

Inventário do Ciclo de Vida de um biodigestor: uma perspectiva quantitativa para Design Sistemico no território do Serro/MG

Life Cycle Inventory of a biodigester: a quantitative perspective for Systemic Design in the territory of Serro/MG

Adson Pinheiro Queiroz Viana, mestrando, Universidade do Estado de Minas Gerais
adson.queiroz12@gmail.com

Gabriel de Melo Senna, mestrando, Universidade Federal de Minas Gerais
gabrielmsenna@gmail.com

João Vitor Souza Teixeira, mestrando, Universidade Federal de Minas Gerais
jvst@ufmg.br

Larissa Arêdes Monteiro, mestranda, Universidade Federal de Minas Gerais
lam2019@ufmg.br

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

Resumo

O objetivo do artigo é associar a metodologia do Design Sistemico (DS) com o método da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), com vistas a contribuir para práticas mais eficientes de conservação. Para tanto, adotou-se parte de um macrosistema, desenvolvido por meio do DS, como unidade de análise: o biodigestor. Para a realização da ACV, os objetivos e o escopo foram definidos, subsidiando o levantamento do inventário do Ciclo de Vida do artefato. Concluiu-se que sua implantação não é uma opção sustentável. Por outro lado, a associação entre o DS e a ACV revelou que um olhar articulado, que envolva métodos qualitativos e quantitativos, com movimento contínuo de aproximação (*zoom-in*) e de consideração do todo (*zoom-out*), pode colaborar com práticas mais eficientes de conservação e auxiliar a estruturação de sistemas mais sustentáveis.

Palavras-chave: Design Sistemico; Avaliação do Ciclo de Vida; Biodigestor.

Abstract

*The goal of the article is to associate Systemic Design (DS) with Life Cycle Assessment (LCA), in order to contribute to more efficient practices of conservation. For this, part of a macrosystem has been adopted as the unit of analysis: the biodigester. For the achievement of the LCA, the objectives and scope has been defined, supporting the survey of the inventory of the life cycle of the artifact. It has been concluded that its implementation is not a sustainable option. On the other hand, the association between the DS and the LCA revealed that an articulated view, involving qualitative and quantitative methods, with a continuous movement of approach (*zoom-in*) and consideration of the whole (*zoom-out*) can collaborate to practices more efficient of conservation methods and to assist in structuring more sustainable systems.*

Keywords: Systemic Design; Life Cycle Assessment; Biodigester.

1. Introdução

O artigo apresenta um estudo de caso resultante de análise teórico-prática da implantação de um sistema de biodigestor, no contexto do uso extrativista de macaúbas (*Acrocomia aculeata*) no território do Serro, localizado em Minas Gerais.

Desde os anos 80, o pensamento linear da prática projetual, que se restringe à materialidade dos produtos/serviços e a problemas técnicos específicos, tem sido substituído pelo pensamento holístico, que é voltado para a complexidade do ser humano, do ambiente, da política etc. e que viabiliza a percepção das relações que podem ser estabelecidas entre as várias partes envolvidas (CESCHIN; GAZIULUSOY, 2019). Bistagnino (2011) alega que, no âmbito tradicional/linear, os *input* (matéria-prima/insumos) são inseridos em uma determinada atividade produtiva, gerando dois tipos de *output*: o valorado (o produto comercial) e os desvalorizados (os resíduos). O autor ressalta que, em um projeto baseado no pensamento holístico/sistêmico, os dois *output* têm valor pois, além do artefato que é comercializado, os ‘resíduos’ ascendem ao posto de recursos/insumos (*input*) em outras atividades produtivas, fundamentalmente, no mesmo território. Neste contexto, os tais ‘resíduos’ poderiam ser doados ou negociados.

O objetivo desse artigo é, então, propor a associação entre a metodologia do Design Sistêmico (DS) e o método da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), com vistas a contribuir para práticas mais eficientes de conservação, pois, ambos são derivados do paradigma da complexidade sistêmica e, juntos, têm potencial para apresentar resultados qualitativos e quantitativos.

1.1 Design Sistêmico (DS)

A metodologia do DS, desenvolvida por Bistagnino (2011) há mais de 20 anos, está estruturada no pensamento sistêmico (BERTALANFFY, 2012; CAPRA; LUISI, 2014). Esta visa o reestabelecimento do equilíbrio entre produção, ambiente e sociedade, fundamentada nos *modi operandi* dos sistemas biológicos da natureza. Nesta perspectiva, o foco projetual é deslocado do produto/serviço para o sistema. Sendo assim, o projeto se configura não mais como uma solução de um problema específico ou em um determinado produto que se encerra nele mesmo, mas sim como fluxos de matéria e energia entre os sistemas produtivos do território em questão, gerando um macrossistema.

O DS possui cinco linhas-guia. A primeira delas, *output-input*, se refere à transformação dos *output* (‘resíduos’) de um sistema produtivo em *input* (recursos) para um outro(s), assim como ocorre na natureza, propiciando a emergência de novos postos de trabalho de qualidade e o aumento do fluxo econômico local. Como lembra Pauli (2010), na natureza cada um realiza uma tarefa e os descartes de uns tornam-se recursos para outros num sistema em cascata, onde nada é desperdiçado, i.e., na natureza não existem desempregados e nem resíduos. A segunda, *relações*, evidencia que são as relações, tanto internas quanto externas, que geram o sistema em si, no qual todos os atores sociais têm importância e são estratégicos. A terceira, *auto-geração*, esclarece que os sistemas autopoieticos se sustentam e se reproduzem autonomamente, definindo o próprio campo de ação e evoluindo em conjunto. A quarta, *agir localmente*, enfatiza a valorização dos recursos (materiais e imateriais) locais, assim como a solução dos problemas por meio da

criação de novas oportunidades. A quinta e última, *homem no centro do projeto*, se refere ao homem relacionado ao próprio contexto ambiental, social, cultural e ético.

Tal metodologia é dividida em quatro fases: (1^a) compreender o território; (2^a) sistematizar e analisar os sistemas produtivos existentes; (3^a) projetar fluxos de matéria e energia entre os sistemas produtivos do território; (4^a) confrontar o contexto atual com o cenário sistêmico. Esta última procura comparar, qualitativa e quantitativamente, os fatores ambientais, econômicos, sociais e culturais do território advindos da visão linear com os da sistêmica.

1.2 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

A ACV é um método sistêmico que permite quantificar os impactos potenciais de um produto, por meio do cálculo dos fluxos de *input* e *output* dos materiais (matéria-prima, produtos e serviços) e energia empregados, assim como dos resíduos gerados, em todas as etapas do seu ciclo de vida (PEREIRA, 2017). O objetivo do método está relacionado ao desenvolvimento ou melhoria de produtos e processos, ao auxílio no planejamento estratégico e na definição de políticas públicas, entre outras aplicações (ABNT, 2009). Devido à grande complexidade, é muito comum que a avaliação seja feita considerando os limites do sistema, podendo variar de: berço (*cradle*) ao túmulo (*grave*), berço ao portão da fábrica (*gate*), dentro da fábrica (entre portões) ou do portão da fábrica ao túmulo.

As etapas do método de ACV envolvem: (1^a) definição de objetivo e escopo; (2^a) análise de inventário; (3^a) avaliação de impactos; (4^a) interpretação de resultados (ABNT, 2009).

1.3 Território do Serro

O estudo de caso apresentado na seção seguinte tem relação direta com a aplicação do Design Sistêmico no território do Serro, que por sua vez, foi o objetivo de uma tese de doutorado (PÊGO, 2016). Este Território está inserido na zona turística mais importante do estado de Minas Gerais, a Estrada Real, abarcando as comunidades dos povoados de Boa Vista de Lages, Capivari, Galheiros, Pedra Redonda, São Gonçalo do Rio das Pedras e a cidade do Serro.

Dentre as diversas atividades produtivas abordadas por Pêgo (2016), destaca-se a manufatura de cosméticos a partir de frutos do cerrado (Amescla, Macaúba, Mutamba e Pacari), facilmente encontrados na região. Tal produção é realizada por um grupo de mulheres da comunidade de São Gonçalo do Rio das Pedras, desde a coleta até o beneficiamento dos frutos, por meio de técnicas transmitidas por várias gerações. Neste estudo, apenas o sistema da Macaúba será tratado.

Após a compreensão do Território, da análise e síntese dos sistemas produtivos existentes no território, Pêgo (2016) investigou as qualidades e características intrínsecas de cada elemento da macaubeira, com o intuito de verificar quais das demais atividades produtivas locais poderiam se ‘interessar’ por seus *output*, se transformando então, em *input*. Além disso, considerou detalhadamente diversos subsistemas, a fim de revelar seus potenciais, seus pontos positivos e ‘negativos’, denominados no DS como ‘alavancas para mudança’. Este é o alicerce sobre o qual o macrosistema foi projetado. Contudo, nesse

artigo enfoca-se o subsistema biodigestor de matéria orgânica. Importante destacar que, no projeto da tese, o biodigestor recebe toda a matéria orgânica do macrosistema (como *input*), gerando biogás e fertilizante (como *output*), que por sua vez é empregado como recursos (*input*) no próprio macrosistema.

2. Metodologia

O presente estudo de caso tem como objetivo associar a metodologia do Design Sistêmico (DS) com o método da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), com vistas à contribuir para práticas mais eficientes de conservação.

Inicialmente, realizou-se o levantamento e análise bibliográfica acerca do DS e da ACV, com o intuito de compreender seus princípios e processos. Neste contexto, adotou-se como unidade de análise parte de um macrosistema, desenvolvido por meio do DS durante o doutoramento de Pêgo (2016): o biodigestor.

Para a realização da ACV deste artefato, foram definidos os objetivos e escopo do estudo. Nesta fase, foram coletadas informações sobre a manufatura e o funcionamento de um biodigestor de modelo canadense. Este foi selecionado, principalmente, em função do seu baixo custo.

Durante o levantamento do inventário do Ciclo de Vida do biodigestor, foram coletados dados sobre os *input* do biodigestor, quais sejam: resíduos vegetais ('tortas' de macaúba em unidade funcional de 10 macaubeiras por mês), resíduos animais (dejetos de bovinos, suínos e aves) e água pluvial (captação, dimensionamento do sistema e instalação hidráulica), assim como os custos e impactos dos insumos para sua construção. Os *output* do sistema envolvem a produção de biogás e fertilizante. Importante ressaltar que os dados apresentados no artigo foram obtidos em estimativas e revisão bibliográfica.

As conclusões do estudo são apresentadas no último item desse artigo.

2.1 Estudo de caso - Associação do DS com a ACV no subsistema biodigestor

A ACV do subsistema biodigestor pode ampliar a compreensão do seu funcionamento em termos energéticos e ambientais. Matéria e energia são consumidos e liberados em todo o biodigestor no processo de produção de biogás e fertilizante. Portanto, uma abordagem holística para avaliar o desempenho ambiental da implantação do biodigestor em uma comunidade do Território é necessária para identificar e localizar os pontos onde a sustentabilidade ambiental poderia ser aprimorada. Para isso, foi necessário sistematizar as informações qualitativas do subsistema (Figura 1), para servir de suporte legível e permitir a continuidade nas discussões quantitativas sobre o tema complexo e multifacetado.

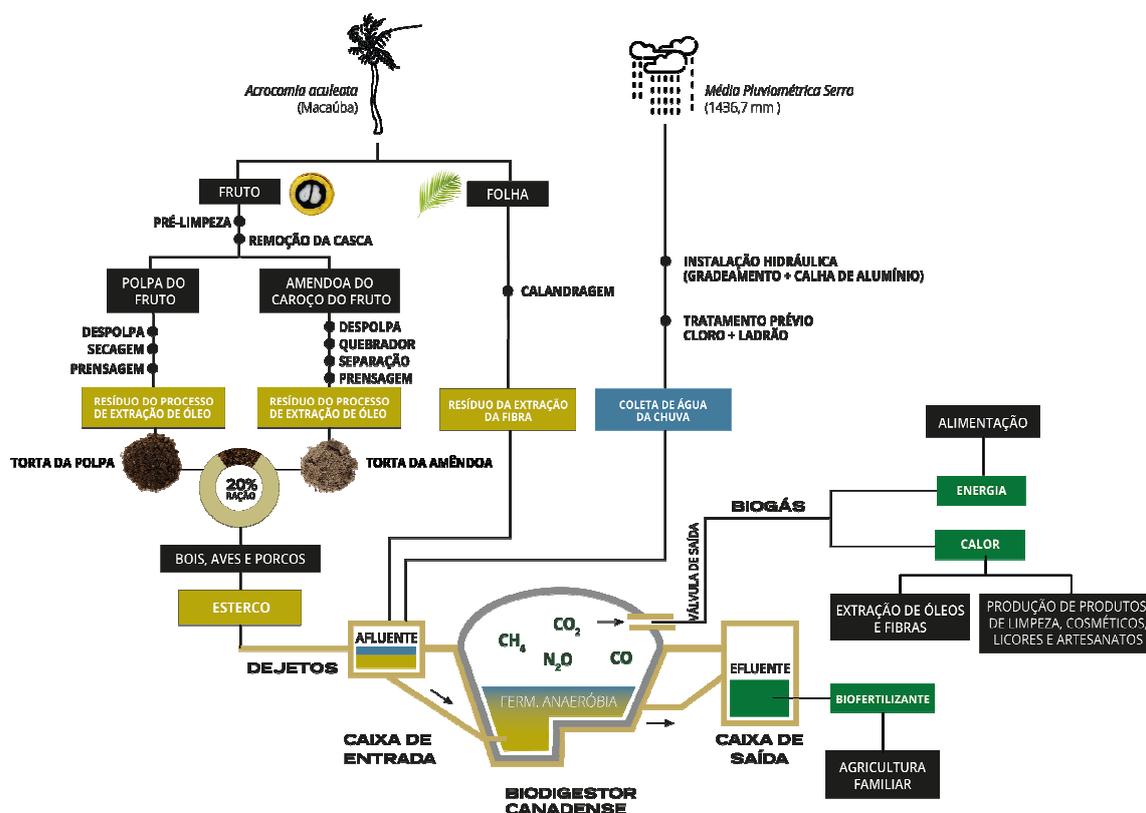


Figura 1 - Fluxograma qualitativo do subsistema biodigestor. Fonte: elaborado pelos autores.

Objetivou-se, portanto, analisar a viabilidade da instalação *in loco* de um biodigestor de modelo canadense, de baixo custo, com capacidade de 16m³, considerando, principalmente, a matéria-prima local proveniente do esterco animal. A quantidade de CO₂ foi a referência mensurável à qual os dados de entrada e saída foram normalizados.

2.1.1 Resíduos vegetais

Dentro do subsistema, as ‘tortas’ de macaúba são resíduos consideráveis no processo de extração do óleo de duas partes do fruto: o mesocarpo (polpa) e o endocarpo (amêndoa). Pêgo (2016) propõe que as tortas (*output*) sejam convertidas em matéria-prima na alimentação animal por dois fatores: as despesas com o manejo nutricional de animais no sistema de criação intensivo compõem um alto custo de produção pecuária (LOPES; FERREIRA, 2017), e existem recomendações para a utilização da torta do mesocarpo e endocarpo na formulação de dietas para ruminantes (até 20%) por ser uma boa fonte de energia para os animais e boa palatabilidade (IICA, 2009; RIGUEIRA *et al.*, 2017). Além disso, é possível agregar 10% dos resíduos vegetais (fruto ou folha) a 90% dos dejetos animais no processo digestão anaeróbica para a produção de biogás.

2.1.2 Resíduos animais

O maior produto de entrada para a alimentação do biodigestor, que configura 80% do *input* para o sistema, são os dejetos de animais (bovinos, suínos e aves), utilizados para a produção do esterco. A preparação desse insumo, antes de ser encaminhado ao biodigestor,

consiste no processo de compostagem térmica, onde a matéria seca é submetida à fermentação aeróbia, com a introdução de oxigênio e calor, para a retirada de patógenos presentes na matéria. Após o processo, o esterco se torna uma matéria orgânica mais estável, com a liberação de água e nutrientes. Porém, o processo apresenta como ponto negativo a liberação de CO₂.

2.1.3 Custos e impactos dos insumos para construção do biodigestor

Para o presente estudo, o modelo canadense de biodigestor (Figura 2) foi o selecionado em função do baixo custo e da facilidade de execução, dentre os disponíveis na literatura (CALZA *et al.*, 2015). Este modelo consiste basicamente em uma caixa de alvenaria enterrada abaixo do nível do solo, para retenção da biomassa, recoberta por uma lona atirantada e um sistema de tubulações para coleta do biogás.



Figura 2: Biodigestor modelo canadense. Fonte: Epagri, 2021.

Os componentes principais necessários para a sua construção são: (i) blocos de concreto; (ii) cimento; (iii) geomembrana de PVC; (iv) tubos de PVC; (v) lona impermeável de PVC. A obra é de execução relativamente simples, podendo ser realizada por um grupo de três a seis pessoas não especializadas, da própria comunidade em questão, desde que assessorados por um profissional especializado. Os materiais especificados são comumente encontrados em depósitos de construção, que podem ser acessados no município. Os custos energéticos (Tabela 1) seriam assim reduzidos, bem como os impactos ambientais decorrentes do transporte deste material. Ressalta-se que, conforme a tabela apresentada, o maior consumo de energia na produção deste tipo de biodigestor se encontra nas peças de PVC - geomembrana, sistema de tubulações e lona - sendo este fato vinculado ao processo de fabricação deste material. Embora o concreto apresente maior consumo por unidade funcional, o PVC apresenta maior consumo absoluto, sendo, portanto, um ponto a ser reavaliado em outro momento, com o intuito de aprimorar o processo construtivo do biodigestor tipo canadense.

Componente de entrada	Coefficiente energético	Unidades	Vida Útil
Mão-de-obra ¹	4,39	MJ homem ⁻¹ h ⁻¹	-
Óleo diesel ¹	47,48	MJ L ⁻¹	-
Graxa ²	43,38	MJ kg ⁻¹	-
Óleo lubrificante ²	37,75	MJ L ⁻¹	-
Chapas de aço ¹	62,78	MJ kg ⁻¹	20 anos
Geomembrana flexível PVC ¹ (1.000 mμ)	119,99	MJ kg ⁻¹	05 anos ⁶
Lona de impermeabilização PVC ¹ (800 mμ)	119,99	MJ kg ⁻¹	05 anos ⁶
Parafusos de aço ¹	62,78	MJ kg ⁻¹	20 anos
PVC ¹ (Tubulação 100 mm)	119,99	MJ kg ⁻¹	40 anos
PVC ¹ (Tubulação 200 mm)	119,99	MJ kg ⁻¹	40 anos
Polietileno ³ (Caixa difusora de fluxo)	108,7	MJ kg ⁻¹	50 anos
Fundação/Concreto ⁴	641,64	MJ m ⁻³	-
Caminhão Volkswagen VW 11130 ⁵	57,2	MJ kg ⁻¹	10.000 horas
Retroescavadora Caterpillar 430E IT ⁵	57,2	MJ kg ⁻¹	10.000 horas
Trator de esteiras Caterpillar D6K ⁵	57,2	MJ kg ⁻¹	10.000 horas

Tabela 1 - Componentes construtivos do biodigestor canadense. Fonte: Veloso *et al.*, 2018.

2.1.4. Captação de água pluvial

a) Dimensionamento do sistema

Um dos insumos que pode ser conciliado com o biodigestor é a água de chuva, por meio de um sistema de captação interligado. A água de chuva não é recomendada para fins nobres, como higiene e dessedentação. Porém, nesse caso, pode ser utilizada para diluir o efluente orgânico e facilitar seu transporte por meio das instalações hidrosanitárias (FIEMG, 2016).

No Brasil, a norma que define as diretrizes para captação de água pluvial é a ABNT NBR 10.844/1989. Esta norma foi utilizada para o dimensionamento do sistema proposto, no âmbito desse estudo.

Para o dimensionamento do sistema é necessário, em primeiro lugar, estimar a demanda de água pluvial, tendo em vista que a mesma não pode ser utilizada para qualquer fim e a capacidade de armazenamento do sistema precisa ser respeitada, evitando super ou subdimensionamentos. No cenário proposto, em que a capacidade máxima de armazenamento do biodigestor é de 16 m³, estimou-se um volume de 20% do total disponível para a parte líquida do sistema. Assim, considerou-se que 3,2 m³ se referem à capacidade de armazenamento de água pluvial.

O segundo passo é verificar o índice pluviométrico da região, pois é fundamental presumir a disponibilidade de água pluvial disponível para captação (FIEMG, 2016). Para tanto, utilizou-se um estudo oficial da EMBRAPA (2010) que monitorou a pluviometria de todas as cidades de Minas Gerais. Os resultados para a cidade do Serro são demonstrados na Tabela 2.

Mês	Pluviometria (mm)	Mês	Pluviometria (mm)
Janeiro	248.9	Julho	13.6
Fevereiro	149.3	Agosto	13.9
Março	176.0	Setembro	35.8
Abril	80.4	Outubro	109.6
Maio	31.8	Novembro	229.5
Junho	11.4	Dezembro	336.5

Tabela 2 - Índices pluviométricos da cidade de Serro, MG em mm. Fonte: EMBRAPA, 2010, p. 86.

Para o cálculo de escoamento o método Ripple é o mais utilizado. Contudo, ainda se faz necessário multiplicar os valores pelo coeficiente de runoff, ou coeficiente de escoamento (FIEMG, 2016). Nesta perspectiva, é possível extrair a quantidade de água que irá escorrer para dentro do sistema, em função do material em que a superfície de captação foi construída.

O material supracitado ainda apresenta um panorama da qualidade da água captada, de acordo com a superfície de captação, uma vez que, dependendo do material, o mesmo irá interagir com a água, podendo adicionar impurezas à mesma. Neste contexto, é possível ainda constatar o perfil do reservatório ao longo do ano, ou seja, se ele estará extravasando ou esvaziando. Essa informação se dá pela subtração da demanda de água pela quantidade captada. No caso do reservatório em questão, ele estará sempre esvaziando, uma vez que a capacidade de retenção é maior do que o volume de chuva disponível. O Quadro 1 apresenta um panorama geral dos resultados.

TIPO DE ESTRUTURA:	Cimento	ÁREA DO SISTEMA:	6	[m ²]	MUNICÍPIO:	Serro	CR MÉDIO:	0.85
REFERÊNCIA	CHUVA MÉDIA MENSAL	DEMANDA MENSAL	VOLUME DE CHUVA MENSAL	BALANÇO DE VOLUME	SITUAÇÃO DO RESERVATÓRIO	CÁLCULO DO VOLUME DO RESERVATÓRIO		
[meses]	[mm]	[m ³]	[m ³]	[m ³]		[m ³]		
Janeiro	248.9	3.20	1	2	Esvaziando	3.20		
Fevereiro	149.3	3.20	1	2	Esvaziando	3.20		
Março	176	3.20	1	2	Esvaziando	3.20		
Abril	80.4	3.20	0	3	Esvaziando	3.20		
Maio	31.8	3.20	0	3	Esvaziando	3.20		
Junho	11.4	3.20	0	3	Esvaziando	3.20		
Julho	13.6	3.20	0	3	Esvaziando	3.20		
Agosto	13.9	3.20	0	3	Esvaziando	3.20		
Setembro	35.8	3.20	0	3	Esvaziando	3.20		
Outubro	109.6	3.20	1	3	Esvaziando	3.20		
Novembro	229.5	3.20	1	2	Esvaziando	3.20		
Dezembro	336.5	3.20	2	1	Esvaziando	3.20		
TOTAL	1436.7	38.4	7	31				12

Quadro 1 - Resultados do dimensionamento do sistema de captação de água pluvial. Fonte: elaborado pelos autores.

A norma brasileira referente ao sistema de captação prevê que 20% da água coletada (primeira água) deve ser descartada, com o intuito de carregar as impurezas que ficam na superfície de captação (ABNT, 1989). A legislação do Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA, nº 357, de 2005, prevê ainda que deve ser adicionado um agente desinfetante, para eliminar qualquer patógeno presente na água (BRASIL, 2005).

b) Instalação hidráulica

Além de mensurar o sistema de captação de água, é necessário ainda dimensionar as calhas e canos que irão compor o sistema de captação. Para tanto, foi utilizada a norma ABNT supracitada que, por sua vez, emprega o método de Manning para o cálculo. Neste caso, a variável mais importante é a vazão, que irá determinar todas as outras características da instalação hidráulica. Para determiná-la utilizou-se a fórmula de Manning ($Q_c = K * S/n * R_H^{2/3} * i^{1/2}$), sendo: Q_c = vazão da calha (l/min); $K = 60.000$; S = área de seção molhada (m^2); n = coeficiente de rugosidade do material da calha; R_H = raio hidráulico (m); i = declividade da calha (m/m).

Inserindo as informações estimadas nesta fórmula, obtiveram-se os seguintes dados: vazão estimada = 73,2l/min; coeficiente $K = 60.000$; área da seção molhada = 0,012 m^2 ; coeficiente de rugosidade = 0,011; raio hidráulico (A/P) = 0,0375 m; declividade da calha = 0,001 m. Estes dados podem auxiliar na aquisição e instalação das calhas e/ou tubos. Para o sistema em questão, foi selecionada uma calha aberta e retangular.

c) Outros insumos

Por fim, é preciso identificar outros insumos necessários para o funcionamento do sistema, que serão considerados no momento de calcular os impactos do Ciclo de Vida do sistema de biodigestor como um todo.

Após a aquisição, todos os insumos deverão ser transportados até a localidade, o que irá impactar em fatores como emissão de CO_2 , consumo de combustível diesel e outros relacionados ao transporte. Para quantificar cada um destes insumos (gradeamento, calhas, agente desinfetante, hidrômetro, ladrão de escoamento, solenóide) seria necessário um estudo mais aprofundado do sistema e tentativas práticas com monitoramento contínuo para adequação das doses e quantidades.

2.1.5 A produção do biogás no Brasil e no Serro

De todo o biogás produzido no Brasil, 9,7% tem como fonte a pecuária. A maior produção de biogás no país, advindos de fontes pecuárias, encontra-se no estado de Minas Gerais, seguido pelo Paraná e Mato Grosso (SEBRAE, 2020).

Por meio dos painéis de dados do SEBRAE (2020), foi possível visualizar a produção do biogás no Serro. No município em questão, a produção anual de biogás é de 369.900 Nm^3 ou $3,699 \times 10^{21} m^3$, toda ela advinda de dejetos de bovinos, constando nula a produção de biogás a partir dos dejetos de aves e suínos.

2.1.6 Energia e calor

Em função da carência de dados relativos à quantidade de animais existentes no Serro, foi analisado a capacidade máxima de produção de biogás, a cada ciclo do biodigestor em trabalho.

Segundo o SEBRAE (2021), 1 m^3 biogás equivale a 0,69 litros de óleo diesel ou 0,53 kg de gás liquefeito de petróleo ou 2,07 kWh de energia elétrica. Aplicados ao biodigestor proposto no território do Serro, com capacidade de 16 m^3 , a cada processo com o

biodigestor trabalhando na capacidade máxima, tem-se 11,04 litros de óleo diesel ou 8,48 kg de gás liquefeito de petróleo ou 33,12 kWh de energia elétrica.

3 Inventário do Ciclo de Vida do biodigestor

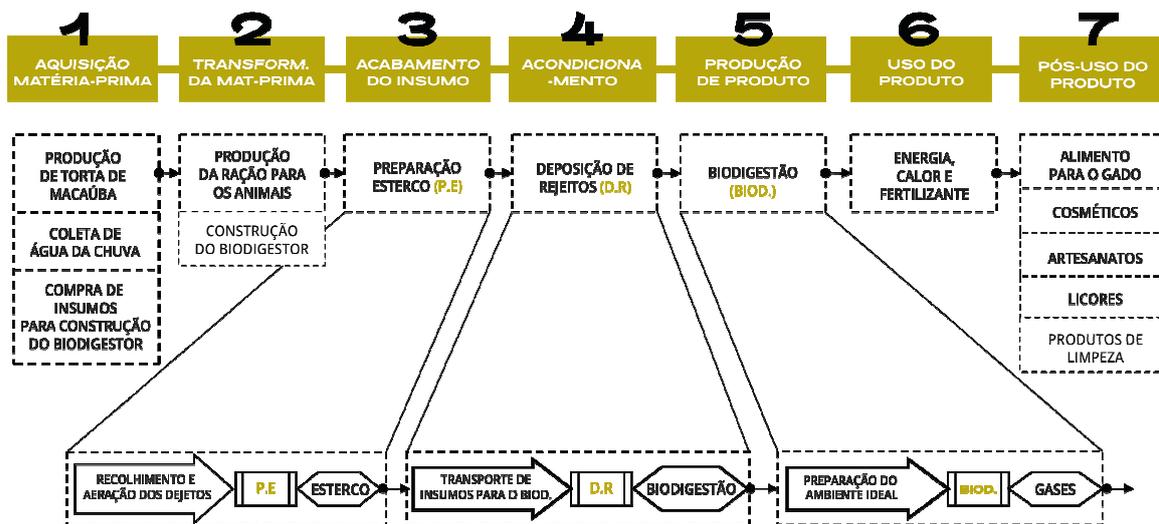


Figura 4 - Esquema gráfico do sistema. Fonte: elaborado pelos autores.

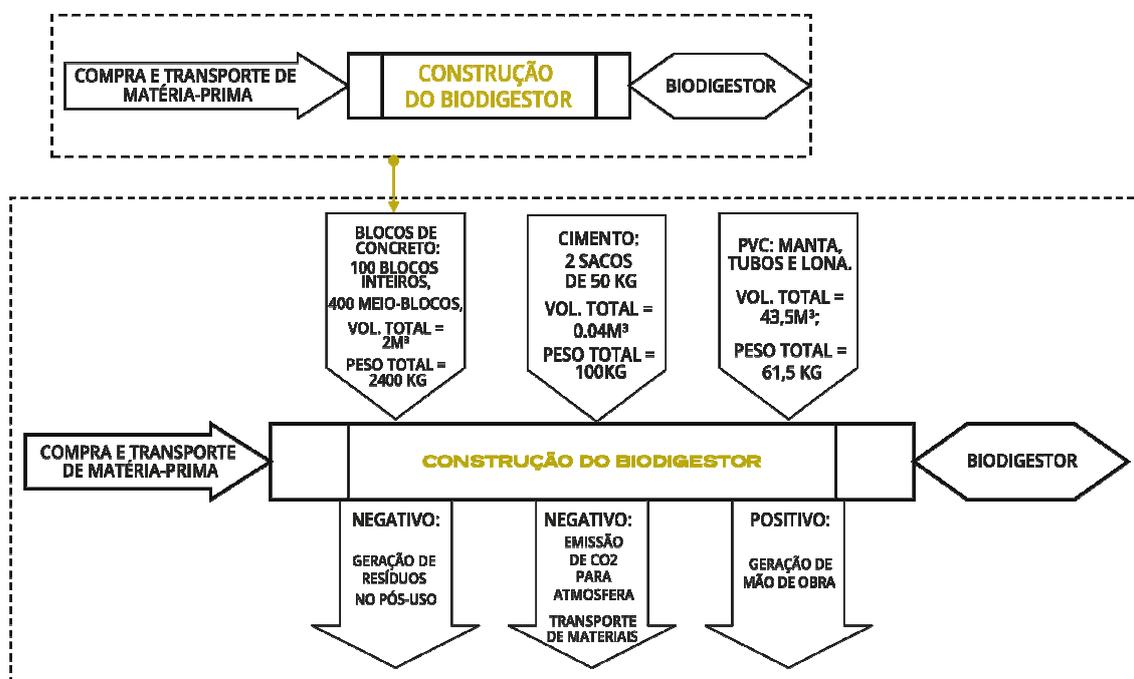


Figura 3 - Esquema gráfico dos input e output. Fonte: elaborado pelos autores.

4 Conclusões

A partir da elaboração do inventário do Ciclo de Vida do biodigestor e dos dados levantados sobre o território do Serro, concluiu-se que sua implantação não representa uma opção sustentável, pois a quantidade de *input* gerado na localidade é insuficiente para mantê-lo em funcionamento na capacidade máxima.

Entendeu-se ainda que, para que a implantação do biodigestor possa trazer benefícios para o território, é necessário que a população compreenda sua importância e se esforce, coletivamente, para manter o sistema saudável e equilibrado. Tais benefícios podem envolver: produção de biogás (energia limpa, local e de baixo custo) e fertilizante (local, livre de contaminantes); geração de trabalho e renda na comunidade (coleta dos resíduos orgânicos e manutenção do biodigestor); promoção da educação ambiental (envolvendo os alunos das escolas municipais); entre outros.

O Design Sistêmico se destaca como uma metodologia mais compatível com os desafios contemporâneos, promovendo a transição de uma visão linear para uma visão sistêmica no âmbito projetual. Já a Avaliação do Ciclo de Vida se configura como um método capaz de otimizar o desempenho ambiental dos produtos, processos e serviços, assim como de auxiliar as tomadas de decisão dentro dos projetos.

Sendo assim, a associação entre o DS e a ACV nesse estudo revelou que um olhar articulado, que envolva métodos qualitativos e quantitativos, com movimento contínuo de aproximação (*zoom-in*) e de consideração do todo (*zoom-out*), pode contribuir com práticas mais eficientes de conservação e auxiliar na estruturação de sistemas mais sustentáveis.

Agradecimentos

Agradecimentos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Universidade do Estado de Minas Gerais e à Universidade Federal de Minas Gerais, que permitiram a realização desta pesquisa.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR ISO 10844: instalações prediais de águas pluviais**. Rio de Janeiro, 1989. 13 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR ISO 14040: gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: princípios e estrutura**. Rio de Janeiro, 2009. 10 p.
- BERTALANFFY, L. V. **Teoria geral dos sistemas: fundamentos, desenvolvimento e aplicações**. 6 ed. Petrópolis: Vozes, 2012. 360 p.
- BISTAGNINO, L. **Design sistêmico: progettare la sostenibilità produttiva e ambientale**. 2. Ed. Bra: Slow Food, 2011. 310 p.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências**. [Brasília]: CONAMA; Ministério do Meio Ambiente, 2005. 27 p.

- CAPRA, F.; LUISI, P. L. **A visão sistêmica da vida: uma concepção unificada e suas implicações filosóficas, políticas, sociais e econômicas.** São Paulo: Cultrix, 2014. 615 p.
- CESHIN, F.; GAZIULUSOY, I. **Design for sustainability: a multi-level framework from products to socio-technical systems.** London: Routledge, 2019. 186 p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Índices Pluviométricos de Minas Gerais. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento.** N. 30. dez 2010. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agua-na-agricultura/previsao-de-clima-e-chuva-no-brasil>. Acesso em: 21 fev. 2021.
- FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DE MINAS GERAIS – FIEMG. **Aproveitamento de Água Pluvial.** [2016]. Disponível em: https://www7.fiemg.com.br/Cms_Data/Contents/central/Media/Documentos/Biblioteca/PDFs/SDI/2016/RecursosHidricos/SS-0115-15-CARTILHA-AGUA-DA-CHUVA-INTRANET.pdf. Acesso em: 21 fev. 2021.
- MATOS, S. M. S.; SANTOS, A. C. Modernidade e crise ambiental: das incertezas dos riscos à responsabilidade ética. **Trans/formação**, Marília, v. 41, n. 2, p. 197-216, 2018.
- PAULI, G. **Blue economy: nuovo rapporto al club di Roma – 10 anni, 100 innovazioni, 100 milioni di posti di lavoro.** Milano: Edizioni Ambiente, 2010. 342 p.
- PÊGO, K. A. C. **Approach of the systemic design in material and intangible culture of Estrada Real: territorial Serro case.** 2016. 204 f. Thesis (PhD) – Politecnico di Torino, Torino, Italy, 2016. Disponível em: <http://porto.polito.it/2644209/>. Acesso em: 13 fev. 2021. DOI:10.6092/polito/porto/2644209.
- PEREIRA, A. F.; OLIVEIRA, A. J. Oportunidades para ecodesign na embalagem, produção e distribuição de lichia a partir da Avaliação do Ciclo de Vida. In: SILVEIRA, A.; FRANZATO, C. LINDEN, J. (Org.). **Caminhos para a sustentabilidade através do design.** Porto Alegre: UniRitter, 2014. cap. 08, p. 133-147.
- PEREIRA, A. F. ACV para designers e arquitetos: experiências de modelamento do inventário do ciclo de vida. In: OLIVEIRA, A. J.; FRANZATO, C.; DEL GALDIO, C. (Org.). **Ecovisões projetuais: pesquisas em design e sustentabilidade no Brasil.** São Paulo: Blucher, 2017. cap. 18, p. 219-234.
- POESCHL M.; WARD S.; OWENDE P. Environmental impacts of biogas deployment—Part II: life cycle assessment of multiple production and utilization pathways. **Journal of Cleaner Production.** Amsterdã, v. 24, n. 10, p. 201-184. 2012.
- RIGUEIRA, J. P. S.; MONÇÃO, F. P.; SALES, E. C. J.; REIS, S. T.; ALVES, D. D.; AGUIAR, A. C. R.; ROCHA JÚNIOR, V. R.; CHAMONE, J. A. Composição química e digestibilidade *in vitro* de tortas da macaúba. **Revista UNIMONTES científica**, Montes Claros, v. 19, n. 2, p. 197-216, jul./dez. 2017.
- SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO PEQUENAS EMPRESAS – SEBRAE. **Data Sebrae Biogás.** [S.I.], 2016-2021. Disponível em: <https://datasebrae.com.br/biogas/>. Acesso em: 18 fev. 2021.
- SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO PEQUENAS EMPRESAS – SEBRAE. **Plantas de Biogás em Operação.** [S.I.], agosto de 2020. Disponível em: <https://paineis-lai.sebrae.com.br/single/?appid=bc75184c-943f-4156-bc85-305915943ebd&sheet=fb74886d-b41f-40a1-a4df-485782d9fda7&opt=cursel%2Cctxmenu&select=clearall>. Acesso em: 18 fev. 2021.
- WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT – WCED. **Our Common Future.** New York: Oxford University Press, 1987.