

## A UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS PROVENIENTE DE MATÉRIA ORGÂNICA PARA FINS ENERGÉTICOS E MITIGAÇÕES AMBIENTAIS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

**DJAYR ALVES BISPO JUNIOR**  
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

**RAPHAEL ABRAHÃO**

**MONICA CARVALHO**

### **Introdução**

A quantidade de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) tem aumentado consideravelmente ao longo dos últimos anos, juntamente com as demandas globais de eletricidade (IEA, 2018). Isto é consequência direta do aumento populacional, como também do modo de vida da sociedade moderna. Dessa maneira, surge a necessidade de encontrar alternativas para diversificar a matriz energética global, como também mitigar os impactos ambientais do planeta. Para isto, pode-se usar o biogás proveniente de RSU para fins energéticos, por meio de sistemas termodinâmicos com várias possibilidades de implementação.

### **Problema de Pesquisa e Objetivo**

Por ano são produzidos cerca de 2 bilhões de toneladas de resíduos no mundo (ONU, 2018). Para acomodar os 7,6 bilhões de habitantes no planeta terra, suprir o uso de recursos e absorver o lixo gerado, seria necessário 70% de outro planeta terra (ONU, 2018). Seguindo a tendência mundial, a expectativa é que a quantidade de RSU no mundo aumente ainda mais. Reconhecendo as oportunidades energéticas presentes no biogás originado de RSU, o objetivo deste trabalho é mostrar a importância da sua utilização, por meio de uma revisão sistemática dos estudos teóricos e experimentais já desenvolvidos.

### **Fundamentação Teórica**

De acordo com Mourad et al. (2002), os RSU podem ser tratados de diversas formas, como: reciclagem, tratamento biológico, incineração, aterro, etc. A incineração é um processo termoquímico baseado na combustão dos compostos orgânicos dos RSU (Nidoni, 2017). Os aterros sanitários são tratamentos bioquímicos de RSU (ABNT, 1983). Ambas as formas de tratamento resultam no biogás. Segundo Chacartegui et al. (2015), o biogás pode ser utilizado em diversas propostas: aplicações térmicas, evaporação de lixiviado, geração de eletricidade por motores a combustão interna, turbinas a gás e a vapor, etc.

### **Metodologia**

Revisão sistemática, caracterizada por ser uma metodologia qualitativa (Pereira et al., 2018). Toda a pesquisa foi feita na base de dados SCOPUS, limitando as pesquisas para artigos publicados em periódicos e revisões. Os descritores utilizados nas buscas foram: urban solid residues, sanitary landfill, biogas, cogeneration, thermodynamics, life cycle assessment. Foram utilizados seus sinônimos correspondentes, assim como os operadores booleanos AND e OR. Não houve qualquer tipo de restrição temporal na pesquisa. Derivados de livros, anais e resumos de conferência também foram excluídos.

### **Análise dos Resultados**

Na primeira etapa apareceram 157 artigos. Logo após houveram as etapas de triagem e elegibilidade, finalizando com a obtenção de apenas 17 estudos. Os artigos identificados foram: Morin et al. (2010), Saravia et al. (2012), Rubio-Romero et al. (2013), Niskanen et al. (2013), Balcazar et al. (2013), Milani et al. (2014), Kumar et al. (2014), Ahmed et al. (2014), Chacartegui et al. (2015), Boskovic et al. (2016), Kieffer et al. (2016), Nascimento et al. (2019), Novelli et al. (2019), Gallego et al. (2019), Ornelas-Ferreira et al. (2020), Thanopoulos et al. (2020), Brigagão et al. (2021).

### **Conclusão**

Por meio dos artigos apresentados neste estudo, constatou-se a importância da utilização desta fonte alternativa e renovável de energia. O biogás pode ser incorporado a diversos sistemas termodinâmicos para fins energéticos, além de soluções para o acúmulo de RSU, considerando também a redução dos impactos ambientais. Experiências de sucesso em outras regiões do mundo podem ser estendidas e adaptadas para o Brasil, com benefícios para o governo e para a população. Trazendo vantagens econômicas e ambientais no momento atual, reduzindo a sobrecarga das concessionárias de energia elétrica.

### **Referências Bibliográficas**

ABNT. 1983. AHMED et al., 2014. BALCAZAR et al., 2013. BOSKOVIC et al., 2016. BRIGAGÃO et al., 2021. CHACARTEGUI et al., 2015. GALLEGO et al., 2019. IEA, 2019. KIEFFER et al., 2016. KUMAR et al., 2014. MILANI et al., 2014. MORIN et al., 2010. MOURAD et al., 2002. NASCIMENTO et al., 2019. NIDONI et al., 2017. NISKANEN et al., 2013. NOVELLI et al., 2019. ONU BRASIL. 2018. ORNELAS-FERREIRA et al., 2020. PEREIRA et al., 2018. RUBIO-ROMERO et al., 2013. SARAVIA et al., 2012. THANOPOULOS et al., 2020.

### **Palavras Chave**

Resíduos Sólidos Urbanos, Gás de aterro, Energia

### **Agradecimento a órgão de fomento**

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas de produtividade, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado.

# A UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS PROVENIENTE DE MATÉRIA ORGÂNICA PARA FINS ENERGÉTICOS E MITIGAÇÕES AMBIENTAIS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

## 1. INTRODUÇÃO

A quantidade de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) tem aumentado consideravelmente ao longo dos últimos anos, juntamente com as demandas globais de eletricidade (IEA, 2018). Isto é consequência direta do aumento populacional, como também do modo de vida da sociedade moderna. Dessa maneira, surge a necessidade de encontrar alternativas para diversificar a matriz energética, como também mitigar os impactos ambientais do planeta. Para isto, pode-se usar o biogás proveniente de RSU para fins energéticos, por meio de sistemas termodinâmicos com várias possibilidades de implementação.

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe, 2020), no Brasil, de 2010 a 2019, a geração de RSU passou de 67 milhões para 79 milhões de toneladas produzidas por ano. Na mesma década, a quantidade de RSU coletados passou de cerca de 59 milhões para 72,7 milhões de toneladas, e a cobertura de coleta passou de 88% para 92%. Na Itália, a produção de RSU no ano de 2016 foi de 30,1 milhões de toneladas, com aumento de 2% em relação a 2015 (Novelli *et al.*, 2019). Em 2008, a Índia já produzia cerca de 90 milhões de toneladas de RSU anualmente (Talyan *et al.*, 2008). De acordo com Xiaoli *et al.* (2016), os EUA recebem cerca de 250 milhões de toneladas de RSU anualmente, e a China produziu cerca de 105 milhões de toneladas de RSU em 2013. Por ano são produzidos cerca de 2 bilhões de toneladas de resíduos no mundo (ONU, 2018). Para acomodar os 7,6 bilhões de habitantes no planeta terra, suprir o uso de recursos e absorver o lixo gerado, seria necessário 70% de outro planeta terra (ONU, 2018). Seguindo a tendência mundial, a expectativa é que a quantidade de RSU no mundo todo aumente ainda mais.

De acordo com Mourad *et al.* (2002), os RSU podem ser tratados de diversas formas, como: reciclagem, tratamento biológico, incineração e aterro. A parte mais adequada da porcentagem gravimétrica dos RSU para fins energéticos são os compostos orgânicos. Geralmente o tratamento pode ser por processos termoquímicos, tendo como exemplo a incineração (Bhaskar and Steele, 2015; Emun *et al.*, 2010). E por processos bioquímicos, tendo como exemplo a Digestão Anaeróbia (DA) (Walker *et al.*, 2009; Peralta-Yahya *et al.*, 2012). Como a grande quantidade de RSU gerados diariamente é preocupante, existe a necessidade da coleta, até a destinação final adequada, para o tratamento a ser realizado.

A incineração é um processo termoquímico baseado na combustão dos compostos orgânicos dos RSU. Geralmente a queima ocorre em usinas, convertendo o material residual em calor, gás de combustão e cinzas. O calor e o gás de combustão podem ser usados para fins energéticos, e as cinzas para fins de construção civil. O benefício da incineração é que reduz a massa sólida dos compostos orgânicos em 80-85%, e o volume em cerca de 95% (Sabbas *et al.*, 2003; Nidoni, 2017). Porém, é necessário cuidado para evitar que os gases sejam depositados diretamente na atmosfera.

Os aterros sanitários são tratamentos bioquímicos de RSU, que precisam estruturalmente de um sistema de impermeabilização, oferta diária de resíduos, monitoramento de águas subterrâneas, sistema de drenagem de gases, monitoramento topográfico e hidro

geológico (ABNT, 1983). Além de coleta e tratamento do biogás e do chorume, como também processos operacionais que consigam reduzir as consequências ambientais (Lucas *et al.*, 2010).

Os aterros sanitários são grandes produtores de biogás, gerando diversos gases, como: metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), amônia (NH<sub>3</sub>), hidrogênio (H<sub>2</sub>), gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S), nitrogênio (N<sub>2</sub>) e oxigênio (O<sub>2</sub>). A disponibilidade desses gases varia de acordo com o tempo de vida do aterro. O metano representa cerca de 50% e os gases variáveis podem corresponder a 1% do biogás (Lucas *et al.*, 2010). É preciso cuidado pois os gases além de energéticos também possuem alto potencial de toxicidade para atmosfera. Principalmente o gás metano, que tem cerca de 21 vezes mais potencial para o aquecimento global que o dióxido de carbono (Piñas *et al.*, 2016). Dessa forma, o biogás é considerado uma fonte muito valiosa.

Segundo Chacartegui *et al.* (2015), o biogás pode ser utilizado em diversas propostas: caldeiras para aquecimento residencial, aplicações térmicas, evaporação de lixiviado. Também pode ser utilizado para geração de eletricidade por motores a combustão interna (MCI), micro turbinas a gás, micro turbinas a vapor, ciclos combinados, sistemas híbridos que integram MCI com ciclo orgânico de Rankine (ORC), sistemas híbridos MCI com células de combustível, combustível para veículos, culinária, ou usando condições de combustão oxi-combustível. De acordo com Salomon (2007), o biogás se assemelha ao gás natural quando comparamos o poder calorífico dos dois, possibilitando sua substituição em diversas aplicações. A principal vantagem do biogás em relação ao gás natural é ser renovável, e sua produção depender de compostos orgânicos, a exemplo da biomassa.

Sobre os processos bioquímicos para o tratamento de RSU, a DA pode ocorrer por meio de reatores, podendo ser uma maneira viável de substituição dos aterros. Segundo Stockmanns *et al.* (2016), a DA em reatores por meio da codigestão intensifica a produção de biogás. Analisando o ciclo de vida, a codigestão anaeróbia possui o melhor aproveitamento de energia renovável em comparação a DA convencional (Stockmanns *et al.*, 2016). Carneiro (2009) destaca que a DA em reatores apresenta inúmeras vantagens em relação aos aterros sanitários, como: baixo grau de poluição, potencialização elevada para a conversão de matéria orgânica, redução de odores e contribui para a diminuição desses resíduos (biodegradáveis) em aterros sanitários. Dessa forma, a DA por meio de reatores apresenta uma excelente opção para diversificar a produção do biogás, e possui muito potencial a ser explorado com um olhar sobre o futuro.

Reconhecendo as oportunidades energéticas presentes no biogás originado de RSU, o objetivo deste trabalho é mostrar a importância da sua utilização, por meio de uma revisão sistemática dos estudos teóricos e experimentais já desenvolvidos. Corroborando com a diversificação da matriz energética global, como também com a mitigações ambientais alcançadas nos estudos identificados desta revisão sistemática.

## **2. METODOLOGIA**

### **2.1. Tipo de Estudo**

De acordo com a importância e relevância do estudo, aplica-se aqui uma revisão sistemática, caracterizada por ser uma metodologia qualitativa (Pereira *et al.*, 2018). A revisão sistemática busca melhor entendimento sobre métodos e resultados obtidos pelos pesquisadores, por meio das oportunidades energéticas do biogás proveniente de RSU. A ideia da revisão sistemática é identificar e discutir os estudos realizados com a intenção de mitigar

impactos ambientais, como também diversificar a matriz energética global. A coleta dos dados ocorreu de maio a junho de 2021.

## **2.2. Fontes de Informação**

Todas as buscas foram realizadas por meio da plataforma SCOPUS, limitando as pesquisas para artigos e revisões. Os descritores utilizados nas buscas foram: Resíduos Sólidos Urbanos, Aterro Sanitário, Biogás, Cogeração e Termodinâmica. Assim como seus sinônimos correspondentes, além dos operadores booleanos AND e OR, para encontrar mais estudos que relacionassem discussões e resultados próximos aos descritores utilizados inicialmente. As buscas foram realizadas somente em inglês. Para a obtenção do maior número de estudos, não foi realizada nenhuma restrição temporal.

## **2.3. Critérios de Inclusão**

Foram incluídos os estudos que avaliaram a utilização do biogás como forma de energia, buscando atender as maiores eficiências da sua utilização. Dessa maneira, estudos que mostram a obtenção de energia térmica e elétrica (cogeração) de forma simultânea foram identificados. Assim como aqueles que demonstraram resultados relevantes quanto as mitigações ambientais.

## **2.4. Critérios de Exclusão**

Os resultados derivados de livros, anais, resumos de conferências e outras formas de divulgação não foram considerados. Alguns estudos voltados apenas para a questão do tratamento dos RSU foram excluídos. Artigos semelhantes e duplicados também foram excluídos desta revisão sistemática.

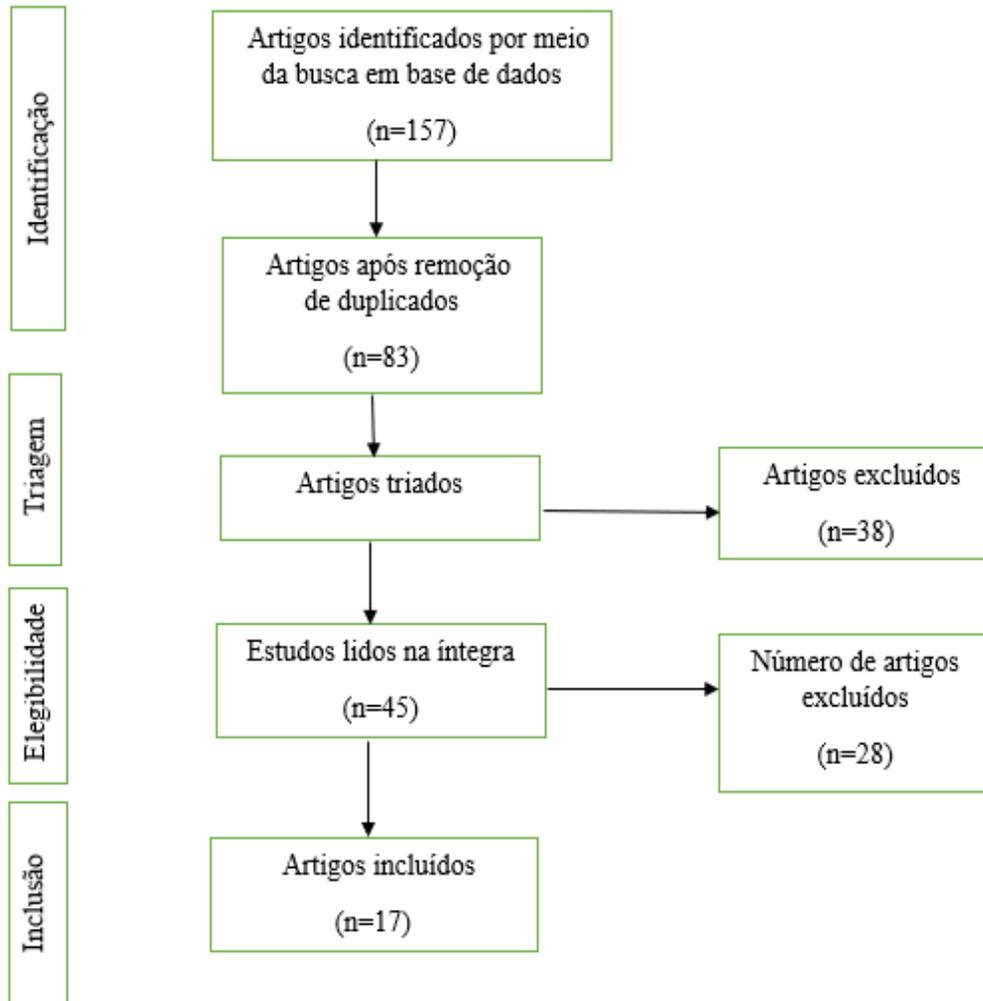
## **2.5. Identificação dos Estudos**

Após a realização das buscas na plataforma SCOPUS, com a utilização dos descritores e os operadores booleanos, foi feita uma triagem a partir da análise dos títulos e resumos dos estudos. A etapa seguinte foi caracterizada pela leitura na íntegra dos resultados obtidos, para elencar os principais pontos dos dados e das informações relevantes e pertinentes, com a aplicação dos critérios de exclusão e inclusão.

# **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A Figura 1 representa o processo da revisão sistemática, de acordo com a metodologia que foi seguida. Inicialmente foram identificados 157 artigos, logo após foram removidos os artigos duplicados. A etapa seguinte foi realizada com 83 artigos, que incluiu triagem com a leitura de títulos e resumos. Os 45 estudos identificados nesta etapa foram lidos na íntegra, finalizando com a obtenção de 17 estudos.

**Figura 1. Diagrama do processo de revisão.**



De acordo com a Figura 1, ao término das análises, 17 artigos preencheram os requisitos de inclusão da revisão sistemática. Os identificados foram: Morin *et al.* (2010), Saravia *et al.* (2012), Rubio-Romero *et al.* (2013), Niskanen *et al.* (2013), Balcazar *et al.* (2013), Milani *et al.* (2014), Kumar *et al.* (2014), Ahmed *et al.* (2014), Chacartegui *et al.* (2015), Boskovic *et al.* (2016), Kieffer *et al.* (2016), Nascimento *et al.* (2019), Novelli *et al.* (2019), Gallego *et al.* (2019), Ornelas-Ferreira *et al.* (2020), Thanopoulos *et al.* (2020), Brigagão *et al.* (2021). Os estudos identificados foram publicados entre os anos de 2010 e 2021.

Morin *et al.* (2010) investigaram as possibilidades econômicas de utilizar matéria orgânica, fração orgânica de RSU, e lodo de esgoto municipal por DA, para geração do biogás. O estudo foi feito para uma província de Quebec, Canadá, com cerca de 150.000 habitantes. Os autores aplicaram o biogás para cogeração, em um tanque de DA, utilizando o software MATTEUS (programa desenvolvido pela Hydro-Quebec). Dessa forma, gerando eletricidade e calor residual, que seria utilizado para aquecimento na estação de tratamento de águas residuais do município. Os resultados mostraram um retorno no investimento de 3,7 anos para o preço de eletricidade de 0,10 \$/kWh. A adição de esterco de fazendas vizinhas aumentaria a produção de biogás em 37%. O retorno passaria a ser de 6,8 anos, mas se o restante do digerido fosse usado para fins agrônômicos, ainda assim seria vantajoso. O projeto garante redução na emissão dos gases do efeito estufa (GEE) em 4.261 toneladas de CO<sub>2</sub> eq./ano.

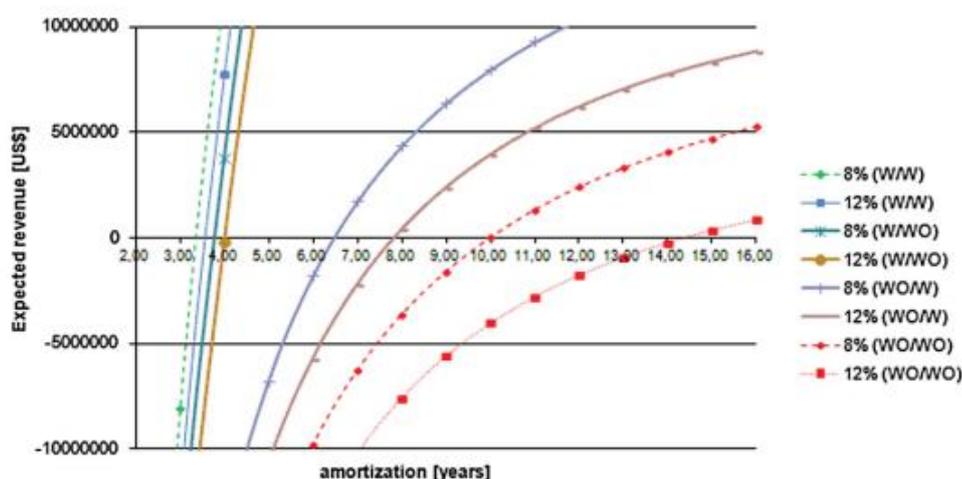
Saravia *et al.* (2012) realizaram uma avaliação técnica e econômica de usinas de ciclo combinado movidas à biogás de aterro sanitário. O estudo foi realizado em uma usina localizada em Monterrey, no México. A proposta além de aumentar a eficiência energética, traz benefícios ambientais por meio da redução de emissões dos GEE, com ênfase na reciclagem de produtos reutilizáveis (vidros, metais, papel e plástico). O ciclo combinado proposto é caracterizado pela integração de MCI com ORC. O objetivo principal é reaproveitar os gases de exaustão do ciclo MCI (que geralmente possui uma eficiência elétrica de até 42%, segundo os autores). Uma planta ORC opera com temperaturas de evaporação relativamente baixas (70-300°C), pois em vez da água, a caldeira ou o evaporador é alimentado com um fluido orgânico (Isopentano, n-pentano, ciclohexano, n-butano, n-octano, isobutano, etc.). Dessa forma, os fluidos orgânicos têm baixa entalpia de evaporação, inferior à da água, possuindo melhor capacidade na recuperação de calor dos gases de exaustão do ciclo MCI. As plantas ORC são instaladas em módulos que incluem: evaporador, turbina, condensador, sistema de bomba e regenerador. Geralmente possuindo capacidade de produção de 60 kWe à 2,7 MWe. No estudo de caso dos autores, o aterro sanitário possui 16 módulos MCI, com capacidade de geração de energia de 16,94 MWe (no total), todos alimentados pelo biogás do aterro. Os 16 MCI rejeitam 7.792 kWt de calor residual para o meio ambiente. Os autores consideram que os gases de exaustão dos ciclos MCI tenham no mínimo uma temperatura de 180°C. São comparados 5 métodos da integração de módulos ORC aos 16 módulos MCI. O método mais adequado, com melhor retorno financeiro, econômico e ambiental é integrar apenas 1 módulo ORC com 1,5 MWe de capacidade de produção, aos 16 módulos MCI. Dessa maneira, a capacidade de geração de eletricidade de 16,94 MWe passaria para 18,44 MWe (aumento de 8,9%), gerando 11,24 GWh/ano de eletricidade. O retorno financeiro seria recuperado em menos de 8 anos (quando os preços de eletricidade forem superiores a 0,09 US\$/kWh), e após isto a obtenção do lucro, possibilitando a venda da energia gerada e armazenada. Além disso, a nova planta evitaria emitir 4.159 M.T. de CO<sub>2</sub> por ano, ao meio ambiente. Os autores ainda consideram que o retorno financeiro pode acontecer muito antes do estimado, com um cenário mais otimista do que o proposto.

Rubio-Romero *et al.* (2013) avaliaram a rentabilidade da produção de eletricidade a partir do biogás de aterros sanitários, em Andaluzia, Espanha. Para o estudo, consideraram os 34 aterros presentes na comunidade autônoma espanhola, localizada na costa sul do país. Dessa forma, definiram uma planta padrão de cogeração como base. Caracterizada por um motor modelo GE Jenbacher JGC 320 de 1048 kW, com vida útil de aproximadamente 7,5 anos. Dos 34 aterros, apenas 6 não eram rentáveis economicamente, pois possuíam capacidade inferior a 166 kW, gerando menos de 118,8 m<sup>3</sup>/h de biogás. Como resultado, a pesquisa considerou o investimento da planta de cogeração em todos os 34 aterros. Concluindo que o retorno sobre o investimento é de 116%, um índice de retorno interno de 32,59%, e um *Payback* de 3,07 anos. Ou seja, após pouco mais de 3 anos o projeto passaria a ter lucro. Além disso, os autores afirmam que por meio de uma análise de sensibilidade, embora alguns aterros não fossem lucrativos individualmente, o investimento total para o grupo de 34 é extremamente rentável, e ajuda a estimular o uso da cogeração para garantir mitigações ambientais.

Niskanen *et al.* (2013) realizaram um estudo na Finlândia, comparando 3 cenários para o tratamento e utilização do biogás gerado nos aterros sanitários. O primeiro cenário é caracterizado pela produção combinada de calor e energia (cogeração), por meio de um MCI. O segundo cenário é a combinação da geração de calor para o processo produtivo de asfalto no verão, e a produção distrital de calor por uma caldeira de água no inverno. O terceiro cenário busca o aprimoramento do biogás de aterros sanitários para a produção do biometano. De acordo com os autores, o método que tem menor emissão de gases do efeito estufa é o primeiro cenário, sendo o mais recomendado.

Balcazar *et al.* (2013) apresentam um estudo sobre um sistema de transformação de RSU em energia, com base na integração de turbinas a gás e a vapor a um incinerador. A planta híbrida, de ciclo combinado, busca a cogeração como solução para a disposição de RSU na cidade de São José dos Campos, São Paulo. O estudo técnico e econômico realizado mostra uma viabilidade atraente para o sistema proposto. Segundo os autores do estudo, São José dos Campos tinha aproximadamente 630.000 habitantes naquele ano, com uma produção de 670 toneladas de RSU por dia. O sistema proposto é caracterizado por um ciclo combinado híbrido, ou seja, um primeiro ciclo que funciona com uma turbina a gás, e o segundo ciclo com uma turbina a vapor. Um incinerador é integrado ao ciclo para alimentar a turbina a vapor, com o intuito de aumentar a eficiência energética do sistema, como também diminuir o acúmulo de RSU por meio da queima direta. Caldeiras de recuperação também são implementadas no sistema, com trocadores de calor. Os autores desejam alimentar a turbina a gás com o biogás dos aterros, e com o uso alternativo do gás natural. E a segunda turbina é alimentada com os gases resultantes do primeiro ciclo (em forma de vapor), e com os vapores provenientes do processo de incineração. Os pontos importantes para aplicação dos conceitos da termodinâmica são enumerados, como os fluxos de massa e o balanço energético. Para os cálculos de eficiência do sistema global, e retorno financeiro de investimento, os autores consideram taxas de juros com crédito de carbono e imposto sobre resíduos. Dessa forma, a conta não é tão simples, pois leva-se em conta também o uso do gás natural como combustível alternativo. Os valores encontrados para retorno financeiro variam de acordo com a Figura 2 (para mais informações consultar Balcazar *et al.*, 2013).

**Figura 2. Retorno para caso híbrido (Turbina Hitachi H-25), com e sem créditos de carbono e imposto sobre resíduos.**



Fonte: Balcazar *et al.* (2013).

Tendo em vista que o aterro estudado possui vida útil de 50 anos, o sistema proposto é altamente recomendado, tanto em um cenário otimista, quanto em um cenário pessimista. Pois, além de apresentar uma taxa interna de retorno (TIR) de 30%, diminui a emissão de GEE, e o acúmulo de RSU na cidade. Segundo os autores, o ciclo combinado híbrido proposto é o que apresenta maior eficiência energética.

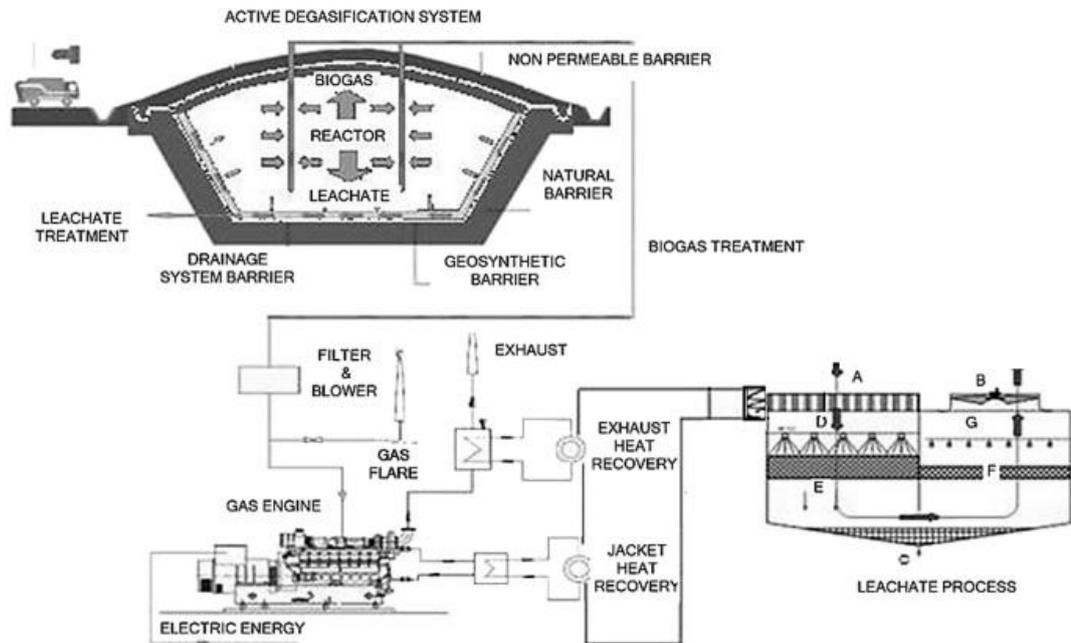
Milani *et al.* (2014) investigaram o desempenho de um sistema integrado de recuperação de energia, a partir de biomassa e RSU, com base em sistemas anaeróbicos. Incluindo digestão, gaseificação e tratamento de água. No sistema, a fração orgânica dos resíduos da biomassa digestível é alimentada em um digestor anaeróbico. Enquanto uma parte da fração combustível dos RSU é gaseificada. Dessa forma, o biogás e o gás de síntese obtidos são usados como combustível para funcionamento de um sistema de cogeração, baseada em um MCI. A água residual produzida pela planta integrada, é recuperada por meio de osmose direta e inversa. O estudo levou em consideração 3 províncias italianas, onde as simulações numéricas mostraram redução na emissão de GEE, máximo aproveitamento da biomassa e redução na quantidade de RSU. Os resultados finais mostram que aproximadamente 70% da biomassa sólida é utilizada como insumo para a planta integrada. Além da economia da água utilizada para o funcionamento da usina, que é recuperada e purificada no processo.

Kumar *et al.* (2014) realizaram um estudo sobre a ameaça de aquecimento global por meio dos GEE por despejo de RSU, em 23 cidades metropolitanas indianas usando o software LandGEM (versão 3.02 durante os anos 2001-2020). Para o cálculo do rendimento do CH<sub>4</sub> foram utilizados os dados do IPCC (2006). O estudo mostra que durante 20 anos (2001-2020) Mumbai tem a maior emissão de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>, com 16.598 e 6.049 Gg, respectivamente. E Visakhapatnam tem o mínimo, com 45,85 e 16,71 Gg de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>, respectivamente. Segundo os autores, no ano de 2007 a Índia emitiu 57,73 M.T. de CO<sub>2</sub> eq. e 2,52 M.T. de CH<sub>4</sub>. Para mitigar estes impactos ambientais, os autores sugerem a adoção de aterros sanitários. Cerca de 60 a 90% de CH<sub>4</sub> podem ser recuperados em forma de biogás, e 47.474 Gg de carbono podem ser sequestrados como um benefício adicional. As opções do biogás recuperado incluem produção de energia, cogeração e aplicação direta como combustível de alta qualidade.

Ahmed *et al.* (2014) desenvolveram um estudo no aterro sanitário de Seelong, na Malásia. A produção de biogás proveniente do aterro, usando o modelo IPCC, resultou na coleta de 10.000 toneladas de biogás estimados por ano. Os lucros obtidos foram cerca de 7,6 vezes maiores do que os ganhos sem o modelo proposto (US \$ 1,89 milhão/ano, contra US \$ 248.000/ano). Este aumento deve-se a utilização de turbinas a vapor para a cogeração, com vantagens em eficiência e robustez. A cogeração proposta é de 2.420 toneladas de equivalentes de petróleo, com cerca de 0,0035% da produção total de energia da Malásia. Com a utilização do biogás, a redução nacional dos GEE é cerca de 0,007%. Os autores sugerem a implementação desta tecnologia nos demais aterros sanitários do país.

Chacartegui *et al.* (2015) analisaram o potencial de geração de biogás em uma estação de tratamento de RSU, na província de Sevilha, no sul da Espanha. O objetivo do estudo foi identificar o potencial energético associado ao aterro, e o uso do calor fornecido para acelerar a evaporação do lixiviado, reduzindo os riscos do excedente de chorume. O estudo compara as legislações de 2007 e 2014, para o caso do sistema de cogeração implantado no aterro. Segundo os autores, o regime de 2014 restringe as horas máximas e mínimas anuais de operação para cogeração no aterro. Resultando em uso limitado de biogás para geração de eletricidade. Os resultados obtidos mostram que mesmo com uma legislação mais restrita, os valores para os investimentos são aceitáveis e lucrativos. Os valores para a legislação anterior são melhores. A Figura 3 representa o processo de utilização do biogás por cogeração no aterro.

**Figura 3. Diagrama do processo de cogeração do aterro de Sevilha.**



Fonte: Chacartegui *et al.* (2015)

A metodologia utilizada por Chacartegui *et al.* (2015) foi o IPCC, juntamente com o método GasSim (Donavon *et al.* 2010). O motor identificado para o processo foi o Janbacher JMS 420 por apresentar melhor integração com a disponibilidade do biogás. Ao longo de sua vida útil o motor produz 134.843 MWh, com uma operação nominal de 1414 kW, com calor total disponível de 883 kW distribuído em diferentes sistemas: na primeira etapa do intercooler 247 kW, no segundo estágio do intercooler 63 kW, circuito camisa de água 155 kW e água da camisa 418 kW. A capacidade total de evaporação do lixiviado do aterro sob as condições atmosféricas é de 4003 m<sup>3</sup>/ano, podendo chegar a 8000 m<sup>3</sup>/ano com o calor adicional fornecido pela cogeração (cumprindo a meta esperada pelos autores). O estudo mostra que a capacidade de biogás capturado é de aproximadamente 65.000 toneladas em 30 anos. Os resultados mostram TIR com valores acima de 10% para diferentes cenários. Os autores ainda sugerem que, de acordo com a nova legislação, o acúmulo do biogás em razão do armazenamento pode ser utilizado nos anos futuros, ou vendido para consumidores externos.

Boskovic *et al.* (2016) fizeram um estudo sobre o aproveitamento do biogás proveniente de 51 aterros sanitários na Sérvia, com a implementação de plantas de cogeração. Segundo os autores, todos os aterros possuem mais de 100.000 m<sup>3</sup> cada. A modelagem de geração de biogás foi feita por meio da equação da metodologia IPCC. Para a geração de eletricidade os autores consideraram motores do ciclo Otto. Os resultados mostram que o investimento total em 14 usinas de cogeração é lucrativo. Os demais aterros não possuem quantidade suficiente de biogás para a planta proposta. A potência nominal total destas 14 usinas é de 7 MW de energia elétrica, e 7,9 MW de energia térmica, com um período de retorno médio cerca de 61 meses. Além do retorno financeiro, o investimento nestas usinas reduz o CO<sub>2</sub> eq. para 161.000 toneladas por ano. O estudo garante benefícios econômicos e ambientais com a implementação de usinas de cogeração nos 14 aterros identificados.

Kieffer *et al.* (2016) concluíram um estudo sobre a exploração dos RSU somado ao gás natural, com o objetivo de produzir fontes primárias de energia (eletricidade e combustíveis). Foram analisadas de maneira técnica e econômica processos como a DA, a síntese de Fischer-Tropsch (FTS) e o ciclo combinado. A DA produz o biogás e matéria orgânica residual (podendo ser usado como nutrientes para o solo), a FTS converte o gás de síntese resultante em combustíveis líquidos, e o ciclo combinado gera eletricidade. Os equipamentos deste estudo tomaram como referência informações do Laboratório Nacional de Tecnologia de Energia (NETL, 2013), juntamente com o simulador AspenPlus e o método Monte Carlo. Os resultados mostram que ao adicionar o biogás com o gás natural, mais oportunidades podem ser exploradas, afim da obtenção de modelos mais lucrativos e que causem menor impacto ambiental, diversificando portfólios de matéria prima e produtos.

Nascimento *et al.* (2019) realizaram um estudo em um aterro sanitário na cidade de João Pessoa (Nordeste do Brasil). O foco da pesquisa foi o aproveitamento do biogás para geração de eletricidade e evaporação de lixiviado. Os autores aplicaram o método GasSim, com dados reais sobre a disposição de RSU no aterro, com capacidade para 1.100 t/dia de resíduos (com 23% de material reciclável). O motor de preferência para a pesquisa foi o Jenbacher JMS 620 GS-BL, chegando a 216 GWh durante a vida do aterro. O aproveitamento dos gases de exaustão do motor é realizado por uma estação de tratamento do lixiviado, com um fluido circulando em um ciclo secundário. Dessa forma, o calor é transferido para processos que demandam energia térmica, com o objetivo de evaporação do lixiviado. Segundo o estudo, o pico de produção do biogás é de 11.277,28 toneladas em 2028, com produção até 2042. A utilização da cogeração garante resultados econômicos líquidos positivos, com TIR superior a 30% após 26 anos, com lucro de aproximadamente R\$ 32 milhões. Além de ser uma alternativa lucrativa é autossustentável.

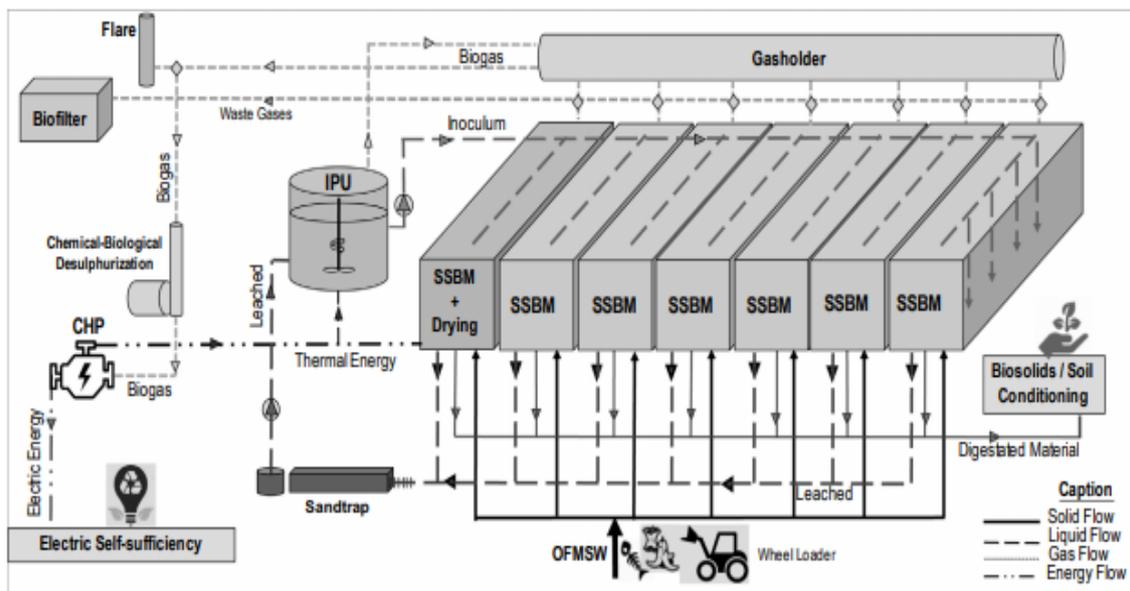
Novelli *et al.* (2019) analisaram a produção de biogás em uma planta administrada no município de Sedegliano (Nordeste da Itália). A planta começou a funcionar em junho de 2016. A principal atividade consiste na exploração da fração orgânica dos RSU e da coleta seletiva do verde florestal. A planta garante a produção de biogás (usado em uma instalação de cogeração), e composto de qualidade, que pode ser usado na agricultura como fertilizantes, após submissão a análises físico-químicas para verificação do estado de fim dos resíduos. A energia térmica é parcialmente recuperada para a produção de água quente para aquecer o digestor anaeróbio, o tanque de coleta do lixiviado e as salas da fábrica. Aproximadamente 10% da eletricidade é autoconsumida para as necessidades dos processos anaeróbios, o valor restante é alimentado diretamente na rede elétrica pública. A planta é caracterizada por 2 motores de cogeração, com potencial de 998 kW, a energia térmica é usada para aquecer os fermentadores para manter uma temperatura de 37°C. Os potenciais da planta são de 31.000 t/ano de resíduos recebidos, 3 milhões N.m<sup>3</sup>/ano de produção de biogás, e 10.300 t/ano de produção de composto. Dessa forma, a planta garante destinação final adequada dos resíduos, boa eficiência energética e impactos ambientais mínimos.

Gallego *et al.* (2019) analisaram termodinamicamente o comportamento de ciclos combinados operando com biogás proveniente de RSU, na cidade de Santo André (Brasil). O município gera 750 t/dia de resíduos. Neste trabalho, o biogás é utilizado por um ciclo combinado composto por um MCI, com sistema de gaseificação de RSU, combinado com sistema de queima de gás de síntese para alimentar um Ciclo Rankine a Vapor. Além de um ORC, que foi proposto, modelado e simulado. O simulador utilizado no trabalho foi o Engineering Equation Solver (EES). Segundo os autores, o valor médio da eficiência exergetica foi de 15,2% e 3.112 kW de potência líquida total para o Ciclo Combinado. Para a potência total do Ciclo Combinado, o motor representou 39,1% de participação, o Ciclo Rankine a Vapor

representou 53,9%, e eficiência média de 11,1%. O ciclo ORC contribuiu em média com 6,9% do total da potência, com eficiência média de 17,2%. A quantidade de CO<sub>2</sub> emitido foi de 1.969 g/kWh e 91,5 g/kWh de CH<sub>4</sub> emitidos. Este ciclo proposto representa flexibilidade em relação a geração de eletricidade, com alta eficiência energética.

Ornelas-Ferreira *et al.* (2020) estudaram estratégias para recuperação de energia pela metanização de um lote de estado sólido (SSBM) para os diferentes usos do biogás. O estudo foi realizado no Rio de Janeiro, Brasil. A planta em escala de demonstração é capaz de tratar 23,5 t/dia da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos (OFMSW). Existem 4 unidades principais, de acordo com a Figura 4: i) 6 reatores de SSBM; ii) 1 reator híbrido que pode ser operado como SSBM ou como reator de secagem térmica; iii) 1 reator anaeróbico completamente misturado para estabilidade do lixiviado e produção do inóculo; iv) unidades de condicionamento de biogás, tratamento e utilização.

**Figura 4. Fluxograma básico da planta proposta.**



Fonte: Ornelas-Ferreira *et al.* (2020)

O biogás produzido pode ser usado como combustível para um MCI combinando calor e energia, para gerar eletricidade, mas seu uso para produção de biometano também foi considerado no estudo. Os autores afirmam que o uso do biometano ao invés do diesel nos caminhões de transporte de resíduos, reduziria a emissão dos GEE em 167 kg CO<sub>2</sub> eq.t<sup>-1</sup> de OFMSW. Segundo o estudo, os melhores cenários de uso do biogás para geração de energia elétrica ou produção de biometano garantem prevenção de 462 e 537 kg CO<sub>2</sub> eq.t<sup>-1</sup> de OFMSW respectivamente.

Thanopoulos *et al.* (2020) realizaram uma análise técnico-econômica de um esquema de tratamento mecânico-biológico integrado, que inclui a DA para cogeração por meio do biogás. O estudo foi realizado no município de Vari-Voula-Vouliagmeni, localizado nos subúrbios ao sul de Atenas, Grécia. Um número total de 34.495,18 toneladas de RSU é gerado na região, que corresponde a 706,62 kg por cidadão ao ano. Os autores compararam 3 tipos de tratamento de

RSU (incineração, gaseificação e DA), de acordo com os requisitos: i) práticas ecologicamente corretas de tratamento de resíduos com as tecnologias mais comprovadas; ii) minimização dos custos operacionais de gestão de resíduos; iii) desempenho de produção de energia suficiente; iv) aceitação pela comunidade local. A DA mostrou ser a mais aplicável para o estudo, por meio de um reator no processo de obtenção do biogás. Um MCI para cogeração é implementado na planta. Após o balanço de massa e energia, o substrato orgânico do lixo doméstico (8.887 toneladas) é misturado com o fluxo de resíduos verdes triturados (9.908 toneladas), juntos, são bombeados para o reator. A produção de biogás registrada foi cerca de 1.700.000 N.m<sup>3</sup> por ano. O motor recebe este biogás e produz cerca de 3.950 MWh<sub>el</sub> de eletricidade, e 4.365 MWh<sub>th</sub> de calor para uma rede de aquecimento local. O projeto possui um retorno financeiro em 100% após 11,5 anos, com tempo de vida de 15 anos. Além de reduzir em 64% a quantidade anual de RSU que vão para o aterro.

Brigagão *et al.* (2021) compararam uma planta de ciclo combinado, sem captura de carbono, a uma com captura de carbono, ambas as plantas operando com o biogás de aterro. Os autores investigaram a viabilidade de conceitos de emissão zero de gás de aterro com a tecnologia de oxi-combustão (captura de carbono). A análise econômica e ambiental foi feita por meio do simulador Aspen-HYSYS. Os resultados ambientais mostram que a planta que utiliza a oxi-combustão em comparação com a planta convencional, reduz as emissões de GEE de 425,90 t CO<sub>2</sub> eq./h para 75,05 t CO<sub>2</sub> eq./h (base GWP100). Quanto aos resultados econômicos a planta convencional mostrou melhores resultados, porém políticas de taxaço para reduço de emissão de GEE pode tornar a planta convencional menos atraente no decorrer dos anos, devido ao aumento dos impostos sobre a emissão de CO<sub>2</sub>. Em alguns países os níveis de tributação já estão sendo amplamente empregados. A planta com captura de carbono é alimentada por 1,08·10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/d gás de aterro, gerando 85,33 MW de potência, podendo suprir a demanda de aproximadamente 70.000 residências médias nos EUA. Portanto, a planta com captura de carbono, além de garantir mitigaçoões ambientais, pode ser lucrativa no decorrer dos anos, envolvendo benefícios sociais e de saúde.

Todos os estudos identificados neste artigo de revisão sistemática corroboram com a utilização do biogás como solução energética, evitando o acúmulo exacerbado dos RSU como tendência mundial na sociedade moderna. Além das mitigaçoões ambientais alcançadas. Os estudos identificados podem servir como referência para aplicação em diversos lugares do mundo, afim de diversificar a matriz energética global. As diversas tecnologias incorporadas e adaptadas ao uso do biogás proveniente da matéria orgânica, comprovam de maneira contundente a mentalidade de eficiência e sustentabilidade. Dessa maneira, a demanda por pesquisas neste sentido tende a estar cada vez mais presentes no cotidiano.

#### 4. CONCLUSÃO

Por meio dos artigos apresentados neste estudo, e das referências utilizadas na literatura, constatou-se a importância da utilização desta fonte alternativa e renovável de energia. O biogás tem uma aplicação extremamente flexível, podendo ser incorporado a diversos sistemas termodinâmicos para fins energéticos. Como mostrado ao longo deste trabalho, diversas pesquisas buscam soluções para o acúmulo de RSU, considerando também a reduço dos impactos ambientais.

A estratégia de incentivar o uso do biogás por meio desta revisão sistemática, busca contribuir para a literatura científica deste ramo, com base em valores obtidos por meio dos

estudos identificados. Ainda existem muitas possibilidades de aplicação do biogás proveniente da matéria orgânica dos RSU. Para isto, estudos futuros deverão receber incentivos para melhorar ainda mais os processos de eficiência energética e mitigações ambientais, com o objetivo de diminuir o tempo de retorno financeiro dos investimentos empregados nos trabalhos desenvolvidos.

Experiências de sucesso em outras regiões do mundo podem ser estendidas e adaptadas para o Brasil, principalmente no momento atual de reduzida geração hidrelétrica (e consequente bandeira vermelha na fatura elétrica), com benefícios para o governo e para a população. O aproveitamento energético do biogás traz vantagens econômicas e ambientais, reduzindo a sobrecarga das concessionárias de energia elétrica.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas de produtividade, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado.

## REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8419: apresentação de projetos de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1983.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama de resíduos sólidos no Brasil, 2020. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso: 18 junho 2021.

AHMED, S.I., JOHARI, A., HASHIM, H., MAT, R., LIM, J.S., NGADI, N., ASMADI, A. 2015. “Optimal landfill gas utilization for renewable energy production, Environ”. *Progress Sustain. Energy*, v. 34, n. 1, pp. 289–296.

BALCAZAR, J.G.C., DIAS, R.A., BALESTIERI, J.A.P., 2013, “Analysis of hybrid waste-to-energy for medium-sized cities”. *Energy (Oxford)*, v. 55, n. 1, pp. 728–741.

BHASKAR, T., STEELE, P.H., 2015. “Thermo-chemical conversion of biomass”. *Bioresource Technology*. v. 178, pp. 1.

BOSKOVIC, G. *et al.* (2016), “Co-Generation Potentials of Municipal Solid Waste Landfills in the Republic of Serbia”. *Thermal Science*, v. 20, n. 4, pp. 1271-1281.

BRIGAGÃO, G. V., MEDEIROS, J. L. D., ARAÚJO, O. D. F., MIKULCIC, H., DUIC, N. 2021. “A zero-emission sustainable landfill-gas-to-wire oxyfuel process: Bioenergy with carbon capture and sequestration”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 138, (Mar), 110686.

CARNEIRO, D. R. C. “Viabilidade técnica e económica de uma unidade centralizada de codigestão anaeróbia de resíduos orgânicos”. 2009. 167f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) - Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto, Portugal. 2009. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10216/66701>. Acesso: 27 maio 2021.

CHACARTEGUI, R., CARVALHO, M., ABRAHÃO, R., BECERRA, J. 2015. “Analysis of a CHP plant in a municipal solid waste landfill in the South of Spain”. *Applied Thermal Engineering*. V. 91, pp. 706–717.

CHAI, X., MAHAJAN, D., TONJES, D. J. 2016. “Methane emissions as energy reservoir: context, scope, causes and mitigation strategies”. *Progress in Energy and Combustion Science*. v. 56. pp. 33-70.

DONOVAN, M., BATESON, T., GRONOW, J.R., VOULVOULIS, N. 2010. “Modelling the behaviour of mechanical biological treatment outputs in landfills using the GasSim model, Sci”. *Total Environ*. v. 408, n. 8, pp. 1979-1984.

EMUN, F., GADALLA, M., MAJOZI, T., BOER, D., 2010. “Integrated gasification combined cycle (IGCC) process simulation and optimization”. *Comp. Chem. Eng*. v. 34, pp. 331– 338.

GALLEGO, A., KUBO, H., GUTIERREZ-GOMEZ, A. C., BERECHÉ, R. P., NETO, A. P., ROCHA, A. D. 2019, “Thermodynamic Analysis of Behavior in Combined Cycles Operating with Biogas and Municipal Solid Waste”. *International Journal of Thermodynamics (IJOT)*. v. 22, n. 2, pp. 74-82.

IEA - AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA. 2019. “Relatório de status de energia global de CO<sub>2</sub>”. “As últimas tendências em energia e emissões em 2018”. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-energy-co2-status-report-2019>. Acesso: 18 junho 2021.

KIEFFER, M., BROWN, T., BROWN, R. 2016. “Flex fuel polygeneration: integrating renewable natural gas into Fischer-Tropsch synthesis”. *Applied Energy*. v. 170, pp. 208–218.

KUMAR, A., SHARMA, M.P., 2014. “GHC emission and carbono sequestration potencial from MSW of Indian metro cities”. *Urban Clim*. v. 8, pp. 30-41.

LUCAS, J. F. R.; MARAN, M. A.; FRARE, L. M. 2010. “Proposta de aproveitamento do biogás gerado no aterro sanitário de Foz do Iguazu – PR”. *XIII Congresso de Engenharia Química. 2010*. Disponível em: <https://xdocs.com.br/doc/cobeq-biogas-final-corrigido-vqoewex572o6>. Acesso: 26 maio 2021.

MILANI, M., MONTORSI, L., STEFANI, M. 2014. “An integrated approach to energy recovery from biomass and waste: anaerobic digestion gasification-water treatment”. *Waste Manag Res*. v. 32, pp. 614–625.

MORIN, P., MARCOS, B., MORESOLI, C., LAFLAMME, C.B. 2010. “Economic and environmental assessment of the energetic valorization of organic material for a municipality in Quebec, Canada”. *Applied Energy*, v. 87, pp. 275-283.

MOURAD, A. L., GARCIA, E. E., VILHENA, A. 2002, “Avaliação do ciclo de vida: princípios e aplicações”. Campinas: Cetea/Cempre.

NASCIMENTO, D. P., MENEZES, V. L., CARVALHO, M., CHACARTEGUI, R. 2019. “Energy analysis of products and processes in a sanitary landfill”. *IET Renewable Power Generation*. v. 13, pp. 1063–1075.

NETL. “Analysis of natural gas-to liquid transportation fuels via Fischer– Tropsch”.2013. *Washington, DC: U.S. DOE; 2013*.

NIDONI, P. G. 2017. “Incineration Process for Solid Waste Management and Effective Utilization of By Products”, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, v. 4, n. 12, pp. 378-382.

NISKANEN, A., VARRI, H., HAVUKAINEN, J., UUSITALO, V., HORTTANAINEN, M., 2013. “Enhancing landfill gas recovery”. *Journal of Cleaner Production*, v. 55, pp. 67-71.

NOVELLI, V., GEATTI, P., CECCON, L., GRATTO, S. 2019. “Biomass Exploitation for Energy Supply and Quality Compost Production an Exemplary Case of Circular Economy in The North East of Italy”. *Environmental Engineering and Management Journal*, v. 18, n. 10 (Nov), pp. 2163-2169.

ONU BRASIL. 2018. “Humanidade produz mais de 2 bilhões de toneladas de lixo por ano, diz ONU em dia mundial”. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/humanidade-produz-mais-de-2-bilhoes-de-toneladas-de-lixo-porano-diz-onu-em-dia-mundial/>. Acesso: 27 maio 2019.

ORNELAS-FERREIRA, B., LOBATO, L.C.S., COLTURATO, L.F.D., TORRES, E.O., POMBO, L.M., PUJATTI, F.J.P., ARAÚJO, J.C., CHERNICHARO, C.A.L., 2020. “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, pp. 1976-1983.

PERALTA-YAHYA, P.P., ZHANG, F., DEL CARDAYRE, S.B., KEASLING, J.D., 2012. “Microbial engineering for the production of advanced biofuels”. *Nature* v. 488, pp. 320–328.

PEREIRA, A. S., SHITSUKA, D. M., PARREIRA, F. J., SHITSUKA, R. 2018. “Metodologia da pesquisa científica”. Universidade Federal de Santa Maria. Disponível em: [https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/358/2019/02/Metodologia-da-Pesquisa-Cientifica\\_final.pdf](https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/358/2019/02/Metodologia-da-Pesquisa-Cientifica_final.pdf). Acesso: 18 junho 2021.

PIÑAS, J.A.V., VENTURINI, O.J., LORA, E.E.S., DE OLIVEIRA, M.A., ROALCABA, O.D.C., 2016. “Aterros sanitários para geração de energia elétrica a partir da produção de biogás no Brasil: comparação dos modelos LandGEM (EPA) e Biogás (Cetesb)”. *Revista Brasileira de Estudos de População*, v. 33, n. 1, pp. 175–188.

RUBIO-ROMERO, J.C., LOPEZ-ARQUILLOS, A., ARJONA-JIMÉNEZ, R., 2013. “Profitability analysis of biogas recovery in Municipal Solid Waste landfills”. *Journal of Cleaner Production*, v. 55, pp. 84-91.

SABBAS, A., POLETINI, A., POMI, R., ASTRUP, T., HJELMAR, O., MOSTBAUER, P., CAPPAL, G., MAGEL, G., SALHOFER, S., SPEISER, C., HEUSS-ASSBICHLER, S., KLEIN, R., LECHNER, P., 2003. “Management of solid waste incineration residues”. *Waste Manage*, v. 23, pp. 61–88.

SALOMON, K. R. 2007. “Avaliação Técnico-econômica e ambiental da utilização do biogás proveniente da vinhaça em tecnologias para geração de eletricidade.” *Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.* Itajubá. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/1721>. Acesso: 27 maio 2021.

SARAVIA, J.R.; GALAZ, J.R.V.; VILLENS, A.C.; ORTIZ, J.N. 2012. “Technical and Economical Evaluation of Landfill-Biogas Fired Combined Cycle Plants”. *Distrib. Gener. Altern. Energy J.*, v. 27, pp. 7–25.

STOCKMANN, A. J.; CAETANO, M. O.; GOMES, L. P. 2016. “Análise de ciclo de vida da destinação da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos: codigestão anaeróbia, digestão anaeróbia e aterros sanitários”. In.: *7º FORUM INTERNACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS. 15 a 17 junho de 2016 Porto Alegre, RS. Anais*. Disponível em: <http://www.institutoventuri.org.br/ojs/index.php/firs/article/view/51>. Acesso: 27 maio 2021.

TALYAN, V., DAHIVA, R.P., SREEKRISHNAN, T.R., 2008. “State of municipal solid waste management in Delhi, the capital of India”. *Waste Manage*, v. 28, pp. 1276–1287.

THANOPOULOS, S., KARELLAS, S., KAVRAKOS, M., KONSTANTELLOS, G., TZEMPELIKOS, D., KOURKOUMPAS, D. 2020. “Analysis of Alternative MSW Treatment Technologies with the Aim of Energy Recovery in the Municipality of Vari-Voula-Vouliagmeni”. *Waste and Biomass Valorization*. v. 11, pp. 1585–1601.

WALKER, L., CHARLES, W., CORD-RUWISCH, R., 2009. “Comparison of static, in-vessel composting of MSW with thermophilic anaerobic digestion and combinations of the two processes”. *Bioresour. Technol.*, v. 100, n. 16, pp. 3799–3807.