

**OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM BIODIGESTORES
BATELADA**

Leandro Willian Marcucci

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” para obtenção do título de Mestre em Biometria.

BOTUCATU
São Paulo - Brasil
Fevereiro – 2018

**OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM BIODIGESTORES
BATELADA**

Leandro Willian Marcucci

Orientadora: Profa. Dra. **Helenice de Oliveira Florentino Silva**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” para obtenção do título de Mestre em Biometria.

BOTUCATU
São Paulo - Brasil
Fevereiro – 2018

Ficha Catalográfica

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉC. AQUIS. TRATAMENTO DA INFORM.
DIVISÃO TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - CÂMPUS DE BOTUCATU - UNESP
BIBLIOTECÁRIA RESPONSÁVEL: ROSANGELA APARECIDA LOBO-CRB 8/7500

Marcucci, Leandro Willian.

Otimização da produção de biogás em biodigestores
batelada / Leandro Willian Marcucci. - Botucatu, 2018

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho", Instituto de Biociências de
Botucatu

Orientador: Helenice de Oliveira Florentino Silva
Capes: 10104003

1. Modelos matemáticos. 2. Otimização. 3. Biodigestor.
4. Biogás.

Palavras-chave: Biodigestor; Biogás; Modelagem Matemática;
Otimização.

Dedicatória

Dedico este trabalho a minha família, ao meu companheiro e aos meus amigos, por fazerem parte dos meus sonhos e compartilharem das minhas conquistas.

Agradecimentos

Agradeço em primeiro lugar a Deus, por me conduzir e me dar forças para enfrentar e realizar as dificuldades encontradas neste trabalho.

A minha orientadora Profa. Dra. Helenice de Oliveira Florentino Silva, pelo conhecimento, contribuição, paciência e orientação no decorrer do trabalho.

À Coordenação e equipe de professores do Programa de Pós-Graduação em Biometria-UNESP-Câmpus de Botucatu-SP, pela oportunidade, convívio e ensinamentos que me ajudaram a ser um profissional melhor.

Agradeço a meus pais Argemiro Marcucci e Marlene Aparecida Pisteker Marcucci por acompanharem toda essa jornada estando sempre ao meu lado dando muito apoio em todos os momentos e a demais familiares.

Ao meu companheiro Altair Oliveira Silva Junior que apesar das dificuldades nunca desistiu de mim e sempre esteve presente me ajudando a enfrentar os obstáculos, me fazendo crescer e me tornando uma pessoa melhor a partir de nossas experiências.

Aos meus amigos que sempre estiveram por perto me ajudando nas dificuldades, em especial, à Amanda Gomes que sempre me deu apoio para não desistir.

Aos meus amigos de graduação e de Pós-Graduação e que moraram comigo me ajudando a esclarecer dúvidas encontradas, em especial aos amigos Larissa Rodrigues, Tayná Pontes, Stephane Kim, Carolinne Souza e a Michele Penso, que sempre me ajudaram com dúvidas no trabalho e alimentaram minha motivação neste percurso.

Agradeço a CAPES pelo apoio financeiro.

Sumário

	Página
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	viii
RESUMO	ix
SUMMARY	xi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	5
2 REVISÃO DE LITERATURA	7
2.1 Biodigestores	7
2.1.1 Biodigestão	9
2.1.2 Biofertilizante	13
2.1.3 Biogás	14
2.1.4 Biodigestão no Brasil	15
3 PRODUÇÃO DE BIOGÁS	17
3.1 Temperatura	18
4 MODELAGEM MATEMÁTICA	19
5 MÉTODOS DE RESOLUÇÃO DO MODELO	26
5.1 Algoritmo Genético (AG)	26

	vi
5.2 Operadores Genéticos	27
5.3 Estrutura do Algoritmo Genético utilizado na resolução do Modelo Matemático (9)-(17)	29
5.3.1 Definindo os Indivíduos	30
5.3.2 Passos do AG	31
5.4 Algoritmo Memético (AM)	33
5.4.1 Etapas do AM	33
5.5 Estrutura do Algoritmo Memético utilizado na resolução do Modelo Matemático (9)-(17)	34
5.5.1 Definindo os Agentes	35
5.5.2 Passos do AM	36
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
7 CONCLUSÕES	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

Lista de Figuras

	Página
1 Biodigestor do tipo indiano (alimentação contínua). Fonte: Silva (2017).	3
2 Biodigestor do tipo chinês (alimentação contínua). Fonte: Silva (2017).	4
3 Biodigestor do tipo batelada.	4
4 Estágios da digestão anaeróbia. Fonte: Machado (2013).	12
5 Caracterização das duas fases de fermentação usadas no modelo.	20
6 Crescimento microbiano segundo Khan et al. (2013).	22
7 Crescimento microbiano segundo Hill (1983).	22
8 Estrutura do algoritmo genético utilizado no modelo matemático.	30
9 Estrutura do algoritmo memético utilizado na resolução do modelo matemático.	35
10 Comparação dos dados reais e das curvas estimadas, Curva Gaussiana, Fourier, Linear (Khan et al. (2013)), e Soma de senos.	39
11 Concentração de substrato na primeira fase (AG).	41
12 Concentração de substrato na primeira fase (AM).	42
13 Concentração de substrato na segunda fase (AG).	42
14 Concentração de substrato na segunda fase (AM).	43
15 Concentração de bactérias na primeira fase (AG).	43
16 Concentração de bactérias na primeira fase (AM).	44
17 Concentração de bactérias na segunda fase (AG).	44
18 Concentração de bactérias na segunda fase (AM).	45
19 Produção de metano no final do processo de fermentação (AG).	45
20 Produção de metano no final do processo de fermentação (AM).	46

Lista de Tabelas

	Página
1	Rendimento do biogás e proporção de metano de acordo com o substrato (Petersson & Wellinge, 2009). 14
2	Concentrações iniciais do sistema (11)-(14). 25
3	Condições iniciais (Khan et al., 2013). 39
4	Parâmetros utilizados (Khan et al., 2013). 39
5	Parâmetros utilizados nos testes. 40
6	TRH, temperatura e produção otimizada de biogás obtidos pela aplicação do AG. 40
7	TRH, temperatura e produção otimizada de biogás obtidos pela aplicação do AM. 40

OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM BIODIGESTORES BATELADA

Autor: LEANDRO WILLIAN MARCUCCI

Orientadora: Profa. Dra. HELENICE DE OLIVEIRA FLORENTINO SILVA

RESUMO

A busca por energia tem sido crescente na atualidade. Por outro lado, o processo de obtenção de energia por diversas fontes nem sempre compensa economicamente e ambientalmente. Assim, as fontes renováveis tem ganhado cada vez mais espaço na matriz energética. Neste contexto, os biodigestores tem assumido um papel importante, por serem uma fonte barata de energia e reduzirem os resíduos e dejetos gerados pelo setor agropecuário. Este trabalho visa propor um modelo de otimização para biodigestores do tipo batelada visando maximizar a produção de biogás e ao mesmo tempo minimizar o tempo de retenção hidráulica, restrito a um sistema dinâmico que descreve o processo de conversão da matéria orgânica em biogás, tendo a temperatura como variável do sistema. Para a resolução do modelo de otimização foi proposto o uso das metaheurísticas Algoritmo Genético e Algoritmo Memético, implementado o Método de Runge-Kutta de quarta ordem para resolução

do sistema de equações diferenciais de primeira ordem e um ajuste de curva aos dados coletados que descrevem o crescimento bacteriano em função da temperatura. Foram investigadas algumas curvas que descrevem o crescimento microbiano a partir do ajuste das curvas Gaussiana, Fourier e Soma de Senos. Os resultados alcançados indicam que o ajuste de curva feito pela curva Gaussiana se mostrou mais eficaz e que ambos Algoritmos, Memético e Genético, produzem soluções satisfatórias e realísticas. Os experimentos computacionais realizados mostram que a metodologia proposta tem grande potencial como ferramenta de auxílio ao planejamento e operação dos biodigestores em batelada.

OPTIMIZATION OF BIOGAS PRODUCTION IN BATCH BIODIGESTERS

Author: LEANDRO WILLIAN MARCUCCI

Adviser: Profa. Dra. HELENICE DE OLIVEIRA FLORENTINO SILVA

SUMMARY

The search for energy has been growing nowadays. On the other hand, the process of obtaining energy from various sources does not always economically and environmentally compensate. Thus, renewable sources have gained more and more space in the energy matrix. In this context, biodigestors have assumed an important role, as they are an inexpensive source of energy and reduce the waste and waste generated by the agricultural sector. This work aims to propose an optimization model for batch type biodigestors in order to maximize the production of biogas and at the same time minimize the hydrological retention time, restricted to a dynamical system that describes the process of conversion of organic matter into biogas, with temperature varying from the system. In order to solve the optimization model it was proposed the use of the metaheuristic Genetic Algorithm and Memory Algorithm, implemented the fourth Runge-Kutta Method order to solve the system

of first order differential equations and a curve fit to the collected data that describe bacterial growth as a function of temperature. Some curves describing the microbial growth were investigated by adjusting the Gaussian, Fourier and Sum of Sine curves. The achieved results indicate that the curve fitting done by the Gaussian curve has proved to be more efficient and that both Algorithms, Memetic and Genetic, produce satisfactory and real solutions. The computational experiments carried out show that the proposed methodology has great potential as an aid tool for the planning and operation of batch biodigesters.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos a produção de resíduos e dejetos gerados pelo setor agropecuário no Brasil tem aumentado significativamente, podendo ocasionar contaminação no solo e problemas de saúde devido ao alto teor de substâncias tóxicas presente nesses resíduos.

Segundo Barbosa & Langer (2011), os dejetos de animais de criação em confinamento são depositados em campo aberto, podendo contaminar o solo, o ar e a água, trazendo problemas de saúde para aqueles que residem nas proximidades do local.

A suinocultura por exemplo, pode causar poluição a partir do manejo inadequado dos dejetos, quando estes são descartados no meio receptor natural (água e solo). Estes dejetos são compostos por fezes, urina, água de limpeza das baias, resíduos de ração, poeira e outros materiais decorrente do processo de produção. Tais resíduos normalmente apresentam coloração escura, consistência líquida, pastosa ou sólida, com alta concentração de orgânicos e odor desagradável.

Neste contexto, uma alternativa que tem se mostrado eficiente para solucionar problemas de poluição a partir de dejetos orgânicos é a biodigestão anaeróbica, ocorrida em biodigestores.

Segundo Deganutti (2002) o biodigestor é um equipamento composto por uma câmara fechada, em que é colocada o material orgânico em solução aquosa, chamado substrato, e uma segunda câmara na parte superior chamada gasômetro, onde é acumulado o biogás proveniente da decomposição do substrato. Além da produção de biogás, o biodigestor fornece o biofertilizante, material remanescente do processo de digestão anaeróbica.

O biogás é composto principalmente por metano e gás carbônico, e pode ser utilizado na geração de energia elétrica, mecânica e no aquecimento (Calza *et al.*, 2015). A geração de energia elétrica pode ser feita pela queima do biogás em turbinas e em motores do ciclo de Otto e diesel, devidamente adaptados, sendo considerada uma fonte de energia limpa e própria para uso em propriedades rurais. O biofertilizante por outro lado trata-se de um adubo natural rico em nitrogênio.

Os biodigestores segundo Borzani *et al.* (2001), podem ser classificados de acordo com o seu tipo de abastecimento, podendo ser:

- contínuo: o processo de fermentação contínua caracteriza-se por possuir uma alimentação contínua de meio de cultura a uma determinada vazão constante, sendo o volume de reação mantido constante através da retirada contínua de caldo fermentado.
- semicontínuo: este processo fermentativo recebe este nome quando, uma vez colocados no reator o meio de fermentação e o inóculo, seguem as operações que obedecem à seguinte ordem:
 - Operação 1: Aguarda-se o término da fermentação.
 - Operação 2: Retira-se parte do meio fermentado, mantendo-se, no reator o restante de mosto fermentado.
 - Operação 3: Adiciona-se ao reator um volume de meio de fermentação igual ao volume de meio fermentado retirado na Operação 2.

O meio fermentado não retirado do fermentador na Operação 2 serve de inóculo ao meio de fermentação na Operação 3. Reinicia-se, desse modo, a sequência de operações descritas, que serão repetidas até não haver queda da produtividade.

- descontínuo ou batelada: neste modo de operação, inicialmente a solução é inoculada com microrganismos e incubada, de modo a permitir que a fermentação ocorra sob condições ótimas. No decorrer do processo fermentativo nada é adi-

cionado. Terminada a fermentação, descarrega-se o material remanescente da biodigestão no biodigestor e este deve ser lavado, esterilizado e recarregado.

- descontínuo alimentado: o processo descontínuo alimentado é definido como uma técnica em processos microbianos, em que um ou mais nutrientes são adicionados durante o cultivo, e os produtos permanecem até o final da fermentação.

As Figuras 1, 2 e 3 ilustram os modelos de biodigestores contínuos e descontínuos (batelada) mais usados no Brasil. Sendo na Figura 1 um biodigestor contínuo do tipo Indiano, na Figura 2 um biodigestor contínuo do tipo Chinês e na Figura 3 um biodigestor do tipo Batelada.

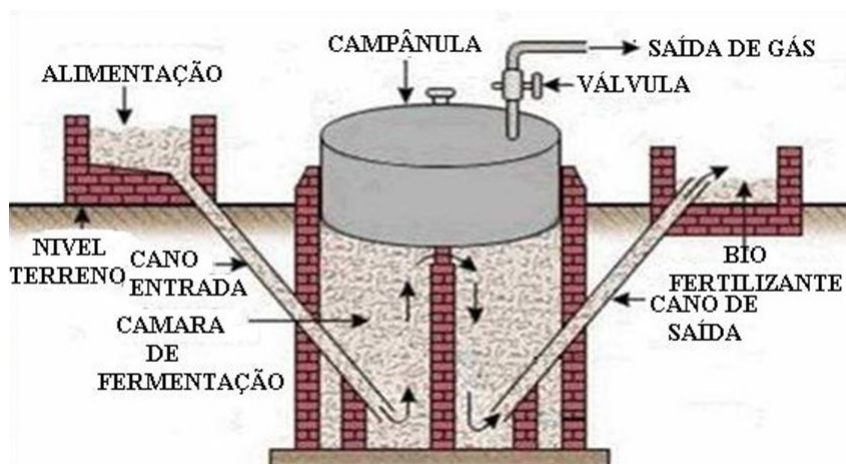


Figura 1: Biodigestor do tipo indiano (alimentação contínua). Fonte: Silva (2017).

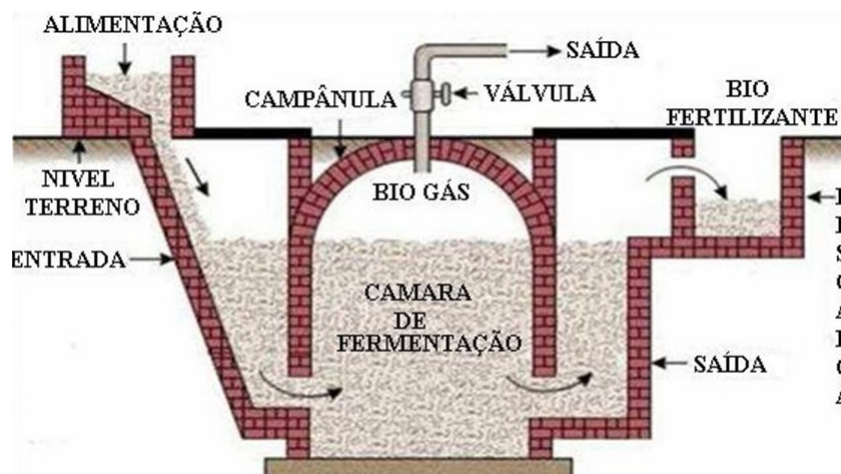


Figura 2: Biodigestor do tipo chinês (alimentação contínua). Fonte: Silva (2017).

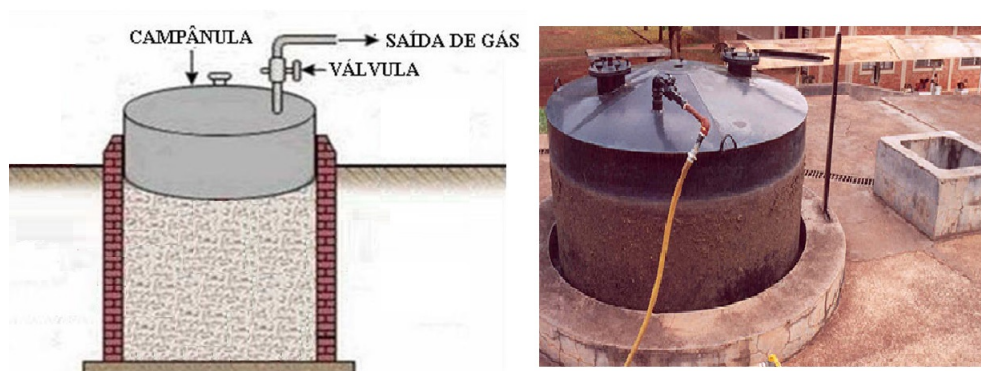


Figura 3: Biodigestor do tipo batelada.

Neste trabalho é abordado biodigestores com abastecimento do tipo batelada. Para estes tipos de abastecimento, ocorre a biodigestão anaeróbica ou fermentação anaeróbica, que é um método de reciclagem semelhante a compostagem que consiste no processo de decomposição de matéria orgânica realizado por um consórcio de microorganismos. O que difere da compostagem é que a biodigestão é um processo fermentativo totalmente anaeróbio (sem presença de oxigênio) constituído por inúmeras bactérias que segundo Machado (2013) se reproduzem ao longo de quatro estágios da fermentação.

O primeiro estágio, hidrólise: estágio em que moléculas complexas como carboidratos, proteínas e gorduras são quebradas por enzimas dando origem à compostos simples como aminoácidos, ácidos graxos e açúcares. No segundo estágio, acidogênese, as substâncias resultantes da hidrólise são transformadas por bactérias fermentativas em ácidos e alcoóis assim como hidrogênio e gás carbônico. No terceiro estágio, acetogênese, o material resultante da acidogênese são transformados em ácido etanóico, hidrogênio e gás carbônico por bactérias acetogênicas. No quarto estágio, metanogênese, a fermentação ocorre por grupos diferentes de bactérias através de duas reações. Na primeira ocorre geração de metano e gás carbônico e, na segunda, o hidrogênio e o gás carbônico dão origem ao metano e a água.

De acordo com o manual de treinamento em biodigestão, elaborado por Oliver (2008), além de produzir biofertilizantes e o biogás, o biodigestor também possui outras importâncias como descontaminação do meio ambiente, melhoria da qualidade do solo, melhoria da qualidade do ar no ambiente, redução na mortalidade animal, redução de custos energéticos, entre outros. Devido a importância do biodigestor, foi que escolheu-se este tema para esta pesquisa, afim de utilizar técnicas matemáticas para determinar a temperatura ótima para o processo de biodigestão, uma vez que esta tem influência sobre o metabolismo das bactérias, podendo ou não afetar a produção de biogás. Além disso, esta pesquisa também visa maximizar a produção de biogás e minimizar o tempo de retenção hidráulica (TRH).

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é propor e resolver um modelo de otimização visando maximizar a produção de biogás em biodigestores batelada e ao mesmo tempo minimizar o tempo de retenção hidráulica, restrito a um sistema dinâmico que descreve o processo de conversão da matéria orgânica em biogás, tendo a temperatura como variável do sistema. Serão utilizadas equações diferenciais para a modelagem do processo de biodigestão anaeróbica em biodigestores e técnicas matemáticas de

otimização para modelar e resolver o problema de maximização da produção do biogás e minimização do TRH. Alcançados tais objetivos, este trabalho contribuirá com a proposição de: um modelo para descrição da dinâmica de conversão de material orgânico em biogás; um modelo que descreve o crescimento bacteriano em função da temperatura; e um modelo de otimização visando a maximização da produção de biogás em um biodigestor em batelada, assim como uma metaheurística para a resolução deste modelo de otimização.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Biodigestores

Um biodigestor compõe-se, basicamente, de uma câmara fechada na qual a biomassa é fermentada anaerobicamente, isto é, sem a presença de oxigênio. A biodigestão anaeróbia pode ser definida como um processo biológico natural no qual um consórcio de diferentes tipos de microrganismos interagem promovendo a transformação de compostos orgânicos complexos em compostos simples, resultando principalmente na produção de metano e dióxido de carbono. Como resultado desta fermentação ocorre à liberação de biogás e a produção de biofertilizante.

O abastecimento de biomassa é feito conforme o tipo do biodigestor que pode ser classificado como contínuo, com descarga proporcional à entrada de biomassa onde o mesmo é normalmente abastecido diariamente ou não contínuo (batelada), este mantém uma produção de gás e biofertilizante por um longo período sem que haja a necessidade de abertura do equipamento ou realimentação. Os biodigestores em batelada, depois de carregados e fechados não mais serão abastecidos até o término da fermentação que é quando cessa a produção do biogás.

Após o término da fermentação, o biodigestor em batelada deve ser higienizado e novamente carregado para novo ciclo de produção de biogás. O biodigestor com abastecimento em batelada é mais indicado quando se tem a utilização de materiais orgânicos de decomposição lenta e com longo período de produção, como no caso de palha ou forragem misturada a dejetos animais, provindos de propriedades onde os animais vivem em confinamento.

Em países como China e Índia, de numerosa população e grande

produção de resíduos, os biodigestores são utilizados em áreas rurais para produção de combustível e adubo. Na maior parte dos casos, os biodigestores destinam-se ao uso doméstico, com projetos de baixo custo. Nos Estados Unidos, os biodigestores visam atender aos objetivos da produção de energia e tratamento de resíduos, principalmente de animais em fazendas, o que possibilita o manuseio de um material sem odores (Benincasa *et al.*, 1991; Chen, 1997).

Os 3 tipos mais comuns de biodigestores no Brasil são os modelos contínuos indiano e chinês e o biodigestor do tipo batelada. Os biodigestores contínuos indiano e chinês são muito utilizados em comunidades rurais. Neles, cada carga diária corresponde uma carga de volume semelhante ao do material fermentado. Os biodigestores em batelada são utilizados em propriedades rurais onde existe um grande volume de resíduos, mas estes são disponibilizados em períodos prolongados.

A implantação de biodigestores para produção de biogás nas propriedades rurais, aproveitando os dejetos de bovinos e suínos, funciona também como uma forma de minimizar os impactos ambientais e trazer benefícios para as pessoas que vivem no local através da produção do biogás, tais como: utilizar o biogás em fogões doméstico, iluminação, refrigeração e também como combustível para funcionamento de motores de combustão interna, chocadeira, secadores de grãos e ainda como produtor de biofertilizantes.

Por outro lado, o aumento de produção de energia via biogás exigirá investimentos em pesquisas nesta área devido a complexidade da biodigestão. Atualmente, existem muitas pesquisas voltadas para a otimização da produção de biogás e de processos que descrevem a biodigestão. Algumas destas pesquisas estão descritas seguir.

O estudo realizado por Qdais *et al.* (2010) utiliza redes neurais artificiais (RNAs) e algoritmos genéticos (AG) como ferramentas para simular e otimizar o processo de produção de biogás, considerando os parâmetros operacionais do biodigestor, como temperatura (T), sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT) e pH no rendimento do biogás. Um modelo de RNA foi utilizado para simular a operação

do biodigestor e para prever a produção de metano, implementando o algoritmo genético para otimizar a produção de metano.

O trabalho elaborado por Costa (2016) estuda os algoritmos genéticos com aplicação na modelagem da digestão anaeróbia em biodigestores do tipo batelada, semi-batelada e contínuo, visando estimar o valor dos parâmetros que constam num modelo dinâmico de digestão anaeróbia para o ajustar a uma situação simulada em que apenas se conhece uma variável de saída, o biogás produzido. Resolve-se o problema de otimização com recurso aos algoritmos genéticos.

Kana *et al.* (2012) abordaram a modelagem e otimização da produção de biogás em substratos mistos de poeira de serra, esterco de vaca, caule de banana, farelo de arroz e resíduos de papel usando algoritmo genético acoplados com redes neurais artificiais.

Estevam *et al.* (2015) desenvolveram um modelo matemático que avalia a possibilidade de instalação de um sistema para geração de energia elétrica a partir do biogás, visando o aproveitamento dos dejetos bovinos provenientes do confinamento de 170 vacas leiteiras.

Meier (2016) propôs um modelo para a otimização da produção de biogás utilizando como substrato misturas de glicerol bruto, vinhaça e água de suinocultura, visando avaliar o efeito destes substratos na eficiência de tratamento dos mesmos, como no volume e composição do biogás produzido, determinando a mistura ótima destes substratos e também o estudo da cinética de produção de biogás, utilizando reatores de bancada com operação em batelada.

2.1.1 Biodigestão

A biodigestão em reatores, acontece em tanques fechados sem o contato com o ar, onde a matéria orgânica contida é metabolizada por bactérias anaeróbicas. A decomposição da matéria orgânica é um processo realizado por bactérias que em condições ideais de temperatura, acidez e homogeneidade a transformam em gases e biofertilizantes.

Para ocorrer a biodigestão anaeróbia é necessário que condições ambientais sejam garantidas, sendo que o sucesso do processo depende de uma análise dos nutrientes requeridos pela população microbiana. A temperatura também é um fator de grande influência ao processo. Segundo Chernicharo (1997), a biodigestão ocorre em uma faixa de temperatura bastante ampla variando de 0 a 97 °C. É importante, que os níveis de temperatura sejam definidos analisando o volume de gás a produzir e o tempo em que o biodigestor permanece fechado para que ocorra o processo de conversão da matéria orgânica em biogás, chamado tempo de retenção hidráulica (TRH) ou tempo de detenção hidráulica (TDH).

Segundo Pereira (2009) outro fator que influencia a digestão anaeróbica é o pH. Em meio ácido a atividade enzimática das bactérias é anulada. Em meio alcalino a fermentação produz anidrido sulfuroso (SO_2) e hidrogênio (H). A digestão pode ser efetuada com o pH entre 6,6 e 7,6 e encontra-se ótima em pH= 7, para valores abaixo de 6,5 a acidez aumenta e a fermentação para.

Em relação a matéria a se fermentar deve-se levar em consideração a proporção carbono/hidrogênio (C/N), que deve ter um valor entre 30 e 35. Acima desse valor, o processo é pouco eficaz uma vez que as bactérias não têm a capacidade de utilizar todo o carbono acessível. Para um valor abaixo ocorre o perigo de aumentar a quantidade de amoníaco (NH_3), que pode atingir os limites de toxicidade (Pereira, 2009). As bactérias apresentam baixa resistência a matérias tóxicas, assim, deve também ser evitada a presença de detergentes e outros produtos químicos na matéria orgânica, pois, uma pequena concentração destes pode provocar intoxicação e morte das bactérias (Pereira, 2009).

Quando se trata de produção de biogás a matéria orgânica também chamada de biomassa ou substrato, tem um maior espaço se, em sua composição possuir grande quantidade de água. Os tipo de matéria orgânica mais utilizados em um país depende da política existente. No Brasil, que é um país com uma gigantesca produção agropecuária, biodigestores que utilizam resíduos sólidos orgânicos de diferentes setores como substrato tem um maior potencial (Machado, 2013).

Segundo Ferraz & Marriel (1980) dentre os materiais que podem ser utilizados para produção de biogás estão:

- Esterco: de gado, suínos, aves, etc.
- Resíduo orgânico: residencial, de matadouros, de restaurantes, de frigoríficos, de usinas de açúcar e álcool, palha, grama, etc.
- Efluentes: esgoto de residências, de fábricas de laticínios, de frigoríficos, vinhotos, etc.

Quando o biodigestor não for utilizar dejetos de animais para a produção de biogás, deve-se ao menos utilizá-los na fase inicial para garantir a presença de bactérias metanogênicas, sem as quais não se produz o biogás (Ferraz & Marriel, 1980). De acordo com Nogueira (1986), a conversão do material orgânico em biogás ocorre em etapas sequenciais, as quais podem ser divididas nos estágios descritos a seguir.

No primeiro estágio da digestão chamado de hidrólise e acidogênese, compostos complexos são degradados por bactérias acidogênicas liberando os ácidos graxos voláteis. Segundo Netto (2004), neste estágio ocorre a ação de bactérias denominadas hidrolíticas que transformam proteínas em peptídeos e aminoácidos, polissacarídeos em monossacarídeos e gorduras em ácidos graxos pela ação de enzimas. No processo de hidrólise, os compostos originados são absorvidos nas células das bactérias fermentativas e após o processo de acidogênese são excretadas como substâncias orgânicas simples e compostos minerais.

No segundo estágio chamado de acetogênese, os ácidos graxos voláteis são convertidos para metano e dióxido de carbono por bactérias acetogênicas e metanogênicas. A acetogênese é o estágio em que ocorre a transformação dos produtos da acidogênese em compostos que formam os substratos para a produção do gás metano do acetato, hidrogênio e dióxido de carbono. Depois, ocorre o processo de estabilidade pelo controle da fase de acidificação para impedir o aumento de material tóxico.

No terceiro e último estágio chamado de metanogênese o biogás contendo metano e CO_2 é produzido ao longo de dois caminhos diferentes: ácido acético e dióxido de carbono e H_2 , que são substratos utilizados pelas bactérias metanogênicas, (Solera *et al.*, 2001). A Figura 4 a seguir ilustra o processo de biodigestão descrito.

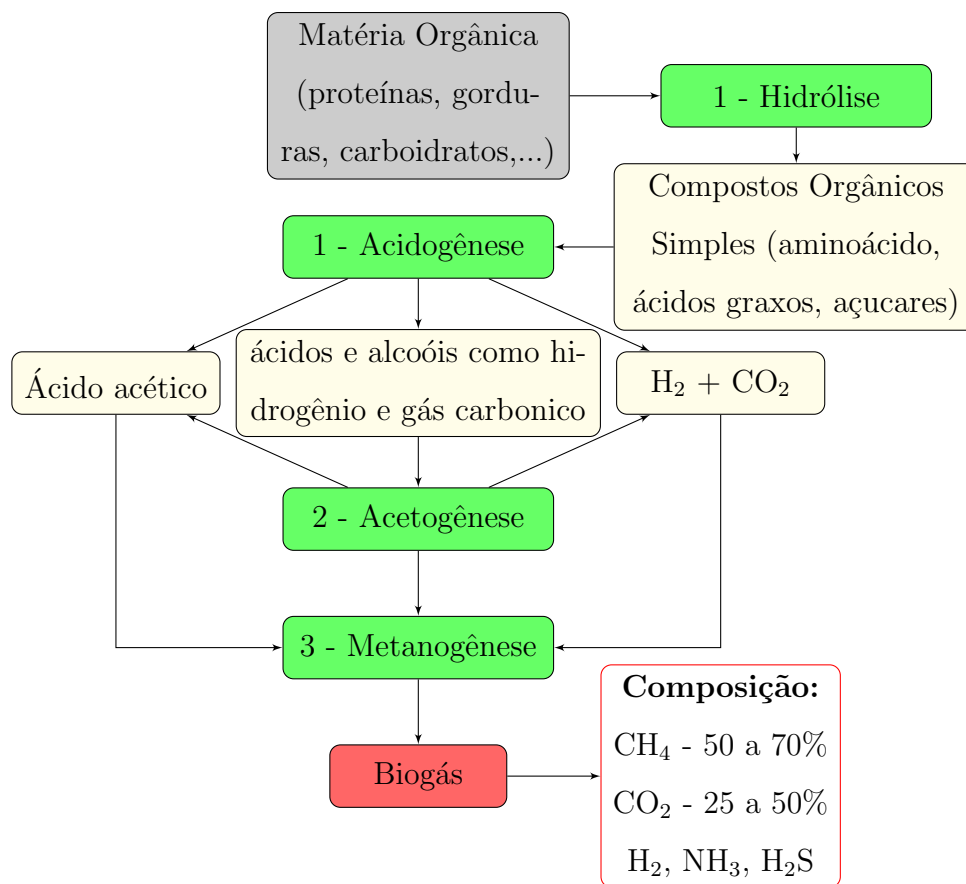


Figura 4: Estágios da digestão anaeróbia. Fonte: Machado (2013).

A decomposição de material orgânico por ação bacteriana na ausência de oxigênio dá origem a um gás chamado de gás sulfídrico ou sulfeto de hidrogênio (H_2S). O gás sulfídrico, é responsável pelo odor desagradável característico do biogás, devido à presença de enxofre em sua composição. Este gás também é responsável pelo poder corrosivo do biogás em peças de composição metálica.

Por outro lado, a eficiência do processo de biodigestão anaeróbia pode ser medida pelas reduções de sólidos totais, sólidos voláteis, fibra, celulose e número de coliformes totais e termotolerantes, além dos potenciais de produção de biogás e metano. É esperado que estas reduções sejam realizadas em um baixo TRH.

A biodigestão pode oferecer uma grande contribuição na redução dos impactos ambientais causados pelo despejo de resíduos em campo aberto. Nos últimos anos perante a gravidade dos problemas ambientais e escassez de combustíveis fósseis, a biodigestão vem sendo motivada por proporcionar benefícios sociais e econômicos. Complementa Barbosa & Langer (2011), que a biodigestão pode gerar tanto benefícios ambientais pela eliminação de resíduos dispostos de modo irregular, diminuindo a contaminação da água, do solo, e do ar, quanto sociais evitando contato humano aos resíduos e à proliferação de pragas e outras doenças relacionadas à falta de saneamento básico, além dos benefícios econômicos que podem ser percebidos por meio da geração de energia e uso de biofertilizantes.

2.1.2 Biofertilizante

Segundo Pereira (2009), o biofertilizante é o afluente sólido resultante da biodigestão anaeróbica da matéria prima ao produzir biogás, contendo muita fibra, podendo ser usado como adubação de fundação e adubação periódica.

A parte aquosa do biofertilizante natural é o biofertilizante líquido que é separado da sua parte sólida por meio de filtração e peneiramento, podendo ser utilizado por meio de aspersão como adubo, que apresenta uma absorção rápida pela plantas, diretamente no solo ou ainda em sistemas de produção de hidropônicos.

O maior benefício obtido por meio do uso de biofertilizante está relacionado ao baixo nível de dano ao meio ambiente, contribuindo com a biota e condições ideais de vida e saúde humana.

2.1.3 Biogás

Biogás é uma mistura gasosa, resultante da fermentação anaeróbica da matéria orgânica, uma mistura de dióxido de carbono e metano produzido naturalmente pela ação das bactérias que são fermentadas de acordo com as restrições necessárias de temperatura, teor de umidade e acidez. É um produto versátil podendo ser transformado em calor, combustível, e produtos químicos. Estima-se que 1,6 trilhões de pés cúbicos de biogás bruto serão produzidos anualmente por biodigestores comerciais e aproveitados de aterros sanitários em todo o mundo até 2022. Isto representará um ganho para as empresas relacionadas a agricultura, de coleta de resíduos, de tratamentos de efluentes, entre outras (Grando *et al.*, 2016).

A quantidade de gás a ser produzida depende de vários parâmetros, entre eles o tipo de biodigestor e o substrato a ser digerido. Entretanto o biogás gerado tende a ser constituído por uma taxa na ordem de 55% a 65% de metano (CH₄), e por aproximadamente 35% a 45% de dióxido de carbono (CO₂) em sua composição (Pereira, 2009). Estas variações dependem das composições das matérias primas em relação ao teor de carboidratos, gorduras e proteínas (Grando *et al.*, 2016). A Tabela 1 apresenta a influência dos principais componentes de matérias orgânicas na composição final do biogás.

Tabela 1: Rendimento do biogás e proporção de metano de acordo com o substrato (Petersson & Wellinge, 2009).

Classe nutricional	Rendimento em Biogás (ℓ/kg de sólidos voláteis)	Proporção de metano %
Gorduras	1000 - 1250	70 - 75
Proteínas	600 - 700	68 - 77
Carboidratos	700 - 800	50 - 55

Existem outros gases e compostos que prejudicam o desempenho do biodigestor, como por exemplo: a água, que pode provocar corrosão em compressores,

tanques de armazenamento devido a reação com H_2S , NH_3 e CO_2 ; há também a presença de poeira que pode causar entupimento devido ao depósito em motores e tanques; o H_2S , que favorece a corrosão em compressores, tanques e motores; o NH_3 , gás corrosivo quando dissolvido em água e o CO_2 , gás que pode afetar o poder calorífico inferior.

2.1.4 Biodigestão no Brasil

O Brasil é um dos maiores criadores de aves, bovinos e suínos no mundo. Porém a maior parte dos dejetos produzidos por esses animais ainda recebe um destino final inadequado gerando sérios problemas ambientais, não sendo aproveitado na produção de bioenergia. Desta forma a biodigestão no Brasil se apresenta atrasada quando comparada com outros países, que possuem menores quantidades desses animais e maior aproveitamento dos resíduos.

De acordo com um estudo desenvolvido por Palhares (2008), o atraso na biodigestão no Brasil se deve principalmente à falta de apoio financeiro, falta de tecnologias mais acessíveis, à falta de mão de obra especializada para orientar o produtor rural.

Mesmo sendo uma tecnologia de baixo custo quando comparada com outras existentes, a biodigestão foi pouco incentivada pelo governo brasileiro, e a falta de tecnologias especializadas, dificultou o processo de utilização da biodigestão. Porém, devido aos altos preços do petróleo e à necessidade de se gerar créditos de carbono comerciáveis em bolsas de valores, a biodigestão vem ganhando importância e sendo apresentada como uma fonte alternativa de energia, que pode trazer benefícios econômicos aos proprietários rurais e contribuir com o meio ambiente (Silva & Pelícia, 2012).

Espera-se que a biodigestão ganhe espaço no cenário energético brasileiro, pois no Brasil as usinas hidrelétricas são responsáveis pela geração de grande parte da energia elétrica consumida, porém, a diversificação da produção energética pode diminuir a dependência da energia proveniente das hidrelétricas uma vez que

as mudanças climáticas vêm acarretando uma escassez hídrica.

3 PRODUÇÃO DE BIOGÁS

A China e a Índia foram os primeiros países a produzirem biogás e utilizá-lo como fonte de energia. A matéria prima era proveniente de restos de comida e dejetos, sendo o biogás produzido utilizado para a iluminação e cozimento. Esses países começaram a aproveitar o processo de digestão anaeróbia para geração de biogás com foco nos lodos de esgoto. Inicialmente, o objetivo era reduzir a quantidade deste lodo, e não utilizar o biogás, porém a crise do petróleo nos anos 70 fez com que aumentasse a necessidade de aproveitamento do biogás (Karlsson et al., 2014).

O interesse pelo biogás no Brasil ganhou força nos anos 90, motivado pela implantação dos biodigestores, onde haveria geração de energia que pudesse dar suporte, caso houvesse novos aumentos no preço do petróleo. Na queima do metano é liberado dióxido de carbono, no entanto a utilização do biogás ainda é benéfica, pois o tratamento dos substratos por meio da biodigestão diminui sua carga orgânica e elimina agentes patogênicos, permitindo a aplicação do resíduo pós-tratamento no solo (Karlsson et al., 2014).

A produção de biogás ocorre durante a biodigestão anaeróbia realizada por um consórcio de microorganismos que precisam de condições para se reproduzirem, como por exemplo: pH dos nutrientes, poucos elementos tóxicos e temperatura adequada.

3.1 Temperatura

A temperatura é considerada um dos fatores físicos mais importantes na digestão anaeróbia, justamente por estar relacionada ao crescimento biológico (Chernicharo, 1997). Esta deve ser controlada durante o processo, visto que, alterações de forma inesperada causam desequilíbrio nos microorganismos presentes, afetando especialmente as bactérias formadoras de metano. Para produção de biogás a faixa de temperatura ideal está entre 30 °C e 35 °C, pois é nessa faixa que reproduzem as bactérias mesofílicas e ocorre nessa faixa de temperatura tem-se a combinação das melhores condições para o desenvolvimento do processo.

A temperatura influencia na velocidade do metabolismo, por exemplo, na faixa de 20 °C e 25 °C a velocidade de utilização do substrato atinge apenas a metade do que é obtido para uma temperatura de 35 °C. A velocidade de digestão é maior sob temperaturas termofílicas (entre 60 °C e 80 °C) quando se comparada às mesofílicas (entre 25 °C e 40 °C), porém os custos para o aquecimento não compensam a utilização de temperaturas tão altas (Pierotti, 2007; Souza, 1984).

O controle de temperatura do processo em batelada requer a manipulação de fontes de aquecimento e resfriamento. As fontes de aquecimento e resfriamento são providas por correntes de vapor e água fria (Mazzucco, 2003).

4 MODELAGEM MATEMÁTICA

A conversão de material orgânico em biogás via biodigestão anaeróbica constitui-se de um processo biológico muito complexo, ocorrendo reações consecutivas, paralelas e independentes, tais como hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Estas etapas são promovidas por diferentes tipos de bactérias, as quais estabelecem um consórcio bacteriano para degradação da biomassa. Apesar desta complexa população apresentar um sinergismo, estas necessitam de diferentes condições ambientais para reproduzirem, como temperatura, pH, tempo de retenção hidráulica, etc. Desta forma, a análise criteriosa do processo de biodigestão visando determinar valores ótimos para os parâmetros, de forma a maximar a produção de biogás, torna-se uma tarefa difícil, necessitando de técnicas matemáticas e computacionais para auxiliar em possíveis estimativas de valores para parâmetros e nas tomadas de decisões.

Neste contexto, este trabalho apresenta uma modelagem matemática buscando a eficiência do processo de biodigestão e otimização de parâmetros, ou seja, visam determinar parâmetros que proporcionem uma máxima produção de biogás em um menor tempo de retenção hidráulica.

Devido a complexidade do processo biológico, utilizar todos os estágios da biodigestão promove modelos matemáticos muitas vezes impossíveis de serem resolvidos. Em vista disso, propõe-se uma modelagem abordando os diversos estágios de metabolismo em duas fases.

Na primeira fase, os compostos complexos (proteínas, gorduras, carboidratos, dentre outros) são processados pelas bactérias hidrolíticas, obtendo compostos orgânicos simples (aminoácidos, ácidos graxos e açúcares), que formam os

substratos a serem digeridos pelas bactérias acidogênicas. Portanto para formulação do modelo na fase 1 serão utilizadas as notações S_1 para a concentração de substrato e X_1 , para a concentração de bactérias.

Na segunda fase, os ácidos, alcoóis, ácido acético obtidos da acidogênese (fase 1), são convertidos pelas bactérias acetogênicas em um substrato rico em H_2 , CO_2 e ácido acético, o qual é processado pelas bactérias metanogênicas, formando o biogás. Portanto para esta fase serão utilizadas as notações, S_2 para a concentração de substrato, e X_2 para a concentração de bactérias.

A Figura 5 ilustra estas duas fases abordadas.

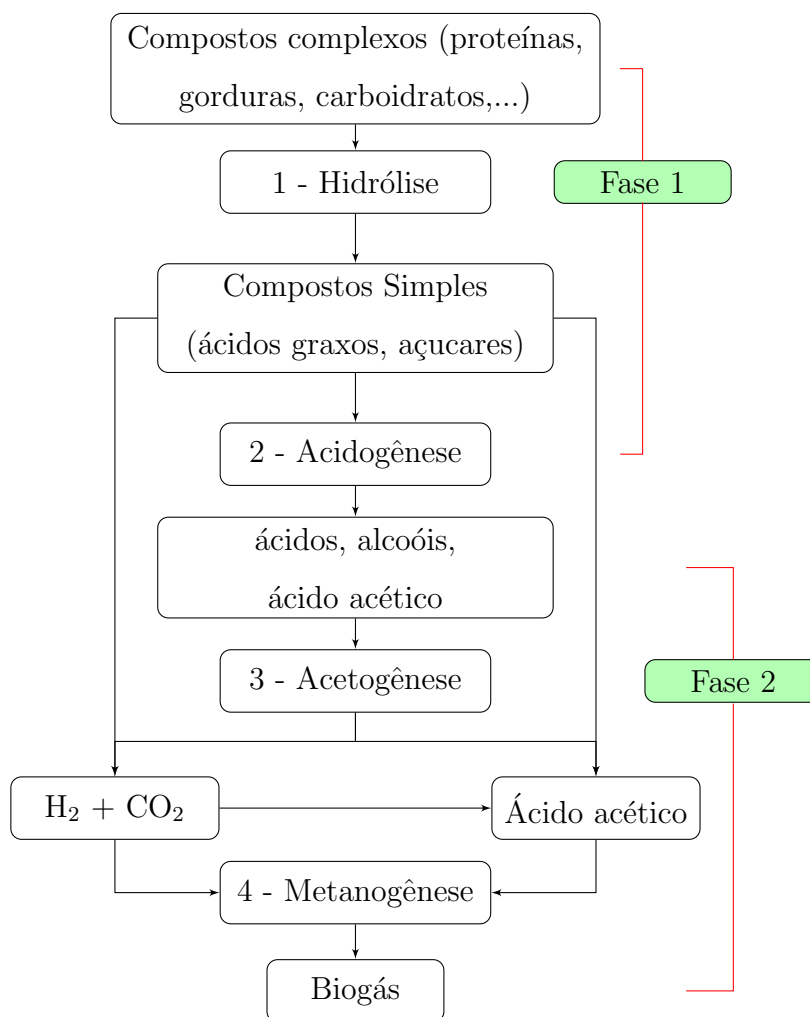


Figura 5: Caracterização das duas fases de fermentação usadas no modelo.

Nos estudos apresentados por Khan *et al.* (2013), a modelagem é também dividida em duas fases, em que, as bactérias que atuam na primeira fase possuem um crescimento específico μ_1 , expresso pela Equação (1).

$$\mu_1 = \frac{\mu_{1max}}{1 + (k_{svb}/S_1) + (S_2/k_{ia})} \quad (1)$$

em que, μ_{1max} é taxa de crescimento máxima das bactérias acidogênicas, k_{svb} é a concentração de substrato para o qual a taxa de crescimento é a metade da taxa de crescimento máxima na primeira fase, chamada de constante de meia velocidade ou constante de saturação e k_{ia} é o coeficiente de inibição das bactérias acidogênicas.

As bactérias que atuam na segunda fase possuem um crescimento específico μ_2 que é expresso pela Equação (2), (Khan et al., 2013).

$$\mu_2 = \frac{\mu_{2max}}{1 + (k_{agv}/S_2) + (S_2/k_{im})} \quad (2)$$

em que, μ_{2max} é a taxa de crescimento máximo das bactérias metanogênicas, k_{agv} é a constante de meia velocidade específica do substrato na segunda fase e k_{im} é o coeficiente de inibição das bactérias metanogênicas.

Por simplicidade de cálculos, Khan *et al.* (2013) consideraram μ_{1max} e μ_{2max} iguais e denotado por μ_{max} , ou seja, $\mu_{1max} = \mu_{2max} = \mu_{max}$. Khan *et al.* (2013) propuseram também um modelo matemático para μ_{max} através de uma aproximação aos dados apresentados por Chen & Hashimoto (1978), tal modelo é expresso pela Equação (3).

$$\mu_{max} = 0.0103T - 0.2077 \quad (3)$$

em que, T é a temperatura.

Desta forma, estes autores consideram que μ_{max} cresce linearmente com a temperatura, conforme ilustrado na Figura 6.

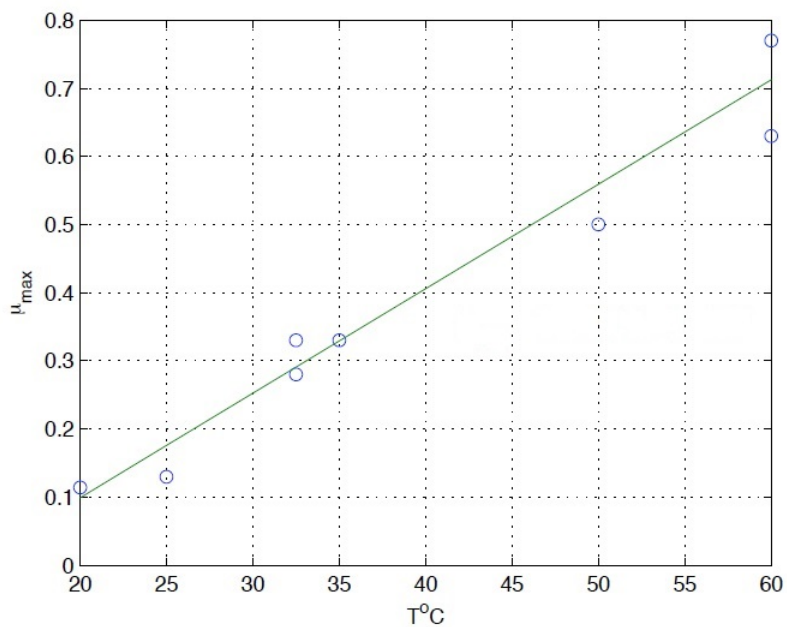


Figura 6: Crescimento microbiano segundo Khan et al. (2013).

Nos experimentos apresentados por Hill (1983) tem-se um crescimento microbiano não linear mostrado na Figura 7.

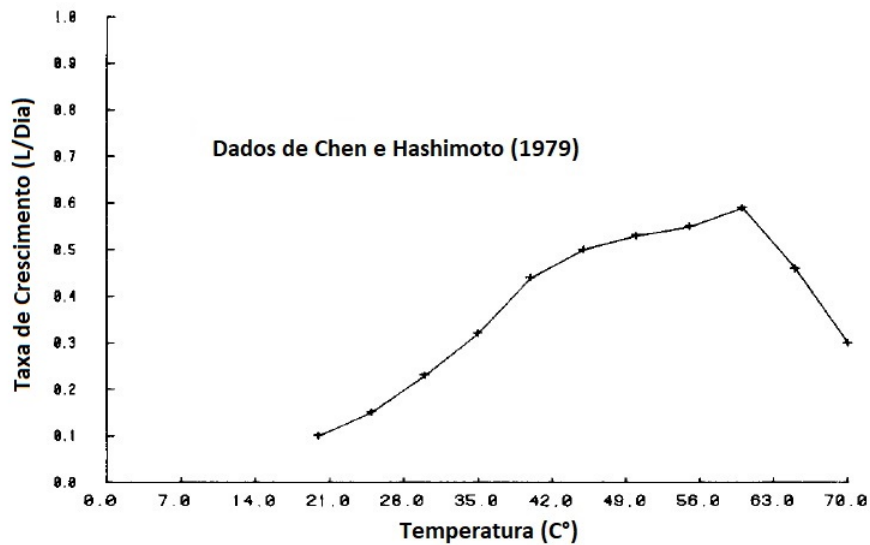


Figura 7: Crescimento microbiano segundo Hill (1983).

Comparando as Figuras 6 e 7 Hill (1983) (Figura 7) descreve o crescimento microbiano de forma mais realística, uma vez que, existem bactérias que não suportam altas temperaturas, como pode ser visto na Figura 7, para temperaturas acima de 60 °C há um decréscimo na taxa de crescimento das bactérias e por conseguinte decresce a produção de biogás (Machado, 2013).

Neste contexto, no capítulo 6 será apresentado um ajuste de curva, aos dados apresentados por Hill (1983), com comportamento não linear em função da temperatura para μ_{max} , em substituição a abordagem não realística apresentada na Equação (3) por Khan et al. (2013).

Com estas considerações, propõe-se um modelo baseado em Khan et al. (2013) para descrever a cinética de fermentação de Monod, considerando as duas fases descritas e as Equações (1) e (2). Khan *et al.* (2013) propuseram um modelo para descrever a biodigestão anaeróbica em um biodigestor semi-batelada e o modelo proposto neste trabalho é uma adaptação do mesmo, porém para um biodigestor do tipo batelada. Tal modelo é composto por um sistema de quatro equações diferenciais de primeira ordem acopladas (4)-(7). As Equações (4) e (6) descrevem a dinâmica das concentrações de substrato (S_1) e de bactérias (X_1) que atuam na primeira fase da digestão, sendo S_{1_0} a quantidade inicial de substrato na primeira fase, k_1 e Y_1 são respectivamente a taxa de mortalidade e o coeficiente de rendimento das bactérias que atuam na primeira fase e θ é o tempo de retenção hidráulica. As Equações (5) e (7) descrevem a dinâmica das concentrações de substrato (S_2) e de bactérias (X_2) presentes na segunda fase da digestão, sendo S_{2_0} a quantidade inicial de substrato na segunda fase, k_2 e Y_2 são respectivamente a taxa de mortalidade e o coeficiente de rendimento das bactérias que atuam na segunda fase. Tais equações foram desenvolvidas por meio de balanço de massa de Monod, para o caso de um biodigestor em batelada.

$$\frac{dS_1}{dt} = \frac{-S_1}{\theta} - \frac{\mu_1 X_1}{Y_1} \quad (4)$$

$$\frac{dS_2}{dt} = \frac{S_1 - S_2}{\theta} - \frac{\mu_2 X_2}{Y_2} + \frac{\mu_1 X_1 (1 - Y_1)}{Y_1} \quad (5)$$

$$\frac{dX_1}{dt} = \left(\mu_1 - k_1 - \frac{1}{\theta} \right) X_1 \quad (6)$$

$$\frac{dX_2}{dt} = \left(\mu_2 - k_2 - \frac{1}{\theta} \right) X_2 \quad (7)$$

dadas as condições iniciais S_{1_0} , S_{2_0} , X_{1_0} e X_{2_0} .

O volume de metano produzido, expresso na Equação (8) é baseado em Hill et al. (1983), depende da quantidade de substrato convertido na segunda fase da digestão, pela ação das bactérias metanogênicas.

$$V = 0.5\mu_2 X_2 \frac{(1 - Y_2)}{Y_2} \quad (8)$$

Este trabalho apresenta dois objetivos integrados. Um objetivo é minimizar o tempo de retenção hidráulica (θ) e o outro é maximizar o volume total de biogás (V_t) produzido. Portanto, propõe-se o seguinte modelo de otimização.

$$Max \left(V_t = \int_0^J 0.5\mu_2 X_2 \frac{(1 - Y_2)}{Y_2} dt \right) \quad (9)$$

$$J = Min (\theta) \quad (10)$$

sujeito a

$$\frac{dS_1}{dt} = \frac{-S_1}{\theta} - \frac{\mu_1 X_1}{Y_1} \quad (11)$$

$$\frac{dS_2}{dt} = \frac{S_1 - S_2}{\theta} - \frac{\mu_2 X_2}{Y_2} + \frac{\mu_1 X_1 (1 - Y_1)}{Y_1} \quad (12)$$

$$\frac{dX_1}{dt} = \left(\mu_1 - k_1 - \frac{1}{\theta} \right) X_1 \quad (13)$$

$$\frac{dX_2}{dt} = \left(\mu_2 - k_2 - \frac{1}{\theta} \right) X_2 \quad (14)$$

$$\mu_1 = \frac{\mu_{max}}{1 + k_{svb}/S_1 + S_2/k_{ia}} \quad (15)$$

$$\mu_2 = \frac{\mu_{max}}{1 + k_{agv}/S_2 + S_2/k_{im}} \quad (16)$$

$$T \geq 0, \theta \geq 0, t \in [0, \theta] \quad (17)$$

em que, θ e T são as variáveis de decisão do problema de otimização e S_1 , S_2 , X_1 e X_2 são as variáveis de estado do sistema (11)-(17), admitindo uma solução inicial $(S_{1_0}, S_{2_0}, X_{1_0}, X_{2_0})$, conforme apresentados na Tabela (2).

Tabela 2: Concentrações iniciais do sistema (11)-(14).

Parâmetros Iniciais	Descrição
S_{1_0} (g/L)	Concentração inicial de sólidos voláteis biodegradáveis
S_{2_0} (g/L)	Concentração inicial de ácidos graxos voláteis
X_{1_0} (g/L)	Concentração inicial de bactérias acidogênicas
X_{2_0} (g/L)	Concentração inicial de bactérias metanogênicas

Os objetivos (9) e (10) estão relacionados, respectivamente com maximização do volume de biogás em todo tempo de retenção hidráulica e minimização do TRH. As restrições (11)-(17) estão relacionadas com o sistema dinâmico da cinética de fermentação, nas variáveis de estado S_1 , S_2 , X_1 e X_2 .

5 MÉTODOS DE RESOLUÇÃO DO MODELO

Para a resolução das restrições (11)-(17) é proposto o método de Runge-Kutta de quarta ordem visando encontrar soluções numéricas para este sistema de equações diferenciais ordinárias. Posteriormente para a resolução do modelo proposto (9)-(17) propõe-se a utilização de métodos que relacionam procedimentos de busca local e conceitos de vizinhança com estratégias de mais alto nível, de modo a criar um processo capaz de escapar de mínimos locais e realizar uma busca robusta no espaço de soluções do problema. Estes métodos são chamados de metaheurísticas (Glover & Kochenberger, 2003). As metaheurísticas utilizadas neste trabalho foram: algoritmo genético (AG) e algoritmo memético (AM) que tem por finalidade encontrar soluções para o problema (9)-(17). A seguir são descritos estes métodos de solução.

5.1 Algoritmo Genético (AG)

Um algoritmo genético (AG) é uma técnica de busca para determinar soluções aproximadas para problemas de otimização, fundamentado principalmente por John Henry Holland (Holland, 1975). Diferentemente de outros algoritmos que precederam essa metaheurística, os AGs incorporam a noção de recombinação fazendo uma analogia biológica evolutiva (Reeves, 2003), como hereditariedade, mutação, seleção natural e recombinação. Nesta analogia a população utilizada é composta por um conjunto de soluções factíveis para o problema abordado. Os indivíduos (soluções) desta população, também denominados cromossomos, passam por processos de seleção, recombinação e mutação, gerando novos indivíduos para

possivelmente fazerem parte de uma nova população, de acordo com sua capacidade de adaptação. Desta forma, a cada nova geração os indivíduos tornam-se melhores, de acordo com sua aptidão.

Desta forma o algoritmo genético (AG) consiste em uma técnica em que uma população de soluções é criada para o problema, para depois submetê-la ao processo de evolução, constituído pelas etapas: **avaliação; seleção; cruzamento; mutação; atualização e finalização** (Lucas, 2002).

5.2 Operadores Genéticos

Inicialização

Inicialmente é gerada uma população inicial com n indivíduos (soluções do problema). Os indivíduos podem ser gerados de forma aleatória ou construtiva. O tamanho da população pode afetar o desempenho e a eficiência dos algoritmos genéticos, uma vez que, populações muito pequenas tem chance de perder a diversidade e convergir para uma solução ótima local, por outro lado uma população muito grande pode afetar a eficiência computacional do algoritmo.

Avaliação

O operador de avaliação determina o seu grau de adaptação, de cada indivíduo através de uma função fitness. É através desta função que se mede o quão um indivíduo está adaptado em relação a função objetivo.

Seleção

A seleção é responsável pela preservação de boas características na espécie. No estágio de seleção os indivíduos são escolhidos para posteriormente serem cruzados, fazendo uso do grau de aptidão de cada um é efetuado um sorteio em que os mais aptos possuem maior probabilidade de serem selecionados.

Dada uma população em que cada indivíduo recebeu um valor de ap-

tidão, existem vários métodos para selecionar os indivíduos que serão aplicados os próximos operadores. Alguns destes métodos de seleção estão descritos a seguir:

Na seleção por ranking os indivíduos são ordenados de acordo com seu valor de aptidão e então é atribuído uma probabilidade de escolha para cada um de acordo com sua posição (Lucas, 2002).

Na seleção por giro de roleta cada indivíduo é representado em uma roleta (sorteio) de acordo com seu índice de aptidão, ou seja, indivíduos com maior aptidão recebem uma porção maior da roleta, da mesma forma os indivíduos com menor aptidão recebem uma porção menor, em seguida é lançada uma bola na roleta e o indivíduo em que a bola parar é selecionado. Os indivíduos com maior nível de aptidão tem maior chance de serem escolhidos na roleta.

Na seleção por torneio são escolhidos grupos de soluções e as mais adaptadas dentre as escolhidas são selecionadas.

Cruzamento

Os indivíduos selecionados anteriormente são cruzados da seguinte forma: a lista de indivíduos selecionados é embaralhada aleatoriamente criando-se uma segunda lista. Cada indivíduo selecionado é então cruzado com o indivíduo que ocupa a mesma posição na lista embaralhada. Os cromossomos de cada par de indivíduos a serem cruzados são particionados em um ponto, chamado ponto de corte, sorteado aleatoriamente. Um novo cromossomo é gerado permutando-se a metade inicial de um cromossomo com a metade final do outro.

Mutação

Esta operação modifica aleatoriamente alguma característica do indivíduo sobre o qual é aplicada. Esta modificação é importante, pois cria novos valores de características que não existiam ou apareciam em pequena quantidade na população em análise. A importância deste operador reside no fato de que uma vez bem escolhido seu modo de atuar garante que diversas alternativas serão exploradas,

mantendo assim um nível mínimo de abrangência na busca de solução. Por outro lado, este operador deve ser aplicado utilizando uma baixa probabilidade, para não modificar as características dos bons indivíduos (Lucas, 2002).

Atualização

Neste passo, os indivíduos resultantes do processo de cruzamento e mutação são inseridos na população formando uma população aumentada. Como a população deve se manter com um tamanho fixo, escolhe-se os n indivíduos com melhor aptidão para formar a nova população, iniciando assim uma nova geração.

Finalização

Este passo não envolve nenhum operador, apenas é composto de um teste que finaliza o processo de evolução caso o algoritmo genético tenha alcançado algum critério de parada previamente estabelecido. Os critérios de parada podem ser de diversas formas, desde atingir um número pré fixado de iterações até o grau de convergência da atual população (Lucas, 2002). Caso o critério de parada não seja satisfeito, aplica-se todos os operadores discutidos até gerar uma nova população para geração seguinte.

5.3 Estrutura do Algoritmo Genético utilizado na resolução do Modelo Matemático (9)-(17)

Nesta seção será apresentado o Algoritmo Genético implementado neste trabalho, baseado nas discussões do item 5.1, para a resolução do modelo descrito pelas Equações (9)-(17). Um esquema resumido do AG proposto está apresentado na Figura 8 e uma descrição completa deste é apresentado posteriormente.

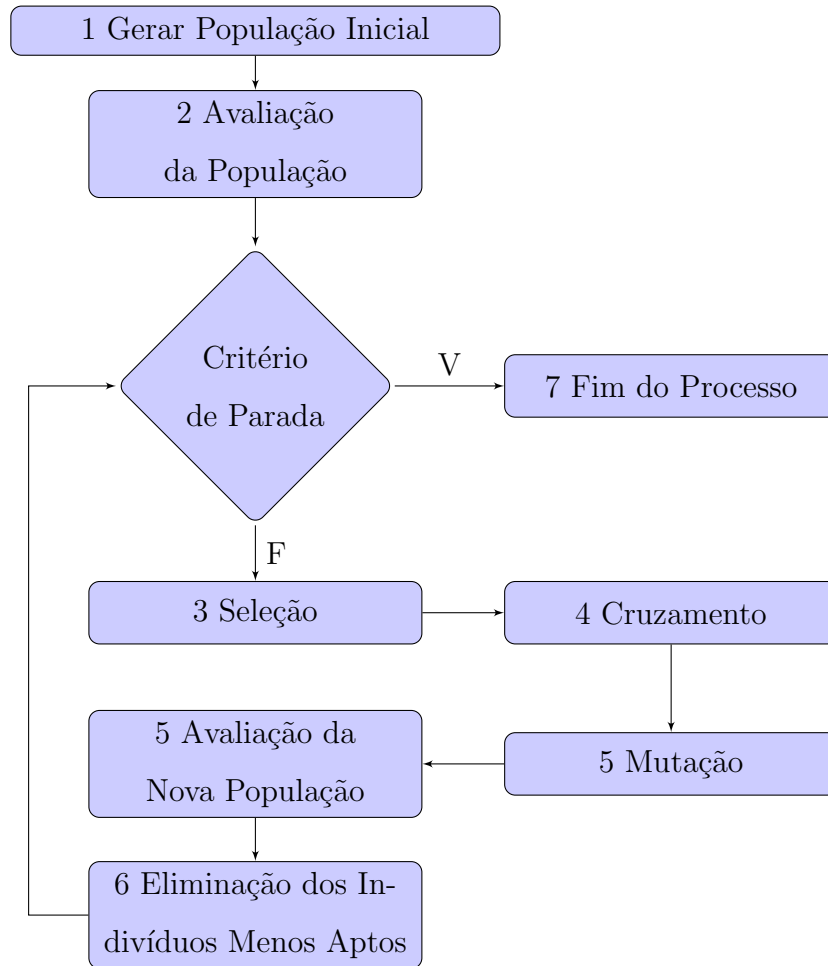


Figura 8: Estrutura do algoritmo genético utilizado no modelo matemático.

5.3.1 Definindo os Indivíduos

Sejam $0 \leq T \leq T_{max}$ e $0 \leq \theta \leq \theta_{max}$, em que T_{max} e θ_{max} são limitantes superiores admitidos para a temperatura T e TRH (θ) respectivamente. Seja $Z = (X'_1, S'_1, X'_2, S'_2)$ uma solução do sistema (4)-(7) obtida quando o sistema é resolvido fazendo $T = T'$ e $\theta = \theta'$.

Define-se os indivíduos, para o AG proposto, da seguinte forma $Ind_i = (\theta'_i, T'_i)$ tal que (θ'_i, T'_i, Z'_i) é uma solução factível para o problema (9)-(17), $i = 1, \dots, n$, em que n é o número total de indivíduos. Uma população P com n indivíduos é dada pelo conjunto $P = \{Ind_i, i = 1, \dots, n\}$.

5.3.2 Passos do AG

- 1 Gerar População Inicial

A população inicial P_0 é construída gerando aleatoriamente n indivíduos.

$$Ind_i = (\theta'_i, T'_i), i = 1, \dots, n$$

– População $P \leftarrow P_0$

- 2 Avaliação da População

Cada indivíduo é avaliado a partir da função *fitness*

$$f_i = \frac{V_{t_i}}{\theta_i} \quad i = 1, \dots, n \quad (18)$$

em que, f_i é o *fitness* de cada indivíduo i , V_{t_i} é definida em (9) e θ_i é o valor do TRH para o indivíduo i .

– $Ind^* \leftarrow$ melhor indivíduo da população P

- 3 Seleção

A seleção é realizada pelo método giro de roleta, que se mostrou mais eficiente, utilizando 80% dos indivíduos da população para formar a população intermediária PI (Observação: Escolhe-se n de tal forma que $0.8n$ seja um número par).

- 4 Cruzamento

Os dois filhos gerados pelo cruzamento destes indivíduos terão as seguintes características $Ind_{filho1} = (\theta_{pai}, T_{mae})$, $Ind_{filho2} = (\theta_{mae}, T_{pai})$. Os dois novos indivíduos são avaliados e inseridos na população P . Este procedimento é repetido até percorrer toda a lista.

- 5 Mutação

Para cada indivíduo da população aumentada ($P \cup \{Ind_{filho k}, k = 1, \dots, 0.8n\}$), gera-se aleatoriamente um número p_a tal que $0 \leq p_a \leq 1$. Se $p_a \leq 0.05$ então o indivíduo sofrerá mutação.

A mutação é feita em apenas um dos genes, θ ou T , do indivíduo. Esta decisão é feita aleatoriamente, assim como o valor do novo gene. Os novos indivíduos obtidos pela mutação são avaliados e inseridos na população aumentada.

$$- \text{População aumentada} = P \cup \{Ind_{filhok}, k = 1, \dots, 0.8n\} \cup \{Ind_{mutados}\}$$

- 6 Nova População

Nesta etapa escolhe-se os n melhores indivíduos da população aumentada para formar a nova população

$$- P \leftarrow \text{nova população}$$

$$- Ind^* \leftarrow \text{melhor indivíduo da população } P$$

- 7 Fim do Processo

O critério de parada adotado é o número máximo de iterações (gerações). Caso o critério de parada não seja satisfeito retorna-se ao item 3. Caso contrário $Ind^* = (T^*, \theta^*)$ gera a solução do sistema (11)-(17): $Z^* = (X_1^*, S_1^*, X_2^*, S_2^*)$ e tem-se assim uma solução para o problema (9)-(17): $T = T^*, \theta = \theta^*, X_1 = X_1^*, S_1 = S_1^*, X_2 = X_2^*, S_2 = S_2^*$ e $J^* = \theta^*, V_t^* = V_t(T^*, J^*, X_2^*)$.

5.4 Algoritmo Memético (AM)

O algoritmo memético (AM) é uma metaheurística baseada em população, a qual foi introduzida por Moscato (1989). Diferentemente dos genes que se propagam ao passarem de indivíduo para indivíduo por meio de espermatozoides ou óvulos, os memes se propagam ao passarem de cérebro em cérebro via processo que genericamente pode ser chamado de imitação (Dawkins, 1976).

Estes algoritmos utilizam o conceito de evolução cultural, em que, não é transmitido através de recombinação, e sim pela comunicação entre indivíduos, desta forma, os memes (unidade replicante de informação cultural) podem ser transmitidos sem que haja uma geração. Neste contexto, a informação memética é transmitida de forma mais rápida que a genética (Buriol, 2000).

Uma heurística auxiliar de busca local é adicionada ao algoritmo genético, transformando-o em um algoritmo memético ou também conhecido como algoritmo genético híbrido. Esta busca local é o que permite a transmissão da informação memética (Moscato, 1989, 1999).

5.4.1 Etapas do AM

De acordo com Mendes (1999) para a execução do AM, as seguintes etapas são necessárias:

Etapa 1: primeiramente são criados n agentes, aleatoriamente ou utilizando algum procedimento de inicialização (heurísticas). A seguir aplica-se uma busca local associada a todos estes agentes, garantindo que a população inicial seja composta por mínimos locais. Por conseguinte faz-se a avaliação de todos os agentes através da função guia.

Etapa 2: nesta etapa, o laço de cooperação é inicializado após definir o número desejado de cooperações, em que é escolhido um conjunto que será composto por dois criadores que farão parte do processo de cooperação. A seguir são gerados dois novos agentes através de uma função competição, que recebe o conjunto de

criadores e retorna o conjunto de novos agentes, os quais serão avaliados e inseridos em uma nova população intermediária separada da principal.

Etapa 3: nesta etapa inicia-se o laço de mutação. Este laço seleciona agentes da população intermediária e aplica uma mutação pré-definida, gerando novos agentes. A seguir a adaptabilidade destes novos agentes é avaliada e estes são reinserido na população intermediária.

Etapa 4: nesta etapa a população principal é atualizada de forma que o número de agentes permaneça o mesmo (n). É efetuada a otimização dos agentes da população intermediária, os quais são avaliados e selecionados os melhores agentes e estes irão substituir os piores. Nesta etapa verifica-se também a existência de uma solução que substitua a melhor solução encontrada até o momento.

5.5 Estrutura do Algoritmo Memético utilizado na resolução do Modelo Matemático (9)-(17)

Nesta seção será apresentado o Algoritmo Memético implementado neste trabalho para a resolução do modelo descrito pelas Equações (9)-(17). Um esquema resumido do AM proposto, baseado nas discussões do item 5.4, está apresentado na Figura 9 e uma descrição completa deste é apresentado posteriormente.

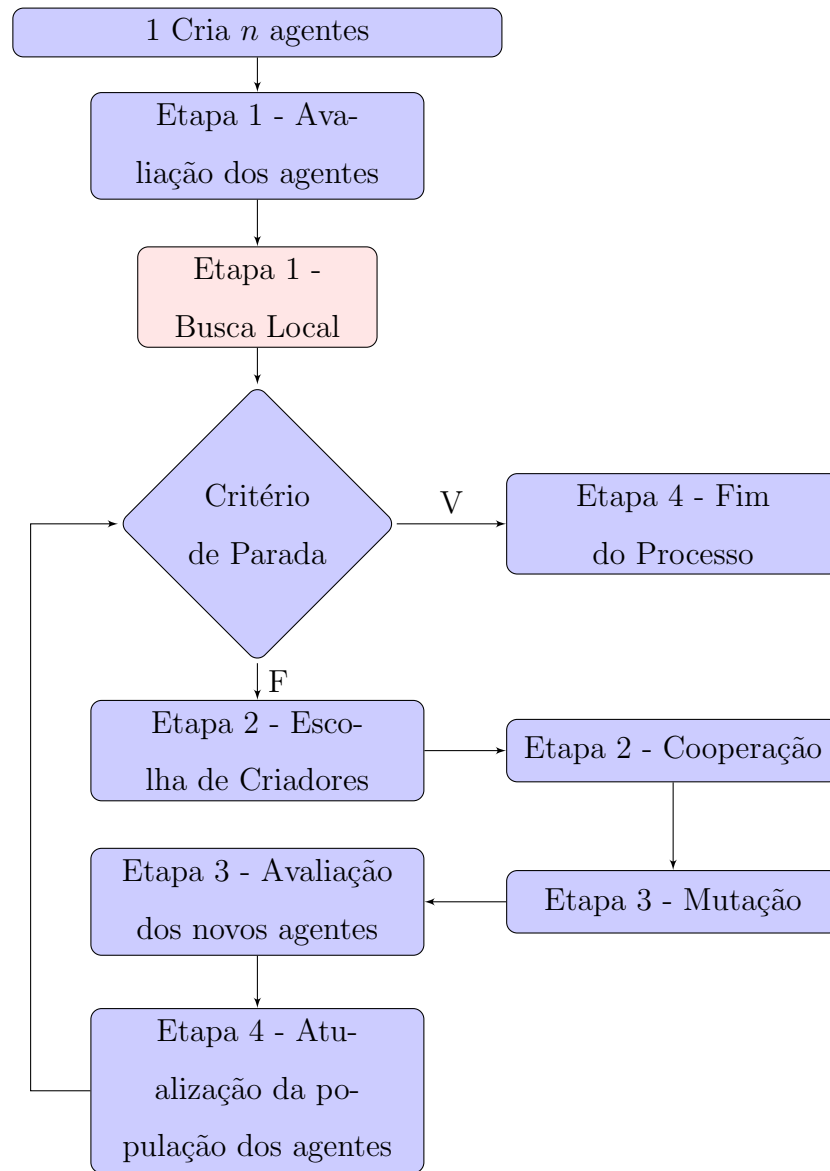


Figura 9: Estrutura do algoritmo memético utilizado na resolução do modelo matemático.

5.5.1 Definindo os Agentes

Sejam $0 \leq T \leq T_{max}$ e $0 \leq \theta \leq \theta_{max}$, em que T_{max} e θ_{max} são limitantes superiores admitidos para a temperatura T e TRH (θ) respectivamente. Seja $Z = (X'_1, S'_1, X'_2, S'_2)$ uma solução do sistema (4)-(7) obtida quando o sistema é resolvido fazendo $T = T'$ e $\theta = \theta'$.

Portanto define-se os agentes, para o AM proposto, da seguinte forma: $ag_i = (\theta'_i, T'_i)$ tal que (θ'_i, T'_i, Z'_i) é uma solução factível para o problema (9)-(17), $i = 1, \dots, n$, em que n é o número total de agentes. Uma população P com n agentes é dada pelo conjunto $P = \{ag_i, i = 1, \dots, n\}$.

5.5.2 Passos do AM

- Etapa 1

A população inicial P_0 é construída gerando aleatoriamente n agentes.

$$ag_i = (\theta'_i, T'_i), i = 1, \dots, n$$

– População $P \leftarrow P_0$

Cada agente $i, i = 1, \dots, n$ é avaliado a partir da função *guia* expressa pela Equação (18) e atualizado

– $ag^* \leftarrow$ melhor agente da população P

Cada agente é perturbado alterando os valores de θ'_i e T'_i de tal forma que os novos valores permaneçam dentro do intervalo admitido para o TRH e temperatura. A seguir é realizada a avaliação destes novos agentes.

– $ag^* \leftarrow$ melhor agente da população P

- Etapa 2

Define-se o número de iterações e inicializa o laço de cooperações realizando a seleção pelo método giro de roleta, utilizando 80% dos agentes da população para formar a população intermediária PI .

Todos os agente da PI são colocados aleatoriamente em uma lista. Retira-se dois a dois ($ag_{criador1} = (\theta_{criador1}, T_{criador1})$ e $ag_{criador2} = (\theta_{criador2}, T_{criador2})$) elementos da lista para realizar a cooperação.

Os dois novos agentes gerados pela cooperação destes criadores terão as seguintes características $novoag_1 = (\theta_{criador1}, T_{criador2})$, $nogoag_2 = (\theta_{criador2}, T_{criador1})$.

Os dois novos agentes são avaliados e inseridos na população P . Este procedimento é repetido até percorrer toda a lista.

- Etapa 3

Para cada agente da população aumentada ($P \cup \{novoag_k, k = 1, \dots, 0.8n\}$), gera-se aleatoriamente um número p_a tal que $0 \leq p_a \leq 1$. Se $p_a \leq 0.05$ então o agente sofrerá mutação.

A mutação é realizada em apenas um dos memes, θ ou T , do agente. Esta decisão é feita aleatoriamente, assim como o valor do novo meme. Os novos agentes obtidos pela mutação são avaliados e inseridos na população aumentada.

- Etapa 4

Nesta etapa escolhe-se os n melhores agentes da população aumentada para formar a nova população

- População aumentada = $P \cup \{novoag_k, k = 1, \dots, 0.8n\} \cup \{ag_{mutados}\}$;
- $P \leftarrow$ nova população;
- $ag^* \leftarrow$ melhor agente da população P .

Caso o critério de parada não seja satisfeito retorna-se a etapa 2 inicializando novamente o laço de cooperações. Caso contrário $ag^* = (T^*, \theta^*)$ gera a solução do sistema (11)-(17): $Z^* = (X_1^*, S_1^*, X_2^*, S_2^*)$ e tem-se assim uma solução para o problema (9)-(17): $T = T^*$, $\theta = \theta^*$, $X_1 = X_1^*$, $S_1 = S_1^*$, $X_2 = X_2^*$, $S_2 = S_2^*$ e $J^* = \theta^*$, $V_t^* = V_t(T^*, J^*, X_2^*)$ é admitida como solução do problema (9)-(17).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo (9)-(17) foi resolvido utilizando as metaheurísticas (AG) e (AM) descritas, as quais foram implementadas com auxílio do software MATLAB R2012a em um computador Core i7 com 8GB de memória do Laboratório Científico de Informática (LCI) do Departamento de Bioestatística. As restrições (11)-(17) foram resolvidas utilizando a rotina ode45 do MATLAB R2012a, que permite resolver numericamente sistemas de equações diferenciais ordinárias usando o método Runge-Kutta de quarta ordem. Ainda, utilizando a ferramenta cftool do MATLAB R2012a, foi realizado um ajuste de curva aos dados apresentados por Hill (1983), propondo assim Equações (19), (20) e (21) para descrição de μ_{max} em função da temperatura. Foram aplicados os ajustes pelas curvas Gaussiana (Equação (19)), Fourier (Equação (20)) e soma de senos (Equação (21)) mostradas a seguir.

Equação de μ_{max} por curva Gaussiana:

$$\mu_{max} = 0.566e^{-((T-52.67)/24.03)^2} \quad (19)$$

Equação de μ_{max} por Fourier:

$$\mu_{max} = 0.3345 + 0.01797 \cos(T0.091) - 0.2317 \sin(T0.091) \quad (20)$$

Equação de μ_{max} por soma de senos:

$$\mu_{max} = 0.5308 \sin((0.04622T) - 0.8416) \quad (21)$$

A Figura 10 apresenta uma comparação das curvas estimadas por Khan *et al.* (2013) (Linear), Curva Gaussiana, Fourier e Soma de senos com os dados apresentados por Hill (1983) para estimativa da taxa de crescimento máximo das bactérias com relação a temperatura.

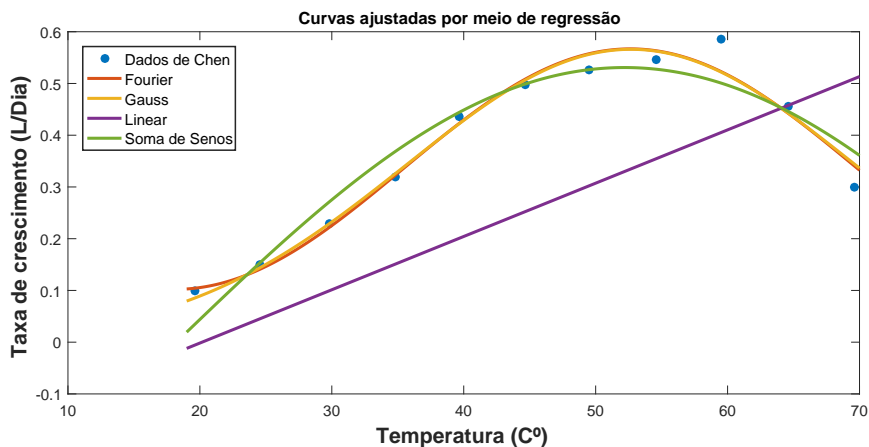


Figura 10: Comparação dos dados reais e das curvas estimadas, Curva Gaussiana, Fourier, Linear (Khan et al. (2013)), e Soma de senos.

Observa-se na Figura 10 que as curvas propostas, Gaussiana e Fourier, ajustam-se melhor aos dados do que a abordagem linear oferecida por Khan *et al.* (2013).

As condições iniciais para as restrições (11)-(17) do modelo e os valores para os parâmetros do modelo (9)-(17) que foram utilizados nas simulações computacionais foram adotados conforme Khan et al. (2013) e estão descritos nas Tabelas 3 e 4:

Condições Iniciais	Valores
S_{1_0}	60 (g/L)
S_{2_0}	29 (g/L)
X_{1_0}	1 (g/L)
X_{2_0}	1 (g/L)

Tabela 3: Condições iniciais (Khan et al., 2013).

Parâmetros	Valores
t	40 (dias)
k_1	$0.1 * \mu_{max}$ (1/dia)
k_2	$0.1 * \mu_{max}$ (1/dia)
k_{svb}	9 (1/dia)
k_{agv}	2 (1/dia)
k_{ia}	12 (1/dia)
k_{im}	6 (1/dia)
Y_1	0.1
Y_2	0.005

Tabela 4: Parâmetros utilizados (Khan et al., 2013).

O AG e o AM foram implementados utilizando cada uma das três Equações de μ_{max} (19),(20) e (21). Os parâmetros considerados nos testes com o AG e o AM estão apresentados na Tabela 5 e os resultados obtidos estão apresentados nas Tabelas 6 e 7.

Parâmetros	Valores
Número de indivíduos	40
Taxa de cruzamento	80%
Taxa de mutação	0,05%

Tabela 5: Parâmetros utilizados nos testes.

μ_{max}	TRH (dias)	Temperatura (°C)	Produção (g/L)	Tempo (segundos)
Gauss	8.48	58.37	20.83	475.97
Fourier	7.97	57.93	19.75	483.68
Soma de senos	8.02	57.24	19.55	500.19
Linear	7.12	86.09	21.67	412.84

Tabela 6: TRH, temperatura e produção otimizada de biogás obtidos pela aplicação do AG.

μ_{max}	TRH (dias)	Temperatura (°C)	Produção (g/L)	Tempo (segundos)
Gauss	5.39	51.86	40.33	746.94
Fourier	3.44	47.32	38.73	816.67
Soma de senos	4.18	59.07	38.92	807.37
Linear	6.10	78.11	40.69	687.94

Tabela 7: TRH, temperatura e produção otimizada de biogás obtidos pela aplicação do AM.

As Tabelas 6 e 7 apresentam tanto para o AG quanto para o AM, uma maior produção de biogás quando utilizado o μ_{max} como uma função linear em

relação a temperatura (abordagem dada por Khan et al. (2013)). Como observado na Figura 10, a descrição linear de μ_{max} não condiz com a realidade, pois a bactérias tendem a diminuir a medida que a temperatura ultrapassa 60 °C (Figura 7). Ainda na Figura 10 é visto que dentre os ajustes de curvas aplicados, o que se mostrou mais próximo aos dados de Hill (1983) foi a curva Gaussiana expressa pela Equação (19). Além disso, nas Tabelas 6 e 7 é constatado que a maior produção de biogás foi alcançada pelo ajuste de curva Gaussiana utilizando o algoritmo memético (AM).

As Figuras 11 a 18 descrevem a dinâmica das variáveis de estado, obtidas quando utilizado os métodos AG e AM. As concentrações de substratos nas duas fases estão apresentadas nas Figuras 11 a 14, sendo as Figuras 11 e 12 para a primeira fase utilizando respectivamente AG e AM e as Figuras 13 e 14 a concentração de substrato na segunda fase utilizando o AG e o AM respectivamente. As concentrações de bactérias que atuam nas duas fases estão apresentadas nas Figuras 15 a 18, sendo as Figuras 15 e 16 para a primeira fase utilizando AG e AM respectivamente. As Figuras 17 e 18 para a segunda fase utilizando AG e AM respectivamente.

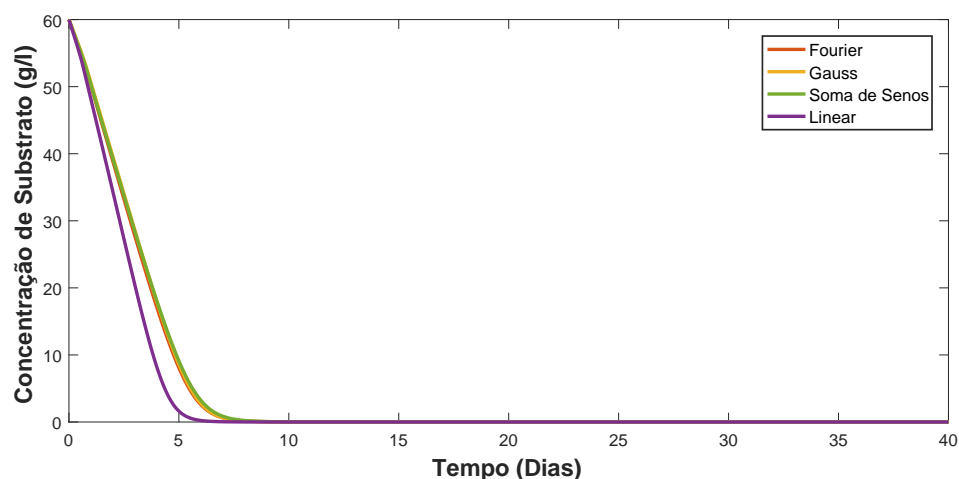


Figura 11: Concentração de substrato na primeira fase (AG).

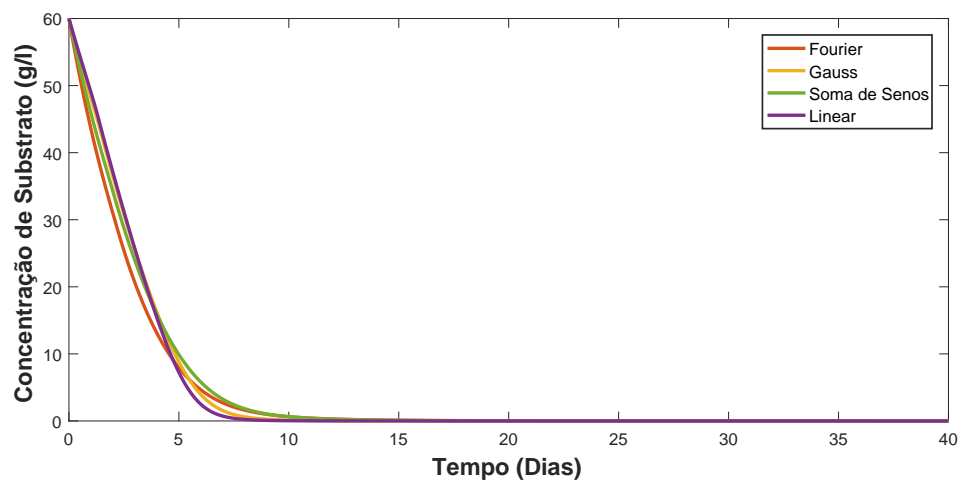


Figura 12: Concentração de substrato na primeira fase (AM).

Nas Figuras 11 e 12 observa-se que o substrato na primeira fase começa a ser consumido nos primeiros 15 dias pelas bactérias acidogênicas, após esse período a quantidade de substrato se estabiliza, uma vez que, as bactérias processaram todo o substrato da primeira fase, obtendo um novo composto orgânico para a atuação das bactérias metanogênicas (segunda fase).

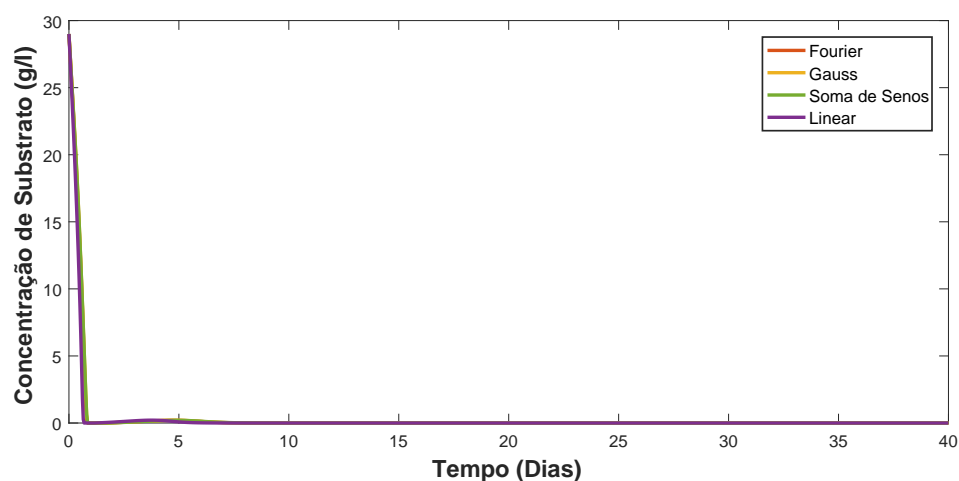


Figura 13: Concentração de substrato na segunda fase (AG).

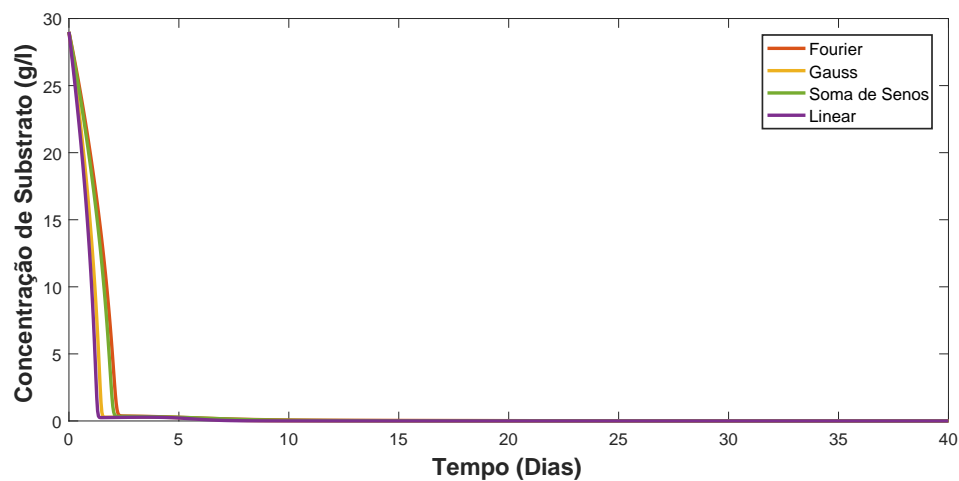


Figura 14: Concentração de substrato na segunda fase (AM).

Nas Figuras 13 e 14, observa-se que o substrato na segunda fase é consumido rapidamente em menos de 3 dias pelas bactérias metanogênicas, tornando-se estável por volta de 15 dias.

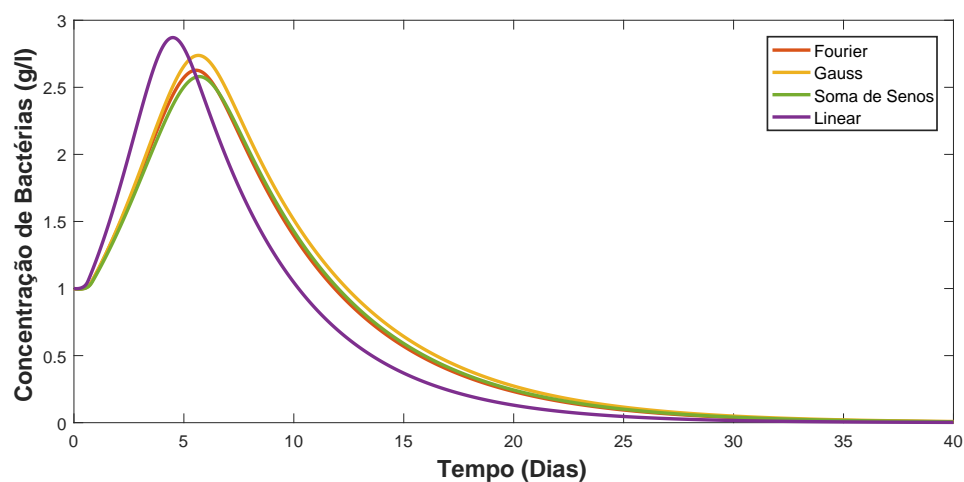


Figura 15: Concentração de bactérias na primeira fase (AG).

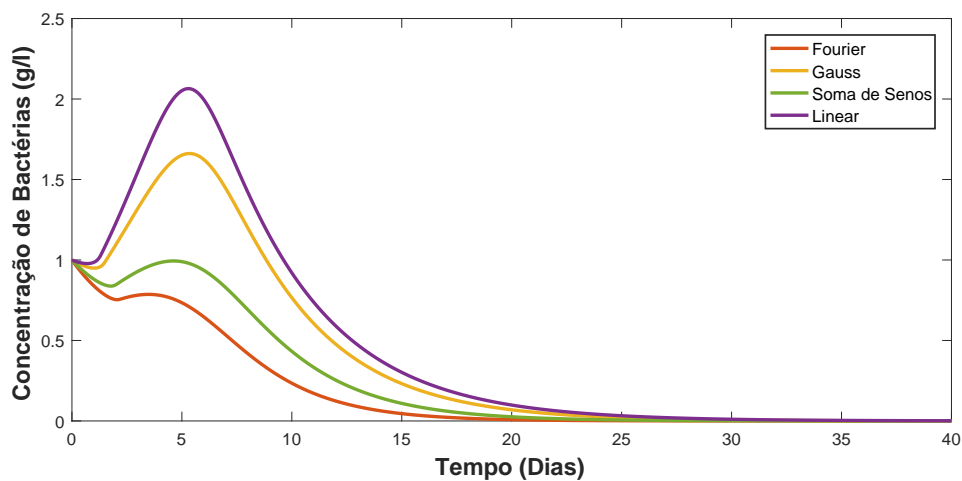


Figura 16: Concentração de bactérias na primeira fase (AM).

Nas Figuras 15 e 16, nota-se um aumento na concentração de bactérias acidogênicas até aproximadamente os 6 primeiros dias. Após processarem todo o substrato há uma tendência de estabilizar esta concentração. Isto ocorre pois as bactérias por falta de alimento morrem ou entram em estado de latência para se preservarem. Seu metabolismo é desacelerado fazendo com que elas permaneçam vivas até encontrar novamente condições para se reproduzir.

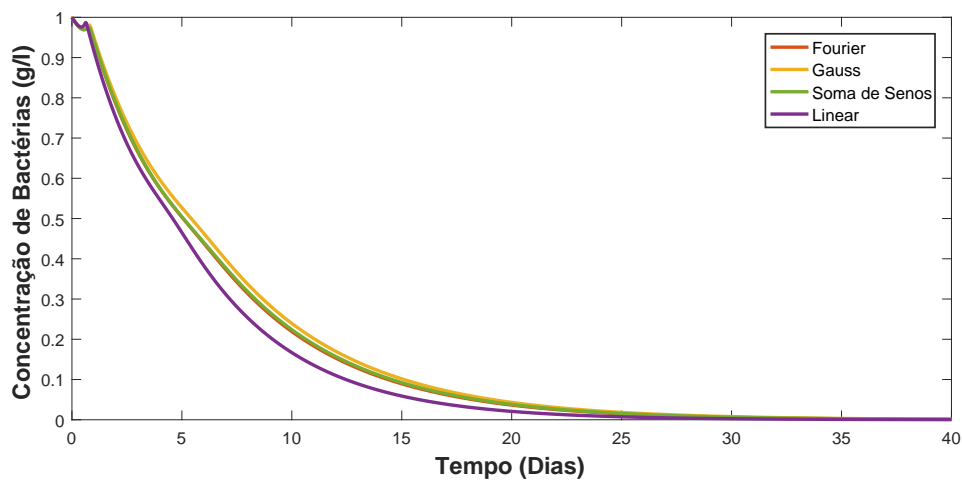


Figura 17: Concentração de bactérias na segunda fase (AG).

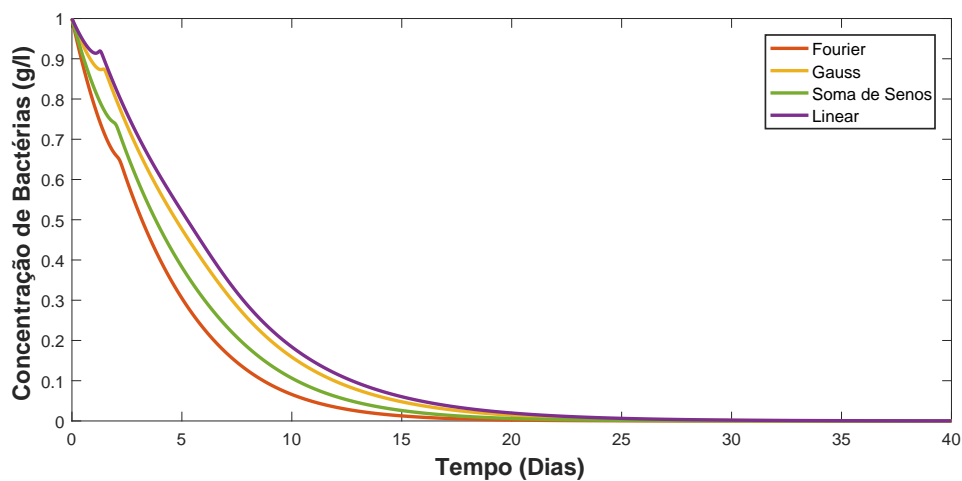


Figura 18: Concentração de bactérias na segunda fase (AM).

Nas Figuras 17 e 18, nota-se que a concentração de bactérias meta-nogênicas sofre um declínio devido a diminuição de substrato. Consta-se que este declínio é devido a diminuição do substrato desta fase e da quantidade de ácido produzido, influenciando condições ideais de vida para estas bactérias.

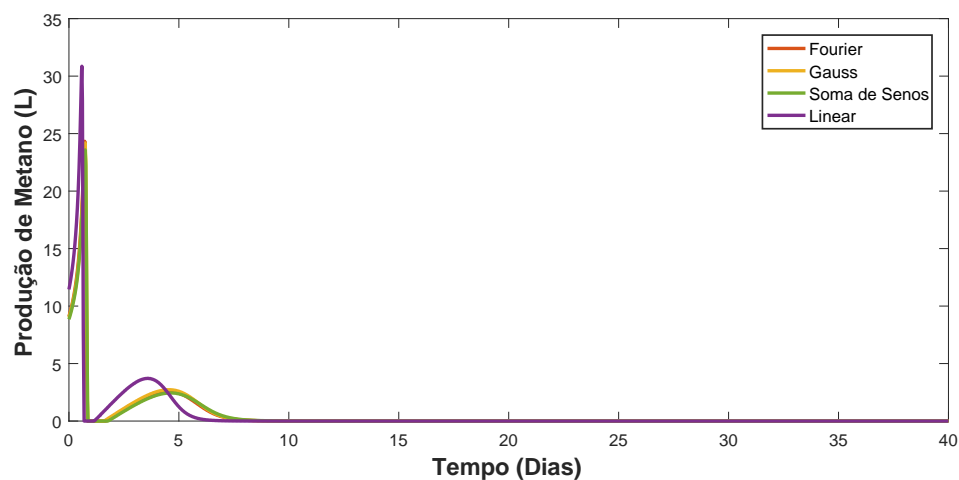


Figura 19: Produção de metano no final do processo de fermentação (AG).

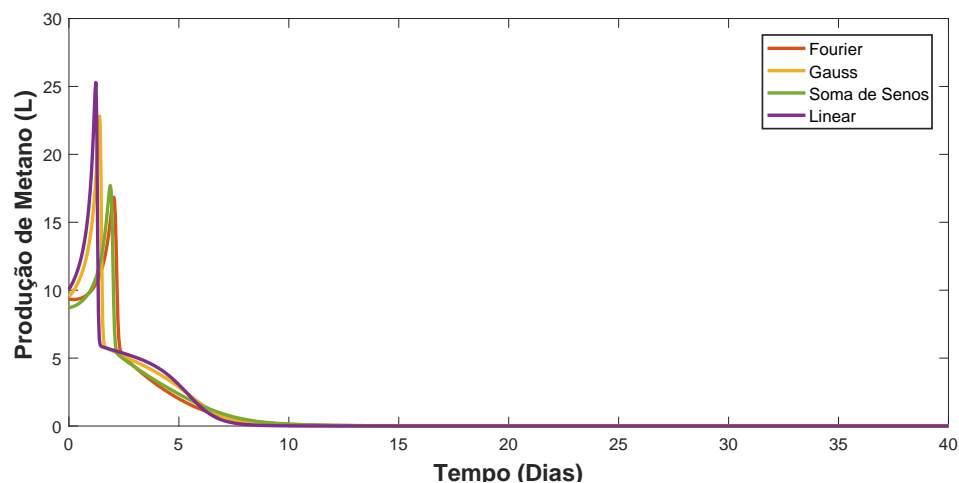


Figura 20: Produção de metano no final do processo de fermentação (AM).

Nas Figuras 19 e 20, constata-se que a produção de metano atinge seu pico nos primeiros dias. Por conseguinte tem-se um decaimento da produção devido a quantidade de substrato que é consumido, uma vez que o biodigestor não é realimentado, se estabilizando aproximadamente em 8 dias para o AG e 10 dias para o AM.

Os resultados mostram que os dois métodos propostos (AG e AM), utilizando os ajustes, curva Gaussiana, Fourier e Soma de senos, para μ_{max} , encontraram soluções otimizadas próximas e ainda o processo de biodigestão descrito nas Figuras 11 a 20 se comporta de forma semelhante para os dois algoritmos.

7 CONCLUSÕES

Na abordagem deste trabalho foi proposto um modelo matemático visando descrever a dinâmica da conversão de matéria orgânica em biogás. Investigou-se também uma metodologia para descrição do crescimento bacteriano em função da temperatura. Este modelo foi utilizado como restrição do problema de otimização visando a determinação da temperatura e do mínimo TRH que maximizem a produção de biogás em biodigestores do tipo batelada. As metaheurísticas AG e AM foram propostas para a resolução deste problema de otimização. Portanto a contribuição deste trabalho baseia-se nestas quatro propostas: um modelo para descrição da dinâmica de conversão de material orgânico em biogás em um biodigestor do tipo batelada, métodos para descrição do crescimento bacteriano em função da temperatura, o problema de otimização da produção de biogás e metaheurísticas para a resolução do problema de otimização.

Conforme as discussões dos resultados pode-se concluir que a metodologia proposta é bastante promissora para a determinação de temperatura e tempo de retenção que otimizem a produção de biogás, ou seja, auxilia em uma operação eficiente de um biodigestor. Assim a metodologia apresentada tem grande potencial para auxílio nas tomadas de decisões de projetistas e operadores de biodigestor.

Como perspectivas futuras serão estudadas novas abordagens como: a proposição de novas metaheurísticas para a resolução do problema de otimização, a realização de uma análise do tipo de matéria orgânica que alimenta o biodigestor visando maximizar a produção de biogás e minimizar o TRH, também determinar a mínima quantidade de gases corrosivos presentes no biogás e estender o problema abordado para uma bateria de biodigestores acoplados do tipo batelada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBOSA, G.; LANGER, M. Uso de biodigestores em propriedades rurais: uma alternativa à sustentabilidade ambiental. **Unoesc e Ciência - ACSA**, v.2, n.1, p.87–96, 2011.

BENINCASA, M.; ORTOLANI, A. F.; JÚNIOR, J. L. Biodigestores convencionais, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 1991.

BORZANI, W.; SCHMIDELL, W.; LIMA, U. A.; AQUARONE, E. **Biotechnology Industrial - vol. 1**. São Paulo: Blucher: Edgard Blucher Ltda, 2001. 254p.

BURIOL, L. S. Algoritmo memético para o problema do caixeiro viajante assimétrico como parte de um framework para algoritmos evolutivos. Campinas, 2000. 136p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - Unicamp.

CALZA, L. F.; LIMA, C. B.; NOGUEIRA, C. E. C.; SIQUEIRA, J. A.; SANTOS, R. F. Avaliação dos Custos de Implementação de Biodigestores e da Energia Produzida pelo Biogás. **Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering**, v.35, n.6, p.990–997, 2015.

CHEN, R. J. Livestock-biogás-fruit systems in South China. **Ecological Engineering**, v.8, p.19–29, 1997.

CHEN, Y. R.; HASHIMOTO, A. G. The Kinetics of Methane Fermentation. **Biotechnology and Bioengineering Symposium**, p.269–282, 1978.

CHERNICHARO, C. A. L. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, 5. In: **Reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG: , 1997. p.246.

COSTA, S. C. Evolutionary algorithms for the modeling of bioreactors, 2016. 110p. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Évora - Escola de Ciência e Tecnologia - Departamento de Física.

DAWKINS, R. **The selfish gene**. Oxford: Claredon Press, 1976.

DEGANUTTI, R. Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada, 2002.

ESTEVAM, C. R. N.; ESTEVAM, G. P.; SANTOS, A. A. Análise e Proposta de um Modelo Matemático para Viabilidade de Instalação de Biodigestores em Propriedades Rurais Destinadas a Ordenha. In: CONGRESSO NACIONAL DE MATEMÁTICA APLICADA COMPUTACIONAL - CNMAC, 1, 2015. ; resumos. Curso de Análise e Desenvolvimento de Sistemas, FATEC - Araçatuba: Proceeding Series of the Brazilian Society of Applied and Computational Mathematics, 2015.

FERRAZ, J. M. G.; MARRIEL, I. E. Biogás: Fonte Alternativa de Energia. Sete Lagoas - MG. **CNPMS - Circular Técnica**, , n.3, p.27, 1980.

GLOVER, F.; KOCHENBERGER, G. A. **Handbook of metaheuristics**. Boston: Kluwer Academic, 2003.

GRANDO, R. L.; ANTUNES, A. M.; FONSECA, F. V. Estudo prospectivo da cadeia produtiva do biogás. **Ciência e Tecnologia: Fatec - JB, Jaboticabal (SP)**, v.8, n.1, p.73–88, 2016.

HILL, D. T. Simplified Monod Kinetics of Methane Fermentation of Animal Wastes. **Agricultural Wastes**, v.5, p.1–16, 1983.

HILL, D. T.; TOLLNER, E. W.; HOLMBERG, R. D. The Kinetics of Inhibition in Methane Fermentation of Swine Manure. **Agricultural Wastes**, v.5, p.105–123, 1983.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems**. Michigan: The University of Michigan Press, 1975.

KANA, E. B. G.; OLOKE, J. K.; LATEEF, A.; ADESIYAN, M. O. Modeling and optimization of biogas production on saw dust and other co-substrates using Artificial Neural network and Genetic Algorithm. **Renewable Energy**, Volume 46, v.46, p.276–281, 2012.

KARLSSON, T.; KONRAD, Q.; LUMI, M.; SCHMEIER, N. P.; MARDER, M.; CASARIL, C. E.; KOCH, F. F.; PEDROSO, A. G. **Manual básico de biogás**. Lajeado: UNIVATES, 2014. 65p.

KHAN, A. A.; STACEY, A. J.; SHEPHERD, J. J. Optimization of methane output for an anaerobic waste digester. **ANZIAM J.**, v.54, p.523–539, 2013.

LUCAS, D. C. **Algoritmos genéticos: uma introdução**. , 2002. 45p.

MACHADO, G. B. Biodigestão Anaeróbia. Portal do Biogás, jul. 2013. Disponível em: <<http://www.portaldobiogas.com/biodigestao-anaerobia/>>. Acesso em: 30 jul. 2017, 2013.

MAZZUCCO, M. M. Um sistema difuso para o controle de temperatura de unidades de processamento em batelada. Florianópolis, 2003. 215p. Tese Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção.

MEIER, T. R. W. Otimização do Processo de Biodigestão Anaeróbica a partir da Mistura de água Residual de Suinocultura, Vinhaça e Glicerol Bruto. Palotina, 2016. 70p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná - UFPR.

MENDES, A. S. Algoritmos meméticos aplicados aos problemas de sequenciamento em máquinas. Campinas, 1999. 90p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - FEEC.

MOSCATO, P. On evolution, search, optimization, genetic algorithms and martial arts: Towards memetic algorithms. **Caltech concurrent computation program, C3P Report**, v.826, p.68, 1989.

MOSCATO, P. Memetic Algorithms: A Short Introduction. In Come, D., Dorigo, M., and Glover, F., editors, *New Ideas in Optimization*, McGrawHill. **London**, p.219–234, 1999.

NETTO, J. C. “Gás Natural Liberalização do Sector na União Europeia e em Portugal. Rio de Janeiro. ERSE - Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos”, 2004.

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

OLIVER, A. P. M. Manual de treinamento em biodigestão, 2008.

PALHARES, J. C. P. **Biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos: aprendendo com o passado para entender o presente e garantir o futuro**. , 2008.

PEREIRA, G. Viabilidade econômica da instalação de um biodigestor em propriedades rurais. Ijuí, 2009. 78p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grando de Sul - UNIJUÍ.

PETERSSON, A.; WELLINGE, A. Biogas Upgrading Technologies: developments and innovations. **União Europeia: Iea Bioenergy**, p.20, 2009.

PIEROTTI, S. M. Avaliação da partido de reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB), em escala real, sob condições hidráulicas desfavoráveis. Florianópolis - SC, 2007. 141p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos - SC.

QDAIS, H. A.; HANI, K. B.; SHATNAWI, N. Modeling and optimization of biogas production from a waste digester using artificial neural network and genetic algorithm. **Resources, Conservation and Recycling**, p.359–363, 2010.

REEVES, C. R. **Genetic algorithms**. Boston: GLOVER, F. e KOCHENBERGER, G.. Handbook of metaheuristics, Kluwer Academic Publishers, 2003. 55-82p.

SILVA, C. E. Utilização do biodigestor: viabilidade técnica e econômica, AEQ- Instituto Aequitas Consultoria Agrotecnológica. X ENEL - Encontro Nordeste do Setor de Leite e Derivados. Disponível em: < [http : //slideplayer.com.br/slide/49617/](http://slideplayer.com.br/slide/49617/) >. Acesso em: 18 dez., 2017.

SILVA, H. W.; PELÍCIA, K. Manejo de dejetos sólidos de poedeiras pelo processo de biodigestão anaeróbica. **Revista Brasileira de agropecuária Sustentável (RBAS)**, v.2, n.1, p.151–155, 2012.

SOLERA, R.; ROMERO, L. I.; SALES, D. The evolution of biomass in a two-phase anaerobic treatment process during start-up. *Chem. Biochem., Eng, Puerto Real*. v.16, p.19–25, 2001.

SOUZA, M. E. Fatores que influenciam a digestão anaeróbia. **Revista DAE**, v.44, p.88–94, 1984.