação cria no possível investidor uma segurança legal, além de uma garantia quanto a viabilidade do projeto.

No tocante à viabilidade financeira, identifica-se que o CDM aparece como uma importante ferramenta na captação de recursos a serem investidos em melhorias no

gerenciamento dos resíduos sólidos, mais precisamente nos aterros sanitários. O fato de não se tratar de um empréstimo, e sim de um investimento onde a principal contrapartida é a comprovação da adicionalidade, faz do uso do CDM um enorme aliado na captação de recursos. Além disso, o aproveitamento energético, sob a forma térmica ou elétrica, passa a ser elemento chave na viabilidade desses projetos, transformando os aterros em verdadeiras fontes de rendimento, garantindo assim o retorno não somente em questões ambientais como também no aspecto financeiro. Portanto, este estudo verificou na prática a viabilidade do CDM como um instrumento de melhoria na destinação final dos resíduos. Embora o momento atual não seja o melhor, principalmente devido aos valores baixos das RCEs no mercado de carbono, em uma análise histórica ficou evidenciada a enorme contribuição desses projetos em questões extremamente importantes ligadas ao gerenciamento dos RSU.

Por fim, o mais importante nesta dissertação vem a ser as diversas propostas de melhorias, não somente na destinação final dos resíduos sólidos, mas em diversas etapas do processo de gerenciamento apresentado neste estudo sob o título de hierarquia dos resíduos. Tais propostas só puderam ser elaboradas após minuciosa análise da literatura existente, bem como dos processos de excelência praticados em países evoluídos na gestão dos resíduos sólidos urbanos. O que se entende é que o investimento não pode ser concentrado apenas nos aterros, uma vez que com a proporção de aumento encontrada no montante gerado de resíduos, a ausência de espaço para construção de novos aterros será uma questão de tempo.

Portanto, entende-se que somente medidas conjuntas podem melhorar de forma satisfatória a questão dos RSU. Dessa forma, a hierarquia dos resíduos pode representar uma mais valia nesse gerenciamento, reduzindo a quantidade dos rejeitos destinados aos aterros. Investimentos em reciclagem e compostagem devem ser fomentados, uma vez que os mesmos, segundo a literatura, se mostraram extremamente importantes na redução do montante enviado aos aterros. Países desenvolvidos, nomeadamente os localizados no continente europeu encontram-se diversos passos à frente nesse quesito, a começar pela questão da educação, fator de extrema importância para lograr êxito em projetos de reciclagem, que dependem fortemente do engajamento da sociedade. Logo, acreditar que a simples transferência de medidas adotadas na Europa para o Brasil teriam a mesma eficácia em um curto espaço de tempo parece de certa forma utópico, levando-se em conta a enorme defasagem existente em diversos aspectos.

Desse modo, devido à urgência do problema, seria de extrema importância o investimento em atividades para mitigação da questão no curto prazo. Este estudo entende

que o investimento em incineração seria a solução conjunta ideal com os aterros para uma evolução necessária na questão dos resíduos em um curto espaço temporal.

Muito embora essa dissertação tenha focado sua atenção em aterros sanitários, por se tratar da principal forma de lidar com os resíduos no Brasil e no mundo em geral, é notório que a incineração apresenta diversas benesses no tratamento dos RSU. Não obstante, a mesma aparece como uma etapa mais favorável que os aterros na hierarquia dos resíduos, sendo praticada por diversos países desenvolvidos, nomeadamente os europeus que fazem uso maciço desse mecanismo, demonstrando que certas preocupações e preconceitos existentes no Brasil deveriam ser superados. Este aliás é um ponto que precisa ser trabalhado. Devido a questões não técnicas, o Brasil utiliza a incineração quase sempre para tratamento de resíduos perigosos como os hospitalares. Isso se deve a uma resistência da população que vê na incineração uma forma de tratamento altamente prejudicial ao meio ambiente. Todavia, o que se observou nesta dissertação, é que muito embora não seja isenta de controvérsia, a evolução tecnológica deste tipo de tratamento mitigou de forma considerável possíveis danos ao meio ambiente.

Portanto, tendo em vista a dificuldade encontrada para que o Brasil consiga dar uma destinação adequada aos resíduos gerados, o presente estudo acredita que tais investimentos nesse método só tenderiam a agregar valor na gestão dos resíduos. O uso do CDM na concepção de novas usinas de incineração, que apresentam um elevado custo de instalação, é fortemente encorajado, juntamente com a criação de novos aterros sanitários e conversão dos lixões ainda hoje existentes, visando a mitigação do problema dos resíduos no curto prazo. Por último, não devem ser esquecidos outras ações extremamente importantes, mas que exigiriam um tempo superior para demonstrar resultados práticos, como o investimento em educação como forma de introduzir uma consciência ambiental, atrelado a investimentos e incentivos em centros de reciclagem e compostagem que poderiam mitigar o montante de resíduos enviados aos aterros sanitários.

Bibliografia

- Aatola, P., Ollikainen, M., & Toppinen, A. (2013). Price determination in the EU ETS market: Theory and econometric analysis with market fundamentals. *Energy Economics*, 36, 380-395.
- ABRACEEL. (2018). Associação Brasileira dos Comercializadores de Energia. Disponível em: http://www.abraceel.com.br/archives/files/Abraceel_Cartilha_MercadoLivre_V9.pdf. Acessado em 08 de janeiro de 2018.
- ABRELPE. (2015). Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2015. São Paulo: ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2015.pdf>. Acessado em 08 de novembro de 2017.
- ABRELPE. (2016). Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2016. São Paulo: ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Disponível em: http://www.abrelpe.org.br/panorama_apresentacao.cfm. Acessado em 12 de novembro de 2017.
- ABNT. (2004). Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10004: Resíduos Sólidos - Classificação, 2004.
- AGENERSA. (2012). Agência Reguladora de Energia e Saneamento Básico do Estado do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.agenersa.rj.gov.br/documentos/Legislacoes/LEI6361-2012.pdf> Acessado em 01 de maio de 2018.
- ANP. (2018). Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em: <http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2017/junho&item=ranp-685--2017>. Acessado em 01 de março de 2018.
- BIG. (2018). Banco de Informações de Geração. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acessado em 30 de janeiro de 2018.
- Börse Frankfurt. (2018). Disponível em: http://en.boerse-frankfurt.de/index/Euro_Stoxx_50. Acessado em 28 de abril de 2018.
- Bove, R., & Lunghi, P. (2006). Electric power generation from landfill gas using traditional and innovative technologies. *Energy Conversion and Management*, 47(11-12), 1391-1401.
- Broun, R., & Sattler, M. (2016). A comparison of greenhouse gas emissions and potential electricity recovery from conventional and bioreactor landfills. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2664-2673.
- CCEE. (2018). Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Disponível em: https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/quem-participa?_adf.ctrl-state=10bhdtv27_1&_afzLoop=263215079543080#!%40%40%3F_afzLoop%3D263215079543080%26_adf.ctrl-state%3D10bhdtv27_5. Acessado em: 29 de maio de 2018.

- Chakma, S., & Mathur, S. (2017). Modelling gas generation for landfill. *Environmental Technology*, 38(11), 1435-1442.
- Chevallier, J. (2011). A model of carbon price interactions with macroeconomic and energy dynamics. *Energy Economics*, 33(6), 1295-1312.
- Choi, E., Shin, E., Seo, Y. S., Kim, J. Y., & Yi, S. M. (2017). The application and development of country-specific parameters for accurate estimations of methane emissions from solid-waste disposal sites. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 19(3), 1117-1126.
- Comissão Europeia. (2018). Disponível em: https://ec.europa.eu/clima/policies/ets_en. Acessado em: 09 abril 2018.
- Cossu. (2016). Back to Earth Sites: From “nasty and unsightly” landfilling to final sink and geological repository. *Waste Management*, 55, 1-2.
- Creti, A., Jouvét, P.-A., & Mignon, V. (2012). Carbon price drivers: Phase I versus Phase II equilibrium? *Energy Economics*, 34(1), 327-334.
- Cucchiella, F., D’Adamo, I., & Gastaldi, M. (2014). Strategic municipal solid waste management: A quantitative model for Italian regions. *Energy Conversion and Management*, 77, 709-720.
- Cucchiella, F., D’Adamo, I., & Gastaldi, M. (2017). Sustainable waste management: Waste to energy plant as an alternative to landfill. *Energy Conversion and Management*, 131, 18-31.
- Dhamija, A. K., Yadav, S. S., & Jain, P. K. (2017). Forecasting volatility of carbon under EU ETS: a multi-phase study. *Environmental Economics and Policy Studies*, 19(2), 299-335.
- Djuric Ilic, D., Eriksson, O., Ödlund, L., & Åberg, M. (2018). No zero burden assumption in a circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 182, 352-362.
- Du, M., Peng, C., Wang, X., Chen, H., Wang, M., & Zhu, Q. (2017). Quantification of methane emissions from municipal solid waste landfills in China during the past decade. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 272-279.
- EEX. (2018). European Energy Exchange. Disponível em: <https://www.eex.com/en#/em>. Acessado em 20 de março de 2018.
- EIA. (2018). U.S Energy Information Administration. Disponível em: <https://www.eia.gov/opendata/qb.php?sdid=NG.RNGWHHD.M>. Acessado em: 15 de abril de 2018.
- El-Fadel, M., Findikakis, A. N., & Leckie, J. O. (1997). Environmental Impacts of Solid Waste Landfilling. *Journal of Environmental Management*, 50(1), 1-25.
- ElSaid, S., & Aghezzaf, E.-H. (2018). A progress indicator-based assessment guide for integrated municipal solid-waste management systems. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 20(2), 850-863.
- EPA. (2017). LFG Energy Project Development Handbook. Disponível em: <https://www.epa.gov/lmop/landfill-gas-energy-project-development-handbook>. Acessado em 04 de março de 2018.

- EPA. (2018). United States Environmental Protection Agency. Disponível em: <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials> . Acessado em 20 de janeiro de 2018.
- Eugenia Sanin, M., Violante, F., & Mansanet-Bataller, M. (2015). Understanding volatility dynamics in the EU-ETS market. *Energy Policy*, 82, 321-331.
- Eurostat. (2018). European Statistics. Disponível em: http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=nrg_ind_335a&lang=en . Acessado em 01 de maio de 2018.
- Fan, Y., Jia, J.-J., Wang, X., & Xu, J.-H. (2017). What policy adjustments in the EU ETS truly affected the carbon prices? *Energy Policy*, 103, 145-164.
- Farrell, M., & Jones, D. L. (2009). Critical evaluation of municipal solid waste composting and potential compost markets. *Bioresource Technology*, 100(19), 4301-4310.
- Globo (2017). Disponível em: <https://g1.globo.com/rj/regiao-dos-lagos/noticia/sao-pedro-da-aldeia-rj-e-a-primeira-cidade-do-pais-autorizada-a-captar-biogás-de-aterro-sanitário.ghtml> . Acessado em: 01 de março de 2018.
- Greedy, D. (2016). Landfilling and landfill mining. *Waste Management & Research*, 34(1), 1-2.
- Hammoudeh, S., Nguyen, D. K., & Sousa, R. M. (2014). What explain the short-term dynamics of the prices of CO2 emissions? *Energy Economics*, 46, 122-135.
- Hong, J., Chen, Y., Wang, M., Ye, L., Qi, C., Yuan, H., . . . Li, X. (2017). Intensification of municipal solid waste disposal in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 168-176.
- IBGE. (2017). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/estimapop/tabelas> . Acessado em: 15 de março de 2018
- IBGE. (2018). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rendimento domiciliar per capita 2017. Disponível em: https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/trabalhoerendimento/pnad_continua/default_renda_percapita.shtm Acessado em: 29 de junho de 2018
- Ibrahim, B. M., & Kalaitzoglou, I. A. (2016). Why do carbon prices and price volatility change? *Journal of Banking & Finance*, 63, 76-94.
- Ikhlayel, M. (2018). Development of management systems for sustainable municipal solid waste in developing countries: a systematic life cycle thinking approach. *Journal of Cleaner Production*, 180, 571-586.
- IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 5. Waste. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html>. Acessado em: 22 de abril de 2018.
- IPCC. (2014). Fifth Assessment Report (AR5). Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/>. Acessado em 23 de abril de 2018.

- IPEA. (2017). Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Disponível em:
http://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=29296
 Acessado em 03 de junho de 2018.
- Jara-Samaniego, J., Pérez-Murcia, M. D., Bustamante, M. A., Pérez-Espinosa, A., Paredes, C., López, M., . . . Moral, R. (2017). Composting as sustainable strategy for municipal solid waste management in the Chimborazo Region, Ecuador: Suitability of the obtained composts for seedling production. *Journal of Cleaner Production*, *141*, 1349-1358.
- Jouhara, H., Czajczyńska, D., Ghazal, H., Krzyżyńska, R., Anguilano, L., Reynolds, A. J., & Spencer, N. (2017). Municipal waste management systems for domestic use. *Energy*, *139*, 485-506.
- Kanamura, T. (2016). Role of carbon swap trading and energy prices in price correlations and volatilities between carbon markets. *Energy Economics*, *54*, 204-212.
- Koch, N., Fuss, S., Grosjean, G., & Edenhofer, O. (2014). Causes of the EU ETS price drop: Recession, CDM, renewable policies or a bit of everything?—New evidence. *Energy Policy*, *73*, 676-685.
- Koop, G., & Tole, L. (2013). Modeling the relationship between European carbon permits and certified emission reductions. *Journal of Empirical Finance*, *24*, 166-181.
- Krause, M. J., Chickering, G. W., Townsend, T. G., & Reinhart, D. R. (2016). Critical review of the methane generation potential of municipal solid waste. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, *46*(13), 1117-1182.
- Kumar, S., Mondal, A. N., Gaikwad, S. A., Devotta, S., & Singh, R. N. (2004). Qualitative assessment of methane emission inventory from municipal solid waste disposal sites: a case study. *Atmospheric Environment*, *38*(29), 4921-4929.
- Kumar, A., & Sharma, M. P. (2014). Estimation of GHG emission and energy recovery potential from MSW landfill sites. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *5*, 50-61.
- Kumar, S., Nimchuk, N., Kumar, R., Zietsman, J., Ramani, T., Spiegelman, C., & Kenney, M. (2016). Specific model for the estimation of methane emission from municipal solid waste landfills in India. *Bioresource Technology*, *216*, 981-987.
- Leme, M. M. V., Rocha, M. H., Lora, E. E. S., Venturini, O. J., Lopes, B. M., & Ferreira, C. H. (2014). Techno-economic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil. *Resources, Conservation and Recycling*, *87*, 8-20.
- Li, M., Hu, S., Xiang, J., Sun, L. S., Li, P. S., Su, S., & Sun, X. X. (2003). Characterization of fly ashes from two chinese municipal solid waste incinerators. *Energy & Fuels*, *17*(6), 1487-1491. doi:10.1021/ef030092o
- Li, S., Yoo, H. K., Macauley, M., Palmer, K., & Shih, J.-S. (2015). Assessing the role of renewable energy policies in landfill gas to energy projects. *Energy Economics*, *49*, 687-697.
- Lou, X. F., & Nair, J. (2009). The impact of landfilling and composting on greenhouse gas emissions - A review. *Bioresource Technology*, *100*(16), 3792-3798.

- Majdinasab, A., Zhang, Z. Y., & Yuan, Q. Y. (2017). Modelling of landfill gas generation: a review. *Reviews in Environmental Science and Bio-Technology*, 16(2), 361-380.
- Mansanet-Batlaller, M., Chevallier, J., Hervé-Mignucci, M., & Alberola, E. (2011). EUA and sCER phase II price drivers: Unveiling the reasons for the existence of the EUA–sCER spread. *Energy Policy*, 39(3), 1056-1069.
- Michaelowa, A. (2014). Linking the CDM with domestic carbon markets. *Climate Policy*, 14(3), 353-371.
- MMA. (2015). Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/informma/item/10570-indc-contribui%C3%A7%C3%A3o-nacionalmente-determinada> . Acessado em 20 de abril de 2018.
- MMA. (2018). Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/perguntasfrequentes?catid=12&start=10>. Acessado em 22 de abril de 2018.
- Monteiro, J. H. P. et al. Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro: IBAM, 2001. 200 p. Disponível em: www.resol.com.br/cartilha4/manual.pdf . Acessado em: 05 de novembro de 2017.
- Nabavi-Pelesaraei, A., Bayat, R., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Afrasyabi, H., & Chau, K.-w. (2017). Modeling of energy consumption and environmental life cycle assessment for incineration and landfill systems of municipal solid waste management - A case study in Tehran Metropolis of Iran. *Journal of Cleaner Production*, 148, 427-440.
- Nazifi, F. (2013). Modelling the price spread between EUA and CER carbon prices. *Energy Policy*, 56, 434-445.
- Newell, R. G., Pizer, W. A., & Raimi, D. (2013). Carbon Markets 15 Years after Kyoto: Lessons Learned, New Challenges. *Journal of Economic Perspectives*, 27(1), 123-146.
- PMSPA. (2017). Prefeitura de São Pedro da Aldeia. Disponível em: <http://www.pmspa.rj.gov.br/noticia/sao-pedro-da-aldeia-e-o-primeiro-municipio-autorizado-a-captar-biogas-no-brasil> . Acessado em: 27 de maio de 2018.
- Psomopoulos, C. S., Bourka, A., & Themelis, N. J. (2009). Waste-to-energy: A review of the status and benefits in USA. *Waste Management*, 29(5), 1718-1724.
- Rajaeifar, M. A., Ghanavati, H., Dashti, B. B., Heijungs, R., Aghbashlo, M., & Tabatabaei, M. (2017). Electricity generation and GHG emission reduction potentials through different municipal solid waste management technologies: A comparative review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 414-439.
- Ramachandra, T. V., Bharath, H. A., Kulkarni, G., & Han, S. S. (2018). Municipal solid waste: Generation, composition and GHG emissions in Bangalore, India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1122-1136.
- Renou, S., Givaudan, J. G., Poulain, S., Dirassouyan, F., & Moulin, P. (2008). Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials*, 150(3), 468-493.

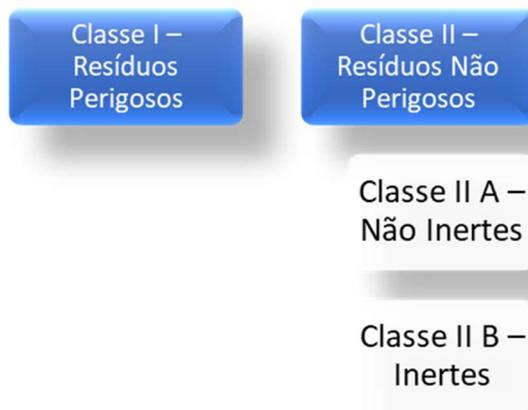
- Ripa, M., Fiorentino, G., Giani, H., Clausen, A., & Ulgiati, S. (2017). Refuse recovered biomass fuel from municipal solid waste. A life cycle assessment. *Applied Energy*, 186, 211-225.
- Sakai, S., Sawell, S. E., Chandler, A. J., Eighmy, T. T., Kosson, D. S., Vehlow, J., . . . Hjelmar, O. (1996). World trends in municipal solid waste management. *Waste Management*, 16(5-6), 341-350.
- SEEG. (2016). Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. Disponível em: <http://seeg.eco.br> . Acessado em 22 de fevereiro de 2018.
- Singh, C. K., Kumar, A., & Roy, S. S. (2017). Estimating Potential Methane Emission from Municipal Solid Waste and a Site Suitability Analysis of Existing Landfills in Delhi, India. *Technologies*, 5(4).
- Tchobanoglous, George; Theisen, Hilary; Vigil, Samuel A.. “Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues”. McGraw-Hill International Editions, United States of America, 1993.
- Tchobanoglous George, Frank Kreith. , Handbook of Solid Waste Management 2002 2nd ed. New York McGraw-Hill
- Thompson, S., Sawyer, J., Bonam, R., & Valdivia, J. E. (2009). Building a better methane generation model: Validating models with methane recovery rates from 35 Canadian landfills. *Waste Management*, 29(7), 2085-2091.
- Tozlu, A., Özahi, E., & Abuşoğlu, A. (2016). Waste to energy technologies for municipal solid waste management in Gaziantep. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 809-815.
- Trotter, I. M., da Cunha, D. A., & Féres, J. G. (2015). The relationships between CDM project characteristics and CER market prices. *Ecological Economics*, 119, 158-167.
- UN (1998). United Nations. Kyoto Protocol. Disponível em: <https://unfccc.int/sites/default/files/kpeng.pdf>. Acessado em: 26 de junho de 2018.
- UNFCCC. (2016). CDM Methodology Booklet. Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/methodologies/documentation/index.html> . Acessado em 04 de março de 2018.
- UNFCCC. (2017). Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/Projects/projsearch.html> . Acessado em: 05 de dezembro de 2017.
- UNFCCC. (2018a). Disponível em: <https://unfccc.int/process/the-kyoto-protocol> . Acessado em: 02 de fevereiro de 2018.
- UNFCCC. (2018b). Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/Projects/diagram.html> . Acessado em: 05 de março de 2018.
- UNFCCC. (2018c). Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/DNV-CUK1095236970.6/view> . Acessado em: 20 de fevereiro de 2018.
- Van Ewijk, S., & Stegemann, J. A. (2016). Limitations of the waste hierarchy for achieving absolute reductions in material throughput. *Journal of Cleaner Production*, 132, 122-128.

- Wang, Y., Geng, S., Zhao, P., Du, H., He, Y., & Crittenden, J. (2016). Cost–benefit analysis of GHG emission reduction in waste to energy projects of China under clean development mechanism. *Resources, Conservation and Recycling*, 109, 90-95.
- Wei, Y., Li, J., Shi, D., Liu, G., Zhao, Y., & Shimaoka, T. (2017). Environmental challenges impeding the composting of biodegradable municipal solid waste: A critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, 122, 51-65.
- World Bank. (2018). Disponível em: <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.KD.ZG?end=2016&locations=X&start=2006&view=chart> . Acessado em 27 de abril de 2018.
- Yang, D., Xu, L., Gao, X., Guo, Q., & Huang, N. (2018). Inventories and reduction scenarios of urban waste-related greenhouse gas emissions for management potential. *Science of the Total Environment*, 626, 727-736.
- Zeng, Q. Z., Liu, W. X., Cao, R. L., Shen, X. Q., & Guo, K. (2017). *Price Determinants in China's Pilot Carbon Markets*.
- Zhang, D. Q., Tan, S. K., & Gersberg, R. M. (2010). Municipal solid waste management in China: Status, problems and challenges. *Journal of Environmental Management*, 91(8), 1623-1633. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.03.012>
- Zhang, Y. J., & Huang, Y. S. (2015). The multi-frequency correlation between EUA and sCER futures prices: evidence from the emd approach. *Fractals-Complex Geometry Patterns and Scaling in Nature and Society*, 23(2).
- Zhao, X., Han, M., Ding, L., & Kang, W. (2018). Usefulness of economic and energy data at different frequencies for carbon price forecasting in the EU ETS. *Applied Energy*, 216, 132-141.
- Zhou, Z. Z., Tang, Y. J., Chi, Y., Ni, M. J., & Buekens, A. (2018). Waste-to-energy: A review of life cycle assessment and its extension methods. *Waste Management & Research*, 36(1), 3-16.

Anexos

Anexo I

Fig. I: Caracterização dos resíduos sólidos quanto a sua periculosidade



Fonte: Elaboração própria com base na ABNT (2004)

A Classe I – abrange todos os elementos que admitem algumas das seguintes particularidades: periculosidade, corrosividade, inflamabilidade, toxicidade, reatividade ou patogenicidade. Como exemplo, podemos citar as baterias e produtos químicos que geram um forte impacto ambiental.

A Classe II – como demonstrado na tabela acima apresenta duas subdivisões, Não inertes e Inertes, que podem ser descritos da seguinte forma:

Classe II A – Não Inertes, aqueles que não fazem parte da classe I e classe II B, entre suas características podemos citar o poder de combustão, além do fato de serem biodegradáveis, ou solúveis em água. A matéria orgânica e o papel seriam alguns exemplos dessa classe.

Por sua vez, Classe II B – Inertes, de acordo com a ABNT (2004), “Quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada à temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor. Exemplo de resíduos: entulhos, sucata de ferro e aço”.

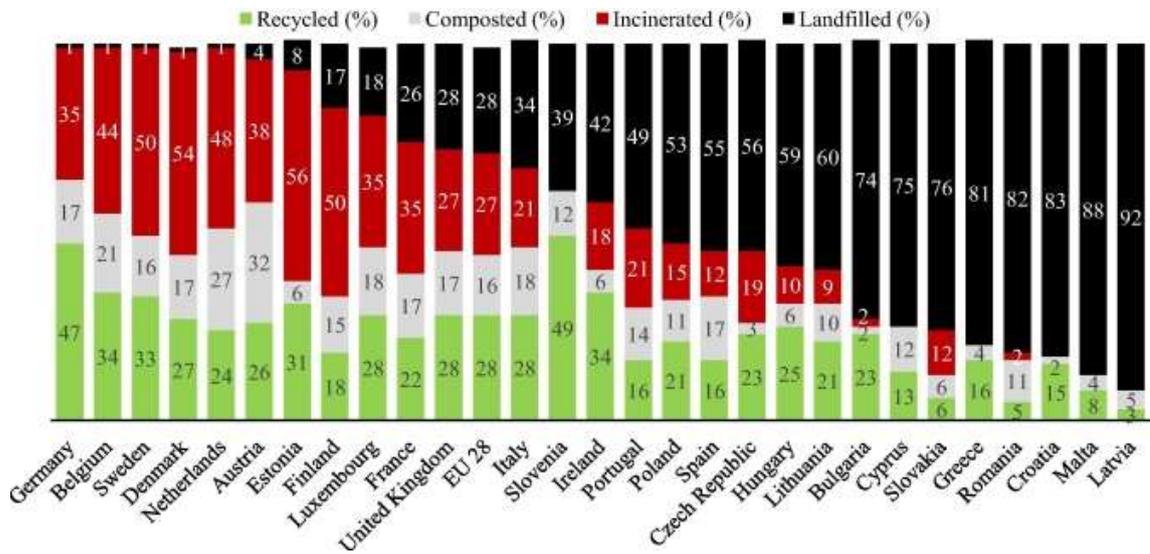
Fig. II: Caracterização dos resíduos sólidos quanto a sua origem

Residencial	Resíduos com grande diversificação originados nas residências, contém em sua maioria restos de alimentos, restos de jardinagem, vidros, bens deteriorados, embalagens, jomais e revistas.
Comercial	Resíduos provenientes dos diversos estabelecimentos comerciais e de serviços, entre os quais podemos destacar, os mercados, hotéis, lojas, discotecas, restaurantes.
Institucional	Oriundos de escolas, hospitais, prisões e repartições do governo.
Serviço municipal	Oriundos dos serviços de limpeza urbana, como restos de árvores e resíduos da variação de locais públicos, limpeza de galerias pluviais, resíduos recolhidos na praia, entre outros.
Industrial	Resultados de processos industriais. Os resíduos variam de acordo com a atividade industrial. Nesta categoria encontram-se a maioria dos resíduos considerados perigosos ou tóxicos.
Agrícola	Resultado de atividades da pecuária e agricultura. É formado por embalagens, restos de colheita, adubos, dejetos de animais e rações.
Construção demolição	Resíduos oriundos da construção civil, reparos em rodovias, demolições.

Fonte: Elaboração própria com base em Techobanglous (2002)

Anexo II

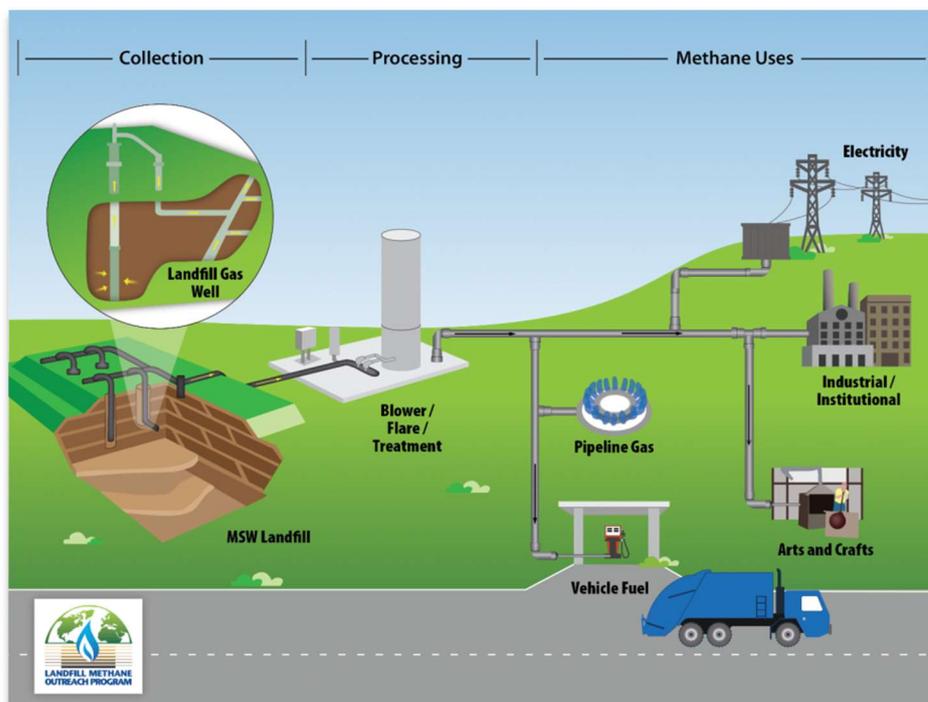
Fig. III: Tratamento dos Resíduos Sólidos em 2014 na U.E 28



Fonte: Cucchiella et al. (2017)

Anexo III

Fig. IV: Processo de Aproveitamento Energético do Biogás em Aterros



Fonte: EPA (2017)

Anexo IV

First Order Decay

De acordo com as Diretrizes do IPCC (2006), as emissões de CH₄ em aterros sanitários para um único ano são estimadas pela equação (1):

$$(1) \quad CH_4 \text{ Emissions} = \left[\sum_x CH_4 \text{ generated}_{x, T} - R_T \right] \cdot (1 - OX_T)$$

Onde:

CH₄ Emissions = CH₄ emitido no ano;

T = inventário do ano;

X = categoria de resíduos ou tipo / material;

R_T = CH₄ recuperado no ano;

OX_T = fator de oxidação no ano

Por sua vez, a equação (2) pode ser usada para se obter uma estimativa de geração de CH₄ em aterros sanitários, o potencial do metano que é gerado ao longo dos anos pode ser calculado tomando como base a quantidade e composição dos RSU dispostos nos aterros.

$$(2) \quad DDOCm = W \cdot DOC \cdot DOC_F \cdot MCF$$

Onde:

DDOCm = carbono orgânico que se degradará sob as condições anaeróbicas nos aterros;

W = massa de resíduos depositados;

DOC = fração de carbono orgânico degradável nos resíduos;

DOC_F = carbono orgânico degradável que se decompõe sob condições anaeróbicas;

MCF = fator de correção do metano.

Muito embora o potencial de geração de metano (L₀)² não seja usado nas diretrizes apresentadas pelo IPCC (2006), a equação (3) será apresentada levando em conta que diversos estudos na literatura mencionam esse cálculo.

$$(3) L_0 = W \cdot DOC \cdot DOC_F \cdot MCF \cdot F \cdot 16/12$$

Onde:

L_0 = Potencial de geração de CH₄;

W = massa de resíduos depositados;

DOC = carbono orgânico degradável no ano da deposição;

DOC_F = fração de DOC que pode se decompor em condições aeróbicas;

MCF = fator de correção do metano;

F = fração de CH₄ no gás de aterro gerado; $16/12$ = relação de peso molecular CH₄ / C

No método First Order Decay, para que se calcule a quantidade de CH₄ gerada anualmente, é indiferente saber o ano em que os resíduos foram depositados no aterro. Na verdade, o que interessa é identificar o total de rejeitos em decomposição atualmente dispostos no mesmo. Logo, ao identificarmos o montante de resíduos em decomposição nos aterros no início do ano, todos os demais anos podem ser considerados como ano 1 no método de estimativa, e os cálculos de First order podem ser feitos pelas equações (4) e (5):

$$(4) DDOCm_{aT} = DDOCm_{dT} + (DDOCm_{aT-1} \cdot e^{-K})$$

$$(5) DDOCm_{decompT} = DDOCm_{aT-1} \cdot (1 - e^{-K})$$

A quantidade de CH₄ gerada a partir da decomposição dos resíduos pode ser estimada pela equação (6) multiplicando a fração CH₄ no biogás gerado e a razão de peso molecular de CH₄ / C.

$$(6) CH_4 generated_T = DDOCm_{decompT} \cdot F \cdot 16/12$$

Onde:

$CH_4 generated_T$ = quantidade de CH₄ gerada a partir da decomposição do material;

$DDOCm_{decompT}$ = DDOCm decomposto em ano;

F = fração de CH₄, em volume, no gás gerado em aterro (fração);

$16/12$ = Taxa conversão CH₄ / C (ratio)

Anexo V

Fig. V: Autoridade Nacional Designada (AND)

Contact details for Brazil DNA(s):

Contact person / Focal point		Organization's address
Name:	Mr. Márcio Rojas da Cruz	General Coordination for Global Climate Change Secretariat for Research and Development Policies and Programmes Esplanada dos Ministérios, Bloco E, s. 258 70067-900, Brasília-DF Brazil
Title:	General Coordinator for Global Climate Change	
Email:	cimgc@mctic.gov.br , mrojas@mctic.gov.br	
Organization:	Ministry of Science, Technology, Innovations and Communications	
Phone:	(+55-61) 2033-7923	
Fax:	(+55-61) 2033-7657	

Contact person / Focal point		Organization's address
Name:	Ms. Sonia Regina Mudrovitsch Bittencourt	General Coordination for Global Climate Change Secretariat for Research and Development Policies and Programmes Esplanada dos Ministérios, Bloco E, s. 258 70067-900, Brasília-DF Brazil
Title:	Executive Secretary of the Brazilian DNA	
Email:	sregina@mctic.gov.br	
Organization:	Ministry of Science, Technology, Innovations and Communications	
Phone:	(+55-61) 2033-7923	
Fax:	(+55 61) 2033-7657	

Contact person / Focal point		Organization's address
Name:	Ms. Andréa Nascimento de Araújo	General Coordination for Global Climate Change Secretariat for Research and Development Policies and Programmes Esplanada dos Ministérios, Bloco E, s. 258 70067-900, Brasília-DF Brazil
Title:	Alternate General Coordinator for Global Climate Change	
Email:	cimgc@mctic.gov.br , anaraujo@mctic.gov.br	
Organization:	Ministry of Science, Technology, Innovations and Communications	
Phone:	(+55 61) 2033-7923	
Fax:	(+55 61) 2033-7657	

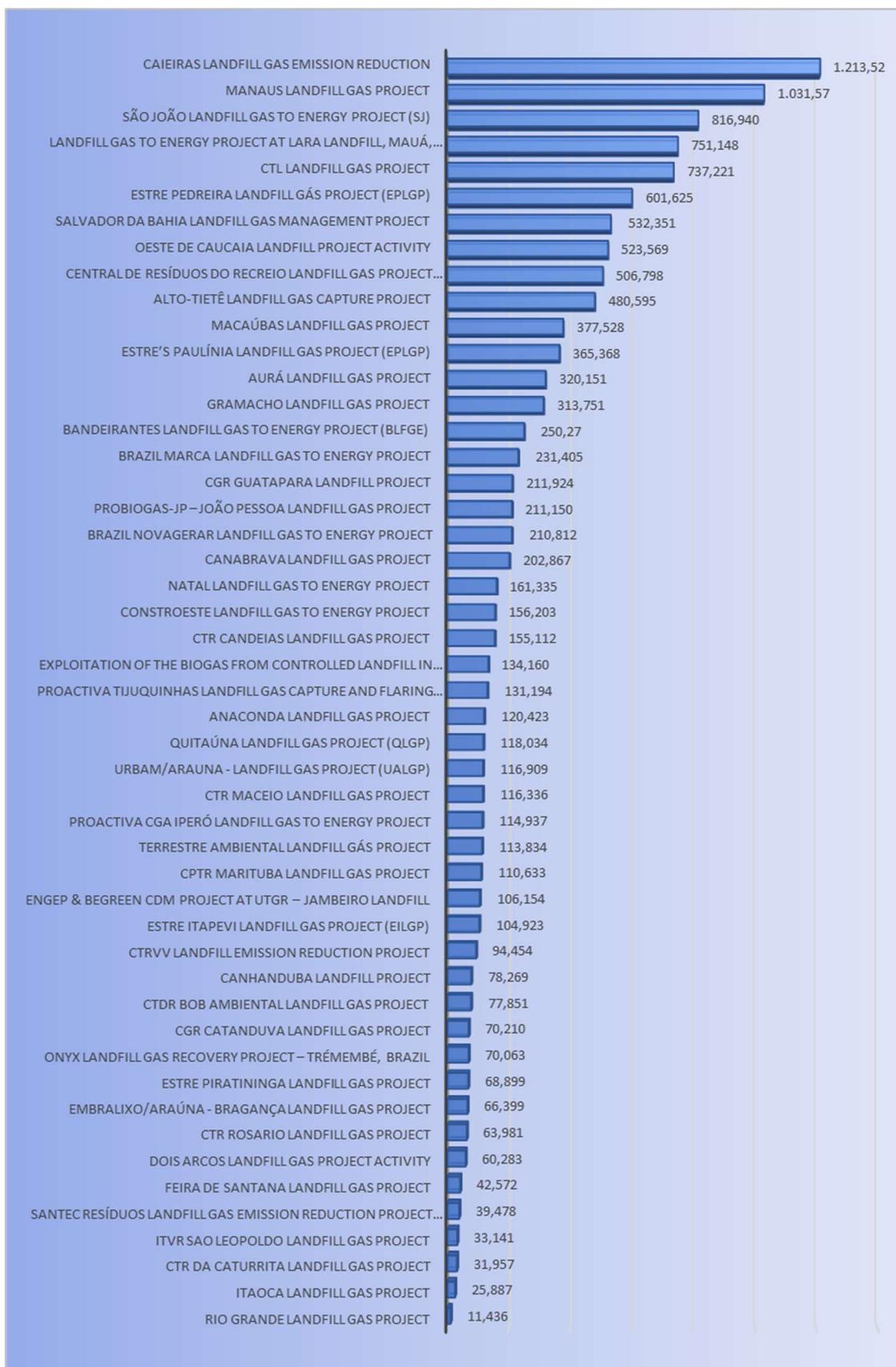
<https://cdm.unfccc.int/DNA/index.html>

Fig. VI: Entidade Operacional Designada (EOD)

Ref. Number	Entity
E-0001	Japan Quality Assurance Organisation (JQA)
E-0005	TÜV SÜD South Asia Private Limited (TÜV SÜD)
E-0006	Deloitte Tohmatsu Sustainability, Co., Ltd. (DTSUS)
E-0009	Bureau Veritas India Pvt. Ltd. (BVI)
E-0011	Korea Energy Agency (KEA)
E-0016	ERM Certification and Verification Services Limited (ERM CVS)
E-0020	GHD Limited (GHD)
E-0021	AENOR INTERNACIONAL, S.A.U. (AENOR)
E-0022	TÜV NORD CERT GmbH (TÜV NORD)
E-0023	Lloyd's Register Quality Assurance Ltd. (LRQA)
E-0024	Colombian Institute for Technical Standards and Certification (ICONTEC)
E-0025	Korean Foundation for Quality (KFQ)
E-0031	Perry Johnson Registrars Carbon Emissions Services (PJRCS)
E-0032	LGA Technological Center, S.A. (LGA Tech. Center S.A)
E-0034	China Environmental United Certification Center Co., Ltd. (CEC)
E-0037	RINA Services S.p.A. (RINA)
E-0039	Korean Standards Association (KSA)
E-0044	China Quality Certification Center (CQC)
E-0046	China Classification Society Certification Company (CCSC)
E-0047	CEPREI certification body (CEPREI)
E-0050	Hong Kong Quality Assurance Agency (HKQAA)
E-0051	KBS Certification Services Pvt. Ltd (KBS)
E-0052	Carbon Check (India) Private Ltd. (Carbon Check)
E-0054	Re Carbon Gözetim Denetim ve Belgelendirme Limited Şirketi (Re Carbon)
E-0056	Korea Testing & Research Institute (KTR)
E-0058	Foundation for Industrial Development - Management System Certification Institute (Thailand) (MASCI)
E-0061	Shenzhen CTI International Certification Co., Ltd (CTI)
E-0062	EPIC Sustainability Services Pvt. Ltd. (EPIC)
E-0065	China Building Material Test and Certification Group Co. Ltd. (CTC)
E-0066	Earthood Services Private Limited (Earthood)
E-0067	China Certification Center, Inc. (CCCI)

<https://cdm.unfccc.int/DOE/list/index.html>

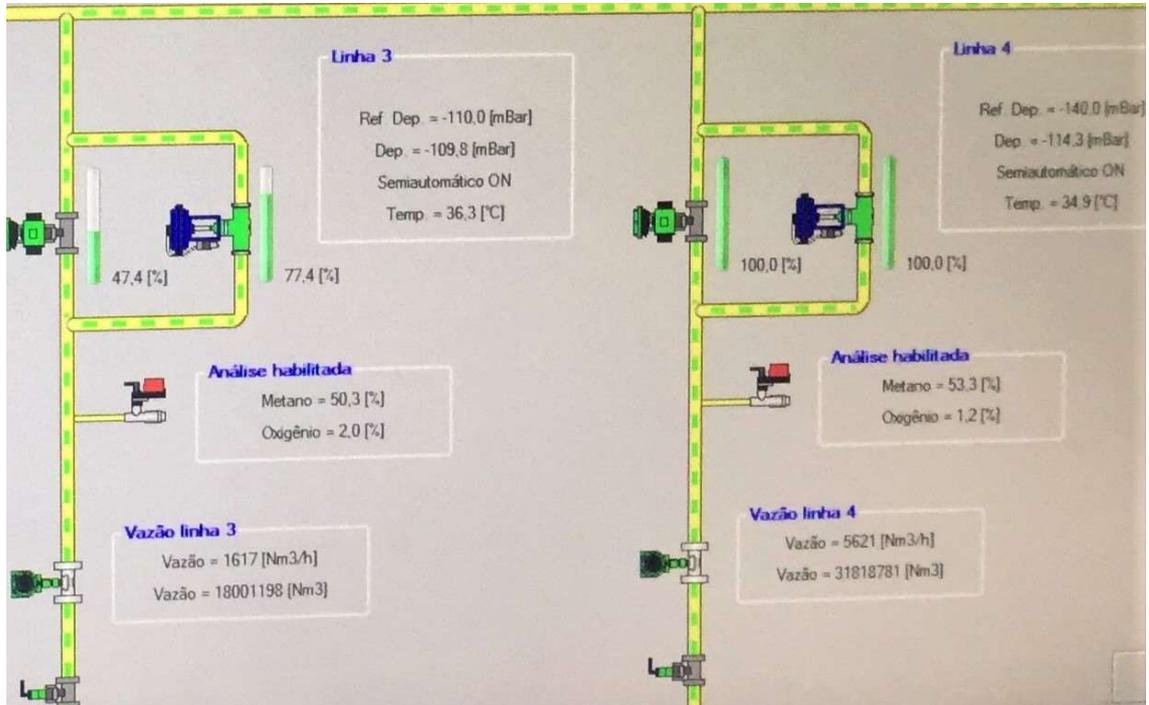
Anexo VI



Fonte: UNFCCC (2017)

Anexo VII

Fig. VII: Monitoramento do Biogás no Aterro Sanitário



Fonte: Autoria Própria (2018)

Fig. VIII: Percentagem de Metano Presente no Biogás



Fonte: Autoria Própria (2018)

Fig. IX: Flare Utilizado na Queima do Metano



Fonte: Autoria Própria (2018)