

INTEGRANDO AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA E DESIGN SISTÊMICO EM ESTUDO PARA IMPLANTAÇÃO DE BIODIGESTOR NO BAIRRO CONFISCO, BELO HORIZONTE-MG

INTEGRATING LIFE CYCLE ASSESSMENT AND SYSTEMIC DESIGN IN A STUDY TO IMPLEMENT A BIODIGESTER AT BAIRRO CONFISCO, BELO HORIZONTE-MG

Data de aceite: 21/12/2024 | Data de submissão: 18/09/2024.

PÊGO, Kátia Andréa Carvalhaes, PhD.

Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG), Belo Horizonte-MG, Brasil,

E-mail: katia.pego@uemg.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8810-7598>

PEREIRA, Andréa Franco, PhD.

Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte-MG, Brasil,

E-mail: andreafranco@arq.ufmg.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3633-4884>

RESUMO

O objetivo da pesquisa apresentada neste artigo é investigar a viabilidade socioambiental da implantação de um biodigestor, ativado por Resíduos Sólidos Urbanos Domésticos Orgânicos, com vistas à geração de energia elétrica no Bairro Confisco, uma das regiões mais vulneráveis aos efeitos da crise climática em Belo Horizonte-MG. A metodologia adotada buscou integrar o método de Avaliação do Ciclo de Vida e os princípios do Design Sistêmico. Sob a abordagem não linear deste último, foi possível vislumbrar as relações entre atores sociais do Bairro, bem como a interação de atores institucionais locais. Diante disto, foram definidos o objetivo e o escopo, incluindo as fronteiras do sistema do biodigestor. Como resultado, apresenta-se o Inventário do Ciclo de Vida, elaborado a partir do desenvolvimento do modelo conceitual do sistema, no qual foram considerados os processos envolvidos e a quantificação de suas entradas e saídas, que subsidiam a avaliação dos impactos em andamento.

Palavras-chave: Inventário do Ciclo de Vida; Resíduos Sólidos Urbanos; Geração de Energia; Biodigestor.

ABSTRACT

The purpose of the research presented in this paper is to examine the socioecological and social benefits of implementing a biodigester, triggered by Organic and Domestic Urban Solid Waste, with the aim of generating electricity at Bairro Confisco, one of the most affected areas by the climate crisis in Belo Horizonte-MG, Brazil. The methodology adopted has sought to integrate the Life Cycle Assessment method and the Systemic Design principles. Under the non-linear approach of the latter, it has been possible to visualize the relationships between neighborhood social actors as well as the interaction of local institutional actors. Thus, the objective and scope have been defined, including the biodigester system boundaries. As a result, the Life Cycle Inventory is presented. It was crafted from the system conceptual model's development and encompasses the processes

involved and the quantification of its inputs and outputs. This quantification is being used to assess the environmental impacts.

Keywords: Life Cycle Inventory; Urban Solid Waste; Power Generation; Biodigester.

1. INTRODUÇÃO

O Pensamento de Ciclo de Vida é uma abordagem que busca compreender, sob a óptica ambiental, como as escolhas influenciam os resultados em cada etapa do ciclo de vida de uma atividade industrial: desde a aquisição de matéria-prima até a fabricação, distribuição, utilização do produto e seu descarte. Pensar no ciclo de vida do produto é importante para reduzir os impactos causados. Nesse sentido, os parâmetros quantitativos são essenciais para comparar e auxiliar na tomada de decisão quanto à melhor alternativa a ser adotada, visando o alcance de melhores metas ambientais. O método de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é, assim, uma ferramenta indicada para quantificar entradas e saídas de materiais (matéria-prima e produtos secundários), energia e resíduos, permitindo o cálculo dos impactos ao longo da vida de um produto. O Design Sistêmico (DS), por sua vez, busca reequilibrar a relação entre produção, meio ambiente e sociedade, por meio do design dos fluxos de matéria e energia entre as atividades produtivas de um determinado território. A essência desta metodologia reside em um princípio fundamental que busca romper com o pensamento linear: os *output* (resíduos ou descartes) de um sistema produtivo devem ser transformados em *input* (recursos - matéria ou energia) para outro(s) sistema(s) produtivo(s), preferencialmente local(is), de forma sistêmica e contínua, tendendo à emissão zero (eliminação de todas as emissões, sejam elas no estado líquido, sólido ou gasoso). Diante disto, entende-se que ambas as abordagens podem ser integradas uma a outra para a obtenção de melhores resultados.

A partir dessa perspectiva, neste trabalho, objetivou-se verificar a viabilidade socioambiental da implementação de um biodigestor ativado por Resíduos Sólidos Urbanos Domésticos Orgânicos (RSUDOs) para a produção de biogás, com vistas à geração de energia elétrica, em um contexto real, o Bairro Confisco, uma das regiões periféricas de Belo Horizonte-MG mais vulneráveis aos efeitos nefastos da crise climática.

Acredita-se que os biodigestores podem contribuir para a diversificação da matriz energética no País, levando-se em conta, também, que os benefícios advindos do aproveitamento dos RSUDOs ultrapassam a produção de energia, abrangendo as dimensões social, econômica e cultural da sustentabilidade. Para o contexto estudado, definiu-se que o biodigestor do modelo canadense seria o mais adequado.

Em virtude do emprego da abordagem sistêmica, foi possível vislumbrar as relações, não somente entre os atores sociais do Bairro Confisco em si, mas, também, os atores institucionais encontrados no território. A partir desta visão, incorporaram-se os dejetos e água usada dos tanques dos animais do Jardim Zoológico na composição da biomassa para a produção do biogás. Como resultado, a análise do Inventário de Ciclo de Vida (ICV) foi elaborada, tendo como referência os limites da fronteira do sistema e os seguintes processos envolvidos:

“Armazenamento dos RSUDOs”, “Construção do Biodigestor”, “Biodigestão”, “Geração de Energia Elétrica” e “Distribuição de Energia Elétrica”.

A avaliação do impacto continua sendo desenvolvida por meio da aplicação do software *OpenLCA* e da base de dados *Ecoinvent*. Os resultados obtidos nessa fase permitirão a interpretação sobre a viabilidade ambiental de implantação do biodigestor no Bairro Confisco.

Por fim, a decisão final também dependerá do refinamento em relação à quantificação dos RSUDOs, por meio de pesquisa de campo e da análise de sua viabilidade econômica.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Meio ambiente, urbanização e resíduos

A urbanização é considerada como o fenômeno global contemporâneo mais significativo, pois mais da metade da população mundial vive em ambientes urbanos (56%, em 2021). Segundo o Relatório Mundial das Cidades 2022 (United Nations Human Settlements Programmed, 2022), 68% da população mundial se concentrarão em área urbana até 2050.

No Brasil tal fenômeno não se revela diferente. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2016), em mais de 500 anos de história, a população brasileira foi crescendo e se concentrando nos grandes centros urbanos.

De acordo com o Banco Mundial (2012), cada um dos 3 bilhões de pessoas que vivem em ambientes urbanos ao redor do mundo gera, em média, 1,2 kg de resíduos por dia. Anualmente esse coletivo produz cerca de 1,3 bilhão de toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Estima-se que, até 2050, esta quantia deve aumentar para 2,2 bilhões de toneladas.

Como consequência, além do aumento do custo da coleta, transporte e tratamento (previsão de US\$ 375,5 bilhões em 2050), os RSU geram impactos negativos substanciais para a economia, saúde, meio ambiente local e global. Importante ressaltar que, de maneira geral, os custos *a jusante* (coleta e acondicionamento) superam os *a montante* (tratamento), revelando a ineficiência desta atividade em nível mundial. Nessa perspectiva, faz-se necessária uma visão integrada da gestão de resíduos sólidos (Banco Mundial, 2012).

No Brasil, em 2014, foram produzidos 78,6 milhões de toneladas de RSU, um aumento de 2,9% em relação ao ano anterior e um índice superior ao crescimento populacional de 0,9%. Deste montante, 41,6% ainda são destinados aos aterros ou lixões a céu aberto, de maneira desordenada, acarretando danos socioambientais substanciais em função do passivo gerado e do desperdício do potencial de reaproveitamento do RSU (Carvalho *et al.*, 2019).

Perrucci e Rodrigues (2018) atribuem a falha do Brasil em coletar e dispor apropriadamente os seus resíduos sólidos urbanos como consequência de: i) alta de recursos econômicos para desempenhar tal tarefa; ii) deficiências administrativas; iii) desinteresse das autoridades públicas quanto à importância da questão ambiental em suas agendas políticas.

Quando dispostos de maneira inadequada, os resíduos contribuem sobremaneira para a emissão dos gases do efeito estufa (GEE), tais como o dióxido de carbono (CO₂) e o metano (CH₄), além de provocar, diretamente, impactos na saúde pública e no meio ambiente, como a contaminação do solo e a poluição das águas subterrâneas e superficiais.

Quando se trata de RSU, o potencial de geração de CH₄ é 21 vezes maior do que o CO₂. Porém, sabe-se que em muitos dos municípios faltam recursos para atender aos objetivos propostos pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída por meio da Lei Nº 12.305, que dispõe sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, além de apontar algumas diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos (Brasil, 2010).

A PNRS prevê a redução da disposição dos resíduos sólidos úmidos em aterros, além do fortalecimento das organizações de catadores, do desenvolvimento de planos estaduais, intermunicipais e municipais e da elaboração de estudos de regionalização e cobrança por serviços de RSU pelos municípios.

O gerenciamento e a disposição do RSU se configuram como um dos grandes desafios enfrentados pela administração pública, como também pelos membros da comunidade científica internacional. Os esforços são direcionados à identificação de formas alternativas de destino final destes resíduos, cuja parte significativa é disposta em aterros, ou são descartados em cursos d'água, contribuindo para a poluição do solo e do ar, e para a ocorrência de enchentes e entupimentos do sistema de esgotamento sanitário urbano.

Sendo assim, o Ministério do Meio Ambiente (MMA) vislumbra a restrição, cada vez maior, da quantidade de resíduos orgânicos dispostos em aterros, promovendo para tanto, e entre outros, a geração de energia elétrica por meio de biodigestores (Ministério do Meio Ambiente, 2012).

A Lei Nº 12.305 já estabeleceu os requisitos para aproveitamento energético de RSU, abrangendo os aspectos de elegibilidade de resíduos, registros e rastreabilidade, amostragem e formação dos lotes, armazenamento, preparo de *Resíduos Sólidos Urbanos para fins Energéticos* (RSUE), classificação dos lotes gerados e uso do RSUE nas *Unidades de Recuperação Energética* (URE) (Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NBR 16849, 2020).

2.2. Biomassa

Toda matéria orgânica, seja de origem vegetal seja animal, utilizada com o objetivo de produzir energia, por meio do processo de digestão anaeróbia, ou *biodigestão*, é denominada biomassa. Biomassa diz respeito ao “substrato” que permite a produção de biogás.

A biodigestão se caracteriza como um processo natural de degradação da matéria orgânica por meio de atividade biológica. Neste processo os microrganismos (bactérias) produzem como resultados principais: a) uma parte líquida rica em nutrientes, denominada “biofertilizante”, que pode ser empregado como fertilizante orgânico e b) uma parte gasosa, composta em cerca de 50 a 75% de metano (CH₄), com alto poder energético, que pode ser utilizado para produzir calor, ou ser convertido em energia elétrica.

Diversos materiais orgânicos podem ser decompostos em um biodigestor. Os principais substratos utilizados para a produção de biogás são: dejetos animais, resíduos agroindustriais (abatedouros, cervejarias, laticínios e fecularias), sobras de alimentos e refugos da agricultura, como bagaço e palhadas. O que difere os substratos é a diversidade dos teores de carboidratos, proteínas, lipídeos e lignocelulose em sua composição (Martinez *et al.*, 2021, p. 9-12). O equilíbrio da produção de biogás depende diretamente da composição química dos substratos utilizados para a alimentação do reator. Ao escolher o substrato mais adequado, se garante não apenas melhor controle do sistema de tratamento, mas, também, a produção de biofertilizante com propriedades superiores e maior eficiência na bioconversão da matéria orgânica em energia.

O carbono é a principal fonte de alimentação das bactérias. As principais fontes de carbono são os carboidratos da biomassa que são degradados pelos microrganismos e utilizados como fonte energética para o seu crescimento. Já o nitrogênio é uma importante fonte para a síntese de proteínas e reprodução protoplasmática das bactérias. A deficiência de nitrogênio no substrato implica em limitação da atividade metabólica dos microrganismos, que neste caso não conseguem degradar todo o carbono existente, resultando em ineficiência do processo de bioconversão de substratos em biogás. Entretanto, o excesso de nitrogênio pode não ser totalmente utilizado pelas bactérias e tende a acumular no sistema, principalmente na forma de amônia (NH_3). A concentração de amônia pode inibir a atividade biológica. Para evitar a formação de amônia dentro do reator deve-se equilibrar a dosagem de substratos ricos em proteínas e manter um pH do sistema próximo da neutralidade ($\text{pH} = 7$). O equilíbrio da digestão anaeróbia também está relacionado à qualidade dos substratos orgânicos, da alimentação dos reatores e da atividade biológica dos microrganismos.

Como visto, para que o processo da biodigestão seja equilibrado e ocorra com eficiência, uma série de parâmetros de controle devem ser avaliados. O uso de substratos com diferentes teores de umidade e taxas de biodegradabilidade requer, frequentemente, a aplicação de algum tipo de pré-tratamento. Estes processos podem ser físicos, químicos ou biológicos. Quando submetida aos pré-tratamentos, a biomassa se torna menos complexa e, portanto, a produção de biogás é facilitada.

2.3. Biodigestor e geração de energia elétrica

A busca por fontes renováveis para a geração de energia elétrica está diretamente relacionada com a intensificação de sua demanda, pois segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2009), o consumo energético mundial deverá crescer aproximadamente 40% (entre 2006 e 2030) em razão do aumento da população global, passando dos atuais 7,7 bilhões (2022) para 9,7 bilhões de indivíduos em 2050.

Nesse contexto, a biomassa é uma excelente alternativa para a transição da matriz energética, com vistas à utilização de fontes de energia renováveis. Especificamente, o material orgânico do RSU, que representa quase a metade do peso dos resíduos, pode ser usado como substrato de fonte alternativa de energia, reduzindo significativamente seu volume que, normalmente, é destinado aos aterros sanitários.

Dentre as tecnologias para o aproveitamento do RSU, o Banco Mundial (2012) e o Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2012) destacam a decomposição do material orgânico por meio de biodigestores, conhecidos como tecnologia de *Digestão Anaeróbia Acelerada* (DAA). De acordo com o mapeamento do potencial de aproveitamento energético dos RSU para geração de energia elétrica, realizado pelo Ministério de Minas e Energia, verificou-se que há potencial de atendimento dos setores residencial, comercial e de cogeração, por meio da biodigestão, com potencial de 4,2 Mm³/dia (Empresa de Pesquisa Energética, 2014).

Do ponto de vista construtivo, o biodigestor refere-se a um reservatório fechado (reator estanque / tanque de coleta), que oferece as condições ambientais adequadas para o desenvolvimento de um consórcio de microrganismos anaeróbios, capazes de degradar os substratos orgânicos. Na medida em que o gás vai se acumulando no reator estanque, uma válvula se abre, permitindo que o biogás saia e seja armazenado em um tanque de coleta.

A produção de biogás por meio de biodigestores é uma técnica antiga. Um dos primeiros registros destes equipamentos com vistas à produção de gás combustível ocorreu na Índia, em Bombaim, em 1857 (Nogueira, 1986).

Atualmente, os biodigestores podem ser classificados, como “*de batelada*”, que são alimentados de uma só vez com grande quantidade de matéria orgânica, ou “*contínuo*”, que operam com cargas diárias de matéria orgânica (biomassa). Este último torna-se mais adequado para evitar o grande acúmulo e armazenamento de substrato.

Os principais modelos de biodigestores contínuos são (Fonseca *et al.*, 2009; Lima, 2013; Flórido, 2016; Nogueira *et al.*, 2016):

- a) o **modelo indiano**, que é caracterizado por possuir uma campânula como gasômetro, a qual pode estar mergulhada sobre a biomassa em fermentação. É construído com uma parede central que divide o tanque de fermentação em duas câmaras, facilitando a circulação da matéria orgânica por todo o interior da câmara de fermentação. É mais indicado para pequenos produtores;
- b) o **modelo chinês**, que é formado por uma câmara cilíndrica em alvenaria para a fermentação, com teto abobadado impermeável, que armazena o biogás. Não usa gasômetro, sendo seu funcionamento baseado no princípio de prensa hidráulica, de modo que o aumento da pressão em seu interior é resultante do acúmulo de biogás, provocando um deslocamento de efluente da câmara de fermentação para a caixa de saída. Uma parcela do gás formado na caixa de saída acaba sendo liberada para a atmosfera, fazendo com que esse tipo de biodigestor não seja utilizado para instalações de grande porte;
- c) o **modelo canadense**, ou de lagoa coberta (BLC), que é considerado de baixo nível tecnológico, de fácil construção e manuseio, além de ter um alto rendimento. Reconhecido por sua horizontalidade, sua largura é bem maior em relação à profundidade, tornando sua área de exposição ao sol bem maior, permitindo maior produção de biogás e uma redução nos riscos de entupimento. Trata-se de um tanque escavado no solo, impermeabilizado e coberto com material geossintético (PVC, PEAD etc.), caracterizado pela baixa permeabilidade a fluídos e gases, suficientemente flexível para

acumular biogás, inflando-se como um balão. Este tem sido amplamente empregado no Brasil, sobretudo, no meio rural para gerenciamento dos efluentes da produção animal.

O biogás somente se torna combustível eficiente quando o teor de CH₄ for superior ao de CO₂. Sendo o gás carbônico incombustível, com sua eliminação por meio da dissolução em água, é possível obter um biogás com 95% de metano e poder calorífico de cerca de 8500 Kcal/m³. Esse biogás pode ser fonte de energia de múltipla utilização: aquecedor de água, geladeiras, fogão, calefação, iluminação, veículos de grande e pequeno porte, grupos geradores, embarcações etc. No caso do RSU, o potencial de produção é calculado com base na relação de 5.500 m³ de metano para cada 100 toneladas diárias de lixo orgânico, ou 55 m³/t (Empresa de Pesquisa Energética, 2014, p. 38).

Quanto à transformação do biogás em energia, existem diversas tecnologias para efetuar essa conversão energética. No caso do biogás, a energia química contida em suas moléculas é convertida em energia mecânica por um processo de combustão controlada. Essa energia mecânica ativa um “grupo gerador” que a converte em energia elétrica. O termo “grupo gerador” refere-se a uma série de itens existentes e indispensáveis para a “geração” de energia. Na ausência de qualquer um dos componentes, não é possível produzir energia elétrica estável. Nesse processo, a energia mecânica é convertida em energia elétrica a partir de indução eletromagnética.

Ademais, após consumo, o excedente de energia elétrica pode ser exportado para a rede elétrica da concessionária de energia local e ser resgatado, por meio de créditos, para utilização futura.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O estudo apresentado nesse artigo faz parte de projeto de pesquisa que visa a integração entre o método de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e a metodologia do Design Sistemico (DS). Sendo assim, buscou-se investigar a viabilidade socioambiental para a implantação de um biodigestor, ativado por *Resíduos Sólidos Urbanos Domésticos Orgânicos* (RSUDOs), para a produção de biogás, com vistas à geração de energia elétrica para o Bairro Confisco, localizado em região periférica na cidade de Belo Horizonte-MG.

Por um lado, aplicou-se a abordagem não linear do DS, sob a qual foi possível vislumbrar as relações entre atores sociais do Bairro Confisco, bem como o envolvimento dos atores institucionais locais, tais como a Fundação de Parques Municipais e Zoobotânica de Belo Horizonte (FPMZB). A partir desta articulação, incorporou-se parte dos dejetos dos animais herbívoros do Jardim Zoológico na composição da biomassa, assim como água dos tanques dos animais e peixes, que é trocada uma vez por semana.

Por outro lado, a partir da aplicação do método de ACV, foi possível se proceder à análise do inventário dos processos envolvidos no sistema.

3.1. Caracterização do campo de estudo

O “Conjunto Confisco”, ou apenas “Confisco”, é um bairro que surgiu em 1988, a partir do movimento de famílias sem moradia que lutavam pelo direito à habitação. O Confisco está localizado na porção noroeste da capital mineira, a montante da Lagoa da Pampulha, em uma área de conurbação entre os municípios de BH e Contagem-MG.

Segundo Viegas (2007), os bairros na região noroeste da Pampulha iniciaram sua constituição a partir da década de 1970, quando foram aprovados vários loteamentos e ampliada a população nessa localidade. Como surgiram no contexto da metropolização de Belo Horizonte, incorporaram as contradições e conflitos do período, o que se refletiu em limitada qualidade de vida, segregação socioespacial e multiplicação das periferias. Também foi nessa época que se intensificou a luta pela propriedade da terra pela população menos favorecida. Assim, nesse contexto, emergiu o Bairro Confisco, implantado pela Prefeitura de Belo Horizonte (PBH) a fim de reduzir o problema de falta de moradias para famílias de menor renda. Por meio de produções da comunidade, identifica-se que os primeiros moradores eram famílias que ocupavam o pátio da Igreja de São José, no centro da capital, como forma de protesto e de cobrança pelo direito à habitação.

As obras para sua construção foram realizadas em esquema de mutirão, com a participação dos moradores, tornando a solidariedade e o engajamento traços marcantes na história do Confisco.

O Bairro possui histórico de vulnerabilidade. Mesmo com a construção das casas, a falta de infraestrutura urbana foi um fator de constante reivindicação por parte de seus moradores: não havia escolas para as crianças nem Centro de Saúde, as vias de acesso não eram asfaltadas e os sistemas de água e luz municipais ainda não haviam sido expandidos. Marinho (2016) exemplifica esse cenário ao trazer a história da Praça do Confisco, marco importante para o território, que, na década de 1990, era uma voçoroca causada pela erosão do solo e pela falta de sistemas de esgoto e drenagem. O local era utilizado para despejo de resíduos, uma vez que não havia coleta de lixo no Bairro. No início dos anos 2000, a região sofreu um deslizamento, com resultados trágicos e, graças às lideranças comunitárias, os moradores conseguiram, por meio do Orçamento Participativo, construir o espaço público que hoje é a Praça do Confisco (Sampaio; Fagundes, 2016). Atualmente, o território ainda apresenta muitas dificuldades e desafios. Um estudo realizado em 2016, encomendado pela PBH, indicou que “[...] o conjunto Confisco aponta alta vulnerabilidade às ondas de calor e à dengue, tanto no ano de 2016, quanto no ano de 2030” (Waycarbon, 2016, p. 40). Além disto, há problemas graves de segurança e violência.

Entretanto, segundo Corgosinho (2019), após a ocorrência de troca de tiros durante a realização de uma atividade voltada para estudantes do ensino fundamental, houve uma mobilização por parte das lideranças comunitárias, órgãos municipais e outras instituições, para a criação de um grupo com o intuito de articular ações de promoção da paz e prevenção da violência no território.

Esse grupo, denominado “Rede Confisco pela Paz”, atua também como um espaço de cidadania, com encontros mensais (presenciais ou virtuais), no qual os moradores locais podem apresentar seus anseios e necessidades para o desenvolvimento socioeconômico da região, bem como opinar e participar da

tomada de decisões para novas ações no território. Conta com o apoio das escolas locais, da Secretaria Municipal de Desenvolvimento Econômico de Belo Horizonte (SMDE-BH), do Centro de Referência de Assistência Social Confisco (CRAS - Confisco), do Centro Cultural Pampulha (CCP), da Guarda Municipal (GM) e, além de outros atores sociais, conta com o apoio da Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG) e da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). É nesse contexto que se insere o estudo ora apresentado.

3.2. Design sistêmico para biodigestor no bairro Confisco

Sob a abordagem não linear do DS, diversos atores e suas inter-relações foram considerados do sistema do biodigestor no Bairro Confisco.

Tais atores foram considerados como potenciais geradores dos RSUDOs do Bairro, fornecedores de matéria orgânica para a biomassa do biodigestor. Documento de 2010 da PBH (2010) permitiu o levantamento de dados referentes ao Bairro Confisco, tais como população, domicílios, densidade domiciliar e demográfica, além da área ocupada.

Os quantitativos do Confisco, extraídos deste documento, foram utilizados como base para a realização do estudo, quais sejam: 4.283 habitantes; 1.217 domicílios; densidade de 3,52 hab/domicílio; densidade demográfica de 15.504,47; área de 0,27 km².

Para identificar o quantitativo dos estabelecimentos comerciais do setor alimentício do Bairro, empregou-se um levantamento realizado por meio da plataforma Google Maps (2022). Foram identificados: duas padarias; seis lanchonetes; dois restaurantes.

Quanto às escolas, havia conhecimento prévio sobre as três que se localizam no Confisco, quais sejam: Escola Municipal Anne Frank (EMAF); Escola Municipal Alice Nacif (EMAN); Escola Municipal de Educação Infantil Urca (EMEI Urca).

Além desses atores, a Fundação de Parques Municipais e Zoobotânica de Belo Horizonte (FPMZB), vizinha ao Bairro Confisco, também foi considerada no sistema. A FPMZB ocupa uma área de 1.750.000 m², onde se encontram o Jardim Zoológico, que abriga animais da fauna nativa brasileira e da exótica mundial, muitos deles ameaçados de extinção, e a Zoobotânica, que se dedica à conservação da flora, especialmente, a de Minas Gerais.

A FPMZB abriga ainda a Unidade de Compostagem (UC) de Belo Horizonte, gerenciada pela PBH, que recebe todo o material proveniente de podas e supressões, juntamente com 18 m³ por semana de dejetos dos animais herbívoros do Zoológico (Teixeira, 2003). O composto produzido com estes materiais é utilizado na produção de mudas para arborização urbana e recuperação ambiental de áreas degradadas.

Prevê-se que a instalação do biodigestor seja feita na FPMZB ao lado da UC. O local é propício à instalação do biodigestor do tipo canadense, pois o terreno é plano e com incidência do sol em todas as estações do ano, facilitando o controle da temperatura dentro da manta e, conseqüentemente, promovendo a eficiência da biodigestão.

Igualmente, prevê-se a incorporação de parte dos dejetos dos animais herbívoros do Zoológico aos RSUDOs na composição da biomassa, pois a combinação de

substratos orgânicos em codigestão com dejetos de origem animal é recomendada, uma vez que estes podem aumentar a produção de metano que, por sua vez, é o responsável pela geração do biogás. Além disso, será utilizada a água dos tanques dos animais e peixes, que é trocada uma vez por semana. O biodigestor necessita de uma quantidade significativa de água para funcionar (proporção de 1:1), sendo a utilização desse efluente bastante conveniente, pois também é rico em nutrientes para os microrganismos.

3.3. ACV para biodigestor no bairro Confisco

De acordo com a Norma ABNT NBR ISO 14040 (2009), a avaliação dos impactos ambientais provocados por sistemas produtivos tem como objetivo subsidiar o desenvolvimento ou melhoria de produtos ou processos, o planejamento estratégico das empresas ou organizações, bem como a definição de políticas públicas.

O método é composto por quatro fases: 1ª) definição de objetivo e escopo; 2ª) análise de inventário; 3ª) avaliação de impactos; 4ª) interpretação. Ainda de acordo com a Norma, tanto a abrangência quanto a profundidade da ACV podem variar conforme o objetivo do estudo.

No estudo em questão, na primeira fase, definiu-se como objetivo o aprofundamento quanto à quantificação dos impactos ambientais provocados pelo sistema do biodigestor, tendo como escopo a verificação de sua viabilidade, do ponto de vista ambiental, no contexto do Bairro Confisco, compreendendo as atividades desde o armazenamento e transporte dos RSUDOs até a distribuição da energia elétrica, limitando-se, pois, na fronteira do “do portão ao túmulo”.

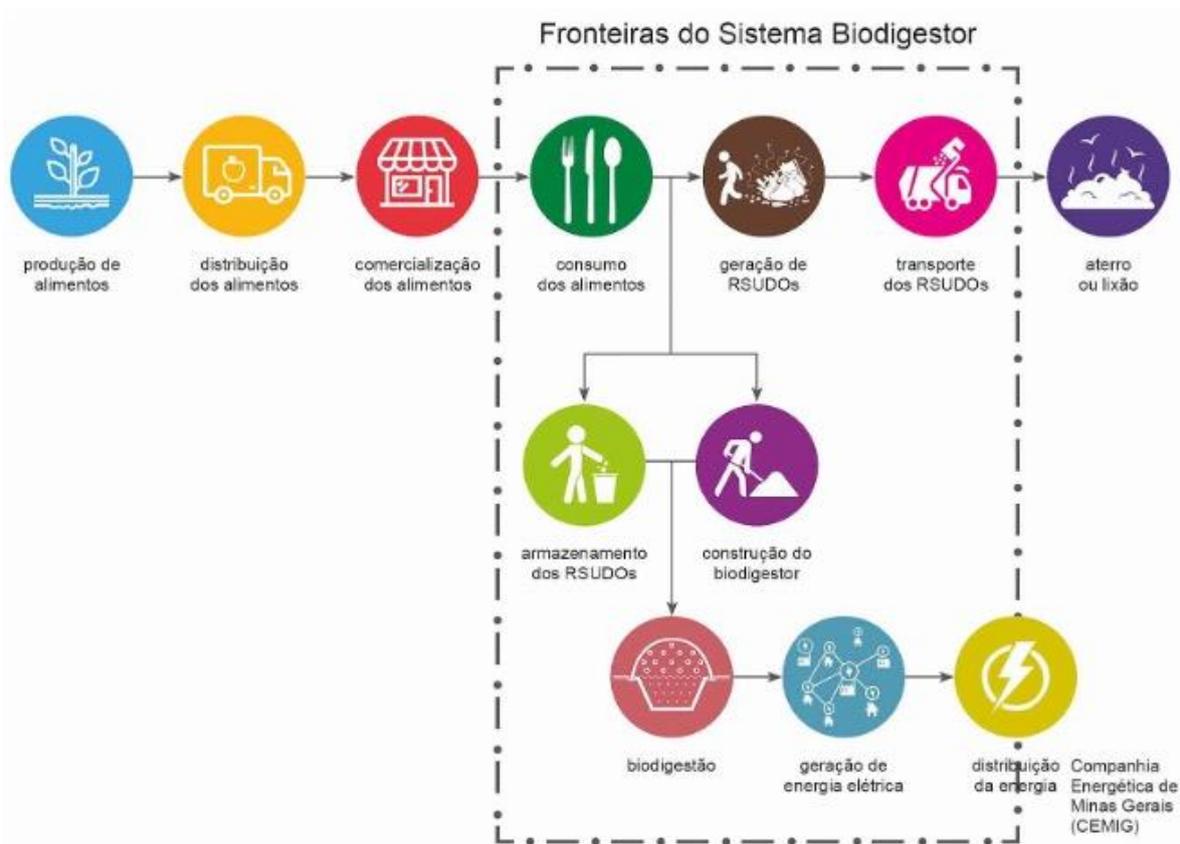
Na segunda fase, procedeu-se à análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) do sistema do biodigestor. Este modelo facilita: i) a visualização e o entendimento da cadeia produtiva de um produto e de suas etapas; ii) a identificação dos fluxos de entrada e saída - de matéria, energia e resíduo - em cada um dos seus processos; iii) e a compreensão da avaliação dos impactos ambientais no ciclo de vida do produto.

A terceira fase, ainda em andamento, está sendo desenvolvida por meio da aplicação do software *OpenLCA* e da base de dados *Ecoinvent*. Os resultados obtidos nesta fase permitirão a interpretação, quarta fase do método, e a conclusão final sobre a viabilidade socioambiental de implantação do biodigestor no Bairro Confisco.

4. RESULTADO: INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA

Partindo-se do objetivo e do escopo definido para a ACV do sistema do biodigestor no Bairro Confisco, foi estruturado seu Inventário do Ciclo de Vida (ICV). A Figura 1 apresenta os limites do sistema, que compreendem as atividades desde o armazenamento e transporte dos RSUDOs até a distribuição da energia elétrica.

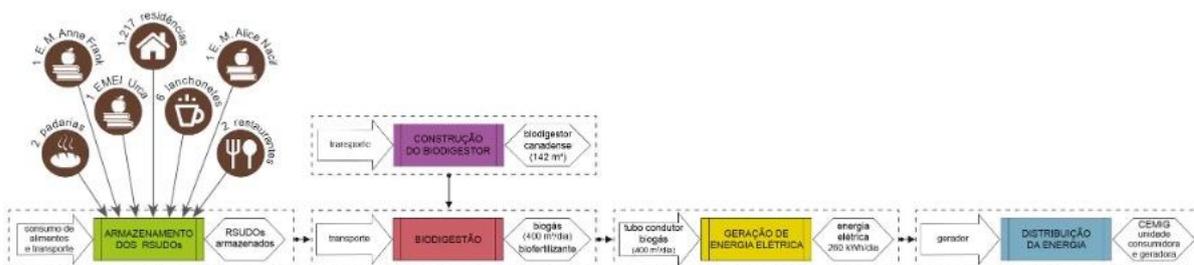
Figura 1: Fronteiras do sistema biodigestor: “do portão ao túmulo”.



Fonte: Autoras.

O modelo conceitual (Figura 2) apresenta o Sistema Biodigestor, com todos os processos envolvidos, quais sejam: “*Armazenamento dos RSUDOs*”, “*Construção do Biodigestor*”, “*Biodigestão*”, “*Geração de Energia Elétrica*” e “*Distribuição de Energia Elétrica*”. Neste, incluiu-se, também, os “atores” (geradores de RSUDOs) do sistema (representados pelos círculos de cor marrom). Ou seja, aqueles que irão “armazenar” seus RSUDOs para posterior inserção no sistema, compostos por: 1.217 domicílios, três escolas municipais, duas padarias, seis lanchonetes e dois restaurantes do Bairro.

Figura 2: Sistema biodigestor e seus atores.



Fonte: Autoras.

Os principais critérios para a seleção do modelo de biodigestor a ser instalado na FPMZB se referem à quantidade de biomassa disponível e à variação de seu fornecimento. Após a coleta e análise dos dados sobre os RSUDOs gerados no Bairro Confisco, verificou-se que a produção destes resíduos é compatível com o modelo canadense, que é indicado para a escala proposta. Esse modelo utiliza materiais triviais, sendo a sua cobertura composta geralmente por uma lona de plástico maleável, tipo PVC, que infla como um balão com a produção do biogás. Eles podem ser construídos enterrados ou não. Além disso, a sua cobertura pode ser retirada com certa facilidade para limpeza.

Todos os dados quantitativos foram levantados para todos os processos, permitindo a avaliação dos impactos, que continua sendo realizada por meio de software e base de dados.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No contexto da emergência e injustiça climática, a produção de energia limpa e local em um território extremamente vulnerável aos seus efeitos parece bastante apropriada. Nessa perspectiva, acredita-se que a investigação quanto à viabilidade socioambiental da implantação de um biodigestor com vistas à produção de energia elétrica no Bairro Confisco em Belo Horizonte-MG, pode auxiliar na estruturação de sistemas mais justos e sustentáveis.

Para tanto, sob a abordagem não linear do Design Sistêmico, foram consideradas as relações entre atores sociais do Bairro Confisco, bem como o envolvimento dos atores institucionais locais para a implantação do biodigestor. A verificação de sua viabilidade, do ponto de vista dos impactos ambientais, está sendo possível a partir da aplicação do método de Avaliação do Ciclo de Vida. Por meio do desenvolvimento do modelo conceitual do sistema do biodigestor, foi possível se proceder à análise do Inventário de Ciclo de Vida, no qual foram incluídos todos os processos envolvidos, bem como levantados os quantitativos das entradas e saídas de material, energia e resíduos desses processos, que estão permitindo a avaliação do impacto e a interpretação quanto à viabilidade ambiental de implantação do biodigestor no Bairro Confisco.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16849**: resíduos sólidos urbanos para fins energéticos – requisitos. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: gestão ambiental – avaliação do ciclo de vida: requisitos e orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

BANCO MUNDIAL. **What a waste**: a global review of solid waste management. Washington: World Bank, 2012. Disponível em:

<https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/302341468126264791/what-a-waste-a-global-review-of-solid-waste-management>.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília: Diário Oficial da União, Brasília, 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm.

CARVALHO *et al.* **Oportunidades enterradas:** geração elétrica a partir do biogás de resíduos sólidos urbanos. Vitória: EDUFES, 2019. Disponível em: http://repositorio.ufes.br/handle/10/774/browse?type=title&sort_by=1&order=ASC&pp=20&etal=-1&null=&offset=0.

CORGOSINHO, R. M. L. **Elementos dificultadores e facilitadores da efetivação das políticas públicas em rede:** o caso da rede do Confisco pela paz. 2019. Monografia (Especialização em Gestão Pública). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, EPE. Ministério de Minas e Energia. **Nota técnica 18/14:** inventário energético dos resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/DEA%2018%20-%20%20Invent%20%C3%A1rio%20Energ%20%C3%A9tico%20de%20Res%20%C3%ADduos%20S%20%C3%B3lidos%20Urbanos%20B1%5D.pdf>.

FLÓRIDO, D. A. M. **Avaliação de um sistema de digestão em pequena escala.** 2016. 49 f. Dissertação de mestrado. Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2016.

FONSECA *et al.* Análise de viabilidade econômica de biodigestores na atividade suinícola na cidade de Balsas - MA: um estudo de caso. In: CONGRESSO DA SOBER, 47, Porto Alegre, 2009. [**Anais eletrônico...**]. Porto Alegre: UFRGS, 2009. Disponível em: <https://doceru.com/doc/8cnnn1e>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, IBGE. **Arranjos populacionais e concentrações urbanas no Brasil.** 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2016. Disponível em: www.ibge.gov.br/apps/arranjos_populacionais/2015.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World energy outlook.** Paris: OECD/IEA, 2009.

LIMA, F. P. A. (org). **Prestação de serviços de coleta seletiva por empreendimentos de catadores:** instrumentos metodológicos para contratação. Belo Horizonte: INSEA, 2013. Disponível em: <http://www.insea.org.br/publicacoes-do-insea/>.

MARINHO, M. A. C. A periferização na Região Metropolitana de Belo Horizonte: narrativas sobre a formação do bairro Estrela D'alva. In: SIMPÓSIO DO

INSTITUTO DE CIÊNCIAS SOCIAIS: MEIO AMBIENTE E DIREITO À VIDA, V, 2016, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: 2016.

MARTINEZ *et al.* **Operação e monitoramento de reatores anaeróbios**: guia de boas práticas. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2021.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Plano nacional de resíduos sólidos**. Brasília: MMA, 2012.

NOGUEIRA, L. A. H. **Biodigestão**: a alternativa energética. São Paulo: Nobel, 1986.

NOGUEIRA *et al.* Projeto de unidade de bioenergia e tratamento de resíduos de abatedouros de aves de corte. In: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA E ENSINO EM CIÊNCIAS – CONAPESC, I, 2016, Campina Grande. [**Anais eletrônicos...**]. Campina Grande: Realize Editora, 2016. Disponível em: <https://www.editorarealize.com.br/artigo/visualizar/18186>.

PERRUCCI, G. G. S.; RODRIGUES, G. O. **Resíduos orgânicos e a aplicação doméstica do biogás gerado**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso. Escola Politécnica de Engenharia Ambiental, Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2018. Disponível em: <https://bdta.abcd.usp.br/item/002956319>.

SAMPAIO, L.; FAGUNDES, M. (org). **História do Confisco em quadrinhos**. Belo Horizonte: Gráfica Cópia & Arte, 2016.

TEIXEIRA, Vitor Hugo. **Biogás**. Lavras, 2003.

UNITED NATIONS HUMAN SETTLEMENTS PROGRAMMED, UN-HABITAT. **World cities report 2022**: envisaging the future of cities. Nairobi: UN-HABITAT, 2022. Disponível em: <https://unhabitat.org/wcr/>.

VIEGAS, M. I. A. **Consonâncias e dissonâncias da grande sinfonia**: os sentidos e conteúdos da vida urbana nos acordes de metrópole contemporânea – o orfeão da Pampulha. 2007. Dissertação de mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

WAYCARBON. **Análise de vulnerabilidade às mudanças climáticas do Município de Belo Horizonte**: resumo para tomadores de decisão. Belo Horizonte: WayCarbon, 2016. Disponível em: <http://conteudo.waycarbon.com/resumo-para-os-tomadores-de-decisao-estudo-de-vulnerabilidade-as-mudancas-climaticas-de-belo-horizonte>.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), à Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG) e à Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), que têm permitido a realização desta pesquisa.