



Fev 2025

Desenvolvimento de ferramentas para o mapeamento dos potenciais de otimização do aproveitamento energético do município de Juiz de Fora/MG

Núcleo Resíduos Sólidos

Elaborado por: Samuel Castro, Emanuel Brandt e Otavio Branco // **UFJF**

O presente documento consolida informações relacionadas à viabilidade técnica de rotas consideradas potenciais para a recuperação energética de resíduos sólidos do município de Juiz de Fora - *Waste to Energy*.

CONTEÚDO

I. Introdução

II. Estudos Prévios

III. Cenários e Modelagem

IV. Rota em Potencial

V. Considerações finais



I.

INTRODUÇÃO

Rotas tecnológicas podem ser definidas como um conjunto de processos, tecnologias e fluxos dos resíduos, desde a sua geração até a sua disposição final, envolvendo circuitos de coleta de resíduos de forma indiferenciada e diferenciada, contemplando tecnologias de tratamento dos resíduos (JUCÁ *et al.*, 2014).

Nesse viés, a proposição de soluções durante o delineamento de uma rota tecnológica deve ser pautada na sustentabilidade ambiental e econômico-financeira, tal como estabelecido na Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS (Lei Federal nº 12.305) (BRASIL, 2010) e ratificado pela Atualização do Marco Regulatório do Saneamento (Lei nº 14.026/2020) (BRASIL, 2020).

Em suma, as soluções propostas devem ser compatíveis com os preceitos da PNRS, ambientalmente efetivas, ter um custo viável à população e ser socialmente justas e aceitáveis por parte da população.

É importante destacar que diversos esforços legais no âmbito da gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos vêm sendo implementados recentemente no

país, sendo instrumentos fundamentais para a regulação e incentivo de ações que visem o desenvolvimento do setor de forma ambiental e economicamente sustentável.

Em 2021, o Decreto Municipal n.º 14.568 aprovou o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Juiz de Fora e determinou o acompanhamento de sua implementação. Já em 2022, no âmbito federal, foi instituído o Decreto nº 10.936, de janeiro de 2022, que regulamenta a PNRS, a fim de estabelecer meios para o seu cumprimento, além de ratificar a responsabilidade compartilhada sobre a gestão dos resíduos.

Ainda nesse contexto, posteriormente foram instituídos o Decreto nº 11.003, de março de 2022, que incentiva o uso sustentável do biogás e do biometano, bem como o Decreto nº 11.043, que aprova o PLANARES, e o Decreto nº 11.044, que certifica o crédito de reciclagem no país, sendo ambos de abril de 2022. Em 2024, destaca-se a Lei nº 14.993 que dispõe sobre a promoção da mobilidade sustentável de baixo carbono e a estocagem geológica de dióxido de carbono, instituindo programas, tais como o Programa Nacional de Incentivo ao Biometano, para incentivar a pesquisa, a produção, a comercialização e o uso do biometano e do biogás na matriz energética brasileira.

Assim, deve-se destacar que, claramente, a resolução da problemática dos resíduos perpassa não somente por uma única tecnologia, mas pela interação das várias partes que compõem o todo, de forma sistêmica e holística. Portanto, deve se ter em mente que a alteração em uma parte da rota determina em outros fluxos e etapas, ou seja, ao alterar uma parte da rota,

altera-se a rota como um todo, como ocorre em qualquer sistema dinâmico.

Dito isso, estudos de viabilidade e simulações de rotas tecnológicas que considerem as particularidades e especificidades locais (técnicas, econômicas e ambientais) são estratégias que podem subsidiar a tomada de decisão e o estabelecimento de políticas públicas para um gerenciamento ambientalmente adequado e sustentável dos resíduos sólidos urbanos.

Assim sendo, o presente estudo tem por objetivo avaliar a viabilidade técnica de rotas tecnológicas alternativas para o gerenciamento de resíduos sólidos de Juiz de Fora – MG com foco na recuperação energética, dando subsídios para o processo decisório de sua implementação pelo poder executivo municipal.

II.

ESTUDOS PRÉVIOS



Análise Gravimétrica

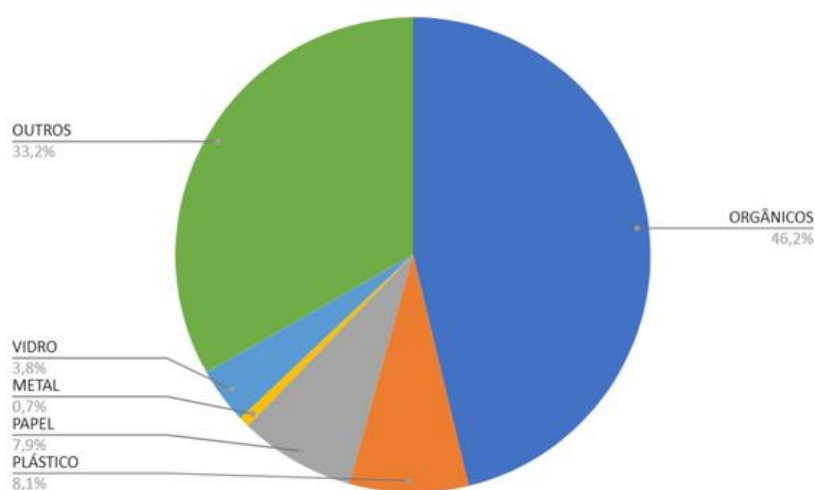
A gravimetria é um método de análise qualitativa, por meio de pesagens, possibilitando um diagnóstico detalhado dos resíduos, levando em conta as características e o percentual de cada fração da amostra que se deseja analisar. O resultado é a composição gravimétrica dos resíduos sólidos no contexto analisado.

A determinação da composição e da quantidade dos resíduos permite maior conhecimento da realidade da fonte geradora, possibilitando propostas de gerenciamento mais eficientes (VEGA *et al.*, 2008). Além disso, a caracterização gravimétrica subsidia a elaboração de qualquer programa ou projeto relacionado, sendo, portanto, um importante instrumento de gestão integrada de resíduos sólidos para o município (MENEZES *et al.*, 2019).

Diante desse cenário, este trabalho teve como objetivo atualizar a caracterização dos resíduos sólidos domiciliares (RSD) gerados no município de Juiz de Fora via análise gravimétrica conduzida no mês de agosto de

2024, com base nas macrorregiões de Planejamento Urbano do Município.

Para a análise gravimétrica, mais de 10 toneladas de RSD foram amostrados, o que representa cerca de 2,5% dos RSD coletados no município (PJF, 2020). Os resultados da caracterização gravimétrica dos RSD são apresentados a seguir.



A representatividade das frações com potencial de destinação alternativa com fins de recuperação material e energética superaram 65% do total, a saber: **46,2% de orgânicos; e 20,5% de recicláveis**. Um maior detalhamento dos resultados pode ser acessado via link: [dashboard](#).

Por fim, destaca-se que a análise temporal e recorrente possibilita a consolidação de um banco de dados capaz de subsidiar a elaboração de estratégias de gestão e tomadas de decisão robustas para a gestão integrada de resíduos sólidos a longo prazo, considerando rotas alternativas que contemplem tecnologias viáveis, em detrimento à disposição final, e em conformidade com a hierarquia preconizada na PNRS.



Visitas Técnicas - *Bechmarking*

Foram realizadas visitas técnicas a plantas de tratamentos de resíduos sólidos, alternativos à disposição final, com foco especial em recuperação energética via tratamentos térmico e biológico.

- **09/10/2024** - Valorização de resíduos industriais através do coprocessamento, gerando CDR (Combustível Derivado de Resíduos) (Orizon - Sorocaba/SP)
- **10/10/2024** - Ecoparque: compostagem de lodo de ETE, triagem mecanizada e aterro sanitário com a recuperação energética do biometano (Orizon - Paulínia/SP)
- **11/10/2024** - Unidade de Recuperação Energética Barueri: primeira usina “waste-to-energy” via incineração da América Latina (Orizon - Barueri/SP)
- **16/10/2024** - Ponta Grossa Ambiental: Unidade de tratamento biológico de resíduos orgânicos, com recuperação energética via queima de biogás (Ponta Grossa/PR)
- **17/10/2024** - Eletrogyx Termoelétrica Ltda.: Gaseificação de resíduos sólidos urbanos (Mafra/SC)
- **08/11/2024** - Comlurb Ecoparque do Caju: Unidade de tratamento biológico de resíduos orgânicos via metanização seca (Rio de Janeiro/RJ)

As visitas possibilitaram uma análise crítica das diferentes tecnologias de referência com foco na recuperação energética a partir de resíduos sólidos urbanos, aplicadas em diferentes contextos do país - tratamento térmico e biológico - com o levantamento de dados e informações reais que servem de referência para a modelagem e avaliação da eficiência dos processos. Evidenciou-se a infraestrutura e complexidade demandada em ambos os casos, envolvendo aspectos técnicos, econômicos, políticos e sociais, com desdobramentos nas diferentes etapas (concepção, licenciamento, projeto, execução e operacionalização), bem como a necessidade de arranjos paralelos para que as rotas sejam implementadas.

Destaca-se que, dentro do contexto observado, tecnologias e sistemas de tratamento biológico apresentaram-se com um maior grau de maturidade; processo viabilizado, principalmente, a partir de etapas de segregação da fração de orgânicos na origem, o que garante a qualidade do substrato, a eficiência da biodigestão e geração de biogás.



III. CENÁRIOS E MODELAGEM

Um dos maiores entraves no manejo de resíduos está contido na complexidade associada à concepção e ao planejamento da implementação de rotas tecnológicas factíveis a curto, médio e longo prazo, de forma eficiente e sustentável, ambiental e economicamente. Destaca-se que o sucesso das ações previstas está completamente vinculado à participação e engajamento de todos os atores envolvidos, englobando a gestão pública, entidades privadas e sociedade civil, sendo um reflexo de práticas de mobilização social e promoção da educação ambiental.

É importante ressaltar que o planejamento de rotas tecnológicas deve ser estabelecido sob o viés da sustentabilidade, pautando-se na redução de impactos socioambientais associados à temática e no manejo eficiente dos resíduos de forma a atender aos critérios de eficiência econômica, equidade social, proteção ambiental e, ainda, garantindo um tempo curto de retorno do investimento.

Nesse contexto, dentre as melhorias que podem ser obtidas em resposta a esse planejamento, ressalta-se a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), conservação de recursos naturais, geração de empregos, o desenvolvimento de tecnologias verdes, oportunidades de negócios e economia de energia, com potencial geração de receita a partir de tecnologias que promovam a recuperação energética a partir dos resíduos. Esses fatores são imprescindíveis para análise do cenário ambiental, econômico e social apresentados pelas rotas tecnológicas.

Nesse contexto, destacam-se os tratamentos biológicos, os quais se baseiam na atuação de microrganismos, sob condições aeróbias ou anaeróbias, com vistas à decomposição e estabilização da fração orgânica biodegradável dos resíduos sólidos.

A digestão anaeróbia e a compostagem se destacam como os principais e mais consolidados processos de tratamento biológico (DE PAULA e REICHERT, 2021).

A digestão anaeróbia (ou biodigestão) é um processo biológico que converte substratos complexos em biogás e digestato por meio de ação microbiológica, na ausência de oxigênio (BAERE, 2003). Trata-se de uma das tecnologias mais antigas e bem estudadas para a estabilização de resíduos e apresenta-se com destaque em função do limitado impacto ambiental e alto potencial de recuperação energética. Tais aspectos positivos, somados à preocupação com o rápido crescimento populacional, aumento pela demanda energética e aquecimento global tem promovido pesquisas mais profundas no desenvolvimento do processo de digestão anaeróbia e melhorias, a fim de garantir a produção do biogás, atingir taxas mais rápidas de degradação e reduzir a quantidade do digestato final gerado.

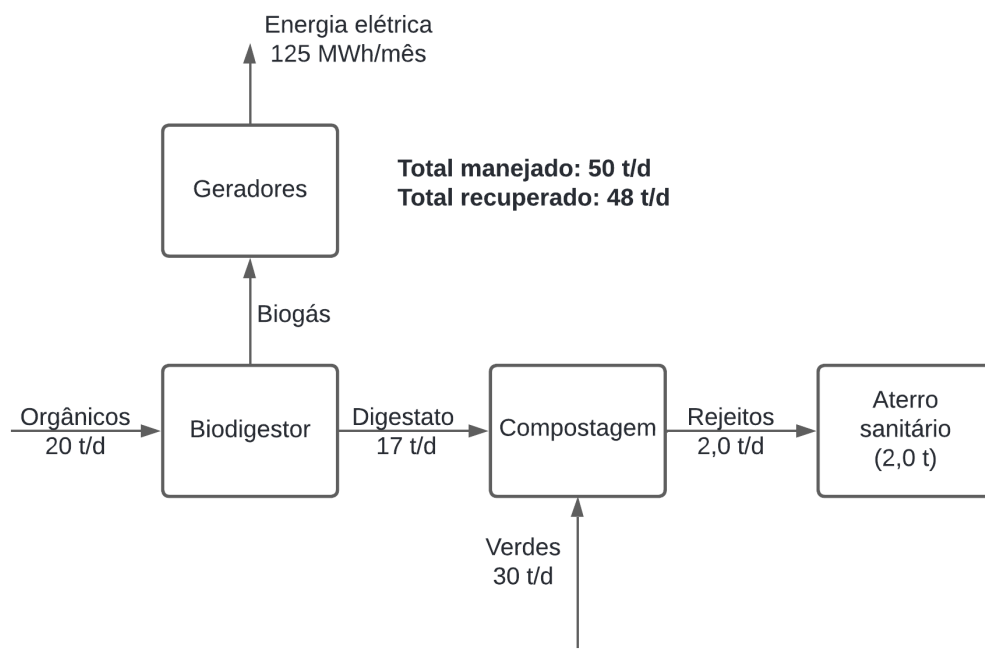
Com foco também na recuperação energética dos resíduos, os tratamentos térmicos podem ser definidos como a conversão dos resíduos sólidos em produtos como gases, líquidos e sólidos, com consequentes geração e liberação de energia na forma de calor. Segundo a Resolução CONAMA 316/2002, que dispõe sobre os procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos, tratamento térmico é todo e qualquer processo cuja operação seja realizada acima da temperatura mínima de 800°C. Destaca-se ainda que, de acordo com a resolução supracitada, a adoção de sistemas de tratamento térmico de resíduos deverá ser precedida de um estudo de análise de alternativas tecnológicas que comprove que a escolha da tecnologia adotada deve estar de acordo com o conceito de melhor técnica disponível.

As cinzas resultantes do processo devem ser adequadamente tratadas e dispostas. Assim, os processos de tratamento de resíduos não dispensam a necessidade de equipamentos adequados para a disposição final e ambientalmente adequada dos rejeitos. Nesse sentido, o aterramento segue como etapa importante de uma rota tecnológica bem estabelecida.

Para uma análise comparativa entre as tecnologias potenciais de recuperação energética, considerou-se o balanço de massas e de energia de dois cenários homogêneos em termos processamento de resíduos sólidos - 50 toneladas/dia.

Cenário 1

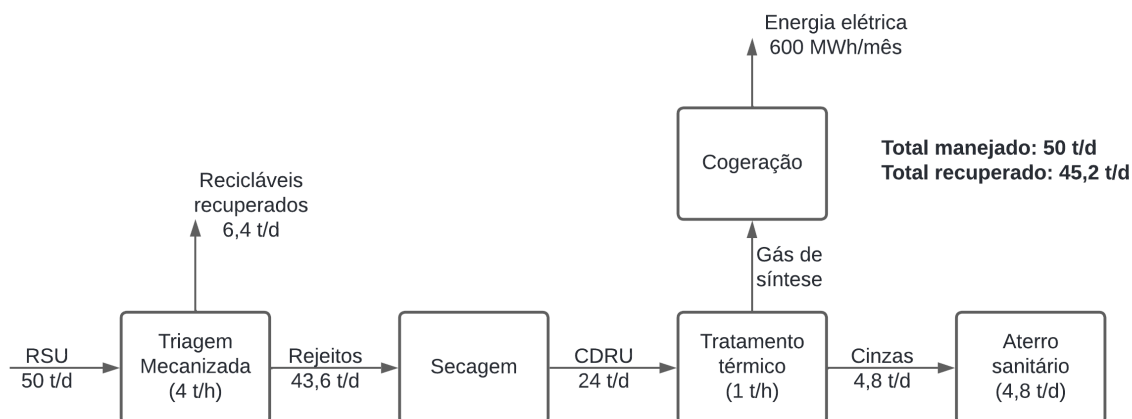
Tratamento Biológico



No Cenário 1, 20 t/d de resíduos orgânicos, previamente segregados na fonte, são encaminhados ao processo anaeróbio de biodigestão, considerando como subprodutos do processo o biogás (aprox. 60% de CH₄) e o digestato. Tal quantitativo de biogás apresenta um potencial de geração de 125 MWh/mês de energia elétrica. Destaca-se que o digestato apresenta potencial de destinação à compostagem, juntamente com resíduos verdes de poda, cerca de 30 t/d. Por fim, dos resíduos manejados, estima-se uma recuperação de 48 t/d via tratamento biológico, com geração de energia elétrica e produção de composto. Para a capacidade instalada da rota tecnológica considerada, estima-se um CAPEX de R\$ 14 MM.

Cenário 2

Tratamento Térmico



No Cenário 2, 50 t/d de resíduos sólidos urbanos (RSU) são destinados a processos de triagem, secagem e, em seguida, encaminhados à unidade de tratamento térmico com geração de gás de síntese que apresenta um potencial estimado de geração de 600 MWh/mês de energia elétrica. Por fim, dos resíduos manejados, estima-se uma recuperação de cerca de 45 t/d via tratamento térmico com geração de energia. Para a capacidade instalada da rota tecnológica considerada, estima-se um CAPEX de R\$ 40 MM.

Pontos a considerar:

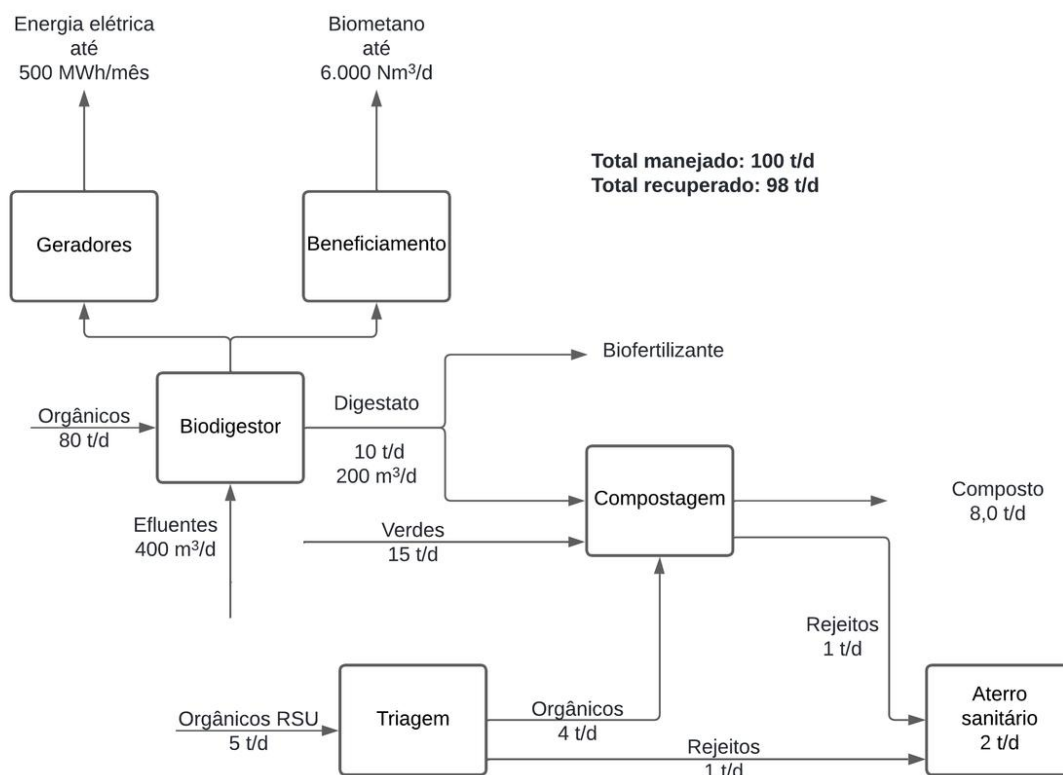
- O tratamento biológico apresenta a versatilidade de receber também efluentes líquidos com elevada carga orgânica, tais como: lodos de estações de tratamento de esgoto (ETE), efluentes de laticínios, etc. Nesse sentido, apresenta características de uma prestação regionalizada, com vistas à geração de ganhos de escala e à garantia da universalização e da viabilidade técnica e econômico-financeira dos serviços (Lei nº 14.026/2020).
- O sistema de compostagem pode ser operado via aeração forçada, o que reduz a demanda de área e tempo de processo.

- O sistema de tratamento biológico apresenta flexibilidade energética com a implementação de uma unidade de beneficiamento do biogás e produção de biometano, produto de maior valor agregado, que pode ser utilizado diretamente como combustível na frota do município.
- A recuperação energética, bem como a produção de composto, pode determinar receitas acessórias à rota tecnológica prevista no Cenário 1.
- Dentro da hierarquia preconizada na PNRS, tratamentos biológicos de resíduos orgânicos são estratégias alinhadas com a economia circular de descarbonização e têm prioridade em relação ao tratamento térmico, além de maior aceitação popular.
- O tratamento biológico é uma tecnologia nacional (Código Finame), com infraestrutura de implementação e manutenção acessíveis no país.
- Operação da tecnologia prevista no Cenário 1 apresenta-se de forma mais simplificada, principalmente a partir da implementação de processos de segregação de resíduos na origem, não necessitando a operação por terceiros.
- A coleta seletiva com a segregação de resíduos na origem aumenta o potencial de reciclagem e recuperação de resíduos orgânicos e, também, de resíduos recicláveis, por evitar a contaminação cruzada de materiais, promovendo a cadeia de valor e aspectos sociais das rotas tecnológicas.
- Juiz de Fora/MG já dispõe de uma legislação municipal (Lei nº 14.402/2022) que institui a obrigatoriedade da destinação dos resíduos orgânicos gerados por pessoas jurídicas à reciclagem.
- O licenciamento ambiental do tratamento biológico se dá no âmbito municipal - considerando uma capacidade de processamento de 100 t/d a ser instalado em área industrial, de forma mais simplificada e célere do que o processo previsto para o Cenário 2.
- É vedado o uso da tecnologia de incineração para destinação de resíduos sólidos urbanos, conforme determinado pelo art. 17 da Lei Estadual nº 18.031 - Dispõe sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos (MINAS GERAIS, 2009).
- A implementação de determinada rota tecnológica não inviabiliza a adoção de outras tecnologias, de forma planejada e escalonada. Rotas tecnológicas robustas e complexas garantem a estabilidade do sistema de gerenciamento e a viabilidade econômica dos processos, promovendo a hierarquia preconizada na PNRS.



IV. ROTA EM POTENCIAL

Com base nos estudos prévios e análises realizadas, e com o mesmo investimento em CAPEX previsto para o Cenário 2, é possível escalar a capacidade instalada para uma rota tecnológica potencial que contemple os tratamentos biológicos (digestão anaeróbia e compostagem) com a geração de subprodutos de valor agregado considerável, custos operacionais e tempo de retorno de investimento inferiores. Nesse sentido, apresenta-se a seguinte perspectiva:



No presente cenário, 80 t/d de resíduos sólidos orgânicos (potencial específico de geração de biogás 125 Nm³/t), previamente segregados na origem, são destinados a reatores CSTR (*continuous stirred-tank reactor*) e submetidos ao processo de degradação anaeróbia da fração orgânica, que tem como subprodutos o biogás (aprox. 60% de CH₄) e o digestato.

O biogás gerado possui potencial de geração de até 500 MWh/mês de energia elétrica (30% de eficiência na conversão de energia em motogeradores), em função do seu elevado poder calorífico (PCI = 10 kWh/Nm³ CH₄), e/ou pode ser destinado à unidade de beneficiamento, com produção estimada de até 6.000 Nm³/d de biometano, produto de elevado valor agregado e que pode ser utilizado diretamente como combustível análogo ao gás natural e em veículos movidos a GNV, podendo sendo aplicável ao transporte público do município.

Como etapa adicional de tratamento biológico dos resíduos, a rota tecnológica prevê uma unidade de compostagem via aeração forçada com membrana semipermeável, com capacidade instalada de processar cerca de 30 t/d de digestato, resíduos verdes oriundos da limpeza pública e resíduos sólidos urbanos; esse último, objeto de coleta seletiva domiciliar de orgânicos conforme meta prevista no Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS-JF) e potencial evidenciado via estudo de análise gravimétrica dos resíduos domiciliares.

Destaca-se que a rota prevista, além da geração de energia elétrica e/ou do biometano, prevê a obtenção de biofertilizante e composto, com potencial destinação como condicionadores do solo. Do total manejado na planta de valoração e recuperação energética de resíduos, apenas 2% segue para equipamento de disposição final de resíduos sólidos - aterro sanitário.

Dentro dos requisitos de área para a planta em questão, destaca-se uma demanda de 6.000 m² para biodigestores e unidades geradoras de energia e biometano, 4.000 m² para triagem e compostagem com aeração forçada e membranas semipermeáveis, além de 2.000 m² para acessos, áreas de apoio e facilidades, totalizando 12.000 m².

A área de 16.000 m² localizada na Rua Jovino Antônio da Silva - Distrito Industrial apresenta-se como área potencial para a instalação da planta por apresentar vantagens como: ser relativamente plana, localizada em zona industrial, proximidade com rede da GASMIG, proximidade com rede elétrica, proximidade com

consumidores de gás natural, facilidade de acesso, no fluxo dos resíduos sólidos do município. Diante do exposto, apresenta-se no Apêndice 1 uma proposta de *layout* preliminar da disposição da planta na referida área.

O investimento inicial para a implementação da planta prevista está estimado em cerca de R\$ 40 MM, o que permite uma avaliação técnica comparativa com o Cenário 2, apresentado na modelagem, e que reporta a uma rota tecnológica de tratamento térmico. Adicionalmente, ressalta-se que, atualmente, a produção de biometano, quando comparada a produção de energia elétrica, pode reduzir significativamente o *payback* das plantas de biogás.

No caso de Juiz de Fora, considerando as tarifas de baixa tensão (R\$ 0,95/kWh) e iluminação pública (R\$ 0,52/kWh), a economia referente à produção de energia elétrica pode variar de R\$ 1,56 a R\$ 2,85 por m³ de metano produzidos na planta, desconsiderando, ainda a tarifa de uso dos sistemas elétricos de distribuição (TUSD). Já no caso da produção de biometano, a economia oriunda exclusivamente da produção do gás pode ser estimada pelo custo de mercado do combustível a ser substituído. Nesse contexto, para o potencial de uso do biometano na frota de ônibus urbanos em substituição aos veículos à diesel, vale considerar:

Estimativa do número de ônibus urbanos abastecidos com biometano

- Distância das rotas de ônibus: 13,7 km (média) | 10,9 km (mediana)
 - Nº de viagens realizadas pela frota por dia: 6.157 (finais de semana e feriados)
 - Distância percorrida pela frota por dia: 84.287 km (média) | 67.056 km (mediana)
 - Número de veículos: 258 (finais de semana e feriados)
 - Distância percorrida por veículo diariamente: 327 km (média) | 260 km (mediana)
-

- Considerando a produção de biometano = 6.000 Nm³/d e um rendimento veicular de 1,7 km/Nm³ de biometano (ônibus básico com ar-condicionado):

→ **Tem-se uma autonomia de 10.200 km/d.**

- Considerando as distâncias média/mediana percorridas por veículo diariamente:

→ **Tem-se a possibilidade de abastecimento de 31 a 39 ônibus básicos com ar-condicionado.**

Estimativa da economia pela substituição dos veículos à diesel por veículos a biometano

- Rendimento veicular a diesel: 2 km/l (ônibus básico com ar-condicionado)
- Consumo diário de diesel por ônibus: 163 l (média) | 130 l (mediana)
- Preço do diesel: R\$ 5,63
- Custo diário do diesel por ônibus: R\$ 920 (média) | R\$ 732 (mediana)

→ Economia mensal ao substituir entre 31 e 39 veículos a diesel por veículos a biometano: **R\$ 685.000 a R\$ 1.085.000**



V.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo realizado evidenciou que a adoção de uma rota tecnológica que envolve tratamentos biológicos apresenta-se como uma solução promissora para o gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos de Juiz de Fora/MG. Dentre as alternativas analisadas, destaca-se que a digestão anaeróbia é uma técnica consolidada no contexto nacional, com potencial de recuperação energética dos resíduos via queima direta do biogás e produção de energia elétrica e/ou beneficiamento com produção de biometano. Este último, um produto de elevado valor agregado que pode ser utilizado como fonte de energia renovável, contribuindo significativamente para a redução da dependência de combustíveis fósseis e promovendo a transição para uma matriz energética mais limpa e sustentável. Adicionalmente, a unidade de compostagem ratifica a importância da rota tecnológica para a descarbonização e o incentivo à economia circular, transformando resíduos em recursos valiosos. A destinação alternativa em detrimento à disposição final, não só otimiza o gerenciamento, mas pode posicionar Juiz de Fora/MG como referência no manejo sustentável e ambientalmente adequado dos resíduos

sólidos, aliando práticas ambientais responsáveis às demandas energéticas locais. Por fim, destaca-se a importância de estudos complementares, dentre os quais, cita-se:

- Levantamento atualizado dos grandes geradores que poderão ser atendidos pela planta de valorização e recuperação energética de resíduos;
- Caracterizações físico-químicas e microbiológicas complementares dos resíduos a serem destinados aos tratamentos;
- Projetos e dimensionamentos das unidades previstas;
- Estudo de viabilidade técnica, econômica e ambiental (EVTEA);
- Planejamento da implementação progressiva da rota tecnológica, promovendo o incremento da coleta seletiva com a separação de secos e úmidos.

CONTATO

Samuel Rodrigues Castro - ESA/UFJF

samuel.castro@ufjf.br

APÊNDICE 1

