

**OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS
EM UMA BATERIA DE BIODIGESTORES**

Leandro Willian Marcucci

Tese apresentada à Universidade Estadual
Paulista “Júlio de Mesquita Filho” para a ob-
tenção do título de Doutor em Biometria.

BOTUCATU
São Paulo - Brasil
Novembro – 2021

**OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS
EM UMA BATERIA DE BIODIGESTORES**

Leandro Willian Marcucci

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

Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” para a obtenção do título de Doutor em Biometria.

BOTUCATU
São Paulo - Brasil
Novembro – 2021

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉC. AQUIS. TRATAMENTO DA INFORM.
DIVISÃO TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - CÂMPUS DE BOTUCATU - UNESP
BIBLIOTECÁRIA RESPONSÁVEL: ROSEMEIRE APARECIDA VICENTE-CRB 8/5651

Marcucci, Leandro Willian.

Otimização do planejamento de produção de biogás em uma
bateria de biodigestores / Leandro Willian Marcucci. -
Botucatu, 2021

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho", Instituto de Biociências de
Botucatu

Orientador: Helenice de Oliveira Florentino Silva
Capes: 10104003

1. Digestores de biogás. 2. Modelagem matemática.
3. Otimização matemática. 4. Biocombustíveis.

Palavras-chave: Biodigestores; Modelagem matemática;
Otimização; Produção de biogás.

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 primeiramente aos meus pais Argemiro Marcucci, Marlene Aparecida Pisteker Marcucci, ao meu parceiro Altair Oliveira Silva Junior e demais familiares que sempre me apoiaram e estiveram do meu lado me dando forças nos momentos mais difíceis, me ajudando a 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.

A 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.

Aos meus amigos de graduação, de Pós-Graduação, amigos que me acolheram quando vim para Botucatu em busca de um sonho, em especial aos amigos Larissa Rodrigues, Tayná Pontes, Stephane Kim, Carolinne Souza, Michele Penso, Amanda Gomes, Gabriela Colovatti, Eduardo Ribeiro Pinto e Agda Galetti que sempre me apoiaram e me ajudaram com dúvidas no trabalho e alimentaram minha motivação neste percurso.

Agradeço a CAPES por toda a estrutura e oportunidade de formar novos pesquisadores para nosso país.

Sumário

	Página
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	ix
RESUMO	x
SUMMARY	xii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo	2
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Biodigestão Anaeróbia	3
2.2 Condições Ambientais na Biodigestão	5
2.2.1 Estágios da Biodigestão	5
2.2.2 Temperatura	6
2.2.3 Condições do pH	7
2.2.4 Tempo de Retenção Hidráulica (TRH)	7
2.2.5 Relação carbono nitrogênio (C/N)	8
2.2.6 Concentração de Sólidos Totais	8
2.2.7 Biofertilizante	8
2.2.8 Biogás	9
2.3 Purificação do Biogás	10
2.4 Biodigestores	13

	vi
2.5 Atendimento de Demanda de Biogás	16
3 PROBLEMA ABORDADO	19
3.1 Ilustração de Planejamento de Produção de Biogás para 5 Biodigestores .	20
4 FERRAMENTA MATEMÁTICA PARA O AUXÍLIO NO PLA- NEJAMENTO OTIMIZADO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS	26
4.1 Algoritmo Genético (AG)	26
4.1.1 Algoritmo	27
4.2 Adaptação do AG para o Problema Abordado	33
4.2.1 Inicialização	33
4.2.2 Avaliação	35
4.2.3 Seleção	36
4.2.4 Cruzamento	36
4.2.5 Mutação	36
4.2.6 Nova população	37
4.2.7 Finalização	37
4.2.8 Ilustração dos Processos do AG	37
5 EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS	42
5.1 Instância 1	42
5.2 Instância 2	42
5.3 Resultados e Discussões	43
5.3.1 Instância 1	43
5.3.2 Instância 2	48
5.3.3 Cenário 1	48
5.3.4 Cenário 2	51
6 CONCLUSÕES	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

Lista de Figuras

	Página
1 Estágios da biodigestão anaeróbia (adaptado de Machado (2013)). . . .	6
2 Fontes de produção e aplicação do biogás (adaptado de Veiga & Mercedes (2015)).	12
3 Representação de um biodigestor modelo chinês (Deganutti et al., 2002).	15
4 Representação de um biodigestor modelo indiano (Deganutti et al., 2002).	15
5 Representação de um biodigestor modelo batelada (Deganutti et al., 2002).	16
6 Bateria com n biodigestores do tipo batelada.	19
7 Produção de biogás de um biodigestor durante 255 dias ($r_j = 255$). . . .	20
8 Demanda diária de biogás no período de 555 dias.	21
9 Curva de produção de biogás, $P_j(x)$, de cada biodigestor em cada tempo $x, x \in [0, r_j], j = 1, \dots, 5$	22
10 Planejamento de produção de biogás de uma bateria com 4 biodigestores no horizonte de planejamento de 555 dias.	23
11 Produção total de biogás e sobra diária de biogás obtida a partir do planejamento elaborado par 555 dias de demanda.	24
12 Representação dos indivíduos e seus respectivos valores da função <i>fitness</i> e suas probabilidades de seleção. Adaptado de Goldberg (1989)	30
13 Representação das probabilidades de cada indivíduo na roleta. Adaptado de Goldberg (1989)	30
14 Representação de alguns passos do AG. Adaptado de Russell & Norvig (2003).	32

15	Estrutura de um indivíduo de um AG visando o planejamento de operação de 3 biodigestores em um horizonte de 15 dias.	35
16	Curva de produção diária de biogás dos Biodigestores 1 e 5.	44
17	Curva de produção diária de biogás dos Biodigestores 2 e 4.	44
18	Curva de produção diária de biogás do Biodigestor 3.	45
19	Planejamento otimizado da produção diária de biogás para uma bateria com 4 biodigestores, determinado com o AG proposto.	45
20	Produção de biogás em todos os dias do planejamento da instância 1 com os 4 biodigestores.	46
21	Sobras de biogás do planejamento de biogás da instância 1.	47
22	Curva de produção diária de biogás dos biodigestores.	49
23	Melhor planejamento da produção diária de biogás para uma bateria com 3 biodigestores, determinado com o AG proposto para a instância 2, Cenário 1.	49
24	Produção de biogás em todos os dias do planejamento com 1 biodigestor.	50
25	Sobras de biogás do planejamento de biogás da instância 2 e estrutura do melhor indivíduo determinado pelo AG proposto.	50
26	Melhor planejamento da produção diária de biogás para uma bateria com 3 biodigestores, determinado com o AG proposto para a instância 2, Cenário 2.	52
27	Produção total de biogás em todos os dias do planejamento com os 3 biodigestores	53
28	Sobras de biogás do planejamento de biogás da instância 2 e estrutura do melhor indivíduo determinado pelo AG proposto.	53

Lista de Tabelas

	Página
1 Composição do biogás (adaptado de Rickebosch et al. (2011)).	10
2 Impurezas do biogás e suas consequências (adaptado de Rickebosch et al. (2011)).	11
3 Planejamento de produção de biogás em uma bateria com 4 biodigestores.	25
4 Analogia dos termos da teoria da evolução com os termos do AG.	27
5 Descrição dos parâmetros utilizados para o desenvolvimento do algoritmo.	41
6 Valores dos parâmetros utilizados no algoritmo.	43
7 Planejamento da instância 1 com uma bateria de 4 biodigestores.	47
8 Valores dos parâmetros utilizados no algoritmo.	48
9 Planejamento da instância 2 com 1 biodigestor	51
10 Valores dos parâmetros utilizados no algoritmo.	51
11 Planejamento da instância 2 com uma bateria de 3 biodigestores	54

OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM UMA BATERIA DE BIODIGESTORES

Autor: LEANDRO WILLIAN MARCUCCI

Orientadora: Profa. Dra. HELENICE DE OLIVEIRA FLORENTINO SILVA

RESUMO

A busca por dejetos de animais de corte vem crescendo a cada dia, uma vez que, tais dejetos são, por muitas vezes, descartados em campo aberto, ocasionando diversos problemas ambientais. Uma alternativa que se tem mostrado eficiente é submeter estes dejetos ao processo de biodigestão anaeróbica, que ocorre em biodigestores. Esse processo é realizado por microorganismos que decompõem a matéria orgânica e, conseqüentemente, tem como material remanescente o biofertilizante, que é um adubo natural, e o biogás, que pode ser utilizado para geração de energia elétrica, mecânica, entre outros. Os biodigestores são equipamentos compostos por duas câmaras, uma responsável por armazenar os dejetos e a outra por armazenar o biogás produzido. A produção de biogás também se mostra eficiente para redução de problemas ambientais, uma vez que os dejetos são descontaminados durante o processo de biodigestão. Este trabalho propõe uma metodologia utilizando a

metaheurística algoritmo genético para determinação de um planejamento otimizado de produção de biogás em um conjunto de biodigestores em um determinado período de tempo, suprindo demandas diárias de biogás de modo que as sobras de produção sejam mínimas, evitando o processo de envasamento. Também é proposto encontrar um número mínimo de biodigestores a serem usados no planejamento, visando redução de gastos. A metodologia proposta foi testada e os resultados alcançados mostram que esta tem grande potencial para auxílio no planejamento otimizado da produção de biogás em grandes empresas.

OPTIMIZATION OF BIOGAS PRODUCTION PLANNING IN A BATTERY OF BIODIGESTERS

Author: LEANDRO WILLIAN MARCUCCI

Adviser: Profa. Dra. HELENICE DE OLIVEIRA FLORENTINO SILVA

SUMMARY

The search for animal waste is growing every day, since it is often discarded in the open field, causing many environmental problems. An alternative that has been shown to be very efficient is to submit these wastes to an anaerobic biodigestion process, which occurs in biodigesters. This process is carried out by microorganisms that decompose the organic matter and consequently have biofertilizer, which is a natural fertilizer, and biogas, which can be used to generate electrical and mechanical energy, among others, as the remaining material. Biodigesters are equipment composed of two chambers, one responsible for storing waste and the other for storing the biogas produced. Biogas production is also efficient in reducing environmental problems, since the waste is decontaminated during the biodigestion process. This work aims to propose a methodology using the genetic algorithm metaheuristic to determine an optimized planning of biogas production in a set of biodigesters in

a given period of time, supplying daily biogas demands so that production surpluses are minimal, avoiding the filling process. It is also proposed to find a minimum number of biodigesters to be used in planning, aiming to reduce costs. The proposed methodology was tested and the results achieved show that this has great potential to aid in optimized planning of biogas production.

1 INTRODUÇÃO

A produção excessiva de resíduos e dejetos no setor agropecuário pode ocasionar graves problemas ambientais, uma vez que, estes resíduos muitas vezes são descartados em campo aberto, ocasionando contaminação do solo, ar e água podendo também causar problemas de saúde em residentes locais (Barbosa & Langer, 2011).

Os dejetos podem ser compostos por água, fezes, urina, restos de alimentos, poeira, entre outros. Deste modo, uma alternativa para solucionar estes problemas é a biodigestão anaeróbica, que é um processo de decomposição de matéria orgânica por microorganismos e sem a presença de oxigênio. Segundo Milanez et al. (2018), durante um ano de biodegradação natural de material orgânico submetido a condições anaeróbicas, o processo libera entre 590 a 800 milhões de toneladas de gás metano na atmosfera. Este processo de biodigestão anaeróbica pode ocorrer em biodigestores, evitando que o metano seja lançado na atmosfera e gerando o biogás que é excelente fonte de energia.

O biodigestor é um equipamento composto por duas câmaras, em que, a primeira é utilizada para se colocar a matéria orgânica que será biodigerida por microorganismos, tal matéria orgânica é chamada também de substrato, e a segunda câmara, localizada na parte superior da primeira é chamada de gasômetro, em que se armazena todo o biogás proveniente da decomposição do substrato. Além disso, a biodigestão converte a matéria orgânica em biofertilizante, podendo ser utilizado como adubo orgânico (Deganutti et al., 2002). O biogás por sua vez, é composto em maior parte por metano e gás carbônico, sendo assim uma fonte de energia renovável, podendo ser utilizada em motores, equipamentos elétricos, aquecimentos e muitos outros (Calza et al., 2015).

De acordo com Milanez et al. (2018), há uma tendência de esgotamento de fontes tradicionais de energia a longo prazo, como por exemplo, petróleo e o carvão, mostrando a necessidade de novas fontes de energia.

Neste contexto o biogás torna-se uma fonte alternativa de energia. Por outro lado, a biodigestão é um processo muito complexo e demanda tempo e custo elevado. Este processo é ainda mais complexo quando são utilizados conjuntos de biodigestores para atender demandas a longo prazo. Deste modo, este trabalho propõe uma metodologia visando determinar um planejamento otimizado de produção de biogás em uma bateria de biodigestores.

1.1 Objetivo

O problema abordado neste trabalho consiste em determinar um planejamento otimizado, em um horizonte finito de tempo (dias, meses, anos), para a produção de biogás em uma bateria de biodigestores, satisfazendo demandas diárias de biogás, minimizando as sobras de produção e utilizando o menor número possível de biodigestores, para tal, este modelo abordou o balanceamento de utilização da biomassa e sequenciamento da produção para atendimento da demanda com controle de sobras. Este problema mostrou-se, na prática, de difícil resolução, necessitando do apoio de ferramentas matemáticas e computacionais. Neste sentido, o objetivo deste trabalho é propor uma metodologia baseada em simulações a partir da metaheurística Algoritmo Genético, visando apoiar a resolução do problema em questão.

2 REVISÃO DE LITERATURA

De acordo com Schwantes et al. (2017) um dos maiores passivos ambientais da atualidade é a crescente geração de resíduos sólidos urbanos e a consequente vida útil dos aterros sanitários, que se torna reduzida devido ao montante de resíduos. A produção agrícola também é umas das atividades que mais produzem resíduos, que por sua vez, acabam sendo destinados a aterros sanitários e lixões, entretanto, grande parte destes resíduos podem ser reaproveitados e reciclados, podendo ser submetidos a processos de decomposição, como a biodigestão anaeróbia (Komatsu et al., 2019; Schwantes et al., 2017).

2.1 Biodigestão Anaeróbia

A biodigestão anaeróbia é vista como uma importante forma de tratamento de resíduos/dejetos, reduzindo sua carga de poluentes como: nutrientes, matéria orgânica, patógenos (Halmeman et al., 2014). Segundo Abdul & Lloyd (1985), um fator importante para a redução de microorganismos patogênicos no processo de biodigestão é a concentração de ácidos voláteis. De modo geral toda matéria orgânica (também chamada de biomassa ou substrato), que contenha carboidratos, gorduras, celulose e proteínas como componentes principais, pode ser utilizada para a produção de biogás. As impurezas contidas nestes resíduos, como por exemplo, areia, vidro, plástico, pedra, devem ser retirados para favorecer o processo de biodigestão. Alguns resíduos requerem um pré-tratamento que melhore sua degradação. Estes pré-tratamentos podem ser classificados como físicos, químicos ou biológicos (Cardoso et al., 2018). O uso de inoculantes microbianos no processo de digestão

metanogênica possibilita que o tempo de produção de metano seja reduzido, otimizando o processo e aumentando a produção do mesmo (Varnero et al., 2014). De acordo com Xavier & Lucas Júnior (2010), o processo de inoculação resume-se em utilizar parte do substrato que já passou pelo processo de biodigestão para fornecer novos microorganismos típicos da biodigestão anaeróbica a um novo substrato. Esses microorganismos ficam mantidos em um ambiente controlado que lhes possibilitam adaptar-se ao tipo de substrato utilizado e alcançar um estado de equilíbrio e consequentemente, a operação do biodigestor pode começar (López et al., 2017).

Segundo Zhang et al. (2013) a biodigestão anaeróbia tem sido uma alternativa sustentável para o descarte de dejetos, principalmente de animais, devido ao seu potencial de produção de gás metano. Esta, consiste em um processo natural que ocorre na ausência de oxigênio, no qual micro-organismos anaeróbios degradam a matéria orgânica e consequentemente a convertem em biogás e biofertilizante (Abreu, 2007; Kleinstuber, 2014). Portanto, esta é uma possibilidade de produzir energia renovável e também de reciclar os nutrientes presentes nos resíduos (Zhang et al., 2012).

Andreazzi et al. (2017), avaliaram 99 artigos científicos publicados na SciELO entre o período de 1985 a 2015 e constataram um aumento significativo nas publicações a partir dos anos 2000 que abordavam a gestão de resíduos e questões energéticas com o uso do biogás. Ainda de acordo com Andreazzi et al. (2017), este aumento se refere a preocupação com a gestão energética mundial e a maior conscientização de cuidados com os recursos naturais.

2.2 Condições Ambientais na Biodigestão

Para que ocorra a biodigestão é necessário que algumas condições ambientais, como por exemplo, a temperatura, o pH, tempo de detenção hidráulica, relação carbono nitrogênio (C/N), concentração de sólidos totais, entre outras, sejam adotadas. Esta sessão discute o processo de biodigestão e as condições ambientais apropriadas.

2.2.1 Estágios da Biodigestão

O processo de biodigestão anaeróbia ocorre pela degradação, transformação ou decomposição da matéria orgânica, realizada por micro-organismos (Cremonez et al., 2013). A biogestão ocorre em etapas distintas e sequenciais chamadas de: hidrólise; acidogênese; acetogênese e metanogênese.

A primeira etapa chamada de hidrólise ocorre pela quebra das cadeias carbônicas de proteínas, lipídios e carboidratos para compostos mais simples como aminoácidos, açúcares e ácidos graxos (Cremonez et al., 2013).

Na segunda etapa chamada acidogênese, os produtos remanescentes da hidrólise são convertidos pelas bactérias acidogênicas em ácido acético, dióxido de carbono (CO_2), ácidos graxos, dentre outros (Cremonez et al., 2013).

Na terceira etapa chamada de acetogênese ocorre a transformação dos produtos da acidogênese em compostos que formam os substratos para a produção do gás metano (CH_4), hidrogênio (H_2) e dióxido de carbono (CO_2).

A quarta e última etapa chamada de metanogênese visa a produção de metano por dois grupos de bactérias, em que um deles produz metano pela conversão de ácido acético e outro pela conversão de hidrogênio (H_2) e dióxido de carbono (CO_2) (Cremonez et al., 2013). A Figura 1 ilustra estas etapas abordadas.

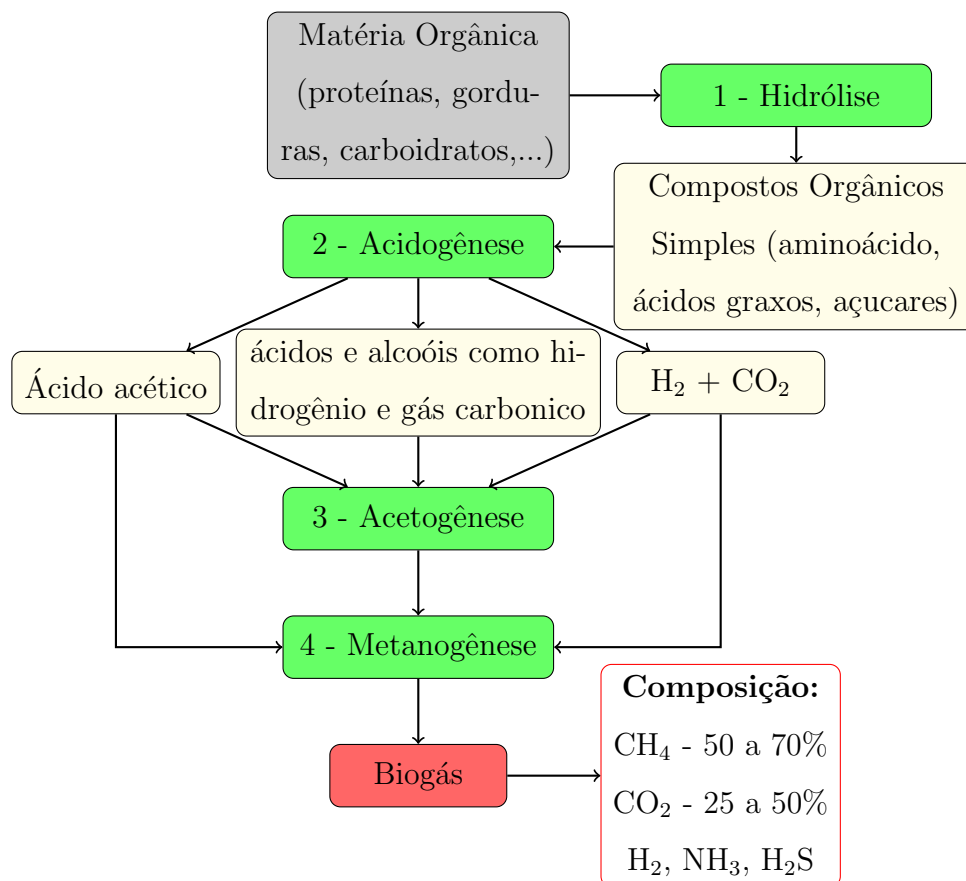


Figura 1: Estágios da biodigestão anaeróbia (adaptado de Machado (2013)).

Em consequência do processo de biodigestão anaeróbia, obtém-se o biofertilizante, material remanescente da digestão de matéria orgânica e o biogás proveniente da decomposição do substrato.

2.2.2 Temperatura

A temperatura é um fator de extrema importância na biodigestão, pois há presença de bactérias aeróbias mesófilas e termófilas. De acordo com Oliveira (2005), as bactérias aeróbias mesófilas são capazes de se desenvolver numa faixa de temperatura entre 20°C e 45°C, de modo que a temperatura ótima de crescimento é de 32°C. As bactérias aeróbias termófilas se desenvolvem numa faixa de temperatura entre 55°C e 65°C, sendo que para algumas espécies esta faixa pode

atingir entre 75°C e 90°C e ainda a temperatura mínima para se desenvolverem é em torno de 35°C. A velocidade da biodigestão anaeróbia é maior em temperaturas mais elevadas (termofílicas) quando comparada a temperaturas mais baixas (mesofílicas), porém os custos relativos ao aquecimento inviabilizam a utilização de temperaturas termofílicas (Araújo, 2017). A biodigestão em temperaturas termofílicas apresenta vantagens em relação às temperaturas mesofílicas, como por exemplo, taxa de reação mais rápidas e maior produtividade de biogás, no entanto em temperaturas termofílicas podem ocorrer acidificação, inibindo a produção de biogás, diminuição da estabilidade, níveis altos de toxicidade e baixa metanogênese, já os sistemas mesofílicos apresentam melhor estabilidade do processo. Neste cenário, as condições ideais para a biodigestão anaeróbica consistem em sistemas termofílicos nas fases de hidrólise/acidogênese e sistemas mesofílicos na fase metanogênica (Mao et al., 2015; Bowen et al., 2014; Lee et al., 2009).

2.2.3 Condições do pH

De acordo com Ibrahim et al. (2017), o pH é outra variável que interfere diretamente na composição e sobrevivência das bactérias metanogênicas em um biodigestor, sendo também fator de sucesso ou fracasso na produção de biogás. Ainda de acordo com Ibrahim et al. (2017), o pH ideal para a formação de metano está na faixa entre 6,0 e 8,0, mas afirmam que valores abaixo de 6,0 e acima de 8,3 devem ser evitados, pois inibem as bactérias que produzem este gás. Segundo Batista (1981), as bactérias que produzem metano sobrevivem numa faixa de pH entre 6,5 e 8,0. A faixa de pH para que se ocorra a fermentação e produção de biogás encontra-se entre 7,0 e 8,0 (Costa, 2008).

2.2.4 Tempo de Retenção Hidráulica (TRH)

O tempo de detenção hidráulica ou também chamado de tempo de retenção hidráulica (TRH) é o tempo em que o substrato permanece no interior do biodigestor até a conversão total e retirada do mesmo. De acordo com Filho (1981),

as diferentes composições dos substratos utilizados na alimentação do biodigestor podem variar o TRH entre 4 a 60 dias. Um baixo TRH, leva ao acúmulo de ácidos graxos voláteis (AGV), já um TRH mais elevado resulta em pouca utilização dos componentes do biodigestor. Entretanto, uma baixa concentração de sólidos voláteis e um TRH mais longo, fornece uma estratégia eficiente para atingir o rendimento máximo da produção de metano (Mao et al., 2015).

2.2.5 Relação carbono nitrogênio (C/N)

A relação carbono nitrogênio (C/N) é a proporção de carbono em cada material em relação ao nitrogênio. Esta relação C/N representa os nutrientes do substrato da biodigestão, deste modo, uma relação C/N demasiadamente alta leva à uma rápida degradação de nitrogênio ocasionando menor produção de biogás. Por outro lado, uma relação C/N demasiadamente baixa, aumentam as chances de inibição de amônia, se tornando tóxico para os microorganismos metanogênicos (Mao et al., 2015). Segundo Arruda et al. (2002) a relação C/N deve ser mantida entre 20 vezes mais carbono do que nitrogênio (20:1) e 30 vezes mais carbono que nitrogênio (30:1).

2.2.6 Concentração de Sólidos Totais

A concentração de sólidos voláteis no biodigestor pode aumentar o rendimento de biogás, entretanto, uma quantidade extremamente alta de sólidos voláteis pode causar alterações no ambiente do biodigestor, inibindo temporariamente a atividade bacteriana durante os estágios iniciais da fermentação. Deste modo, nos estágios de hidrólise e acidogênese haverá uma atividade bacteriana mais alta que no estágio de metanogênese, produzindo então grande quantidade de AGV, que conseqüentemente causará uma acidificação irreversível e, eventualmente, o pH do biodigestor diminuirá e o processo de hidrólise será inibido (Mao et al., 2015).

2.2.7 Biofertilizante

O biofertilizante é um dos produtos resultantes do processo de fermentação realizado no biodigestor, podendo estar na forma líquida ou sólida/pastosa. A aplicação do biofertilizante no solo adquire alguns benefícios como, melhoria das qualidades biológicas, químicas e físicas, proporciona melhor penetração nas raízes das plantas, promove melhor absorção da umidade resistindo a períodos de seca e além de não provocar problemas de degradação do solo, possui baixo custo (Vieira et al., 2016; Barichello, 2010; Barbosa & Langer, 2011).

Segundo Alcócer et al. (2019), o biofertilizante pode ser descartado no solo *in natura* processado, seco ou peletizado, podendo assim utilizar ao máximo os resíduos de animais. Com a propriedade de fertilização, enriquece o desempenho das plantas tornando-as mais saudáveis e produtivas, além de poder ser utilizado em sua forma líquida como um defensivo natural para alguns predadores.

A qualidade do biofertilizante depende da composição bioquímica das matérias orgânicas utilizadas no processo, de modo que se estas possuem elevados níveis de nutrientes, têm-se a produção de fertilizantes orgânicos (Moreno, 2011).

2.2.8 Biogás

Existem várias vantagens na produção de biogás nas fazendas, incluindo economia de lenha ou combustíveis fósseis e reduções nas emissões de odores e gases de efeito estufa (Molano et al., 2018). A importância da produção de biogás se destaca pelo fato de que pode-se produzir calor ou vapor, gerar energia elétrica e combustível de veículos e motores.

A geração de energia térmica (calor) é o uso mais simples do biogás, onde sistemas usando biogás podem proporcionar energia calorífica para cozinhar e aquecer a água em lugares carecidos de combustíveis. Existem sistemas que utilizam o biogás para gerar energia elétrica e calor, alguns produzem como foco principal o calor e depois a eletricidade, em outros acontece o oposto, mas em ambos os casos a eficiência do biogás é enriquecida quando comparada com a geração apenas da

eletricidade ou do calor. Para utilizar como combustível de veículos, o biogás deve ter qualidade semelhante ao gás natural, podendo ser usado também em motores de combustão interna a gasolina e diesel. Além disso, o gás obtido pela fermentação possui uma taxa de octanagem entre 100 e 110, o tornando adequado em motores com alta taxa de compressão, no entanto apresenta baixa velocidade de ignição (Moreno, 2011).

2.3 Purificação do Biogás

O biogás é composto por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2) em maior proporção, não é totalmente puro, uma vez que outros compostos químicos e gases como hidrogênio (H_2), gás de amônia (NH_3), sulfeto de hidrogênio (H_2S), entre outros que podem fazer parte de sua composição (Marcucci, 2018).

As Tabelas 1 e 2 ilustram, respectivamente, a composição padrão do biogás e as principais impurezas e consequências negativas.

Tabela 1: Composição do biogás (adaptado de Rickebosch et al. (2011)).

Componente	Composição (%)
Metano (CH_4)	40 - 75
Dióxido de Carbono (CO_2)	15 - 60
Vapor de Água (H_2O)	15 - 60
Sulfeto de Hidrogênio (H_2S)	0,005 - 2
Siloxano	0 - 0,02
Hidrocarboneto Halogenado	< 0,6
Amônia (NH_3)	< 1
Oxigênio (O_2)	0 - 1
Monóxido de Carbono (CO)	< 0,6
Nitrogênio (N)	0 - 2

Tabela 2: Impurezas do biogás e suas consequências (adaptado de Rickebosch et al. (2011)).

Impurezas	Consequências
Vapor de Água	Corrosão devido a reação com H_2S , NH_3 e CO_2 formando ácidos e pode causar condensação ou congelamento devido a alta pressão
Poeira	Pode causar entupimento em compressores e tanques de armazenamento
Dióxido de Carbono (CO_2)	Baixo valor calorífico
Sulfeto de Hidrogênio (H_2S)	Corrosão, possível formação de SO_2 e SO_3 em concentrações tóxicas causando corrosão em contato com a água
Siloxano	Formação de SiO_2 , e reação abrasiva em válvulas, velas de ignição e cilindro
Hidrocarboneto	Corrosão devido a combustão
Amônia (NH_3)	Corrosão quando diluído na água
Oxigênio (O_2)	Em altas concentrações se torna explosivo

A purificação do biogás aumenta seu poder calorífico e se dá de acordo com sua utilização. O tratamento completo consiste na retirada de grande parte de CO_2 e outros gases residuais do biogás gerando assim o chamado biometano com uma composição de 95% a 97% de metano e pode conter de 1% a 3% de dióxido de carbono (Moreno, 2011; Rickebosch et al., 2011).

A Figura 2 ilustra as fontes de produção e o aproveitamento do biogás sem ou com a purificação, o uso e/ou condicionamento da purificação do biogás.

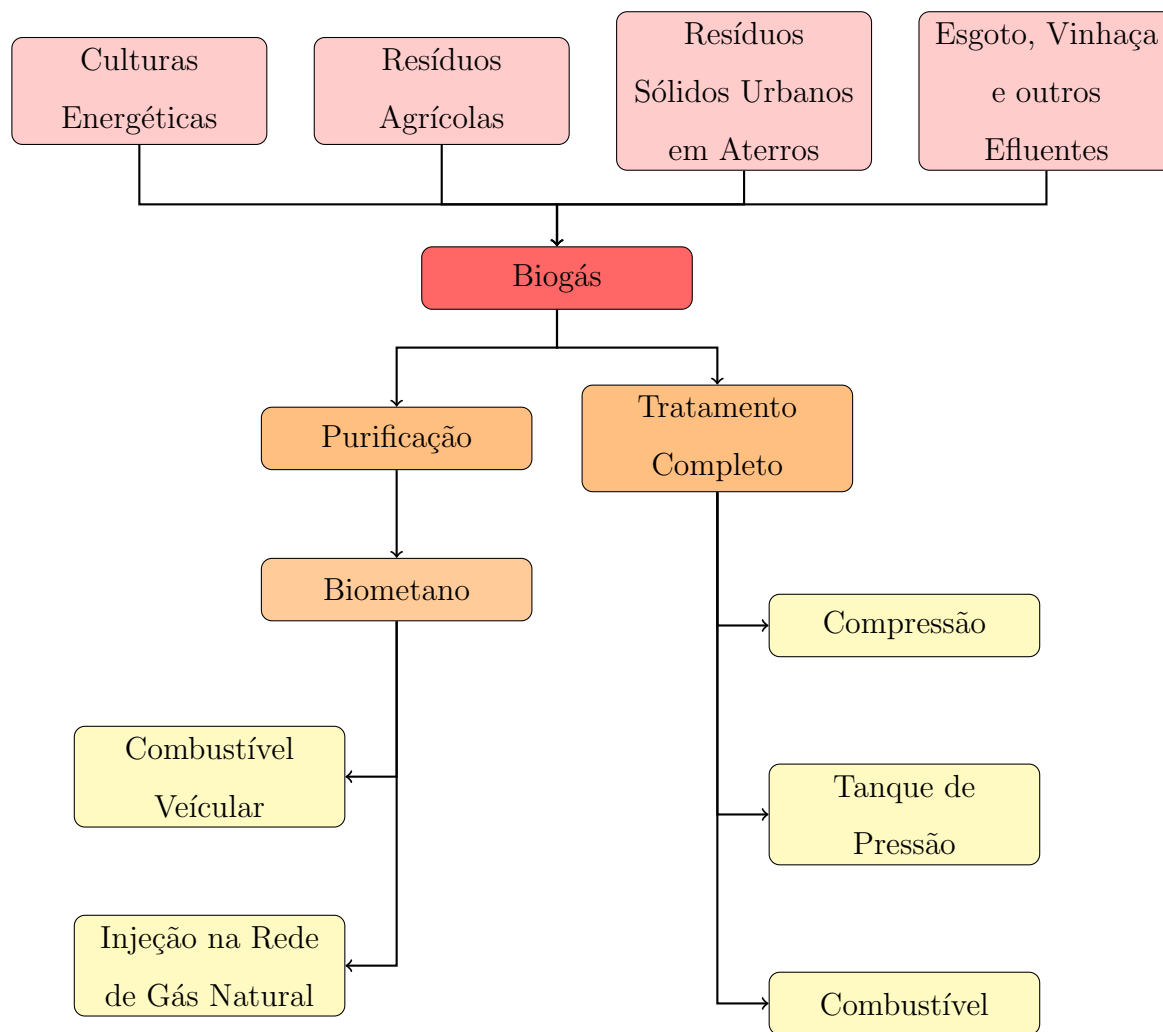


Figura 2: Fontes de produção e aplicação do biogás (adaptado de Veiga & Mercedes (2015)).

2.4 Biodigestores

Em áreas rurais, não é muito comum o gerenciamento de resíduos, o que faz com que o descarte seja inadequado, podendo ocasionar problemas sanitários prejudiciais ao meio ambiente e saúde das pessoas e animais (Quiroga et al., 2019). Uma forma de reaproveitar esses resíduos é utilizar biodigestores como meio de reciclagem. Atualmente os biodigestores estão ganhando atenção de comunidades rurais e de pesquisadores devido ao seu baixo custo e da eficiência na transformação de resíduos orgânicos em um novo produto, o biogás (Quiroga et al., 2019).

Um biodigestor é composto basicamente por um tanque de fermentação, onde é depositado os resíduos, e uma câmara, também chamada de campânula, onde é armazenado o biogás. De acordo com Moreno (2011), estes podem ser construídos no subsolo ou no solo, utilizando tijolos ou cimento como materiais de construção. Ainda segundo Moreno (2011), para que um biodigestor opere de forma correta é necessário seguir as seguintes características:

- ser hermético para impedir a entrada de ar e evitar o vazamento do biogás produzido;
- ser isolado termicamente para que não haja mudanças bruscas de temperatura, uma forma de evitar tais mudanças é a construção do biodigestor no subsolo;
- o recipiente de gás deve conter uma válvula de segurança;
- ter meios que possibilitem carregar e descarregar o biodigestor e que seja acessível a manutenção.

Segundo Borzani et al. (2001), os biodigestores são classificados de acordo com sua alimentação, podendo ser:

- contínuo: neste processo de alimentação, o biodigestor tem descarga proporcional a entrada de resíduos, desta forma, são compostos também por um cano de entrada e um cano de saída possuindo assim a mesma vazão de entrada e de saída.

- semicontínuo: neste processo, o biodigestor é alimentado e espera-se até que a fermentação esteja completa, posteriormente, parte do meio fermentado é retirado e alimenta-se novamente o biodigestor com o volume de meio de fermentação igual ao volume que foi retirado, este processo é repetido até que não haja queda de produtividade.
- descontínuo ou batelada: neste processo, o biodigestor é alimentado e no decorrer da fermentação nada é adicionado. Ao final da fermentação retira-se o meio fermentado do biodigestor e este deve ser totalmente lavado, esterilizado e recarregado e sua instalação pode ser realizada com apenas um tanque ou vários tanques em série.

Diferentemente dos biodigestores contínuos o biodigestor batelada é composto por duas partes: uma câmara fechada onde é colocado a matéria orgânica em solução aquosa, a qual será digerida por bactérias, e um gasômetro onde será armazenado o biogás gerado (Andrade et al., 2019). Os biodigestores do modelo batelada ganharam espaço no mercado por apresentarem uma instalação operacional de baixo custo (Oliveira, 2004).

Como discutido anteriormente, a decomposição que acontece no interior da câmara é chamada de digestão anaeróbica ou biodigestão, onde os microorganismos degradam a matéria orgânica na ausência de oxigênio (Santos et al., 2017). O biofertilizante obtido possui uma composição muito complexa, entre eles destacam-se nitrogênio e fósforo, que são macronutrientes essenciais para as plantas. Quando comparados aos fertilizantes químicos comerciais, os biofertilizantes apresentam algumas vantagens como: favorecem o crescimento de microrganismos benéficos proporcionando mais saúde ao solo, tornando-o mais poroso, o que permite maior aeração em camadas mais profundas (Moura et al., 2017; Wang et al., 2014).

Existem vários tipos de biodigestores, os quais se diferenciam pelo modelo e material com o qual são construídos.

As Figuras 3 e 4 ilustram respectivamente os biodigestores de modelo

chinês e indiano, os quais se classificam em contínuos e a Figura 5 ilustra um biodigestor de modelo batelada que se classifica como semicontínuo ou descontínuo (batelada).

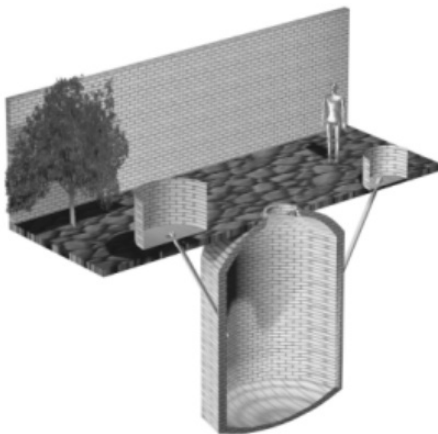


Figura 3 - Representação de um biodigestor modelo chinês (Deganutti et al., 2002).

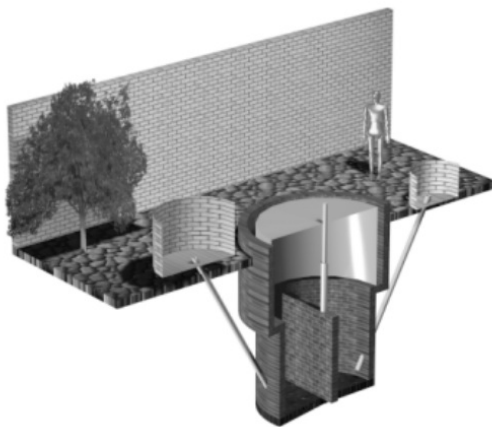


Figura 4 - Representação de um biodigestor modelo indiano (Deganutti et al., 2002).



Figura 5 - Representação de um biodigestor modelo batelada (Deganutti et al., 2002).

A seguir é apresentado o problema abordado e o estudo dos aspectos necessários para o desenvolvimento do processo computacional realizado.

2.5 Atendimento de Demanda de Biogás

A biodigestão de matéria orgânica para produção de biogás é uma das formas mais promissoras de auxílio na geração de energia renovável de baixo custo e baixo impacto ambiental. Assim, a produção de biogás para suprir a demanda local de energia tem sido cada vez mais frequente, principalmente em grandes propriedades rurais. O biogás pode ser utilizado para aquecimento de água e ambientes, iluminação, funcionamento de motores, fogões, veículos, entre outros. A demanda por biogás pode variar de acordo com a época do ano. Neste contexto, muitas das vezes é necessário ter mais de um biodigestor funcionando, necessitando assim, criar uma bateria de biodigestores funcionando simultaneamente para suprir a demanda de gás.

Por outro lado, em locais com grande acúmulo de resíduos orgânicos, como indústrias, fazendas/empresas com produção de animais confinados, ou até mesmo centros cooperativos de produção de biogás, é necessário o uso de um con-

junto de biodigestores, os quais devem ser capazes de atender a demanda diária de biogás. O gerenciamento desta bateria de unidades de biodigestores não é tarefa fácil e necessita de um planejamento prévio para um horizonte finito de tempo. Neste planejamento é importante a definição do tipo de biomassa que será usada para abastecer os biodigestores, o dia que cada biodigestor entrará em operação, os dias em que estes estarão em manutenção/limpeza, o número de biodigestores que estarão em operação, o controle das sobras diárias de biogás para evitar custos extras com envasamentos ou necessidade de queima de excesso. Muitas vezes este planejamento torna-se mais difícil por envolver variação na demanda devido as sazonalidades, fazendo com que o consumo aumente ou diminua no período a ser planejado. Este tipo de planejamento e a resolução de outros problemas envolvidos no processo de biodigestão requerem o auxílio de ferramentas matemáticas e computacionais devido a sua complexidade.

O estudo realizado por Tanaka et al. (2020), aborda um modelo de otimização não-linear inteiro misto para determinar dentre 10 biodigestores do tipo indiano, quais devem ser colocados em operação, visando obter a máxima produção de biogás para assim atender demandas de energia.

No trabalho elaborado por Covolan (2018), foi desenvolvido um software em Java que permite determinar as dimensões de biodigestores do tipo indiano, chinês e batelada. Para isto, foram utilizadas programação não linear, estimação dos parâmetros e aplicou-se o método Primal Dual Barreira Logarítmica para a resolução dos modelos.

Costa (2016) estudou algoritmos genéticos com aplicação na modelagem da digestão anaeróbica em biodigestores, visando estimar os parâmetros presentes em um modelo dinâmico representante deste processo, com a finalidade de ajustá-los a uma situação simulada.

O trabalho desenvolvido por Galbiatti et al. (2010), abordou a modelagem matemática para a análise da produção de biogás a partir de 5 substratos diferentes: esterco de aves de corte com cama de capim napier; esterco de aves de

corte com cama de capim napier triturado; esterco suíno; esterco bovino e esterco bovino misturado com 50% de bagaço de cana-de-açúcar. Os resultados apontam que o biogás produzido pelo substrato de esterco bovino foi o que mostrou maior valor de metano em sua composição.

Desta forma, pode-se notar que as modelagens matemática e computacional são ferramentas de grande valia para auxílio na resolução de problemas na área em questão. Neste contexto, o presente trabalho visa o desenvolvimento de uma metodologia para auxiliar a realização de um planejamento otimizado para produção de biogás em uma bateria de biodigestores, em um horizonte de tempo finito. Tal metodologia é apresentada a seguir.

3 PROBLEMA ABORDADO

Dada uma bateria com n unidades de biodigestores do tipo batelada, B_j , $j = 1, \dots, n$, em que B_1 representa o biodigestor 1, B_2 representa o biodigestor 2, e assim sucessivamente até B_n , que representa o n -ésimo biodigestor, conforme ilustrada na Figura 6.

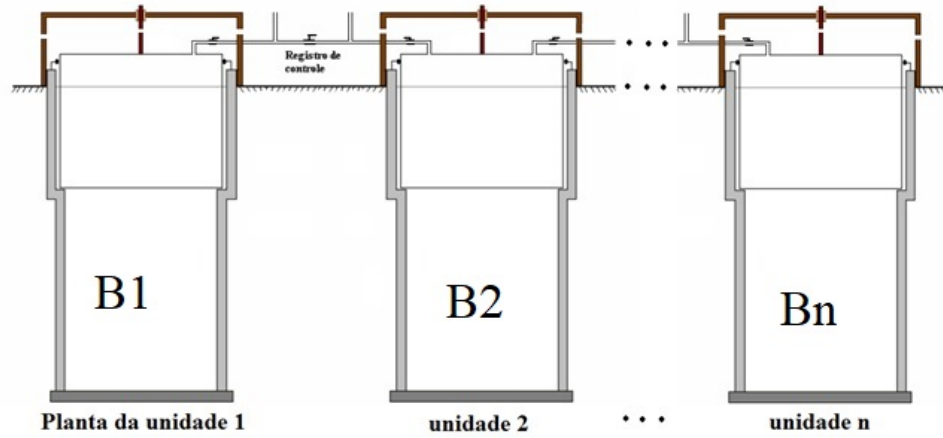


Figura 6 - Bateria com n biodigestores do tipo batelada.

O problema consiste em determinar m ($m \leq n$) biodigestores desta bateria que serão usados para suprir as demandas diárias D_i , iniciadas no tempo $t = q_i$, $i = 1, \dots, p$, em que p é o número total de períodos (dias) em que há demanda. Este planejamento deve ser elaborado de forma que a sobra de biogás S_t , $t = 1, \dots, T$, em cada dia t , seja a menor possível, em que T é o tempo total considerado para o planejamento. Sendo necessário também determinar o dia d_{jk} , em que cada biodigestor B_j , entrará em operação pela k -ésima vez, $d_{jk} \in \{1, 2, \dots, T\}$, e o número de vezes, N_j , que cada biodigestor entrará em operação, em que $j = 1, \dots, n$. É suposto

que existe um único tipo de biomassa a ser utilizada, e que o tempo de retenção de sólido mais o tempo de limpeza após o uso de cada biodigestor B_j é igual a r_j e a produção de biogás para cada tempo x que o biodigestor j está em operação é igual a $P_j(x)$, $x \in [0, r_j]$. A Figura 7 apresenta a curva de produção de biogás $P_j(x)$, $x \in [0, 255]$. Tal curva foi construída utilizando dados de Galbiatti et al. (2010).

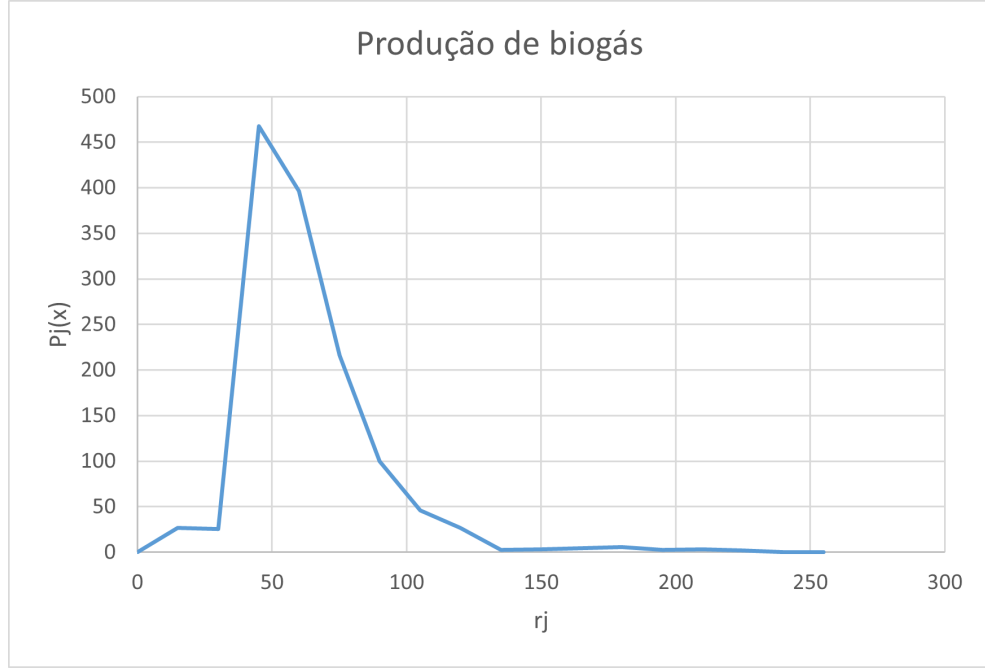


Figura 7 - Produção de biogás de um biodigestor durante 255 dias ($r_j = 255$).

3.1 Ilustração de Planejamento de Produção de Biogás para 5 Biodigestores

É ilustrado aqui um planejamento não otimizado de uma bateria de 5 biodigestores ($n = 5$), visando atender 4 períodos de demanda ($p = 4$) em um horizonte de planejamento de 555 dias ($T = 555$). Nos primeiros 120 dias, iniciados no tempo $q_1 = 0$ a demanda diária é de $200m^3$ de gás ($D_1 = 200m^3$), posteriormente tem-se o segundo período de 150 dias começando no dia 120 ($q_2 = 120$) com uma demanda diária de $100m^3$ de gás ($D_2 = 100m^3$), para o terceiro período tem-se um

período de 150 dias começando no dia 270 do planejamento ($q_3 = 270$) com demanda de gás de $300m^3$ ao dia ($D_3 = 300m^3$) e para o quarto período tem-se os 135 dias restantes do planejamento começando no dia 420 ($q_4 = 420$) a demanda diária é de $100m^3$ ($D_4 = 100m^3$), conforme mostrado na Figura 8.

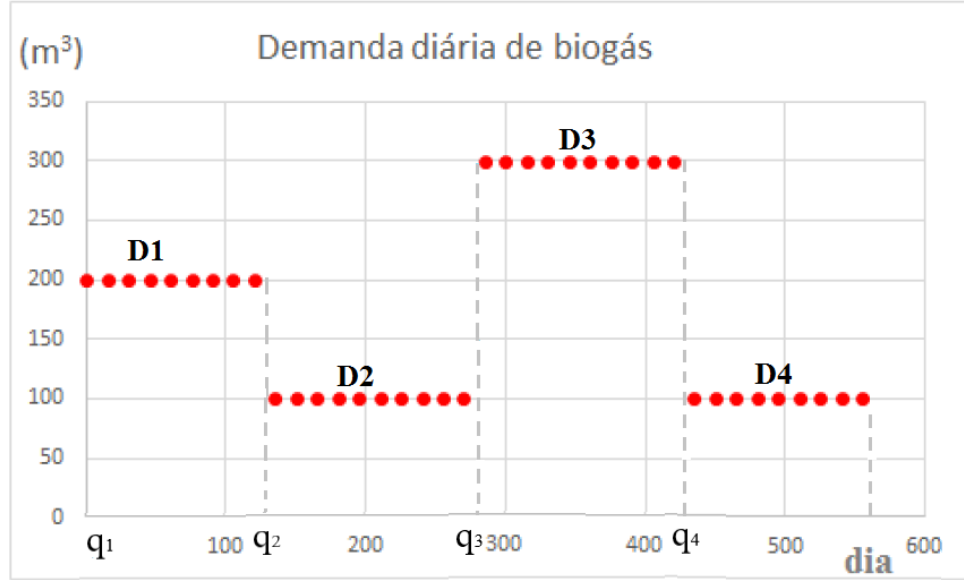


Figura 8 - Demanda diária de biogás no período de 555 dias.

Na Figura 9 são apresentadas as curvas de produção de biogás $P_j(x)$ para os 5 biodigestores considerados deste exemplo, $j = 1, 2, 3, 4, 5$. Os biodigestores B_1 e B_5 apresentam um pico de produção de biogás em 45 dias após o seu abastecimento e com 135 dias a produção já é bastante reduzida, encerrando o funcionamento com 230 dias. B_2 apresenta um pico de produção de biogás em 60 dias após o seu abastecimento e por volta dos 135 dias a produção reduz bastante, de forma a encerrar o seu funcionamento com 250 dias. B_3 apresenta a maior produção de biogás em 120 dias e diminui gradativamente encerrando seu funcionamento com 265 dias, este é o biodigestor que produz a menor quantidade de biogás dentre os 4. B_4 apresenta um pico de produção de biogás com 60 dias após seu abastecimento, com 135 dias tem-se uma queda na produção de biogás e encerra o funcionamento com 250 dias. Neste exemplo, cada biodigestor possui um período de limpeza de 15

dias e deve permanecer inoperante durante todo este tempo, ou seja, r_j é o tempo total de retenção de sólidos mais 15 dias para a limpeza do biodigestor. Os dados de produção de biogás foram obtidos de Galbiatti et al. (2010). Resumindo, $r_1 = r_5 = 230 + 15 = 245$, $r_2 = r_4 = 250 + 15 = 265$ e $r_3 = 265 + 15 = 280$ dias.



Figura 9 - Curva de produção de biogás, $P_j(x)$, de cada biodigestor em cada tempo x , $x \in [0, r_j]$, $j = 1, \dots, 5$.

A Figura 10 mostra o planejamento de produção de biogás utilizando a bateria com os 4 biodigestores escolhidos para o planejamento ($m = 4$). Neste planejamento os biodigestores atenderam com sobra a demanda de biogás nos 555 dias. B_1 entra em operação 45 dias antes do período de demanda ($d_{11} = -45$), reiniciando esta operação por mais 2 vezes, sendo nos dias 210 ($d_{12} = 210$) e 465 ($d_{13} = 465$) do planejamento. O Biodigestor 2 (B_2) inicia seu funcionamento no dia 30 ($d_{21} = 30$) do planejamento reiniciando mais uma vez no dia 300 ($d_{22} = 300$). O Biodigestor 3 (B_3) entra em operação no dia 60 ($d_{31} = 60$) do planejamento repetindo

a operação mais uma vez no dia 345 ($d_{32} = 345$). Por fim, o Biodigestor 4 (B_4), opera uma única vez tendo seu início no dia 225 ($d_{41} = 225$) do planejamento e finalizando sua operação no dia 480. Não foi necessário o uso do Biodigestor 5 (B_5).

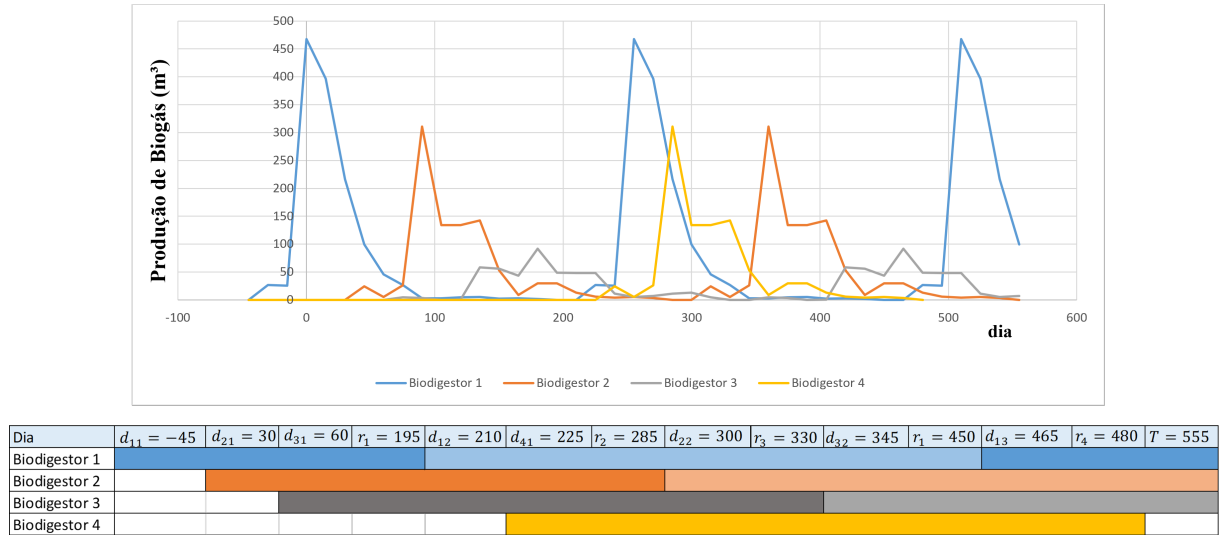


Figura 10 - Planejamento de produção de biogás de uma bateria com 4 biodigestores no horizonte de planejamento de 555 dias.

A Figura 11 ilustra a produção total de biogás em todo o horizonte de planejamento de 555 dias. A figura apresenta também a sobra diária de biogás, a qual é medida pela quantidade de biogás produzida, mais a quantidade acumulada do dia anterior, menos a quantidade consumida. A produção de biogás no início do planejamento foi de $467,3m^3$ e a demanda era de $200m^3$, a produção permaneceu acima da demanda até o dia 30 e diminuiu gradativamente obtendo novamente alguns picos como no dia 90 em que a produção foi de $317m^3$ para uma demanda de $200m^3$. A maior quantidade de produção de biogás foi no dia 285 com $538,5m^3$ para uma demanda de $300m^3$. Ainda na Figura 10, nota-se que houve uma sobra excessiva de produção de biogás, no dia 30 a sobra foi de $532,7$ e a demanda neste dia era de $200m^3$. A maior sobra foi no dia 285 com $1098,4m^3$ produzidos a mais do que o necessário, o qual neste dia era de $300m^3$. As sobras de biogás são importantes

para suprir os dias que a produção esteja abaixo da demanda, mas grandes quantidades de sobras podem encarecer todo o processo de produção por ser necessário o envasamento.

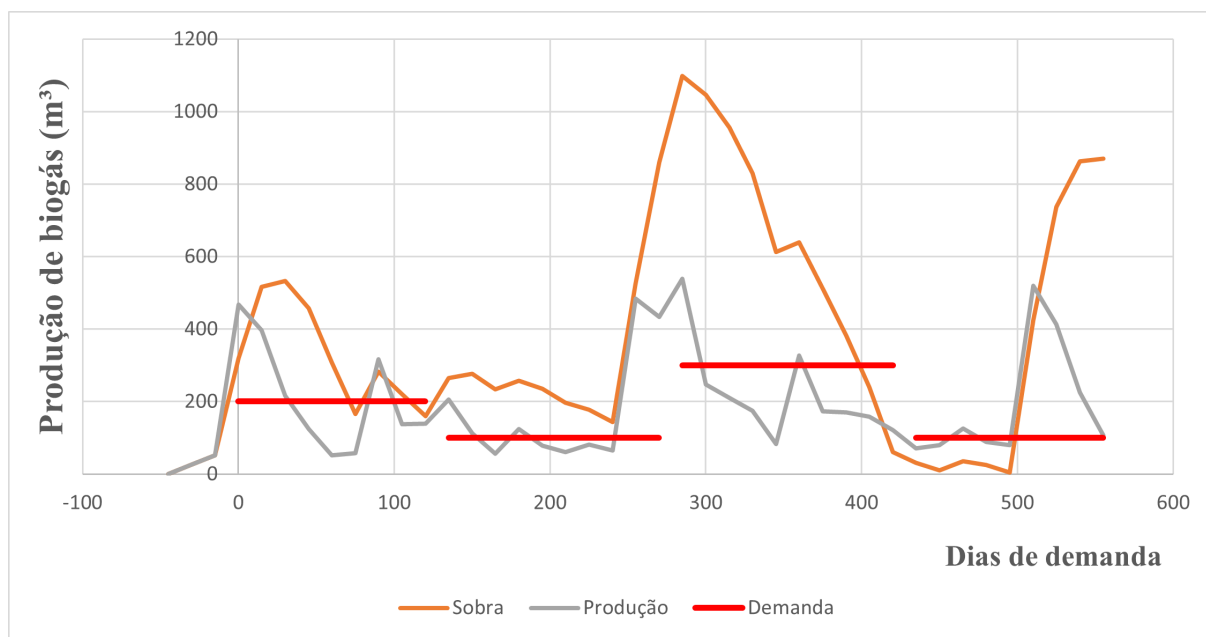


Figura 11 - Produção total de biogás e sobra diária de biogás obtida a partir do planejamento elaborado por 555 dias de demanda.

Este planejamento é sumarizado na Tabela 3.

Tabela 3: Planejamento de produção de biogás em uma bateria com 4 biodigestores.

T (dias)	B_j	N_j	Dia de início e término de cada biodigestor (d_{jk}, r_j)	Produção de cada Biodigestor (m^3)	Média de sobras diárias (m^3)
555	1	3	$(-45, 195); (210, 450); (465, 555)$	57642, 20	27, 55
	2	2	$(30, 285); (300, 555)$	27951, 94	
	3	2	$(60, 330); (345, 555)$	13224, 79	
	4	1	$(225, 480)$	13975, 97	
Total	4			112794, 90	

4 FERRAMENTA MATEMÁTICA PARA O AUXÍLIO NO PLANEJAMENTO OTIMIZADO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Neste capítulo é proposta uma metodologia para auxiliar na determinação de um planejamento otimizado da produção de biogás em uma bateria de biodigestores. Esta metodologia consiste da metaheurística Algoritmo Genético (AG). O processo preliminar consiste na estimação de produção diária de biogás para cada um dos n biodigestores considerados (Carvalho et al., 2020).

Dadas as características da biomassa e dos biodigestores a serem utilizados, propõe-se utilizar o modelo de Marcucci (2018) para gerar as estimativas de produção diária de biogás, as quais serão utilizadas na metaheurística proposta a seguir.

4.1 Algoritmo Genético (AG)

Fundamentado por Holland (1975), o Algoritmo Genético (AG) é uma técnica para determinação de solução aproximada para um problema de otimização através de um processo iterativo a partir de soluções iniciais. No AG, as soluções para o problema original são chamadas de indivíduos ou cromossomos.

Os algoritmos genéticos fazem analogia a teoria da evolução de Charles Darwin, em que em um espaço de busca (espaço de soluções de um determinado problema), os indivíduos mais adaptados (melhores soluções) serão capazes de se reproduzirem combinando soluções já existentes e passar suas características genéticas

para as próximas gerações (Carvalho et al., 2020). De acordo com Lacerda et al. (2002) a analogia dos termos entre o AG e a teoria da evolução são representados na Tabela 4 abaixo.

Tabela 4: Analogia dos termos da teoria da evolução com os termos do AG.

Sistema Natural	AG
Cromossomo	Solução (representada por um vetor ou uma matriz)
Gene	Elemento do vetor ou matriz que representa o cromossomo
Indivíduo	Cromossomo
Alelo	Valores que o gene pode assumir
Genótipo	Estrutura do cromossomo
Fenótipo	Estrutura submetida ao problema

Segundo Goldberg (1989), a simplicidade de operação e eficiência são as principais características de um algoritmo genético.

De forma simplificada, o AG consiste dos 5 passos descritos a seguir.

4.1.1 Algoritmo

1. Inicialização.

- (a) Determinar a estrutura do indivíduo de acordo com a estrutura da solução do problema (vetor ou matriz);
- (b) Determinar o tamanho N da população;
- (c) Determinar uma população inicial, gerada de forma aleatória ou construtiva ou ambas.

2. Avaliação.

- (a) Avaliar cada indivíduo da população de acordo com seu grau de aptidão;
- (b) Selecionar uma Elite.

3. Aplicação dos operadores genéticos e avaliação dos novos indivíduos.
 - (a) Seleção;
 - (b) Cruzamento;
 - (c) Mutação;
 - (d) Avaliar os novos indivíduos criados com o cruzamento e a mutação.
4. Geração da nova população.
 - (a) Dentre todos os indivíduos existentes, escolher os N melhores que farão parte da próxima geração.
 - (b) Atualizar a Elite.
5. Finalização.
 - (a) Verificar se o critério de parada foi satisfeito.
 - i. Se o critério de parada for atingido, então fim e a melhor solução da elite é a solução para o problema.
 - ii. Se não, retorne ao passo 3.

A seguir serão discutidos cada um desses passos.

Inicialização

O AG é iniciado gerando de forma aleatória ou por construção uma população com N indivíduos. O tamanho N da população pode influenciar no desempenho do algoritmo, uma vez que N muito pequeno, a solução pode convergir para uma solução ótima local, enquanto que N muito grande pode afetar na eficiência e no tempo computacional. O indivíduo pode ter diferentes estruturas, dependendo da forma da solução do problema, podendo ser matrizes, vetores, entre outros. A Figura 14a ilustra uma população inicial de tamanho $N = 4$, na qual os indivíduos são vetores binários, com 8 genes e os alelos são os números 0 ou 1.

Avaliação

Nesta etapa os indivíduos serão avaliados por uma função de avaliação ou função *fitness*, a qual irá mensurar o nível de aptidão do indivíduo de acordo com o problema de otimização. Esta função geralmente está relacionada a função objetivo. Após a avaliação, é criado um novo grupo de indivíduos chamado de elite, o qual é composto pelos melhores indivíduos da população atual. Este grupo garante que boas soluções não sejam perdidas nas etapas de cruzamento e mutação (De Jong, 1975).

Operadores Genéticos

Seleção

Os indivíduos são classificados de acordo com os resultados da avaliação realizada. Nesta classificação, os melhores indivíduos terão maiores chances de serem selecionados para a etapa de cruzamento e geração de novos indivíduos. Esta seleção é realizada de forma aleatória e existem diversos métodos para este procedimento. Dois destes métodos estão descritos a seguir.

O método de seleção mais simples, segundo Goldberg (1989) é a seleção realizada por roleta (sorteio), em que todos os valores da função aptidão são somados, obtendo um valor que será o correspondente a 100%, assim cada indivíduo receberá um percentual de seleção. Um círculo é particionado de acordo com as porcentagens relacionadas a cada indivíduo, como uma roleta de jogos. Desta forma, a cada giro da roleta um indivíduo é selecionado, dando maior oportunidade dos bons indivíduos serem selecionados mais que uma vez. Os indivíduos selecionados são colocados em uma piscina de cruzamento (*mating pool*). Nas Figuras 12 e 13, são apresentados a seleção realizada pelo método da roleta.

Indivíduos	<i>Fitness</i>	Probabilidade de Seleção
1 00110010	24	31%
2 11010100	23	29%
3 00010110	20	26%
4 10101100	11	14%
Total	78	100%

Figura 12 - Representação dos indivíduos e seus respectivos valores da função *fitness* e suas probabilidades de seleção. Adaptado de Goldberg (1989)

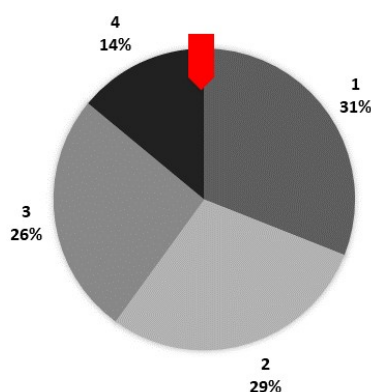


Figura 13 - Representação das probabilidades de cada indivíduo na roleta. Adaptado de Goldberg (1989)

Tem-se também a seleção por torneio, em que dois indivíduos são escolhidos aleatoriamente e o indivíduo com melhor avaliação é selecionado para a próxima etapa (Blickle & Thiele, 1995).

É importante ressaltar que processos de seleção não devem selecionar apenas os melhores indivíduos para realizarem o cruzamento, pois os mesmos poderiam ter um alto nível de similaridade, tendo assim altas probabilidades do algoritmo convergir para soluções ótimas locais. Por este motivo é necessário ter alto grau de aleatoriedade no processo de seleção e consequentemente um alto nível de diversidade entre os indivíduos.

Cruzamento

O cruzamento ocorre entre dois indivíduos trocando os alelos pertencentes a determinados genes, gerando assim 2 novos indivíduos. Para o caso em que os indivíduos sejam vetores, o cruzamento pode ser realizado sorteando um ou mais pontos de corte e fazendo as trocas genéticas entre os pais, dando origem a dois filhos, como mostrados nas Figuras 14c e 14d. Se o corte for em um ponto sorteia-se uma posição inteira v (ponto de corte), de modo que v pertença ao intervalo $[1, l - 1]$, em que, l é o número total de genes do indivíduo. Dois novos indivíduos são criados trocando todos os alelos entre as posições $v + 1$ e l (Goldberg, 1989). Na Figura 14c fez-se os cruzamentos dos indivíduos 2 com 1 e 2 com 3. Estes indivíduos possuem 8 genes, portanto os pontos de cruzamentos v podem ser 1, 2, 3, 4, 5, 6 ou 7. Para o cruzamento dos indivíduos 2 com 1 foi sorteado $v = 3$ e para os indivíduos 2 com 3 foi sorteado $v = 5$.

Se os indivíduos são matrizes, o cruzamento pode ser realizado sorteando uma posição inteira v (ponto de corte) que pertença ao intervalo $[1, l - 1]$, em que, l é o número total de linhas. Consequentemente, as linhas entre as posições $v + 1$ e l serão trocadas dando origem a dois novos indivíduos. Todo este processo de cruzamento pode ser realizado do mesmo modo para as colunas da matriz. É possível também que o cruzamento seja realizado sorteando mais de um ponto de corte e fazendo a troca dos alelos de modo que não modifique a estrutura do indivíduo (Goldberg, 1989).

Mutação

Nesta etapa é fixada uma pequena probabilidade para determinar se um indivíduo irá ou não sofrer a mutação. Se o indivíduo for escolhido para sofrer a mutação, então é escolhido de forma aleatória um ou mais genes e seus alelos são modificados, por exemplo, se os indivíduos possuírem entradas binárias a mutação mudaria o valor de 0 para 1 e vice-versa. Os indivíduos mutados serão avaliados e inseridos na população intermediária. A probabilidade de mutação deve ser baixa,

pois caso contrário poderia modificar os indivíduos bons já encontrados, dificultando a convergência para a solução ótima (Marcucci, 2018; Goldberg, 1989). A Figura 14e ilustra o operador mutação.

Ilustração dos passos do AG

Na Figura 14 abaixo é possível observar algumas das etapas do AG, onde: (a) uma população inicial formada por $N = 4$ indivíduos; (b) é calculado o valor da função de avaliação para cada indivíduo e suas respectivas probabilidades de seleção; (c) é realizada a seleção dos indivíduos e escolha aleatória do ponto de corte para realizar o cruzamento; (d) cruzamento entre os pais para gerar novos indivíduos (filhos); (e) é realizado um sorteio para saber qual ou quais indivíduos sofrerão mutação, assim como o gene que sofrerá mudança no alelo; (f) os novos indivíduos são colocados em uma população intermediária.

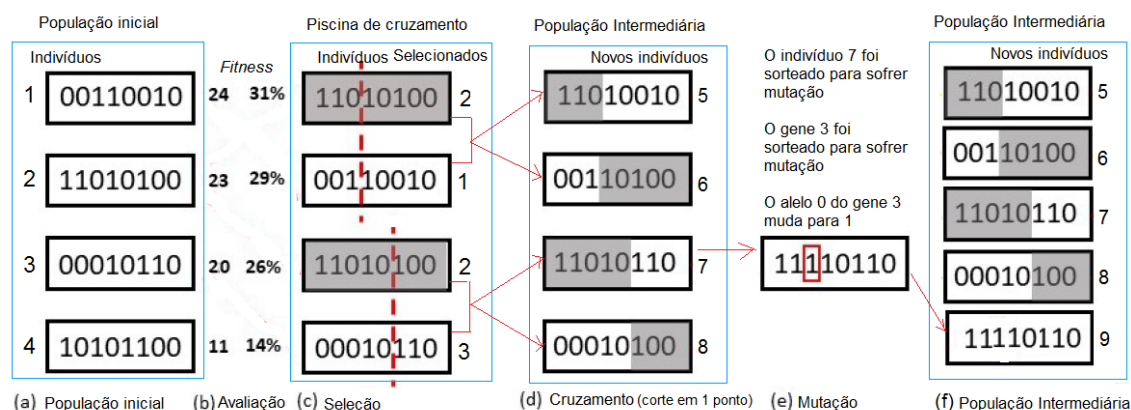


Figura 14 - Representação de alguns passos do AG. Adaptado de Russell & Norvig (2003).

Nova População

Após a avaliação dos novos indivíduos gerados pelo cruzamento e mutação, forma-se uma população aumentada, ou seja, uma população formada pelos indivíduos da população intermediária e os indivíduos da população original e

escolhe-se os N melhores indivíduos que irão formar a nova população. Ainda nesta etapa, se existirem indivíduos da nova população melhores que os da elite, então atualiza-se a elite.

Finalização do Algoritmo

Esta é a última etapa do algoritmo na qual verifica se o critério de parada foi atingido. O critério de parada pode ser verificado de diversas formas, como por exemplo, se não houver melhora na solução em um número pré definido de gerações, então o algoritmo é finalizado e o melhor indivíduo da elite será a solução do problema.

Outro critério de parada é definir o número total de gerações G que o algoritmo realizará, caso seja atingido, o algoritmo é finalizado, e o melhor indivíduo da elite será a solução do problema.

Um critério de parada muito utilizado é por tempo de execução computacional. Neste critério, define-se um tempo em segundos, minutos ou horas para rodar computacionalmente o algoritmo.

Pode-se fazer um método híbrido de parada, juntando 2 ou mais dos critérios discutidos.

4.2 Adaptação do AG para o Problema Abordado

Neste trabalho é proposto um planejamento da produção de biogás em uma bateria de biodigestores, visando atender uma demanda diária e minimizando sobras, uma vez que o processo de estocagem de biogás tem um custo elevado.

Para obter este planejamento de forma otimizada é proposto o uso de um algoritmo genético com as seguintes etapas.

4.2.1 Inicialização

Para iniciar o AG, definiu-se a estrutura para cada indivíduo como uma matriz, uma vez que, para o planejamento de biogás tem-se o número total

de biodigestores (n) e o período de planejamento ($[1, T]$). Portanto, os indivíduos serão matrizes de ordem $n \times T$. Desta forma, cada linha da matriz representa um biodigestor e cada coluna um dia de planejamento. Portanto cada gene (j, t) está relacionado a situação de funcionamento do biodigestor j , no dia t , $t \in [1, T]$ do planejamento. Os alelos são 0 ou 1, sendo 1 significando que o biodigestor j está em operação no dia t , e 0 em caso contrário. Uma ilustração desta estrutura é apresentada na Figura 15.

A seguir são apresentados os parâmetros e condições utilizados para o desenvolvimento do algoritmo proposto.

- O número de dias em que cada biodigestor permanecerá operando é dado por K , em que $K < T$.
- O número total de períodos de demanda é dado por p .
- A demanda por período é dada por D_i , onde $i = 1, \dots, p$.
- As variáveis binárias serão representadas por X_{jk}^t , em que $X_{jk}^t = 1$ representa que o biodigestor j está operando pela k -ésima vez no tempo t , $j = 1, \dots, n$, $t = 1, \dots, T$ e $X_{jk}^t = 0$ caso contrário.
- É escolhido um dia conveniente h , para um ou mais biodigestores estarem em funcionamento, pois no primeiro dia de planejamento a demanda tem que ser satisfeita. Chamado de pré processamento.
- Cada biodigestor, depois de iniciar a operação, permanecerá operando até completar todos os K dias de operação. Para isto é realizada uma relação binária, em que, 0 representa o biodigestor inoperante e 1 representa que o biodigestor esta em operação.
- Após o término do período em que cada biodigestor ficará em operação, o mesmo deverá ficar inoperante por um período de tempo para que se possa realizar a limpeza do tanque, este período é representado por T_{jlimp} dias.

Após o período de operação e de limpeza (r_j) de cada biodigestor j , no dia $r_j + 1$ realiza-se novamente o sorteio para o algoritmo decidir se o biodigestor entrará em operação ou não. Quando decide-se por não entrar em operação, realiza-se o sorteio para o próximo dia ou até que decida pelo funcionamento ou se atinga o último dia do planejamento.

Para os demais biodigestores, realizam-se sorteios para definir se irão entrar em operação ou não desde o primeiro dia de planejamento. Os sorteios são efetuados do mesmo modo já discutido acima. Ao final de todos estes processos, o indivíduo do AG terá a estrutura de uma matriz de ordem $n \times T$, composta por 0 e 1, conforme mostrado na Figura 15.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
B_1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1
B_2	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1
B_3	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0

Figura 15 - Estrutura de um indivíduo de um AG visando o planejamento de operação de 3 biodigestores em um horizonte de 15 dias.

4.2.2 Avaliação

Nesta etapa, cada indivíduo será avaliado para determinar o seu grau de aptidão, da seguinte forma:

- será verificado se as demandas diárias foram atingidas (factibilidade quanto a demanda);
- satisfazendo o item anterior, o indivíduo será avaliado pela seguinte função de avaliação ou função *fitness*;

$$fit_{Ind} = \frac{1}{sobra + 1},$$

em que, a *sobra* é o valor de toda produção de biogás em excesso deste indivíduo. A *sobra* do dia é calculada pela quantidade de biogás produzido no dia, mais a quantidade remanescente do dia anterior, menos a quantidade do gás consumido no dia. Quanto mais próximo de zero for a *sobra*, mais próximo de 1 o valor da função fit_{Ind} chegará. Portanto, uma vez que todas as demandas forem atingidas e quanto menor a *sobra*, mais apto será o indivíduo. Ainda nesta etapa cria-se a elite com os indivíduos que obtiverem os melhores resultados, ou seja, com os indivíduos que tiverem o valor da função fit_{Ind} mais próximo de 1.

4.2.3 Seleção

Utiliza-se nesta etapa o método da roleta. Uma vez determinado a aptidão de cada indivíduo, os mesmos receberão um percentual de seleção de acordo com o nível de aptidão, deste modo, indivíduos mais aptos terão maior chance de serem selecionados para posterior cruzamentos. Nesta etapa os indivíduos serão selecionados com um percentual de 80% da população original.

4.2.4 Cruzamento

Na etapa do cruzamento, a lista de indivíduos selecionados é embaralhada criando uma segunda lista, então cada indivíduo será cruzado com o indivíduo que ocupar a mesma posição na lista embaralhada. Cada indivíduo da lista de selecionados é chamado de Ind_{pai} e cada indivíduo da lista embaralhada é chamado de Ind_{mae} . Este cruzamento é realizado sorteando aleatoriamente uma das linhas das matrizes e trocando-as de lugar, dando origem a duas novas matrizes as quais são chamadas de Filho 1 (F_1) e Filho 2 (F_2), veja a ilustração de cruzamento na Seção 4.2.8.

4.2.5 Mutação

Nesta etapa, os indivíduos poderão ser mutados com uma probabilidade de 5%, a qual irá sortear uma linha da matriz e a primeira entrada igual a 1 irá ser recuada para a entrada anterior da mesma linha, veja a ilustração de mutação na seção 4.2.8.

4.2.6 Nova população

Os indivíduos resultantes do cruzamento e da mutação foram avaliados e inseridos na população, formando uma população aumentada. Entretanto a população deve se manter do mesmo tamanho, portanto são escolhidos os indivíduos com melhor aptidão para compor a nova população com o tamanho igual ao da população inicial. A elite será atualizada se existirem indivíduos na nova população melhores que os já existentes na elite.

4.2.7 Finalização

Para o critério de parada do algoritmo é usado um número fixo de gerações.

A seguir será apresentado um exemplo de um indivíduo, bem como as etapas de cruzamento e mutação.

4.2.8 Ilustração dos Processos do AG

É ilustrado aqui a estrutura de um indivíduo, bem como as etapas de cruzamento e mutação. Considere então um planejamento com 3 biodigestores ($n = 3$), em um horizonte de planejamento de 15 dias ($T = 15$), com tempo de limpeza de cada biodigestor igual a 2 dias ($T_{limp} = 2$) e cada biodigestor permanecerá em operação durante 5 dias ($K = 5$).

Inicialmente é escolhido construtivamente qual ou quais biodigestores estarão operando no primeiro dia do planejamento de tal forma que a demanda

neste dia deve ser atingida. Supondo que a demanda foi atingida apenas com o uso do biodigestor B_1 no seu quarto dia de funcionamento ($h = 4$), então o primeiro biodigestor começará a operação 3 dias antes do planejamento e continuará operando até o dia 2 e consequentemente terá 2 dias de limpeza, ou seja, $X_{11}^1 = X_{11}^2 = 1$, $X_{11}^3 = 0$ e $X_{11}^4 = 0$. Houve um sorteio e verificou-se que o biodigestor deveria entrar em operação pela segunda vez no dia 6. Portanto $X_{12}^6 = \dots = X_{12}^{10} = 1$ e $X_{12}^{11} = X_{12}^{12} = 0$. O próximo sorteio mostrou que o Biodigestor 1 deveria entrar em operação pela terceira vez no dia 14 do planejamento, portanto $X_{12}^{13} = 0$ e $X_{13}^{14} = X_{13}^{15} = 1$, veja a Figura 15. O algoritmo para determinar X_{jk}^t é dado a seguir.

Algoritmo

Para cada biodigestor j , na vez k e tempo $t = t^* < T$ do planejamento faça:

- Enquanto $t^* < T$
 1. Sorteia um número $sort \in \{0, 1\}$
 2. Se $sort = 1$ então
 - (a) $X_{jk}^{t^*} = \dots = X_{jk}^{t^*+K} = 1$ e $X_{jk}^{t^*+K+1} = \dots = X_{jk}^{t^*+K+T_{limp}} = 0$;
 - (b) $k = k + 1$;
 - (c) $t^* = t^* + K + T_{limp} + 1$;
 3. Senão
 - (a) $X_{jk}^{t^*} = 0$;
 - (b) $t^* = t^* + 1$ vá para o passo 1;
- Fim Enquanto

O mesmo algoritmo é utilizado para os outros biodigestores, alterando apenas os valores de j , k e t^* .

Neste exemplo, é possível verificar que o primeiro biodigestor retornou a operar nos dias 6 e 14. O segundo biodigestor iniciou a operar no quarto dia de

planejamento, retornando pela segunda vez no dia 12 e o terceiro biodigestor iniciou sua operação no segundo dia de planejamento, voltando a operar no dia 10. Deste modo cria-se a população inicial.

Abaixo segue a estrutura deste indivíduo em forma matricial.

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Abaixo é apresentado um exemplo de cruzamento entre dois indivíduos.

Sejam Ind_{pai} e Ind_{mae} os indivíduos 1 e 2 respectivamente, representados pelas seguintes matrizes:

$$Ind_{pai} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$Ind_{mae} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Neste exemplo, o cruzamento é realizado trocando linhas entre os indivíduos pai e mãe, como as matrizes tem 3 linhas, ou seja, 3 biodigestores, então as possibilidades de sorteio da linha para o cruzamento são os números 1, 2 ou 3. Suponha que foi sorteado o número 3, então a linha 3 do Ind_{pai} será trocada com a linha 3 do Ind_{mae} , ficando com dois novos indivíduos chamados de Filho 1 (F_1) e Filho 2 (F_2). Os Filhos F_1 e F_2 contêm parte dos genes do pai (preto) e parte dos genes da mãe (vermelho), como apresentados a seguir:

$$F_1 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$F_2 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Suponha agora que o indivíduo F_2 foi sorteado para sofrer a mutação na linha 1. Então a primeira entrada igual a 1 da linha 1 é recuada um dia, conforme mostrado a seguir.

$$F_2 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Para facilitar o leitor, é apresentado na Tabela 6 todos os parâmetros e suas descrições já mencionados no texto.

Tabela 5: Descrição dos parâmetros utilizados para o desenvolvimento do algoritmo.

Parâmetros	Descrição
N	Número de indivíduos da população inicial
n	Número total de biodigestores da bateria
m	Número mínimo de biodigestores encontrados que entrarão em operação
T	Tempo total do planejamento (dias)
T_{limp}	Tempo de limpeza do biodigestor
K	Tempo em que o biodigestor ficará operando
h	Dia de operação em que um ou mais biodigestores estarão no primeiro dia do planejamento
p	Número de períodos em que há demanda
i	Índice que representa os períodos de demanda, $i = 1, \dots, p$
j	Índice que representa o biodigestor, $j = 1, \dots, n$
k	Índice que representa o número de vezes em que o biodigestor está em operação
t	Índice que representa o dia do planejamento, $t = 1, \dots, T$
d_{jk}	Dia em que o biodigestor j começou a operar pela k -ésima vez
r_j	Tempo de operação mais o tempo de limpeza do biodigestor j
D_i	Demanda no período i
fit_{Ind}	Função de avaliação do indivíduo Ind
N_j	Número total de vezes que cada biodigestor j entrou em operação
$P_j(x)$	Produção de biogás do biodigestor j no tempo x
q_i	Dia em que se inicia a demanda no período i
B_j	Representa cada biodigestor j
X_{jk}^t	Variável que assumirá o valor 1 se o biodigestor j , estará operando pela k -ésima vez no tempo t e 0 caso contrário
G	Número total de gerações
P_s	Percentual de indivíduos a serem selecionados

5 EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

O algoritmo AG foi implementado com o auxílio do software Octave-6.2.0. A implementação foi realizada em um computador com processador AMD Ryzen 7 e 8gb de memória RAM. Para os experimentos computacionais foram criadas 2 instâncias.

5.1 Instância 1

Na primeira instância foram utilizados os dados obtidos por Galbiatti et al. (2010), em que os autores estudam a produção quinzenal de biogás em biodigestores do tipo batelada, com mesma capacidade e diferentes tipos de substratos em um período total de 250 dias. Deste modo, foi aplicada a metodologia proposta no problema já descrito na Seção 3, para a determinação de um planejamento ótimo de produção de biogás. Além disso, foi realizada uma interpolação linear a cada dois pontos aos dados de Galbiatti et al. (2010) obtendo assim valores diários de produção de biogás.

5.2 Instância 2

Na instância 2 foram utilizados os dados de Khan et al. (2013), em que os autores apresentam um modelo de otimização da produção de biogás para um biodigestor do tipo batelada no período de 30 dias. Para a obtenção da produção diária de biogás de cada biodigestor, foi utilizado o modelo proposto por Marcucci (2018) e a partir disto foi determinado o planejamento ótimo de produção de biogás.

5.3 Resultados e Discussões

5.3.1 Instância 1

Para a instância 1 foram utilizados 4 biodigestores de mesma capacidade e diferentes tipos de substratos, desta forma tem-se diferentes quantidades de produção diária de biogás. O tempo total de planejamento utilizado nas simulações foi de 555 dias com as seguintes demandas diárias: no primeiro período $q_1 = 0$ (do dia 0 até o dia 119) a demanda foi de $200m^3$, no segundo período $q_2 = 120$ (do dia 120 até o dia 269) a demanda foi de $100m^3$, no terceiro período $q_3 = 270$ (do dia 270 até o dia 419) a demanda foi de $300m^3$ e no quarto período $q_4 = 420$ (do dia 420 até o dia 555) a demanda foi de $100m^3$. A demanda total do planejamento é de $97500m^3$ de biogás. Os valores dos parâmetros utilizados foram obtidos através de calibração de acordo com o problema abordado e estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Valores dos parâmetros utilizados no algoritmo.

Parâmetros	Valores
N	500 indivíduos
n	5 biodigestores
T	555 dias
T_{limp}	15 dias
K	240 dias
p	4 períodos
D_1	$200m^3$
D_2	$100m^3$
D_3	$300m^3$
D_4	$100m^3$
G	50 gerações
P_s	80%
q_1	0
q_2	120
q_3	270
q_4	420

Nas Figuras 16, 17, 18 são apresentadas respectivamente a curva de produção diária de biogás dos biodigestores 1 e 5, a curva de produção de biogás dos biodigestores 2 e 4 e a curva de produção de biogás do biodigestor 3.

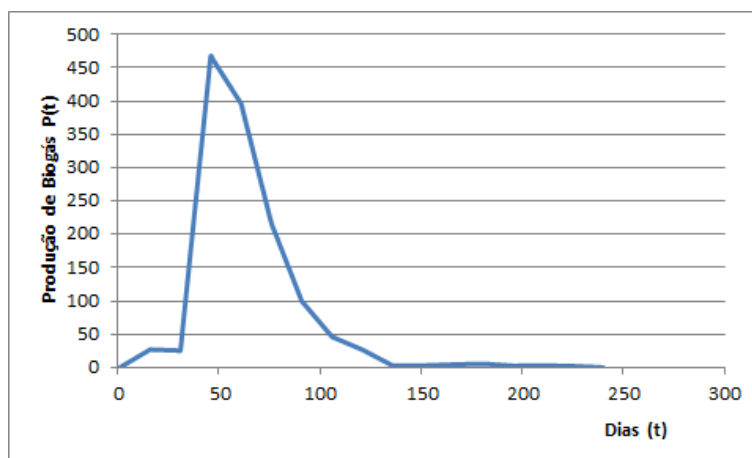


Figura 16 - Curva de produção diária de biogás dos Biodigestores 1 e 5.

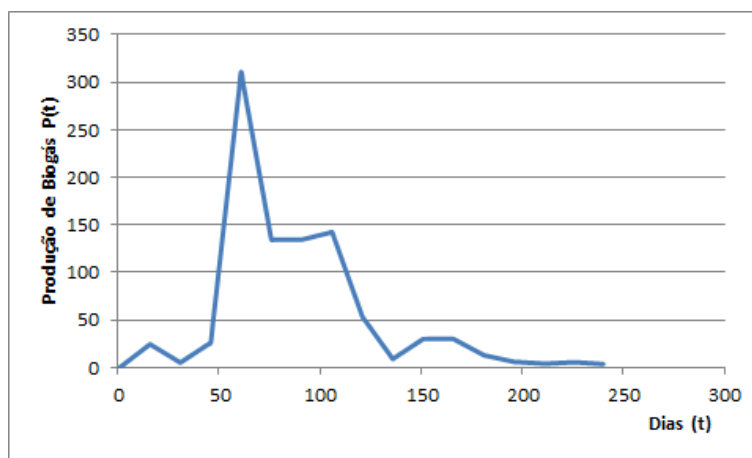


Figura 17 - Curva de produção diária de biogás dos Biodigestores 2 e 4.

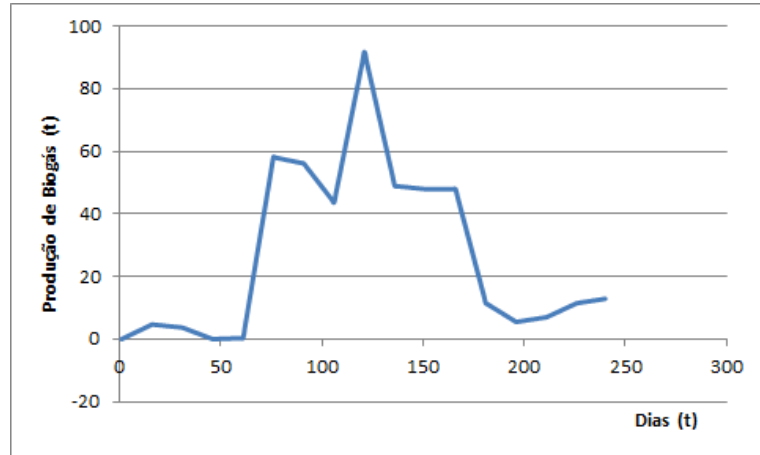


Figura 18 - Curva de produção diária de biogás do Biodigestor 3.

Após a aplicação do algoritmo AG, com dados da Tabela 7 e a produção estimada como já discutido, foi obtido um planejamento em que devem ser usados 4, dos 5 biodigestores existentes.

A Figura 19 apresenta o planejamento otimizado encontrado.

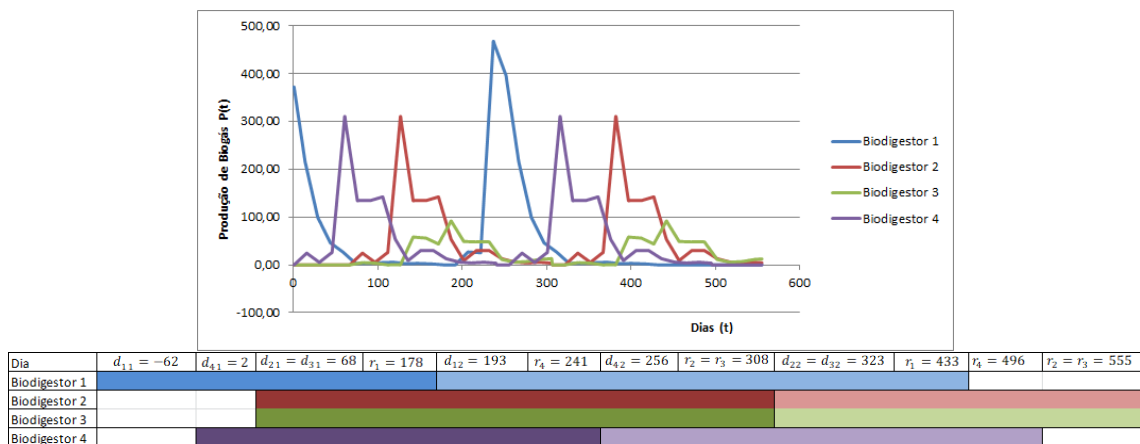


Figura 19 - Planejamento otimizado da produção diária de biogás para uma bateria com 4 biodigestores, determinado com o AG proposto.

Na Figura 19 é possível observar que os Biodigestores 1, 2 e 3 entraram em operação 2 vezes cada um, em que o Biodigestor 1 entrou em operação pela primeira vez 62 dias antes de começar o planejamento e terminou no dia 178, o

mesmo entrou em operação novamente no dia 193 do planejamento e terminou no dia 433. Os Biodigestores 2 e 3 entraram em operação pela primeira vez no dia 68 do planejamento e terminaram no dia 308, os mesmos entraram em operação novamente no dia 323 do planejamento e terminaram no dia 555. O Biodigestor 4 entrou em operação pela primeira vez no dia 2 do planejamento e terminou no dia 241, o mesmo entrou em operação novamente no dia 256 do planejamento e terminou no dia 496.

A Figura 20 apresenta a produção de biogás em todos os dias do planejamento da instância 1 com 4 biodigestores.

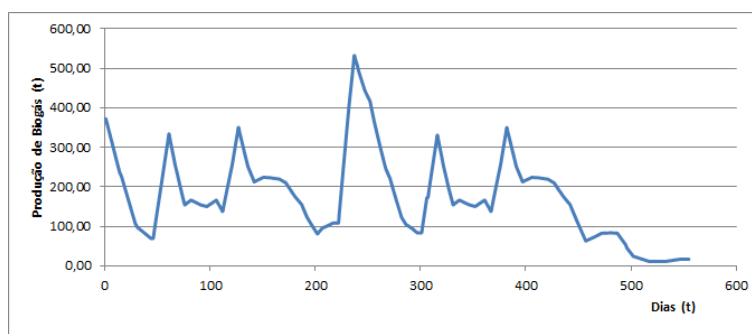


Figura 20 - Produção de biogás em todos os dias do planejamento da instância 1 com os 4 biodigestores.

A Figura 21 apresenta sobras diárias de biogás do planejamento da instância 1.

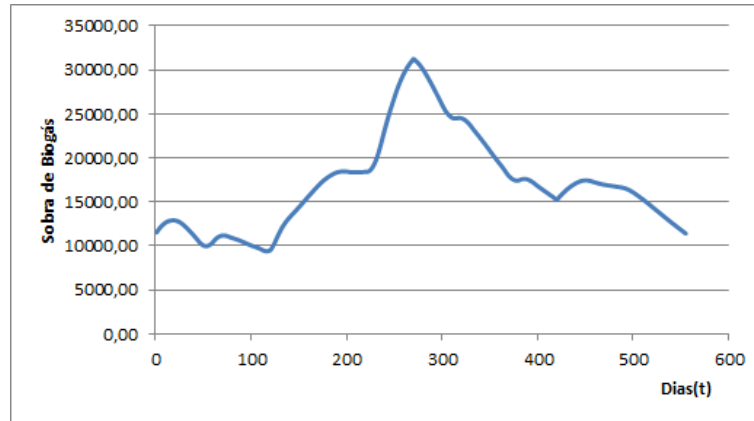


Figura 21 - Sobras de biogás do planejamento de biogás da instância 1.

Este planejamento é sumarizado na Tabela 7.

Tabela 7: Planejamento da instância 1 com uma bateria de 4 biodigestores.

T (dias)	B_j	N_j	Dia de início e término de cada biodigestor (d_{jk}, r_j)	Produção de cada Biodigestor (m^3)	Média de sobras diárias (m^3)	Tempo de CPU (horas)
555	1	2	$(-62, 178); (193, 433)$	39854,31	20,55	11,42
	2	2	$(68, 308); (323, 555)$	27871,83		
	3	2	$(68, 308); (323, 555)$	13282,13		
	4	2	$(2, 241); (256, 496)$	27895,68		
Total				108903,95		

Os resultados apresentados na Tabela 7 mostram que o melhor planejamento encontrado supriu a demanda diária de biogás com uma produção total de $108903,95m^3$ e uma média de sobra diária de $20,55m^3$ de biogás, a qual é 25,41% menor que a obtida sem otimização na Seção 3.1.

5.3.2 Instância 2

Para a instância 2, foram implementados 2 cenários distintos, no primeiro foram utilizados 3 biodigestores com as mesmas dimensões e mesmo tipo de alimentação, em um tempo total de planejamento de 30 dias com uma demanda diária constante igual a $2000m^3$ e uma demanda total de $60000m^3$. Os valores dos parâmetros do AG utilizados foram obtidos através de calibração de acordo com o problema abordado no cenário 1 e estão apresentados na Tabela 8. No segundo cenário foram utilizados 3 biodigestores com as mesmas dimensões e mesmo tipo de alimentação, em um tempo total de planejamento de 30 dias com uma demanda diária constante igual a $5000m^3$ e uma demanda total de $150000m^3$. Os valores dos parâmetros utilizados no AG também foram obtidos através de calibração de acordo com o problema abordado no cenário 2 e estão apresentados na Tabela 10.

5.3.3 Cenário 1

Tabela 8: Valores dos parâmetros utilizados no algoritmo.

Parâmetros	Valores
N	500 indivíduos
n	3 biodigestores
T	30 dias
T_{limp}	3 dias
K	30 dias
p	1 período
D_1	$2000m^3$
G	50 gerações
P_s	80%

Na Figura 22 é apresentada a curva de produção diária de biogás dos biodigestores.

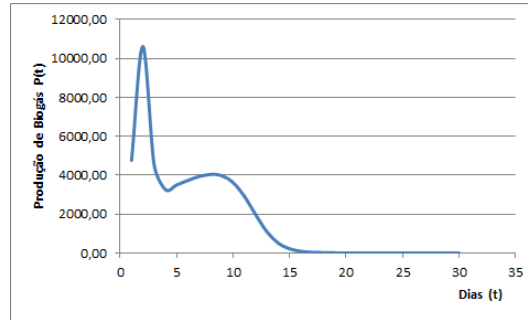


Figura 22 - Curva de produção diária de biogás dos biodigestores.

Pode ser notado na Figura 22, que o substrato utilizado provoca um pico de produção de biogás nos primeiros 4 dias, chegando a mais de $10000m^3$ no dia 2, a partir do dia 15 esta produção se estabiliza em torno de $4000m^3$ diários e a partir disto esta produção decai rapidamente de forma que, a partir do dia 15 já não há mais biogás sendo produzido. Neste contexto, torna-se difícil elaborar um planejamento de produção de biogás que atenda as demandas com baixa quantidade de sobras diárias, visto a grande variação de gás produzido neste período de operação.

A Figura 23 apresenta o melhor planejamento a partir do AG proposto para a instância 2 no Cenário 1.

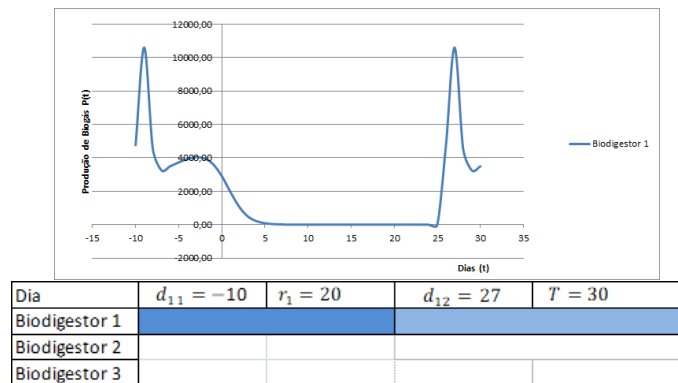


Figura 23 - Melhor planejamento da produção diária de biogás para uma bateria com 3 biodigestores, determinado com o AG proposto para a instância 2, Cenário 1.

Na Figura 23 é possível observar que o Biodigestor 1 entrou em operação 2 vezes, enquanto que os Biodigestores 2 e 3 não entraram em operação, sendo que o Biodigestor 1 entrou em operação pela primeira vez 10 dias antes de começar o planejamento e terminou no dia 20, o mesmo entrou em operação novamente no dia 27 do planejamento e terminou no dia 30. Desta forma um único biodigestor foi capaz de atingir a demanda.

A Figura 24 apresenta a produção de biogás em todos os dias do planejamento da instância 2, Cenário 1 com 1 biodigestores.

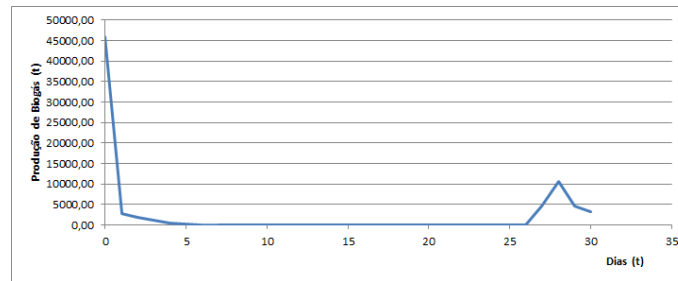


Figura 24 - Produção de biogás em todos os dias do planejamento com 1 biodigestor.

A Figura 25 apresenta sobras diárias totais de biogás do planejamento da instância 2 e a estrutura do melhor indivíduo.

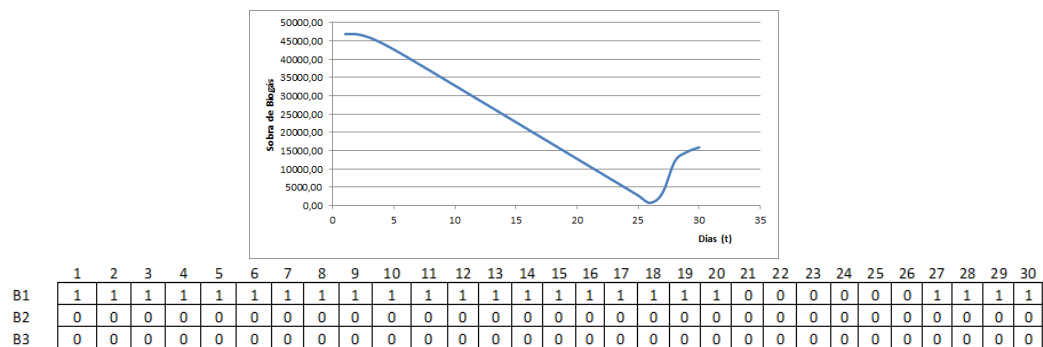


Figura 25 - Sobras de biogás do planejamento de biogás da instância 2 e estrutura do melhor indivíduo determinado pelo AG proposto.

Este planejamento está sumarizado na Tabela 9.

Tabela 9: Planejamento da instância 2 com 1 biodigestor

T	B_j	N_j	Dia de início e término de cada biodigestor (d_{jk}, r_j)	Produção de cada Biodigestor (m^3)	Média de sobras diárias (m^3)	Tempo de CPU (horas)
30	1	2	$(-10, 20); (27, 30)$	75924, 79	530, 82	0, 70
	2	0	—	0		
	3	0	—	0		
Total				75924, 79		

Os resultados apresentados na Tabela 9 mostram que o planejamento encontrado supriu a demanda total de biogás necessária, em que a produção total foi de $75924, 79m^3$.

5.3.4 Cenário 2

Tabela 10: Valores dos parâmetros utilizados no algoritmo.

Parâmetros	Valores
N	500 indivíduos
n	3 biodigestores
T	30 dias
T_{limp}	3 dias
K	30 dias
p	1 período
D_1	$5000m^3$
G	50 gerações
P_s	80%

A Figura 26 apresenta o melhor planejamento a partir do AG proposto para a instância 2 no cenário 2.

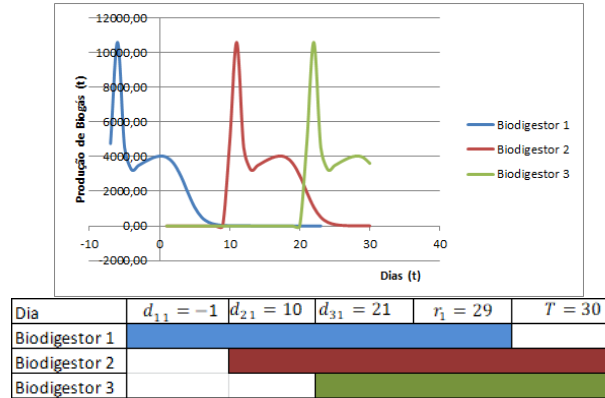


Figura 26 - Melhor planejamento da produção diária de biogás para uma bateria com 3 biodigestores, determinado com o AG proposto para a instância 2, Cenário 2.

Na Figura 26 é possível observar que os Biodigestores 1, 2 e 3 entraram em operação 1 vez cada um, sendo que o Biodigestor 1 entrou em operação pela primeira vez 1 dia antes de começar o planejamento e terminou no dia 29. O Biodigestor 2 entrou em operação pela primeira vez no dia 10 do planejamento e terminou no dia 30. O Biodigestor 3 entrou em operação pela primeira vez no 21 do planejamento e terminou no dia 30.

A Figura 27 apresenta a produção total de biogás em todos os dias do planejamento da instância 2, cenário 2 com 3 biodigestores.

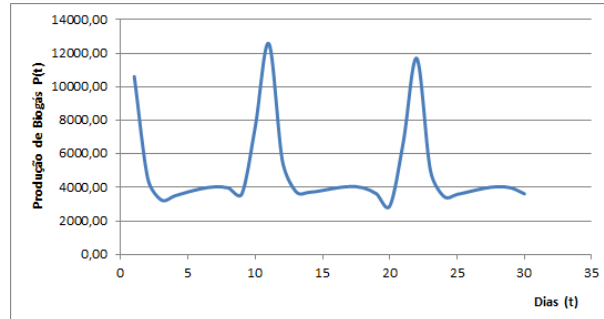


Figura 27 - Produção total de biogás em todos os dias do planejamento com os 3 biodigestores

A Figura 28 apresenta sobras diárias totais de biogás do planejamento da instância 2 e a estrutura do melhor indivíduo.

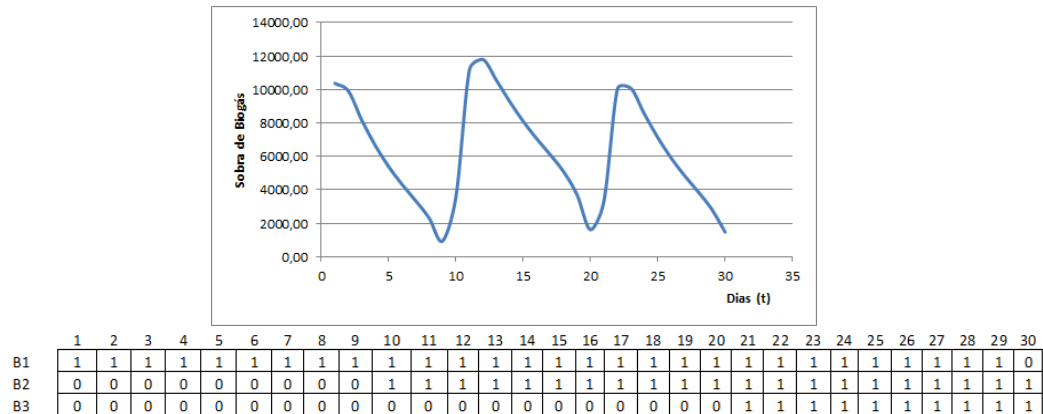


Figura 28 - Sobras de biogás do planejamento de biogás da instância 2 e estrutura do melhor indivíduo determinado pelo AG proposto.

Este planejamento é sumarizado na Tabela 11.

Tabela 11: Planejamento da instância 2 com uma bateria de 3 biodigestores

T	B_j	N_j	Dia de início e término de cada biodigestor (d_{jk}, r_j)	Produção de cada Biodigestor (m^3)	Média de sobras diárias (m^3)	Tempo de CPU (horas)
30	1	1	$(-1, 29)$	52769,39	49,14	0,68
	2	1	$(10, 30)$	52767,78		
	3	1	$(21, 30)$	45937,16		
Total				151474,33		

Os resultados apresentados na Tabela 11 mostram que o planejamento encontrado supriu a demanda total de biogás necessária, em que a demanda total produzida foi de $151474,33m^3$.

Os resultados da Instância 2 mostram que o AG proposto foi capaz de determinar um planejamento otimizado de produção de biogás. Neste sentido, esta ferramenta matemática/computacional, pode auxiliar os tomadores de decisões a planejarem de forma otimizada a construção de uma bateria de biodigestores.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi abordado o planejamento ótimo de produção de biogás em uma bateria de biodigestores. Este problema foi relatado ser de extrema dificuldade de implementação prática e solicitado investigações de técnicas matemáticas para auxílio na resolução deste. Neste contexto, este trabalho propôs uma metodologia utilizando a metaheurística algoritmo genético visando determinar planejamentos otimizados de produção de biogás para uma bateria de biodigestores. O algoritmo foi capaz de propor um planejamento que atende as demandas diárias de biogás com um número mínimo de biodigestores em operação, sobrando o mínimo possível de gás em cada dia. Desta forma evitou-se o aumento de custo com envasamento do biogás.

Pode-se concluir que a metodologia proposta se mostrou promissora para auxiliar tomadores de decisões nesta área, tendo grande potencial para auxílio a empresas produtoras de biogás.

Este trabalho foi bastante impactado pela pandemia de COVID-19, impossibilitando o uso de recursos computacionais mais adequados a esta pesquisa, o que dificultou a exploração de outras instâncias e outros métodos de resolução.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDUL, P.; LLOYD, D. Pathogen survival during anaerobic digestion: Fatty acids inhibit anaerobic growth of *Escherichia coli*. **Biotechnology Letters**, v.7, n.2, p.125–128, 1985.

ABREU, E. F. Estudo da diversidade microbiana metanogênica em reatores UASB tratando esgoto sanitário. Belo Horizonte, 2007. 82p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais.

ALCÓCER, J. C. A.; PINTO, O. R. O.; COSTA, M. D. G.; SILVA, M. E. D.; OLIVEIRA, J.; FONSECA, A. M. Use of biodigesters, cisterns and desalinators: social technologies as sustainable alternatives of coexistence with the Semiarid. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v.23, n.24, p.15, 2019.

ANDRADE, M. P.; CAMPOS, A. T.; GANDIA, R. M.; TONELLI, R. T. A.; FREITAS, L. N. S.; FERREIRA, J. C. Efficiency of batch model biodigesters in the treatment of swine manure in deep litter. **Theoretical and Applied Engineering**, v.3, p.12–19, 2019.

ANDREAZZI, M. A.; MENDES, A. R.; OLIVEIRA, K. V.; LIZAMA, M. A. P. Energy management: a synthesis of scientific publications on biodigestion for waste management. **Ambiente Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v.12, n.6, p.9, 2017.

ARAÚJO, A. P. C. Produção de Biogás a Partir de Resíduos Orgânicos Utilizando Biodigestor Anaeróbico, 2017.

ARRUDA, M. H.; AMARAL, L. P.; PIRES, O. P. J.; BARUFI, C. R. V. Dimensionamento de biodigestor para geração de energia alternativa. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, v.1, n.2, p.8, 2002.

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

BARICHELO, R. O uso de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso da região noroeste do Rio Grande do Sul. Santa Maria, 2010. 139p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria - UFSM/RS.

BATISTA, L. F. **Manual técnico : construção e operação de biodigestores: modelo Indiano**. EMBRATER, 1981. 54p.

BLICKLE, T.; THIELE, L. A Mathematical Analysis of Tournament Selection. In: Proceedings of the 6th International Conference (ICGA95), 1995. ; resumos. San Francisco: , 1995. 9-16.

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

BOWEN, E. J.; DOLFING, J.; DAVENPORT, R. J.; READ, F. L.; CURTIS, T. P. Low-temperature limitation of bioreactor sludge in anaerobic treatment of domestic wastewater. **Water Science Technology**, p.10, 2014.

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.

CARDOSO, E. L. B.; PÉREZ, A. C.; BERNAL, L. O.; VELÁZQUEZ, L. M. C.; GONZÁLEZ, L. L. Sistematización de aspectos teóricos sobre las tecnologías de producción de biogás a escala industrial. **Tecnología Química**, p.29–45, 2018.

CARVALHO, R. L.; ALMEIDA, T. S.; ROCHA, M. L. **Introdução às Metaheurísticas**. Palmas - TO: EDUFT, 2020. 77p.

COSTA, L. V. C. Tratamento de resíduos na suinocultura com uso de biodigestores. **PUBVET: Publicações em Medicina Veterinária e Zootecnia**, v.2, n.49, 2008.

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

COVOLAN, J. P. M. Programação não linear para dimensionamento de biodigestores rurais, 2018.

CREMONEZ, P. A.; FEIDEN, A.; ZENATTI, D. C.; CAMARGO, M. P.; NADALETI, W. C.; ROSSI, E.; ANTONELLI, J. Biodigestão anaeróbia no tratamento de resíduos lignocelulósicos. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v.2, p.21–35, 2013.

DE JONG, K. A. Analysis of the behavior of a class of genetic adaptative systems. Hampton, Virginia, 1975. 271p. Thesis(Ph.D.) - The University of Michigan Engineering Library.

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M. C. J. P.; ROSSI, M.; TAVARES, R.; SANTOS, C. Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada. Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022002000100031lng=en&nrm=abn, 2002. Acesso em: 06 fev. 2020.

FILHO, J. A. C. **Biogás: independência energética do Pantanal Mato-Grossense**. Corumbá: EBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1981. 53p.

GALBIATTI, J. A.; CAMELO, A. D.; SILVA, F. G.; GERARDI, E. A. B.; CHICONATO, D. A. Estudo qualiquantitativo do biogás produzido por substratos em biodigestores tipo batelada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.4, p.432–437, 2010.

GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning**. Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1989. 432p.

HALMEMAN, M. C. R.; STACHISSINI, M. G.; DAMACENO, F. M.; GABRIEL FILHO, L. R. A.; CREMASCO, C. P.; PUTTI, F. F. The deployment of biodigester systems in rural properties. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v.8, n.4, p.351–360, 2014.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence**. Michigan: The University of Michigan Press: , 1975.

IBRAHIM, S. B. S.; LIRA, R. C.; SANTOS, E. L.; AMORIM, E. L. C.; BELEM, T. J. L.; MACEDO, W. V.; SOUZA, S. P. L.; SILVA, S. J. C.; SILVA, J. C.; LIRA, J. P. A. Biodigestão anaeróbia do bagaço da cana-de-açúcar pré-tratado e utilizando excretas de frango como inóculo. **PUBVET: Publicações em Medicina Veterinária e Zootecnia**, v.11, n.12, p.1188–1297, 2017.

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.

KLEINSTEUBER, S. Special Issue on "Microbial Ecology of Anaerobic Digestion". **Bioengineering**, v.1, p.111–112, 2014.

KOMATSU, R. K.; SANTOS, C. H. P.; DE SOUSA, J. P. Gestão de Resíduos: Hábitos de descarte de Resíduos derivados da Produção Agrícola das propriedades em Assentamentos Rurais. **Id on Line Rev. Mult. Psic.**, v.13, n.44, p.700–722, 2019.

LACERDA, E. G. M.; CARVALHO, A. C. P. L. F.; LUDERMIR, T. B. Um Tutorial sobre algoritmos Genéticos. **RITA - Revista de Informática Teórica e Aplicada**, v.9, n.3, p.7–39, 2002.

LEE, M.; HIDAKA, T.; HAGIWARA, W.; TSUNO, H. Comparative performance and microbial diversity of hyperthermophilic and thermophilic co-digestion of kitchen garbage and excess sludge. **Bioresource Technology**, v.100, n.2, p.578–585, 2009.

LÓPEZ, M. N.; GONZÁLEZ, P. T.; VIRGEN, Q. A.; LIMÓN, N. V. Adaptación de inóculos durante el arranque de la digestión anaerobia con residuos sólidos orgánicos. **Información Tecnológica**, v.28, n.1, p.199–208, 2017.

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

MAO, C.; FENG, Y.; WANG, X.; REN, G. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.45, p.540–555, 2015.

MARCUCCI, L. W. Otimização da Produção de Biogás em Biodigestores Batelada. Botucatu, 2018. 65p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".

MILANEZ, A. Y.; GUIMARÃES, D. D.; MAIA, G. B. S.; SOUZA, J. A. P.; LEMOS, M. L. F. Biogás de resíduos agroindustriais: panorama e perspectivas. **BNDES Setorial**, , n.47, p.221–276, 2018.

MOLANO, L. P. C.; GUTIÉRREZ, K. P. V.; MOYANO, L. J. D.; ESTÉVEZ, J. J.; HERNÁNDEZ, H. E. Lighting the anaerobic digestion process in rural areas: struvite from cattle manure digestate. **Revista Colombiana de Biotecnología**, v.20, n.2, p.78–88, 2018.

MORENO, M. T. V. **Manual de Biogás**. Santiago de Chile: Chile: remoción de barreras para la electrificación rural con energías renovables, 2011. 119p.

MOURA, L. F.; TEIXEIRA, P. F. S.; GONDIM, F. A.; JUNIOR, F. H. N.; BARBOSA, R. M.; ARRUDA, J. F.; ALBIERO, D.; ALEXANDRIA, A. R. Viability of biofertilizer produced by an indian biodigester prototype applied to sunflower plants. **Journal of Agricultural Science**, v.9, n.10, p.253, 2017.

OLIVEIRA, P. A. V. **Tecnologias para o manejo de resíduos na produção de suínos: manual de boas práticas**. Concórdia, Santa Catarina: EMBRAPA-CNPSA, 2004. 109p.

OLIVEIRA, R. P. S. Condições Microbiológicas e Avaliação da Pasteurização em Amostras de Leite Comercializadas no Município de Piracicaba - SP. Piracicaba, 2005. 81p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

QUIROGA, J.; TSCHIERSCH, K.; BOHÓRQUEZ, O. A model of didactic guidelines to train designing and implementation of biodigesters. **Journal of Physics: Conference Series**, v.1161, 2019.

RICKEBOSCH, E.; DROUILLON, M.; VERVAEREN, H. Techniques for transformation of biogas to biomethane. **Biomass and Energy, Elsevier**, v.35, p.1633–1645, 2011.

RUSSELL, S.; NORVIG, P. **Artificial Intelligence: a modern approach**. New Jersey: Prentice Hall, 2003. 1112p.

SANTOS, D. F.; GUIMARÃES, W. F. F.; GONÇALVES, C. U. Biodigestores como Alternativa à Sustentabilidade Ambiental no Campo Brasileiro: Um Balanço Bibliográfico Acerca dos Modelos Indiano, Chinês e Batelada. **Ciência Agrícola**, v.15, p.35–39, 2017.

SCHWANTES, D.; GOLÇALVEZ JR., A. C.; RICHART, A.; CASTRO, G. M.; TRESPACH, F. W.; CEZARIO, N. S.; MANFRIN, J. Biodigestores alternativos no tratamento de resíduos orgânicos. **Scientia Agraria Paranaensis - Sci. Agrar. Parana.**, v.16, n.4, p.475–484, 2017.

TANAKA, G. C.; BALBO, A. R.; REIS, C. A.; FLORENTINO, H. O.; CHERRI, A. C. Simulação de um modelo de otimização de biodigestores para a produção sustentável de bioenergia. **Brazilian Journal of Business**, v.2, n.2, p.1140–1150, 2020.

VARNERO, M. T.; GALLEGUILLOS, K.; GUERRERO, D.; SUÁREZ, J. Producción de biogás y enmiendas orgánicas a partir del residuo olivícola (Alperujo). **Información Tecnológica**, v.25, n.5, p.73–78, 2014.

VEIGA, A. P. B.; MERCEDES, S. S. Biometano de aterros no Brasil: potencial e perspectivas. In: 10^o CONGRESSO SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E ENERGIA NO MEIO RURAL, Goiânia, 2015. ; resumos. São Paulo: AGRENER GD, 2015. 11.

VIEIRA, M. T.; MIRANDA, D. H.; BASQUEROTTO, C. H. C. C. Utilização do subproduto proveniente da produção de biogás como fertilizante. **Conexão Eletrônica**, v.13, n.1, p.12, 2016.

WANG, X.; CHEN, Y.; SUI, P.; GAO, W.; QIN, F.; WU, X.; XIONG, J. Efficiency and sustainability analysis of biogas and electricity production from a large-scale biogas project in China: An emergency evaluation based on LCA. **Journal of Cleaner Production**, , n.65, p.234–245, 2014.

XAVIER, C. A. N.; LUCAS JÚNIOR, J. Parâmetros de dimensionamento para biodigestores batelada operados com dejetos de vacas leiteiras com e sem uso de inóculo. **Engenharia Agrícola**, v.30, n.2, p.212–223, 2010.

ZHANG, C.; XIAO, G.; PENG, L.; SU, H.; TAN, T. The anaerobic co-digestion of food waste and cattle manure. **Bioresource Technology**, v.129, p.170–176, 2013.

ZHANG, Y.; BANKS, C. J.; HEAVEN, S. Co-digestion of source segregated domestic food waste to improve process stability. **Bioresource Technology**, v.114, p.168–178, 2012.