

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**GUILHERME FERREIRA VALÉRIO**

**ANÁLISE TERMODINÂMICA DO CICLO BRAYTON OPERANDO COM GASES  
ORIUNDOS DE UM BIODIGESTOR**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PATO BRANCO  
2019**

GUILHERME FERREIRA VALÉRIO

**ANÁLISE TERMODINÂMICA DO CICLO BRAYTON OPERANDO COM  
GASES ORIUNDOS DE UM BIODIGESTOR**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Mecânica da Coordenação de Engenharia Mecânica – COEME – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientadora: Prof. Dr. Francisco Augusto Aparecido Gomes

PATO BRANCO

2019

## FOLHA DE APROVAÇÃO

# ANÁLISE TERMODINÂMICA DO CICLO BRAYTON OPERANDO COM GASES ORIUNDOS DE UM BIODIGESTOR

Guilherme Ferreira Valério

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 29/11/2019 como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Pato Branco (UTFPR-PB). O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora julgou o trabalho **APROVADO**.

---

Prof. Dr. João Biesdorf  
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Matemática)

---

Prof. Dr. Romel da Rosa da Silva  
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Matemática)

---

Prof. Dr. Francisco Augusto Aparecido Gomes  
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Mecânica)  
Orientador

---

Prof. Dr. Paulo Cezar Adamczuk  
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica

## DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho principalmente ao meu pai Orandi Ferreira Valério e minha mãe Angelina Aparecida Portela Valério que sempre me apoiaram e me motivaram a nunca desistir e sempre lutar pelos meus sonhos, e pelo sonho de ser Engenheiro Mecânico

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradecer ao meu orientador Prof. Dr. Francisco Augusto Aparecido Gomes por acreditar que meu trabalho seria possível e que minha ideia seria promissora, pois foi durante uma de suas aulas da disciplina de Termodinâmica 2 sobre Ciclo Brayton que tive a ideia de juntar o ciclo ao biodigestor, além de me mostrar o caminho das pedras para realizar o trabalho.

Agradecer a minha família pelo apoio e pela motivação nos momentos que mais precisei para conseguir chegar ao fim da minha graduação, por cada um deles tenho um carinho especial, com destaque para meu pai Orandi Ferreira Valério e Angelina Aparecida Portela Valério que tiveram um esforço especial para me prover sustento e moradia além das outras necessidades, eles que me educaram e ensinaram os valores que foram indispensáveis para conseguir meu êxito.

Minhas irmãs Jéssica e Geisla que me ajudaram nessa empreitada, a Jéssica que me cobrava as notas e pedia pra ver meu boletim, e a Geisla que me dava muitos conselhos como irmã mais velha.

Ao meu colega que mais me incentivou o Caciano Migliavacca que foi por muito tempo minha dupla de estudo e um grande amigo incentivador. E todos meus colegas amigos e vizinhos que me ajudaram de alguma forma ter sucesso e passar por essa faze.

Finalmente todos os Professores e todo corpo acadêmico e colaboradores da Universidade Tecnológica Federal do Paraná que me possibilitaram ter a bagagem para ter sucesso na vida profissional.

## EPÍGRAFE

*If I have seen further it is by standing on the shoulders of Giants. (NEWTON, Isaac, 1676).*

*Se eu vi mais longe foi por estar de pé sobre ombros de gigantes. (NEWTON, Isaac, 1676).*

## RESUMO

VALÉRIO, Guilherme Ferreira. Análise Termodinâmica do Ciclo Brayton Operando com Gases Oriundos de um Biodigestor. 2019. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2019.

Esta pesquisa apresenta um estudo para a aplicação do biogás produzido num biodigestor utilizando o Ciclo Brayton. Inicialmente foi realizada uma análise da eficiência produtiva do biodigestor, com tal análise foi possível estimar qual seria a produção específica de biogás. Foi realizada uma análise termodinâmica para estimar a eficiência teórica do ciclo com base em valores obtidos na literatura. Por fim com a junção dos dados obtidos foi possível chegar numa relação entre a massa de alimentos sólidos que entra no processo com a potência disponibilizada pelo ciclo.

**Palavras-chave:** Análise termodinâmica. Biodigestores. Ciclo Brayton. Análise da Eficiência.

## **ABSTRACT**

VALÉRIO, Guilherme Ferreira. Thermodynamic Analysis of Brayton Cycle Operating with Gases from a Biodigester. 2019. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2019.

This research presents a study for the application of biogas produced in a biodigester using the Brayton Cycle. Was initially performed an analysis of the productive efficiency of the biodigester, with such analysis it was possible to estimate what would be the specific production of biogas. A thermodynamic analysis was performed to estimate the theoretical efficiency of the cycle based on values obtained in the literature. Finally, with the combination of the obtained data it was possible to come up with a relation between the mass of solid foods that enters the process with the power provided by the cycle.

**Keywords:** Thermodynamic Analysis. Biodigester. Brayton Cycle. Efficiency Analysis.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1 - Esquema de Produção do Biogás .....</b>	<b>16</b>
<b>Figura 2 - Diagrama Ciclo Brayton .....</b>	<b>17</b>
<b>Figura 3 - Ciclo Brayton diagrama PxV .....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 4 – Construção da Turbina .....</b>	<b>24</b>
<b>Figura 5 - Modelo Ilustrativo Biodigestor tipo Indiano.....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 6 - Componentes do Ciclo Brayton.....</b>	<b>27</b>
<b>Figura 7 - Consumo do dia 25/11/2003 .....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 8 - Ciclo Brayton TXP .....</b>	<b>33</b>
<b>Figura 9 - Purificação do Biogás.....</b>	<b>37</b>
<b>Figura 10 - Sólidos Utilizados na Biodigestão.....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 11 - Esquema dos Biodigestores Experimentais.....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 12 - Exemplo de Turbina .....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 13 - Captação do Biogás do Aterro.....</b>	<b>53</b>
<b>Figura 14 - Matriz Energética Brasil 2017.....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 15 - Matriz Energética Brasil 2005 e 2030.....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 16 - Matriz Nacional X Matriz Mundial.....</b>	<b>56</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 - Relação Massa de Resíduos e Massa de Biogás .....</b>	<b>32</b>
<b>Tabela 2 - Resultados Obtidos .....</b>	<b>46</b>
<b>Tabela 3 - Resultados Obtidos GE .....</b>	<b>49</b>
<b>Tabela 4 - Usinas Instaladas no Brasil .....</b>	<b>52</b>
<b>Tabela 5 - Redução dos Sólidos Voláteis .....</b>	<b>57</b>
<b>Tabela 6 - PH da Mistura .....</b>	<b>58</b>

## LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SV	Sólidos Voláteis	
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais	-
PH	Potencial Hidrogeniônico	
GE	General Eletric	
RU	Restaurante Universitário	
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná	
Cp	Calor específico do ar a pressão constante	[KJ.(Kg.K) <sup>-1</sup> ]
K	Razão de calores específicos do ar	
<i>VRO</i>	Volume de resíduos obtidos	L.dia <sup>-1</sup>
<i>Msv</i>	Massa de sólidos	g.dia <sup>-1</sup>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética	

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	14
1.2 OBJETIVOS .....	15
1.2.1 Objetivo Principal .....	15
1.2.2 Objetivos Específicos .....	16
1.3 JUSTIFICATIVA .....	17
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	18
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>19</b>
2.1 REVISÃO TERMODINÂMICA.....	19
2.1.1 Lei Zero da Termodinâmica .....	19
2.1.2 Primeira Lei da Termodinâmica .....	19
2.1.3 Segunda Lei da Termodinâmica .....	19
2.1.4 Lei da Conservação da energia .....	19
2.1.5 Equação da Continuidade .....	20
2.2 EFICIÊNCIA ISOÊNTRÓPICA.....	21
2.3 Ciclo Brayton .....	23
2.4 BIODIGESTOR .....	25
<b>3 METODOLOGIA (MATERIAIS E MÉTODOS)</b> .....	<b>27</b>
3.1 DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO CICLO .....	27
3.1.1 Eficiência do Compressor.....	28
3.1.2 Eficiência da Câmara de Combustão .....	28
3.1.3 Eficiência Geral da Turbina .....	29
3.2 EFICIÊNCIA DE PRODUÇÃO DO BIOGÁS.....	29
3.3 DEMANDA ENERGÉTICA.....	30
3.3.1 Consumo Mensal .....	30

3.3.2 Equipamentos Analisados .....	30
3.3.3 Dados Obtidos.....	30
3.4 EFICIENCIA VOLUMÉTRICA DE PRODUÇÃO .....	31
3.5 POTÊNCIA DISPONÍVEL.....	32
3.6 PARAMETROS DO CICLO BRAYTON.....	32
3.7 EFICIÊNCIA CORRIGIDA.....	36
3.7.1 Potencial Corrigido .....	37
3.8 POTENCIAL CALORÍFICO DO BIOGÁS.....	37
3.9 POTÊNCIA LIQUIDA DO CICLO .....	38
3.9.1 Quantificando os Valores em Massa.....	38
3.9.2 Quantificando os Valores em Energia .....	43
3.10 DIMENSIONAMENTO DO CICLO .....	44
3.10.1 Para a Menor Demanda Diária .....	44
3.10.2 Volume do Biodigestor para a Demanda Menor .....	45
3.11 POTÊNCIA DO CICLO.....	46
3.11.1 Dimensionamento da Turbina .....	46
3.11.2 Volume do Biodigestor para Turbina .....	49
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>51</b>
4.1 APLICABILIDADE .....	51
4.2 POSSÍVEIS CLIENTES.....	51
4.3 SITUAÇÃO NO BRASIL.....	52
4.4 MATRIZ ENERGÉTICA.....	54
4.4.1 Matriz Nacional e Matriz Mundial .....	55
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>57</b>
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	59
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>60</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O consumo mundial de energia está crescendo gradualmente nos últimos anos, junto a ele a dependência de fontes não renováveis, devido a isso necessitamos de avanços e opções de fontes renováveis e confiáveis para geração de energia.

Um setor muito promissor é a geração através de biogás, uma opção interessante seria o uso de resíduos alimentícios colocados em biodigestores para produção de biogás. Com um subproduto inerte e com alto poder nutritivo para a fauna ao invés do chorume um produto altamente tóxico ao ciclo biológico, principalmente para o ciclo da água.

O biogás após ser produzido pelo biodigestor, em seguida purificado, após o tratamento utilizado em uma turbina operando de acordo com o Ciclo Brayton para gerar potência de eixo e posteriormente eletricidade através de um gerador que não será abordado no estudo. Regenerando o calor da exaustão, que nesse tipo de ciclo atinge temperaturas elevadas, posteriormente pode ser aproveitado regenerada para outro sistema de potência como o Ciclo Rankine, ou através de um trocador de calor com várias possíveis aplicações.

### 1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Neste trabalho será estudado a viabilidade da utilização de resíduos orgânicos digeridos anaerobicamente dentro de um biodigestor apropriado para produção de biogás. O gás purificado através do borbulhamento em uma solução de hidróxido de sódio (NaOH), retirando o gás sulfídrico que é altamente corrosivo sendo o principal impedimento para aplicação comercial do biogás, além disso, o borbulhamento retira também o gás carbônico (CO<sub>2</sub>), restando apenas metano (CH<sub>4</sub>) puro e de alta qualidade. Com o combustível purificado e de boa qualidade podemos estimar o poder calorífico.

Em seguida analisando a viabilidade e eficiência global da queima em um sistema termodinâmico operando com uma turbina a gás modelada de acordo com Ciclo Brayton para potência de eixo e transformação em energia elétrica. Regenerado o potencial restante de calor da saída, principalmente como trocador de calor ou em um Ciclo Rankine que opera com turbina a vapor.

Para o biodigestor foi relacionado uma mistura de diferentes tipos de matérias orgânicas e seu rendimento na produção de biogás.

## 1.2 OBJETIVOS

Os dados de produção de biogás serão obtidos na literatura, em mL.g<sup>-1</sup>.SV, sendo assim, uma relação entre a quantidade de sólidos voláteis na mistura e quantos mililitros de biogás será produzido. Os sólidos voláteis são a principal fonte para os microrganismos anaeróbicos produzirem o biogás pela sua decomposição.

Esperamos ser possível relacionar a massa sólida bruta unitária que entra no sistema com seu respectivo volume correspondente de combustível puro produzido. Dimensionar o volume necessário da matéria orgânica mais água para suprir uma certa demanda. O volume total e tipo de biodigestor a ser adotado.

Calcular o tamanho e potência do conjunto turbina, compressor e câmara de combustão, geralmente vendidos em blocos que muitas vezes tem potencias elevadas.

O gerador elétrico vale ressaltar que na literatura encontramos eficiências próximas de 99%, o que mostra avanço em seu rendimento, portando iremos adotar que o aproveitamento final liquido do eixo é total, e que único requisito é ser gerado em 60Hz que é o padrão do sistema interligado nacional.

### 1.2.1 Objetivo Principal

Serão analisados experimentos existentes de biodigestores para obter as boas condições para produção, armazenamento e tratamento do biogás. A melhor proporção da mistura agua e sólidos para otimizar a produção. Controlar o processo para que o mesmo tenha uma produção quase que constante, ressaltando a dificuldade pois os experimentos em geral são realizados em batelada e não em regime contínuo como os biodigestores em operação. Podemos apresentar alguns indicadores que poderão ser extrapolados para melhoria do regime contínuo.

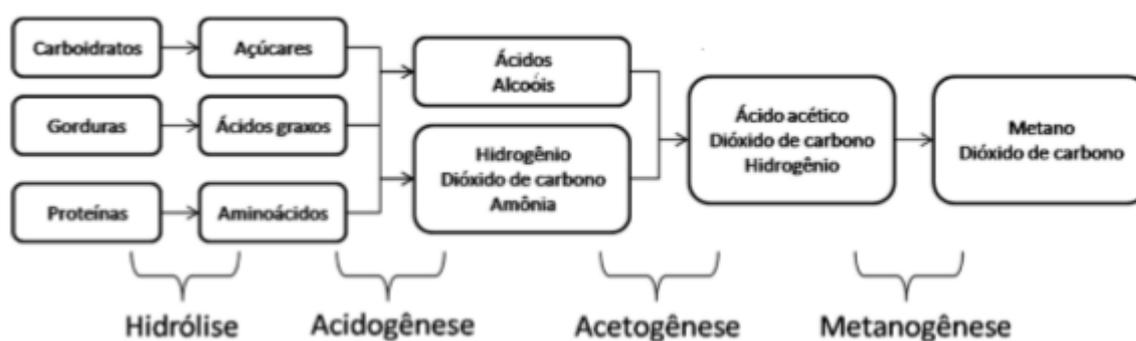
Um fator determinante é a manutenção de um PH alcalino sendo no mínimo 6 o valor que interrompe a produção. Um bom PH favorece o ambiente para a cultura microbiológica anaeróbica desejada.

Estudar a eficiência e qualidade do gás, um estudo teórico da eficiência do Ciclo Brayton, utilizar valores baseados em sistemas de geração a gás existentes.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

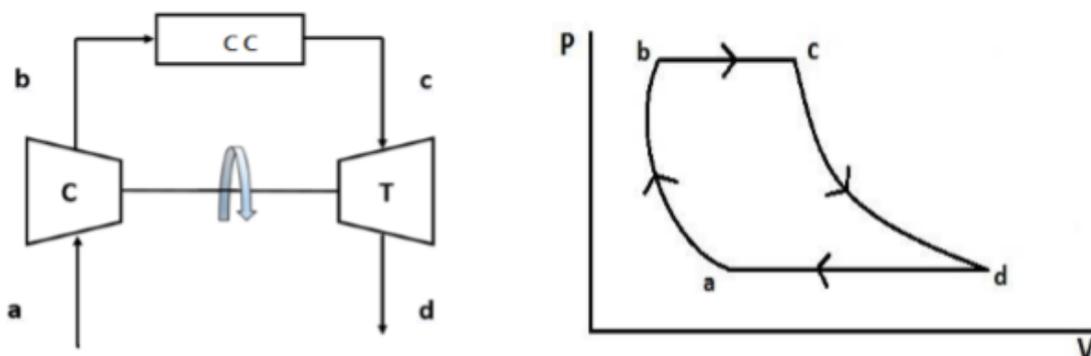
- Estudar o processo produtivo do biogás, quais as melhores condições para sua produção, considerando os fatores químicos e físicos. O PH fator de parada de produção, a homogeneidade, suas variáveis de temperatura.
- Dimensionar e relacionar o volume do biodigestor para atender a demanda de uma universidade, com base nos valores específicos unitários, levando em conta a produção específica e a diluição da mistura.
- Calcular o rendimento teórico do ciclo em questão, estipular o regime de trabalho para melhor atender a demanda e como seria uma boa forma de gerenciamento do fornecimento, a melhor forma de aproveitar a energia da exaustão, sendo como calor ou regeneração, ou o discriminar o potencial genericamente.

**Figura 1 - Esquema de Produção do Biogás**



Fonte: CEMIG (2012).

Figura 2 - Diagrama Ciclo Brayton



Fonte: Viera (2016)

### 1.3 JUSTIFICATIVA

O processo de biodigestão atualmente é bem conhecido e aplicado em certos setores com destaque para granjas e confinamentos, sendo aplicado principalmente em dejetos de animais, mas quando o assunto são os restos de comida é pouco difundido.

Vale ressaltar que em grande escala restos de comida também podem ser altamente prejudiciais ao meio ambiente, se não descartados corretamente. Produzindo principalmente chorume. O chorume é altamente tóxico ao ciclo das águas, sendo assim, de certa forma a todo ciclo biológico, pois a água é a base de todas as formas de vida, conseqüentemente ao solo também, porque a parte do chorume que fica por um tempo na superfície é letal a flora, e tóxico aos que dela se alimentam.

Quando esse resíduo é colocado em um biodigestor o problema vira solução produzindo biogás e seu subproduto tanto líquido como sólido é um adubo orgânico inerte e altamente nutritivo, com grande poder fertilizante. Outro ponto forte a ser estudado é o desempenho desse biogás em uma turbina de Ciclo Brayton, pois atualmente trata do ciclo de combustão interna mais eficiente existente. Com grande ganho significativo de eficiência quando combinado com um Ciclo Rankine trabalhando com o excesso de calor da exaustão.

A regeneração do calor de saída num trocador de calor pode ser aproveitado para aquecer um fluido, como por exemplo água quente ou ar quente, sendo ambos de grande versatilidade de aproveitamento. Como a temperatura é alta, ao contrário do gás usado no motor operado como Ciclo Otto adaptado ao biogás que

é limitado ou a potência de eixo ou queima para gerar calor em outro dispositivo como por exemplo um fogão adaptado, pois a exaustão possui baixo potencial regenerativo.

#### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

No segundo capítulo, é feita uma breve revisão bibliográfica dos assuntos citados no trabalho, onde se tem o embasamento teórico para o estudo e as considerações necessárias.

A seguir, no terceiro capítulo é apresentado quais metodologias e materiais serão utilizadas para obtenção dos resultados e validação dos cálculos realizados a fim da verificação do estudo, análise da viabilidade do processo.

No quarto capítulo os resultados obtidos serão apresentados e verificado a sua validade, feito uma análise se são ou não viáveis, alguns dados já existentes.

No quinto capítulo serão apresentados os resultados obtidos através de métodos apropriados, conclusões cabíveis, considerações finais, algumas possíveis aplicações, e sugestões de futuros trabalhos que poderiam agregar em material ou eficiência para melhor aprofundamento do trabalho.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será abordado uma revisão breve da bibliografia existente, as justificativas de escolha de cada método de resolução do problema as teorias relacionadas e a discussão de cada um dos problemas abordados.

### 2.1 REVISÃO TERMODINÂMICA

#### 2.1.1 Lei Zero da Termodinâmica

A Lei Zero da Termodinâmica declara que se dois corpos estão em equilíbrio térmico com um terceiro corpo, eles também estão em equilíbrio térmico entre si (ÇENGEL; BOLES, 2006).

#### 2.1.2 Primeira Lei da Termodinâmica

A Primeira Lei da Termodinâmica, também conhecida como princípio da conservação de energia, oferece uma base sólida para o estudo das relações entre as diversas formas de energia e suas interações. Com base em observações experimentais, enuncia que a energia não pode ser criada nem destruída durante um processo, ela pode apenas mudar de forma (ÇENGEL; BOLES, 2006).

#### 2.1.3 Segunda Lei da Termodinâmica

A Segunda Lei da Termodinâmica, segundo o enunciado de Kelvin Planck, uma máquina térmica deve trocar calor com uma fonte a baixa temperatura, além de uma fonte a alta temperatura, para se manter em operação (ÇENGEL; BOLES, 2006).

#### 2.1.4 Lei da Conservação da energia

A lei da conservação de energia ou também pode ser chamada de primeira lei da termodinâmica, nesse caso, será abordada sua equação em termos de entalpia e para um volume de controle em regime permanente escoamento permanente.

Processos com volume de controle se adequam dispositivos como: turbinas, compressores, bocais, caldeiras, condensadores entre outros. Esse modelo não incluirá as fases transitórias, de entrada em operação ou parada, serão abordados apenas os períodos em que a operação é estável (VAN WYLEN; SONNTAG; BORGNAKKE, 1995).

Consideramos agora o significado de cada uma das hipóteses para o processo em regime permanente.

1 Se o volume de controle não se move, relativamente ao sistema de coordenadas, todas as velocidades medidas em relação a esse sistema são também velocidades relativas à superfície de controle e não há trabalho associado com a aceleração do volume de controle.

2 Se o estado da massa em cada ponto do volume de controle, não varia com o tempo, então (VAN WYLEN; SONNTAG; BORGNAKKE, 1995).

$$\frac{dm_{VC}}{dt} = 0 \text{ e } \frac{dE_{VC}}{dt} = 0 \quad (1)$$

Onde:

$dm_{VC}$  : é a variação da massa do volume de controle, [Kg];  
 $dE_{VC}$  : é a variação da energia interna do volume de controle, [J];  
 $dt$  : é a variação do tempo, [s].

### 2.1.5 Equação da Continuidade

$$\sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_s \quad (2)$$

Onde:

$\sum \dot{m}_e$  :é o somatório do fluxo de massa que entra no volume de controle, [Kg.s<sup>-1</sup>];

$\sum \dot{m}_s$  :é o somatório do fluxo de massa que saí do volume de controle, [Kg.s<sup>-1</sup>].

Primeira Lei da termodinâmica para volume de controle.

$$\dot{Q}_{VC} + \sum \dot{m}_e \left( h_e + \frac{v_e^2}{2} + gZ_e \right) = \sum \dot{m}_s \left( h_s + \frac{v_s^2}{2} + gZ_s \right) + \dot{W}_{VC} \quad (3)$$

Onde:

$\dot{Q}_{VC}$  :é o fluxo de calor do fluido através do volume de controle, [KJ.s<sup>-1</sup>];

$\sum \dot{m}_s$  :é o somatório do fluxo de massa que saí, [Kg.s<sup>-1</sup>];

$h_e$  :é a entropia de entrada do fluido, [KJ.Kg<sup>-1</sup>];

$h_s$  :é a entropia de saída do fluido, [KJ.Kg<sup>-1</sup>];

$\frac{v_e^2}{2}$  :é a velocidade de entrada do fluido, [m.s<sup>-1</sup>];

$\frac{v_s^2}{2}$  :é a velocidade de saída do fluido, [m.s<sup>-1</sup>];

$gZ_e$  :é energia potencial gravitacional da entrada do volume de controle, [KJ.Kg<sup>-1</sup>];

$gZ_s$  :é energia potencial gravitacional da entrada do volume de controle, [KJ.Kg<sup>-1</sup>];

$\dot{W}_{VC}$  :é o fluxo de trabalho através do volume de controle, [KJ.s<sup>-1</sup>].

## 2.2 EFICIÊNCIA ISOÊNTROPICA

Em geral podemos dizer que a eficiência de uma máquina térmica envolve uma comparação entre o desempenho real da máquina, sob dadas condições, e o desempenho que ela teria num processo ideal (VAN WYLEN; SONNTAG; BORGNAKKE,1995).

$$\eta_{isoentrópico} = \frac{W_{real}}{W_{teórico}} \quad (4)$$

Onde:

$\eta_{isoentrópico}$  :é o rendimento isoentrópico do componente, ;

$W_{real}$  :é o trabalho real realizado pelo componente, [KJ.s<sup>-1</sup>];  
 $W_{teórico}$  :é o trabalho teórico realizado pelo componente, [KJ.s<sup>-1</sup>].

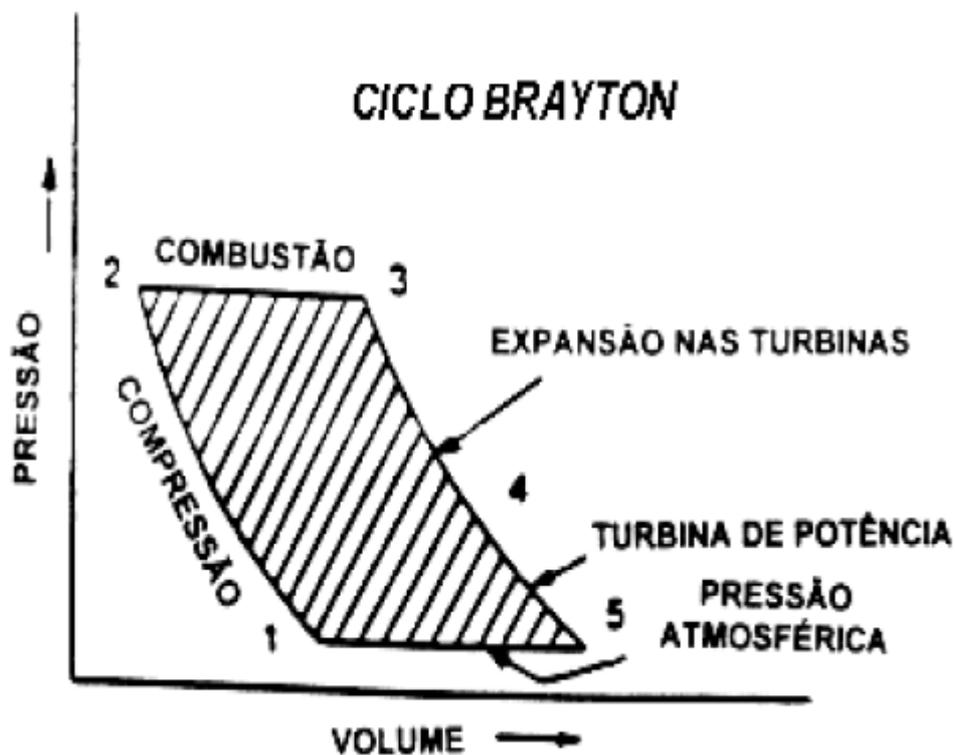
Devido às perdas ocorridas no sistema, principalmente a transferência de calor para o meio ou até mesmo mudança no arranjo químico devido ao processo de combustão fazem com que nem todo o calor existente potencialmente na mistura seja convertido em trabalho.

Segundo Kelvin – Planck é impossível construir um dispositivo que opere num ciclo termodinâmico e que não produza outros efeitos além do trabalho líquido e troca de calor com um único reservatório térmico.

Esse enunciado estabelece que é impossível construir um motor térmico que opere segundo um ciclo termodinâmico que receba calor e produza uma quantidade igual de trabalho, é necessário realizar a troca de calor entre dois reservatórios de alta e de baixa temperatura (VAN WYLEN; SONNTAG; BORGNAKKE,1995).

## 2.3 Ciclo Brayton

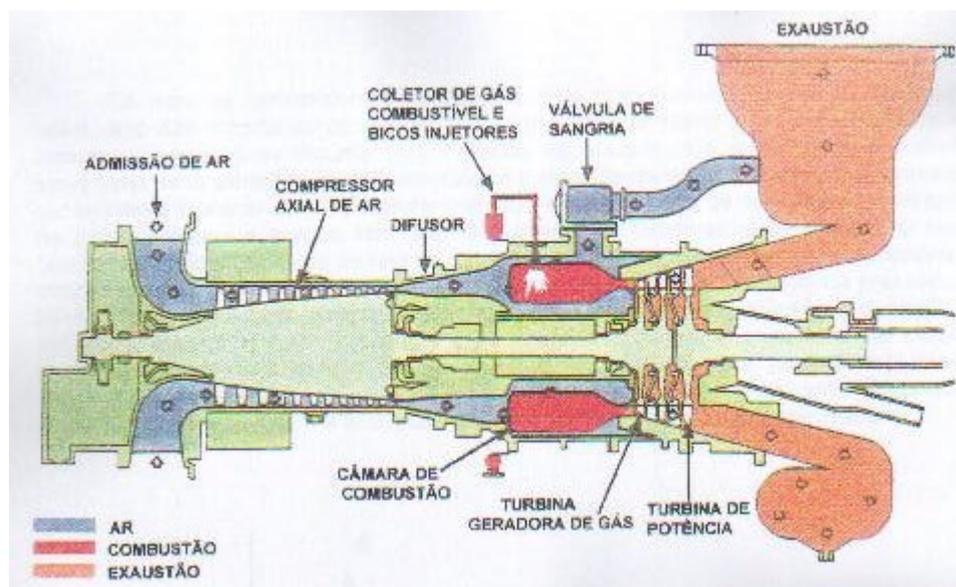
Figura 3 - Ciclo Brayton diagrama PxV



Fonte: Queiroz; Matias (2003).

As turbinas a ar são modeladas conforme o Ciclo Brayton, ciclo é composto por quatro estágios e todos os processos são internamente reversíveis. Sendo assim, não existe perda de energia por aumento de entropia ou para o meio, os quatro processos envolvidos no ciclo são eles: compressão, combustão e expansão, exaustão.

**Figura 4 – Construção da Turbina**



Fonte: Queiroz; Matias (2003).

Compressão é um processo onde se reduz o volume do gás afim de aumentar sua pressão e conseqüente temperatura é feita num equipamento chamado compressor em geral de vários estágios e cada estágio aumenta entre 1,1 e 1,4 a pressão do fluido através de um processo de aceleração e desaceleração do fluido. Os compressores podem ser totalmente axial ou axial com o último estágio centrífugo.

O compressor axial permite obter altas vazões de ar, até 700 kg/s, e eficiência isoentrópica com valores típicos entre 85 a 90 %, sendo por isso empregado em praticamente todas as turbinas a gás de médio e grande porte. (QUEIROZ; MATIAS, 2003).

Combustão é um processo onde se adiciona calor ao fluido através da injeção de gás e posterior queima de mistura ar-combustível. A combustão realizada na câmara de combustão esse, equipamento possui alta eficiência em torno de 95%, a queima é realizada sem entrar em contato com a parede e uma parte do ar é redirecionado pelas laterais da câmara antes de entrar na mesma para o resfriamento do equipamento.

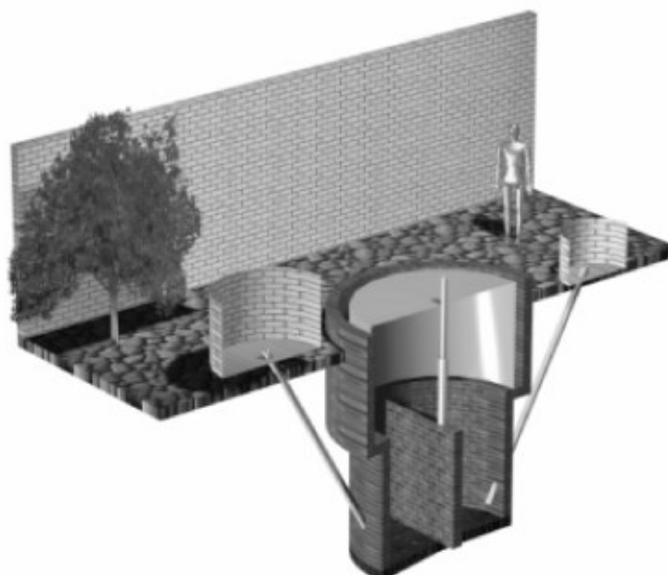
Expansão é o processo no qual o gás, à alta temperatura, é expandido e sua energia se transforma em potência de eixo. As pás da roda de turbina é responsável pelo processo de expansão, é o equipamento mais eficiente para realizar o processo, ao fim do processo o gás é liberado para atmosfera.

As turbinas empregadas na geração de potência à gás são na grande maioria do tipo axiais por apresentarem maior eficiência isoentrópica, variando entre 75 a 90 %. (QUEIROZ; MATIAS, 2003).

## 2.4 BIODIGESTOR

O biodigestor é o equipamento, onde na prática se produz biogás, sua construção é bem simples trata-se de uma câmara fechada onde é colocado material orgânico com a adição de água, sofre decomposição e gera biogás que será acumulado na câmara superior (DEGANUTTI; PALHACI; ROSSI; TAVARES; SANTOS, 2002).

**Figura 5 - Modelo Ilustrativo Biodigestor tipo Indiano**



**Fonte: Deganutti; et al (2002).**

A decomposição sofrida pelo material dentro do biodigestor chama-se decomposição anaeróbica, dessa decomposição obtêm-se biogás e biofertilizantes, o biofertilizante tem grande potencial para o uso na agricultura além de ser limpo e inerte ao meio ambiente, o biogás tem grande potencial energético.

O biogás é composto por uma mistura de gases metano e dióxido de carbono, podendo conter gás sulfídrico (prejudicial ao metal) e nitrogênio. O processo de formação do biogás é comum na natureza, principalmente em locais onde a celulose sofre decomposição natural. É produto da fermentação com ausência de ar chamada digestão anaeróbica, pode ser obtido de resíduos vegetais e lixo orgânico industrial ou residencial, em condições adequadas de umidade.

O principal componente do biogás é o metano representando cerca de 60 a 80% na composição do total da mistura. O metano é um gás incolor, altamente combustível, não deixa fuligem e com um mínimo de poluição. Em função da porcentagem com que o metano participa na composição do biogás, o poder calorífico deste pode variar de 5.000 a 7.000 kcal por metro cúbico. Esse poder calorífico pode chegar a 12.000 kcal por metro cúbico uma vez eliminado todo o gás carbônico da mistura (DEGANUTTI; PALHACI; ROSSI; TAVARES; SANTOS, 2002).

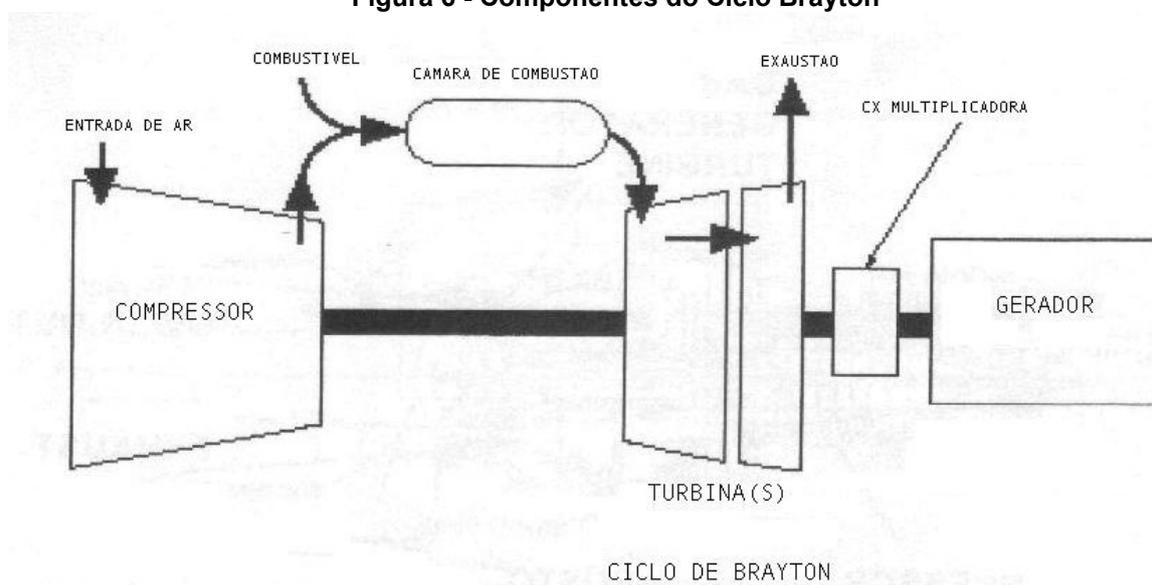
### 3 METODOLOGIA (MATERIAIS E MÉTODOS)

Este capítulo é destinado a apresentação dos materiais e métodos utilizados para a construção desse trabalho, e busca dos resultados pretendidos de eficiência e proveito energéticos do ciclo, além de modelos de biodigestores e a relação entre o volume de resíduos necessários para uma determinada demanda de gás e conseqüente energia.

#### 3.1 DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO CICLO

Para determinação da eficiência esperada do ciclo será necessário estudar a eficiência de cada componente do ciclo separadamente. A partir desse estudo será possível determinar analiticamente como seria o desempenho do ciclo em aproveitar o gás gerado pelo biodigestor.

**Figura 6 - Componentes do Ciclo Brayton**



**Fonte: Queiroz; Matias (2003).**

### 3.1.1 Eficiência do Compressor

Conforme citado acima temos os valores de eficiência dos compressores utilizados nesse tipo de conjunto. A partir disso pode-se determinar analiticamente a eficiência isentrópica do compressor.

Nos compressores a eficiência está diretamente ligado ao quão próximos o processo de compressão está do processo ideal reversível sem aumento de entropia. Nesse caso vamos adotar os valores encontrados na literatura entre 85 e 90 %, com isso poderíamos estipular o consumo real do compressor em termos de energia para a realização do trabalho requerido.

$$W_{Compressor} = \frac{W_{LiqComp}}{\eta_{Compressor}} \quad (5)$$

Onde:

$W_{Compressor}$  :é o trabalho consumido pelo compressor, [KJ.s<sup>-1</sup>];  
 $W_{LiqComp}$  :é o trabalho líquido realizado pelo compressor, [KJ.s<sup>-1</sup>];  
 $\eta_{Compressor}$  :é o rendimento teórico do compressor .

### 3.1.2 Eficiência da Câmara de Combustão

As câmaras de combustão são componentes com bom rendimento, operam com mecanismo relativamente simples se comparada com os outros sistemas. Sua eficiência, conforme a literatura, entre 90 a 98 %, sendo que.

$$Q_{Combustivel} = \frac{Q_{Liq}}{\eta_{Combustor}} \quad (6)$$

Onde:

$Q_{Combustivel}$  :é o calor fornecido pelo combustível, [KJ.s<sup>-1</sup>];  
 $Q_{Liq}$  :é o calor efetivamente disponível para o ciclo, [KJ.s<sup>-1</sup>];  
 $\eta_{Combustor}$  :é a eficiência do combustor .

### 3.1.3 Eficiência Geral da Turbina

Os valores da eficiência desse componente já foram citados acima, item 2.3. Com esses parâmetros podemos determinar qual será o trabalho de eixo disponibilizado pelo ciclo. Considerando valores de eficiência de geradores comerciais pode-se chegar ao valor da energia elétrica gerada pelo sistema.

Na seção de descarga da turbina a temperatura é razoavelmente alta, por esse motivo, essa energia térmica inoperante pode ser utilizada como um processo de cogeração de energia, assim como geração de calor para componentes periféricos do sistema térmico.

Com os valores da eficiência isoentrópica da turbina, a energia que será extraída para a subsequente conversão em energia elétrica, será determinada pela seguinte expressão

$$W_{Turbina} = \frac{W_{LiqTurb}}{\eta_{Turbina}} \quad (7)$$

Onde:

$W_{Turbina}$  :é o trabalho consumido pela turbina, [KJ.s<sup>-1</sup>];

$W_{LiqTurb}$  :é o trabalho líquido realizado pela turbina, [KJ.s<sup>-1</sup>];

$\eta_{Turbina}$  :é o a eficiência da turbina .

## 3.2 EFICIÊNCIA DE PRODUÇÃO DO BIOGÁS

Existem diversos tipos de biodigestores entre eles se destacam o Indiano, o chinês e o canadense. Independentemente do modelo o processo de biodigestão é um processo natural anaeróbico, necessitando de uma determinada umidade e ausência de oxigênio para produção de uma parcela considerável de biogás com o menor nível de dióxido de carbono possível, principal impureza.

Segundo Kubaská et al. (2010) que fez uma análise utilizando mais de 15 tipos de restos de comida comuns ao cotidiano, foram mapeados seus potenciais na geração de biogás. A partir desses resultados é possível efetuar os cálculos para o dimensionamento de um sistema de geração de potência a gás.

### 3.3 DEMANDA ENERGÉTICA

Com base no trabalho desenvolvido por Rodrigues et. al. (2003), realizado em um restaurante universitário (R.U), com o foco de obter o consumo elétrico a partir da instalação de um medidor individual, foi possível obter os valores da demanda de energia elétrica. Com esses dados, a demanda energética pode ser estimada, conseqüentemente a energia motriz necessária para atender a demanda. Além disso, estimar o volume necessário de resíduos orgânicos.

#### 3.3.1 Consumo Mensal

O presente trabalho será desenvolvido baseado nos dados obtidos em Rodrigues et al (2003), cujo consumo mensal de energia elétrica de um restaurante universitário (R.U.) foi medido durante 30 dias, no período de 03 de novembro a 02 de dezembro de 2003.

#### 3.3.2 Equipamentos Analisados

Os seguintes equipamentos elétricos foram analisados quanto sua demanda energética:

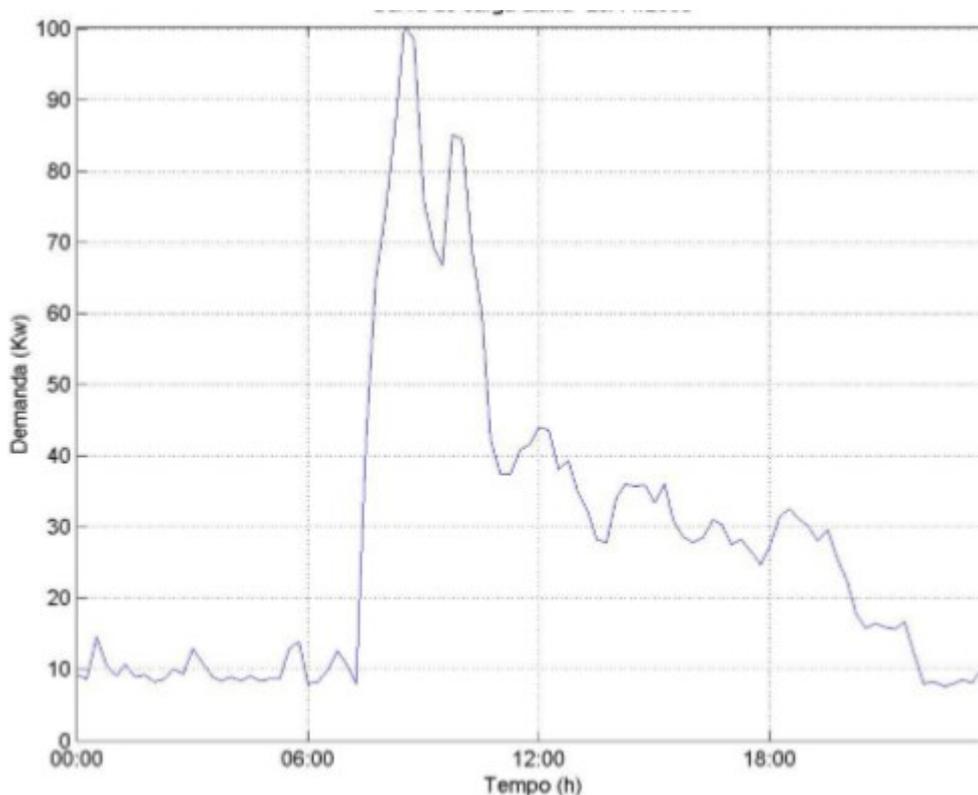
- Forno elétrico combinado;
- Máquina de lavar-louças;
- Frigideira elétrica;
- Forno elétrico convencional;
- Fritadeira elétrica.

#### 3.3.3 Dados Obtidos

Quanto ao consumo de energia elétrica, o valor mensal atingiu 14.421 KWh. Os menores valores de consumo diários foram de 488 KWh e 213 KWh para os dias úteis e finais de semana respectivamente[...], (RODRIGUES et al. 2003).

A demanda por horário conforme a Figura 7 - **Consumo do dia 25/11/2003**, prevê como seria o regime ideal para a produção energética para tal aplicação. Observa-se, Figura 7 - **Consumo do dia 25/11/2003**, que demanda de energia elétrica não é constante, chegando próxima de 100 KWh em determinados momentos, possivelmente os aparelhos de uso contínuo estavam em funcionamento no período, como por exemplo, refrigeradores. Enquanto que o pico de demanda energética coincide com o uso dos equipamentos ligados ao preparo das refeições.

**Figura 7 - Consumo do dia 25/11/2003**



Fonte: Rodrigues; et al (2003).

### 3.4 EFICIENCIA VOLUMÉTRICA DE PRODUÇÃO

Com base nos dados obtidos nos experimentos realizados por Kubaská et al (2010) e Nascimento (2014) pode-se observar uma certa relação entre os sólidos voláteis e a produção de biogás por volume de resíduos.

Tabela 1 - Relação Massa de Resíduos e Massa de Biogás

Parâmetros	Valores	Fonte
Sólidos Voláteis	16, 017g.L <sup>-1</sup>	Nascimento (2014)
Produtividade de Biogás / SV iniciais	400mL.g <sup>-1</sup> .SV	Kubaská et al. (2010)
Produtividade de Biogás / SV iniciais	156mL.g <sup>-1</sup> .SV	Nascimento (2014)

Fonte: Adaptado de Nascimento (2014).

Com base nos valores obtidos pelos autores e o volume de resíduos produzidos pelo R.U. pode – se dimensionar o volume e os parâmetros necessários para a construção do biodigestor, e posteriormente o potencial energético do biogás.

### 3.5 POTÊNCIA DISPONÍVEL

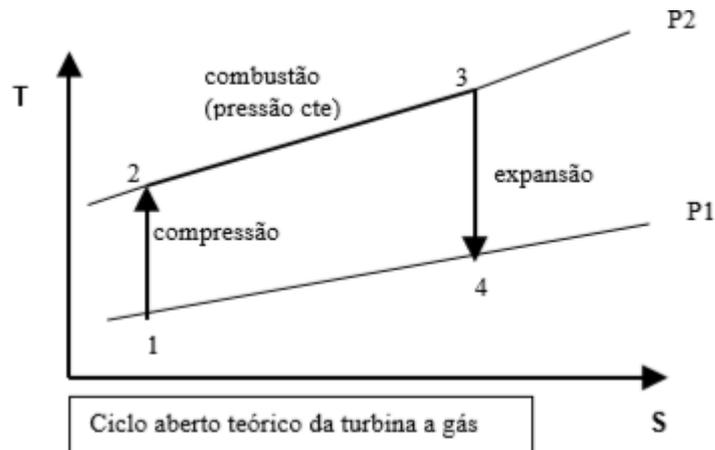
Para o ciclo de potência com base nos valores de eficiência de transformação do biodigestor e do volume de resíduos disponíveis é possível dimensionar o sistema, sendo assim, podemos estipular com base nos valores de eficiência de referência encontrados na literatura qual seria o trabalho líquido disponível na saída do eixo da turbina.

### 3.6 PARAMETROS DO CICLO BRAYTON

Com referência ao Ciclo Brayton, Figura 8, serão discutidas quais as temperaturas e pressões com melhor custo benefício para serem adotadas nos cálculos necessários para ter um parecer quantitativo do tema proposto para o trabalho.

Assume-se que o ar é admitido na temperatura ambiente, aproximadamente 300 K.

Figura 8 - Ciclo Brayton TXP



Fonte: Queiroz; Matias (2003)

A temperatura no início da expansão que é a maior temperatura do ciclo, geralmente é limitada pela resistência térmica dos materiais empregados na fabricação da turbina, principalmente as suas pás (VAN WYLEN et al, 1995).

Sabemos que para o ciclo Brayton quanto maior a temperatura de saída maior a eficiência do processo, argumento provado pela equação 8.

$$\eta_{T\acute{e}rmico} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad (8)$$

Onde:

- $\eta_{T\acute{e}rmico}$  : é o rendimento ideal do ciclo ;
- $T_1$  : é a temperatura de entrada do compressor, [K];
- $T_2$  : é a temperatura de saída do compressor, [K].

Segundo a Fabricante de turbinas a gás General Electric, a temperatura de entrada do ar nas turbinas é em torno de 1250 °C, o que é em torno de 1530 K. Por se tratar de um cálculo, no presente trabalho será adotado uma temperatura ligeiramente inferior, 1300 K, além das questões de segurança (VIEIRA, 2016).

Para a pressão de admissão da turbina, será considerado o valor de 8 atm, um valor intermediário daquele praticado em turbinas reais, como por exemplo as turbinas em operação na Bacia de Campos (Braga, 2013).

Para efeitos de cálculos iremos considerar o ar como gás ideal e segundo Van Wylen et al com calor específico  $C_p$  constante,

$$C_p = 1,003 \frac{KJ}{Kg * K}$$

e ainda, a razão entre calores específicos a pressão e volume constantes,  $k = C_p/C_v$ , para o ar,

$$k = 1,4$$

Com as devidas definições feitas, seguem os cálculos para determinar as temperaturas, os trabalhos e os calores absorvido e cedido para o meio no Ciclo Brayton,

a) Temperatura do que sai do compressor (T2):

$$T_2 = T_1 * \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (8)$$

Onde:

$T_2$  :é a temperatura de saída do compressor, [K];

$T_1$  :é a temperatura de entrada do compressor, [K];

$P_2$  :é a pressão de saída do compressor, [atm];

$P_1$  :é a pressão de entrada do compressor, [atm].

$$T_2 = 300 K * \left(\frac{8 atm}{1 atm}\right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 540,434 K$$

b) Temperatura que saí da turbina

$$T_4 = T_3 * \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (9)$$

Onde:

$T_4$  :é temperatura de saída da turbina, [K];

$T_3$  :é a temperatura de entrada da turbina, [K];

$P_4$  :é a pressão de saída da turbina, [atm];

$P_3$  :é a pressão de entrada da turbina, [atm].

$$T_4 = 1300 K * \left(\frac{1 atm}{8 atm}\right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 717,658 K$$

c) Trabalho do compressor

$$W_{Compressor} = -c_p(T2 - T1) \quad (10)$$

Onde:

$W_{Compressor}$  :é o trabalho do compressor, [KJ.Kg<sup>-1</sup>].

$$W_{Compressor} = -1,003 \frac{KJ}{Kg.K} * (543,434 K - 300K) = -2,433 * 10^2 \frac{KJ}{Kg}$$

d) O trabalho da turbina

$$W_{Turbina} = -c_p(T3 - T4) \quad (11)$$

Onde:

$W_{Turbina}$  :é o trabalho da turbina, [KJ.Kg<sup>-1</sup>].

$$W_{Turbina} = -1,003 \frac{KJ}{Kg.K} * (717,658 K - 1300K) = 5,844 * 10^2 \frac{KJ}{Kg}$$

e) Calor que entra no ciclo

$$Q_{Ent} = c_p(T3 - T2) \quad (12)$$

Onde:

$Q_{Ent}$  :é o calor que entra no ciclo, [KJ.Kg<sup>-1</sup>].

$$Q_{Ent} = 1,003 \frac{KJ}{Kg.K} * (1300 K - 543,434 K) = 7592 * 10^2 \frac{KJ}{Kg}$$

f) Calor que deixa o processo ( $Q_{sai}$ ):

$$Q_{sai} = c_p(T1 - T2) \quad (13)$$

Onde:

$Q_{sai}$  É o calor que sai do ciclo [KJ.Kg<sup>-1</sup>].

$$Q_{sai} = 1,003 \frac{KJ}{Kg.K} * (300 K - 543,434 K) = 2443 * 10^2 \frac{KJ}{Kg}$$

Com os devidos valores calculados podemos verificar a eficiência ideal do ciclo utilizando a equação 8.

$$\eta_{T\acute{e}rmico} = 1 - \frac{T1}{T2} \quad (8)$$

$$\eta_{T\acute{e}rmico} = 1 - \frac{300 K}{543,434 K} = 0,448$$

### 3.7 EFICIÊNCIA CORRIGIDA

Com base nos valores estipulados da eficiência de cada componente principal do ciclo, para essa fase do estudo pode-se desconsiderar as outras perdas do sistema, dando destaque para a tubulação. Sendo assim, a potência líquida do sistema será obtida através da multiplicação do poder calorífico disponível pela eficiência de cada componente, e sendo subtraído o consumo do compressor, que é considerado a maior gargalo desse tipo de ciclo, pois como se pode ver acima, os valores de eficiência são altos. No entanto o compressor pode consumir até 2/3 da potência líquida produzida, conforme os cálculos anteriores considerando um processo ideal de compressão e expansão o limite superior do rendimento em ciclo

único é de 44,8%, valendo ressaltar que poderia ser melhor aproveitado o calor de saída da turbina, nitidamente ainda possui um certo potencial.

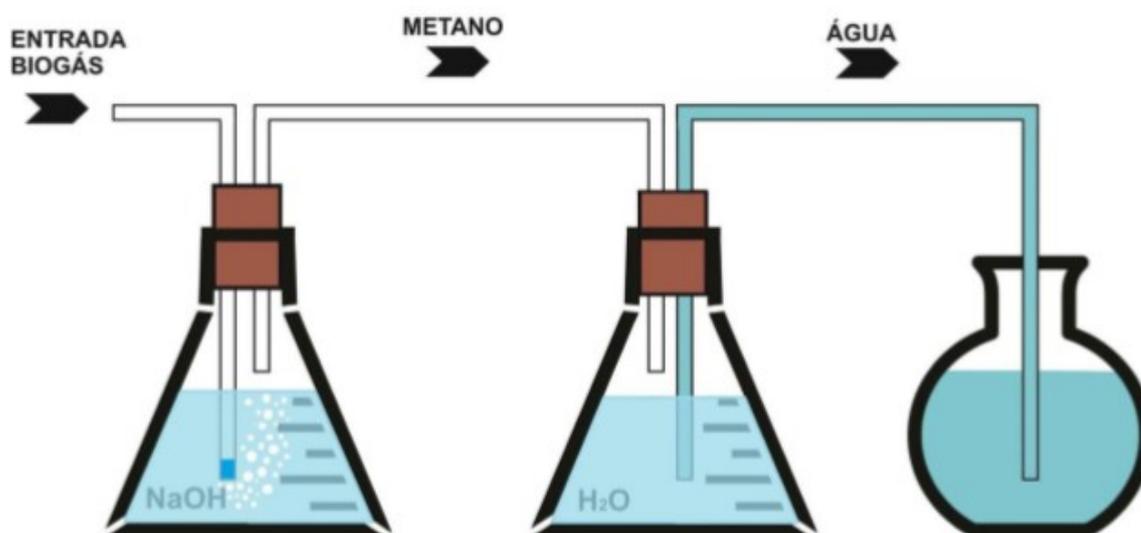
### 3.7.1 Potencial Corrigido

Portanto podemos estipular a geração de energia, considerando a produção específica de gás e o valor global de eficiência do ciclo, sendo assim, é possível fazer uma previsão de qual será o volume necessário do biodigestor para uma determinada demanda de energia.

## 3.8 POTENCIAL CALORÍFICO DO BIOGÁS

O biogás é constituído majoritariamente de metano, após o tratamento em borbulhamento em hidróxido de sódio aquoso a composição ficará 100% metano, sendo assim, para um certo volume de 221,36 mL de biogás, após o tratamento em NaOH, sobrou 160,15 mL de gás. Indicando 72% de pureza da mistura inicial, sendo assim o gás carbônico  $\text{CO}_2$  e ácido sulfídrico  $\text{H}_2\text{S}$  quase que a totalidade dos 28% restantes, (NASCIMENTO, 2014).

Figura 9 - Purificação do Biogás



Fonte: Nascimento (2014)

Potencial calorífico do metano puro, considerando após o tratamento será de  $53922 \text{ J.Kg}^{-1}$ , sendo um número conservador pois é difícil sabermos qual o verdadeiro potencial antes de termos produzido o gás e realizarmos uma análise adequada.

### 3.9 POTÊNCIA LIQUIDA DO CICLO

Com base no rendimento teórico do ciclo Brayton em torno de 44,8% e o potencial de produção de biogás por Kg de alimento e por fim o potencial energético do biogás após ser purificado, podemos obter a relação teórica específica entre o alimento destinado ao biodigestor e o valor líquido de energia retirada ao fim do processo.

#### 3.9.1 Quantificando os Valores em Massa

Para cada litro de efluente adicionado ao biodigestor temos nas literaturas adotadas uma produção que varia entre 156 a  $400 \text{ mL.g}^{-1}.\text{SV}$ , onde SV significa sólidos voláteis, é coerente se calcular com base nisso, pois o volume de biogás é diretamente proporcional a quantidade de sólidos voláteis iniciais e a quantidade consumida no biodigestor, e para cada litro se considera em média um potencial inicial de 16,017 g de sólidos voláteis (SV).

Sendo sólidos voláteis, considerado todos os sólidos fixos e voláteis a  $550^\circ\text{C}$ , que são os resíduos orgânicos presentes na mistura com potencial de gerar biogás (*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 2012).

Analisando a mistura destinada ao biodigestor, cada litro tem apenas 100 gramas de sólidos, para se ter o valor para um Kg de sólido devemos multiplicar esse valor por 10.

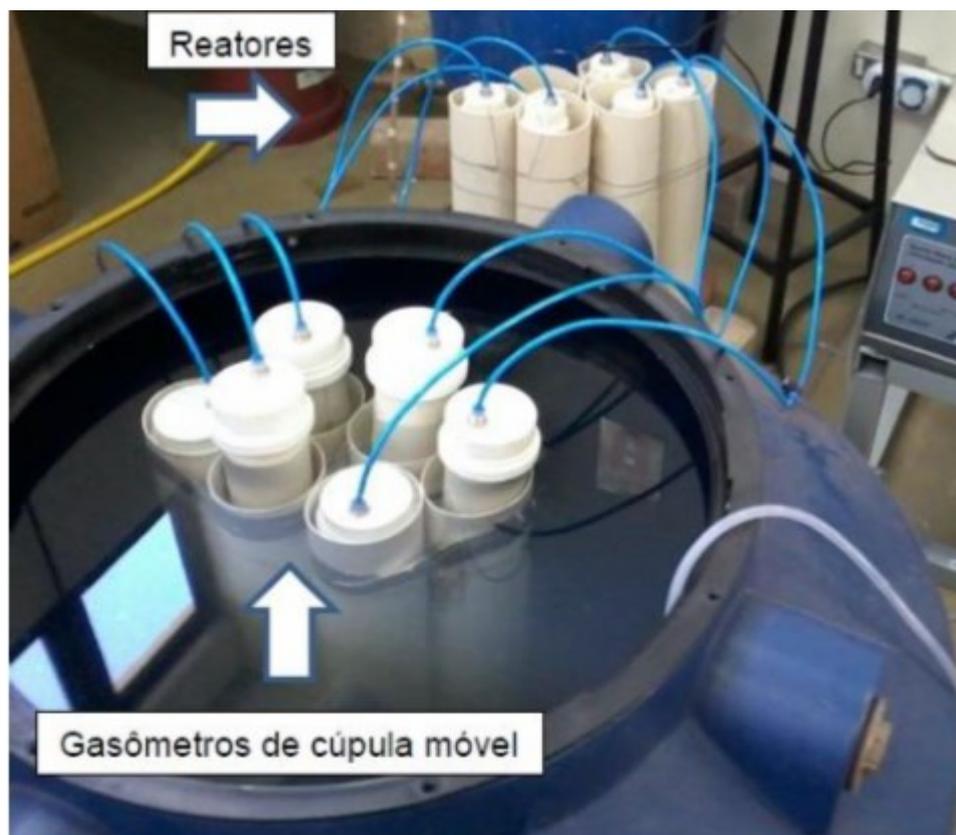
**Figura 10 - Sólidos Utilizados na Biodigestão**



**Fonte: Nascimento (2014).**

Segundo Nascimento (2014) que realizou o experimento, com uma massa de 0,1 Kg dessa mistura de sólidos a cada litro de esgoto sintético, como diluente da mistura, conforme Figura 11, onde essa mistura foi colocada numa caixa com água.

**Figura 11 - Esquema dos Biodigestores Experimentais**



**Fonte: Sotti (2014).**

Considerando que o reservatório acima do biodigestor estará a pressão ambiente, além disso o rendimento após tratamento fica em torno de 72%, para ambos os casos.

Tomando como base de cálculos a unidade de 1 kg para se poder ter uma potência líquida específica, no entanto tomaremos como base os cálculos do estudo de Nascimento (2014), transcritos abaixo, após isso iremos encontrar o valor específico.

$$VEB[70 \text{ Kg. dia}^{-1}(\text{resíduo orgânico})] = 700 \text{ L. dia}^{-1}(\text{esgoto bruto})$$

O volume diário de resíduos orgânicos a ser adicionado é dado pela equação a seguir.

$$VRO = \frac{70 \text{ Kg. dia}^{-1}}{1,1 \text{ Kg. L}^{-1}} = 63,64 \text{ L. dia}^{-1}(\text{resíduos orgânicos})$$

O volume total do reator é dado pela equação a seguir levando em conta o tempo de retenção da mistura.

$$V_{total} = (700 + 63,64) * 25 = 19.090,91 L$$

Para determinar a produção do biogás utilizou – se a relação entre volume e a massa de sólidos voláteis  $M_{sv}$  adicionados ao reator.

$$M_{sv} = 16,017 g.Kg^{-1} * 763,64 Kg.dia^{-1} = 12 231,22 g.dia^{-1}$$

A produção pode ser estimada relacionando os valores obtidos.

$$V_{biogas} = \frac{M_{sv} * P_{bsv}}{1000} \quad (14)$$

Segundo os valores obtidos por Kubaská et al. (2010).

$$V_{biogas} = \frac{12 231,22 g.dia^{-1} * 400 mL * (g * SV)^{-1}}{1000} = 4892,49 L.dia^{-1}$$

Segundo os valores obtidos por Nascimento (2014).

$$V_{biogas} = \frac{12 231,22 g.dia^{-1} * 156 mL * (g * SV)^{-1}}{1000} = 1908,07 L.dia^{-1}$$

Para transformar em unidade de massa, nesse caso, a densidade do gás será  $0,656 Kg.(m^3)^{-1}$ , portanto podemos encontrar a massa gerado do biogás purificado, considerando o mesmo armazenado em pressão ambiente, pois o poder calorífico mais frequentemente é relacionado a massa, a mesma não varia com o volume, e nesse caso o valor é de  $53922 J.Kg^{-1}$ .

$$m_{gás} = V_{biogas} * \rho_{biogas} \quad (15)$$

Onde:

$m_{gás}$  :é a massa do gás, [Kg];

$V_{biogas}$  :é o volume do gás, [m<sup>3</sup>];

$\rho_{biogas}$  :é a densidade do gás, [Kg.(m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup>].

$$P_{gás} = m_{gás} * C_{gás} \quad (16)$$

Onde:

$P_{gás}$  :é o potencial do gás, [J];

$m_{gás}$  :é a massa do gás, [Kg];

$C_{gás}$  :é o poder calorífico do gás, [J.Kg<sup>-1</sup>].

Segundo os valores obtidos por Nascimento (2014).

$$m_{gásmaior} = 1,908 \text{ m}^3 * 0,656 \text{ Kg. (m}^3\text{)}^{-1} = 1,25 \text{ Kg}$$

Segundo os valores obtidos por kubaská et al. (2010).

$$m_{gásmaior} = 4,893 \text{ m}^3 * 0,656 \text{ Kg. (m}^3\text{)}^{-1} = 3,16 \text{ Kg}$$

Transformando os valores em unidades unitárias ou específico por Kg de sólido, primeiro precisamos fazer o caminho inverso lembrando que a quantidade de massa destinada ao processo é de 70 Kg podemos saber quanto cada Kg de sólidos produz de gás.

$$m_{unitgás} = \frac{m_{gás}}{70} \quad (17)$$

Onde:

$m_{unitgás}$  :é a massa unitária do gás, [Kg];

$m_{gás}$  :é a massa do gás, [Kg].

Segundo os valores obtidos por Nascimento (2014).

$$m_{unitgás} = \frac{1,25 \text{ Kg}}{70} = 0,0179 \text{ Kg}$$

Segundo os valores obtidos por Kubaská et al. (2010).

$$m_{unitgás} = \frac{3,16 \text{ Kg}}{70} = 0,0451 \text{ Kg}$$

### 3.9.2 Quantificando os Valores em Energia

Segundo os valores obtidos por Nascimento (2014), com base na massa gerada e o poder calorífico do metano encontrado na literatura de  $53922 \text{ J.Kg}^{-1}$

$$P_{gás} = m_{gás} * C_{gás} * \eta_{Térmico} \quad (18)$$

Onde:

$P_{gás}$  :é o potencial do gás, [J];

$m_{gás}$  :é a massa do gás, [Kg];

$C_{gás}$  :é o poder calorífico do gás, [ $\text{J.Kg}^{-1}$ ];

$\eta_{Térmico}$  :é o rendimento ideal do ciclo .

Segundo os valores obtidos por Nascimento (2014).

$$P_{gásmenor} = 0,0179Kg * 53922 J * Kg^{-1} * 0,448 = 432,41 J$$

Segundo os valores obtidos por Kubaská et al. (2010).

$$P_{gásmaior} = 0,0451Kg * 53922 J * Kg^{-1} * 0,448 = 1089,48 J$$

### 3.10 DIMENSIONAMENTO DO CICLO

O dimensionamento prático do ciclo, com base nos valores superiores e inferiores de produção específica líquida de gás é possível estabelecer o volume necessário do reservatório do biodigestor necessário para atender uma determinada demanda nesse caso, um restaurante universitário (R.U.) que também é próximo a UTFPR Campus Pato Branco. Segundo Rodrigues et al. (2003) com valor mensal de 14. 412 KWh e os valores diários maiores e menores de 488 e 213 KWh.

Convertendo esses valores em Joules temos que 1KWh equivale à 3,6 MJ, com base nos valores e essa unidade de conversão podemos chegar nos dimensões ou no caso na massa de alimento necessários para cumprir uma certa demanda.

#### 3.10.1 Para a Menor Demanda Diária

Temos que a menor demanda é 213 KWh, convertendo em Joules.

$$D_{menor} = 213 * 3,6MJ = 766,8 MJ \quad (19)$$

Onde:

$D_{menor}$  É a menor demanda diária de energia.

Para essa demanda considerando os valores encontrados de eficiência a massa para o potencial maior e menor respectivamente.

$$m_{alimento} = \frac{D_{menor}}{P_{gás}} \quad (20)$$

Para o potencial menor temos que  $P_{gásmenor} = 432,41 J$ .

$$m_{alimento} = \frac{D_{menor}}{P_{gásmenor}}$$

$$m_{alimento} = \frac{766,8 MJ}{432,41 J * Kg^{-1}} = 1771 * 10^3 Kg$$

Para o potencial maior temos que  $P_{gásmaior} = 1089,48 J.Kg^{-1}$ .

$$m_{alimento} = \frac{D_{menor}}{P_{gásmaior}}$$

$$m_{alimento} = \frac{766,8 MJ}{1089,48 KJ * Kg^{-1}} = 703,08 * 10^3 Kg$$

### 3.10.2 Volume do Biodigestor para a Demanda Menor

Com base na massa de sólidos calculado anteriormente e a densidade do efluente testado no experimento podemos calcular o volume necessário para o biodigestor, para cada litro de mistura pronta à ser destinada ao processo temos 100 gramas de alimento a densidade segundo Nascimento é de 1,1Kg por litro ou 1100 Kg.(m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup>, para se ter um Kg de sólido precisamos de 10 litros dessa mistura, sendo assim, o resultado precisa ser multiplicado por 10.

$$V_{biodigestor} = \frac{m_{alimento}}{\rho_{mistura}} * 10 \quad (21)$$

Onde:

$V_{biodigestor}$  :é o volume do biodigestor, [m<sup>3</sup>];

$\rho_{mistura}$  :é a densidade a mistura, [Kg.(m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup>];

10 :é o fato de correção para se ter 1 Kg de sólido .

Portanto para o a menor produção de gás.

$$V_{biodigestor} = \frac{1770 * 10^3 Kg}{1100 Kg.m^3} * 10 = 16 * 10^3 m^3$$

Para a maior produção de gás.

$$V_{biodigestor} = \frac{690,8 * 10^3 Kg}{1100 Kg.m^3} * 10 = 6,28 * 10^3 m^3$$

**Tabela 2 - Resultados Obtidos**

<b>Autor</b>	<b>Potencial [J]</b>	<b>Massa Necessária [Kg]</b>	<b>Volume [m<sup>3</sup>]</b>
Nascimento (2014)	432,41	1771 * 10 <sup>3</sup>	16 * 10 <sup>3</sup>
Kubaská et al. (2010)	1089,48	703,08 * 10 <sup>3</sup>	6,28 * 10 <sup>3</sup>

**Fonte: Próprio Autor (2019).**

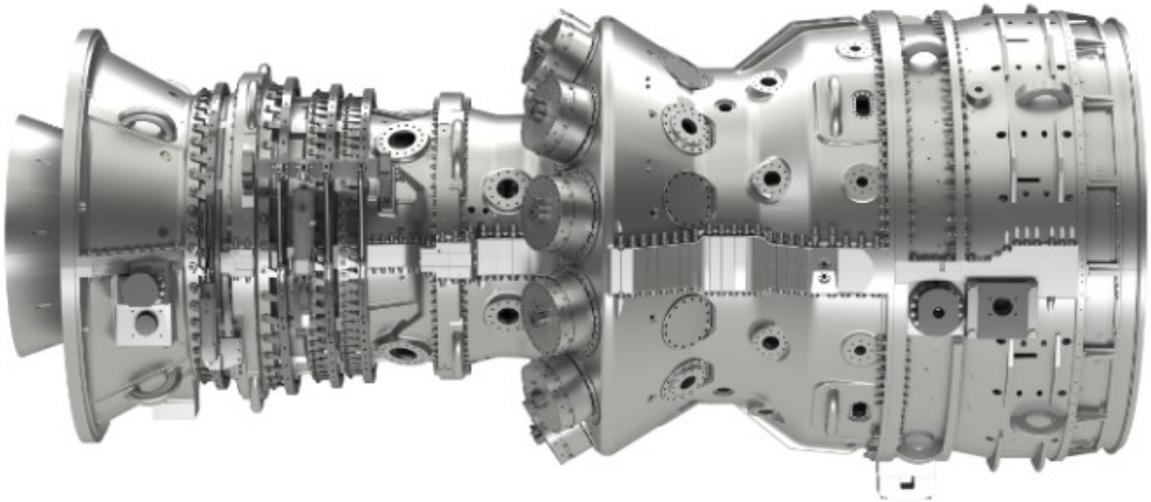
### 3.11 POTÊNCIA DO CICLO

Com base nos dados anteriores podemos estimar o tamanho do reservatório e em seguida, além de que pela demanda podemos escolher a turbina necessária, valendo ressaltar que os modelos comerciais são de potencias bem superiores aos valores em estudo, portando seria necessário adequar a turbina, no entanto poderia ser facilmente contornado isso com a melhoria da eficiência produtiva do digestor.

#### 3.11.1 Dimensionamento da Turbina

Com base nos valores da Tabela 2 podemos extrapolar para uma turbina comercial, pois o volume de resíduos de uma cidade ou uma indústria maior pode viabilizar tal modelo. Um exemplo seria o uso para um biodigestor implantado num aterro sanitário, onde ajudaria na destinação do lixo e teria grande quantidade de gás.

**Figura 12 - Exemplo de Turbina**



**Fonte: General Eletric(GE) (2019).**

Uma das empresas que se destacam na fabricação de turbina de potência a gás estacionária é a própria GE, atualmente ela possui um modelo 9HA operando em ciclo combinado, sendo assim, uma turbina a vapor aproveita a energia de exaustão, na França registrou um recorde de 62,22% de eficiência líquida, reconhecido pelo *Guinness Book* (General Eletric, 2019).

Reconsiderando o estudo feito para esses valores dessa turbina podemos fazer os cálculos do rendimento específico novamente apenas alterando o valor de 44,8 % para 62,22% na equação 18.

$$P_{gás} = m_{gás} * C_{gás} * \eta_{Térmico} \quad (18)$$

Segundo os valores obtidos por Nascimento (2014).

$$P_{gásmenor} = 0,0179Kg * 53922 J * Kg^{-1} * 0,6222 = 600,55 J$$

Segundo os valores obtidos por Kubaská et al. (2010).

$$P_{gásmaior} = 0,0451Kg * 53922 J * Kg^{-1} * 0,6222 = 1513,12 J$$

Comparativamente com a Tabela 2 utilizando as equações 20 e 21 podemos encontrar as demandas em massa e volume respectivamente para atender os valores de consumo diário Segundo Rodrigues et al. (2003).

$$m_{alimento} = \frac{D_{menor}}{P_{gás}} \quad (20)$$

$$V_{biodigestor} = \frac{m_{alimento}}{\rho_{mistura}} * 10 \quad (21)$$

Para o potencial menor temos que  $P_{gásmenor} = 600,55 J$ .

$$m_{alimento} = \frac{D_{menor}}{P_{gásmenor}}$$

$$m_{alimento} = \frac{766,8 MJ}{600,55 J * Kg^{-1}} = 1275,50 * 10^3 Kg$$

Para o potencial maior temos que  $P_{gásmenor} = 1513,12 J * Kg^{-1}$ .

$$m_{alimento} = \frac{D_{menor}}{P_{gásmaior}}$$

$$m_{alimento} = \frac{766,8 MJ}{1513,12 J * Kg^{-1}} = 506,24 * 10^3 Kg$$

Portanto para o a menor produção de gás.

$$V_{biodigestor} = \frac{1275,50 * 10^3 Kg}{1100 Kg * m^3} * 10 = 11,6 * 10^3 m^3$$

Para a maior produção de gás.

$$V_{biodigestor} = \frac{690,8 * 10^3 Kg}{1100 Kg.m^3} * 10 = 4,6 * 10^3 m^3$$

**Tabela 3 - Resultados Obtidos GE**

<b>Autor</b>	<b>Potencial [J]</b>	<b>Massa Necessária [Kg]</b>	<b>Volume [m<sup>3</sup>]</b>
Nascimento (2014)	600,55 J	1275,50 * 10 <sup>3</sup> Kg	11,6 * 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>
Kubaská et al. (2010)	1513,12 J	506,24 * 10 <sup>3</sup> Kg	4,6 * 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>

**Fonte: Próprio Autor (2019).**

Conforme as pesquisas, e os resultados devemos atentar para o benefício do sistema, não apenas a demanda energética. Com esse tipo de análise podemos considerar como opção, ressaltando que o estado da arte da família 7HA da GE podemos ter valores muito promissores.

### 3.11.2 Volume do Biodigestor para Turbina

Os valores de turbinas encontrados no mercado possibilitam o dimensionamento do biodigestor, pois geralmente os biodigestores são modelos modulares enquanto que as turbinas dependem da disponibilidade de modelos e aplicações pelo fabricante.

Os volumes encontrados anteriormente podem ser relacionados com os volumes de resíduos destinados aos aterros sanitários, pois nesse caso, como o resíduo é enterrado, naturalmente terá uma produção de biogás. Podendo não ser a forma mais eficiente, porém é barata e usa as instalações existentes, porém sem deixar inerte o líquido (chorume) e sólido, perdendo o potencial como adubo, pois o solo de um aterro sanitário não tem a necessidade de ser fértil.

Contextualizando a turbina GE 7HA com potência entre 275 e 337 MW movidas a gás natural (Brasil Engenharia, 2019).

Precisaria de um volume muito grande do biodigestor, no entanto poderia ser utilizado em conjunto com gás natural mineral por exemplo, com isso seria um acréscimo de energia.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao final dos procedimentos acima citados espera-se que a aplicação seja viável, pois é uma opção na substituição dos combustíveis fósseis na nossa matriz energética.

Com os valores de eficiência global do ciclo e do biodigestor na transformação dos sólidos em biogás, estima-se uma relação próxima de qual a capacidade de geração de energia para um determinado tipo de alimento destinado ao biodigestor relacionado ao seu volume útil. Por fim, quanto de energia pode ser gerado pelo sistema, e em quanto tempo tal projeto se pagaria e começaria gerar lucro.

### 4.1 APLICABILIDADE

O consumo pode ser suprido com base nos valores superiores e inferiores de geração do biogás por Kg de alimento. Sendo assim, pode se dimensionar o volume necessário do reservatório para suprir uma determinada necessidade. Vale ressaltar que os valores usados para os cálculos tratam-se de valores obtidos em experimentos de batelada, onde é nítido que o aproveitamento de boa parte dos sólidos voláteis não foi possível devido a flotação e decantação da mistura, consequência da falta de homogeneização. Portando, em um regime contínuo com um misturador na entrada e outro no interior do biodigestor, facilmente poderia-se aumentar esse potencial, facilitando o retorno do investimento.

### 4.2 POSSÍVEIS CLIENTES

Como possíveis clientes podemos considerar qualquer empresa ou município que possui um grande descarte de alimentos, ou resíduos orgânicos sólidos, até mesmo óleo vegetal usado. Apesar do rendimento teórico ser baixo, vale ressaltar que o ganho ambiental é muito grande, pois é uma maneira limpa de lidar com resíduos orgânicos sólidos e como produto final um adubo com alto poder fertilizante e inerte quimicamente.

### 4.3 SITUAÇÃO NO BRASIL

A produção de energia por biogás anaeróbico, ganhou destaque desde as crises energéticas iniciadas pela crise do petróleo em 1970. No Brasil como no mundo, a principal fonte de alimentação é dada pelos resíduos agropecuários. O Brasil conta com nove usinas, em São Paulo, Paraná e Minas gerais, duas com esgoto. Com o aproveitamento do biogás evita o metano para a atmosfera (CEMIG, 2012).

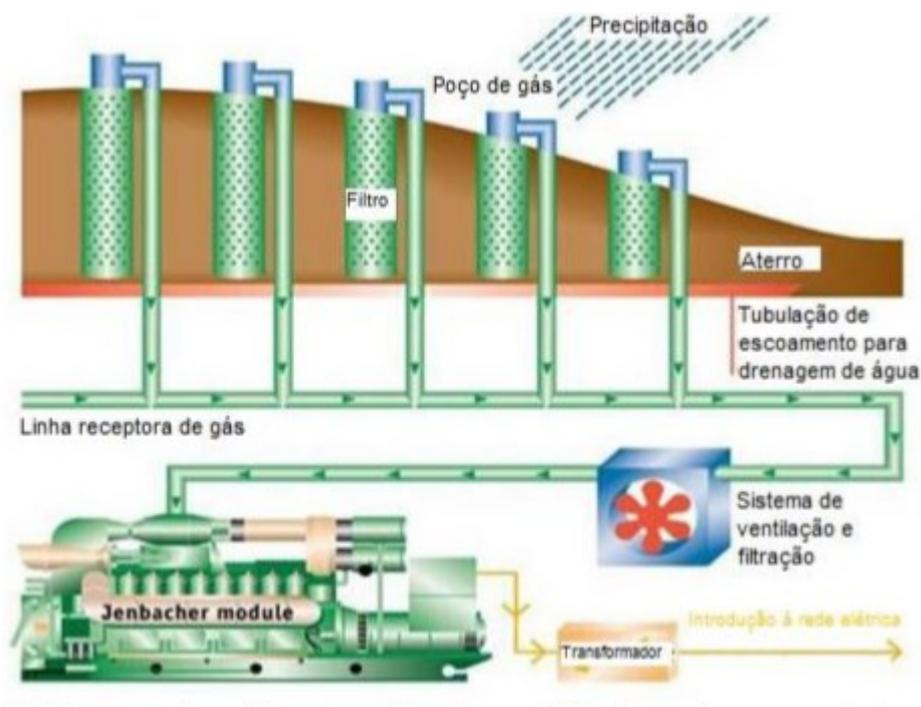
**Tabela 4 - Usinas Instaladas no Brasil**

<b>Usinas do tipo UTE em Operação</b>				
<b>Usina</b>	<b>Potencia (KW)</b>	<b>Destino da Energia</b>	<b>Proprietário</b>	<b>Município</b>
<b>Bandeirante</b>	20.000	APE PIE	70% <b>Biogeração Energia S/A</b> 30% <b>União de Bancos Brasileiros S.A.</b>	<b>São Paulo - SP</b>
<b>São João Biogás</b>	21560	PIE	100% <b>São João Energia Ambiental S/A</b>	<b>São Paulo - SP</b>
<b>Energ - Biog</b>	30	REG	100% <b>Biomass Users Network Brasil</b>	<b>Barueri - SP</b>
<b>Unidade Industrial de Aves</b>	160	REG	100% <b>Cooperativa Agroindustrial Lar</b>	<b>Matelândia - PR</b>
<b>Unidade Industrial de Vegetais</b>	40	REG	100% <b>Cooperativa Agroindustrial Lar</b>	<b>Itaipulândia - PR</b>
<b>ETE Ouro Verde</b>	20	REG	100% <b>Companhia de Saneamento do Paraná - Sanepar</b>	<b>Foz do Iguaçu - PR</b>
<b>Granja Colombari</b>	32	REG	100% <b>José Carlos Colombari</b>	<b>São Miguel do Iguaçu - PR</b>
<b>Asja BH</b>	430	REG	100% <b>Consortio Horizonte Asja</b>	<b>Belo Horizonte - MG</b>
<b>Arrudas</b>	2400	REG	100% <b>Companhia de Saneamento de Minas Gerais</b>	<b>Belo Horizonte - MG</b>
<b>Total: 9 Usinas</b>			<b>Potência Total: 44 622 KW</b>	

Fonte: CEMIG (2012).

No caso do aterros sanitários, o próprio lixo é o digestor, pode ser facilmente recolhido por tubulações e tratados, a viabilidade é dada quando o aterro recebe 200 toneladas de resíduos por dia, tem capacidade na ordem de 500.000 toneladas e altura mínima de 10 m (CEMIG, 2012).

Figura 13 - Captação do Biogás do Aterro



Fonte: CEMIG (2012).

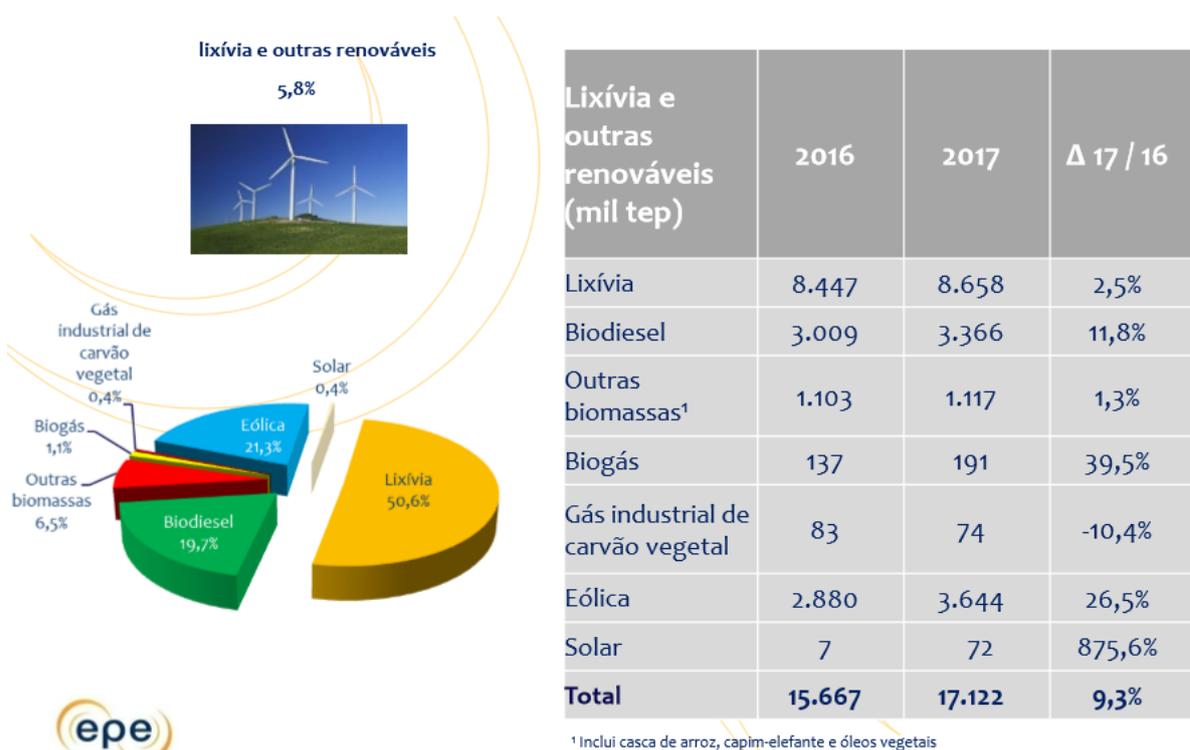
Analogamente ao estudo em questão o aterro sanitário com coleta de biogás precisa de um grande volume para se tornar viável de ser operado e implantado. Vale ressaltar que não estamos apenas pensando no fator econômico, mas também o ambiental, pois retira o metano da camada de ozônio, além do chorume que seria de grande potencial poluente aos rios é substituído por um líquido e um resíduo sólido altamente rico e fertilizante para o solo.

O líquido e sólido podem substituir os derivados de petróleo e ser usados como fertilizante, sem liberação de chorume (CEMIG, 2012).

#### 4.4 MATRIZ ENERGÉTICA

As matrizes energéticas podem variar muito conforme a demanda de um país e também seu desenvolvimento tecnológico, Figura 14.

**Figura 14 - Matriz Energética Brasil 2017**

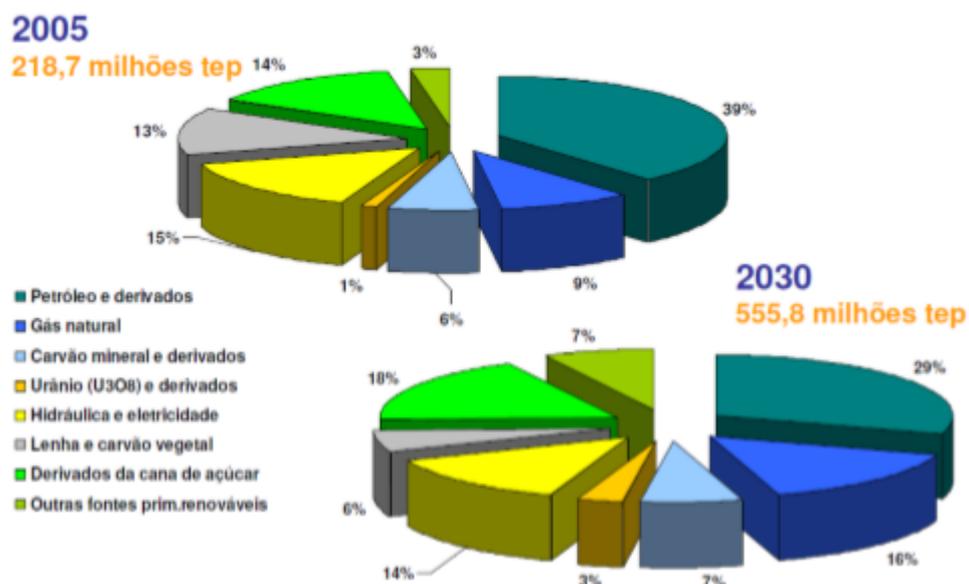


Fonte: EPE (2018).

Com base na Figura 14 podemos ver o crescimento de 39,5% na produção do biogás um ótimo respaldo para sua utilização. No entanto, se olharmos no panorama geral a produção é de apenas 1,1%, algo que tem a tendência de crescer muito nos próximos anos, junto com a biomassa.

Outro relatório que podemos adotar é o da CEMIG de 2005 com projeção para 2030, onde foi feito um estudo de tendência, Figura 15.

Figura 15 - Matriz Energética Brasil 2005 e 2030



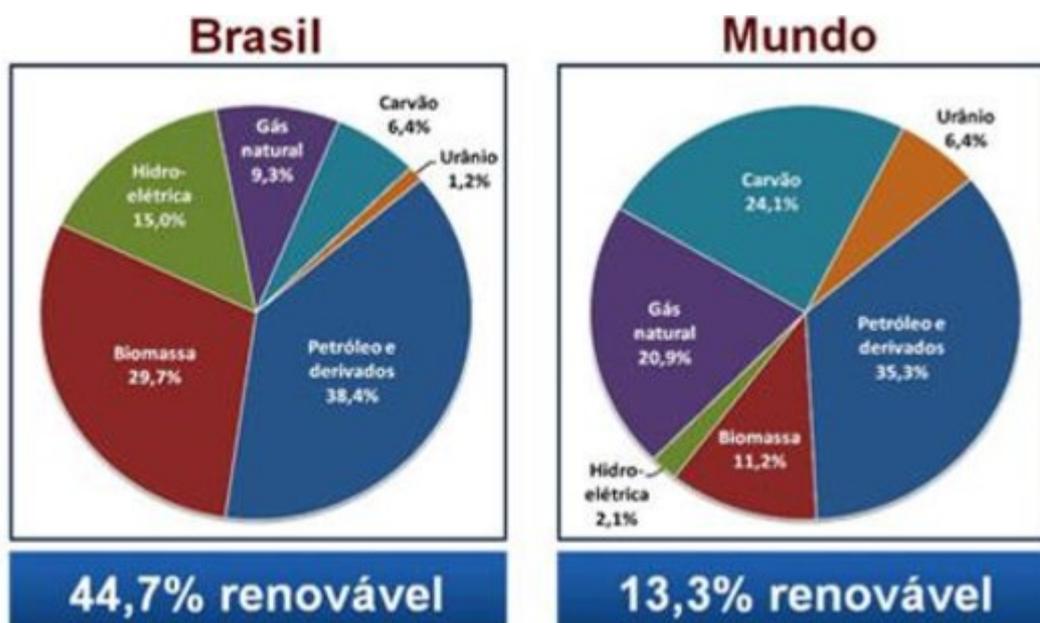
Fonte: CEMIG (2012).

Nesse caso o biogás não está discriminado, mas dois conjuntos que ele pode ser inserido como outras fontes prim. Renováveis e o conjunto gás natural quando purificado, apresentam um crescimento considerável no período.

#### 4.4.1 Matriz Nacional e Matriz Mundial

Na Figura 16 é apresentado um comparativo entre a matriz energética nacional e a mundial em 2008, ano de referência do estudo da CEMIG tomado como base.

Figura 16 - Matriz Nacional X Matriz Mundial



Fonte: CEMIG (2012).

Podemos observar nos diagramas, Figura 16 que 44,7 % do nossa matriz é renovável enquanto que no restante do mundo apenas 13,3%, com grande destaque para hidroelétrica e biomassa que no Brasil somam juntas os 44,7%.

## 5 CONCLUSÕES

Apesar de no estudo só o biodigestor ser o foco, analisando toda a conjuntura do descarte de resíduos, onde geralmente gera-se um custo elevado na construção de aterros ou outros meios para destinação correta. Nesse sentido o biodigestor torna-se uma ótima solução, pois apesar do custo de implantação, existe um *payback* com a produção do gás para gerar energia e calor e o biofertilizante diferentemente do aterro que só gera custos.

A eficiência do biodigestor, pode ser facilmente aumentada com a construção de um tanque climatizado, ou seja, com controle de temperatura média. Além de misturadores para manter a mistura homogênea, sendo assim, sem fase flotada ou decantada, com isso aumentaria a disponibilidade de sólidos voláteis na mistura para serem digeridos.

O consumo de sólidos voláteis é comprovadamente relacionado com a produção de biogás, e no estudo em questão o percentual de redução foi pequeno, o que indica um grande potencial de melhoria (NASCIMENTO, 2014).

**Tabela 5 - Redução dos Sólidos Voláteis**

Amostra	Sólidos totais	Sólidos voláteis		Sólidos fixos	
Reator 1 <b>Inicial</b> <b>Final</b>	47, 8114g.L <sup>-1</sup>	34, 1987g.L <sup>-1</sup>	71,53%	13, 6127g.L <sup>-1</sup>	28,47%
	32, 5236g.L <sup>-1</sup>	21, 5404g.L <sup>-1</sup>	66,23%	10, 9832g.L <sup>-1</sup>	33,77%
Reator 2 <b>Inicial</b> <b>Final</b>	42, 4448g.L <sup>-1</sup>	28, 0461g.L <sup>-1</sup>	66,08%	14, 3887g.L <sup>-1</sup>	33,92%
	40, 2638g.L <sup>-1</sup>	24, 6814g.L <sup>-1</sup>	61,30%	15, 5824g.L <sup>-1</sup>	38,70%
Reator 3 <b>Inicial</b> <b>Final</b>	54, 3791g.L <sup>-1</sup>	40, 3672g.L <sup>-1</sup>	74,23%	14, 0119g.L <sup>-1</sup>	25,77%
	38, 0546g.L <sup>-1</sup>	26, 3223g.L <sup>-1</sup>	69,17%	11, 7322g.L <sup>-1</sup>	30,83%

Fonte: Adaptado de Nascimento (2014).

A redução dos sólidos voláteis está diretamente ligado com a produção de biogás, como a redução foi pequena a produção consequentemente também foi, sendo assim, o reator 1 teve uma redução de 71,53 para 66,23%, ou seja, 5,3% do percentual inicial de SV, o reator 2 teve uma redução de 66,08 para 61,30%, ou seja,

4,78% do percentual inicial de SV, o reator 3 teve uma redução de 74,23 para 69,17 %, ou seja, 5,06% do percentual inicial de SV. Enquanto que os sólidos fixos, tiveram uma variação inconclusiva com aumento ou redução dependendo do caso. Portanto, a produção do biogás poderia crescer significativamente com o aumento do consumo dos sólidos voláteis, pois nitidamente seu verdadeiro potencial foi pouco aproveitado.

Segundo NASCIMENTO (2014) a redução do PH também se mostrou outro fator determinante, pois as bactérias anaeróbicas precisam de um PH levemente básico.

**Tabela 6 - PH da Mistura**

Amostra	PH	
	Inicial	Final
Reator 1	9,93	6,24
Reator 2	9,93	6
Reator 3	9,93	5,9

Fonte: Adaptado de Nascimento (2014).

Analisando a Tabela 6 quando o PH ficou próximo de 6 a digestão anaeróbica parou interrompendo a produção de biogás (NASCIMENTO, 2014).

Portanto outro fator que poderia melhorar a produção do biogás seria a correção do PH. Como por exemplo com a adição de  $\text{CaCO}_3$  comercialmente conhecido como calcário largamente utilizado na agricultura para correção de PH do solo.

A produção energética pode ser moldada para atender os picos de consumo como apresentados na Figura 7 com destaque para o maior deles entre 6h e 12h.

Como ressaltado no item 4.4 do trabalho, o biogás terá um destaque significativo no futuro energético nacional, levando em conta esses dados, qualquer estudo nessa área tem grande potencial de ser posteriormente concretizado. Pois ainda temos muito que aprender sobre o processo de produção mais eficiente de biogás e seu melhor aproveitamento termodinâmico para se ter cada vez mais relevância no âmbito energético nacional e mundial.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para novos trabalhos, acredito que seria necessário uma pesquisa e experimento mais detalhado no mérito dos biodigestores, sendo melhor homogeneizada a mistura. Além do controle de temperatura média e a alimentação contínua, controle de PH da mistura, pois mostrou – se um fator decisivo e indispensável ser acima de 6 onde já é considerado ácido. Com isso poderia ter uma melhor eficiência na produção de biogás fator determinante para uma melhor viabilidade de construção. Consequentemente, melhor tempo de retorno, ressaltando também o gráfico de divisões energéticas nacional, onde as fontes de combustíveis renováveis tem grande potencial de crescimento.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER ENVIRONMENT FEDERATION. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 22. ed. Washington: American Public Health Association, 2012.

BRAGA, Carolina Bordini. **Avaliação do Desempenho no Ponto de Projeto de Turbinas a Gás em Operação na Bacia De Campos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

BRASIL ENGENHARIA . **GE Lança Modelo de Turbina a Gás Alinhado com Novos Desafios Energéticos**. Disponível em: <http://www.brasilengenharia.com/portal/noticias/destaque/13013-ge-lanca-modelo-de-turbina-a-gas-alinhado-com-novos-desafios-energeticos>. Acesso em: 11/11/2019.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. **Alternativas Energéticas: uma Visão Cemig**. Belo Horizonte: Cemig, 2012.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES M. A. **Termodinâmica**. 5.ed.[S.I.]: São Paulo, SP: McGraw-Hill, 2006. 740p. ISBN 85-86804-66-5.

DEGANUTTI, Roberto et al. Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada. **Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural**, 2002.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional**. Rio de Janeiro: EPE, 2018.

GENERAL ELETRIC. **Reports Brasil**. Disponível em: <https://gereportsbrasil.com.br/o-futuro-da-eletricidade-f914c24921b2>. Acesso em: 11/11/2019.

KUBASKÁ, M; SEDLÁČEK, S.; BODÍK, I; KISSOVA, B. **Food Waste as Biodegradable Substrates for Biogas Production**. In: 37th International Conference of SSCHE. Tatransk´ e Matliare, Slovakia, 2010.

NASCIMENTO, Renan Carlos. **Biogás de Resíduos Orgânicos do Restaurante Universitário com Adição de Efluente Doméstico e Óleo de Cozinha**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2014.

QUEIROZ, M.; MATIAS, J. A. PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. PETROBRAS. **BÁSICO DE TURBINAS A GÁS**. Rio de Janeiro, 2003. 87p.

RODRIGUES, Humberto de Ávila; JÚNIOR, Sebastião Camargo Guimarães; BISPO, Décio; CAMACHO, José Roberto; SALERNO, Carlos Henrique. **Gerenciamento Do Uso Da Energia Elétrica Em Um Restaurante Universitário Utilizando A Lógica Difusa: Análise Da Composição Deste Insumo Nos Custos Da Refeição**. Artigo – Núcleo de Eletricidade Rural e Fontes Alternativas de Energia - Núcleo de Máquinas Elétricas Faculdade de Engenharia Elétrica- Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2003.

SOTTI, Gustavo de. **Biogás de digestão anaeróbia dos resíduos orgânicos de restaurante universitário com efluente sanitário**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2014.

VAN WYLEN, G.; SONNTAG, R.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica**. 4. Ed. [S.l.]: São Paulo, SP: Blucher, 1995. 580p. ISBN 978-85-212-0135-9.

VIEIRA, Pedro Rafael Lima. **Influência de Parâmetros Operacionais Sobre a Eficiência do Ciclo Brayton em Turbinas a Gás Estacionárias**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.