

## **GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS EM EMPREENDIMENTOS COMERCIAIS URBANOS E POTENCIALIDADE DE USO ENERGÉTICO**

**Alan Noda Jesus<sup>1</sup>**  
**Joyce Barboza Silva<sup>2</sup>**  
**Marco Aurelio Gattamorta<sup>3</sup>**

### **RESUMO**

A implantação de programas de gerenciamento de resíduos sólidos em grandes centros comerciais urbanos vem evoluindo significativamente e, em função disto, a demanda por soluções diversificadas na cadeia de resíduos mostra-se necessária, particularmente com relação a redução da logística de transporte para os aterros sanitários, que podem implicar em redução de custos para tratamento destes resíduos, bem como na avaliação da potencialidade de produção de metano e energia. O desenvolvimento de um projeto piloto dentro do Programa de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS) em um shopping center na cidade de São Paulo, avaliou a implantação da segregação de resíduos sólidos orgânicos e estimou a geração de metano e energia elétrica pelo modelo empírico de *School Canyon*, e a aplicação da biodigestão e compostagem na gestão destes resíduos. Durante os cinco meses do projeto piloto implementado, o local gerou 59.398 kg de resíduos orgânicos, e estimou-se um potencial máximo de geração de 3.517,53 m<sup>3</sup>/ano de gás metano pelo modelo empírico *School Canyon*, podendo gerar 35,07 MWh/ano de energia elétrica para o empreendimento. Os resultados apontam que a quantidade de metano gerada não apresentou viabilidade de implantação de sistemas de geração de energia elétrica *in loco* para o empreendimento, devido seu alto consumo de eletricidade. No entanto, os resultados apontaram que o projeto pode ser uma alternativa de tratamento de resíduos orgânicos, que podem resultar na redução de custos com transporte dos resíduos, no aproveitamento calorífico do gás metano gerado, estimado em 29.899.005 Kcal/ano, como gás de cozinha para os restaurantes do empreendimento ou ainda na geração de biocompostos.

**Palavra chaves:** Biogás. Metano. Resíduos. Energia.

<sup>1</sup> Engenharia Ambiental e Sanitária. Faculdades Metropolitanas Unidas. E-mail: [alannoda@outlook.com](mailto:alannoda@outlook.com)

<sup>2</sup> Engenharia Ambiental e Sanitária. Faculdades Metropolitanas Unidas. E-mail: [joycee\\_silva@hotmail.com](mailto:joycee_silva@hotmail.com)

<sup>3</sup> Biologia. Universidade de São Paulo. E-mail: [marco.gattamorta@fmu.br](mailto:marco.gattamorta@fmu.br)

# EDUCATION STRATEGIES FOR SUSTAINABILITY: A COMPARATIVE PEDAGOGICAL APPROACH AMONG THE MAIN STRATEGIES ADOPTED IN RECIFE, PERNAMBUCO SOLID WASTE MANAGEMENT IN URBAN COMMERCIAL ENTERPRISES AND ENERGY USE POTENTIALITY

## ABSTRACT

The implementation of solid waste management programs in large urban shopping centers has been evolving significantly and, due to this, the demand for diversified solutions in the waste chain is necessary, particularly in relation to the reduction of transport logistics for landfills, which may result in cost reduction for the treatment of these residues, as well as in the evaluation of the potential of methane and energy production. The development of a pilot project within the Solid Waste Management Program (PGRS) in a shopping center in the city of São Paulo, evaluated the implementation of the segregation of organic solid waste and estimated the generation of methane and electricity by the School's Canyon empirical model and the application of biodigestion and composting in the management of this waste. During the five months of the pilot project implemented, the site generated 59,398 kg of organic waste, and a maximum generation potential of 3,517.53 m<sup>3</sup>/year of methane gas was estimated using the School Canyon empirical model, which could generate 35.07 MWh /year of electricity for the project. The results show that the amount of methane generated was not feasible to implement electricity generation systems in loco for the project, due to its high electricity consumption. However, the results pointed out that the project may be an alternative for the treatment of organic waste, which may result in cost reduction in the transportation of waste, in the calorific use of the methane gas generated, estimated at 29,899,005 Kcal / year, as gas of kitchen for the restaurants of the enterprise or in the generation of biocomposites.

**Keywords:** Biogas. Methane. Waste. Energy.

## 1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Com o grande crescimento da população, a geração de resíduos e rejeitos aumenta cada dia mais. Com isso, acabou-se desenvolvendo uma preocupação com todo o manejo destes resíduos, desde a segregação até a disposição final, bem como com novas formas de tratamento, particularmente dos resíduos orgânicos para a produção de substrato para uso no solo, e o retorno de parte dos resíduos recicláveis, como papel, plástico e metal, ao ciclo de vida para geração de novos produtos. Com isso, busca-se avaliar a viabilidade de implantação de novas técnicas de gerenciamento dos resíduos, particularmente aqueles apontados por cientistas e

pesquisadores como novas tecnologias de baixo custo, elevada eficiência e a redução de impactos negativos.

Os dados de geração de resíduos são alarmantes. Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos – ABRELPE (2018), a geração de resíduos sólidos urbanos cresceu 1% em 2017, em comparação com 2016, o que representa um total de 78,4 milhões de toneladas de lixo gerado em 2017, aponta-se ainda que 8,8% deste total de resíduo não foi coberto pela estrutura de coleta de resíduos sólidos no país. Isto indica que cerca de 6,9 milhões de toneladas de lixo tiveram um destino impróprio, resultando em poluição de água, ar e solo, em função da disposição final incorreta.

Cerca de 51,4% de todo resíduo urbano gerado no Brasil é classificado como orgânico, ou seja, resíduo biológico o qual passa por processo de degradação (BRASIL, 2010). Considerando os dados da ABRELPE, que aponta a geração de 78,4 milhões de toneladas de resíduo urbanos, em 2017, estima-se que cerca de 40,3 milhões de toneladas desse total refere-se a resíduos orgânicos.

A região Sudeste é a campeã em geração de resíduos sólidos, composta por grandes centros urbanos como São Paulo e Rio de Janeiro. A região, de acordo com a ABRELPE, gerou 105.794 toneladas de resíduo por dia em 2017, representando 52,9% do total de resíduo sólido coletado no país. Apesar de ser considerada a região de maior importância econômica do país, o Sudeste ainda não possui coleta integral de seu resíduo, sendo 1,94% do total de resíduo gerado não coletado em 2017.

Estes resíduos devem ser devidamente encaminhados para aterros sanitários, considerando a Política Nacional de Resíduos Sólidos - Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Desta forma, a elevação quantitativa de resíduos sólidos orgânicos impacta os aterros sanitários e pode provocar redução no período de funcionamento destes aterros, exigindo a detecção de novas áreas para estas atividades. Isto também se caracteriza como um problema para os grandes centros urbanos, devido a ausência de locais adequados para a implantação destes empreendimentos, a necessidade de grandes áreas e as distâncias para destinação, que vem se tornando cada vez maiores e acaba ampliando os custos de transporte e a geração de gases de efeito estufa.

De acordo com o Balanço Energético Nacional (EPE, 2018), 57,1% do total de energia gerada no país é proveniente de fontes não renováveis de energia. Com o

aumento da população, a demanda de energia também vem apresentando crescimento e, com isso, países, cidades, indústrias e até mesmo a população tem questionado a implantação de novas alternativas de geração de energia, priorizando a busca de soluções mais limpas, preferencialmente de baixo custo, e utilizando alternativas ambientalmente interessantes.

Desta forma, a geração de resíduos sólidos e a busca por novas formas de geração de energia podem apresentar sobreposição, visto que compostos orgânicos são capazes de gerar gases adequados para serem aproveitados energeticamente. Uma das alternativas para isto refere-se a biodigestão de matéria orgânica, que se mostra como um mercado muito atrativo para empreendimentos onde há grande geração de resíduos sólidos orgânicos. A viabilidade de transformação dos produtos da decomposição da matéria orgânica, em especial o biogás para a geração de energia elétrica, pode se tornar uma alternativa viável para locais como escolas, empresas e shoppings centers, por exemplo.

A decomposição da matéria orgânica gera o biogás, rico em metano (CH<sub>4</sub>), gás capaz de gerar energia em biodigestores. Os biodigestores caracterizam-se como tecnologias que permitem a decomposição de compostos orgânicos, em condições de anaerobiose, onde produzem o metano e compostos orgânicos decompostos ricos em nutrientes e que podem ser utilizados em áreas verdes públicas ou mesmo na agricultura para melhorar a qualidade do solo (FILHO, SANTANA, GATTAMORTA, 2018).

O mercado de grandes geradores de resíduos orgânicos, como shopping centers, é o mais interessante para a implantação de biodigestores. Hoje este mercado está em grande crescimento. Segundo a Associação Brasileira de Shoppings centers – ABRASCE (2018), o Brasil possui hoje 563 shoppings espalhados por todo país, e ainda uma previsão de inauguração de mais 15 empreendimentos para 2019. São Paulo, hoje, possui 31% do total de shoppings centers do país, sendo o estado com o maior número de empreendimentos instalados, e ainda tem previsão de inauguração de mais 4 shoppings para o final de 2019, demonstrando assim, ser um mercado em constante crescimento.

Os empreendimentos tiveram, em 2017, um fluxo de 463 milhões de visitas por mês de acordo com a ABRASCE, fluxo de pessoas que vem crescendo ano após ano, devido ao aumento da oferta de shoppings pelo país.

Além de muito frequentado para compras, os shoppings centers hoje também são uma alternativa para a alimentação, devido a grande oferta de operações concentradas em um único lugar. A presença de diversos restaurantes e *fast foods* e a variedade de cardápios consagraram os shoppings centers como excelente alternativa para realizar as refeições.

Automaticamente essas concentrações de ofertas de alimentação acabam gerando o resíduo orgânico. Hoje grande parte dos shoppings centers classifica seu resíduo orgânico como lixo comum, encaminhando-os para aterros sanitários, mas já há alguns que utilizam o processo de compostagem. O shopping Eldorado, localizado em São Paulo, ficou conhecido mundialmente por fazer uma gestão mais inteligente de seu resíduo orgânico a partir da compostagem, processo de gerenciamento de resíduos orgânicos para geração de composto natural. Diferente da biodigestão, essa metodologia não faz o uso do gás produzido na decomposição da matéria como fonte energética.

A biodigestão é um processo de tratamento do resíduo orgânico realizado na ausência de oxigênio, durante o processo de decomposição da matéria orgânica há a produção do biogás, que de acordo com Reis (2012), esse gás em sua maioria é composto por metano (CH<sub>4</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). O biogás possui um grande potencial energético e, segundo Andreoli et al. (2003), em vários países o biogás é utilizado como fonte energética importante, pois é uma saída para a diminuição do uso do gás natural, proveniente de uma fonte não renovável, o petróleo. Seu potencial energético se dá devido ao alto poder de geração de calor, onde um biogás com cerca de 70% de metano tem poder calorífico de aproximadamente 23.380 kJ/m<sup>3</sup> ou 6,5 kW/m<sup>3</sup>, o que representa cerca de 60% do poder calorífico do gás natural. (ANDREOLI et al., 2003).

Considerando a quantidade de resíduos orgânicos e a viabilidade de geração de energia, este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de um projeto piloto de gestão de resíduos sólidos implantado em shopping center na cidade de São Paulo considerando a geração de metano e energia elétrica, utilizando o modelo empírico *School Canyon*, e discutir o aproveitamento calorífico e a potencialidade de geração de biocomposto através do uso de processos de biodigestão.

## 2 METODOLOGIA

- a) A pesquisa teve caráter exploratório e foi realizado através do levantamento de geração de resíduos orgânicos em um shopping center da cidade de São Paulo. A estimativa de geração de biogás e metano, bem como de energia, foram feitos através de pesquisas bibliográficas em bases de dados científicas disponíveis na rede mundial de computadores.
- b) Para a realização do projeto, foram levantados dados quantitativos de resíduos orgânicos, a partir da fonte geradora, e avaliada a viabilidade da utilização desses resíduos para geração de energia e o gerenciamento de resíduos do empreendimento.
- c) A partir deste levantamento, foram realizados cálculos buscando detectar a quantidade de biogás e metano gerados por estes resíduos, considerando informações disponíveis na literatura científica e técnica, e, em seguida, estimada a quantidade de metano e energia gerada e a viabilidade de uso e distribuição desta energia.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base na geração de resíduos sólidos de um shopping na grande São Paulo, que recebe diariamente, em média, entre 20 e 50 mil pessoas, analisou-se a viabilidade de implantação de um biodigestor anaeróbico para melhor gerenciamento da parcela orgânica de resíduos gerados no empreendimento, considerando estimativas de geração de energia elétrica e utilização do biocomposto gerado.

O shopping utilizado como modelo deste estudo possui o Programa de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS), sendo que a segregação dos resíduos sólidos é realizada utilizando-se sacos de diferentes cores para descarte, sendo a cor azul para material reciclável e preta para resíduos comuns.

A tabela 1 apresenta a geração de resíduos comuns e recicláveis no shopping no ano de 2018:

Tabela 1 – Geração de resíduos em um grande shopping de São Paulo em 2018.

Mês Resíduo	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	TOTAL
Comum (ton)	172	150	171	162	161	146	160	172	152	159	166	196	<b>1967</b>
Reciclável (ton)	27	24	38	26	24	31	43	29	33	23	26	38	<b>368</b>

Fonte: Dos autores (2019).

No período estudado, foram geradas 2.335 toneladas de resíduos, sendo 84% deste total classificado como resíduo comum e encaminhado para aterro sanitário, enquanto os 16% restantes foram classificados como recicláveis.

Parte do material reciclado recolhido é doado para uma cooperativa, em cumprimento ao Decreto Municipal N° 45.668 de 29 de dezembro 2004, que dispõe sobre a organização do Sistema de Limpeza Urbana no Município de São Paulo, e dá outras providências. O decreto determina que grandes geradores devem integrar o programa social de triagem de material reciclável e coleta seletiva de resíduos sólidos promovido por órgãos públicos ou cooperativas de inclusão social e de coleta de recicláveis, destinando material reciclável que represente 10% ou mais do total de resíduos gerados.

O shopping que possui parceria com uma cooperativa, atende ao disposto no decreto supracitado, doando 10% do resíduo reciclável, e o restante desta parcela é vendido para empresa que realiza a coleta e descarte do resíduo, como forma de abatimento do serviço prestado para o Shopping Center.

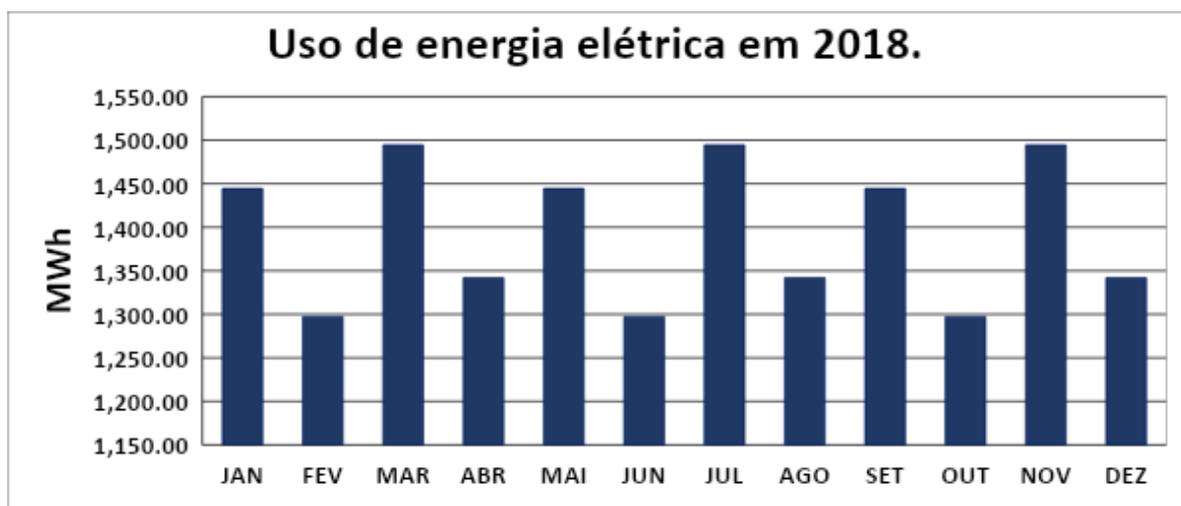
Mesmo com a venda desta parcela dos resíduos recicláveis para a empresa de coleta e descarte do resíduo, o quantitativo de resíduos encaminhados para aterro sanitário ainda é elevado, conforme demonstra a Tabela 1 e, particularmente para a porção orgânica, avaliou-se a possibilidade de geração de energia, colaborando assim com a redução de utilização do aterro e, conseqüentemente, contribuindo para a sustentabilidade do empreendimento.

Como processos de compostagem e biodigestão de resíduos orgânicos podem ser utilizados para a redução do transporte para aterros sanitários e também para a produção de biocomposto ou geração de energia, elaborou-se um projeto piloto de compostagem e realizou-se análises do gasto médio com energia elétrica pelo empreendimento.

Inicialmente, analisou-se os dados de energia elétrica consumidas mensalmente pelo shopping center, considerando o ano de 2018, e houve um consumo médio de energia elétrica de 1.328,53 MWh/mês (Gráfico 01), com custo médio mensal de R\$ 194.050,85.



**Gráfico 01** – Consumo de energia elétrica pelo empreendimento em 2018.



Fonte: Dos autores (2019).

Posteriormente, em março de 2019, o shopping iniciou o projeto piloto de compostagem. Para tanto, foram disponibilizados 12 carros coletores de resíduos de 240 litros cada um, para que lojistas, particularmente das praças de alimentação, de modo que pudessem realizar o descarte da matéria orgânica produzida em seus restaurantes, e, em seguida, este material fosse encaminhado para a compostagem, realizado por empresa especializada.

Para a implantação do projeto foi realizado um treinamento de PGRS, para todos os lojistas do setor de alimentação do Shopping Center, ressaltando o cenário de resíduos sólidos no Brasil, a importância da separação correta e do descarte adequado. Os lojistas foram orientados a segregar os resíduos de forma a viabilizar o projeto piloto, destinando os resíduos orgânicos para os carros coletores e os recicláveis nos sacos azuis.

Durante os meses de março a julho de 2019, analisou-se qualitativa e quantitativamente o descarte de matéria orgânica nos carros coletores, de modo a avaliar a efetividade da segregação e estimar quantitativamente os resíduos de potencial uso para compostagem e biodigestão (Tabela 2).

Tabela 2 – Quantidade de resíduos encaminhados para compostagem.

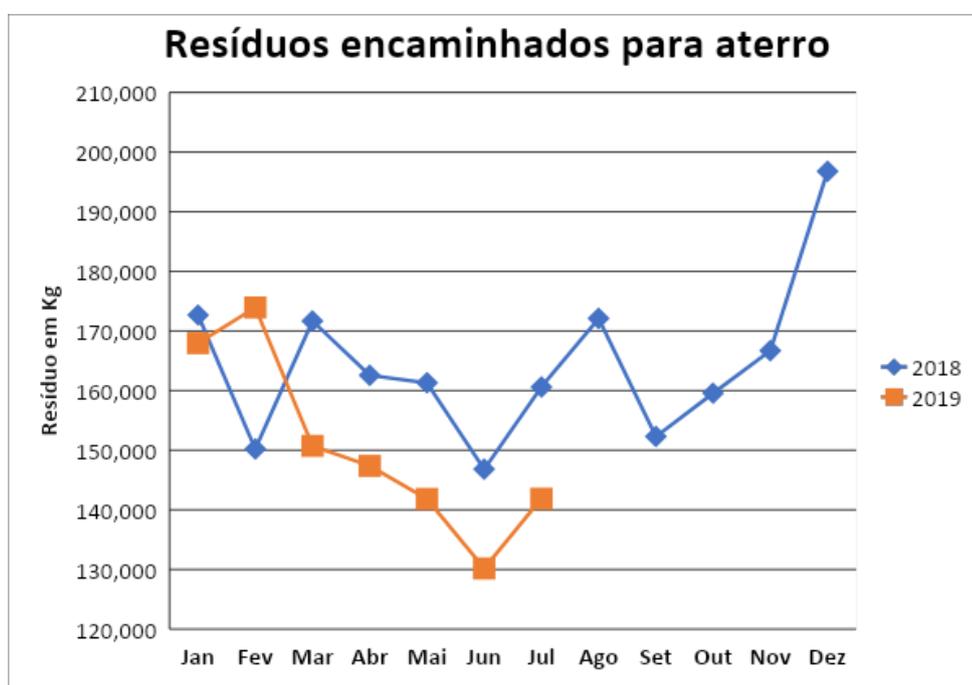
Mês Resíduo	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	TOTAL
Orgânico (Kg)	4.300	15.224	13.635	12.724	13.515	59.398

Fonte: Dos autores (2019).

O mês de março de 2019 apresentou um volume coletado de resíduos orgânicos inferior (4.300 kg) aos demais meses do projeto piloto (superior a 12.724 kg/mês, de abril a julho de 2019), sendo coletadas 59,40 toneladas de resíduos orgânicos no período piloto do projeto, que foram encaminhados para compostagem.

Com a implantação do projeto piloto, observou-se um impacto na gestão dos resíduos, tanto para aquele encaminhado ao aterro sanitário (Gráfico 02) quanto para os resíduos destinados à reciclagem (Gráfico 03).

**Gráfico 02** – Comparativo de resíduos encaminhado para aterro entre 2018 e 2019.



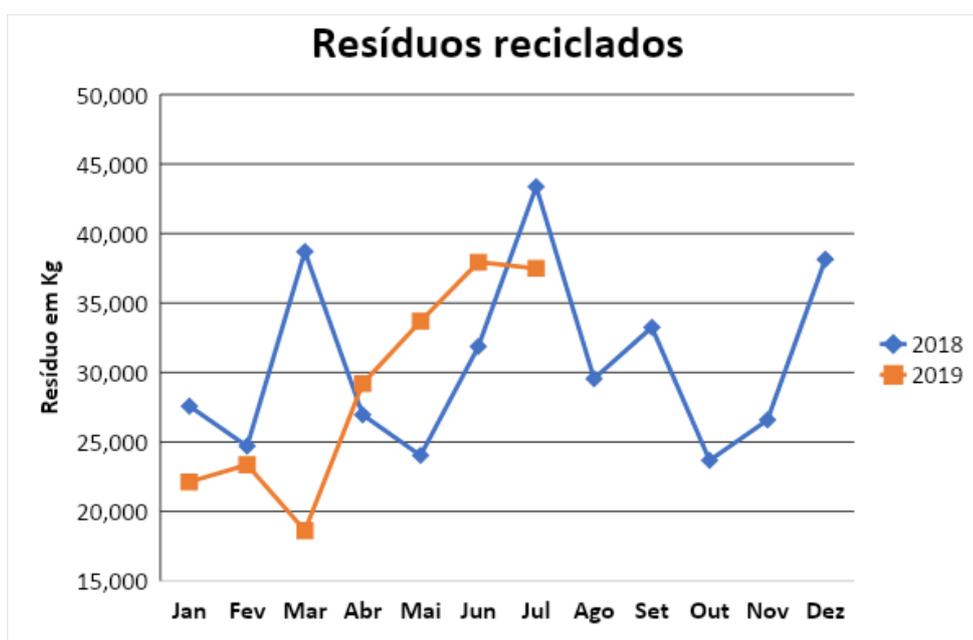
**Fonte:** Dos autores (2019).

Observa-se, no período de estudo, uma redução na destinação de resíduos para aterro sanitário, que, em 2018, totalizou 802 toneladas entre março e julho, enquanto que no mesmo período, em 2019, o total encaminhado foi de 711 toneladas, apresentando uma redução de 11% de destinação para aterro (91 toneladas), conforme Gráfico 02.

Além disso, após a implantação do projeto de compostagem houve também um aumento na reciclagem do empreendimento (Gráfico 03). Nota-se que, em 2018, os quantitativos de resíduos recicláveis segregados adequadamente oscilaram de 25 a 45 toneladas mensais e que, em 2019, observou-se os menores quantitativos de

resíduos recicláveis (inferiores a 25 toneladas por mês). Após o treinamento de PGRS, no entanto, observou-se uma curva crescente de segregação adequada de resíduos recicláveis, que podem indicar uma maior participação dos colaboradores na reciclagem no período estudado. Mesmo que, quantitativamente, observa-se valores inferiores de resíduos destinados para reciclagem em julho de 2019, comparativamente a julho de 2018, a ausência de dados de fluxo de pessoas na praça de alimentação nos períodos deste estudo não permite compreender a participação relativa do público na geração e secreção de resíduos recicláveis.

**Gráfico 03** – Comparativo de resíduos recicláveis entre 2018 e 2019.



Fonte: Dos autores (2019).

Para avaliar a viabilidade de geração de energia dos resíduos orgânicos encaminhados para compostagem, durante o projeto piloto, os dados quantitativos de matéria orgânica foram utilizados para simular a produção de metano passível de ser gerado, utilizando para isto o modelo empírico *School Canyon*, que utiliza como fundamento a existência de uma fração constante de material biodegradável por unidade de tempo de depósito de resíduos (PAVAN, 2010).

A equação que permite estimar a quantidade de metano é expressa da seguinte forma:

$$Q_{(CH_4)_i} = k \cdot L_0 \cdot m_i \cdot e^{-kt}$$

Onde:

$Q_{(CH_4)i}$ : é a vazão de metano produzida no ano  $i$  a partir da seção  $i$  do resíduo ( $m^3$ /ano);

$i$  é o incremento de tempo em um ano;

$k$  é a constante de geração de metano ( $anos^{-1}$ );

$L_0$  é potencial de geração e metano ( $m^3 CH_4$ / t resíduo);

$m_i$  é massa de resíduo depositada no ano  $i$  (t);

$t_i$  é o tempo passado desde o fechamento (anos).

De acordo com Pavan (2010), o modelo nos trará uma estimativa de produção de metano num intervalo de tempo em função da constante de geração de metano ( $k$ ), do potencial de geração de metano ( $L_0$ ), e da quantidade de resíduos depositada. Para a realização dos cálculos, foram utilizados os valores de  $k$  e  $L_0$  de acordo com as tabelas 03 e 04. A constante ( $k$ ) é baseada na umidade, pH, disponibilidade de nutrientes e temperatura ou, de acordo com a USEPA (1998), relacionada a precipitação anual (Tabela 3), enquanto os valores de  $L_0$  baseiam-se na caracterização do resíduo (relativamente inerte, moderadamente inerte ou altamente degradável) (Tabela 4).



Tabela 3 – Valores propostos para  $k$  em função da precipitação e da disponibilidade de nutrientes.

Precipitação anual em mm	Valores de $k$ (anos)		
	Relativamente inerte	Moderadamente Degradável	Altamente Degradável
<250	0,01	0,02	0,03
>250 e < 500	0,01	0,03	0,05
>500 e <1000	0,02	0,05	0,08
>1000	0,02	0,06	0,09

Fonte: Word Bank (2003).

Tabela 4 – Valores de  $L_0$  sugeridos em função da degradação do resíduo.

Caracterização do resíduo	Valor mínimo de $L_0$ ( $m^3 CH_4$ / t resíduo)	Valor máximo de $L_0$ ( $m^3 CH_4$ / t resíduo)
Resíduo relativamente inerte	5	25
Resíduo moderadamente inerte	140	200
Resíduo altamente degradável	225	300

**Fonte:** World Bank (2003).

Com base nos valores propostos por Pavan (2010), estimou-se a geração de metano a partir do resíduo orgânico encaminhado para compostagem. O resíduo orgânico, previamente a implantação do projeto piloto, era encaminhado para o aterro sanitário CDR Pedreira, localizado na cidade de São Paulo. Os dados de precipitação desta área foram utilizados para a seleção do valor de  $k$  na equação, de acordo com CLIMATEMPO (2019), sendo 1.464 mm por ano. Com base nesta precipitação, estabeleceu-se o valor de  $k$  igual a 0,09 (Tabela 03) e, em função da característica de degradabilidade dos resíduos, o valor de  $L_0$  selecionado foi entre 225 e 300 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/ton, tendo em vista que o resíduo caracterizava-se como altamente degradável (Figuras 1 e 2).

**Figura 1** – Cascas de frutas e verduras descartadas.



**Fonte:** Dos autores (2019).

**Figura 2** – Restos de alimentos prontos descartados.



Fonte: Dos autores (2019).

Para definir o valor de  $m_i$ , massa de resíduo por ano, utilizou-se uma média de geração de resíduo orgânico. Nos 5 meses de operação do projeto de compostagem foram coletados 59.398 kg de resíduos, que resulta em uma média de 11.879 kg por mês. Este valor foi utilizado para estimar a quantidade de resíduos orgânicos no período de 12 meses, que resultou em 142.548 kg anuais.

Estes valores foram aplicados na equação, considerando os valores de  $L_0$  mínimo e máximo.



Assim, para  $L_0$  mínimo,  $Q(CH_4) = 0,09 \cdot 225 \cdot 142,548 \cdot e^{-0,09}$ , resultando em 2.638,15 m<sup>3</sup>/ano de metano gerado. Para o valor de  $L_0$  máximo, de 300 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/ton, tem-se que  $Q(CH_4) = 0,09 \cdot 300 \cdot 142,548 \cdot e^{-0,09}$ , resultado em 3.517,53 m<sup>3</sup>/ano de metano gerado.

As estimativas de geração de metano mínima e máxima foram, respectivamente, 2.638,15 m<sup>3</sup>/ano e 3.517,53 m<sup>3</sup>/ano. Estes valores apontam para a potencialidade de redução de consumo de combustíveis fósseis quando da análise de viabilidade de aproveitamento energético do biogás. Estas alternativas tem sido avaliadas no mundo inteiro devido o alto poder calorífico do metano, que representa cerca de 50% à 80% de sua totalidade (CORDEBELLA *et al.*,2006).

Ferreira (2015) aponta que a combustão do metano é uma reação exotérmica, e através de cálculos desenvolvidos em seu estudo ele apresentou que em condições de temperatura e pressão padrões, 1m<sup>3</sup> de metano tem potencial de gerar 8.500 kcal/m<sup>3</sup> de energia ou 9,97kWh/m<sup>3</sup>.

Considerando o poder calorífico do metano, calculou-se o potencial de geração de energia do material encaminhado para compostagem, a partir dos valores mínimos e máximos de metano gerado. Para a quantidade mínima estimada de metano gerado anualmente, de 2.638,15 m<sup>3</sup>/ano, aplicou-se o potencial de geração de energia de 9,97kWh/m<sup>3</sup> proposto por Ferreira (2015), que resultou em uma estimativa de 26.302,35 kWh/ano ou 26,30 MWh/ano. Aplicou-se a mesma equação para o valor potencial máximo de metano, ou seja, 3.517,53 m<sup>3</sup>/ano, que multiplicado por 9,97kWh/m<sup>3</sup>, resultou em 35.069,77 kWh/ano ou 35,07 MWh/ano.

Com base nestas estimativas, avaliou-se o consumo de energia do empreendimento em 2018 (Gráfico 01), com consumo médio de 1.328,53 MWh/mês, os valores de geração de energia elétrica através do metano gerado pelo biodigestor não seriam representativos, dado que estimou-se um valor anual de 26,30 MWh e 35,07 MWh, considerando os valores mínimos e máximos aplicados a equação proposta por Pavan (2010). Para efeitos comparativos, o valor máximo estimado de energia elétrica mensal para o potencial máximo de geração de energia a partir do metano seria de 2,92 MWh/mês, que representaria apenas 0,20% do total consumido mensalmente, e que, caso fosse implantado, geraria uma economia média de R\$ 388,10/mês, pouco significativa considerando a implantação do sistema de biodigestão e o gasto mensal médio de R\$ 194.050,85 do empreendimento.

A tabela 6 apresenta uma síntese dos resultados obtidos de geração de metano e seu resultado quando convertido em energia elétrica.

Tabela 6 – Geração de metano e energia elétrica estimada de acordo com o modelo de *School Canyon*.

Potencial de geração de Metano (m <sup>3</sup> /ano)		Potencial de geração de energia elétrica (MWh/ano)
L <sub>0</sub> mínimo	2.638,15	26,30
L <sub>0</sub> máximo	3.517,53	35,07

Fonte: Dos autores (2019).

Estes resultados apontam que o uso de biodigestor para geração de energia elétrica pode não ser viável no empreendimento, tendo em vista que a quantidade de metano produzida não seria significativa para a redução de custos com energia e que seriam necessárias adequações técnicas construtivas nas edificações do empreendimento e a aquisição de equipamentos para a conversão em energia elétrica. Desta forma, a viabilidade para conversão em energia elétrica é baixa e, portanto, considerada não aplicável ao empreendimento.

No entanto, a energia obtida pela decomposição dos resíduos poderia ser diretamente aproveitada a partir do uso do metano produzido, sendo interessante sua aplicação como gás metano encanado, para o uso em cozinhas e fornos.

Para avaliar a viabilidade do uso do metano para uso em cozinhas e fornos, o valor de produção de 3.517,53 m<sup>3</sup>/ano obtido a partir do L<sub>0</sub> máximo, multiplicado pelo poder calorífico do gás, de 8.500 kcal/m<sup>3</sup>, resultaria em uma produção de 29.899.005 kcal/ano, um resultado expressivo de poder calorífico para o gás, demonstrando assim que sua utilização como forma de geração de calor é viável.

De acordo com Oliver *et al.* (2008), 1 litro de biogás equivale a 0,45 litros de gás de cozinha e Okamura (2013), em estudo realizado com resíduos sólidos depositados em aterros sanitários, determinou uma composição percentual (V/V) de 46,7% a 67,5% de metano no biogás gerado pela decomposição destes resíduos e que reforçam a potencialidade calorífica da matéria orgânica. Desta forma, projetos de estudo de viabilidade de implantação de sistemas de biodigestão e aproveitamento do metano como gás calorífico de uso em cozinhas podem ser desenvolvidos, mas deve-se considerar a aplicabilidade destes projetos em empreendimentos já construídos, bem como os custos para a implantação destes sistemas e o retorno do investimento. Para o projeto piloto desenvolvido, em uma área já construída e que tratou quantidades elevadas de resíduos sólidos orgânicos, talvez a implantação de biodigestores convencionais não apresente viabilidade. No entanto, existem tecnologias disponíveis no mercado para tratamento de resíduos sólidos orgânicos, denominados biodigestores de escala doméstica ou biodigestores portáteis (SEBRAE, 2020) e projetos de biodigestores de pequena escala vem sendo desenvolvidos e apresentam potencial para a implantação em empreendimentos que envolvam serviços de restaurantes e alimentos, desde que sejam adequadamente avaliados aspectos estruturais para a implantação destas tecnologias (REIS, 2012) e que o

processo seja devidamente monitorado, dada a complexidade bioquímica do processo de fermentação (SHUBEITA *et al.*, 2014).

Tendo em vista que o potencial de aproveitamento energético dos resíduos orgânicos avaliados no projeto piloto não demonstrou potencial de aplicação para conversão em energia elétrica, considerando o porte do empreendimento, e estudos de viabilidade de aproveitamento do gás metano possuem tecnologias de biodigestão em pequena escala, mas precisam ser avaliados considerando o porte do empreendimento, analisou-se também a geração de biocomposto e a viabilidade de manutenção do projeto.

Durante o período do estudo, o shopping destinava o resíduo orgânico segregado a uma empresa, quatro vezes por semana, que devolvia parte do biocomposto produzido para uma horta urbana que estava sendo desenvolvida também no projeto. Essa prestação de serviço custava ao empreendimento comercial R\$ 435,00 por coleta e R\$ 85,00 reais por tonelada de resíduo orgânico tratado.

A tabela 7 apresenta o custo da compostagem no período de março a julho de 2019, e o total gasto no período. Como esta parcela não corresponde a 100% dos resíduos orgânicos segregados no empreendimento (Gráfico 02), a implantação deste projeto poderia resultar em valores elevados, que poderiam impactar economicamente a gestão dos resíduos considerando a alternativa proposta.

Tabela 7 – Custo do projeto piloto de compostagem.

Mês	Março	Abril	Maior	Junho	Julho	TOTAL
Tonelada	4,3	15,224	13,635	12,724	13,515	59,398
Coletas	7	17	18	17	18	77
Custo	R\$ 3.410,50	R\$ 8.689,05	R\$ 8.988,98	R\$ 8.476,54	R\$ 8.978,78	<b>R\$ 38.543,85</b>

Fonte: Dos autores (2019).

Com base na tabela 07, observa-se um custo de R\$ 38.543,85 em 5 meses de projeto, com gasto mensal médio de R\$ 7.708,77 para uma destinação mensal média de 11,88 toneladas de resíduo orgânico. Assim, considerando a ampliação do projeto para 12 meses, o empreendimento teria como gasto cerca de R\$ 92.505,24 com a compostagem, custo este que o shopping não teria caso esse resíduo orgânico fosse direcionado para um biodigestor *in loco* para tratamento desta parcela.

Além dessa economia que o empreendimento poderia vir a ter com a utilização de um biodigestor *in loco*, o shopping faria uma gestão mais adequada dos resíduos orgânicos no próprio empreendimento. Considerando também que o metano possui potencial de 21-28 vezes superior ao gás carbônico, no que tange ao seu papel como gás de efeito estufa - GEE, a instalação do biodigestor poderia contribuir significativamente para a redução da emissão de GEE, podendo inclusive ser contabilizado como créditos de carbono pelo empreendimento (SILVA, FRANCISCO, 2010).

No entanto, tendo em vista que a viabilidade da implantação de biodigestores não apresentou resultados promissores para a geração de energia no período de desenvolvimento do projeto piloto, ou ainda que o aproveitamento do gás metano para geração de energia calorífica *in loco* não foi avaliado neste trabalho.

#### 4 CONCLUSÕES



A busca por alternativas mais efetivas e sustentáveis para gestão de resíduos no cenário atual tem se mostrado relevante para empreendimentos urbanos e o processo de biodigestão traz a possibilidade de realizar uma gestão mais completa de resíduos e a utilização de seus subprodutos para benefícios ambientais e econômicos nestes empreendimentos.

O estudo apresentou um panorama de geração de resíduos orgânicos de um shopping center e avaliou o desenvolvimento de um projeto piloto e sua potencialidade de geração de energia elétrica, calorífica e na produção de biocomposto. Foi apontado que mesmo com uma geração de metano podendo atingir o valor de 3.517,53 m<sup>3</sup>/ano, a utilização do gás não seria viável para produção de eletricidade para o empreendimento, que atingiria o valor de 35,07 MWh/ano, resultado pouco relevante considerando os custos com energia elétrica no shopping center estudado.

Mesmo não apresentando viabilidade para geração de energia elétrica, a utilização do metano poderia ser avaliada do ponto de vista calorífico, estimado em 29.899.005 kcal/ano e que poderia ser utilizado para a substituição do gás de cozinha utilizado pelos restaurantes dentro do empreendimento, desde que fossem considerados tecnologias de biodigestores de pequena escala.

Diante do cenário estudado, aponta-se que a utilização de biodigestores pode-se apresentar como alternativa ao tratamento de resíduos orgânicos *in loco*, considerando os custos que o empreendimento possui com o encaminhamento dessa parcela de resíduos para um tratamento adequado, porém vale ressaltar que a implantação de um biodigestor deve ser avaliada pré-emprego, em construções com características de geração de resíduos semelhantes, visto a inviabilidade de instalação de um equipamento capaz de receber volumes tão altos de resíduos em empreendimentos já construídos e consolidados.

## REFERÊNCIAS

ABRASCE, 2018, **NÚMEROS DO SETOR**, Associação Brasileira de Shoppings Centers. Disponível em: < <https://abrasce.com.br/monitoramento>>. Acesso em: 14 fev 2019.

ABRELPE, 2018, **PANORAMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL**, Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Disponível em: <<http://abrelpe.org.br/download-panorama-2017/>>. Acesso em: 08 fev 2019.

ANDREOLI, C.V.; FERREIRA, A.C.; CHERNICHARO, C. A. L. **Secagem e higienização de lodos com aproveitamento de biogás**. In CASSINI, S. T. (coordenador) **Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento de biogás**. Rio de Janeiro: PROSAB, 2003. 196p.

ARRUDA, M. H; AMARAL, L. D; PIRES, O. P; BARUFI, C. R.; **Dimensionamento de Biodigestor para Geração de Energia Alternativa**. Revista Científica Eletrônica de Agronomia, 2002.

BARRÍA, Cecília. **Por que a América Latina continua construindo shoppings enquanto os EUA estão abandonando o modelo**. BBC, 2017. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/geral-42245404>>. Acesso em: 04 de julho de 2019.

BONFANTE T. M.; **Análise da Viabilidade Econômica de Projetos que Visam à Instalação de Biodigestores para o Tratamento de Resíduos da Suinocultura sob às Ópticas do Mecanismo do Desenvolvimento Limpo (MDL) e da Geração de Energia**. [Dissertação]. Ribeirão Preto: Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade; 2010.

BRASIL, 2010. Lei nº 12.305. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.

CLIMATEMPO. **Climatologia** Disponível em: <<https://www.climatempo.com.br/climatologia/558/saopaulo-sp>>. Acesso em: 11 Ago. 2019.

COMASTRI, J. A.; **Biogás: independência energética do Pantanal Mato-Grossense**. EMBRAPA – Circular Técnica, 09, 1981, p. 53.

CORDEBELLA, A.; SOUZA, S.N.M.; SOUZA, J.; KOHELER, A. C.; **Viabilidade da cogeração de energia elétrica com biogás da bonivocultura de leite**. Enc. Energ. Meio Rural 2006.

EPE, 2018. **BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL**, Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: < <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-397/Relat%C3%B3rio%20S%C3%ADntese%202018-ab%202017vff.pdf>>. Acesso em: 08 fev 2019.

FAO - **Food and Agriculture Organization. Food wastage footprint: Impacts on natural resources**. Organization of the United Nations. p.63. Itália, Roma. 2013

FERNANDES, D. M. **Biomassa e biogás da suinocultura**. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, Paraná, 2012.

FERREIRA, B. O. **Avaliação de um sistema de metanização de resíduos orgânicos alimentares com vistas ao aproveitamento energético do biogás**. 2015. 124f. Dissertação (Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - UFMG. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

FILHO, A.C.F.; SANTANA, C.D.S.; GATTAMORTA, M.A. **Utilização de biodigestores para geração de energia elétrica a partir de dejetos de suínos no Brasil**. INOVAE - ISSN: 2357-7797, São Paulo, Vol.6, JAN-DEZ, 2018 - pág. 67-84

GÓMEZ, X. et. al. **Anaerobic co-digestion of primary sludge and the fruit and vegetable fraction of the municipal solid wastes** – Conditions for mixing and evaluation of the organic loading rate, Renewable Energy 31: 2.017, 2006.

OLIVEIRA, A. M. G; AQUINO, A. M; NETO, M. T. C. **Compostagem Caseira de Lixo Orgânico Doméstico**. EMBRAPA – Circular Técnica, 76, 2005, p. 05.

OLIVEIRA, L.B.; E ROSA L.P. **Brazilian waste potential: energy, environmental, social and economic benefits**. Energy Policy. V.31, p.1481–1491. 20

OLIVER, A. de P. M. et al. **Manual de treinamento em biodigestão**. Salvador: Winrock, 2008. 23 p.

PAVAN, Margareth de Cássia Oliveira. **GERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: AVALIAÇÃO E DIRETRIZES PARA TECNOLOGIA POTENCIALMENTE APLICÁVEIS NO BRASIL**. Orientador: Virginia Parente. 2010. 187 p. Tese (Doutorado em energia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

PMSP – Prefeitura Municipal de São Paulo, 2004. DECRETO Nº 45.668, DE 29 DE DEZEMBRO DE 2004. Regulamenta os artigos 123 e 140 da Lei no. 13.478, de 30 de

dezembro de 2002, **dispõe sobre a organização do sistema de limpeza urbana no município de São Paulo e dá outras providências**. Disponível em: <<https://leismunicipais.com.br/a/sp/s/sao-paulo/decreto/2004/4566/45668/decreto-n-45668-2004-regulamenta-os-artigos-123-e-140-da-lei-n-13478-de-30-de-dezembro-de-2002-que-dispoe-sobre-a-organizacao-do-sistema-de-limpeza-urbana-no-municipio-de-sao-paulo-e-da-outras-providencias>> Acesso em: 27 de maio de 2019.

PROSAB: Programa de Pesquisas em Saneamento Básico; Rede Cooperativa de Pesquisas/ **Digestão Anaeróbia de Resíduos Orgânicos e Aproveitamento de Biogás**. Coordenador: Cassini, S. T., 2003. Disponível: <<https://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/ProsabStulio.pdf>> Acesso em 08 Out. 2019.

REIS, A. S. **Tratamento de resíduos sólidos orgânicos em biodigestor anaeróbio**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. 2012. 79f.

ROCHA, C.M. **Proposta de implantação de um biodigestor anaeróbio de resíduo alimentares**. 2016. 14f. Trabalho de conclusão de curso – UFJF. Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora.

SANTOS, A. C. **Geração de Metano devido a digestão anaeróbia de Resíduos Sólidos Urbanos - Estudo de caso do Aterro Sanitário Metropolitano Centro, Salvador-Bahia**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia, Salvador. 2011. 154p.

SEBRAE. **Biodigestor em escala doméstica? Veja substituto do GLP**. Disponível em: <<https://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/biodigestor-em-escala-domestica-veja-substituto-do-glp,e19407cd60e71710VgnVCM1000004c00210aRCRD>> Acesso em: 27 Set. 2020.

SEEG, 2017, **Emissões de GEE do Brasil**, Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa. Disponível em: <[http://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2017/10/RelatoriosSeeg2017-Sintese\\_final.pdf](http://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2017/10/RelatoriosSeeg2017-Sintese_final.pdf)> Acesso em 14 Abr 2019.

SHUBEITA, F.M.; WEBBER, T., FERNANDES, R.; MARCON, C.; POEHLS, L.B. **Um estudo sobre o monitoramento e controle de biodigestores de pequena escala**. Technical Report no. 079. Porto Alegre: Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Set. 2014.

SILVA, N. P., FRANCISCO, A. C.; **Geração de energia elétrica a partir de dejetos suínos: um estudo de caso em uma propriedade rural na região oeste do estado do Paraná**. *Nucleus*, v.7, n.2, 2010, p. 65 – 82