

## SIMULAÇÃO E MODELAGEM DE UM BIODIGESTOR PARA GERAÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS DO PROCESSAMENTO DE CAFÉ

### SIMULATION AND MODELING OF A BIODIGESTOR FOR GENERATION OF BIOGAS FROM COFFEE PROCESSING WASTE

Guilherme Pinheiro Drumond<sup>a</sup>, Artur Assreuy Diniz <sup>a</sup>, Victor Rezende Moreira<sup>a</sup>, Raquel Sampaio Jacob<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Universidade Federal de Minas Gerais, <sup>b</sup>Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

guilhermepdrumond@gmail.com, arturdiniz.a@gmail.com, victorrrznde.eng@gmail.com,  
sampaiojacob@gmail.com

Submissão: 31 de maio de 2023

Aceite: 25 de abril de 2024

#### Resumo

O café é uma das bebidas mais comercializadas no mundo, sendo um dos principais produtos referentes ao desenvolvimento agrícola e econômico brasileiro. O aumento da demanda do produto gera um aumento na sua produção, assim aumentando os resíduos do seu processamento. Dentre os processos de tratamento disponíveis, a biodigestão anaeróbia representa grande vantagem pelo reaproveitamento energético do subproduto do processo, o biogás. O trabalho baseou-se na modelagem e simulação de um processo de biodigestão anaeróbia da borra de café para a produção de biogás. A simulação foi executada no Matlab, empregando as ferramentas ode45 e ode15s para resolver as equações diferenciais nos modelos de Monod, para equacionamento da cinética da variação da concentração de biomassa e substrato, e Lotka-Volterra, para avaliar a produção de biogás, além do efeito negativo exercido na biomassa por este. A produção total encontrada no biodigestor foi de 4149 m<sup>3</sup> para o modelo sem retirada de biogás e 5283 m<sup>3</sup> no modelo com retirada contínua de biogás, apresentando proximidade aos resultados da literatura. O biodigestor demonstrou limitações pelo tempo de detenção hidráulica, além de outros fatores. Foram calculadas as variáveis para a adequação do efluente tratado para o lançamento em corpos d'água de Classe 2 e 3, impostas pelo CONAMA. Os valores encontrados para as duas simulações foram de cerca de 9 dias para Classe 3 e 12 dias para Classe 2.

**Palavras-chave:** modelagem de biodigestores; resíduos da produção de café; produção de biogás; análise ambiental de resíduos cafeeiros.

#### ABSTRACT

Coffee is one of the most commercialized beverages in the world, being one of the main products related to Brazilian agricultural and economic development. The higher demand for the product generates an increase in its production, thus increasing waste from its processing. Among the available treatment processes, anaerobic digestion represents a great alternative due to the advantage of the possibility of energetic reuse of the by-product of the process, biogas. The work was based on the modeling and simulation of an anaerobic digestion process of coffee grounds for the production of biogas. The simulation was performed in MatLab, employing the ode45 and ode15s tools to solve the differential equations of the Monod model, to correlate the kinetics of the variation in biomass and substrate concentration, and the Lotka-Volterra model, to evaluate the biogas production, in addition to the negative effect exerted on the biomass by this. The total production found in the biodigester was 4149 m<sup>3</sup> for the model without biogas withdrawal and 5283 m<sup>3</sup> in the model with continuous biogas withdrawal, demonstrating proximity to the results in the literature. Variables were calculated for the suitability of the treated effluent for release in Class 2 and 3 bodies of water, imposed by CONAMA. The values found for both situations

were around 9 days for Class 3 and 12 days for Class 2. The biodigester showed limitations due to the hydraulic detention time, in addition to other factors.

**Keywords:** modeling of biodigesters; coffee production residues; biogas production; environmental analysis of coffee residues.

## 1 INTRODUÇÃO

O café é um fruto com origem na Etiópia trazido ao Brasil no século XVIII (Ricciardi *et al.*, 2020). Ele é um dos produtos mais comercializados no mundo e se tornou chave para o desenvolvimento agrícola no decorrer da história brasileira. Existem diferentes procedimentos que envolvem o processamento dos grãos de café, que ainda permanecem sendo melhorados para aumentar o rendimento, com impactos ambientais e sociais já comprovados (Associação dos Cafeicultores de Araguari, 2021). Dentre os resíduos e efluentes produzidos tem-se o foco na borra de café e na água de despolpa, que apresentam uma abundância de nutrientes nitrogenados e fosfatados. Além disso, a produção de café gera a exaustão dos nutrientes no solo, emissão de gases poluentes e consumo considerável de água, cerca de 15 a 20 litros por quilograma de café produzido (Dadi *et al.*, 2018; Takashina *et al.*, 2017). Todos os efeitos da produção têm sua escala dependente da escala de produção, a qual acompanha a demanda global do produto, que continuamente é aumentada (International Coffee Organization, 2021).

Observando-se os efeitos ambientais da produção cafeeira, existem formas de contornar a situação com redução, reaproveitamento ou tratamento adequado das matrizes poluidoras. Para efetuar tais abordagens, podem ser utilizados princípios físico-químicos, como a coagulação e a floculação, assim como processos oxidativos, ou biológicos, como a biodigestão (Giordano, 2004; Torres *et al.*, 2016). A biodigestão pode ser destacada dentre os processos citados, já que a tecnologia é conhecida pela alta remoção de matéria orgânica e baixo custo, em relação aos demais processos (Torres *et al.*, 2016). Além disso, esse processo já foi utilizado para o coprocessamento de outros materiais com alguns componentes descartados na produção cafeeira, demonstrando caráter positivo para uma produção maior de biogás no coprocessamento de uma matriz, em relação à

biodegradação do resíduo isolado (Albuquerque; Araújo, 2016). Entretanto, outras fontes, como Pena, Rocha e Nucci (2015), demonstraram que a casca do café poderia gerar um efeito nocivo às bactérias, gerando efeitos negativos no desenvolvimento do processo de biodigestão.

Mesmo representando grandes vantagens em relação a outros métodos de tratamento, a biodigestão pode apresentar impasses em sua implementação. No caso da biodigestão aeróbia, o principal custo seria o da aeração do meio, já que a ausência de oxigênio impediria seu funcionamento. Por outro lado, na biodigestão anaeróbia observa-se uma grande sensibilidade, já que plásticos e metais podem interferir em sua eficiência (Dias *et al.*, 2021).

A modalidade anaeróbia possui vantagens por não necessitar de oxigênio no volume de controle, diminuindo os custos com a manutenção da taxa de oxigênio dissolvido. Além disso, consegue gerar subprodutos com potencial de reaproveitamento energético, o biogás, constituído majoritariamente de metano (Dias *et al.*, 2021). Assim, um subproduto tóxico do tratamento anaeróbio se torna uma alternativa energética mais adequada ambientalmente, em relação custo/benefício de suas outras destinações, podendo-se aplicá-lo como aquecimento doméstico e até combustível para indústria automobilística (International Energy Agency, 2020; Scarlat; Dallemand; Fahl, 2018; Weiland, 2009). Em adição a isso, a utilização do biogás produzido no processo reduz os gastos com geração de energia e emite menos poluentes do que a disposição original dos resíduos (Martinez *et al.*, 2020). Nesse contexto, a biodigestão anaeróbia se torna uma etapa para produção de energia e diminuição de gastos, estimulando pesquisas na área e a avaliação da implementação da tecnologia na área industrial.

No ciclo de vida de um sistema ou projeto, qualquer alteração de seu planejamento inicial implica em gastos adicionais e atrasos em sua entrega ou funcionamento. Entretanto, nem todas as

alterações acarretam os mesmos custos, sendo que quanto antes na cadeia produtiva a ação é tomada, menor é o impacto registrado. Dessa forma, investir no entendimento do problema e na estruturação da arquitetura da solução é fundamental, e as técnicas de modelagem são ferramentas essenciais em ambas as etapas. A estruturação de um modelo permite saber quando é necessário atuar no problema e prever quais as implicações dessas atuações no sistema como um todo, realizando ajustes, caso resultados projetados sejam diferentes do desejado devido a iterações inesperadas do sistema de interesse com outros elementos internos e externos (Hutchison, 2015; Rebs; Brandenburg; Seuring, 2019; Stave, 2010; Yi *et al.*, 2023).

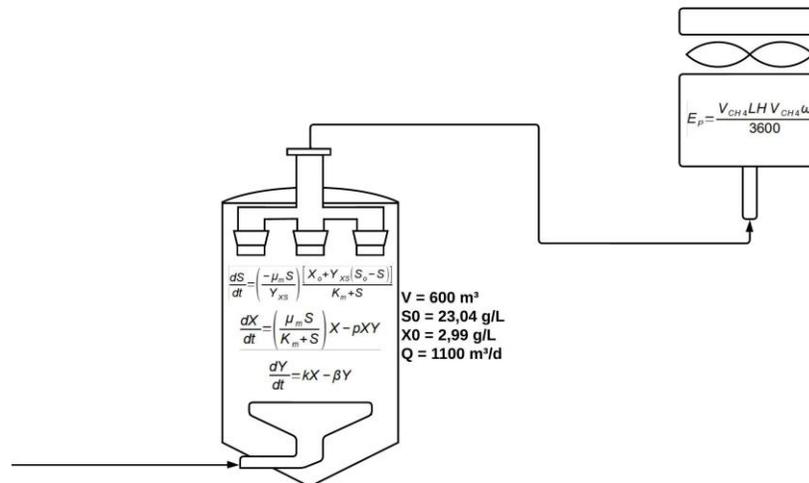
Com a exposição das consequências da produção do café apresentadas, explicita-se a necessidade de aumento no tratamento de resíduos derivados do café, além da pesquisa por fontes alternativas de energia renovável. O trabalho busca o estudo da modelagem e simulação de um biodigestor anaeróbio que utiliza o tratamento da borra de café para a produção de biogás. Além

disso, o trabalho busca desenvolver uma comparação entre um reator que acumula o biogás em seu meio e outro que extrai continuamente o biogás do processo para a sua utilização, com as encontradas na literatura, além de analisar a produção energética do biodigestor em relação a outras fontes. Não obstante, busca-se desenvolver o estudo ambiental do efluente tratado, avaliando, assim, o tempo e a concentração necessária ao final do processo para a destinação da matriz em corpos d'água.

## 2 METODOLOGIA UTILIZADA

A metodologia utilizada é separada em dois passos, assim como demonstrado na Figura 1. O primeiro passo foi a modelagem e obtenção de resultados do biodigestor, no qual são obtidas as concentrações de substrato, biomassa e volume de biogás produzidos. Já o segundo passo envolve o cálculo de energia gerada, a partir do volume de biogás produzido e calculado no primeiro passo.

**Figura 1: Etapas da metodologia abordada**



Fonte: Autoria própria.

### 2.1 Modelagem do biodigestor

Foram utilizados diferentes modelos para a simulação de crescimento da concentração de biomassa, o decrescimento da concentração de substrato e da produção de biogás no biodigestor. O modelo de Monod (Monod, 1949) foi considerado para o estudo da concentração de biomassa e

substrato em relação ao tempo decorrido. Além de Monod, foi utilizado o modelo de Lotka-Volterra (Volterra, 1926), que considera o efeito inibitório do metano produzido na biodigestão afetando, assim, o desenvolvimento da biomassa, utilizando o modelo para complementar o estudo da concentração de biomassa e a produção de biogás. Considerando os modelos e suas utilidades no estudo, são

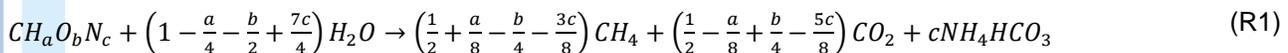
apresentadas as Equações 1 a 3 que representam os cálculos para o estudo de cada parâmetro.

$$\frac{dS}{dt} = \left( \frac{-\mu_m S}{Y_{XS}} \right) \frac{[X_0 + Y_{XS}(S_0 - S)]}{K_m + S} \quad (1)$$

$$\frac{dX}{dt} = \left( \frac{\mu_m S}{K_m + S} \right) X - pXY \quad (2)$$

$$\frac{dY}{dt} = kX - \beta Y \quad (3)$$

A Equação 1, que representa a variação da concentração de substrato com o tempo, é constituída por S (g/L) como concentração de substrato, X (g/L) como concentração de biomassa,  $K_m$  (g/L) como coeficiente de meia saturação,  $\mu_m$  (1/d) como taxa de crescimento específico e  $Y_{XS}$  ( $g_{\text{biomassa}}/g_{\text{substrato}}$ ) como coeficiente de rendimento. Já a Equação 2, que representa a variação da concentração de biomassa com o tempo, é constituída pelas mesmas variáveis em adição a p (1/m<sup>3</sup>) como a variação de microrganismos de forma independente ao biogás e Y (m<sup>3</sup>) como produção de biogás. A última equação, representando a variação da produção de biogás com o tempo, possui duas variáveis ainda não citadas: k (L.m<sup>3</sup>/g.d) como a constante positiva de Lotka-Volterra e  $\beta$  (1/d) como a constante de retirada do biogás, considerada 0,25 coleta do material de forma contínua, igualando a 0



As características da borra e os parâmetros relacionados, para sua utilização no biodigestor simulado, foram encontradas na literatura e podem ser observadas nas Tabelas 1 e 2, representando a caracterização da matriz utilizada e os parâmetros utilizados em cada modelo. A composição da matriz demonstrada na Tabela 1 torna a borra de café uma matéria-prima direcionada para a produção de biocombustíveis (Adarme-Durán *et al.*, 2017).

O principal parâmetro na Tabela 1 é a DQO da matriz buscada. Isso porque o modelo de Monod considera a concentração inicial de substrato equivalente à DQO de entrada da matriz no biodigestor fator crucial para o desenvolvimento da simulação do processo (Abu-Reesh, 2014). O tratamento da borra através da biodigestão anaeróbia tem grande potencial, observando-se a

para o biodigestor com retenção de biogás (Monod, 1949; Volterra, 1926).

Utilizou-se o ambiente virtual do Matrix Laboratory (MatLab), *software* especializado em cálculos de engenharia e utilizado por suas bibliotecas de cálculo pré-definidas, para simular os sistemas de digestão anaeróbia. As equações diferenciais foram solucionadas empregando-se método de Dormand-Prince, baseado no método de Runge-Kutta, levando-se em conta a discretização do tempo em intervalos uniformes (Pescador; Oliveira, 2016). Foram comparadas as ferramentas ode45, comumente aplicada em modelagem de processos na área de engenharia, e ode15s, que é recomendada para a modelagem de processos biológicos devido à sua natureza exponencial (Nir; Majumdar, 2016). As concentrações de cada espécie analisada foram consideradas constantes nas direções angular e radial, além de ter o desenvolvimento do processo de biodigestão no sentido longitudinal, simplificando assim o cálculo do gradiente de concentrações e facilitando a modelagem para a observação da reação (Levenspiel, 2011). Considerou-se dois fenômenos no processo, demonstrados na Reação R1 (Ladeira *et al.*, 2022): o primeiro representa o consumo por microrganismos da colônia, variando a biomassa; o segundo representa o biogás produzido (Abu-Reesh, 2014; Oro; Sausen; Sausen, 2017).

porcentagem de compostos alvos de microrganismos.

O biodigestor de fluxo contínuo foi escolhido para a simulação do processo considerando-se um conjunto de biodigestores de mesmo volume, em paralelo, de 600 m<sup>3</sup>, com 12,8 m de altura e 3,86 m de diâmetro (Alves, 2019; Bruno; Oliveira, 2008; Freitas *et al.*, 2019; Godoy Junior *et al.*, 2014; Neres; Ramos; Régis, 2021; Prado, 2006). A operação do biorreator ocorreu em temperatura ambiente (25° C); tal consideração é justificada pela localidade utilizada, o Brasil, que é um país de clima tropical de altitude, proporcionando assim uma faixa térmica superior a 20° C. Essa faixa de temperatura é a que bactérias mesófilas atuam de forma mais eficiente. A temperatura ideal se encontra entre 35° C e 37° C, mas aquecer o sistema representaria um gasto financeiro e um gasto adicional de biogás produzido,

destinado ao aquecimento (Prado, 2006). Em adição, existe uma faixa de pH que deve ser mantida, que está entre 5 e 9, mesmo que pH neutros gerem uma eficiência maior. A faixa ampla

foi escolhida pois a manutenção mais estrita necessitaria da adição de substâncias químicas no substrato, gerando a chance de intervir no processo e maior custo no processo (Yadvika *et al.*, 2004).

**Tabela 1: Caracterização da borra de café**

<b>Análises</b>	<b>Teor</b>
Demanda química de oxigênio (DQO) (g/L)	23,04
Cinzas (%)	1,6
Carboidratos (%)	45 – 47
Celulose	8,6 – 9,0
Hemicelulose	36,7 – 38,0
Manose	46,8
Galactose	15 – 30,4
Arabinose	1,4 – 3,8
Polissacarídeos (%)	13,6
Ligninas	19 – 26
Açúcares totais	8,5
Substâncias Pécicas	0,01
Fibra dietética Total (%)	47,30
Fibra dietética insolúvel (%)	41,63
Fibra dietética solúvel (%)	5,67
Proteína total (%)	11,2 – 13,6
Lipídeos (%)	9 – 24
Polifenóis totais (%)	1,5 – 3,5
Ácidos clorogênicos (%)	0,1 – 2,3
Taninos	0,02
Cafeína (%)	0,01 – 1,2
Calorias (kcal/100g)	~411

Fonte: Modificado de Adarme-Durán *et al.*, 2017.

**Tabela 2: Parâmetros utilizados nos modelos**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
$S_0$	23,04 g/L
$\mu_m$	0,076 1/d
K	3,59 g/L
$Y_{XS}$	0,13 g/g <sub>Substrato</sub>
$X_0$	2,9952 g/L
$\alpha$	2 1/d
$p_{Lotka-Volterra}$	0,001 1/m <sup>3</sup>
$k_{Lotka-Volterra}$	0,25 m <sup>3</sup> L/g.d
$\beta$	0,25 1/d

Fonte: Modificado de Adarme-Durán *et al.*, 2017.

O biodigestor de fluxo contínuo foi escolhido para a simulação do processo considerando-se um conjunto de biodigestores de mesmo volume, em paralelo, de 600 m<sup>3</sup>, com 12,8 m de altura e 3,86 m de diâmetro (Alves, 2019; Bruno; Oliveira, 2008; Freitas *et al.*, 2019; Godoy Junior *et al.*, 2014; Neres; Ramos; Régis, 2021; Prado, 2006). A operação do biorreator ocorreu em temperatura ambiente (25° C); tal consideração é justificada pela localidade utilizada, o Brasil, que é um país de clima tropical de altitude, proporcionando assim uma faixa térmica superior a 20° C. Essa faixa de temperatura é a que bactérias mesófilas atuam de forma mais eficiente. A temperatura ideal se encontra entre 35° C e 37° C, mas aquecer o sistema representaria um gasto financeiro e um gasto adicional de biogás produzido, destinado ao aquecimento (Prado, 2006). Em adição, existe uma faixa de pH que deve ser mantida, que está entre 5 e 9, mesmo que pH neutros gerem uma eficiência maior. A faixa ampla foi escolhida pois a manutenção mais estrita necessitaria da adição de substâncias químicas no substrato, gerando a chance de intervir no processo e maior custo no processo (Yadvika *et al.*, 2004).

## 2.2 Produção energética e impacto ambiental

Além do estudo das concentrações de substrato, biomassa e produção de biogás, foi calculado também o potencial energético,  $E_p$  (MW). A equação para seu cálculo é feita em relação ao volume de metano produzido por volume da matriz de café tratada,  $V_{CH_4}$  (Nm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup><sub>matriz</sub>), considerando-se valor calorífico inferior de metano de 35,72,  $LHV_{CH_4}$  (MJ/Nm<sup>3</sup>), e o fator de conversão elétrica de 0,43,  $\omega$ , apresentados na Equação 4 (Lebron *et al.*, 2020).

$$E_p = \frac{V_{CH_4} LHV_{CH_4} \omega}{3600} \quad (4)$$

Levando-se em conta as legislações ambientais, foi feita uma consideração de equivalência de DQO da matriz a ser trabalhada e a concentração de substrato S, conforme Abu-Reesh (2014). Mesmo que a matriz não possa ser avaliada pela demanda biológica de oxigênio de 5 dias de avaliação (DBO<sub>5</sub>), foi possível utilizar a DQO em seu lugar para encontrar os intervalos necessários de tempo para que o lançamento em corpos d'água esteja dentro da legislação. Esse fato é justificado, pois a DBO<sub>5</sub> é somente uma fração da DQO, de modo que as

legislações do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) sejam atendidas de forma adequada ao termo mais amplo dos requerimentos mais exigentes, ou seja, a DQO será comparada com as concentrações estipuladas para a DBO<sub>5</sub> (Brasil, 2005, 2011).

O cálculo utilizado para essa previsão é a de conservação de matéria, baseando-se no produto de concentração e vazão molar da saída do biodigestor, do rio utilizado e do corpo após o lançamento do efluente. Logo, a Equação 5 prevê o valor de concentração da DQO na saída do biodigestor, que será comparado na modelagem para calcular o tempo de detenção hidráulica (TDH) do processo. A DBO<sub>5</sub> imposta após o lançamento pela Resolução nº 397 do CONAMA (Brasil, 2005),  $DBO_r$ , é multiplicada pela sua vazão final, que é o somatório das duas vazões,  $V_f$ , e igualada ao somatório do produto entre a DQO e a vazão de efluente da matriz tratada,  $DQO_e$  e  $V_e$ , e o produto da DBO<sub>5</sub> com a vazão do rio antes do lançamento,  $DBO_r$  e  $V_r$ .

$$DBO_r V_r = DQO_e V_e + DBO_r V_r \quad (5)$$

Duas legislações foram levadas em conta para a avaliação de impacto ambiental, a Resolução nº 397 do CONAMA (Brasil, 2005), complementada pela Resolução nº 430 do CONAMA (Brasil, 2011), que estipula a queda de 60% da DBO da matriz antes que essa possa ser lançada em um corpo d'água e as concentrações de DBO<sub>5</sub> passíveis de serem lançadas em corpos hídricos de acordo com sua classificação, 10 mg/L para Classe 3 e 5 mg/L para Classe 2. Já a Resolução nº 397 especifica as classificações dos rios e a destinação de seu uso, além de garantir que permaneçam inalteradas tais classificações. Apontou-se que existem mais critérios, de caráter rigoroso, para o lançamento de efluentes em corpos d'água Classe 1, devido a fatores do enquadramento da utilização do corpo hídrico, que em corpos de Classe 2 e 3, assim o escopo do trabalho foi limitado em estimar os custos e condições relativos somente às Classes 2 e 3.

Para a avaliação do impacto ambiental, foi considerado que as concentrações especificadas pelas CONAMA 357 e 430 são aplicadas somente após a diluição da matriz no corpo d'água, portanto, foi necessário estimar uma vazão do curso hídrico de destino e uma para o processo estipulado para se avaliar até qual momento é necessário manter o

tratamento e o custo atrelado a isso. Considerou-se, assim, o rio Paraopeba, latitude -20,1652 e longitude -44,7688, com a vazão mínima de 12,8 m<sup>3</sup>/s. A escolha do corpo d'água baseou-se na presença de uma estação de tratamento de esgoto (ETE), já que sua presença seria uma forma de prevenção em casos de vazamentos ou problemas estruturais, agindo assim como uma barreira estipulada para o caso de problemas com a adequação de efluente (Soares, 2021). Além disso, o corpo d'água foi apresentado com a vazão mínima para amenizar problemas de eficiência, caso o tratamento gere resultados de concentração acima do previsto no modelo (PINTO; ALVES, 2001). O último valor considerado para o rio foi a sua DBO, que de acordo com a literatura varia muito, principalmente pela

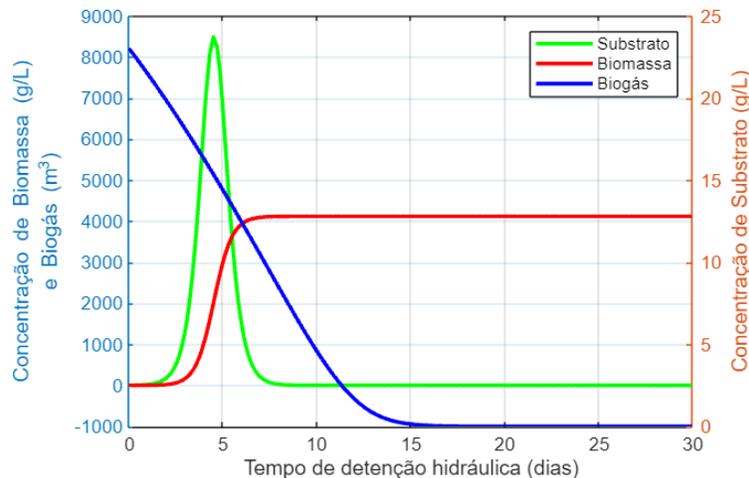
influência de seus afluentes, porém considerou-se em média de 2,3 mg/L (Soares, 2021).

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Dados de produção e comparação

Após a modelagem do processo foi possível observar os perfis de concentração de biomassa e substrato, além do volume produzido de biogás acumulado dentro do biodigestor. O modelo teve um perfil semelhante ao encontrado em Oro, Sausen e Sausen (2017), diferenciando-se devido às características dos materiais utilizados na literatura com a borra de café utilizada para este estudo. Os perfis citados podem ser observados em um período de avaliação de 30 dias, conforme o Gráfico 1.

**Gráfico 1: Volume de biogás contido no reator e concentrações de biomassa e substrato presentes no biodigestor no cenário sem retirada de biogás**



Fonte: Autoria própria.

A biomassa teve um comportamento inicial de crescimento, já que o ambiente apresenta uma grande concentração de substrato, sendo propenso para isso. Quando chega ao seu ápice, entre o quarto e quinto dia, na concentração de 8627 g/L, o efeito da competição passa a ponderar no ambiente, como demonstrado pela queda contínua de concentração de substrato, além da maior presença de biogás, que possui o efeito inibitório para as bactérias (Oro; Sausen; Sausen, 2017). Em sequência, a biomassa tem uma queda da concentração até um valor desprezível entre o oitavo e o nono dia.

Já observando o volume de biogás produzido,

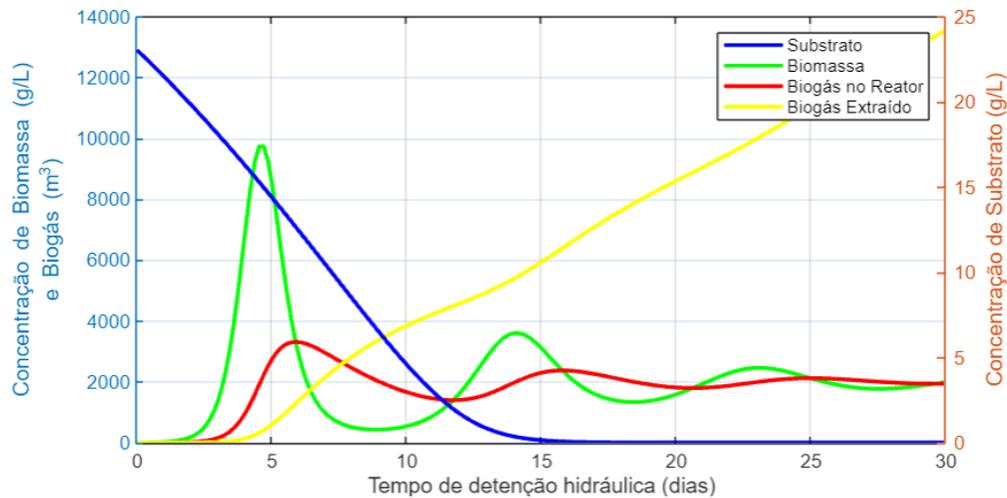
seu perfil se estabiliza próximo ao oitavo dia, porém sua presença começa a influenciar o meio reacional de forma mais relevante a partir do quinto dia. Os efeitos inibitórios, de acordo com Oro, Sausen e Sausen (2017), se tornam superiores no instante após o máximo de biomassa, mesmo com uma presença considerável da concentração de substrato disponível para a biodigestão. O fator negativo do estoque de biogás demonstra certa limitação que não é apresentada no modelo de biodigestor com extração contínua do biogás, como demonstrado no Gráfico 2.

Inicialmente, analisando-se o comportamento da concentração de biomassa, há um crescimento

até se atingir um ápice entre o quarto e quinto dia. Após o seu máximo, o biogás decresce assim como o biodigestor na modalidade sem retirada, entretanto não chega a valores desprezíveis, mas flutua com o crescimento e decrescimento do biogás dentro do

meio reacional. Demonstra-se novamente a dependência da biomassa com volume de biogás presente no biodigestor, que acompanha de forma inversa a curva do volume de biogás.

**Gráfico 2: Volume de biogás contido no reator e concentrações de biomassa e substrato presentes no biodigestor no cenário com retirada de biogás**



Fonte: Autoria própria.

Em relação ao volume de biogás, a produção permanece em todo o tempo de estudo, porém esta produção permanece mesmo após a concentração de substrato se tornar próxima de zero, limitando o estudo ao período de 14 dias iniciais. Como visto no Gráfico 2, o volume extraído de biogás aumenta de acordo com o tempo de detenção, porém quando é observada a produção média diária do volume de biogás, esta variável tende a diminuir após o pico o quinto dia.

Considerando-se um tempo de detenção hidráulica, para o biodigestor sem retirada de biogás, de 8 dias, pode-se observar uma produção de 4149 m<sup>3</sup>, ou 3792 Nm<sup>3</sup>, considerando uma produção média de 518,60 m<sup>3</sup> por dia de biodigestão, ou 0,864 m<sup>3</sup>Biogás/m<sup>3</sup>Reator.d, sendo o ápice dessa produção entre o quarto e sexto dia, já que sua produção é dependente da concentração de biomassa e esse é o intervalo de tempo no qual se apresenta o pico de concentração. Dividindo-se sua produção pela vazão de entrada total, dá-se um valor de aproximadamente 3,45 Nm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>Matriz, que será utilizado para o cálculo de produção energética. Já para o biodigestor com retirada de biogás, com o mesmo TDH de 8 dias, pôde-se observar uma

produção de cerca de 5283 m<sup>3</sup>, ou 4828 Nm<sup>3</sup>, gerando assim um valor de 4,39 Nm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>Matriz. Considerando os valores de produção, pode-se observar uma média de 660,36 m<sup>3</sup>/d, ou 1,101 m<sup>3</sup>Biogás/m<sup>3</sup>Reator.d. Ambas as modalidades possuíram uma curva semelhante, com a modalidade com retirada de biogás resultando o perfil com maiores valores, como demonstrado no Gráfico 3.

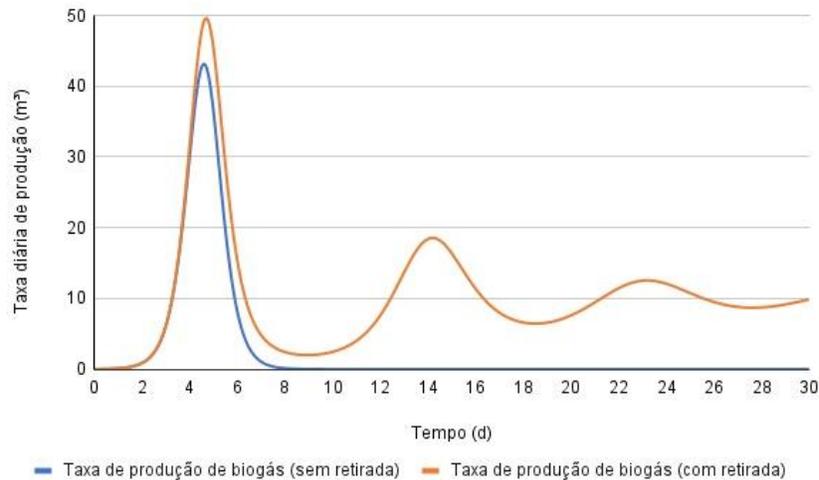
É possível observar que as curvas iniciam com um mesmo perfil até o quarto dia, porém o biodigestor com retirada de biogás apresenta uma produção maior a partir desse ponto. Os picos são apresentados em espaços de tempo bem próximos, porém com valores diferentes, obtendo-se o maior pico na consideração de retirada do biocombustível. No oitavo dia, a taxa de produção é interrompida para o biodigestor sem retirada, o que não ocorre no outro, com uma flutuação de biogás que vai se estabilizando em valores próximos de 10 m<sup>3</sup>.

Por meio da literatura, para intenções de comparação, os valores de produção de biogás por volume de biodigestor foram utilizados para padronizar tal comparação e avaliar a eficiência da simulação. Os valores encontrados em Bruno e Oliveira (2008) são entre 0,605 m<sup>3</sup>Biogás/m<sup>3</sup>Reator.d e

0,805  $\text{m}^3_{\text{Biogás}}/\text{m}^3_{\text{Reator.d}}$ , valores inferiores, porém próximos, aos encontrados no estudo atual. Entretanto, a diferença de volume dos reatores, as vazões de matriz e as concentrações de entrada da DQO afetam a comparação, pois estas variáveis são

as que regem, em parte, a produção do biogás dentro do processo, além do TDH que também influencia de forma crítica o desenvolvimento do processo.

**Gráfico 3: Taxa de produção de biogás para as modalidades com e sem retirada de biogás**



Fonte: Autoria própria.

Por meio da literatura, para intenções de comparação, os valores de produção de biogás por volume de biodigestor foram utilizados para padronizar tal comparação e avaliar a eficiência da simulação. Os valores encontrados em Bruno e Oliveira (2008) são entre 0,605  $\text{m}^3_{\text{Biogás}}/\text{m}^3_{\text{Reator.d}}$  e 0,805  $\text{m}^3_{\text{Biogás}}/\text{m}^3_{\text{Reator.d}}$ , valores inferiores, porém próximos, aos encontrados no estudo atual. Entretanto, a diferença de volume dos reatores, as vazões de matriz e as concentrações de entrada da DQO afetam a comparação, pois estas variáveis são

as que regem, em parte, a produção do biogás dentro do processo, além do TDH que também influencia de forma crítica o desenvolvimento do processo. Os Gráficos 1 a 3 foram obtidos através de simulações empregando a ode45. Comparando-se os resultados dessa ferramenta com a ode15s, como ilustrado no Gráfico 4, foi constatado que para o problema modelado o comportamento de ambas pode ser considerado equivalente com uma precisão de 0,1%, suficiente para a situação problema proposta.

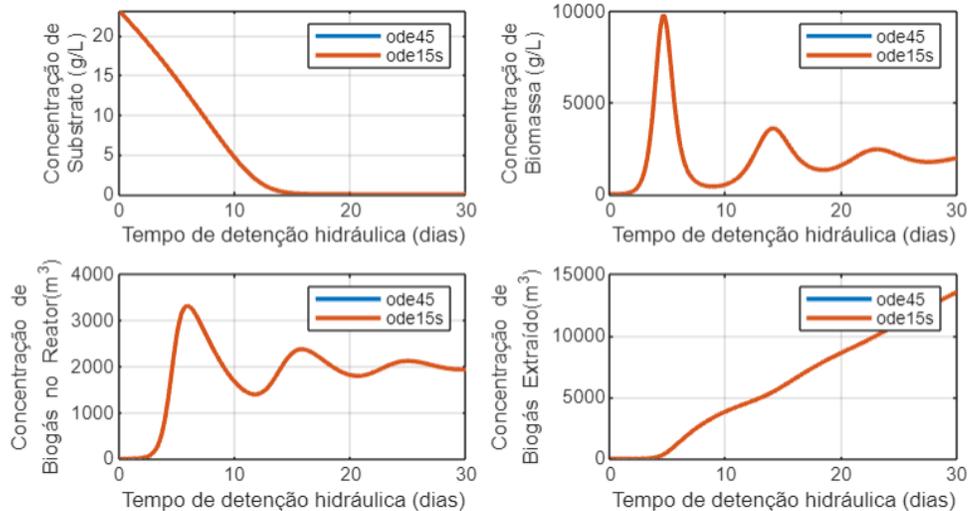
### 3.2 Potência energética e impacto social

Foram encontrados os valores do potencial de geração energética do biogás produzido no biodigestor sem retirada de, aproximadamente, 0,015 MW ou 1,64 kW/d, e, para a outra modalidade, um valor próximo de 0,019 MW ou 2,08 kW/d. Em ambos os casos, a produção de biogás pode suprir a demanda energética do próprio processo, de 0,011 MW ou 1,19 kW/d. Para fins de comparação, Dos Santos e Fernandes (2020) proporcionaram em seu estudo o valor de energia solar produzida no estado de Minas Gerais de cerca de 562,5 MW; já Muarigue e Fortes (2022) publicaram em seu estudo a potência de geração de energia da Hidrelétrica Usina Suíça, em Espírito Santo, que é de 16760 MW e Neto (2014) demonstrou em sua publicação que a potência de energia eólica produzida em Itarema, no estado do Ceará, é de 30 MW. Os biodigestores simulados podem cobrir, em porcentagem, entre 0,0027% e 0,0034% da produção de energia solar do estado de Minas Gerais, entre 0,00009% e 0,00011% da energia produzida na Hidrelétrica Usina Suíça e entre 0,05% e 0,06% da energia

produzida em parques eólicos do município de Itarema. Tais valores, em porcentagem, são levados em conta para um meio reacional de 600 m<sup>3</sup>; com um aumento de escala, essa tecnologia pode ser

utilizada para a adaptação de biodigestão de outros materiais em locais de difícil acesso e com poucas alternativas para a geração de energia.

**Gráfico 4: Comparação entre modelagens empregando ode45 e ode15s**



Fonte: Autoria própria.

Para demonstrar o impacto social do uso de biogás como fonte energética alternativa, é possível calcular o número aproximado de famílias beneficiadas pela produção de biogás simulada. Tem-se que o potencial energético do biogás é, em média, de 6,11 kWh/m<sup>3</sup><sub>Biogás</sub>, gerando cerca de 25350 kWh de energia total produzida, para o biodigestor sem retirada de biogás, e 32279 kWh para a modalidade com retirada. Além disso, existe o fato de que a cada 1 kWh/h, cerca de 4 famílias são beneficiadas com a energia gerada. Se para 8 dias de biodigestão teve-se 25350 kWh e 32279 kWh de energia gerada, pode-se considerar que foram gerados em média 3168,80 kWh e 4034,89 kWh/d, ou 132,03 kWh e 168,12 kWh/h, para assim conseguir fazer a comparação. Assim, com os valores de 132,03 kWh e 168,12 kWh/h produzidos na simulação, a biodigestão poderia beneficiar entre 528 e 672 famílias (Felca *et al.*, 2015; International Energy Agency, 2020).

Tomando como parâmetro os argumentos, num aumento de escala para o âmbito nacional, o número de famílias beneficiadas pela energia do biocombustível seria ainda maior. Além disso, a utilização da matriz energética geraria uma diminuição do preço da energia e seria uma

alternativa de épocas de escassez energética, normalmente quando os recursos hídricos estão em época de seca ou em época de diminuição de ventos, gerando baixa na produção de energia eólica (Miguel, 2021).

### 3.3 Estudo de impacto ambiental

Para a avaliação dos impactos ambientais são necessárias as informações das concentrações máximas de DBO<sub>5</sub> da Resolução nº 357, do CONAMA (Brasil, 2005), que são de 10 mg/L para rios Classe 3 e 5 mg/L para rios Classe 2, além das vazões do rio Paraopeba, de 12,8 m<sup>3</sup>/s, e de saída de efluente de matriz tratada, de 1100 m<sup>3</sup>/d, e da DBO do rio como 2,3 mg/L (PINTO; ALVES, 2001; Soares, 2021). Esses valores são substituídos na Equação 5 para encontrar as concentrações de saída do efluente de matriz tratada e, assim, encontrar o tempo de detenção hidráulica necessário para a sua adequação de lançamento.

Calculou-se, então, o valor mais próximo para a adequação da concentração entre os pontos de concentração da modelagem. Dentre os valores em cada ponto de concentração encontra-se o TDH para cada concentração, já que a modelagem

discretizou o tempo e utilizou do método de saltos de tempo para o cálculo. No caso dos rios de Classe 3, a concentração de DQO de lançamento calculada foi em torno de 7,71 g/L, reduzida a concentração inicial em 66,55%, em um período de 9 dias. Já para o caso dos rios de Classe 2, a concentração de DQO de lançamento calculada é cerca de 2,71 g/L, gerando assim um tempo de detenção hidráulica de 12 dias, reduzindo a concentração da DQO do processo em 88,33% do inicial. A partir do fato de que o processo em foco é um processo biológico, no qual teoricamente a DBO é a única parte da DQO que foi consumida, pode-se dizer que em ambos os casos a Resolução nº 357, do CONAMA (Brasil, 2005), é respeitada, tanto pelos limites de lançamento, quanto pela redução de 60% da DBO inicial.

Em ambos os casos, o TDH está acima de 9 dias, o que torna inviável o processo para o biodigestor sem retirada de biogás, já que a partir do nono dia a biomassa já está em concentrações desprezíveis e o substrato permanece decaindo, o que faz o modelo se limitar aos dados antes desse intervalo. Com isso, o modelo não se demonstra viável, em relação ao estudo ambiental, a menos que sejam impostas outras etapas de tratamento da matriz. Já o biodigestor com retirada de biogás, em ambos os casos os intervalos estão dentro do limite de validação do modelo. Além disso, vale ressaltar que quando a consideração de que o substrato inicial é igual a seu valor de DQO de entrada, considera-se também materiais inertes, que não apresentam interação alguma com a biomassa e, por consequência, não são materiais convertidos no biocombustível.

### 3.4 Limitações do modelo

Levando-se em conta o intuito de tornar o processo de biodigestão uma alternativa de produção de energia, a simulação não envolve a coleta contínua do biogás para produção energética. Assim, deve-se atentar para a utilização deste processo como armazenamento reserva do recurso ou utilizar diferentes biodigestores para a coleta alternada de cada instalação. Essa limitação impede a utilização do biodigestor como fonte primária de energia e limita a produção de biogás, já que a biomassa tem uma dependência com a concentração de substrato e volume de biogás para

a manutenção de sua concentração no meio reacional.

Dando-se enfoque aos modelos utilizados na simulação, mesmo que sua utilização seja próxima a encontrada em outros estudos e demonstra uma eficiência relevante em relação a outros, sua composição tem limitações de previsão e de sensibilidade da produção e concentrações. A concentração de substrato é independente da biomassa, além de que a biomassa não acompanha o comportamento do substrato. Esse fator pode gerar uma limitação na capacidade de predição do modelo em um ponto onde a concentração do substrato já esteja em níveis desprezíveis para o favorecimento do crescimento da biomassa (Xu, 2020).

Observando-se novamente o Gráfico 1, a concentração da biomassa é reduzida a valores insignificantes a partir do oitavo dia, o que demonstra uma segunda limitação do modelo quanto ao limite imposto para o tempo de detenção; isso é afirmado pelo fato da inexistência de biomassa impedir o processo de prosseguir, a menos que seja inserida uma nova colônia no meio. O fator determina um tempo limite para o funcionamento do biodigestor, sendo necessário o aumento da concentração de substrato ou a coleta de biogás para a manutenção da concentração da biomassa no meio.

Quando analisado o Gráfico 2, é possível observar que o substrato decai de forma independente a outras variáveis, assim como o modelo sem retirada de biogás. Observa-se que foi estudado um volume de controle radial e angular, com concentração homogênea para entender a variação das concentrações de substrato e biomassa. Como o volume de estudo foi isolado, não há manutenção do substrato, por ser considerado um regime laminar, assim o comportamento da biomassa tende a um aumento inicial, uma redução pelos efeitos inibitórios e a redução do substrato. Entretanto, após o 14º dia houve uma interrupção na queda da concentração de biomassa e apresentou-se uma tendência à estabilização. Tal comportamento é encontrado na literatura, mas somente quando ocorre também a manutenção da concentração de substrato. Uma hipótese da razão para tal comportamento é a utilização de materiais mais complexos como fonte energética, ou mesmo a consideração de redução do metabolismo ao seu

mínimo (Eastman; Ferguson, 1981; García-Ochoa *et al.*, 1999; Policastro *et al.*, 2022).

#### 4 CONCLUSÃO

O desenvolvimento do estudo teve o objetivo de modelar um biodigestor para o aproveitamento da borra de café produzindo assim biogás. Com isso, seria possível destiná-lo para reaproveitamento, através de sua queima, como uma forma alternativa de geração de energia, além de analisar as variáveis de saída para que o processo fosse adequado à legislação de lançamento em rios. A modelagem, executada pelas ode45 e ode15s, foi construída com base nos modelos de Monod e Lotka-Volterra para a análise de perfil da concentração de substrato e biomassa, além do volume produzido de biogás e, por último, a produção energética foi calculada através da consideração de motores de combustão interna.

Por meio dos resultados encontrados, foram discutidos pontos de grande importância para a modelagem e produção energética, sempre em método comparativo com outros estudos. Observando-se que os perfis de concentração de biomassa, substrato e de volume produzido de biogás se assemelham aos encontrados na literatura, pode-se afirmar que as ode45 e ode15s conseguiram desenvolver a modelagem de maneira próxima ao esperado. O biodigestor com retirada se adaptou melhor que o sem retirada. Ambos os casos tiveram sua produção relevante, em relação à literatura, obtendo uma produção de cerca de 518,60 m<sup>3</sup>/d para a modalidade sem retirada e 660,36 m<sup>3</sup>/d para o com retirada de biogás, um valor acima do encontrado até então. Além disso, o potencial energético do processamento da borra de café provou-se capaz de beneficiar entre 528 e 672 famílias, produzindo 3168,80 kWh/d para o biodigestor que estocava biogás e 4034,89 kWh/d para o biodigestor de coleta contínua. Então, pode-se afirmar que o modelo apresentou grande potencial do biogás advindo do processamento da borra de café como uma alternativa energética em épocas de crise ou para locais de difícil acesso.

Redirecionando-se o olhar para a avaliação ambiental do projeto, seguindo a Resolução nº 430, do CONAMA (Brasil, 2011), pode-se observar que para que o lançamento fosse feito em um rio Classe 3, o tempo de retenção hidráulica seria de cerca de

9 dias, com uma concentração de 7,71 g/L. Já caso o lançamento fosse feito em um rio de Classe 2, o TDH passaria a ser de cerca de 12 dias, com uma concentração de 2,71 g/L. Em ambos os casos, o TDH está acima do limitado no modelo sem retirada do biocombustível, já que a biomassa se torna desprezível entre o oitavo e nono dia de processo. Já para o modelo com retirada contínua, ambos os casos estão dentro do intervalo de tempo em que o modelo é válido. Além disso foi também respeitada a mesma resolução, que impõe a redução de 60% da DBO.

Outro fato importante é que a concentração de DQO de entrada do reator, quando considerada a concentração de substrato inicial, considera o material inerte como parte do que interage com a biomassa, o que não ocorreria na realidade. Logo, parte do material consumido no modelo poderia não ter esse comportamento dentro do processo, demonstrando outra limitação ao modelo utilizado.

Em relação ao desenvolvimento do projeto, o principal estudo que complementa a análise é uma avaliação experimental da biodigestão, nas condições citadas, uma vez que os resultados apresentados foram promissores e devem ser confirmados em escala laboratorial. Em relação ao biodigestor, é necessário o estudo de uma mudança em sua estrutura, obtendo-se um estudo de vários tipos de biodigestor, para assim entender qual a forma ótima de produção, além de estudar o perfil de concentração de substrato e biomassa, além do volume produzido de biogás, e quais as mudanças que essa alteração traria ao modelo. Já quando o enfoque é na modelagem, execução de estudos relacionando a aplicação de diferentes modelos, variações dos parâmetros arbitrários da produção e aplicação de diferentes tipos de reator é interessante para a avaliação de qual o modelo ótimo para cada região e quais as mudanças que poderiam gerar nos resultados. Em adição a isso, a utilização de outras matrizes pode ser estudada para observar a viabilidade do modelo e demonstrá-lo como alternativa para outras fontes poluidoras com características vantajosas para a utilização da biodigestão anaeróbia como tratamento prévio para o lançamento em corpos hídricos.

A expansão do modelo para previsão de emissão de compostos sulfurados, gás carbônico e outros de interesse à legislação pode ser de grande relevância, permitindo um monitoramento ambiental

do processo, em adição ao estudo de destinação da matriz após o processo. Pode-se também utilizar o estudo para a destinação de rios com menores rigores observando, assim, se o modelo possui um tempo de detenção hidráulica dentro das limitações do modelo, para assim avaliar qual seria a produção total de biogás, além de observar o potencial energético nesse caso. Em adição, uma análise econômica poderia enriquecer o estudo, demonstrando em valores exatos a economia feita com a utilização do processo como alternativa energética dentro da cadeia de processos da indústria, além de demonstrar qual seria o retorno com a implantação do processo, gerando um balanço de sua construção com a economia de gastos energéticos dentro da planta industrial.

### REFERÊNCIAS

- ABU-REESH, I. M. Kinetics of anaerobic digestion of labaneh whey in a batch reactor. **African Journal of Biotechnology**, v. 13, n. 16, p. 1745–1755, 2014.
- ADARME-DURÁN, C. A.; TSUKUI, A.; SANTOS, F. K. F.; MARTINEZ, S. T.; BIZZO, H. R.; REZENDE, C. M. Coffee: General aspects and its use beyond drink. **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 1, p. 107–134, 2017.
- ALBUQUERQUE, L. S.; ARAÚJO, J. C. S. de. Produção de biogás por co-digestão utilizando uma mistura de dejetos bovinos e casca de café Conilon. **Brazilian Journal of Production Engineering**, v. 2, n. 3, p. 44–54, 2016.
- ALVES, R. B. **Análise da viabilidade econômica da geração de energia elétrica a partir do biogás de suinocultura em terminação**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Tecnologias da Cadeia Produtiva do Biogás) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2019.
- ASSOCIAÇÃO DOS CAFEICULTORES DE ARAGUARI. História Café. Disponível em: <https://www.aca.com.br/index.php?pg=historia-cafe>. Acesso em: 11 set. 2021.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005 (Retificada). **Diário Oficial da União**, n. 204, p. 14–15, 2005.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011. **Diário Oficial da União**, n. 92, p. 01–20, 2011.
- BRUNO, M.; OLIVEIRA, R. A. de. Tratamento anaeróbio de águas residuárias do beneficiamento de café por via úmida em reatores UASB em dois estágios. **Saneamento e Controle Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 2, p. 14, 2008.
- PINTO, E. J. de A.; ALVES, M. M. S. **Regionalização de vazões das sub-bacias 40 e 41 - Alto São Francisco**. Caracterização física e análise dos dados básicos. Relatório final. Convênio 015/2000 ANEEL - 013/CPRM/2000. Belo Horizonte: ANEEL; CPRM, v. 1, dez. 2001.
- DADI, D.; MENGISTIE, E.; TEREFE, G.; GETAHUN, T.; HADDIS, A.; BIRKE, W.; BEYENE, A.; LUIS, P.; VAN DER BRUGGEN, B. Assessment of the effluent quality of wet coffee processing wastewater and its influence on downstream water quality. **Ecology and Hydrobiology**, v. 18, n. 2, p. 201–211, 2018.
- DIAS, M. E.; OLIVEIRA, G. H. D. de; COUTO, P.; DUSSAN, K. Anaerobic digestion of hydrothermal liquefaction wastewater from spent coffee grounds. **Biomass and Bioenergy**, v. 148, n.6, May, 2021.
- EASTMAN, J. A.; FERGUSON, J. F. Solubilization of particulate organic carbon during the acid phase of anaerobic digestion. **Journal of the Water Pollution Control Federation**, v. 53, n. 3, Part 1, p. 352–366, Mar. 1981.
- FELCA, A. T. A.; GLÓRIA, R. F.; BARROS, R. M.; ALVES, A. P. Análise do potencial energético do biogás proveniente de estações de tratamento de esgoto. In: CONGRESSO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE DE POÇOS DE CALDAS, 12, 2015, Poços de Caldas. **Anais [...]**. Poços de Caldas: GSC Eventos Especiais; Instituto Federal do Sul de Minas – Campus Muzambinho, v. 7, n. 1, p. 1–7, mai. 2015.
- FREITAS, F. F.; SOUZA, S. S. de; FERREIRA, L. R. A.; OTTO, R. B.; ALESSIO, F. J.; SOUZA, S. N. M. de; VENTURINI, O. J.; ANDO JUNIOR, O. H. The Brazilian market of distributed biogas generation: Overview, technological development and case study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 101, p. 146–157, 2019.

GARCÍA-OCHOA, F.; MAZORRA V. E. S.; NAVAL, L.; GUARDIOLA, E. Kinetic model for anaerobic digestion of livestock manure. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 25, n. 1–2, p. 55–60, Jul. 1999.

GIORDANO, G. **Tratamento e controle de efluentes industriais**. Rio de Janeiro: Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, p. 1–88, 2004.

GODOY JUNIOR, E.; JESUS, R. O.; IIVA, A. C.; CAMARGO, J. A. de. Comparative study on efficiency of biodigesters upflow anaerobic sludge blanket treating brewery effluent. **Chemical Engineering Transactions**, v. 38, p. 157–162, Jan. 2014.

HUTCHISON, N. Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK). 2015. Disponível em: [https://sebokwiki.org/w/images/sebokwiki-farm!w/8/8d/SEBoKv1.4\\_full.pdf](https://sebokwiki.org/w/images/sebokwiki-farm!w/8/8d/SEBoKv1.4_full.pdf).

INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION. Coffee year production by country. 2021. Disponível em: <https://www.ico.org/prices/po-production.pdf>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Outlook for biogas and biomethane. Prospects for organic growth. World Energy Outlook Special Report. p. 93, Mar. 2020.

LADEIRA, Y. F. X.; MOREIRA, V. R.; CARPANEZ, T. G.; MAGALHÃES, N. C. Ultrafiltration as a pre-treatment technology to improve vinasse biomethanation. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 169, Nov. 2022, p. 718–724, 2022.

LEBRON, Y. A. R.; MOREIRA, V. R.; FURTADO, T. P. B.; SILVA, S. C. da; LANGE, L. C.; AMARAL, M. C. S. Vinasse treatment using hybrid tannin-based Coagulation-Microfiltration-Nanofiltration processes: Potential energy recovery, technical and economic feasibility assessment. **Separation and Purification Technology**, v. 248, p. 117152, Oct. 2020.

LEVENSPIEL, O. **Engenharia das reações químicas**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2011.

MARTINEZ, C. L. M.; SAARI, J.; MELO, Y.; CARDOSO, M.; ALMEIDA, G. M. de; VAKKILAINEN, E. Evaluation of thermochemical

routes for the valorization of solid coffee residues to produce biofuels: A Brazilian case. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 137, Dec. 2020.

MIGUEL, J. V. P. **Avaliação da geração de energia elétrica no Brasil em condições de escassez de recursos eólicos e hídricos**. 2021. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

MONOD, J. The growth of bacterial cultures. **Annual Reviews Microbiology**, v. 3, n. XI, p. 371–394, 1949.

MUARIGUE, A. R.; FORTES, A. G. Geração de energia hidrelétrica através de uma turbina Francis para o uso residencial. **Conexões: Ciência e Tecnologia**, v. 16, p. 1-12, mar. 2022.

NERES, L. M.; RAMOS, H. R.; RÉGIS, M. DE M. Modelos de biodigestores utilizados no mundo no contexto de cidades inteligentes. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, p. 77–89, 2021.

NETO, A. P. **A tutela jurídica da energia eólica no Brasil**. 1. ed. Rio de Janeiro: Synergia Editora, 2014.

NIR, M. J.; MAJUMDAR, S. Numerical aspect of Predator-Prey Model. **bioRxiv**, Ju I. 2016.

ORO, N. T.; SAUSEN, A. T. Z. R.; SAUSEN, P. S. Modelagem, estabilidade e simulação do processo de produção de biogás num biodigestor urbano. **Revista CIATEC-UPF**, v. 9, n. 1, 2017.

PENA, A. DE C. C.; ROCHA, S. M. S.; NUCCI, E. R. Estudo da produção de biogás a partir de dejetos bovinos combinados com bagaço de cana e casca de café. *In: ANAIS DO SIMPÓSIO NACIONAL DE BIOPROCESSOS*, 2015, Campinas. **Anais [...]**. Campinas, set. 2015.

PESCADOR, A.; OLIVEIRA, Z. R. Q. Resolução numérica da equação diferencial de resfriamento de Newton pelos métodos de Euler e Runge-Kutta. **Revista Produção e Desenvolvimento**, v. 2, n. 1, p. 10-25, jan./abr. 2016.

POLICASTRO, G.; CESARO, A.; FABBRICINO, M.; PIROZZI, F. Opportunities and Challenges from Symbiosis of Agro-Industrial Residue Anaerobic Digestion with Microalgae Cultivation. **Sustainability**, v. 14, n. 23, Nov. 2022.

PRADO, M. A. C. **Produção de biogás no tratamento dos efluentes líquidos de Coffea arabica L. em reator UASB para o potencial aproveitamento na secagem do café.** 2006.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras (MG), 2006.

REBS, T.; BRANDENBURG, M.; SEURING, S. System dynamics modeling for sustainable supply chain management: A literature review and systems thinking approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 208, p. 1265–1280, Jan. 2019.

RICCIARDI, P.; CILLARI, G.; MIINO, M. C.; COLLIVIGNARELLI, M. C. Valorization of agro-industry residues in the building and environmental sector: A review. **Waste Management and Research**, v. 38, n. 5, p. 487–513, 2020.

SANTOS, G. J. dos; FERNANDES, L. R. **Análise sobre energia solar no Brasil: o Sol como fonte de energia elétrica.** 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

SCARLAT, N.; DALLEMAND, J. F.; FAHL, F. Biogas: Developments and perspectives in Europe. **Renewable Energy**, v. 129, p. 457–472, 2018.

SOARES, A. L. C. **Bacia hidrográfica do rio Parapeba: análise integrada dos diferentes impactos antrópicos.** 2021. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

STAVE, K. Participatory System Dynamics Modeling for Sustainable Environmental Management: Observations from Four Cases. **Sustainability**, v. 2, n. 9, p. 2762–2784, Sep. 2010.

TAKASHINA, T. A.; LEIFELD, V.; ZELINSKI, D. W.; MAFRA, M.; MAFRA, L. I. Application of Response Surface Methodology for Coffee Effluent Treatment by Ozone and Combined Ozone/UV. **Ozone Science and Engineering**, v. 40, Ou n. 1, p. 1-12, Dec. 2017

TORRES, J. A. et al. Enzymatic oxidation of phenolic compounds in coffee processing wastewater. **Water Science and Technology**, v. 73, n. 1, p. 39–50, 2016.

VOLTERRA, V. Fluctuations in the Abundance of a Species considered Mathematically. **Nature**, v. 118, n. 2972, p. 558–560, 1926.

WEILAND, P. Biogas production: Current state and perspectives. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 85, n. 4, p. 849–860, Sep. 2009

XU, P. Analytical solution for a hybrid Logistic-Monod cell growth model in batch and continuous stirred tank reactor culture. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 117, n. 3, p. 873–878, Mar. 2020.

YADVIKA; SANTOSH; SREEKRISHNAN, T. R.; KOHLI, S.; RANA, V. Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques - A review. **Bioresource Technology**, v. 95, n. 1, p. 1–10, Mar. 2004.

YI, Y.; WU, J.; ZULIANI, F.; LAVAGNOLO, M. C.; MANZARDO, A. Integration of life cycle assessment and system dynamics modeling for environmental scenario analysis: A systematic review. **Science of The Total Environment**, v. 903, Dec. 2023.