298 – ANÁLISE DA EFICIÊNCIA OPERACIONAL DE UM BIODIGESTOR DE TRATAMENTO ANAERÓBIO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS

Wilkson Sousa dos Santos [(1)]
Engenheiro Mecânico pela Universidade Paulista (UNIP, 2024), mestrando em Bioprodutos e Bioprocessos na Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP).
Fernanda Peixoto Manéo[(2)]
Engenheira Agrônoma pela Faculdade Integrada Cantareira. Mestre em Gestão Ambiental pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). Doutoranda pela Universidade Estadual Paulista (UNESP). Pesquisadora Assistente do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT).
Letícia dos Santos Macedo[(3)]
Tecnóloga Sanitarista e Ambiental pela Universidade de Campinas (UNICAMP). Mestre em Gestão Ambiental pela Universidade de São Paulo (USP). Pesquisadora Assistente do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT).
Claudia Echevenguá Teixeira[(4)]
Bióloga pela Universidade de Caxias do Sul, Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Campinas e Doutora em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade de Sherbooke. Pós-doutorado pela Universidade do Estado do Arizona. Pesquisadora no Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT).
Adilson Vicente da Silva[(5)]
Engenheiro Mecânica pela Universidade Santa Cecília (UNISANTA, 2015) e Pós-graduado pela Universidade Paulista (UNIP, 2017).

Endereço[(1)]**:** Avenida João Dagnone, 1100 Jardim - Santa Angelina - São Carlos - São Paulo - 13563-120 - Brasil - Tel: +55 (16) 99168-8452 - Fax: +55 (16) 3373-9552 e-mail: glgiglio@usp.br

[(1)] O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

RESUMO

Este estudo avaliou a eficiência operacional de um biodigestor anaeróbio de tratamento da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos (FORSU) em um município litorâneo de São Paulo, processando até 60 t/mês em quatro túneis de metanização. Seis ciclos de operação (2023-2024) foram analisados, com monitoramento da composição gravimétrica da FORSU, biogás (320-400 Nm³/ton VS, 50-60% CH_4), inóculo e digestato. A composição média dos resíduos foi 41% restos alimentares processados, 23% restos de preparação, 23% frutas, 9% legumes e verduras e 4% outros. A redução de massa atingiu 66%, e o digestato, classificado como Classe B (IN 61/2020), apresentou potencial para upgrading à Classe A via compostagem aeróbia (55°C, 72h) ou estabilização com cal (pH 12, 12h), viabilizando seu uso como biofertilizante. Comparado a biodigestores internacionais (650-750 Nm³/ton VS), o rendimento foi inferior, mas a estabilidade e qualidade do biogás indicam potencial de otimização. A tecnologia alinha-se às metas do Planaro (MMA, 2025), promovendo gestão sustentável e economia circular.

PALAVRAS-CHAVE: *Biodigestão anaeróbia, fração orgânica, biogás, digestato, biofertilizante, resíduos sólidos urbanos.*

INTRODUÇÃO

Conforme o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2024), o Brasil gerou, no ano de 2023, 75 milhões de toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Considerando que, conforme o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES, 2022), 45% dos RSU correspondem à Fração Orgânica (FORSU), são cerca de 34 milhões de toneladas dessa fração. O Plano Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2022), assim como o Plano Estadual de Resíduos Sólidos de São Paulo (SÃO PAULO, 2020), estipularam metas de redução de resíduos orgânicos destinados ao aterro, mas essas metas estão longe de serem atendidas. Desde a promulgação de marcos legais importantes do setor de resíduos, como a Política Nacional de Saneamento Básico – instituída na Lei nº 11.445, de 2007 – e, principalmente, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) – formalizada na Lei nº 12.305, de 2010, (BRASIL, 2010a), e posteriormente regulamentada pelo Decreto nº 10.936, de 2022 (BRASIL, 2022), assim como dos PLANARES, 2022 e do PERS, 2020, mudanças significativas em relação ao tratamento e disposição da FORSU no país são esperadas, entretanto, caminhamos à passos lentos.

O Planaro (Plano Nacional de Redução e Reciclagem de Resíduos Orgânicos Urbanos) (MMA, 2025), prevê como uma das soluções de redução de resíduos orgânicos destinados ao aterro, a instalação de biodigestores descentralizados nos municípios, com o reaproveitamento do biogás gerado no abastecimento de caminhões de coleta de lixo municipal. Esta é uma solução não apenas de reaproveitamento dos resíduos orgânicos mas também de redução de emissões de gases de efeito estufa, visto que, além da redução das emissões geradas pelo próprio resíduo, segunda maior fonte de emissões de metano no Brasil (SEGG, 2022), de acordo com o CIBiogás (Centro Internacional de Energias Renováveis/Biogás), o biometano pode reduzir em até 90% as emissões de poluentes na comparação com a gasolina.

Além disso, os compostos orgânicos gerados nesses processos são ricos em microrganismos e, ao serem aplicados no solo, podem influenciar fortemente a biogeoquímica terrestre, formando e decompondo a matéria orgânica do solo (MOS) que é considerada o maior estoque terrestre de carbono orgânico e nitrogênio do planeta, e uma fonte primária de outros macro e micronutrientes. Ao moldar a rotatividade da MOS, os microrganismos influenciam as concentrações atmosféricas de CO_2 e o clima global, e ajudam a fornecer serviços ecossistêmicos cruciais, como fertilidade do solo, sequestro de carbono, assim como para a produtividade e a saúde das plantas. Ou seja, a influência do microbioma ao solo, na biogeoquímica, se estende muito além das atividades metabólicas dos organismos vivos (Sokol et al., 2023). Entretanto, a aplicação da biomassa gerada no processo de tratamento anaeróbio dos resíduos, como fonte de adubo, ainda é um desafio no Brasil, que possui normas e leis de aplicação de lodos de tratamento de esgoto e composto resultante de tratamento aeróbio de resíduos orgânicos na forma de biofertilizante, mas ainda não possui para aqueles resultantes de tratamento anaeróbio (Tabela 1). Na contrapartida, conforme apresentado na Tabela 1, a União Europeia (UE) possui regulamento para aplicação do digestato na forma de biofertilizante, tendo alguns países da UE normas específicas; e o Reino Unido e os Estados Unidos também possuem regulamentos para essa finalidade.

Tabela 1: Leis, Normas e Instruções Normativas Nacionais e Internacionais

País/ Região	Norma/Documento	Âmbito Principal	Descrição/Relevância
Brasil	IN 61/2020 (MAPA)	Compostos orgânicos e biossólidos	Define Classes A e B para compostos com base em contaminantes químicos e biológicos
Brasil	IN 07/2016 (MAPA)	Fertilizantes orgânicos	Estabelece limites máximos de contaminantes para fertilizantes orgânicos, aplicável aos compostos
Brasil	Resolução CONAMA 498/2020	Lodo de esgoto como biossólido	Regulamenta tratamentos (compostagem, cal) para lodo de esgoto.
Brasil	Resolução CONAMA 481/2017	Compostagem aeróbia	Critérios de higienização (ex.: 55°C por 14 dias) como referência para beneficiamento do composto.
Itália	DLgs 75/2010	Fertilizantes e compostos orgânicos	Classifica compostos (GWC, BWC, SWC) e define limites para uso agrícola, exige compostagem para digestato.
Itália	DM 1998	Recuperação de resíduos não perigosos	Exige pós-tratamento (ex.: compostagem a 55°C por 72h) para utilização do digestato.
União Europeia	Regulamento (UE) 2019/1009	Produtos fertilizantes	Define padrões para digestato como fertilizante, com limites rigorosos e opções de tratamento.
Alemanha	DüMV 2012	Regulamento de fertilizantes	Regulamenta digestato com limites de contaminantes e tratamentos como higienização térmica.
Estados Unidos	EPA 40 CFR Part 503	Biossólidos	Define Classes A e B para biossólidos/digestato, com processos como compostagem para Classe A.
Reino Unido	BS PAS 110:2014	Digestato de biodigestores anaeróbios	Padrão para digestato como biofertilizante, com limites de patógenos e metais, exige estabilização.

A FORSU permanece em tratamento anaeróbio por 20 a 30 dias, visto que após isso, este não apresenta mais potencial de geração de biogás em volumes consideráveis para o reaproveitamento energético. Por isso o processo é encerrado antes da total maturação do composto, recomendando-se uma continuidade do processo por tempo necessário para sua total maturação. Além disso, o tratamento anaeróbio, ao contrário do tratamento aeróbio, não alcaça temperaturas necessárias para a neutralização de possíveis contaminantes biológicos, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2: Temperaturas necessárias para neutralização de contaminantes biológicos

Contaminante biológico	Neutralização das bactérias (T°C)	Tratamento anaeróbio[1] (T°C)	Tratamento aeróbio (T°C)	LMP em biofertilizantes (BRASIL, 2020)
Coliformes Termotolerantes			55 por	<10^3 NMP/g
Salmonella sp.				Ausência NMP/25g
Ovos de helmintos				<0,1 ovo/g

LMP = Limite Máximo Permitido para compostos de Classe A, (BRASIL, 2020)
[1]Sistema mesofílico (mais comuns no Brasil)

No Brasil existem hoje algumas iniciativas de biodigestão da FORSU, com reaproveitamento energético, sendo uma destas, um biodigestor instalado em um município de Bertioga, no Estado de São Paulo. Este biodigestor encontra-se em operação tratando FORSU já segregado na fonte, proveniente de grandes geradores do município. Faz parte deste estudo, a apresentação dos resultados obtidos em 06 ciclos de operação, assim como dos resultados que serão obtidos nos próximos 03 ciclos de operação. Este estudo considerou a composição dos resíduos tratados, avaliando a eficiência do tratamento deste material e se necessário, as possíveis formas de remediação do material, visando a aplicação na forma de biofertilizante. O estudo avaliou também a eficiência energética do processo, considerando a variação de geração e da composição do biogás.

No contexto da biodigestão da FORSU no Brasil, destaca-se o município de Bertioga, na Baixada Santista, onde a coleta seletiva de resíduos orgânicos começou em fevereiro de 2025. Iniciada em 07 de fevereiro com a entrega de um caminhão dedicado (**Figura 1**), a ação atende grandes geradores, como escolas e supermercados, segregando a fração orgânica para tratamento em biodigestor anaeróbio, alinhando-se às diretrizes do Planaro (MMA, 2025) para redução de resíduos em aterros e mitigação de emissões.

Figura 1: Caminhão responsável pela coleta seletiva de resíduos orgânicos

OBJETIVOS

O presente estudo teve como objetivo principal avaliar o processo de otimização do desempenho de uma planta de biodigestão anaeróbica de tratamento da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos (FORSU). A qualidade do processo operacional do biodigestor foi avaliada por meio da análise dos dados de caracterização dos materiais de entrada e saída dos túneis de metanização, sendo estes: a FORSU; o biogás, o inóculo (lixiviado dos resíduos) e o digestato (FORSU pós-tratada). O estudo avaliou também formas de beneficiamento do digestato, visando a aplicação deste na forma de biofertilizante.

Foi realizado um monitoramento contínuo do volume e qualidade do biogás produzido, correlacionando essas variáveis com diferentes composições dos resíduos sólidos urbanos. Avaliou-se também o impacto da composição da FORSU na estabilidade do processo. Por fim, buscou-se estabelecer indicadores de desempenho que subsidiem o gerenciamento sustentável dos resíduos e a valorização de seus subprodutos, como biofertilizantes, fortalecendo o potencial energético do sistema.

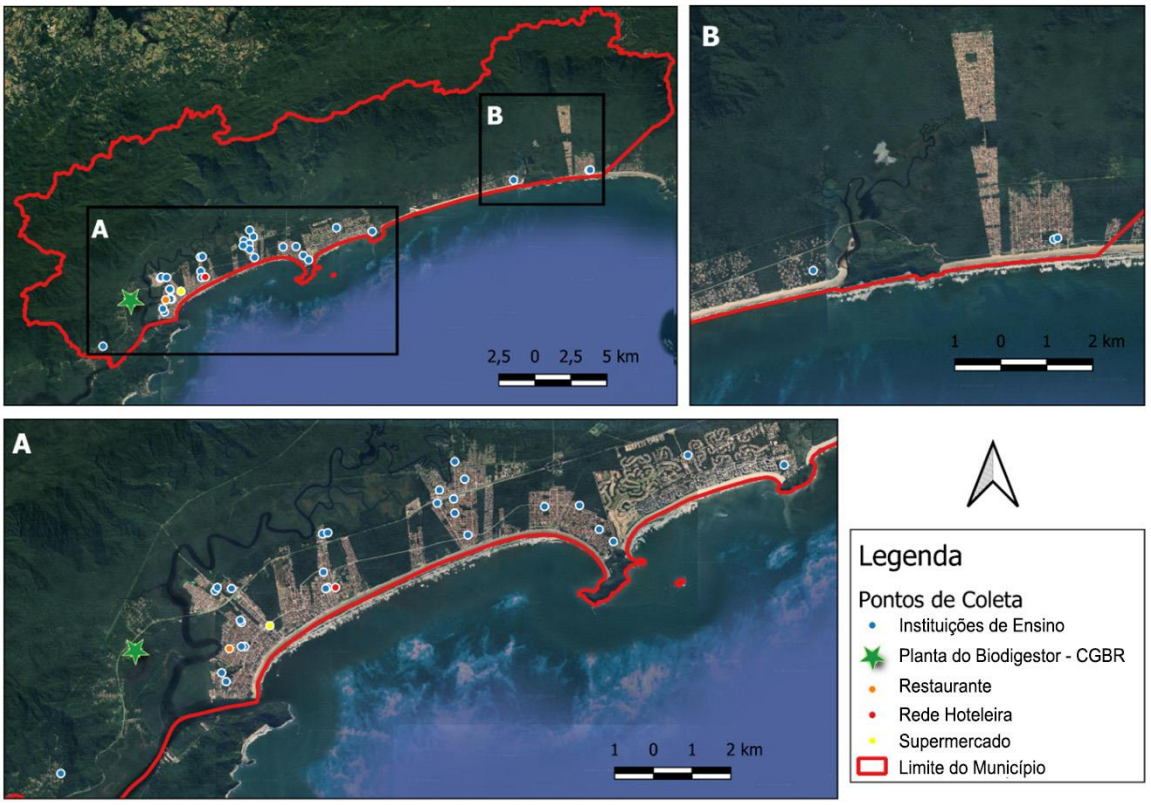
Os objetivos específicos deste estudo foram:

- Conhecer e avaliar a eficiência da tecnologia de biodigestão de resíduos sólidos urbanos em túneis de metanização;
- Avaliar a eficiência do tratamento, considerando a qualidade do digestato, assim como formas de beneficiamento deste visando a aplicação na forma de biofertilizante;
- Avaliar as condições operacionais do biodigestor, avaliando a estabilidade do processo e seu rendimento na produção de biogás;
- Determinar a composição gravimétrica detalhada dos resíduos orgânicos coletados já segregados na fonte, considerando as diferentes frações orgânicas, e inorgânicas (materiais recicláveis que podiam estar presentes);
- Comparar a composição da FORSU, proveniente de diferentes origens (escolas, mercados, rede hoteleira e restaurante) para identificar as características específicas de cada gerador;
- Avaliar a variação da composição do biogás, conforme variações na composição físico-química da FORSU utilizada no processo; e
- Avaliar os dados de monitoramento da produção de biogás em termos de volume e composição (metano, dióxido de carbono e oxigênio).

METODOLOGIA UTILIZADA

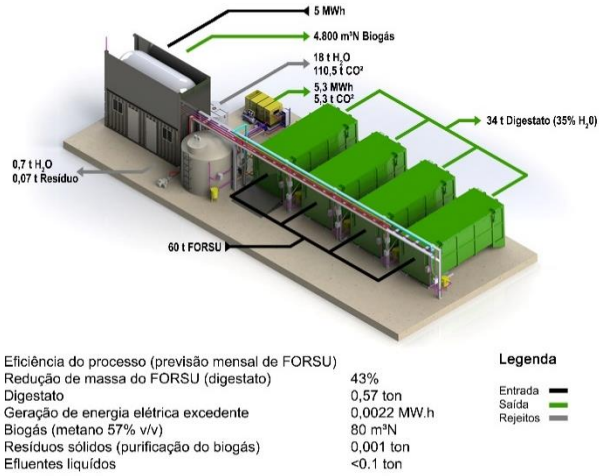
Para este estudo foi avaliada a eficiência do tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos – Fração Orgânica (FORSU), em um biodigestor de tratamento anaeróbio, que encontra-se em operação no município de Bertioga, no estado de São Paulo. O material tratado no biodigestor foi obtido já segregado na fonte, por meio de coleta seletiva de orgânicos em grandes geradores (**Figura 2**), com monitoramento da massa coletada em cada um deles.

Figura 2: Estabelecimentos atendidos pela coleta seletiva de resíduos orgânicos



O biodigestor possui capacidade de tratamento de até 60 t/mês de FORSU e é operado em sistema de batelada, por meio de quatro túneis de metanização do tipo extra-seco, cada um com capacidade aproximada de 15 toneladas. O sistema conta com uma Unidade de Produção de Inóculo (UPI), que recebe o líquido percolado do processo e promove sua recirculação como inoculante, acelerando a atividade microbiológica. A operação é toda monitorada remotamente por um sistema automatizado. A capacidade estimada de produção de biogás, quando em pleno funcionamento, é de até 4.800 m³/mês de biogás, com potencial de geração energética de aproximadamente 5 MWh/mês (**Figura 3**). Atualmente a energia esta sendo utilizada prioritariamente para o abastecimento da própria planta. O sistema integra um gasômetro para armazenamento temporário do biogás e um gerador de energia elétrica alimentado pelo mesmo.

Figura 3: Planta de biodigestão de FORSU



Foram analisados os resultados de 6 ciclos de tratamento realizados em 2023 (3 ciclos) e em 2024 (3 ciclos), além de 3 ciclos em andamento. Também foram conduzidos 2 ciclos de tratamento aeróbio em túneis de metanização com aeração forçada, utilizando o processo de compostagem por leira estática aerada, para continuidade da maturação do digestato e avaliação da possibilidade de aplicação deste na forma de biofertilizante. Para avaliar a eficiência do processo foram realizadas caracterizações, conforme apresentado na Tabela 1, dos materiais de entrada e saída do biodigestor, sendo esses:

- A FORSU coletada nos grandes geradores;
- O inóculo - efluente gerado durante o processo de metanização;
- O digestato - material resultante do tratamento da Forsu; e
- O biogás gerado durante todo o processo, sua composição e volume.

Tabela 1: Controle de qualidade do processo de metanização

Parâmetros	Matrizes	Metodologia
Teor de umidade	F, I e D	NBR 6457, ABNT, 1986; Embrapa, 2009
Teor de matéria orgânica e voláteis	F, I e D	NBR 13600 – ABNT, 1996; Embrapa, 2009
pH	I	LIMA, 2004
Determinação de alcalinidade	I	SMEWW 2320
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	I	JIRKA, A.M.; CARTER, M.J., Analytical Chemistry, 1975
Sólidos totais, suspensos e dissolvidos	I	Carvalho et.al. 2000. Guy, H. P., 1969
Contaminação química*	D	ICP-OES EPA Method 3051-A: 2007
Contaminação biológica**	D	Farmacopeia Brasileira – 6ª edição (2019) e Portaria MS 1480/90 e Europeian Pharmacopeia
Contaminação por materiais inertes***	D	NBR/ABNT 10.007/2004; ASTM, D523/2016, IPT/CEMPRE, 2018

F = FORSU; I = Inóculo e D = Digestato.
* lista de compostos: Antimônio, Arsênio; Bário; Boro; Cádmio; Chumbo; Cobalto; Cobre; Cromo total; Cromo hexavalente; Mercúrio; Molibdênio; Níquel; Nitrato como N; Prata; Selênio e Zinco.
**Contagem de coliforme termotolerantes, Salmonella sp. E ovos viáveis de helmintos
***Determinação da composição física a gravimétrica

A composição do biogás foi monitorada diariamente por leitores automáticos instalados na planta, que medem o volume gerado e as concentrações de CH_4, CO_2 e O_2.

O monitoramento da eficiência operacional foi realizado ao longo de seis ciclos completos de operação. Em cada ciclo, foram coletados dados de entrada e saída dos túneis, incluindo massa inicial de FORSU, quantidade de podas, volume de líquido percolado, massa de digestato final e perda de massa durante o processo. A caracterização dos materiais foi feita conforme os parâmetros físicos (umidade, pH), químicos (C/N, teor de

carbono e nitrogênio total), e biológicos (potencial patogênico), considerando os requisitos estabelecidos pelas Instruções Normativas nº 61/2020 e nº 07/2016 do MAPA. A composição física e gravimétrica dos resíduos foi analisada no material de entrada e saída, quando presente inertes. O ensaio já havia sido realizado no material fornecido por escolas, mercado e restaurante (Figura 2), com separação em classes conforme a Tabela 2 e cálculo da porcentagem de cada classe na massa total.

O líquido lixiviado acumulado foi recirculado à pilha de resíduos através da UPI, atuando como inóculo e contribuindo para a manutenção da atividade microbiana metanogênica. A escolha por este sistema visou à autonomia operacional da planta, minimizando o uso de inoculantes externos.

Figura 3: Ensaio de determinação da composição física e gravimétrica dos resíduos orgânicos

Tabela 2: Materiais segregados no ensaio de determinação composição física e gravimétrica

Resíduos	Descrição
Casca de banana	-
Coco	Inteiro ou pedaços de casca
Outras frutas	Diversas
Ovo	Inteiro e/ou casca
Peixe	Espinha e carne
Carne (frango, porco carne vermelha)	Diversas
Legumes e verduras	Inteiras
Resto de preparação de alimentos	Cascas de legumes e verduras
Resto de alimento processado	Sobras de alimentos de pratos e panelas
Outros orgânicos (especificar)	-

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esse item apresenta alguns resultados já obtidos nos ciclos de tratamento anaeróbio de resíduos orgânicos em um biodigestor constituído e 4 túneis de metanização. Os dados dos ciclos de operação, massa de material tratado e fase de operação em que se encontrava cada ciclo de tratamento, estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Datas e totais de dias de cada fase de cada ciclo de operação nos túneis 01 e 02

Túnel	Ciclo/ Datas de coleta	Armazenamento	Quantidade de dias de cada fase			
			Fase aeróbia	Ativação metanogênica	Fase metanogênica	Total
1	**1** 22/5 à 31/8/23	101	03	28	NH	31
	2 1/9 a 6/10/23	36	02	83	NH	85
	3 11/10 a 24/10/23	14	03	27	NH	30
	4 19/2 a 4/3/24	15	02	95	NH	97
	5 4/3 a 12/6/24	16	02	31	17	48
	6 **01/7 a 16/8**	47	02	5	Atual	-
2	**1** 1/9 a 11/10/23	5	04	48	NH	52
	2 3/5 a 27/5/24	24	23	46	38	107

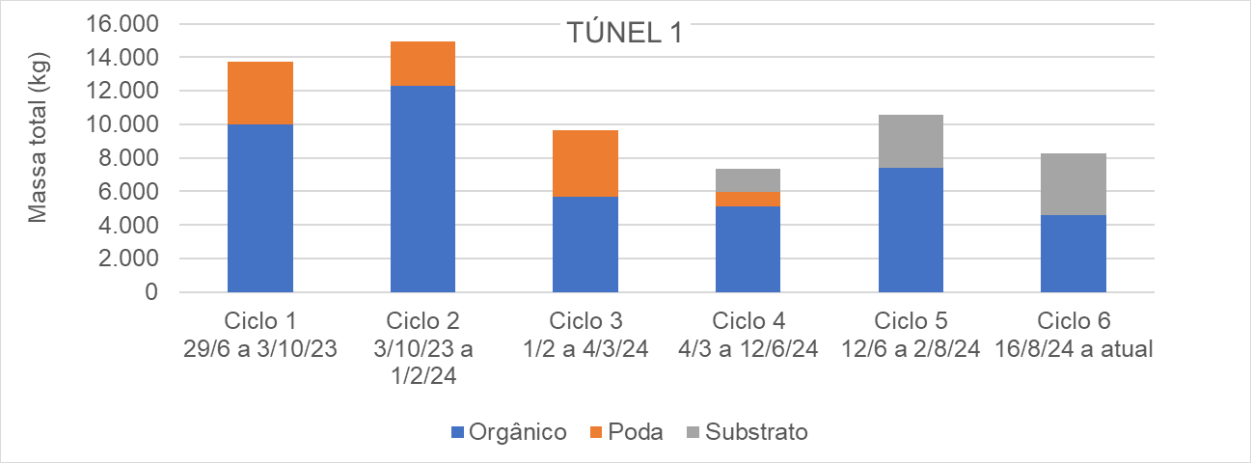
A **Tabela 4** mostra a composição e o balanço de massa dos materiais coletados e tratados, incluindo os ciclos anaeróbios e os 2 ciclos aeróbios nos túneis 4 e 3, realizados para beneficiar o digestato e avaliar seu uso como biofertilizante.

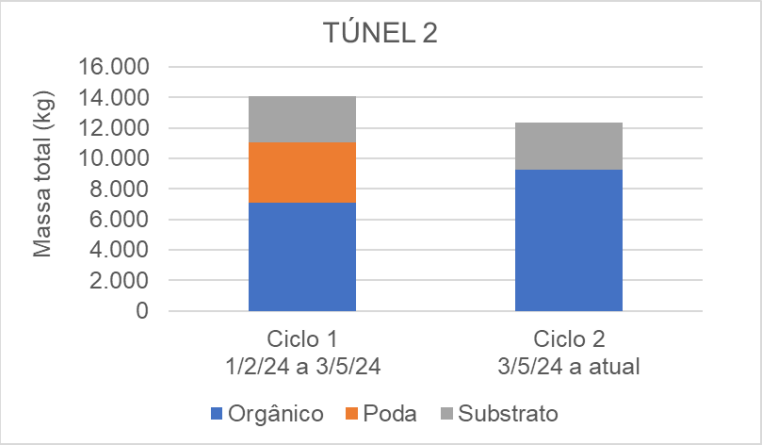
Tabela 4 - Balanço de massa de resíduos coletados, tratados e descarregados dos túneis

Túnel/Ciclo	Material orgânico coletado (kg)	Líquido drenado durante o armazenamento		Material tratado (kg)			Massa total (kg)		Perda de massa durante o tratamento	
		(kg)	(%)	FORSU	Poda	Substrato	Entrada	Saída	(kg)	(%)
T1/C1	21.230	11.294	53	9.981	3.738	-	13.719	8.350	5.369	39
T1/C2	14.550	2.240	15	12.310	2.620	-	14.930	7.870	7.060	47
T1/C3	9.530	3.840	40	5.690	3.935	-	9.625	8.870	755	8
T1/C4	11.300	6.180	55	5.120	860	1.390	7.370	3.240	4.130	56
T1/C5	8.040	650	8	7.390	-	3.167	10.557	5.690	4.867	46
T1/C6	8.200	3.600	44	4.600	-	3.680	8.280	Atual	Atual	Atual
T2/C1	8.260	1.150	14	7.110	-	3.000	10.110	7.403	2.707	27
T2/C2	11.680	2.440	21	9.240	-	3.120	12.360	Atual	Atual	Atual
T3/C1	6.450	3.530	55	2.920		1.251	4.171	Atual	Atual	Atual
T4/C1	8.600	2.659	31	5.941	2.545	-	8.486	**	**	**
TOTAL	107.840	43.451	38	70.302	13.698	15.608	99.608	-	-	-

Durante o processo de tratamento no interior dos túneis, foi misturado material estruturante ao resíduo alimentar, em uma proporção de 30% e 70%, respectivamente. Este material foi adicionado para que não haja compactação do resíduo alimentar durante o processo. O material estruturante utilizado nos primeiros ciclos foi resíduo de poda seca e triturada, e nos ciclos subsequentes, foi utilizado o próprio material já tratado (substrato), sendo este reinserido no processo. A **Figura 4** apresenta as massas dos resíduos tratados em cada ciclo de operação de tratamento anaeróbio.

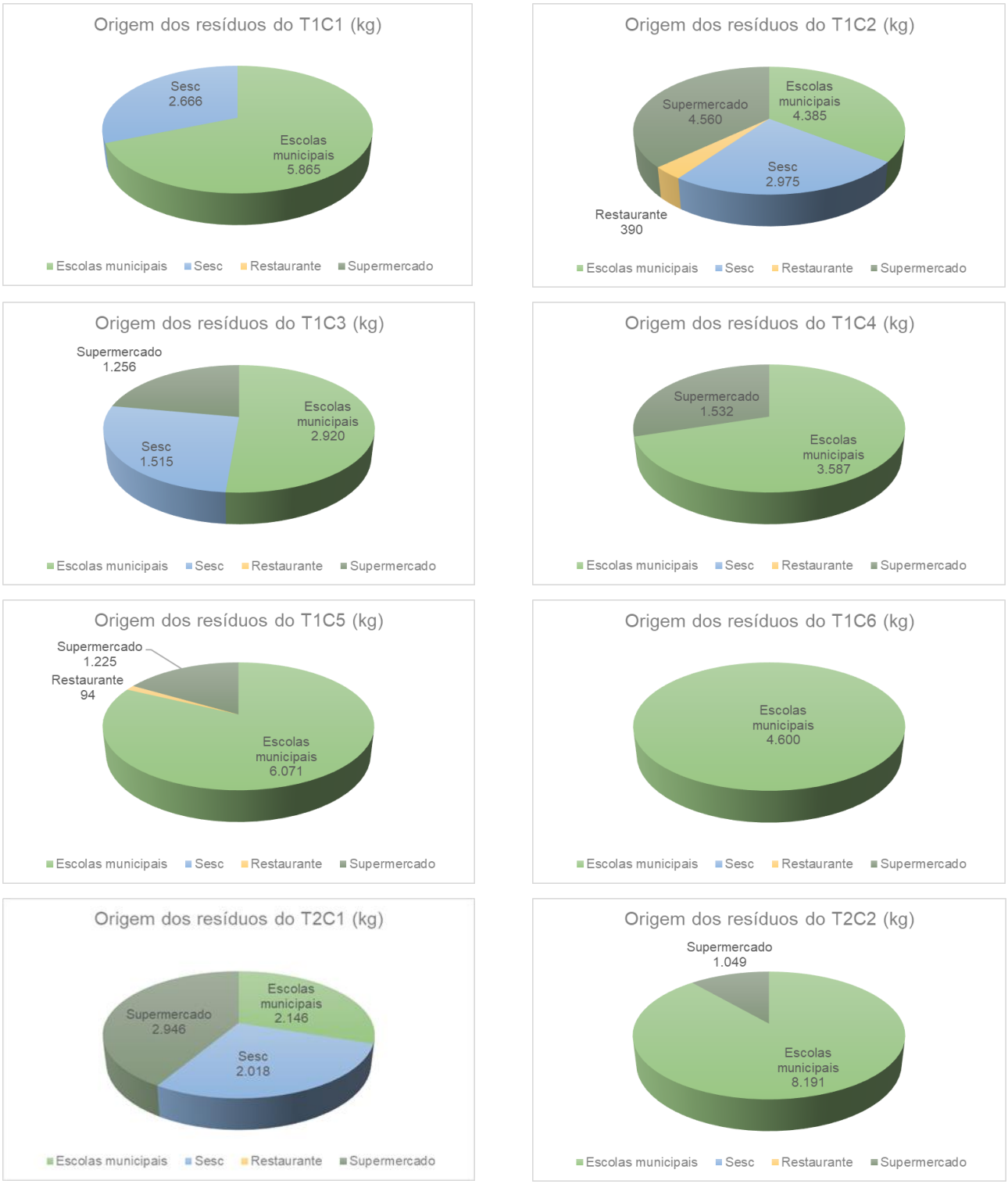
Figura 4: Composição do material tratado nos ciclos de operação de tratamento anaeróbio.





A **Figura 5** apresenta a quantidade de resíduos tratados em cada túnel de metanização, de acordo com o estabelecimento de origem.

Figura 5: Origem dos materiais tratados em cada um dos ciclos de operação



Com base nos dados da origem do material tratado em cada túnel de metanização e nos dados dos resultados da determinação da composição gravimétrica de cada estabelecimento coletado (Figura 6), obteve-se a seguinte composição de material tratado em cada ciclo de operação, conforme apresentado na **Figura 7**.

Figura 1 - Composição dos resíduos orgânicos dos grandes geradores

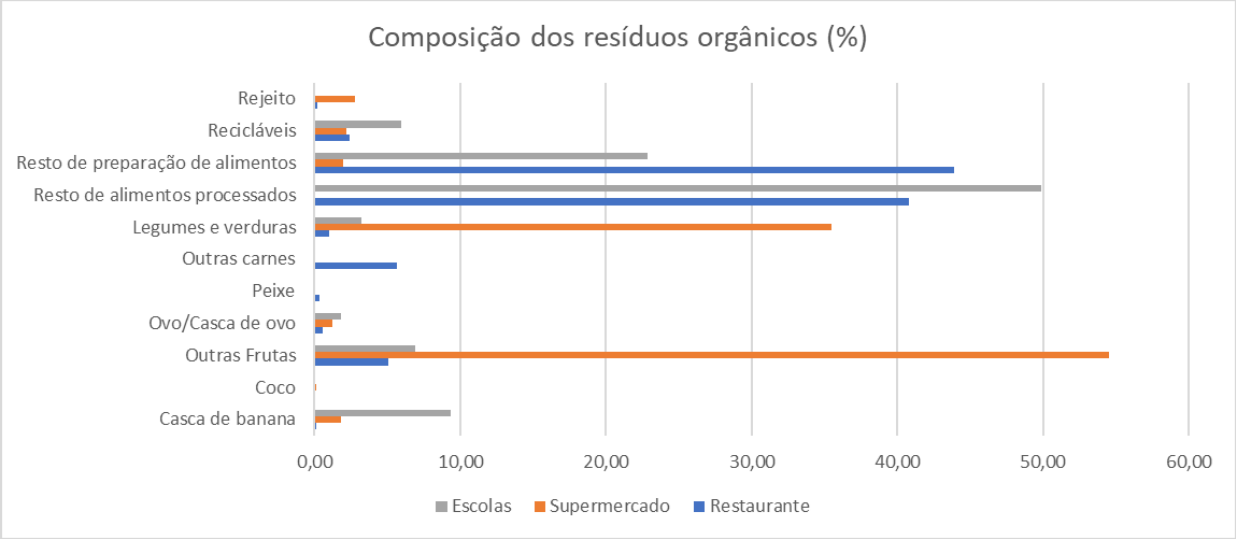
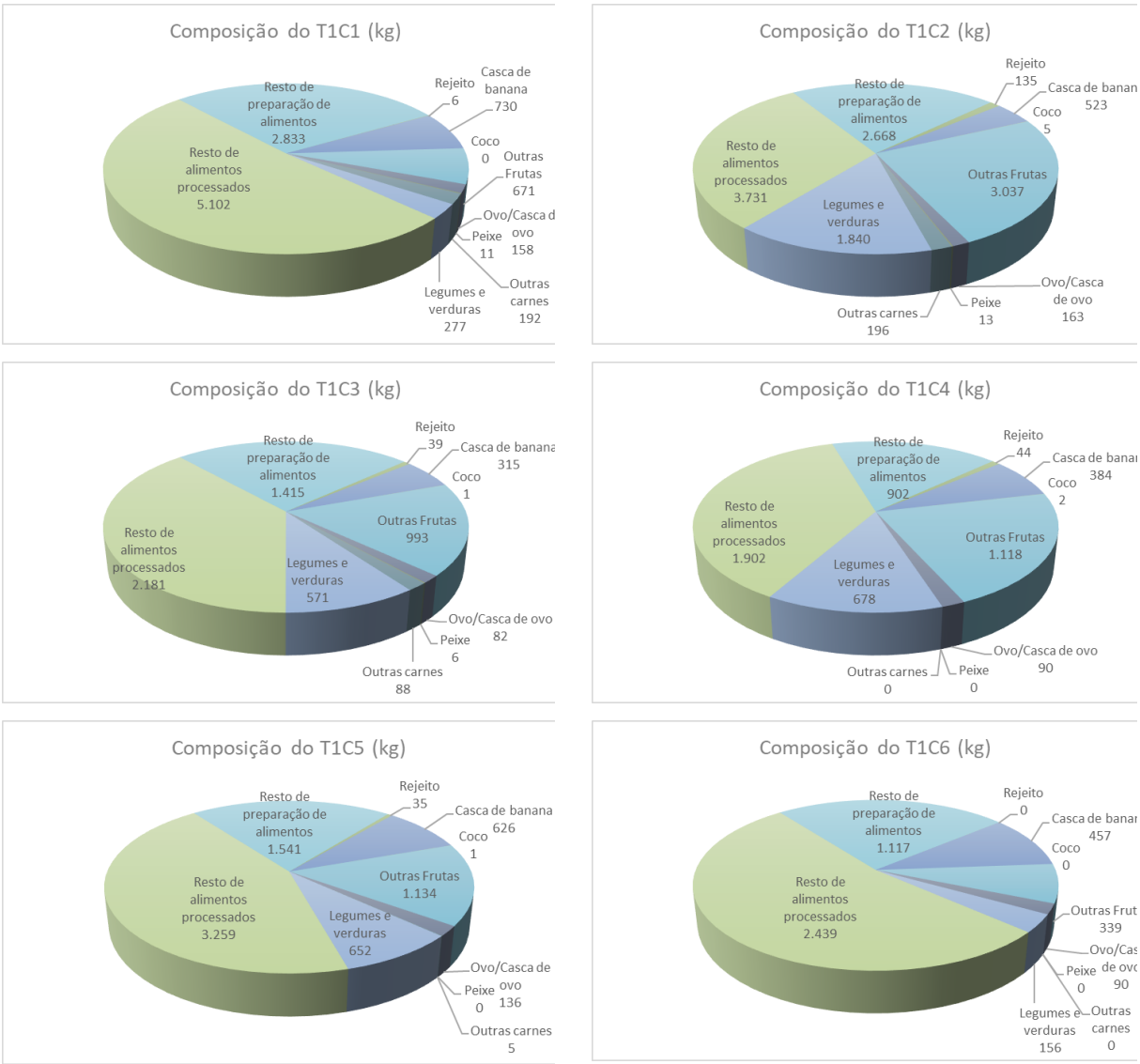
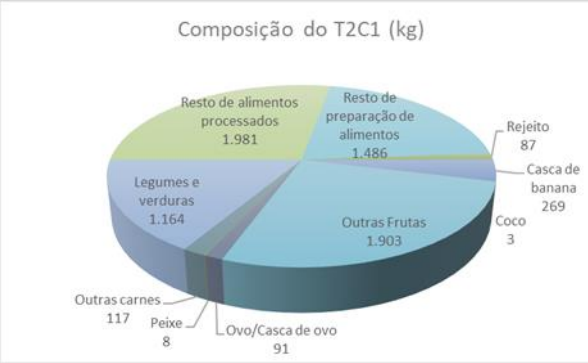
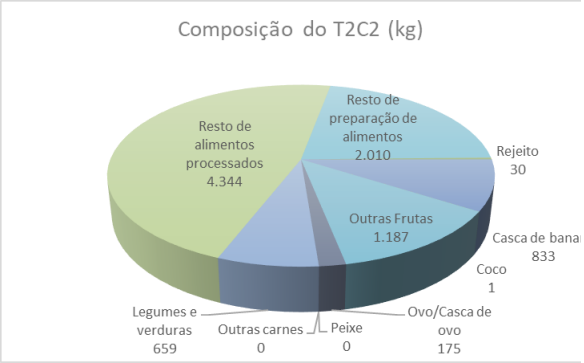


Figura 7: Composição detalhada do material tratado nos túneis de metanização







Com base nestes dados e nos dados da caracterização dos materiais de entrada e saída do biodigestor, sendo estes a FORSU, o biogás (volume gerado e composição química), assim como da caracterização química, física e biológica do digestato, que encontravam-se em análise, foi possível avaliar a eficiência do processo de tratamento anaeróbio em túneis de metanização.

O digestato gerado no biodigestor, classificado como Classe B pela IN 61/2020 (Tabela 6) devido ao inóculo de efluente de esgoto, apresentou potencial para ser elevado à Classe A, permitindo assim a aplicação agrícola irrestrita. Normas nacionais e internacionais, como a Resolução CONAMA nº 498/2020 (Tabela 5) e o Regulamento (UE) 2019/1009 (Tabela 5), indicaram que processos como compostagem e estabilização com cal foram eficazes na redução de contaminantes biológicos, principal barreira à classificação superior. Esses métodos, já amplamente utilizados em países como Itália e Alemanha, ofereceram uma alternativa viável para otimizar o reaproveitamento do digestato, indo além da sua reutilização como material estruturante no processo atual do Biodigestor.

A compostagem aeróbia, testada em dois ciclos do estudo presente, destacou-se como uma solução promissora, especialmente ao atingir 55°C por 72 horas, conforme o padrão italiano (DLgs 75/2010). Esse processo não apenas eliminou patógenos como coliformes e helmintos, mas também estabilizou a matéria orgânica, alinhando o digestato aos limites de Classe A (<10^3 NMP/g de coliformes, <0,1 ovo/g de helmintos). Já a aplicação de cal, mantendo pH 12 por 12 horas (CONAMA 498/2020), ofereceu uma abordagem mais rápida e de baixo custo, ideal para ajustes pontuais em ciclos de alta produção. Ambos os métodos aproveitaram a infraestrutura existente, como os túneis aeróbios, sugerindo uma integração prática ao sistema operacional.

A possibilidade de combinar esses tratamentos compostagem seguida de cal em casos de persistência de contaminantes emergiu como uma estratégia para o biodigestor melhorando assim o beneficiamento do composto. Ensaios piloto podem definir o protocolo ideal, ajustando tempo, temperatura e dosagem de cal às características específicas do digestato, como sua umidade elevada. Essa abordagem híbrida não só atenderia às exigências normativas, mas também posicionaria o projeto como uma potencial referência na valorização de resíduos orgânicos no Brasil, contribuindo para a redução de impactos ambientais e o fortalecimento da economia circular proposta pelo Planaro (MMA, 2025).

De acordo com a tabela 7 A comparação com biodigestores mesofílicos secos internacionais revelou que o rendimento do sistema brasileiro (320-400 Nm^3/ton VS) está abaixo dos padrões consolidados, como os 650-750 Nm^3/ton VS da planta de Straubing (Alemanha) e 550-650 Nm^3/ton VS de Marselha (França), refletindo sua escala piloto de 72 ton/ano frente a capacidades de 15.000-30.000 ton/ano e a ausência de tecnologias avançadas de pré-tratamento; ainda assim, o teor de metano estimado (50-60%) se aproxima dos valores internacionais (58-65%), indicando potencial de otimização em um setor nacional que, com apenas 755 plantas em 2023, segue no início e rumo a uma eficiência equiparável às referências globais.

Tabela 7 – Comparação de Biodigestores Mesofílicos Secos Internacionais

Localização	Escala (ton/ano)	Rendimento de Biogás (Nm^3/ton VS)	Teor de Metano (%)	Uso Final do Biogás	Observações
Brasil (Estudo Atual)	72	320-400	50-60 (estimado)	Eletricidade (5 MWh/mês)	Piloto, mesofílico seco, fase inicial
Alemanha (Straubing)	25.000	650-750	60-65	Cogeração (9.000 MWh/ano)	Industrial, otimizado, alta eficiência
Itália (Verona)	20.000	500-600	58-62	Eletricidade (6.500 MWh/ano)	Mesofílico seco, pós-compostagem
França (Marselha)	15.000	550-650	60	Eletricidade (5.000 MWh/ano)	Recirculação de percolado, consolidado
Espanha (Barcelona)	30.000	600-700	59-63	Eletricidade (10.000 MWh/ano)	Escala ampla, integração aeróbia

O monitoramento contínuo do biogás revelou uma produção média de 320–400 Nm^3 por tonelada de sólidos voláteis (VS), com picos de 4.800 m^3/mês durante os ciclos de maior carga orgânica. A composição média foi de 50–60% de CH_4, 35–45% de CO_2 e traços de O_2, alinhando-se com biodigestores mesofílicos secos de pequena escala (Tabela 7). Observou-se que resíduos com maior teor de restos alimentares processados (41%, Figura 7) apresentaram maior rendimento em metano, enquanto a presença de materiais lignocelulósicos (podas) reduziu temporariamente a eficiência. Apesar de o rendimento atual ser inferior a referências internacionais (ex.: 650–750 Nm^3/ton VS na Alemanha), a estabilidade do processo e a qualidade do biogás sustentam o potencial para otimizações subsequentes, segundo Coelho et al. (2018), biogás com 55–70% de CH_4 é típico em sistemas mesofílicos, sendo adequado para geração elétrica ou conversão em biometano (>95% CH_4) via purificação.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resíduos alimentares tratados e em tratamento no biodigestor que fez parte desse estudo, foram coletados seletivamente em grandes geradores de um município litorâneo, sendo em 32 escolas municipais e estaduais; 01 supermercado; 01 restaurante e 01 rede hoteleira. A massa coletada em cada um dos estabelecimentos foi monitorada, obtendo-se assim a geração diária por estabelecimento. Foi realizada também a determinação da composição física e gravimétrica dos resíduos de cada um desses estabelecimentos, sendo possível, com esses dados, estimar a composição do material tratado no interior de cada um dos o4 túneis de metanização do biodigestor, assim como a massa de resíduos de cada estabelecimento tratada em cada um dos túneis e ciclos de operação. A composição média dos resíduos tratados nos biodigestores foi de 41% de restos alimentares processados, 23% de restos de preparação de alimentos, 23% de frutas, 9% de legumes e verduras e 4% de outras classes de resíduos como: carnes (1%), ovo e casca de ovo (2%), rejeitos (1%).

Das 108 toneladas de resíduos coletados entre os anos de 2023 e 2024, estes foram tratados em 6 ciclos de tratamento anaeróbio e 2 ciclos de tratamento aeróbio, com uma redução de massa de, aproximadamente, 66%, ou seja, uma redução de 108 toneladas para 37 toneladas de restos de alimentos tratados, misturados ao material estruturante. O material tratado (digestato), foi reinserido no processo na forma de material estruturante, em uma proporção de 70% de restos alimentares e 30% de estruturante. Entretanto, parte deste material seco e peneirado está em análise química e biológica para avaliação da eficiência do processo de tratamento e a possibilidade de reaproveitamento deste na forma de biofertilizante. Caso não seja possível, serão realizados testes de beneficiamento do material, visando esta ou outras aplicações como: recomposição de solos ou obras de aterramento.

A biodigestão anaeróbia revelou-se uma solução técnica viável para o tratamento da FORSU, com produção de biogás aproveitável e possibilidade de upgrading do digestato para Classe A, ampliando sua aplicação como biofertilizante e atendendo às metas de gestão sustentável de resíduos. Estudos futuros foram delineados para converter o biogás em biometano, direcionado ao abastecimento dos caminhões de coleta de lixo do município, uma estratégia que intensificará a redução de emissões de gases de efeito estufa e a autonomia energética local, em consonância com o Planaro (MMA, 2025). Esses avanços reforçam o papel da tecnologia na transição para uma economia circular no Brasil.

Estes e outros dados dos ciclos de operação de tratamento anaeróbio no biodigestor em estudo estão em análise e serão avaliados mais profundamente para a próxima etapa deste estudo. O monitoramento contínuo e a análise detalhada de resíduos, biogás (CH4, CO2 e O2) e digestato vêm demonstrando avanços significativos no desenvolvimento da biodigestão anaeróbica como solução sustentável para a gestão de resíduos orgânicos no Brasil. Embora desafios técnicos e operacionais ainda precisem ser superados, como a melhoria dos processos e a implementação de políticas públicas que incentivem a segregação na origem, os resultados obtidos vêm indicando um cenário promissor. A integração de parcerias estratégicas e o aprimoramento das metodologias reforçam o potencial desta tecnologia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). NBR 10007:2004. Amostragem de Resíduos Sólidos, ABNT, Brasil; 2004(d).

ALEMANHA (Straubing) - Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR). (2021). Biogas-Messprogramm II: 61 Biogasanlagen im Vergleich. Gülzow-Prüzen: FNR. Disponível em: https://www.fnr.de

BRASIL. Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010. Regulamenta a Lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências. Brasília: Presidência da República, Casa Civil, Brasil, 2010b.

BRASIL. Decreto nº 10.936 de 12 de janeiro de 2022. Regulamenta a lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. 823 p. Brasília: Presidência da República, Casa Civil, Brasil, 2010.

BRASIL. Lei no 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 02 ago. 2010a.

BRASIL. Plano Nacional de Resíduos Sólidos – PLANARES. Ministério do Meio Ambiente e Secretaria de Qualidade Ambiental. Brasília: República Federativa do Brasil, 2022.

BS PAS 110:2014 (Reino Unido) - British Standards Institution (BSI). PAS 110:2014 — Specification for whole digestate, separated liquor and separated fibre derived from the anaerobic digestion of source-segregated biodegradable materials. Londres, 2014.

Coelho, S.; Garcilasso, V. P.; Ferraz Junior, A. D. N.; Santos, M. M. dos; Joppert, C. L. Tecnologia de produção e uso de biogás e biometano. São Paulo: IEE - USP, 2018.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). Decisão de Diretoria nº 256. São Paulo, 21 de novembro de 2016.

DLgs 75/2010 (Itália) - Governo Italiano. Decreto Legislativo nº 75, de 29 de abril de 2010. Disposições relativas à fertilização dos solos com substâncias orgânicas e à comercialização de fertilizantes. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Roma, 2010.

DM 1998 (Itália) - Governo Italiano. Decreto Ministeriale 5 febbraio 1998. Disciplina delle modalità di recupero dei rifiuti non pericolosi. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Roma, 1998.

DüMV 2012 (Alemanha) - Governo Alemão. Düngemittelverordnung (DüMV), de 5 de dezembro de 2012. Regulamentação sobre fertilizantes, adubos e substratos de cultivo. Bundesgesetzblatt, Berlim, 2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA, 2019), Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato. 214 p Embrapa Suínos e Aves. Concórdia, Santa Catarina, 2019.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Manual de Análises Químicas de Solos, Plantas e Fertilizantes. 2009

EPA 40 CFR Part 503 (EUA) - Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA). 40 CFR Part 503 — Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge. Regulamento federal sobre biossólidos e suas aplicações. Federal Register, Washington, DC, 1993 (atualizado).

ESPANHA (Barcelona) - Institut Català d'Energia (ICAEN). (2018). Planta de Biogás de Ecoparc 2: Informe Técnico. Barcelona: Generalitat de Catalunya. Disponível em: https://icaen.gencat.cat

FRANÇA (Marselha) - Agence de la Transition Écologique (ADEME). (2019). Guide sur la méthanisation des déchets solides urbains. Paris: ADEME. Disponível em: https://www.ademe.fr

IN 61/2020 (MAPA) - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Instrução Normativa nº 61, de 8 de julho de 2020. Estabelece os requisitos mínimos para a produção e aplicação agrícola de compostos orgânicos e biossólidos. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2020.

IN 07/2016 (MAPA) - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Instrução Normativa nº 7, de 17 de maio de 2016. Define as especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem

dos fertilizantes orgânicos e biofertilizantes destinados à agricultura. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2016.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT) / AGÊNCIA METROPOLITANA DA BAIXADA SANTISTA (AGEM) Plano Regional de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da Baixada Santista (PRGIRS/BS) 261 Fevereiro de 2018

ITÁLIA (Verona) - Consorzio Italiano Biogas (CIB). (2020). Biogasfattobene: Linee Guida per la Digestione Anaerobica dei Rifiuti Organici. Mantova: CIB. Disponível em: https://www.consorziobiogas.it

Jirka AM., Carter MJ., (2018). Analytical Chemistry, 1975, 47(8), 1397P. apud HACH Company. Manual do usuário: Demanda de Oxigênio, Química. Método de digestão por reator. 1.ed. jan. 2011

Lima, LMQ. (2004). Lixo – tratamento e biorremediação. Editora Hemus. 3ª Edição. 265 p. Brasil.

MANEO, F.P.; TEIXEIRA, C.E.; MACEDO, L.S.; GUIMARÃES, C.C.; GOMES, F.C.S.P. Aspectos operacionais de um sistema de biodigestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos. Artigo apresentado no 32º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Belo Horizonte, 2023.

Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima(MMA) - Plano Nacional de Redução e Reciclagem de Resíduos Orgânicos Urbanos (PLANARO). 27p. Brasília, DF, 2025.

NBR 6457 1986. Amostras de Solo – Preparação Para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização, ABNT, Brasil; 1986.

NBR 6508 1984. Grãos de Solo que Passam na Peneira de 4,8 mm – Determinação da Massa Específica, ABNT, Brasil; 1984.

NBR 13.600 1996. Solo – Determinação do Teor de Matéria Orgânica por Queima a 440°C. ABNT, Brasil; 1996.

Resolução CONAMA 481/2017 - Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 481, de 3 de outubro de 2017. Estabelece diretrizes para a compostagem de resíduos orgânicos e a utilização do composto produzido. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2017.

Resolução CONAMA 498/2020 - Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020. Define critérios e procedimentos para a produção e aplicação de biossólidos em solos, incluindo diretrizes para tratamento e controle de qualidade. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2020.

Regulamento (UE) 2019/1009 - Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia. Regulamento (UE) 2019/1009, de 5 de junho de 2019. Relativo à colocação no mercado de produtos fertilizantes UE. Jornal Oficial da União Europeia, Bruxelas, 2019.

Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento – SNIS. Manejo dos Resíduos Sólidos. Brasil, 2023. Disponível em: < https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/painel/rs > Acessado em setembro de 2024.

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater – SMEWW, (2021). 4500 H+ pH. Edição Braun-Howland E. Washington DC, 2021.

STANDARD TEST METHOD; ASTM D 5231 - Determination of the Composition of Unprocessed Municipal Solid Waste. 2016.