

ESTRATÉGIA PARA ALCANÇAR O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL: UTILIZAÇÃO DE BIOGÁS EM ATERROS SANITÁRIOS

Victor Hugo Lobo Correia ¹
Renata Portela de Abreu ²
Danielle Bandeira de Mello Delgado ³
Monica Carvalho ⁴

RESUMO

Atualmente, a redução da dependência de combustíveis fósseis é fundamental, principalmente devido aos impactos ambientais. Em vista disso, a participação das energias renováveis na matriz energética mundial tem aumentado significativamente nos últimos anos. Dentre elas, o biogás gerado em aterros sanitários é um recurso valioso e que muitas vezes é subutilizado. Neste contexto, o presente trabalho apresenta uma revisão da literatura sobre o aproveitamento do biogás gerado em aterros sanitários para a produção de energia. A revisão foi realizada com base em artigos publicados em periódicos científicos da base Periódicos CAPES, entre o período de 2014 a 2019. Por meio da revisão, foi possível analisar as principais metodologias, aplicações e tecnologias de aproveitamento empregadas para a geração de energia renovável. Devido ao vasto número de aplicações, pode-se concluir que o biogás é um subproduto bastante versátil, sendo possível a produção de energia elétrica, térmica e biocombustíveis.

Palavras-chave: Aterro sanitário, Biogás, Sustentabilidade, Energia renovável.

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, diversos estudos científicos vêm alertando a população mundial sobre as consequências do aquecimento global, e a necessidade de mitigar seus efeitos negativos. De acordo com o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) (IPCC, 2018), é necessário limitar o aquecimento do planeta em 1,5°C em relação ao período pré-industrial, caso contrário, o aquecimento acima deste valor provocará graves consequências à sociedade e ao meio ambiente. Para isso, será necessário zerar as emissões de dióxido de carbono até 2050. Mesmo com diversas iniciativas de países desenvolvidos, como o Protocolo de Kyoto e o Acordo de Paris, as emissões continuam a crescer (OLIVIER *et al.*, 2017).

¹ Mestrando, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, victorloboc@gmail.com;

² Mestranda, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, re.portela96@gmail.com;

³ Professora orientadora: MSc, Instituto Federal da Bahia, campus Paulo Afonso, danielle.delgado@ifba.com;

⁴ Professora orientadora: PhD, Centro de Energias Alternativas e Renováveis, Universidade Federal da Paraíba, monica@cear.ufpb.br.

Segundo Olivier *et al.* (2017), as emissões de dióxido de carbono em todo mundo aumentaram de 22,45 Gt em 1990 para 35,76 Gt em 2016. Em vista disto, a busca pelo desenvolvimento sustentável tem se tornado cada vez mais importante em diversos setores da sociedade, e em especial, o setor energético. O uso de equipamentos e combustíveis mais eficientes e com um menor impacto ambiental deve ser considerado principalmente por órgãos públicos, de tal maneira que isto afeta diretamente a percepção dos consumidores e agrega valor ao recurso adotado (DELGADO *et al.*, 2018).

A fim de reduzir a dependência de combustíveis fósseis na matriz energética, diversos países têm investindo massivamente no uso de fontes renováveis de energia como eólica, solar, e biomassa, entre outras. Entre os anos de 2013 e 2017, os investimentos realizados na capacidade de geração de energia a partir de fontes renováveis foram aproximadamente o dobro dos investimentos em geração através de combustíveis fósseis, em todo o mundo (GIELEN *et al.*, 2019). Neste cenário, o uso do biogás vem crescendo consideravelmente em todo o mundo. De acordo com a European Biogas Association (2018), nos últimos cinco anos foram instaladas 3.122 novas plantas de biogás na Europa, o que representou um aumento de 18% no período. Este percentual é liderado pela Alemanha, país europeu com o maior número de plantas de biogás em operação. Já no Brasil, houve um crescimento significativo na geração de energia elétrica através do biogás. A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (BRASIL, 2017a), por meio do Balanço Energético Nacional, mostrou que a capacidade instalada no país subiu de 32 MW em 2008 para 135 MW em 2017.

No Brasil, as principais fontes de produção de biogás são: aterros sanitários (51%), indústrias de alimento ou bebidas (25%), suinocultura (14%) e lodo de esgoto (6%) e outros (3%) (BRASIL, 2017b). De acordo com Khan *et al.* (2017), o biogás é resultado da atividade biológica que ocorre durante a decomposição de resíduos orgânicos em meio anaeróbio, isto é, sem a presença de oxigênio. A composição básica do biogás consiste de 60% de metano (CH₄), 35% de gás carbônico (CO₂) e 5% de outros gases como nitrogênio, amônia, dentre outros (PALACIO *et al.*, 2019; SANTOS *et al.*, 2018). O metano, assim como outros gases de efeito estufa, quando lançado na atmosfera pode causar grande impacto ambiental. Segundo o IPCC (2013), este gás tem o potencial de poluição 34 vezes superior quando comparado ao dióxido de carbono. Estima-se que a decomposição de matéria orgânica em condições anaeróbicas libera entre 590 milhões e 800 milhões de toneladas de metano na atmosfera por ano (LEMOS *et al.*, 2018).

Porém, o biogás surge como uma alternativa sustentável para aliar a produção de serviços energéticos e a redução da emissão de metano na atmosfera (CHACARTEGUI *et al.*, 2015). O biogás purificado é um produto bastante versátil, podendo ser utilizado nas mais diversas aplicações. Coelho *et al.* (2018) afirmam que pode ser utilizado para a produção de energia elétrica e térmica em sistemas de cogeração. Os autores ainda mostram que quando o biogás atinge (através da purificação) uma concentração de metano superior a 95% passa a ser biometano. Este produto pode ser utilizado como substituto do gás natural e do diesel em veículos e máquinas pesadas; e também pode ser injetado nas redes de distribuição de gás natural. Além disso, é possível armazenar o biogás como matéria-prima ou ar comprimido, o que facilita suas possíveis aplicações (LEMOS *et al.*, 2018). Alguns fatores como objetivos de projeto e políticas energéticas são fundamentais para determinar o uso final mais adequado do biogás e conseqüentemente os tipos de tecnologias de aproveitamento a serem utilizadas.

Resíduos sólidos gerados nos grandes centros urbanos geralmente são depositados em aterros sanitários, pois estes locais consistem em uma opção sustentável e economicamente viável (WESTLAKE, 2014). Devido à decomposição dos resíduos orgânicos, estes aterros produzem grandes quantidades de biogás. De acordo com Nascimento *et al.* (2019), o biogás produzido pode ser coletado e utilizado para a geração de energia, o que faz deste gás uma valiosa fonte de energia renovável. Os autores ainda afirmam que aproveitando o biogás para fins energéticos, a emissão direta de gases nocivos na atmosfera seria evitada. Barros, Filho e Silva (2014) constataram que a geração de energia elétrica a partir do biogás de aterros se torna viável economicamente em cidades com pelo menos 200.000 habitantes.

O objetivo deste trabalho foi realizar uma revisão de literatura a cerca do uso do biogás em aterros sanitários para a geração de serviços energéticos, destacando as principais aplicações, tecnologias e os processos envolvidos. Assim, o estudo visa mostrar o potencial do aproveitamento do biogás gerado, e identificar tendências e áreas pouco exploradas em termos de pesquisa e desenvolvimento, com vistas ao desenvolvimento sustentável.

METODOLOGIA

A metodologia utilizada para a realização deste estudo consistiu em um levantamento e análise de artigos científicos publicados em periódicos nacionais e internacionais nos

últimos cinco anos. A busca foi realizada na base de dados Periódicos CAPES, combinando os descritores “Aterro”, “Biogás”, “Energia Renovável” e “Cogeração”, bem como sinônimos e termos equivalentes na língua inglesa.

Para a pesquisa foram incluídos estudos teóricos e experimentais que tiveram como objetivo o aproveitamento do biogás para fins energéticos. Dentro deste escopo estão artigos de análise de viabilidade, projetos, análises econômicas e estudos de desempenho de plantas de aproveitamento do biogás. Foram excluídos artigos de revisão bibliográfica e estudos que não utilizaram o biogás para geração de qualquer tipo de energia.

Inicialmente, os artigos foram selecionados de acordo com os critérios de inclusão e exclusão, e dentro do período determinado. Em seguida, os estudos considerados relevantes dentro da temática da pesquisa foram obtidos e investigados a fim de incluí-los na sistematização de dados. Posteriormente, para cada artigo foram analisadas as seguintes características: metodologia aplicada (experimental, análise termodinâmica e outras), aplicação utilizada (energia elétrica, biometano e outras) e as tecnologias de aproveitamento (motor a combustão, turbina e outras). Por fim, os dados obtidos foram discutidos e considerações foram feitas.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A busca realizada na base de dados Periódicos CAPES forneceu um total de 161 artigos. Através da leitura dos títulos e resumos, observando os critérios de exclusão, 43 trabalhos foram considerados relevantes dentro da temática e potencialmente elegíveis para o estudo. Após a leitura na íntegra, 17 artigos que atenderam os critérios de inclusão foram selecionados.

Os trabalhos selecionados foram publicados entre os anos de 2014 e 2019 e foram desenvolvidos nos seguintes países: Argélia (1), Bolívia (1), Brasil (3), China (2), Itália (2), Malásia (2), Irã (1), Coreia do Sul (1), Espanha (2), Turquia (1) e EUA (1). A seguir, os estudos foram brevemente apresentados, destacando as metodologias, aplicações, tecnologias utilizadas e resultados alcançados.

Ahmed *et al.* (2014) aplicaram um modelo de otimização, baseado na programação linear inteira mista (MILP), no planejamento da geração de energia renovável através do biogás em um aterro sanitário localizado em Johor, Malásia. O modelo fornece os equipamentos adequados e a quantidade de energia renovável produzida com o objetivo de

maximizar a receita e minimizar as emissões dos gases do efeito estufa, simultaneamente. Os autores mostram que o cenário ótimo indica o uso do biogás para a produção de energia elétrica e calor em um sistema de cogeração, utilizando turbinas a vapor. O sistema resultou em um lucro 7,6 vezes maior em relação à prática já utilizada pelo aterro, que gerava receita apenas através de créditos de carbono pela queima do biogás.

Chacartegui *et al.* (2015) analisaram o potencial de aproveitamento de biogás em um aterro localizado no sul da Espanha através de um sistema de cogeração. O sistema proposto consistiu em um motor de combustão interna, para a geração de energia elétrica, acoplado a um sistema de evaporação forçada para a produção de calor destinado a desidratação do chorume. Através de uma análise técnico-econômica, os autores mostram que mesmo com uma legislação não favorável, benefícios econômicos ainda foram obtidos através da venda de energia elétrica. Seguindo a mesma linha de pesquisa, Nascimento *et al.* (2019) estimaram a produção de biogás e o potencial de aproveitamento via cogeração para o aterro sanitário metropolitano da cidade de João Pessoa-PB. O estudo mostra que o sistema de cogeração pode gerar até 216 GWh de energia elétrica durante todo seu tempo de operação, que vai de 2003 até 2028, e o calor gerado é suficiente para evaporar todo o chorume produzido no aterro. Além disso, por meio da venda da energia produzida, o aterro pode alcançar um balanço econômico positivo de R\$ 32 milhões para o período de operação.

Zhao *et al.* (2017) estudaram o desempenho econômico da substituição do carvão em uma planta de incineração por biogás gerado em um aterro localizado na China e o uso do calor residual da planta para evaporar o chorume gerado no aterro. A análise foi baseada em dois cenários distintos, os quais consideraram a variação da taxa de evaporação do chorume e a quantidade de biogás utilizada pela planta. Os resultados mostram que o primeiro cenário, no qual a quantidade de biogás é fixa e a taxa de evaporação é definida por funções, apresentou um desempenho econômico superior ao segundo, que considera a taxa de evaporação fixa e a quantidade de biogás definida por funções. A receita alcançada pelo primeiro cenário foi 35% maior que a receita de referência e até 41% do chorume do aterro pode ser evaporado pelo calor residual da planta de incineração, para o mesmo cenário.

Mebarki *et al.* (2015) estudaram o aproveitamento do biogás para a geração de energia elétrica através de células a combustível de óxido sólido (SOFC). Através de modelos matemáticos, a pesquisa analisou como a temperatura, espessura do eletrólito e a concentração de hidrogênio influenciam na densidade energética da célula. Os resultados mostram que a temperatura de 1273 K é ideal para uma densidade energética de 1,4 W/cm²,

na qual é considerada uma boa densidade em vista da espessura do eletrólito e da concentração de hidrogênio utilizados. Também aplicando SOFC, Papurello *et al.* (2015) desenvolveram e testou experimentalmente uma planta piloto para a produção de energia elétrica a partir do biogás. O estudo concluiu que a planta alcançou uma eficiência elétrica em torno de 32% a 36%, e este método de aproveitamento do biogás mostrou-se tecnicamente viável. Já Buonomano *et al.* (2015) mostraram os resultados de uma estudo experimental que utilizou uma célula a combustível de carbonato fundido (MCFC), com capacidade de 1 kW, alimentada por hidrogênio, biogás de aterro e misturas entre eles. Os equipamentos usados no experimento foram instalados na usina elétrica de um aterro localizado em Naples, Itália. Os autores afirmam que com o uso apenas do biogás a célula pode apresentar problemas com sobretensões e o melhor desempenho é alcançado apenas com o uso do hidrogênio. Porém, o uso da mistura entre os dois combustíveis apresentou um desempenho satisfatório, o que pode reduzir os gastos de forma considerável, em vista do baixo custo envolvido na obtenção do biogás.

Uma bomba de calor acionada por um motor alimentado por biogás foi estudada experimentalmente por Wu e Ma (2016). A pesquisa avaliou os efeitos das variações de velocidade do motor em parâmetros como a temperatura dos gases do escapamento, o coeficiente de performance da bomba de calor (COP) e a taxa de energia primária do sistema (PER). Os resultados do experimento mostram que quando o motor opera em 70% a 90% da velocidade nominal, a geração de calor pelo sistema e a taxa da recuperação de calor dos gases do escapamento são relativamente altos. O sistema atingiu os valores máximos de 4,2 e 1,4 para o COP e PER, respectivamente.

Oliveira *et al.* (2017) realizaram uma análise técnico-econômica da utilização do biogás de um aterro para fornecer energia elétrica para uma refinaria de óleo com demanda de 40 MWh. A energia foi gerada através de duas turbinas a vapor abastecidas por caldeiras com capacidade de 340 t/h de vapor. O estudo conclui que utilizando o apenas o biogás como combustível, é possível economizar um total de \$2.6 milhões por ano.

Winslow, Laux e Townsend (2019) investigaram a viabilidade de converter o biogás de aterro em combustível para uma frota de tratores, através de uma análise econômica combinada com a avaliação do ciclo de vida (LCA) para quatro cenários. Os autores concluem que, do ponto de vista econômico e ambiental, o uso do biogás para a geração de energia elétrica para abastecer tratores com propulsão elétrica (substituindo motores diesel) é mais vantajoso do que uso desta energia para substituir a rede principal. O uso do biogás de

aterro como combustível para veículos também foi estudado por Nadatelli *et al.* (2015). O trabalho analisou o potencial da utilização do biogás para abastecer a frota de ônibus urbanos em todos os estados do Brasil. O trabalho se baseou na metodologia proposta pelo IPCC para estimar a quantidade de biogás gerado em aterros por ano, para cada estado brasileiro. Os autores mostram que o Brasil gerou 16.131.857 N.m³/h de biogás, quantidade essa que é suficiente para abastecer a frota de ônibus brasileira, estimada em 107.000 veículos.

Friesenhan *et al.* (2017) compararam três tecnologias de aproveitamento do biogás utilizando as eficiências energética e exergética, e um método simplificado da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), a fim de avaliar os impactos ambientais causados. As tecnologias analisadas, em sistemas de cogeração, foram as seguintes: célula de combustível a hidrogênio, motor a gás alimentado por biogás e motor a gás alimentado por biometano. Baseado na literatura, o estudo implementou o modelo de cada tecnologia no software de simulação de processos químicos *Aspen Plus*. A pesquisa mostra que a célula de combustível a hidrogênio apresentou os melhores resultados em relação à eficiência e as emissões de gases do efeito estufa. O motor alimentado por biogás apresentou desempenho similar, porém células a combustível ainda são uma tecnologia relativamente nova e tendem a evoluir mais no futuro, diferente dos motores a combustão interna.

Bautista e Calvimontes (2017) estudaram o potencial da produção de energia elétrica através do biogás em aterros nas cidades de Santa Cruz, La Paz e Cochabamba na Bolívia. Inicialmente, os autores quantificaram a produção de biogás através do modelo LandGem de primeira ordem, juntamente com dados de coeficientes disponíveis na literatura. Para estimar a quantidade de energia elétrica, o biogás foi usado como combustível para motores de combustão interna com eficiência de 34%. Os resultados mostraram que Santa Cruz gerou a maior quantidade de energia elétrica, 265 GWh, enquanto que La Paz e Cochabamba produziram 215 GWh e 110GWh, respectivamente. Já Tercan, Cabalar e Yaman (2015) realizaram um estudo de caso sobre a geração de energia elétrica a partir do biogás em um aterro localizado na cidade de Gaziantep, Turquia. Na planta do aterro, o gás é coletado através de poços perfurados e conectados a um sistema de tubulações, e então a energia elétrica é produzida através de turbinas a gás. O estudo mostra que nos anos de 2010, 2011 e 2012 foram produzidos 2253 MWh, 1719 MWh e 2836 MWh de energia elétrica, respectivamente.

Hoo, Hashim e Ho (2018) desenvolveram uma cadeia de fornecimento de biometano através da rede de gás natural para diferentes demandas do setor industrial, comercial e

residencial. O modelo desenvolvido pelo os autores é baseado em análises espaciais e econômicas, e foi aplicado no aterro sanitário Seelong localizado no estado de Johor, Malásia. Os resultados mostram que a distância máxima para o fornecimento de biometano para o centro consumidor é de 37 km, utilizando uma tubulação de oito polegadas. Em caso de 20% de aumento no valor do gás natural, essa distância se aproximar a 50 km. Além disso, os autores afirmam que através das tecnologias atuais de conversão, é possível que o biogás alcance a composição padrão do gás natural.

Kim *et al.* (2016) investigaram ciclos de potência que utilizam dióxido de carbono em estado supercrítico como fluido de trabalho, a fim de determinar o mais adequado para instalação em aterros de pequeno e médio porte. Para isso, foi realizada uma comparação entre nove configurações de ciclo supercrítico para o aproveitamento do calor residual de uma turbina a gás de 5 MW alimentada por biogás. A pesquisa avaliou o desempenho termodinâmico de cada ciclo e realizou análises de sensibilidade. O ciclo de aquecimento duplo com fluxo dividido produziu a maior quantidade de trabalho líquido dos ciclos estudados, correspondendo a um valor de 3,23 MW, porém este ciclo apresentou desvantagens relevantes, tais como uma grande quantidade de componentes e a necessidade de estratégias operacionais complexas. Já o ciclo de aquecimento parcial produziu 2,75 MW de trabalho líquido com uma configuração mais simples que facilita sua operação, e por isso foi considerado pelos autores adequado para a instalação em aterros.

Gholizadeh, Vajdi e Mohammadkhani (2019) investigaram um ciclo de Rankine orgânico (ORC) modificado através da análise termodinâmica e termoeconômica a fim de determinar o desempenho e custos do sistema. O ciclo é acoplado a uma turbina a gás alimentada por biogás que fornece calor para o ORC. Os autores também realizaram um estudo de sensibilidade dos parâmetros operacionais para caracterizar o desempenho do ciclo quando submetido a perturbações externas. Os resultados mostram que as eficiências energética e exegética podem ser maximizadas através da relação de pressão do compressor de ar e da pressão de entrada da turbina a vapor. O sistema analisado produziu um total de 1368 kW de energia elétrica a um custo de 17,20 \$/GJ

Verificou-se que há uma vasta bibliografia no tema do aproveitamento do biogás, especialmente biogás gerado em aterros sanitários, tema deste estudo. Com os resultados obtidos nesta pesquisa bibliográfica aprofundada, pode-se obter uma ampla perspectiva sobre o uso do biogás de aterro e também um ponto de partida baseado em resultados de literatura científica. No caso de aterros sanitários, a geração de energia elétrica (ou outra forma de

energia que reduza ou evite a emissão de gases de efeito estufa, de acordo com o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo - MDL) pode levar à comercialização de Reduções Certificadas de Emissão (RCE), ou créditos de carbono, sendo que cada crédito corresponde a 1 tCOe (tonelada de carbono equivalente) que deixaram de ser lançados para a atmosfera. Por meio da adaptação e extensão de experiências de sucesso pode-se alcançar conceitos de desenvolvimento sustentável, com benefícios ambientais e até mesmo econômicos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve o objetivo de mostrar o potencial do aproveitamento do biogás gerado em aterros por meio de uma revisão bibliográfica de artigos publicados entre 2014 e 2019. A pesquisa buscou trabalhos que aplicaram o biogás para a produção de algum tipo de energia. Ao final da pesquisa, os principais pontos de 17 artigos foram brevemente explanados.

A análise técnico-econômica foi a metodologia mais utilizada nos artigos, principalmente para avaliar a viabilidade de novos projetos. Algumas pesquisas ainda empregaram a Avaliação do Ciclo de Vida a fim de quantificar o impacto ambiental da geração de energia. As aplicações utilizadas comprovam a versatilidade do biogás gerado em aterro. O uso para fins de cogeração (produção de eletricidade e energia térmica) foi a mais empregada.

Nos artigos estudados, foram utilizadas as seguintes tecnologias de produção de energia: células a combustível, motores de combustão interna, turbinas a gás e turbinas a vapor. Dentre essas, a célula a combustível é considerada a tecnologia mais promissora, devido sua elevada eficiência que pode alcançar valores superiores a 50%; enquanto que a eficiência de motores de combustão interna fica em torno de 25% a 40%. Além disso, a célula a combustível é uma tecnologia relativamente nova, e apresenta um grande potencial de evolução.

Pesquisa e desenvolvimento na área de energias renováveis são fundamentais para o desenvolvimento econômico de uma forma sustentável. O aproveitamento do biogás em aterros sanitários é um grande exemplo de desenvolvimento sustentável, pois através desta prática é possível gerar riquezas, por meio de serviços energéticos, e reduzir o impacto ambiental causado pela a emissão de gases nocivos a atmosfera.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelas bolsas de Produtividade em Pesquisa (nº 307394/2018-2) e de Mestrado (nº 132407/2019-1), e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de Mestrado.

REFERÊNCIAS

AHMED, Saeed Isa *et al.* Optimal landfill gas utilization for renewable energy production. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, [s.l.], v. 34, n. 1, p.289-296, 24 mar. 2014. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/ep.11964>.

BAUTISTA, Juan Pablo Vargas; CALVIMONTES, Jorge. EVALUATION OF LANDFILL BIOGAS POTENTIAL IN BOLIVIA TO PRODUCE ELECTRICITY. **Investigacion & Desarrollo**, [s.l.], v. 17, n. 1, p.55-62, 31 jul. 2017. Universidad Privada Boliviana. <http://dx.doi.org/10.23881/idupbo.017.1-5i>.

BRASIL. EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Impactos da participação do biogás e do biometano na matriz energética**. In: IV FÓRUM DO BIOGÁS, São Paulo, 17-18 de outubro de 2017. São Paulo, out. 2017b.

BRASIL. EPE: Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2017**: Ano base 2016. Rio de Janeiro, 2017a.

BUONOMANO, Annamaria *et al.* Molten carbonate fuel cell: An experimental analysis of a 1kW system fed by landfill gas. **Applied Energy**, [s.l.], v. 140, p.146-160, fev. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.11.044>.

CHACARTEGUI, Ricardo *et al.* Analysis of a CHP plant in a municipal solid waste landfill in the South of Spain. **Applied Thermal Engineering**, [s.l.], v. 91, p.706-717, dez. 2015. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.08.069>.

COELHO, Suani Teixeira *et al.* **Tecnologias de produção e uso de biogás e biometano**: Part. I Biogás; Part. II Biometano. São Paulo: IEE-usp, 2018.

DELGADO, Danielle Bandeira de Mello *et al.* Analysis of Biomass-fired Boilers in a Polygeneration System for a Hospital. **Frontiers in Management Research**. [s.l.], v. 2, n. 1, p. 1-13, jan. 2018. DOI: <https://dx.doi.org/10.22606/fmr.2018.21001>.

EBA – European Biogas Association. **EBA Statistical Report 2018**. Bélgica, 2018.

FRIESENHAN, Christian *et al.* Streamlined life cycle analysis for assessing energy and exergy performance as well as impact on the climate for landfill gas utilization technologies.

Applied Energy, [s.l.], v. 185, p.805-813, jan. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.097>.

GHOLIZADEH, Towhid; VAJDI, Mohammad; MOHAMMADKHANI, Farzad. Thermodynamic and thermoeconomic analysis of basic and modified power generation systems fueled by biogas. **Energy Conversion and Management**, [s.l.], v. 181, p.463-475, fev. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.011>.

GIELEN, Dolf *et al.* The role of renewable energy in the global energy transformation. **Energy Strategy Reviews**, [s.l.], v. 24, p.38-50, abr. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.esr.2019.01.006>.

HOO, Poh Ying; HASHIM, Haslenda; HO, Wai Shin. Opportunities and challenges: Landfill gas to biomethane injection into natural gas distribution grid through pipeline. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 175, p.409-419, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.193>.

IPCC, 2013. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

IPCC. Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. **Relatório Especial sobre Aquecimento Global de 1.5°C (SR15)**. 2018.

KIM, Min Seok *et al.* Study on the supercritical CO₂ power cycles for landfill gas firing gas turbine bottoming cycle. **Energy**, [s.l.], v. 111, p.893-909, set. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.014>.

LEMONS, Mário Luiz Freitas *et al.* BIOGÁS DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS: PANORAMA E PERSPECTIVAS. **BNDDES Setorial**, N. 47, Rio de Janeiro, v. 1, n. 47, p.221-276, mar. 2018. Disponível em: <<http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/15221>>. Acesso em: 29 jul. 2019.

MEBARKI, B. *et al.* Theoretical estimation of the production of biogas from the landfill of Batna city and its electrical conversion by a SOFC. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s.l.], v. 40, n. 39, p.13799-13805, out. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.03.062>.

NADALETTI, W.c. *et al.* Potential use of landfill biogas in urban bus fleet in the Brazilian states: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 41, p.277-283, jan. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.052>.

NASCIMENTO, Dayse Pereira *et al.* Energy analysis of products and processes in a sanitary landfill. **IET Renewable Power Generation**, [s.l.], v. 13, n. 7, p.1063-1075, 20 maio 2019. Institution of Engineering and Technology (IET). DOI: <http://dx.doi.org/10.1049/iet-rpg.2018.5777>.

OLIVEIRA, Anderson José Rangel de *et al.* Analysis of Waste Biogas (Landfills) applied to Power Generation. **Revista de Ingeniería Energética**, [s.l.], v. 38, n. 3, p.175-187, maio 2017.

Olivier J.G.J., *et al.* (2017). **Trends in global CO₂ and total greenhouse gas emissions: 2017 report**. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague. Disponível em: <https://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/pbl-2017-trends-in-global-co2-and-total-greenhouse-gas-emissions-2017-report_2674.pdf>. Acesso em julho de 2019.

PALACIO, José Carlos Escobar *et al.* Municipal Solid Waste Management and Energy Recovery. In: AL-BAHADLY, Ibrahim H. (Ed.). **Energy Conversion: Current Technologies and Future Trends**. [s.l.]: Intechopen, 2019. p. 128-146. Disponível em: <<https://www.intechopen.com/books/energy-conversion-current-technologies-and-future-trends>>. Acesso em agosto de 2019.

PAPURELLO, Davide *et al.* Waste to energy: Exploitation of biogas from organic waste in a 500 Wel solid oxide fuel cell (SOFC) stack. **Energy**, [s.l.], v. 85, p.145-158, jun. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.03.093>.

SANTOS, José J.C.S. *et al.* 6 - Geothermal Power. In: YAHYAOU, Imene (Ed.). **Advances in Renewable Energies and Power Technologies: Volume 2: Biomass, Fuel Cells, Geothermal Energies, and Smart Grids**. [s.l.]: Elsevier, 2018. p. 173-205.

TERCAN, Safak Hengirmen; CABALAR, Ali Firat; YAMAN, Gokhan. Analysis of a landfill gas to energy system at the municipal solid waste landfill in Gaziantep, Turkey. **Journal Of The Air & Waste Management Association**, [s.l.], v. 65, n. 8, p.912-918, 14 abr. 2015. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/10962247.2015.1036178>.

WEREKO-BOBBY, C. Y.; HAGEN, E. B. **Biomass conversion and technology**. Editora John Wiley & Sons. P. 2-224. New York, 2000.

WESTLAKE, K.. **Landfill Waste Pollution and Control**. [s.l.]: Elsevier Science, 2014. 135 p.

WINSLOW, Kevin M.; LAUX, Steven J.; TOWNSEND, Timothy G.. An economic and environmental assessment on landfill gas to vehicle fuel conversion for waste hauling operations. **Resources, Conservation And Recycling**, [s.l.], v. 142, p.155-166, mar. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.11.021>.

WU, Jiyang; MA, Yimin. Experimental study on performance of a biogas engine driven air source heat pump system powered by renewable landfill gas. **International Journal Of Refrigeration**, [s.l.], v. 62, p.19-29, fev. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.08.023>.

ZHAO, Rui *et al.* Economic potential of leachate evaporation by using landfill gas: A system dynamics approach. **Resources, Conservation and Recycling**, [s.l.], v. 124, p.74-84, set. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.04.010>.