



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

Kátia Andréa Carvalhaes Pêgo, Doutora, Universidade do Estado de Minas Gerais.

katia.pego@uemg.br

Andréa Franco Pereira, Doutora, Universidade Federal de Minas Gerais.

andreafranco@ufmg.br

[Linha temática: T5. Economia circular]

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 (ACV) e os princípios do Design Sistêmico (DS). Sob a abordagem não linear do DS, foi possível vislumbrar as relações entre atores sociais do Bairro, bem como a interação de atores institucionais locais. Diante disto, na primeira fase da ACV, foram definidos o objetivo e o escopo, incluindo as fronteiras do sistema do biodigestor. Como resultado, apresenta-se o Inventário do Ciclo de Vida (segunda fase da ACV), 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

Abstract

The purpose of the research presented in this paper is to examine the ecological 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 (LCA) method and the Systemic Design (SD) principles. Under the DS's non-linear approach, it has been possible to visualize the relationships between neighborhood social actors as well as the interaction of local institutional actors. Thus, in the first phase of the LCA, the objective and scope have been defined, including the biodigester system boundaries. As a result, the Life Cycle Inventory (second phase of the LCA) is presented. It has been 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

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 outros sistemas produtivos, preferencialmente locais, de forma sistêmica e contínua. 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 projetar novas relações entre sistemas sociais e institucionais, encontrados no território do Bairro Confisco. 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.

1.1. 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 (UN-HABITAT, 2022), 68% da população mundial se concentrarão em área urbana até 2050.

De acordo com o Banco Mundial (2012), cada um dos três 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) falta 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 de 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, tais como a contaminação do solo e a poluição das águas subterrâneas e superficiais. Em relação ao RSU, o potencial de geração de CH₄ é 21 vezes maior do que o CO₂.

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 (MMA, 2012).

1.2. 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 (CH_4), 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.

1.3. Biodigestor e geração de energia

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 (EPE, 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; ARAÚJO; HENDGES, 2009; LIMA, 2013; FLÓRIDO, 2016; NOGUEIRA; CAVALCANTI; SILVA, 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 líquidos 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 CH_4 for superior ao de CO_2 . 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 (EPE, 2014, p. 38).

Quanto à transformação do biogás em energia, de acordo com Reis (2020), 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 gerador¹” que a converte em energia elétrica. 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.

2. 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 Sistemático (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 (PÊGO, 2016), 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.

2.1. 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.

¹ 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.

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.

2.2. Design Sistêmico para biodigestor no Bairro Confisco

O objetivo do Design Sistêmico é promover o reequilíbrio entre produção, ambiente e sociedade, por meio do desenvolvimento de produtos, sistemas, serviços ou processos que tendem a emissão zero (seja em estado líquido, sólido ou gasoso). Para tanto, sua metodologia é dividida em quatro etapas, quais sejam: 1^a) compreender o território: elaboração do *Relevo Holístico* do território, a partir de uma investigação *in loco*, de maneira sistêmica; 2^a) sistematizar e analisar os sistemas produtivos: apuração quantitativa e qualitativa de todos os *input* e *output* das atividades produtivas locais; 3^a) projetar: desenvolvimento dos fluxos de matéria e energia entre os sistemas produtivos do território; 4^a) confrontar: comparação da abordagem atual (existente) com a sistêmica (proposta). A aplicação dessa metodologia facilita o aumento exponencial da capacidade produtiva do território em questão e, conseqüentemente, a geração de trabalho e renda para a população local. Nessa perspectiva, o designer projeta principalmente relações, por meio de fluxos de matéria e energia entre os sistemas produtivos, fundamentalmente, no mesmo território.

Sendo assim, iniciou-se pela compreensão do Confisco e pela elaboração de seu Relevo Holístico. Essa fase se revelou fundamental para a identificação dos sistemas, que pudessem contribuir, por meio de seus *output*, para o funcionamento e viabilidade do biodigestor, assim como para a posterior articulação entre tais sistemas. Os mesmos foram reunidos em três grupos, de acordo com as características de seus *output*: (i) RSUDOs – moradores da comunidade, escolas e estabelecimentos comerciais do setor alimentício; (ii) dejetos de animais – Jardim Zoológico de BH; (iii) água rica em nutrientes – Jardim Zoológico de BH.

Para a sistematização e análise desses sistemas (segunda etapa), foram utilizados dados de fontes distintas, associadas ao Relevo Holístico, quais sejam: (i) PBH² – 4.283 habitantes, 1.217 domicílios, densidade de 3,52 hab./domicílio, densidade demográfica de 15.504,47, área de 0,27 km²; (ii) plataforma Google Maps – 02 padarias, 06 lanchonetes e 02 restaurantes; (iii) 03 escolas – Escola Municipal Anne Frank (EMAF), Escola Municipal Alice Nacif (EMAN) e Escola Municipal de Educação Infantil Urca (EMEI Urca); (iv) funcionários da Fundação de Parques Municipais e Zoobotânica de Belo Horizonte (FPMZB), onde se localiza o Jardim Zoológico.

A FPMZB ocupa uma área de 1.750.000 m², onde se encontra 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 Fundação 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.

O projeto dos fluxos de matéria e energia entre os sistemas, terceira etapa da metodologia do DS, conjectura-se a instalação do biodigestor do tipo canadense na FPMZB, ao lado da UC. Este se configura como um local bastante propício, 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.

² Disponível em:

[http://prefeitura.pbh.gov.br/sites/default/files/noticia/corpo/bairros_pop_dens_bh_2010%20\(3\).pdf](http://prefeitura.pbh.gov.br/sites/default/files/noticia/corpo/bairros_pop_dens_bh_2010%20(3).pdf).

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.

2.3. 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 de ACV 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, a partir do modelo conceitual proposto por Pereira (2012). 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.

3. Resultados: 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.

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.

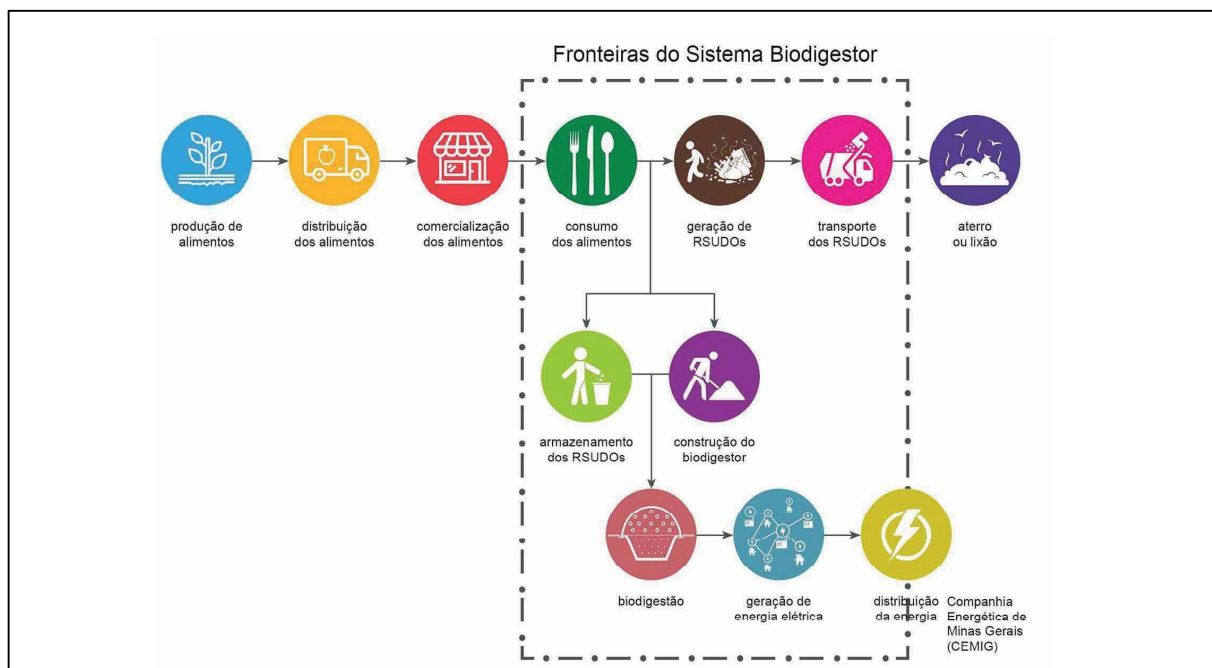


Figura 1: Fronteiras do Sistema Biodigestor: “do portão ao túmulo”. Fonte: elaborado pelas autoras.

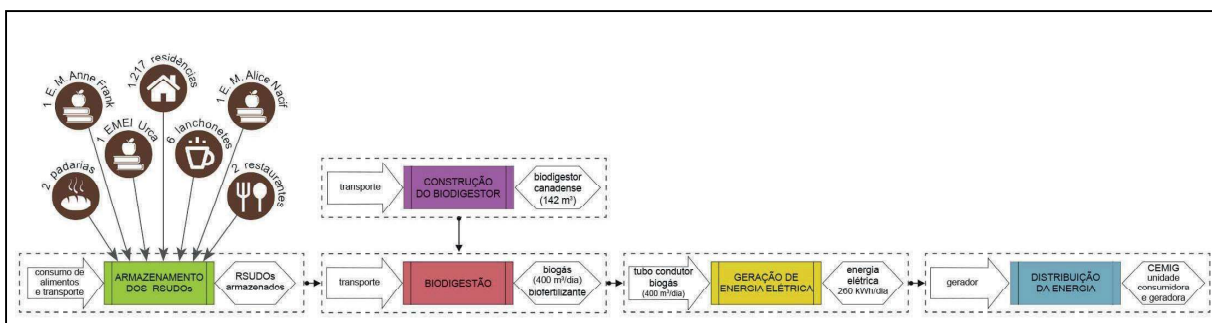


Figura 2: Sistema Biodigestor e seus atores. Fonte: elaborado pelas autoras.

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.



4. 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.

A partir dos resultados obtidos, vislumbra-se a geração distribuída de energia elétrica nas regiões periféricas de BH, mas também de outros centros urbanos, a partir da separação, coleta e manejo dos RSUDOs nos territórios, considerando as especificidades dos mesmos.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais, à Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, bem como à UEMG e à UFMG pelos recursos concedidos.

Referências

- 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.
- CARVALHO, R. Q.; TAVARES, A. N.; SANTOS, G. V.; BAJAY, S.V. **Oportunidades enterradas**: geração elétrica a partir do biogás de resíduos sólidos urbanos. Vitória: EDUFES, 2019.
- CORGOSINHO, R. M. L. **Elementos dificultadores e facilitadores da efetivação das políticas públicas em rede**: o caso da rede do Confisco pela paz. 2019. Especialização em Gestão Pública (Monografia), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Ministério de Minas e Energia. **Nota técnica 18/14**: inventário energético dos resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 2014.
- FLÓRIDO, D. A. M. **Avaliação de um sistema de digestão em pequena escala**. 2016. 49 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente) – Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2016.
- FONSECA, F. S. T.; ARAÚJO, A. R. A.; HENDGES, T. L. 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 eletrônicos...*]. Porto Alegre: UFRGS, 2009.

IEA. 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.

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, D. G.; BASTOS, J. A.; ALINO, J. H. L.; REMOR, P. V.; EDWIGES, T. **Operação e monitoramento de reatores anaeróbios**: guia de boas práticas. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2021.

MMA. 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, A. C.; SILVA, E. M. C. A.; CAVALCANTI, M. T.; SILVA, J. N. 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.

PÊGO, K. A. C. (2016). **Approach of the Systemic Design in Material and Intangible Culture of Estrada Real**: Territorial Serro Case. These. Sistemi di Produzione & Design, Politecnico di Torino, Torino.

PEREIRA, A. F. Avaliação do ciclo de vida (ACV) no ambiente construído: importância da modelagem do inventário do ciclo de vida para projeto de produto e arquitetônico. In: RESENDE, M. A. P. (Org.). **Tecnologia do ambiente construído e interdisciplinaridade**. Belo Horizonte: Instituto de Estudos do Desenvolvimento Sustentável – IEDS, 2012, p. 1-19.

PERRUCCI, G. G. S.; RODRIGUES, G. O. **Resíduos orgânicos e a aplicação doméstica do biogás gerado**. 2018. 110 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Escola Politécnica da USP – Universidade de São Paulo, 2018.

REIS, L. **Biogás e energia elétrica**: como produzir eletricidade com resíduos orgânicos? CIBiogás Energias Renováveis, 2020.

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

UN-HABITAT, UNITED NATIONS HUMAN SETTLEMENTS PROGRAMMED. **World cities report 2022**: envisaging the future of cities. Nairobi: UN-HABITAT, 2022.

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 (Mestrado em Geografia), 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.