

Modelos de biodigestores utilizados no mundo no contexto de cidades inteligentes

Models of biodigesters used in the world in the context of smart cities

Modelos de biodigestores utilizados en el mundo en el contexto de las ciudades inteligentes

Letícia Morais Neres

Docente, Universidade Nove de Julho, Brasil
leticianeresbio@uni9.edu.br

Heidy Rodriguez Ramos

Professora Doutora, Universidade Nove de Julho, Brasil
heidyrr@uni9.pro.br

Milena de Moura Régis

Professora Mestra, Universidade Nove de Julho, Brasil
milenaregis@uni9.pro.br

RESUMO

O desenvolvimento das cidades é marcado pelos desafios associados com a demanda de energia em seus diversos níveis, bem como pela necessidade de uma gestão eficiente de resíduos. Nos próximos 30 anos está previsto um aumento da populacional global e um aumento dessa população em áreas urbanas no mundo, acentuando tais gargalos. Nesse contexto, os resíduos orgânicos podem servir de fonte energética limpa e renovável a partir da produção do biogás, o qual é um subproduto da digestão anaeróbia, e que pode ser convertido em energia elétrica e energia térmica, a partir de sua queima para uso em aquecimento e como combustível. Esse gás é produzido em biodigestores, equipamentos fechados em uma câmara com compartimentos de entrada de substrato e saída do produto final do processo. A partir de uma revisão bibliográfica, o presente estudo buscou os principais modelos de biodigestores utilizados na Europa, Ásia, África e América do Sul, visando apresentar o cenário atual da aplicação desses equipamentos no contexto de cidades inteligentes. Os resultados indicam uma diferença na instalação dos biodigestores entre os continentes. Enquanto a Europa conta com modelos de alta tecnologia, na África, por exemplo, são comuns biodigestores de estrutura e materiais básicos, tornando a produção de biogás ineficiente. Concluiu-se que, assim como observado com outras fontes energéticas e modelos de gestão de resíduos, os países com melhor estrutura e recursos, conseguem desenvolver melhor o uso dos biodigestores, aumentando sua qualidade de vida, enquanto países mais pobres não conseguem explorar totalmente o mesmo potencial de produtividade.

PALAVRAS-CHAVE: Biogás. Biodigestores. Cidades inteligentes.

1. INTRODUÇÃO

O mundo enfrentará nas próximas décadas um aumento populacional intenso, o qual irá desencadear ações múltiplas para o fornecimento de elementos básicos para a vida das civilizações humanas, de acordo com a ONU (2019a). Atrelado a essa problemática, também é previsto o aumento drástico das áreas urbanas no Planeta, e um dos grandes desafios para minimizar crises que podem vir a acontecer no futuro é a oferta de energia eficiente e sustentável (ONU, 2019b).

É importante ressaltar que os efeitos do crescimento populacional e da urbanização tem por característica desencadear o aumento expressivo da quantidade de resíduos gerados nas cidades (DAS et al., 2019). Portanto, é necessário que as populações e seus representantes estejam atentos às tendências de crescimento diário de produtividade de lixo, que devem atingir picos em 2025 e em 2050, conforme explicaram Kumar e Samadder (2017).

De acordo com Kumar et al. (2020), as cidades enfrentam o desafio de criarem estratégias que não somente minimizem os impactos estruturais que já as afetam, mas que sejam o ponto de partida para a criação de novas oportunidades de melhorias da qualidade de vida em todos os seus níveis. Os autores também ressaltam que soluções inteligentes estão além da oferta de tecnologia, considerando que é essencial oferecer ações que acompanham a dinâmica das cidades, com maior participação popular, com planejamento de curto e longo prazo.

Nesse sentido, no âmbito do aprimoramento das matrizes energéticas locais, associadas à gestão de resíduos, utilização de biodigestores e produção de biogás, é considerada uma ferramenta de valorização do lixo e ao mesmo tempo é uma oportunidade de aumento da oferta de energia (MATHERI et al., 2018; OCTAVIANTHY; PURWANTO, 2018).

Os biodigestores são equipamentos que permitem a manipulação da produtividade do biogás. São estruturas fechadas compostas por uma caixa de entrada, a câmara no qual é despejado o substrato e que também armazena o gás produzido, além de uma caixa de saída para o gás e para o biofertilizante, também chamado de digestato (FRIGO et al., 2015). Weiland (2010) explicou que o biogás é um subproduto da digestão anaeróbia, um processo natural de degradação da matéria orgânica, promovida pela ação de bactérias cujas atividades metabólicas não dependem da presença de oxigênio. Desse modo, o biogás é composto por metano e gás carbônico, por isso é inflamável e

sua queima produz energia térmica, a qual produz energia elétrica, além de ser base de combustíveis ambientalmente seguros.

A instalação de biodigestores e a produção do biogás, ainda ocorre predominantemente em áreas rurais, por conta da oferta maior de biomassa em pouco espaço de tempo (VIEIRA; POLLI, 2020). Atelge et al. (2020) explicaram que os primeiros projetos de produção de biogás começaram no fim do século XIX, com destaque para a instalação de biodigestores com média escala na década de 1930. Os autores enfatizam que o biogás não tem potencial para competir com fontes energéticas convencionais por motivos técnicos e financeiros, mas tais investimentos são benéficos quando gerenciados de forma integrada com outras matrizes, principalmente em países em desenvolvimento. Porém, algumas tecnologias têm sido testadas em áreas urbanas com resultados positivos (RUPF et al., 2017) especialmente quando os sistemas de produção do gás são descentralizados e atrelados a programas de reciclagem, com participação popular no processo de coleta do resíduo orgânico e devolução na rede de gás ou na rede elétrica (ANYAOKU; BAROUTIAN, 2018).

No Brasil, a utilização desses equipamentos é predominante no meio rural. Ainda assim, essa prática de valorização dos resíduos é muito pouco explorada, uma vez a falta de estruturação institucional de políticas públicas não favorece a criação de um mercado eficiente para a utilização de biodigestores, afetando até mesmo as plantas de biogás existentes, as quais esbarram em dificuldades técnicas (SILVA; SOARES; SEO, 2016).

Diante da problemática exposta, o presente estudo visa apresentar quais os principais modelos de biodigestores utilizados na Europa, Ásia, África e América do Sul, relacionando-os com o contexto desafiador que estão inseridos nas cidades.

2. OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho é apresentar os principais tipos de biodigestores utilizados na Europa, Ásia, África e América do Sul, evidenciando os contextos da oferta de energia e gestão de resíduos orgânicos, sejam eles avançados ou não, buscando apresentar as disparidades esperadas nas diferentes localidades.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 O DESAFIO DA OFERTA ENERGÉTICA NO CONTEXTO DE CIDADES INTELIGENTES E A INSERÇÃO DO BIOGÁS

De acordo com Calvillo, Sánchez-Miralles e Villar (2016), a provisão de energia em cidades requer cada vez mais a utilização de recursos renováveis e planejamentos que se baseiam na heterogeneidade de condições sociais, ambientais e econômicas principalmente nos meios urbanos. Os autores comentaram sobre as dificuldades dos agentes envolvidos no gerenciamento das matrizes energéticas em trabalhar essas variáveis simultaneamente, sendo necessária, portanto, um cronograma que contemple ações em todas as camadas da sociedade, desde o poder público até a população.

Em 2018, houve um aumento de 3,2% na produção de energia em todo o mundo, comparado ao ano de 2017, segundo a *International Energy Agency* (IEA, 2018a). A partir do relatório denominado *World Energy Balances: Overview* produzido pela IAE, em panorama geral, o setor com

maior crescimento no uso de energia foi o de transportes. Esse cenário traz à luz os desafios associados a fontes mais ambientalmente limpas e eficientes, uma vez que combustíveis provenientes do petróleo ainda são os mais recorrentes, a despeito do crescimento do uso de biocombustíveis nos últimos 20 anos. Nesse sentido, a produção de combustíveis a partir de diferentes tipos de biomassa é um dos principais tópicos explorados para suprir a demanda crescente de energia associada com o setor de transportes nas cidades, sendo o bioetanol, o biodiesel e o bio-hidrogênio as principais substâncias renováveis aplicadas nos diferentes tipos de veículos, no entanto, esta é uma cadeia produtiva com gargalos importantes a serem superados, como a aproximação maior da fonte de biomassa às fontes de produção dos combustíveis e outros aspectos técnicos e econômicos (CHANG; HWANG; WU, 2017).

No que tange ao uso da eletricidade, em 2018 o mundo produziu 3,9% a mais de eletricidade do que em 2017, sendo a principal fonte energética para esse uso o carvão (38%), ao passo em que recursos renováveis como a hidroeletricidade e a energia eólica representam juntas 21% da quantidade total de eletricidade gerada, enquanto biocombustíveis e resíduos compreendem apenas 2,4% desse montante (IEA, 2018b). No contexto das cidades inteligentes, o uso eficiente da energia elétrica está diretamente ligado a criar novos formatos de oferta energética que estejam embasadas em oportunidades para o setor econômico, mas principalmente para a universalização do acesso à eletricidade, conforme explicam Masera et al. (2018). De acordo com estes autores, o uso eficiente da eletricidade é o maior objetivo das cidades inteligentes, além da importância de explorar as oportunidades associadas com produtividade energética a partir de recursos renováveis, abrindo possibilidades de uma economia circular. A reutilização dos resíduos orgânicos tem potencial de reduzir gastos com a gestão de resíduos urbanos, uma vez que a produção do biogás utilizando esses dejetos como base, aumenta a grade de fontes energéticas para as cidades, dado que o gás pode ser convertido em energia térmica que é transformada em eletricidade, combustíveis, gás de cozinha e energia térmica para aquecimento (DI MATTEO et al., 2017).

3.2 A IMPORTÂNCIA DA VALORIZAÇÃO DOS RESÍDUOS ORGÂNICOS NA CONVERSÃO EM ENERGIA

Yazid et al. (2017) explicaram que a expansão das populações humanas acarretou um crescimento intenso da geração de resíduos orgânicos, e principalmente, em áreas mais populosas e com menos recursos não houve a estruturação de planejamentos de valorização desses dejetos. No que tange aos métodos para conceber valor a tais efluentes, a economia circular é observada por Maina, Kachrimanidou e Koutinas (2017) como recurso relevante para atender às demandas de gestão de resíduos orgânicos, com notoriedade para ações da União Europeia e dos Estados Unidos em estruturar essa logística de forma a prolongar a utilidade desses materiais. Os autores explicaram que a economia circular aplicada aos resíduos orgânicos no contexto de países desenvolvidos visa aumentar as oportunidades de mercado associadas com as matrizes energéticas locais.

Em áreas em desenvolvimento ou pouco desenvolvidas, a economia circular também é apresentada como potencial para a valorização do lixo. Porém, com o intuito de amenizar uma problemática de maior proporção, dado que muitos países na África e na Ásia, por exemplo, ainda não contam com ordenação da destinação final de dejetos (FETENE et al., 2018).

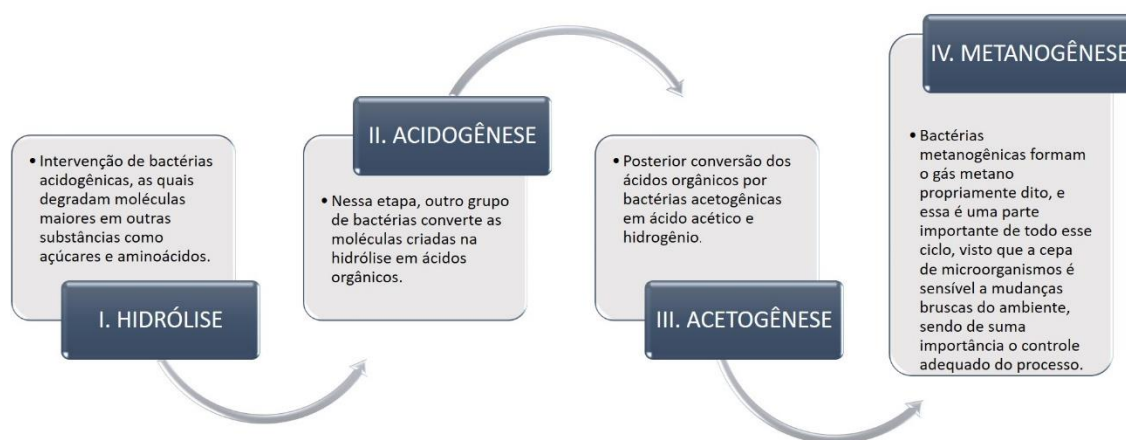
A *International Energy Agency (IEA)* cita o biogás como uma das principais fontes de energia renovável e eficiente, enfatizando principalmente o uso do biometano. Enquanto o biogás é o produto mais puro da digestão anaeróbia e utilizado de forma imediata e local, o biometano passa por procedimentos de tratamento para a retirada de substâncias degradativas, tornando o

biometano apto para maior manipulação de transporte e inserção em redes de gás natural. Ainda segundo a IEA, há a perspectiva de crescimento da aplicação do biogás até 2040, sendo importante ressaltar o panorama de aproveitamento voltado para energia elétrica e térmica, edificações e agricultura, além da conversão em biometano (IEA, 2020).

3.3 A DIGESTÃO ANAERÓBIA E ASPECTOS IMPORTANTES PARA A INSTALAÇÃO DE BIODIGESTORES

Bajpai (2017) descreve a digestão anaeróbia como sendo uma série de processos químicos físicos e biológicos degradam a matéria orgânica sem a presença de oxigênio, a partir de quatro etapas básicas, relacionadas na figura 1.

Figura 1. Etapas do processo de digestão anaeróbia.



Fonte: Elaborado pelas autoras a partir dos dados propostos por Bajpai (2017).

Nos biodigestores há uma estrutura básica que consiste em uma caixa de entrada, por onde o substrato é inserido, seguido de uma câmara na qual o processo de digestão anaeróbia propriamente acontece. Quando possível, é controlado um compartimento de armazenamento do gás e uma caixa de saída tanto para o gás quanto para o digestato (FRIGO et al., 2015). Por meio do documento Fundamentos do Biogás, o Centro Internacional de Energias Renováveis (CIBiogás) explica que a produção de biogás dentro de um biodigestor está intimamente ligada com a quantidade de sólidos totais presente no substrato. Além disso, é importante ressaltar que quanto menores forem as partículas presentes no substrato, mais fácil será a geração do biogás dado que haverá maior contato das bactérias com esse resíduo. Outro aspecto importante a ser considerado, segundo o CIBiogás, é o tempo de retenção hidráulica: quanto menor esse índice, menor será o tempo que o biodigestor irá levar para gerar o biogás (CIBiogás, 2020).

A escala dos equipamentos utilizados varia por uma série de fatores, os quais estão relacionados com a necessidade do uso do biogás, conforme explicaram Roy et al. (2018). Segundo os autores, é importante que os biodigestores consigam suprir a demanda do local instalado. Os critérios técnicos, econômicos e ambientais variam de acordo com a região e a característica do local (rural/urbano). Normalmente os biodigestores em regiões em desenvolvimento são de menor escala, voltados para a aplicação em uso doméstico, direcionado para eletricidade e gás de cozinha,

enquanto em áreas melhor estruturadas o subproduto alcança maior proporção por conta de maiores investimentos de organização (SCARLAT; DALLEMAND; FAHL, 2018).

4. METODOLOGIA

O presente estudo foi realizado a partir de uma pesquisa bibliográfica. Macedo (1995) discorre sobre o termo conceituando-o como uma busca da literatura dentro de um dado arcabouço teórico, com o objetivo de trazer à luz os principais trabalhos associados com o objeto de estudo, para posteriormente realizar análises e apresentar seu estado da arte atual. Essa metodologia foi aplicada uma vez que os dados apresentados nesse estudo variam de acordo com a localidade e o período nos quais foram coletados, sendo imprescindível a demonstração de informações que estejam de acordo com a realidade global do objeto de estudo.

4.1. MÉTODO DE ANÁLISE

Para o levantamento de dados acerca do cenário atual sobre a utilização de biodigestores foram utilizadas as bases “Google Acadêmico”, “Scielo” e “Science Direct”, cruzando as palavras-chave: “biodigestor”, “digestão anaeróbia”, “cidades inteligentes”, “áfrica”, “europa”, “asia” e “mundo” intercalando entre os idiomas português e inglês.

Para o levantamento de dados acerca do cenário atual sobre a utilização de biodigestores foram utilizadas as bases “Google Acadêmico”, “Scielo” e “Science Direct”, cruzando as palavras-chave: “biodigestor”, “digestão anaeróbia”, “cidades inteligentes”, “áfrica”, “europa”, “asia” e “mundo” intercalando entre os idiomas português e inglês. Nas bases de dados supracitadas, cada região de estudo foi pesquisada individualmente, e em cada uma dessas buscas foram filtrados 10 artigos por página. Foi lido o resumo de cada um desses 10 artigos, sendo posteriormente selecionados desse montante: 6 artigos para o contexto europeu, 8 artigos para o contexto africano, 5 artigos para o contexto asiático e 7 para o contexto do Brasil e outros países sul-americanos. Os artigos selecionados a partir da análise dos resumos foram lidos por inteiro, e foram incluídos neste estudo aqueles que obtinham informações relevantes para o desenvolvimento da pesquisa. Foi inserido também um filtro temporal de 2017 a 2020, e quando na ausência de artigos nesse período com o conteúdo de interesse, foram selecionados trabalhos de anos anteriores. Em cada um dos artigos selecionados, foi realizada a leitura de todo o texto, sendo coletados os dados de acordo com a sua relevância, independente do tópico no qual a informação se encontrava. Essa abordagem foi aplicada na pesquisa de cada uma das regiões de estudo. No total, foram selecionados 26 artigos para a composição dos resultados.

5. RESULTADOS

Na seção a seguir serão apresentadas as informações coletadas acerca dos principais tipos de biodigestores identificado na literatura na Europa, Ásia, África, Brasil e outros países sul-americanos.

5.1 CONTEXTO DO USO DE BIODIGESTORES NO MUNDO

Em países europeus o número de biodigestores cresceu entre 2010 e 2016 nas áreas urbanas, com destaque para a Alemanha como país europeu com maior capacidade de produção de biogás, voltados principalmente para áreas rurais (SCARLAT; DALLEMAND; FAHL, 2018). De acordo com Gromke et al. (2018) este país concentra as plantas de biogás em áreas rurais visando a produção de energia elétrica em larga escala e a purificação do gás para transformação em biometano. Lauer e Thrän (2017) ressaltaram que em relação ao custo-benefício, as plantas de biogás germânicas geram reduções de custo a longo prazo dadas as vantagens em processos de redes de armazenamento e unidades de combinação e energia elétrica e térmica, visto que o intervalo entre a produção do gás e a sua utilização pode gerar desperdício do produto.

O equipamento com maior predominância na Europa é o modelo *Countinous Stirred Tank Reactor* (CSTR), de alimentação contínua e cuja estrutura se dá pela presença de um sistema de agitação próprio, possibilitando a mistura de diferentes substratos e com maior presença de sólidos totais, o que é uma vantagem uma vez que é importante que o substrato esteja concentrado em partículas menores para maior adesão dos microorganismos, segundo Amaral, Steinmetz e Kunz (2020). Os autores explicaram que esse tipo de biodigestor possui estruturas internas com serpentinas para o aquecimento do substrato, tornando viável maior controle de temperatura e consequentemente, de outros fatores químicos como pH.

Um estudo realizado por Hansen, Mathiesen e Skov (2019) acerca da transformação na matriz energética alemã até 2050, tornando-a 100% renovável. Os autores sugerem que a produção de energia a partir da biomassa é viável para os setores de eletricidade, transporte e aquecimento, destacando o resíduo orgânico como elemento chave dessa cadeia. O continente europeu é um agente ativo na estruturação de cidades inteligentes, e são notáveis os movimentos realizados com ações e pesquisas considerando projetos para a conversão de matéria orgânica em energia como parte importante da busca por eficiência energética sustentável (VASSILEVA; CAMPILLO; SCHWEDE, 2017).

No continente africano, especificamente na África do Sul, são utilizados biodigestores subterrâneos em áreas rurais, de estrutura simples com base em tijolo, cimento e argamassa, mas com a ressalva de desvantagens associadas com a qualidade do gás produzido, uma vez que não há o controle de parâmetros importantes e a matéria-prima utilizada é passível de fissuras, limitando o tempo de vida útil do equipamento (MUTUNGWAZI; MUKUMBA; MAKAKA, 2018). A grande maioria dos países africanos utilizam biodigestores de cúpula fixa e equipamentos do modelo indiano, uma vez que são mais fáceis de manipular, ainda que de forma geral sejam muito ineficientes por conta da falta de gerenciamento no geral (MSHANDETE; PARAWIRA, 2009).

Segundo Deganutti, Palhaci e Rossi (2002), os biodigestores do tipo indiano funcionam com baixa concentração de sólidos totais, além de precisarem ser alimentados em períodos curtos, sendo mais indicados para áreas rurais com coleta de excrementos animais em partes diferentes do dia. Também chamados de biodigestor de campânula flutuante, a estrutura desse ferramental se dá por uma caixa de entrada, no qual o resíduo cai em uma câmara separada por uma barreira e uma campânula que flutua sobre o substrato, tornando a pressão mais constante dentro do biodigestor, conforme Andrade, Ranzi e Muniz (2002). Os autores informaram que sua estrutura é bem simples, não contando com instrumentos de agitação e nem de controle de aspectos físicos, como a temperatura.

O modelo de cúpula fixa possui uma câmara cilíndrica com compartimentos de entrada do substrato e saída do gás, segundo Pérez et al. (2014). De acordo com os autores, o gás fica armazenado na parte superior da câmara, e toda a estrutura é subterrânea. Esse tipo de biodigestor também é construído a partir de cimento, sendo os maiores custos alocados na mão de obra de construção e manutenção do equipamento.

Entretanto, o modelo de cúpula fixa enfrenta gargalos relevantes quando instalados em áreas muito vulneráveis como em Camarões, onde o projeto da planta de biogás falhou pela falta de fornecimento de água para adicionar ao substrato, tornando os sólidos totais muito altos para o funcionamento eficiente do digestor (MUNGWE et al., 2016). Há um campo promissor para a inserção de biodigestores em ações de produtividade de energia limpa atrelada à problemática do lixo no continente africano, que ainda esbarram, contudo, em barreiras associadas com a falta de normativas regulatórias (NEFEDOVA et al., 2020; SEMELANE; TAZVINGA; NZAKI, 2018).

No contexto da Ásia, estes países de forma geral utilizam biodigestores domésticos de cúpula fixa, como o Vietnã (ROUBÍK et al., 2017) e o Camboja, países ainda muito ruralizados e com baixa oferta universal de energia (HYMAN; BAILIS, 2018). De acordo com Deng et al. (2017), a China é um dos países pioneiros no que tange a utilização de biodigestores. Os autores citam a ocorrência do biodigestor tipo CSTR, mas ressaltam que o modelo mais presente nas plantas de biogás é o *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB), principalmente pelo fato de ser muito eficiente na gestão de esgoto e resíduos industriais. Essas estruturas contêm mecanismos de manipulação do fluxo do substrato de forma ascendente que tolera quantidades altas de biomassa, tornando o tempo de retenção hidráulica menor, facilitando uma maior produção dos gases.

Ainda a respeito do país chinês, há normativas associadas com a padronização da produção do biogás que existem desde a década de 1970 e foram modificadas em 2015 para influenciar o crescimento de investimentos mercantis, servindo de base para outros países asiáticos, mas ainda carecendo de algumas estruturas que contemplam parcerias com o poder público (WANG et al., 2020).

A Índia é outro país referência na utilização de biodigestores. Thomas et al. (2017) descreveram alguns dos modelos mais recorrentes, como o *Khadi and Village Industries Commission* (KVIC) que segue padrões do biodigestor de campânula flutuante comum, seguido do modelo Deenbandu, que é construído com materiais mais baratos e tem um formato circular que permite criar uma pequena câmara de compensação, necessitando de mão de obra para a retirada de lodo excedente. Ainda de acordo com Thomas et al. (2017), é importante citar o modelo Pragati, cujo biogás produzido é voltado para uso doméstico, tornando característico que os equipamentos no país sejam de escala menor.

No Brasil e outros países sul-americanos, Freitas et al. (2019) explicam que os principais tipos de biodigestores utilizados no país são os modelos indiano, chinês, UASB e CSTR, os quais foram anteriormente citados nos estudos supracitados, com destaque no caso brasileiro para o modelo lagoa coberta ou canadense, cuja estrutura se dá por um aterramento próximo da superfície e armazenamento do gás em uma cobertura impermeável. Os autores explicam que esse tipo de biodigestor é mais adequado para projetos industriais e agro-industriais, ressaltando também que modelos com composição em aço vêm se tornando mais recorrentes.

No Brasil, os biodigestores estão concentrados em áreas rurais considerando a grande atividade agrícola nacional, criando altas quantidades de resíduos orgânicos que servem como substrato para a produção do biogás (SANTOS et al., 2018). O país tem uma das matrizes energéticas com mais opções de energias renováveis aplicadas no mundo, destacando-se principalmente pelo

uso da hidroeletricidade, conforme explicam Silva, Neto e Seifert (2016). Ainda de acordo com os autores, a maior parte do consumo energético da biomassa está voltado para a produção do etanol, levando o país a ocupar uma posição relevante no que tange a cadeia produtiva de combustíveis ambientalmente limpos, mas que por outro lado não aproveita outros tipos de resíduos orgânicos para outras formas de conversão em energia.

O modelo lagoa coberta também foi observado na Bolívia, com produção de biogás para regiões rurais, visando a utilização do gás para uso doméstico (SCHNEIDER et al., 2020). Na Argentina, assim como no Brasil são comuns os biodigestores tipo lagoa coberta, CSTR e UASB, mas cabe ressaltar que o país não conta com muitos projetos de instalação de plantas de biogás (CARUANA, 2019).

Segundo Vasco-Correa et al. (2018), o desenvolvimento de projetos para produção de energia a partir da biomassa na América Latina segue aquém do potencial encontrado na região, principalmente dada a grande variedade de substratos. Wu et al. (2019) destacam que maior produção de bioenergia no continente sul-americano tende a trazer benefícios relevantes para a economia e o meio-ambiente, impulsionando principalmente as áreas rurais.

Os resultados apresentados no contexto anterior de regiões estudadas foram resumidos no quadro 1.

Quadro 1. Principais tipos de biodigestores usados no mundo, segundo os autores pesquisados nesse estudo.

Autores	Região	Principais tipos de biodigestores
Amaral, Steinmetz e Kunz (2020).	Europa	CSTR-Continued Stirred Tank Reactor. Possui sistema de agitação próprio, diminuindo custos com pré-preparo dos resíduos.
(MUTUNGWAZI; MUKUMBA; MAKAKA, 2018); (MSHANDETE; PARAWIRA, 2009).	África	Modelo do tipo indiano, cúpula fixa e outras estruturas subterrâneas feitas de uma base simples de tijolos, cimento e argamassa.
Deng et al., 2017	Ásia	Modelo CSTR e UASB-Upflow Anerobic Sludge Blanket, sendo este último instalado principalmente para a gestão dos resíduos industriais chineses. Assim como o CSTR, o UASB possui mecanismos de manipulação do fluxo do substrato, aumentando a quantidade de biomassa inserida no equipamento. Na Índia cabe destacar os modelos <i>Khadi and Village Industries Commission (KVIC)</i> e <i>Deenbandu</i> , ambos de estrutura simples e limitada.
Freitas et al. (2019); (SCHNEIDER et al., 2020); (CARUANA, 2019)	Brasil e outros países sul-americanos	Modelos UASB, CSTR e lagoa coberta. O modelo lagoa coberta ou canadense tem uma cobertura simples plastificada e é usualmente alimentado com resíduos rurais de dejetos animais.

Fonte: Elaborado pelas autoras, 2020.

6. CONCLUSÃO

A discussão a respeito da estruturação de novas cidades levando em consideração a crescente populacional, a qual está associada com o aumento dos perímetros urbanos, traz à luz desafios complexos no que concerne a oferta de energia e a gestão eficiente de resíduos. Nesse sentido, o presente estudo apresentou os diferentes tipos de biodigestores utilizados no mundo e os principais gargalos relacionados com a instalação dessas estruturas, além das vantagens que tais equipamentos proporcionam a partir do reuso de resíduos orgânicos e aproveitamento do biogás. Os resultados evidenciam que há uma diferença notável nos modelos de biodigestores observados nas regiões pesquisadas.

Na Europa, a produção do biogás está inserida em ações governamentais que estimulam sua geração, sobretudo nas áreas rurais, com a instalação de biodigestores com tecnologias de maior complexidade para maior aproveitamento do substrato e distribuição do gás. Na Ásia, cabe destacar a grande utilidade dos biodigestores na China e na Índia, nações pioneiras na aplicação desses equipamentos. Por outro lado, na África, os modelos observados são de arranjos simples e, portanto, limitados a uma produtividade de biogás pequena e de menor qualidade. Os países africanos em sua maior parte possuem mais áreas rurais do que urbanas, as quais sofrem com a falta de oferta de energia universalizada. Tal cenário também é observado em outros países asiáticos, os quais apresentam condições estruturais semelhantes à de países africanos.

O Brasil dispõe de um enorme potencial de ampliação de sua matriz energética a partir da reutilização dos resíduos orgânicos para a produção de biogás, dada a atividade rural extremamente ativa e as possibilidades de planejamento adequado de ações que contemplem a estimulação dessa produtividade. Entretanto, essas oportunidades não são exploradas amplamente. Em outros países sul-americanos os biodigestores não são usados com maior recorrência e entre todos os fatores, cabe salientar que são países cuja matriz energética está mais associada ao mercado dos combustíveis fósseis de forma geral.

Sendo assim, há uma incontestável desigualdade na forma com a qual países desenvolvidos e subdesenvolvidos trabalham o planejamento de suas cidades e, nesse caso, da conversão de resíduos em energia limpa e eficiente. Além disso, os principais empecilhos observados estão ligados à falta de elaboração adequada de planos de ação que envolvam todas as camadas da sociedade para criar avanços na aplicação de biodigestores em cidades inteligentes.

O presente estudo se limita a apresentar o contexto básico de modelos de biodigestores no contexto das cidades inteligentes, sendo importante o maior detalhamento dessa cadeia em artigos futuros, com enfoque em uma abordagem empírica que explore a participação de *stakeholders* neste processo.

7. REFERÊNCIAS

AMARAL, A. C.; STEINMETZ, R. L. R.; KUNZ, A. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Embrapa Suínos e Aves-Livro científico (ALICE), 2019. Disponível em <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1108617/1/LivroBiogas.pdf>> . Acesso em: 20 agosto 2020.

ANDRADE, M. A. N.; RANZI, T. J. D.; MUNIZ, R. N. Biodigestores rurais no contexto da atual crise de energia elétrica brasileira e na perspectiva da sustentabilidade ambiental. **Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural**, 2002.

ANYAOKU, C. C.; BAROUTIAN, S. Decentralized anaerobic digestion systems for increased utilization of biogas from municipal solid waste. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 90: 982-991. 2018.

ATELGE, M. R.; KRISA, D.; KUMAR, G.; ESKICIOGLU, C.; NGUYEN, D.D.; CHANG, S. W.; ATABANI, A.E.; AL-MUHTASEB, A. H.; UNALAN, S. Biogas production from organic waste: recent progress and perspectives. **Waste and Biomass Valorization**, 11. 3:1019-1040. 2020.

BAJPAL, P. Basics of anaerobic digestion process. In: **Anaerobic Technology in Pulp and Paper Industry**. Springer, Singapore, p. 7-12. 2017.

CALVILLO, C. F.; SÁNCHEZ-MIRALLES, A.; VILLAR, J. Energy management and planning in smart cities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 55:273-287. 2016.

CARUANA, M. E. C. Organizational and economic modeling of an anaerobic digestion system to treat cattle manure and produce electrical energy in Argentina's feedlot sector. **Journal of Cleaner Production**, 208:1613-1621. 2019.

CHANG, W. R.; HWANG, J. J.; WU, W. Environmental impact and sustainability study on biofuels for transportation applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 67: 277-288. 2017.

CIBiogás – Centro Internacional de Energias Renováveis. **Fundamentos do Biogás**. 2020.

DAS, S.; LEE, S. H.; KUMAR, P.; KIM, K. H.; LEE, S. S.; BHATTACHARYA, S. S. Solid waste management: Scope and the challenge of sustainability. **Journal of cleaner production**, 2019, 228: 658-678. 2019.

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M. D. C. J. P.; ROSSI, M. Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada. **Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural**, 2002.

DENG, L.; LIU, Y.; ZHENG, D.; WANG, L.; PU, X.; SONG, L.; WANG, Z.; LEI, Y.; CHEN, Z.; LONG, Y. Application and development of biogas technology for the treatment of waste in China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 70: 845-851. 2017.

DI MATTEO, U.; NASTASI, B.; ALBO, A.; GARCIA, D. A. Energy contribution of OFMSW (Organic Fraction of Municipal Solid Waste) to energy-environmental sustainability in urban areas at small scale. **Energies**, 10, 2: 229. 2017.

FETENE, Y.; ADDIS, T.; BEYENE, A.; KLOOS, H. Valorisation of solid waste as key opportunity for green city development in the growing urban areas of the developing world. **Journal of environmental chemical engineering**, 6, 6:7144-7151. 2018.

FREITAS, F.F.; SOUZA, S.S.; FERREIRA, L.R.A.; OTTO, R.B.; ALESSIO, F.J.; SOUZA, S. N. M.; VENTURINI, O. J.; ANDO JUNIOR, O.H. The Brazilian market of distributed biogas generation: Overview, technological development and case study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 101: 146-157. 2019.

FRIGO, K. D. A.; FEIDEN, A.; GALANT, N. B.; SANTOS, R. F.; MARI, A. G.; FRIGO, E. P. Biodigestores: seus modelos e aplicações. **Acta Iguazu**, 4.1:57-65, 2015.

GROMKE, J. D.; RENSBERG, N.; DENYSENKO, V.; STINNER, W.; SCHMALFUß, T.; SCHEFTELOWITZ, M.; NELLES, M.; LIEBETRAU, J. Current developments in production and utilization of biogas and biomethane in Germany. **Chemie Ingenieur Technik**, 90, 1-2:17-35. 2018.

HANSEN, K., MATHIESEN, B. V., SKOV, I. R. Full energy system transition towards 100% renewable energy in Germany in 2050. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 102, 1-13. 2019.

HYMAN, J.; BAILIS, R. Assessment of the cambodian national biodigester program. **Energy for Sustainable Development**, 46:11-22. 2018.

IEA - International Energy Agency. **Electricity Information: Overview**. 2018b. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/electricity-information-overview>. Visualizado em 26/09/2020.

IEA - International Energy Agency. **Outlook for biogas and biomethane: Prospects for organic growth**. 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth>. Visualizado em 13/09/2020

IEA - International Energy Agency. **World Energy Balances: Overview**. 2018a. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview>. Visualizado em 13/09/2020.

KUMAR, A; SAMADDER, R. S. A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste. **Waste Management**, 69: 407-422. 2017.

KUMAR, H., SINGH, M. K., GUPTA, M. P., MADAAN, J. Moving towards smart cities: solutions that lead to the smart city transformation framework. **Technological forecasting and social change**, 153, 119281. 2020

LAUER, M.; THRÄN, D. Biogas plants and surplus generation: Cost driver or reducer in the future German electricity system?. **Energy Policy**, 109:324-336. 2017.

MACEDO, N. **Iniciação à pesquisa bibliográfica**. Edições Loyola, 1995.

MAINA, S.; KACHRIMANIDOU, V.; KOUTINAS, A. A roadmap towards a circular and sustainable bioeconomy through waste valorization. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, 8:18-23. 2017.

MASERA, M.; BOMPARD, E. F.; PROFUMO, F.; HADJSAID, N. Smart (electricity) grids for smart cities: Assessing roles and societal impacts. **Proceedings of the IEEE**, 106, 4:613-625. 2018.

MATHERI, A. N., MBOHWA, C., NTULI, F., BELAID, M., SEODIGENG, T., NGILA, J. C., NJENGA, C. K. Waste to energy bio-digester selection and design model for the organic fraction of municipal solid waste. **Renewable and sustainable energy reviews**, 82, 1113-1121. 2018.

MSHANDETE, A. M.; PARAWIRA, W. Biogas technology research in selected sub-Saharan African countries—A review. **African Journal of Biotechnology**, 8.2. 2009.

MUNGWE, J. N.; COLOMBO, E.; ADANI, F.; SCHIEVANO, A. The fixed dome digester: An appropriate design for the context of Sub-Sahara Africa?. **Biomass and Bioenergy**, 95: 35-44. 2016.

MUTUNGWAZI, A.; MUKUMBA, P.; MAKAKA, G. Biogas digester types installed in South Africa: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 81:172-180. 2018.

NEFEDOVA, L.; SOLOVYEV, A.; RAFIKOVA, Y.; SOLOVYEV, D. Renewable energy as a factor of sustainable development and regulation of ecological problems in Africa. In: **E3S WEB OF CONFERENCES**. EDP SCIENCES, 2020. p. 05009.

OCTAVIANTHY, D.; PURWANTO, W. Designing smart energy system for smart city through municipal solid waste to electricity: techno-economic analysis. In: **E3S WEB OF CONFERENCES**. EDP SCIENCES, 2018. p. 02044.

ONU – Organização das Nações Unidas. **World Population Prospects – Highlights**. 2019a. Disponível em: https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019_Highlights.pdf. Visualizado em 20/08/2020.

ONU – Organização das Nações Unidas. **World Urbanization Prospects**. 2019b. Disponível em: <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf>. Visualizado em 20/08/2020.

PÉREZ, I.; GARFÍ, M.; CADENA, E.; FERRER, I. Technical, economic and environmental assessment of household biogas digesters for rural communities. **Renewable energy**, 62: 313-318. 2014.

ROUBÍK, H.; MAZANCOVÁ, J.; PHUNG, L. D.; DUNG, D. V. Quantification of biogas potential from livestock waste in Vietnam. **Agronomy Research**, 15. 2:540-552. 2017.

ROY, A. D.; PRAKASH, O.; KUMAR, A.; KAVITI, A. K.; PANDEY, A. Design and Selection Criteria of Biogas Digester. In: **Low Carbon Energy Supply**. Springer, Singapore, p. 91-112. 2018.

RUPF, G. V.; BAHRI, P. A.; DE BOER, K.; MCHENRY, M. P. Development of an optimal biogas system design model for Sub-Saharan Africa with case studies from Kenya and Cameroon. **Renewable Energy**, 109, 586-601. 2017.

SANTOS, I. F. S.; VIEIRA, N. D. B.; NÓBREGA, L. G. B., BARROS, R. M.; FILHO, G. L. T. Assessment of potential biogas production from multiple organic wastes in Brazil: Impact on energy generation, use, and emissions abatement. **Resources, Conservation and Recycling**, 131: 54-63. 2018.

SCARLAT, N.; DALLEMAND, J. F.; FAHL, F. Biogas: Developments and perspectives in Europe. **Renewable energy**, 129:457-472. 2018.

SCHNEIDER, J. V.; MAINALI, B.; MARTÍ-HERRERO, J.; MALMQUIST, A.; MARTIN, A.; ALEJO, L. Biogas based polygeneration plant options utilizing dairy farms waste: A Bolivian case. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, 37:100571. 2020.

SEMELANE, M. S.; TAZVINGA, H.; NKAZI, B. D. A sustainable operational method for micro-scale biodigesters in South Africa. 2018.

SILVA, R. C.; NETO, I. D. M.; SEIFERT, S. S. Electricity supply security and the future role of renewable energy sources in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 59: 328-341. 2016.

SILVA, L. A.; SOARES, F. R.; SEO, E. Avaliação do ciclo de vida do processo biodigestão anaeróbia dos resíduos sólidos urbanos para geração de energia. **InterfacEHS-Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade**, 2016.

THOMAS, P.; SOREN, N.; RUMJIT, N. P.; JAMES, J. G.; SARAVANAKUMAR, M. P. BIOMASS resources and potential of anaerobic digestion in Indian scenario. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 77: 718-730. 2017.

VASCO-CORREA, J.; KHANAL, S.; MANANDHAR, A.; SHAH, A. Anaerobic digestion for bioenergy production: Global status, environmental and techno-economic implications, and government policies. **Bioresource technology**, 247: 1015-1026. 2018.

VASSILEVA, I.; CAMPILLO, J.; SCHWEDE, S. Technology assessment of the two most relevant aspects for improving urban energy efficiency identified in six mid-sized European cities from case studies in Sweden. **Applied Energy**, 194:808-818. 2017.

VIEIRA, H, G; POLLI, H. Q. O BIOGÁS COMO FONTE ALTERNATIVA DE ENERGIA. **Revista Interface Tecnológica**, 17.1: 388-400. 2020.

WANG, X.; YAN, R.; ZHAO, Y.; CHENG, S.; HAN, Y.; YANG, S.; CAI, D.; MANG, H. P.; LI, Z. Biogas standard system in China. **Renewable Energy**, 157:1265-1273. 2020.

WEILAND, P. Biogas production: current state and perspectives. **Applied microbiology and biotechnology**, 85.4: 849-860. 2010.

WU, W.; TOMOKO H.; HARUKA O.; NAOTA H.; JINGYU L; TETSUYA M; SHINICHIRO F.; TOSHIHIKO M.; KIYOSHI T. Global advanced bioenergy potential under environmental protection policies and societal transformation measures. **GCB Bioenergy**, 11.9: 1041-1055. 2019.

YAZID, N. A.; BARRENA, R.; KOMILIS, D.; SÁNCHEZ, A. Solid-state fermentation as a novel paradigm for organic waste valorization: a review. **Sustainability**, 9, 2:224. 2017.