1538 - O PANORAMA DO MANEJO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DE TERESINA E SEU POTENCIAL ENERGÉTICO

Laécio Kelson do Nascimento Silva[(1)]
Engenheiro Civil pelo Centro Universitário Santo Agostinho com graduação sanduíche na Michigan State University. Diretor Técnico na Agência Municipal de Regulação de Serviços Públicos de Teresina. Pós-graduando do MBA em Saneamento Ambiental na Fundação Escola de Sociologia e Política de São Paulo. Pós-graduando em Planejamento Urbano e Gestão Socioambiental de Cidades na Universidade Federal do Piauí.

Endereço[(1)]**:** Rua Adão Belarmino, 401 – Parque Piauí – Timon - MA - CEP: 65631-260 - Brasil - Tel: (86) 99912-1581 - e-mail: laecionascimento@hotmail.com.br

RESUMO

A legislação setorial brasileira aponta o aumento do aproveitamento energético de resíduos – AER como uma das diretrizes estratégicas para a gestão de resíduos sólidos e a reconhece como uma das formas ambientalmente adequadas de destinação final. O município de Teresina, Piauí, vem transformando sua conjuntura jurídico-institucional com o intuito de conceder a exploração do serviço público de manejo de resíduos sólidos urbanos (SMRSU), com eventual uso de tecnologias de recuperação energética como alternativa de destinação ambientalmente adequada de resíduos sólidos. Este trabalho avalia os aspectos quantitativos e qualitativos do potencial energético do SMRSU do município e discute os desafios enfrentados pelos atores envolvidos na gestão desse serviço público. O Relatório de Estudos Engenharia Logística e Afins desenvolvido pela Caixa Econômica Federal na estruturação do projeto de concessão da exploração do SMRSU de Teresina aponta para a viabilidade técnica dessa modalidade de recuperação de resíduos no município.

PALAVRAS-CHAVE: Aproveitamento Energético de Resíduos, Resíduos Sólidos, Teresina.

INTRODUÇÃO

O século XX testemunhou uma reconfiguração da estrutura socioeconômica de muitas sociedades ao redor do mundo, marcado pelo progresso material e migração populacional em massa, resultando na urbanização e expansão de áreas que ficaram caracterizadas por uma alta densidade demográfica e elevadas demandas por recursos naturais e meios de se dispor de seus resíduos (KAZA *et al.,* 2018).

Anand (2010) classifica o manejo de resíduos sólidos como uma questão crucial na gestão socioambiental dos territórios e populações em constante expansão em nossos espaços urbanos, com consequências diretas para a sustentabilidade ambiental e socioeconômica de nossas cidades.

É neste contexto desafiador que a gestão do saneamento básico brasileiro, sobretudo no que concerne a dos serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, precisa encontrar soluções capazes de atender suas demandas e sanar insuficiências, em obediência aos preceitos legais desse setor da infraestrutura nacional, a exemplo da Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS, Lei nº 12.305/2010, e seu regulamento, o recente Decreto nº 10.936/22.

O Brasil tem buscado possibilitar, por meio de ações e políticas públicas fomentadas pela legislação setorial, o aumento do interesse de agentes de variados setores do cenário nacional e internacional na gama de arranjos com potencial de viabilizar o caminho para a universalização de acesso e gestão eficiente dos referidos serviços.

Com o advento da PNRS, intensificou-se a discussão acerca de processos de tratamento dos resíduos sólidos, sobretudo aqueles que envolvem a diminuição de massa e potencial poluidores. A exigência de submissão de diferentes materiais a tratamentos específicos que precedam sua disposição final ambientalmente adequada e

obedeçam a cadeia de prioridades na gestão e no gerenciamento de resíduos, é uma diretriz estabelecida pela Política (BARREIRA, 2022).

O Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares) aponta o aumento do aproveitamento energético proveniente de resíduos sólidos como uma de suas diretrizes estratégicas para a gestão e gerenciamento desses materiais, citando expressamente o mapeamento de *"limitações e entraves de ordem técnica, econômica, tributaria, jurídica e legal para expansão da recuperação energética de RSU no território nacional e articular soluções junto aos estados, consórcios, municípios e setor privado."* (BRASIL, 2022, p. 167), notadamente com ênfase no uso de biogás.

Outra peça do arcabouço legal desse setor, a Portaria Interministerial nº 247, de 30 de abril de 2019, reconhece a recuperação energética como uma das formas de destinação final ambientalmente adequada, passível de ser adotada por titulares e prestadores de serviço, e inclui os resíduos de limpeza urbana e domiciliares como passíveis de recuperação energética.

O município de Teresina, Piauí, assessorado pelo Governo Federal, vem transformando sua conjuntura jurídico-institucional com o intuito de conceder a exploração dos serviços de resíduos sólidos urbanos (RSU), de modo a promover um cenário socioambiental moderno e adequado aos parâmetros legais, conformando-se às exigências do marco setorial (TERESINA, 2021).

Será prerrogativa do futuro Prestador de Serviços da cidade explorar a viabilidade técnico-econômica e eventual implementação de aproveitamento energético de resíduos (AER) no contexto do serviço público de manejo de resíduos sólidos urbanos (SMRSU) municipal.

É nesta conjuntura que emergem alguns dos questionamentos que este trabalho pretende discutir. As iniciativas de estruturação regulatória e de políticas públicas voltadas ao setor ensejam discussões e dúvidas quanto às saídas viáveis para os desafios que os titulares dos serviços de saneamento e demais entes federativos enfrentam atualmente. Este trabalho almeja explorar a real capacidade e ações a serem empreendidas pelos atores envolvidos na gestão do SMRSU de Teresina a fim de que se possa explorar o AER e fomentar ações de transição energética num contexto macro.

A GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL

Apontada como uma problemática de escala global, a gestão inadequada de resíduos sólidos afeta todos os indivíduos e o meio onde esses estão inseridos. A medida que os países do globo avançam economicamente e suas populações crescem, ocorre também, por consequência, um processo de urbanização dos espaços desencadeado por movimentos migratórios e demanda por recursos naturais, resultando em aumento da geração per capta de resíduos nesses espaços urbanos (KAZA, *et al*., 2018).

Jacobi (2011) corrobora o entendimento de que o crescimento e a longevidade da população aliados à intensa urbanização e à expansão do consumo de novas tecnologias acarretam na produção de imensas quantidades de resíduos, e afirma que a gestão e a disposição inadequada dos resíduos sólidos causam significativos impactos socioambientais nos centros urbanos.

De forma conceitual, Anand (2010) define a gestão de resíduos sólidos como a disciplina associada a identificar, deduzir, armazenar, coletar, transportar e transbordar, reusar e reciclar, tratar efetivamente e dispor de resíduos em conformidade com os melhores princípios de gestão, economia, engenharia, saúde pública, conservação, estética e outras condições ambientais, incluindo todas as funções administrativas, financeiras, legais, de planejamento e projeto relativas à gestão de resíduos sólidos.

No tocante à legislação brasileira, a Política Nacional de Resíduos Sólidos é a lei que dispõe sobre os princípios, objetivos, instrumentos e diretrizes relativos à gestão integrada e gerenciamento de resíduos sólidos. Em seus termos, a PNRS estabelece que a gestão de resíduos deve abranger todas as etapas de gerenciamento de resíduos, considerando as dimensões políticas, econômicas, ambiental, cultural e social, e deve ser executada com controle social e com vistas ao desenvolvimento sustentável (DA SILVA FILHO; SOLER, 2019).

É interessante observar que a PNRS faz distinção expressa entre os conceitos de gestão e gerenciamento de resíduos, ao passo que no exterior, de forma geral, lida-se com um conceito mais amplo de gestão, do inglês management, que abrange as atividades de concepção, planejamento e suas ações operacionais.

Considerando as diretrizes aplicáveis à gestão e ao gerenciamento dos resíduos sólidos, trazidas pelo Decreto nº 10.936/22, que regulamenta a Lei nº 12.305/10, que institui a PNRS, o gerenciamento e aprimoramento da qualidade de resíduos sólidos deverá observar a seguinte ordem de prioridades: (i) não geração de resíduos sólidos, (ii) redução de resíduos sólidos, (iii) reutilização de resíduos sólidos, (iv) reciclagem de resíduos sólidos, (v) tratamento de resíduos sólidos, (vi) disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (BRASIL, 2022).

Quanto à etapa de destinação final ambientalmente adequada, a Lei a definiu como:

> Destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sisnama, do SNVS e do Suasa, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos. (BRASIL, 2010).

O conceito de destinação final trazido pela PNRS é claro quanto às possibilidades aceitas para encaminhamento dos resíduos sólidos após seu descarte, incluindo entre elas a disposição final como uma das modalidades admitidas para destinação ambientalmente adequada de resíduos (DA SILVA FILHO; SOLER, 2019).

De acordo com a ordem de prioridade da gestão de resíduos da PNRS, a disposição final somente é admissível para os rejeitos dos resíduos que não puderam ser evitados ou aproveitados pelas etapas anteriores de reutilização, reciclagem e tratamento.

No entanto, o aterramento segue sendo o caminho mais curto, porém menos eficiente para a solução da destinação final de resíduos no país, uma vez que o aterro sanitário tende a ser a alternativa mais acessível do ponto de vista econômico, técnico e até mesmo de conhecimento para localidades que enviam milhões de toneladas de resíduos para lixões ou aterros controlados, contrariando o que está expresso na legislação (INSTITUTO 17, 2022).

Segundo ABRELPE (2021), os dados mais recentes do cenário da destinação dos resíduos sólidos urbanos[1] (RSU) no brasil revelam que, dos 82 milhões de toneladas de gerados no ano de 2020, 6,4 milhões de toneladas foram descartadas sem qualquer forma de controle.

O Plano Nacional de Resíduos Sólidos – PLANARES, instituído por meio do Decreto nº 11.043, de 13 de abril de 2022, apresenta um caminho para se alcançar os objetivos e materializar a PNRS por meio de diretrizes, estratégias, ações e metas para melhorar a gestão de resíduos sólidos no país.

O Plano prevê o aumento da recuperação de resíduos para cerca de 50% em 20 anos, de modo que metade dos resíduos sólidos gerados no país deverá deixar de ser aterrada e passará a ser reaproveitada por meio da reciclagem, compostagem, biodigestão e recuperação energética, conforme o estabelecido na Meta 4 que versa sobre *"reduzir a quantidade de resíduos e rejeitos encaminhados para disposição final ambientalmente adequada."* (BRASIL, 2022).

[1] Art. 13 da Lei nº 12.305/10: para os efeitos desta Lei, os resíduos sólidos têm a seguinte classificação:
I - quanto à origem:
a) resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;
b) resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
c) resíduos sólidos urbanos: os englobados nas alíneas "a" e "b"; (BRASIL, 2010).

Em complemento ao atendimento à ordem de prioridade estabelecida na legislação do setor, a adoção de boas práticas e de soluções mais eficientes devem ser mandatórias para todos os munícipios do país, sobretudo, para aqueles que tem acesso a aterros sanitários, que devem focar na recuperação de resíduos e desviar, ao máximo, resíduos sólidos da disposição final (INSTITUTO 17, 2022).

APROVEITAMENTO ENERGÉTICO COMO ALTERNATIVA À DESTINAÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

A Politica Nacional inovou ao trazer a possibilidade de implantação de tecnologias para recuperação energética como alternativa de destinação ambientalmente adequada de resíduos, o que implica num incremento tecnológico em relação aos métodos de tratamento convencional desses materiais (KUBO, 2022).

Em adição aos esforços de redução e reutilização dos resíduos, bem como ao de aprimoramento da eficiência do processo de destinação final, o aproveitamento energético de resíduos (AER) compõe o rol de estratégias de gestão eficiente dos RSU, podendo contribuir para reforçar a oferta de energia próxima aos centros de consumo, com impactos sociais e ambientais muito positivos (INSTITUTO 17, 2022).

A utilização de resíduos sólidos urbanos como combustível num processo de queima para obtenção de energia é um processo comumente chamado de waste-to-energy (WTE), ou em português, AER. Um processo de gaseificação de resíduos também pode ser chamado de AER, sendo possível a obtenção de energia derivada desses materiais. No viés energético, a produção de energia pode ser relevante, com aproveitamento em várias modalidades, para uso industrial e geração de energia. Nos países de clima frio pode ser utilizada para o uso de aquecimento de residências e prédios públicos (KUBO, 2022).

Nesse contexto, o AER figura como uma das práticas capazes de contribuir para a recuperação de resíduos sólidos e ajudar no tratamento e redução desses materiais antes que sejam encaminhados para aterros sanitários. Isto ocorre porque o AER engloba tanto a recuperação de resíduos, por meio da reciclagem da fração orgânica durante a produção de biogás, como o tratamento e a redução de volumes de resíduos destinados ao aterro sanitário via recuperação energética (INSTITUTO 17, 2022).

O sistema energético é a etapa que envolve as atividades de valorização energética dos subprodutos de tratamento da fração orgânica de RSU, ou seja, quando os produtos deixam de ser vistos como resíduos e passam a ser produtos para geração de energia. O produto gerado a partir da fração orgânica de RSU com potencial energético é o biogás, que pode ser queimado para geração de energia elétrica e calor para aquecimento domestico ou industrial, ou ainda ser refinado em biometano para uso como combustível veicular. O sistema também pode ser referido como subsistema energético, visto que é um sistema dentro do sistema geral de gerenciamento de RSU (VIERA, 2018).

O AER se faz presente nas etapas de: reciclagem da fração orgânica pela biodigestão, que recupera nutrientes ao produzir biogás e digestato[2]; e de tratamento, quando há a recuperação energética da fração residual, que pode ser transformada em combustível derivado de resíduo (CDR) ou combustível derivado de RSU (CDRU). Ao se efetivarem as medidas que visam ao AER, somente os rejeitos demandarão disposição em aterros sanitários, o que, de fato, corresponderá à menor parcela e à última etapa da ordem de prioridade da gestão de resíduos.

BIOMETANIZAÇÃO

A digestão anaeróbia, ou também referenciada como biometanização, é a decomposição biológica da matéria orgânica, na ausência de oxigênio que visa a produção de metano e valorização energética da celulose presente no material (MATA-ALVAREZ; MACE; LLABRES, 2000; MATA-ALVAREZ, 2002).

[2] Material que passou por processo de digestão anaeróbica, o qual possui características fertilizantes muito semelhantes as do dejeto maturado (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). Disponível em <https://www.embrapa.br/suinos-e-aves/biogasfert/fertilizantes/dejetos-fertilizantes/fertilizante-fluido/digestato>. Acesso em out. 2022.

Teresina (2021) conceitua digestão anaeróbia ou biodigestão como um processo de decomposição da matéria orgânica pelo ataque de micro-organismos em condições de ausência de oxigênio livre, gerando como produtos finais gasosos, o biogás (mistura de metano, gás carbônico, gás sulfídrico, amônia e outros gases em menor proporção) e um substrato sólido que pode ser usado como condicionador de solos.

Entretanto, a fração orgânica dos resíduos sólidos é um substrato complexo e, obviamente, a sua degradação envolve um caminho metabólico ainda mais complexo, constituído por uma série de reações, até à síntese do metano como produto final.

Ao contrário da degradação aeróbia, onde a matéria orgânica é metabolizada diretamente a gás carbônico - CO_2, a degradação anaeróbia envolve quatro etapas distintas e sequenciais.

Em linhas gerais, o tempo de digestão da massa orgânica é curto, cerca de 45 dias (tempo de aproveitamento econômico de extração do biogás). Entretanto, após este período é necessário que se proceda à cura do material resultante, o que demora, pelo menos, mais 45 dias em condições climáticas tropicais, totalizando, o processo completo, num período mínimo de 90 noventa dias.

Atualmente, o processo de tratamento por digestão anaeróbia figura como uma tecnologia promissora, em virtude da alta taxa de produção de biogás que propicia o aproveitamento energético.

Várias são as vantagens dos sistemas anaeróbios quando comparados aos tratamentos aeróbios, dentre as quais merecem destaque: menor consumo de energia, menor área para implantação e potencial de geração de energia.

Contudo, os processos anaeróbios empregados no tratamento de resíduos sólidos ainda possuem alguns interferentes, devido à falta de configurações de sistemas de tratamento e, sobretudo, ao tempo necessário para estabilizar os resíduos sólidos, que é bastante longo quando comparado com processos aeróbios.

Estudos mostram que, a partir da crise energética dos anos 70, o gás metano dos digestores anaeróbios voltou a despertar o interesse geral, acarretando o aumento de sua utilização nos países europeus. Esta tendência foi reforçada nos últimos anos em virtude da proibição da implantação de novos aterros sanitários na Comunidade Europeia.

A utilização energética do biogás apresenta grande importância estratégica dentro do enfoque dos impactos ambientais, pois além de viabilizar seu aproveitamento como fonte de energia, contribui para o controle das emissões de metano na atmosfera, já que tem o potencial de aquecimento global vinte e oito vezes maior que o do gás carbônico. Porém, a principal vantagem do biogás frente ao gás natural é que o último não é uma fonte de energia renovável, razão pela qual vários países o utilizam como fonte energética.

No Brasil, assim como em outros países onde há um grande percentual de matéria orgânica nos RSU, os biodigestores vêm sendo utilizados para fins, não só de saneamento rural, como também de redução de custos de produção, tendo em vista que o biogás gera boa parte da energia elétrica consumida na propriedade e o composto orgânico melhora as características do solo, aumentando a produtividade das plantações.

A conversão energética de biogás em energia pode ser feita de várias formas, graças ao avanço tecnológico observado no setor. Dentre as opções disponíveis no mercado, as mais empregadas são as microturbinas a gás e os motores de combustão interna de ciclo Otto.

O saneamento brasileiro apresenta grandes oportunidades relacionadas ao aproveitamento energético de biogás da fração orgânica de RSU, por meio do processo de digestão anaeróbia. A adoção desse modelo promove: a oferta de energia, a diversificação da matriz energética, a destinação e o tratamento adequados em relação aos resíduos, a redução da sobrecarga de diversos aterros sanitários e a prolongação de sua vida útil. Outro fator importante é que a biodigestão é uma forma de reciclagem de materiais orgânicos, processo pelo qual se dá o aproveitamento energético, via geração do biogás, e a reciclagem de materiais, via produção de digestato (INSTITUTO 17, 2022).

A viabilidade da implantação da biodigestão anaeróbia passa, obrigatoriamente, pela segregação da fração orgânica. A segregação da fração orgânica deve ser, portanto, priorizada, como o é no caso dos materiais recicláveis secos. Essa segregação, idealmente, deve ser realizada na fonte, para garantir a não contaminação por outros rejeitos (AVFALL SVERIGE, 2021).

Na avaliação de INSTITUTO 17 (2021), o Brasil tem um potencial de aproveitamento de, aproximadamente, 24,5 milhões t/ano de resíduos orgânicos provenientes do RSU destinado adequadamente para aterros sanitários, montante equivalente ao potencial de produção de 1,9 bilhão de $Nm^3_{biogás}$/ano.

RECUPERAÇÃO DO BIOGÁS DE ATERROS SANITÁRIOS

Os substratos utilizados para produção de biogás são divididos em 3 classes quanto sua origem: agropecuária, indústria, aterro sanitário e estações de tratamento de esgoto (RSU e ETE). As plantas que processam resíduos sólidos urbanos ou efluentes de estações de tratamento de esgoto representam 9% das plantas em operação, porém, são responsáveis por 73% do biogás produzido no país. Estamos falando de 1.342.221.982 (Nm^3/ano) do total de 1.829.065.334 (Nm^3/ano) de biogás produzido no Brasil (CIBIOGÁS, 2021).

O biogás é um subproduto da decomposição anaeróbica realizado em presença de archeobactérias do tipo metanogênicas, que se alimentam dos materiais orgânicos, presentes nos resíduos sólidos urbanos. É constituído basicamente por metano CH_4 (50%), dióxido de carbono CO_2 (49%) e pequenas quantidades de outros gases, dentre eles: hidrogênio H_2, gás sulfídrico H_2S, oxigênio O_2, amoníaco NH_3 e nitrogênio N_2.

A composição do biogás depende do material orgânico de origem e, em se tratando do biogás de aterro sanitário, da idade da célula, pois os componentes químicos sofrem decaimento ao longo do tempo.

Segundo a ABRELPE, para que o metano do biogás possa ser explorado comercialmente, por meio de recuperação energética, o aterro sanitário deverá receber, no mínimo, 200 toneladas de RSU por dia e ter altura mínima de carregamento de 10 metros.

O PANORAMA DA GESTÃO DO SMRSU DE TERESINA

Em maio de 2021, a Prefeitura Municipal de Teresina (PMT), através da Secretaria Municipal de Planejamento e Coordenação (SEMPLAN), apresentou o Projeto de exploração e prestação dos serviços de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada de resíduos sólidos domiciliares (RDO) e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos de conservação urbana (RPU), mediante delegação feita por contrato de concessão, bem como atividades correlatas. A adoção dessa política pública tem como intuito a modernização e adequação de seu SMRSU ao marco legal e regulatório do saneamento básico.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Teresina, capital do Estado do Piauí, tem uma população estimada de 871.126 pessoas (2021), Índice de Desenvolvimento Humano Municipal de 0,751 (2010), Produto Interno Bruto per capita de R$ 25.458,50 em 2019 e uma área territorial de 1.391,293 km².

Os Resíduos Sólidos Domiciliares são definidos (apud D'ALMEIDA; VILHENA, 2000 *apud* PMGIRS, 2018) como aqueles originários nas residências, na própria vivência das pessoas. São constituídos, principalmente, por restos de alimentos, produtos deteriorados, jornais e revistas, garrafas, embalagens em geral, papel higiênico, fraldas descartáveis e uma grande diversidade de outros itens.

Para análise do potencial de aproveitamento dos resíduos sólidos domiciliares (RDO) na cidade de Teresina, Sousa (2018) afirma que dos 100% de resíduos gerados, 35,94% são de materiais orgânicos, 39,32% de recicláveis e 24,74% de Rejeitos.

Em 2018, foram coletados na zona urbana do Município de Teresina 206.897,64 toneladas de RDO, resultando em uma média mensal de 17.241,47 toneladas. No agregado com os demais Resíduos Sólidos Urbanos, estes valores alcançam 436.853,58 toneladas e 36.404,47 toneladas por mês (TERESINA, 2021).

Considerando a média per capita de geração global geral de RSU, tem-se que a que a média de RSU coletados no município de Teresina foi de 1,42 kg/hab x dia em 2018. Este índice está bem acima da média estimada pela ABRELPE (2017), que é de 0,8792 kg/hab x dia, como também da média nacional para cidades entre 250 mil e um milhão de habitantes, que foi de 1,07 kg/hab. x dia (SNIS, 2017).

O Aterro Municipal de Teresina (AMT) recebe os resíduos da coleta domiciliar (RDO), de serviços de limpeza pública e de conservação (RPU), de resíduos depositados pela população nos PRR's (Pontos de Recebimento de Resíduos), penas e vísceras, bem como aqueles provenientes dos serviços realizados por empresas particulares/grandes geradores.

O AMT recebe em média 17.240 t/mês de resíduos domiciliares, 150 t/mês de resíduos especiais (penas e vísceras), 69 t/mês de coleta seletiva, 2.276 t/mês de resíduos provenientes dos Pontos de Recolhimento de Resíduos (PRR), 1.200 t/mês de resíduos coletados por empresas particulares, 7.000 t/mês de resíduos produzidos pelas equipes de capina e 10.000 t/mês de resíduos removidos dos pontos de transbordo, totalizando uma média mensal de **37.935 t/mês** resíduos dispostos mensalmente no aterro controlado ou **1.264,50 t/dia**. (TERESINA, 2021).

Segundo o Relatório de Estudos Engenharia Logística e Afins, elaborado pela Caixa Econômica Federal (CEF) para prover subsídios à PMT quanto a escolha do melhor arranjo tecnológico e institucional para o SMRSU, é possível viabilizar tecnologias de digestão anaeróbia, assim como de pirólise e gaseificação, com o mínimo de 150 t/dia de RSU bruto, sendo mais conveniente o mínimo de 250 t/dia.

Com base nos parâmetros encontrados na literatura e em informações de fornecedores de tecnologias avaliadas, as alternativas foram estudadas de acordo com um balanço de massa para cada rota.

Após análise de critérios e variáveis de ordem tecnológica, socioambiental e econômica, e dentre as três possibilidades estudadas, os consultores da CEF apontaram para a escolha da rota tecnológica com a biometanização como a mais apropriada para o cenário da gestão de RSU em Teresina.

A rota escolhida para o SMRSU é composta por: Triagem + Biometanização (200 t/dia) + compostagem do material digerido (100 t/dia) + aterramento de resíduos (900 t/dia) + recuperação do biogás do aterro.

As outras alternativas consideradas foram: Triagem + pirólise (250 t/dia) + aterramento de resíduos (650 t/dia) + recuperação do biogás do aterro; e Incineração (600 t/dia) + aterramento de resíduos (300 t/dia) + recuperação do biogás do aterro. Os estudos efetuados a partir deste ponto foram desenvolvidos apenas para o projeto com biometanização[3].

No caso de Teresina/PI, a produção de energia elétrica pela queima do biogás em motores recíprocos de combustão interna associados a conjuntos de geradores promete ser a alternativa mais viável, já que estes motores possuem comparativamente menor custo por quilowatt e maior eficiência que a maioria das turbinas a gás. A par disto, o conjunto motor-gerador ainda oferece como vantagem a flexibilidade para futuras expansões ou reduções do sistema, levando em consideração as eventuais incertezas quanto a produções futuras de biogás.

Pelo exposto, vê-se que o uso da digestão anaeróbia no tratamento de resíduos sólidos não é novidade, principalmente quando as condições de mercado viabilizam economicamente a exploração do biogás como fonte de energia alternativa.

O Relatório de Estudos Engenharia Logística e Afins afirma que a viabilidade econômica relacionada aos processos de digestão anaeróbia pode ser alcançada a partir da redução dos custos de disposição em aterro sanitário, geração de receita derivada da produção e comercialização de energia renovável, da comercialização do composto orgânico para uso agrícola (ou mesmo a produção e venda de plantas ornamentais) e ainda a possibilidade de comercialização de créditos de carbono (pouco significativa, atualmente).

[3] As outras alternativas consideradas foram: Triagem + pirólise (250 t/dia) + aterramento de resíduos (650 t/dia) + recuperação do biogás do aterro; e Incineração (600 t/dia) + aterramento de resíduos (300 t/dia) + recuperação do biogás do aterro.

É importante salientar que até a presente data, no Brasil, não existe digestor anaeróbio que trate resíduos sólidos urbanos em escala comercial, porém, há uma unidade piloto em operação no Rio de Janeiro, dimensionada para tratar até 50 t/dia de fração orgânica, vem operando com bastante sucesso (TERESINA, 2021).
Por esta razão, a unidade prevista para Teresina foi avaliada para o mesmo modelo de tecnologia (*Methanum*) e será dimensionada para processar 175 t/dia de fração orgânica.

A tecnologia citada apresenta como principais vantagens:

- Aumento da vida útil dos aterros sanitários;
- Redução da fração orgânica dos RSU, responsável pelos odores desagradáveis e geração de lixiviados de alta carga poluidora nos aterros sanitários;
- Maior geração de biogás e metano devido às condições controladas de umidade e temperatura dos digestores;
- Permite a coleta de todo o biogás gerado (em aterros o índice de recuperação pode variar de 20% a 40%), reduzindo assim as emissões de gases de efeito estufa;
- O processamento gera sub-produtos valorizáveis: biogás (energia e calor) e composto orgânico.

As principais desvantagens dessa tecnologia são:

- A composição e a heterogeneidade dos resíduos podem variar dependendo da localização (zona de geração) e da estação do ano, podendo comprometer o processo de biodigestão anaeróbia e consequentemente a qualidade do biogás e do material digerido gerado;
- Necessidade de etapa posterior (como compostagem) para bioestabilização dos resíduos digeridos;
- Dificuldade na operação do sistema, principalmente em termos de obstruções de canalização em sistemas contínuos;
- Necessidade de mão de obra qualificada para o processo de operação e monitoramento da planta.

No Aterro Municipal de Teresina a captação do biogás será feita através de *manifolds* conectados ás cabeças dos poços de drenagem de gases que conduzirão o biogás coletado para a unidade de tratamento, uma vez que, a fim de garantir um processo de queima ambientalmente seguro, ou mesmo um melhor rendimento energético (caso o futuro concessionário venha a optar por esta alternativa), deverá ser feita a remoção de outros gases, como o dióxido de carbono (CO_2) e principalmente o gás sulfídrico (H_2S).

No projeto considerou-se que a totalidade do biogás captado tratado será queimado de forma centralizada e controlada através da instalação de *flare* para queima de até 150m^3/h.

ESTIMATIVAS E PROJEÇÕES DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS EM TERESINA

A usina de triagem projetada para o SMRSU de Teresina terá capacidade para processar até 200 toneladas/dia de lixo bruto, operando em dois turnos. As informações técnicas obtidas com os técnicos e pesquisadores envolvidos na unidade de biometanização estudada como parâmetro para a elaboração do projeto apontaram inicialmente não ser imprescindível um pré-tratamento rigoroso dos resíduos a serem encaminhados à unidade de beneficiamento da fração orgânica. Um teor de impurezas (basicamente resíduos inertes) maior ou menor interferiria apenas nos parâmetros de recuperação do biogás e, consequentemente, no rendimento térmico da unidade (TERESINA, 2021).

O processo de decomposição anaeróbica gera quantidade considerável de biogás. O biogás gerado possui elevada concentração de metano (da ordem de 60%), que uma vez liberado na atmosfera produz forte impacto como gerador de efeito estufa. Por outro lado, o metano possui elevado poder calorífico, podendo ser utilizado como biocombustível, substituindo o Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), ou alimentando um moto gerador para produção de energia elétrica.

Como a utilização do metano como biocombustível depende de negociações e adequações do setor energético, no Projeto, para efeito de dimensionamento e estimativas de investimento e custo operacional, considerou-se a utilização do metano recuperado para geração de energia elétrica.

A eficiência energética do biogás, considerada no Projeto, com percentual superior a 60% de metano e 30% na conversão elétrica do gerador, é de aproximadamente 0,19 MWh/t.dia, demonstrando a potencialidade de uso controlado.

Segundo Ornellas-Ferreira (2019), os quantitativos esperados para geração de energia elétrica em 1 (um) ano são:

- Energia produzida: 13.870 (MWh/ano).
- Energia recuperada do biogás do aterro: 0,19 (MWh/t).

A quantidade de metano gerada pelo aterro sanitário foi estimada com auxílio do software LandGEM, desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*United States Environmental Protection Agency* – USEPA), baseado na metodologia de decaimento de primeira ordem, cujos resultados são apresentados a seguir:

- Aterro Municipal de Teresina atualmente em operação: 33.198.030,68 Nm³ (em 30 anos).
- Novo aterro a ser construído: 84.384.837,08 Nm³ (em 30 anos).

Devido a menor quantidade de metano esperada nos 4 – 5 anos de operação do aterro sanitário municipal, desconsiderou-se para estimativa da energia a ser potencialmente recuperada.

O biogás capturado no aterro novo será direcionado ao sistema de geração de energia juntamente ao biogás produzido na biodigestão a partir do ano 5, quando se inicia a operação do aterro novo. Baseado na metodologia acima citada, estimou-se em cerca de 11.760 MWh/ano a média anual de energia adicionada ao demonstrado.

Para quantificar a quantidade de gás metano (CH_4) gerado no Aterro Municipal de Teresina utilizou-se o programa LandGEM (2006), desenvolvido pela USEPA. O referido modelo é baseado na premissa de que há uma fração constante de material biodegradável no aterro por unidade de tempo. Trata-se de um modelo cinético de primeira ordem usado para avaliar a produção de biogás durante a vida de um aterro.

DESAFIOS PARA VIABILIZAR O APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS NO MUNICÍPIO DE TERESINA

Para Barreira (2022) o desafio de implantação de sistemas de tratamento e valorização de resíduos no Brasil é enorme, justamente pela inexperiência de aplicação de alguns processos, pela falta de estudos técnicos de viabilidade econômica e ambiental e pelas dificuldades de uma gestão integrada de resíduos na maioria dos municípios brasileiros.

A implantação de processos e tecnologias de tratamento de resíduos deverá considerar os seguintes aspectos: (i) características dos resíduos: quantitativo e qualitativo (composição gravimétrica, granulométrica e poder calorifico), (ii) objetivos da planta: recuperação de materiais recicláveis, reciclagem de orgânicos (composto, material estabilizado para aterramento e/ou biogás), recuperação energética através do CDR, (iii) viabilidade econômica: custo x beneficio, (iv) questões ambientais: impactos relacionados, licenciamento ambiental e atendimento às legislações, (v) demandas de mercado: situação atual de mercado e sua repercussão na rota tecnológica, (vi) características locais e regionais: disponibilidade de áreas para instalação de aterros e a possibilidade de soluções consorciadas.

No caso específico de Teresina, o Relatório de Estudos Engenharia Logística e Afins, desenvolvido pela Caixa Econômica Federal, aponta para a viabilidade técnica dessa modalidade de recuperação de resíduos em específico, o aproveitamento energético de resíduos.

Contudo, no que diz respeito a viabilidade econômica da prática de AER em Teresina, será necessário desenvolver um estudo mais apurado acerca dos aspectos comerciais e regulatórios do mercado local a fim de que verificar-se o real potencial do empreendimento em sobreviver a longo prazo, recuperar os custos dos investimentos e também a sua habilidade em manter-se lucrativo durante o período de operação das instalações.

CONCLUSÕES

Diante das considerações apresentadas neste trabalho, é possível concluir que o atendimento à Política Nacional de Resíduos Sólidos deve ser premissa para toda proposta de solução de gestão de resíduos sólidos no Brasil.

O atendimento à ordem de prioridade e a adoção de boas práticas e de soluções mais eficientes devem ser mandatórios para todos os munícipios do país, sobretudo, para aqueles que tem acesso a aterros sanitários, que devem focar na recuperação de resíduos e desviar, ao máximo, resíduos sólidos da disposição final.

O aproveitamento energético de resíduos é um importante caminho para o cumprimento da PNRS, pois complementa e traz benefícios para as etapas da reciclagem, da fração orgânica, e do tratamento da fração residual, por meio da recuperação energética.

Esta prática é capaz de reduzir o envio de rejeitos para disposição final, ao contribuir para o aumento dos níveis de reciclagem e aumentar a vida útil de aterros sanitários e diminuindo a necessidade de novas áreas para a esse fim.

Além desses benefícios, ainda contribui para a diversificação da matriz energética do país, por meio da geração de energia renovável, e para a diminuição da dependência de combustíveis fósseis, reduzindo, consequentemente, as emissões de gases de efeito estufa.

Por fim, a discussão acerca dos potenciais desses arranjos é válida, pois abre importantes possibilidades de fortalecimento e complementariedade dos setores de saneamento e energia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020. 2021. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>. Acesso em fev. 2023.
2. ANAND, S. *Solid Waste Management*. Nova Delhi: *Mittal Publications*, 2010.
3. AVFALL SVERIGE. *Swedish Waste Management 2020*. Baltzarsgatan/Malmo, Suécia: AVFALL SVERIGE, 2021.
4. BARREIRA. L. P. Gestão Integrada e Valorização de Resíduos Sólidos. Rotas Tecnológicas e Valorização de Resíduos. São Paulo, 2022. FESPSP. (Apostila).
5. BRASIL. Decreto nº 11.043, de 13 de abril de 2022. Aprova o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES). Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Qualidade Ambiental, 2022b. p. 187. Disponível em: <http:/www.planalto.gov.br/ ccivil_03/_ato2019- 2022/2022/decreto/D11043.htm>. Acesso em fev. 2023.
6. BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de Agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF: palácio do Planalto. 2010. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em fev. 2023.
7. BRASIL. Portaria interministerial N° 274. Ministério do Meio Ambiente, Gabinete do Ministro. Portaria Interministerial no 274, de 30 de abril de 2019: Disciplina a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos referida no § 1o do art. 9o da Lei no 12.305, de 2010 e no art. 37 do Decreto no 7.404, de 2010. Diário Oficial da União: Seção 1, Brasília, DF. 2019h. ed. 83, p. 57.
8. CEF. CAIXA ECONÔMICA FEDERAL – VIGOV. Relatório Técnico de Diagnóstico Preliminar Consolidado. Sistema de Resíduos Sólidos Urbanos. Teresina. 2018.

9. CIBIOGÁS. Nota Técnica: N° 001/2021 – Panorama do Biogás no Brasil 2020. Foz do Iguaçu, Março de 2021. Disponível em: <https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/2021/06/PANORAMA-DO-BIOGAS-NO-BRASIL-2020-v.8.0-1_1.pdf>. Acesso em mar. 2023.
10. DA SILVA FILHO, C. R. V.; SOLER, F. D. Gestão de resíduos sólidos: o que diz a lei. Editora Trevisan, 2019.
11. DE ANDRADE, R. M.; FERREIRA, J. A. A gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil frente às questões da globalização. Rede-Revista Eletrônica do PRODEMA, v. 6, n. 1, 2011.
12. IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pi/teresina/panorama>. Acesso em fev. 2023.
13. INSTITUTO 17. Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos no Brasil: Potencial energético por arranjo tecnológico. Programa de Energia para o Brasil – BEP (Brasil). Relatório técnico 06-2022. São Paulo/SP: Instituto 17, 2022.
14. JACOBI, P. R.; BESEN, G. R. Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade. Estudos avançados, v. 25, p. 135-158, 2011.
15. KAZA, S. *et al*. *What a Waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050*. Washington, DC. *World Bank Publications*, 2018.
16. KUBO, H. Gestão Integrada e Valorização de Resíduos Sólidos. Gaseificação. <https://fespsp.v3.curso.app/s.fesped5573ae/2022/08/mod03-givr-aula05-apostila-214522.pdf>. FESPSP.
17. MATA-ALVAREZ, J.; MACE, S.; LLABRES, P. *Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. Bioresource technology*, v. 74, n. 1, p. 3-16, 2000.
18. MATA-ALVAREZ, J. (Ed.). *Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes*. *IWA publishing*, 2002.
19. ORNELAS-FERREIRA, B *et. al. Strategies for energy recovery and gains associated with the implementation of a solid state batch methanization system for treating organic waste from the city of Rio de Janeiro – Brazil*. *Renewable Energy,* v. 146, p. 1976-1983, 2020.
20. TERESINA. Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Teresina Revisado. Versão 03. Teresina. 2015-2018.
21. SNIS. Site do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - <http://www.snis.gov.br/>. Acesso em mar. 2023.
22. SOUSA, A. do N. Indicadores Socioeconômicos, Geração e Composição dos Resíduos Sólidos Domiciliares da Cidade de Teresina-PI: uma Contribuição para a Gestão Municipal. 2018. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco – Recife/PE.
23. TERESINA. Secretaria Municipal de Planejamento e Coordenação. Relatório de Estudos Engenharia Logística e Afins. 2021. Teresina. Disponível em: <https://semplan.pmt.pi.gov.br/wp-content/uploads/sites/39/2021/05/Relatorio-de-Estudos-Engenharia-Logistica-e-Afins.pdf>. Acesso em mar. 2023.
24. VIEIRA, V. H. A. de M. Impactos Ambientais Do Ciclo De Vida Da Fração Orgânica Dos Resíduos Sólidos Urbanos E O Caso Da Região Metropolitana De São Paulo. 2018. Disponível em: <https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/2021/08/Victor-Impactos-ambientais-do-ciclo-de-vida-da-fracao-organica-dos-residuos-solidos-urbanos-caso-da-regiao-metropolitna-de-SP.pdf>. Acesso em mar. 2023.