

GABRIEL FRANZON

ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM BIODIGESTORES DO  
TIPO *PLUG-FLOW* COM TRÊS TIPOS DIFERENTES DE CORES DE  
GASÔMETROS E INSERÇÃO DE ISOLANTE TÉRMICO

CASCVEL  
PARANÁ – BRASIL  
FEVEREIRO – 2020

GABRIEL FRANZON

**ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM BIODIGESTORES DO TIPO *PLUG-FLOW* COM TRÊS TIPOS DIFERENTES DE CORES DE GASÔMETROS E INSERÇÃO DE ISOLANTE TÉRMICO**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Armin Feiden

CASCAVEL  
PARANÁ – BRASIL  
FEVEREIRO – 2020

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Franzon, Gabriel

ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM BIODIGESTORES DO TIPO PLUG-FLOW COM TRÊS TIPOS DIFERENTES DE CORES DE GASÔMETROS E INSERÇÃO DE ISOLANTE TÉRMICO / Gabriel Franzon; orientador(a), Dr. Armin Feiden, 2020.  
68 f.

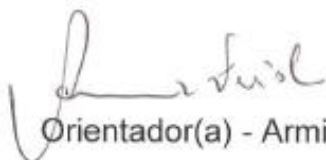
Dissertação (mestrado), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, 2020.

1. biodigestor. 2. monitoramento. 3. radiação solar. 4. transferência de calor. I. Feiden, Dr. Armin. II. Título.

**GABRIEL FRANZON**

Estudo da transferência de calor em biodigestores do tipo plug-flow com três tipos diferentes de cores de gasômetros e inserção de isolante térmico

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa Biocombustíveis, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:



Orientador(a) - Armin Feiden

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Maritane Prior

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Breno Carneiro Pinheiro

Centro Internacional de Energias Renováveis (CIBiogás)

Cascavel, 9 de março de 2020

## **AGRADECIMENTOS**

A minha mãe, pai e meus irmãos, pelo constante apoio e por não medirem esforços em tornar meus sonhos possíveis.

A minha namorada Anna Eduarda Madureira por estar ao meu lado nos melhores e piores momentos dessa caminhada.

A meu orientador Prof. Dr. Armin Feiden, por toda a disponibilidade, comprometimento e bons conselhos que se tornaram um estímulo para a conclusão deste trabalho.

A todos os professores que tive durante essa jornada, onde passaram e contribuíram com um pouco de seus conhecimentos.

Ao meu orientador do CIBiogás Breno Carneiro Pinheiro pela disponibilidade e comprometimento a mim dedicados, assim como todos os demais colaboradores da empresa.

Também agradeço ao Centro Internacional de Energias Renováveis (CIBiogás), Fundação Parque Tecnológico de Itaipu (FPTI), Companhia Paranaense de Energia (Copel) e a Plas-Ionas por apoiar este projeto.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplo de um biodigestor de lagoa coberta. ....	9
Figura 2: Sistema de Resistência Térmica. ....	17
Figura 3: Temperatura do solo de acordo com sua profundidade. ....	20
Figura 4: Espectro de ondas eletromagnéticas com a faixa da radiação térmica.....	21
Figura 5: Energia ganho por superfícies opacas. ....	24
Figura 6: Transmissividade espectral dos vidros com baixo teor de ferro, policloreto de vinila (PVC) e polietileno na temperatura ambiente para diferentes temperaturas....	26
Figura 7: Transmissividade, absorção e reflexão da radiação solar de um vidro. ....	26
Figura 8: Modelagem de um biodigestor. ....	28
Figura 9: Montagem do experimento.....	29
Figura 10: Instalação dos biodigestores no local.....	29
Figura 11: Instalação dos sensores de temperatura nos biodigestores. ....	30

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Comportamento das temperaturas internas do biodigestor em um dia.....	12
Gráfico 2: Produção de biogás, temperatura mínima do ar e temperatura mínima do termopar intermediário. ....	12
Gráfico 3: Temperatura máxima e mínima na cidade de Foz do Iguaçu. ....	31
Gráfico 4: Média de irradiação solar em Foz do Iguaçu ao longo do ano. ....	32
Gráfico 5: Comportamento da biomassa do biodigestor 1 no período de 24 horas...	37
Gráfico 6: Comportamento do biogás do biodigestor 1 no período de 24 horas. ....	37
Gráfico 7: Comportamento da biomassa do biodigestor 1 em um período de 7 dias. ....	38
Gráfico 8: Comportamento do biogás do biodigestor 1 no período de 7 dias.....	38
Gráfico 9: Comportamento da biomassa do biodigestor 2 no período de 24 horas...	39
Gráfico 10: Comportamento da biomassa do biodigestor 2 em um período de 7 dias. ....	39
Gráfico 11: Comportamento do biogás do biodigestor 2 no período de 24 horas. ....	40
Gráfico 12: Comportamento do biogás do biodigestor 2 no período de 7 dias.....	40
Gráfico 13: Comportamento da biomassa do biodigestor 3 no período de 24 horas.	41
Gráfico 14: Comportamento da biomassa do biodigestor 3 em um período de 7 dias. ....	41
Gráfico 15: Comportamento do biogás do biodigestor 3 no período de 24 horas. ....	42
Gráfico 16: Comportamento do biogás do biodigestor 3 no período de 7 dias.....	42
Gráfico 17: Comportamento da biomassa do biodigestor 4 no período de 24 horas.	43
Gráfico 18: Comportamento da biomassa do biodigestor 4 em um período de 7 dias. ....	43
Gráfico 19: Comportamento do biogás do biodigestor 4 no período de 24 horas. ....	44
Gráfico 20: Comportamento do biogás do biodigestor 4 no período de 7 dias.....	44
Gráfico 21: Temperatura média dos sensores da biomassa ao longo do experimento no biodigestor 1.....	47
Gráfico 22: Temperatura média dos sensores da biomassa ao longo do experimento no biodigestor 2.....	47
Gráfico 23: Temperatura média dos sensores da biomassa ao longo do experimento no biodigestor 3.....	48

Gráfico 24: Temperatura média dos sensores da biomassa ao longo do experimento no biodigestor 4.....	48
Gráfico 25: Temperatura média dos biodigestores ao longo do experimento. ....	49
Gráfico 26: Variações das temperaturas dos biodigestores ao longo do experimento. ....	51
Gráfico 27: Comportamento energético durante o período diurno e noturno ao longo do experimento no biodigestor 1. ....	52
Gráfico 28: Comportamento energético durante o período diurno e noturno ao longo do experimento no biodigestor 2. ....	52
Gráfico 29: Comportamento energético durante o período diurno e noturno ao longo do experimento no biodigestor 3. ....	53
Gráfico 30: Comportamento energético durante o período diurno e noturno ao longo do experimento no biodigestor .....	53
Gráfico 31: Transferência de calor calculado do biodigestor 1 em comparação com o real. ....	55
Gráfico 32: Transferência de calor calculado do biodigestor 2 em comparação com o real. ....	55
Gráfico 33: Transferência de calor calculado do biodigestor 3 em comparação com o real. ....	55
Gráfico 34: Transferência de calor calculado do biodigestor 4 em comparação com o real. ....	56



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação das técnicas para a geração de biogás de acordo com diferentes critérios. ....	9
Tabela 2: Variação de temperatura e temperatura média da biomassa ao longo de um dia do biodigestor 1 .....	38
Tabela 3: Variação de temperatura e temperatura média da biomassa ao longo de um dia do biodigestor 2 .....	40
Tabela 4: Variação de temperatura e temperatura média da biomassa ao longo de um dia do biodigestor 3 .....	42
Tabela 5: Variação de temperatura e temperatura média da biomassa ao longo de um dia do biodigestor 4 .....	44
Tabela 6: Variação de temperatura entre os dias 11 e 12 do experimento. ....	49
Tabela 7: Temperatura média da biomassa e variação de temperatura ao longo do experimento.....	49
Tabela 8: Variação de temperatura entre os dias 4 e 8 do experimento. ....	50
Tabela 9: Porcentagem calculada de perda de calor para o solo e para o biogás ....	57
Tabela 10: Médias de temperatura ao longo do experimento do biodigestor 1 .....	65
Tabela 11: Médias de temperatura ao longo do experimento do biodigestor 2 .....	66
Tabela 12: Médias de temperatura ao longo do experimento do biodigestor 3 .....	67
Tabela 13: Médias de temperatura ao longo do experimento do biodigestor 4 .....	68

FRANZON, Gabriel. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, julho de 2019.  
**Estudo da transferência de calor em biodigestores do tipo *plug-flow* com três tipos diferentes de cores de gasômetros e inserção de isolante térmico.** Armin Feiden.

## RESUMO

O biogás é um dos ramos da energia renovável que nos dias atuais está mais avançando, principalmente por conta de estudos, projetos e leis que estão sendo criados para incentivar ainda mais esta tecnologia. Este trabalho tem como objetivo demonstrar o funcionamento da transferência de calor em biodigestores do tipo *plug-flow*. Sabe-se que estes possuem grandes áreas para a captação da radiação solar, resultando em ganho de calor internamente. Desta forma, este estudo verificou o efeito da cor da lona do gasômetro, além da adição de isolamento térmico nos biodigestores, com a finalidade de analisar o ganho de energia devido a radiação solar e verificar qual é o melhor caso para que os biodigestores do tipo lagoa coberta operem com maiores temperaturas e sejam mais estáveis. Para isso foram construídos e analisados quatro biodigestores com dimensões de 2,1x0,7x0,4 m, sendo aplicados três tipos de lonas com e sem isolante térmico, sendo um com lona branca e um com lona preta sem isolamento e outros dois, com lonas transparente e preta com a adição de isolante térmico, sendo todos operados em mesmas condições do meio. O experimento foi realizado na cidade de Foz do Iguaçu, entre o período 02/09/2019 até 03/10/2019, onde obteve como resultado que o biodigestor de gasômetro transparente com isolante térmico possuiu a maior temperatura média, porém também a maior variação térmica, sendo que esse fato ocorreu principalmente por causa da diferença de temperatura entre o ambiente, o solo e a biomassa. O biodigestor de gasômetro preto e adição de isolamento, possuiu a segunda maior temperatura média, e variação térmica. Já os biodigestores de gasômetro preto e gasômetro branco, possuiram as menores temperaturas médias e variações térmicas respectivamente, sendo o biodigestor de lona branca o mais estável termicamente. Além disso, verificou-se que a maior perda de calor ocorre no sentido da biomassa para o biogás.

Este trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

**PALAVRAS-CHAVE:** biodigestor; monitoramento; radiação solar; transferência de calor.

FRANZON, Gabriel. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, julho de 2019. **Study of heat transfer in *plug-flow* biodigestors with three different types of gasometer colors and insulation of thermal insulation.** Armin Feiden.

## ABSTRACT

Biogas is one of the branches of renewable energy that is advancing today, mainly due to studies, projects and laws that are being created to further encourage this technology. This work aims to demonstrate the functioning of heat transfer in *plug-flow* type digesters. It is known that these have large areas for capturing solar radiation, resulting in heat gain internally. In this way, this study verified the effect of the color of the gasometer canvas, in addition to the addition of thermal insulation in the biodigesters, in order to analyze the energy gain due to solar radiation, besides verifying which is the best case for the biodigesters covered lagoon type operate at higher temperatures and are more stable. For this, four biodigesters with dimensions of 2.1x0.7x0.4 m were built and analyzed, with three types of tarpaulins with and without thermal insulation being applied, one with white tarpaulin and one with black tarpaulin without insulation and the other two with tarpaulins transparent and black with the addition of thermal insulation, all being operated in the same conditions of the environment. The experiment was carried out in the city of Foz do Iguaçu, between the period 02/09/2019 until 03/10/2019, where it obtained as a result that the biodigester of transparent gasometer with thermal insulator had the highest average temperature, but also the greatest variation This fact occurred mainly because of the temperature difference between the environment, the soil and the biomass. The black gasometer biodigester and the addition of insulation had the second highest average temperature and thermal variation. The black gasometer and white gasometer digesters, on the other hand, had the lowest average temperatures and thermal variations respectively, with the white canvas biodigester being the most thermally stable. In addition, it was found that the greatest heat loss occurs from biomass to biogas.

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Financial Code 001.

**KEYWORDS:** biodigester; monitoring; heat transfer; solar radiation.

## SUMÁRIO

1. Introdução .....	1
1.1. Objetivos .....	3
1.1.1. Objetivo Geral.....	3
1.1.2. Objetivos específicos.....	3
1.2. Justificativa.....	4
1.3. hipótese.....	4
2. Revisão bibliográfica .....	6
2.1. O biogás e a biodigestão anaeróbia.....	6
2.2. Biodigestores .....	7
2.3. condições e características do meio .....	9
2.3.1. Teor de matéria seca dos substratos e tipos de alimentação.....	10
2.3.2. Temperatura em biodigestores.....	10
2.3.3. Agitação, oxigênio, pH e disponibilidade de nutrientes.....	13
2.4. Transferência de calor.....	14
2.4.1. Condução .....	15
2.4.2. Convecção.....	15
2.4.3. Radiação .....	16
2.4.4. Resistência térmica .....	17
2.5. Temperatura do solo .....	19
2.6. Radiação e ambiente .....	20
2.6.1. Radiação solar.....	21
2.6.2. Cores e absorbância solar.....	22
2.6.3. Corpo negro.....	22
2.6.4. Superfícies opacas .....	23
2.6.5. Superfícies transparentes e o efeito estufa .....	24
3. Material e métodos.....	27
3.1. Biodigestores .....	27

3.2.	Temperatura e os sensores de temperatura .....	29
3.3.	Radiação e sensores de luminosidade.....	31
3.4.	Obtenção de dados e comparação .....	32
3.5.	Substrato.....	33
3.6.	Transferência de calor no sistema .....	33
3.7.	O experimento.....	34
4.	resultados e discussão.....	35
4.1.	comportamento térmico dos biodigestores .....	35
4.1.1.	Sensores de temperatura .....	35
4.1.2.	Efeito do solo e isolamento térmico no experimento .....	36
4.1.3.	Comportamento térmico do biodigestor 1 .....	36
4.1.1.	Comportamento térmico do biodigestor 2.....	39
4.1.2.	Comportamento térmico do biodigestor 3.....	41
4.1.3.	Comportamento térmico do biodigestor 4.....	43
4.1.4.	Comparação do comportamento térmico da biomassa dos biodigestores 45	
4.1.1.	Comparação do comportamento térmico do biogás dos biodigestores .	46
4.2.	temperaturas médias da biomassa .....	47
4.3.	Ganho e perda de energia ao longo do experimento .....	52
4.4.	Relação entre a transferência de calor calculada e a real.....	54
5.	Conclusão .....	58
6.	Referências bibliográficas .....	59

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil está buscando novas alternativas de obtenção de energia, principalmente provenientes de fontes limpas e, ao mesmo tempo, de baixo custo. Visando este objetivo, em 2016, foi assinado o acordo de Paris, o qual possuiu como objetivo diminuir a emissões de gases do efeito estufa com a finalidade de evitar o aumento da temperatura do Planeta Terra (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIAS - MME, 2018a).

Além disto, a Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2018) afirma que o Brasil precisará aumentar sua produção de energia até o ano de 2026 em 20%. Um grande potencial para alcançar essa meta é a utilização da energia proveniente da biomassa, que é renovável e alternativa, a qual, atualmente, representa apenas 5% da capacidade total de produção de energia elétrica instalada (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, 2016).

Para auxiliar no desenvolvimento deste tipo de tecnologia, o governo vem incentivando o comércio de energia provenientes de fontes renováveis, em que a resolução ANP nº 08, publicada em 30 de janeiro de 2015, estabeleceu e caracterizou o biometano - biogás que possui uma composição de 96% ou mais de metano - para que se possa ser comercializado em todo o território nacional, no qual visa ser utilizado como energia veicular ou na demanda industrial (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS - ANP, 2015; BRASIL, 2017).

Desta forma, buscando diminuir a número de emissões e, ao mesmo tempo, aumentar a produção de energia elétrica, criou-se o programa RenovaBio, caracterizado por ser uma política nacional de biocombustíveis instituída pela Lei nº 13.576/2017, com a finalidade de ampliar a produção de biocombustíveis e colocá-los em um patamar estratégicos na matriz energética (MME, 2018b; BRASIL, 2015).

A região oeste do Paraná possui como seu principal foco econômico atividades relacionadas ao agronegócio e a exploração do turismo (IPARDES - INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL, 2003). A criação de suínos da região equivale a 65% da produção do estado, e o Paraná possui o maior rebanho do país, com 17,85% do total de animais. (SUINOCULTURA, 2017; BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL - BNDES, 2016).

Conseqüentemente, este tipo de atividade gera uma grande quantidade de resíduos orgânicos, podendo virar um problema se não tratado de forma correta (LOPES; FILHO; ALVES, 2013; BNDES, 2016).

A utilização de biodigestores é uma solução para esses casos, pois além de evitar a poluição ambiental, os resíduos orgânicos resultantes desta atividade, serão transformados em biogás, biofertilizante sólido e líquido. O biogás - gás que possui uma mistura composta principalmente de metano ( $\text{CH}_4$ ) e pelo dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) - pode ser utilizado como energia térmica, elétrica ou veicular, enquanto que o biofertilizante pode ser utilizado no próprio local para melhorar a produção das lavouras (CIBIOGÁS, 2018). Desta forma, a utilização de biodigestores para o tratamento de resíduos está indo de encontro com os objetivos da geração limpa de energia que o Brasil busca.

Para que o processo de biodigestão ocorra de forma ideal, é necessário o controle de vários parâmetros como a temperatura, o pH, a agitação, quantidade de oxigênio existente no meio, entre outros fatores (FRIEHE; WEILAND; SCHATTAUER, 2010). A temperatura se destaca, principalmente, por favorecer o processo, acelerando a decomposição do material orgânico, quando operado de forma correta.

O funcionamento de biodigestores ocorre em três faixas de temperatura distintas, em que, para maiores temperaturas, há uma maior produção de biogás (CHERNICHARO, 2007). O mesmo autor também diz que o aquecimento em biodigestores é utilizado para otimizar a produção de biogás; porém, há um maior gasto de energia com esse processo e, por este motivo, a maioria das estações de tratamento construídos na região oeste do Paraná não possuem instalado este sistema.

Com a finalidade de auxiliar no aumento de temperatura dos biodigestores, este trabalho utilizou a energia solar, à partir da análise do seu comportamento inserido no sistema, com o intuito de empregar essa mesma energia para o aquecimento do sistema. Uma das alternativas estudadas foi a inserção de isolante térmico na parte inferior do biodigestor, pois, desta forma, ocorre uma menor transferência de calor com o solo. Outra alternativa foi utilização de lonas transparentes nos gasômetros, a qual a radiação solar visível atravessa a lona aquecendo diretamente a biomassa.

O presente trabalho foi realizado com apoio do Centro Internacional de Energias Renováveis (CIBiogás), Fundação Parque Tecnológico de Itaipu (FPTI) e

patrocinado pela Companhia Paranaense de Energia (Copel) e fruto de um P&D ANEEL (PD-06491-0287/2012).

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo Geral

- Analisar quantitativamente e qualitativamente o funcionamento de transferência de calor em biodigestores do tipo *plug-flow* com diferentes cores de geomembrana de cobertura, além de verificar a variação de energia em cada sistema.

### 1.1.2. Objetivos específicos

- Realizar um experimento com quatro protótipos de biodigestores tipo *plug-flow* com diferentes cores de geomembranas de cobertura, além da adição de isolamento térmico para a retirada de dados de temperatura;
- Compreender o funcionamento da transferência de calor em função das lonas e efeitos dos isolantes em biodigestores do tipo *plug-flow*;
- Estimar a perda e ganho de calor em biodigestores *plug-flow* em função da cor da lona do gasômetro e isolamento térmico utilizado;
- Mostrar os prós e contras dos tipos diferentes de lonas que podem ser utilizados.
- Definir a melhor opção de cor de lona de cobertura, além da utilização ou não do isolamento térmico, considerando diferentes condições do meio.



## 1.2. JUSTIFICATIVA

Visando o aumento de produção de biogás e o aproveitamento energético nas áreas rurais, é de grande importância o conhecimento de como funciona a transferência de calor nos biodigestores. Por isso, este trabalho irá auxiliar no melhoramento do desempenho do sistema e, conseqüentemente, na produção de forma mais eficiente. Este estudo busca utilizar energia solar ao invés de mecanismos de aquecimento a base de energia elétrica, principalmente por ser disponível sem custo, quando comparados com os dispositivos convencionais.

A temperatura possui uma grande importância tanto para a produção de gás quanto para o tempo de retenção hidráulica (TRH), sendo este último o tempo em que o material fica armazenado nos biodigestores (FRIEHE; WEILAND; SCHATTAUER, 2010). O sistema trabalha em três faixas de temperatura: os psicrófilicos operam abaixo de 25°C, as mesofílicas operam em torno de 35 a 42°C e as termofílicas ficam entre 50 a 60°C. Sendo assim, quanto maior a temperatura de operação do biodigestor, maior será a produção de gás e, conseqüentemente, menor o seu TRH (TIETZ, 2014). Um menor TRH resulta em biodigestores mais compactos, porém com a mesma produção de gás.

Desta forma, este trabalho avalia opções de lonas para melhorar os biodigestores do tipo lagoa coberta, para que possuam uma maior eficiência e, assim, tornando-os mais viáveis economicamente.

## 1.3. HIPÓTESE

Biodigestores são usinas, centrais ou qualquer recipiente de armazenamento anaeróbios que possuem por objetivo a aceleração da decomposição da matéria orgânica, obtendo como produto final biogás e adubo (SANTOS, 2013). Normalmente empregados em propriedades rurais, tem por finalidade o tratamento de dejetos de animais, evitando assim a contaminação do meio ambiente.

No biodigestor de fluxo pistão, também chamado de *plug-flow*, a biomassa tem entrada contínua em uma das extremidades do tanque e passa através do mesmo,

sendo dispensada na outra extremidade, passando por todas as fases na mesma sequência em que foi inserida (CORTES, ROCHA e CORTES, 2019).

Este modelo, normalmente é construído por causa de seu baixo custo de implantação, principalmente quando uma propriedade rural é obrigada por lei a realizar o tratamento de resíduos criação de animais, no qual normalmente é realizado através do armazenamento desses em uma lagoa para que material se degrade (VON SPERLING, 1996).

A realização deste tipo de processo não acarreta em biodigestores com elevada eficiência, pois é preciso o controle de alguns parâmetros para que o mesmo opere em seu estado ótimo. Dentre esses indicadores, tem-se a temperatura da biomassa como um dos mais importantes (CIBIOGÁS, 2018). Sendo assim, os biodigestores deste trabalho irão verificar se isolamento térmico e a cor do gasômetro auxiliam no aumento e constância de sua temperatura interna, visando encontrar o melhor caso para que os estes operem em temperaturas maiores.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. O BIOGÁS E A BIODIGESTÃO ANAERÓBIA

Biogás é um gás proveniente de um processo biológico, ou seja, da decomposição da matéria orgânica em um reator anaeróbio, na ausência de oxigênio. Este processo é muito comum na natureza, ocorrendo normalmente em pântanos, fundos de lagos, esterqueiras e no estômago de alguns animais. A matéria orgânica é transformada em biogás através de sua degradação por microrganismos, além de gerar um outro tipo de resíduo que pode ser utilizado como adubo orgânico (BARRERA,2003).

De acordo com Oliveira (2005), a composição do biogás é formada de 50 a 75% de seu volume de metano ( $\text{CH}_4$ ), e de 25 a 50% de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Além disso, o biogás possui outros gases em menores quantidades como o hidrogênio ( $\text{H}_2$ ), sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ) e amônia ( $\text{NH}_3$ ). Os gases mais importantes são o metano e o sulfeto de hidrogênio; sendo o primeiro por causa de seu alto poder calorífico, enquanto o segundo por ser um gás altamente tóxico (MAZZUCCHI,1980).

Dentre os fatores que influenciam diretamente na composição do biogás, estão a matéria orgânica utilizada, o tipo de biodigestor, a técnica de fermentação e tecnologias aplicadas na construção das usinas e biodigestores. A sua formação é dividida em vários estágios e a decomposição da matéria orgânica deve estar alinhada, para que o processo seja realizado adequadamente (KALSSON *et al*, 2014).

Rostoffe (2010) afirma que o processo de biodigestão anaeróbia é dividido em quatro etapas: a hidrólise, acidogênese, acetogênese e a metanogênese. A primeira etapa é a hidrólise, em que os compostos orgânicos considerados complexos, são decompostos em substâncias menos complexas. A segunda etapa é composta pelas bactérias acidogênicas, que irão decompor os compostos intermediários em ácidos graxos de cadeia curta (SOUZA, 1984; GARCIA, PATEL E OLLIVER, 2000).

A terceira etapa é a acetogênese, na qual transforma-se o material resultante da acidogênese em gás carbônico, hidrogênio e ácido etanóico. Essa fase é

influenciada diretamente pela quantidade de hidrogênio que a acidogênese gerou, pois grandes concentrações de hidrogênio podem impedir a transformação dos compostos intermediários da acidogênese, inibindo a quarta etapa (FRIEHE; WEILAND; SCHATTAUER, 2010).

A quarta e última etapa da biodigestão é a metanogênese, que é a principal etapa para a formação do biogás, na qual as arqueas metanogênicas são os microrganismos atuantes nesta fase. Elas são estritamente anaeróbias e convertem o hidrogênio, dióxido de carbono e o ácido acético em metano (ROSTOFFE, 2010).

As quatro fases da decomposição anaeróbia ocorrem paralelamente nos biodigestores, em um único processo e em um único estágio. Por isso, encontrar um meio termo para que todos esses microrganismos consigam sobreviver no meio é essencial, de tal forma que a temperatura, agitação, pH e carga orgânica devem ser definidos de modo que todos os microrganismos provenientes da biodigestão possam se desenvolver (PICANÇO, 2004).

O mesmo autor também diz que, em toda a biocenose, as arqueas metanogênicas são as mais sensíveis aos distúrbios do meio e também possuem uma baixa taxa de crescimento, por isso, as condições do meio devem ser adaptadas às suas necessidades.

## **2.2. BIODIGESTORES**

Biodigestores anaeróbios são reservatórios em que se armazena matéria orgânica na ausência de oxigênio e possui como uma de suas finalidades o tratamento de resíduos, degradando-o. Ademais, possui como produto o biogás e o biofertilizante. Entre os biodigestores existentes, os mais comuns são: o chinês, o indiano, a lagoa coberta e o CSTR (FRIEHE, WEILAND e SCHATTAUER, 2010).

O modelo indiano, é conhecido principalmente por sua campânula, local onde armazena-se o gás produzido no processo de biodigestão, que pode ser mergulhada sobre a própria biomassa ou por um selo de água externo. A sua estrutura onde é realizado o tratamento dos resíduos, normalmente, é constituída de cerâmica, enquanto a campânula normalmente é feita de aço inoxidável. Além disso, no tanque

onde é realizado o tratamento, há uma parede central, que possui como finalidade dividi-lo em dois, forçando o resíduo se movimentar por toda extensão do biodigestor até a saída (JORGE; OMENA, 2012).

O modelo chinês também se utiliza do embolo e possui uma menor complexidade na hora da montagem, comprimindo o biogás e também evita o seu consumo contínuo. O seu funcionamento ocorre pelo aumento de pressão que o gás gerado faz na biomassa, resultando em um deslocamento desta e, conseqüentemente, o efluente é deslocado para a caixa de saída. Ou seja, o biodigestor opera em pressões maiores que a atmosfera para realizar o processo (DEGANUTTI *et al.*, 2002).

O biodigestor CSTR, normalmente, é um tanque em formato de cilindro, que não é enterrado, e possui uma alta capacidade de processar com rapidez e grande desempenho de substratos, pois possui elevado controle de seus parâmetros como a temperatura, a entrada de nutrientes, o pH e a agitação. Todo o dejetto nele é homogeneizado devido ao sistema de agitação, além de possuir um controle minucioso da temperatura interna (FRIEHE; WEILAND; SCHATTAUER, 2010).

Para realizar a operação deste tipo de biodigestor, é realizado uma preparação da biomassa antes de ser inserido no tanque de fermentação, para que esse substrato seja transformado no substrato ideal de operação. Desta forma, o substrato é triturado na menor forma possível, para que as partículas fiquem pequenas e, conseqüentemente, aumentem a área de contato do material orgânico com o meio líquido dentro do biodigestor (SOARES, 2010).

O biodigestor de lagoa coberta, também conhecido como canadense, mostrado pela Figura 1, é o tipo de biodigestor mais comum no Brasil e também é mais simples que o modelo indiano e o chinês. Nesse, há uma abertura no solo que possui lona na sua parte inferior, utilizada para armazenar o substrato, soldado em uma outra lona superior, que é utilizada para armazenar o gás gerado (JORGE; OMENA, 2012).

Por ser um biodigestor que pode ser utilizado em grandes e pequenas propriedades (e devido ao seu baixo custo de implantação), ele é muito difundido no Brasil, como também na região Oeste do Paraná. Ele possui uma grande área de contato com o meio, fazendo a temperatura variar muito de acordo com a condição ambiente, podendo apresentar grandes variações de temperatura ao longo do dia (BALMANT, 2009).

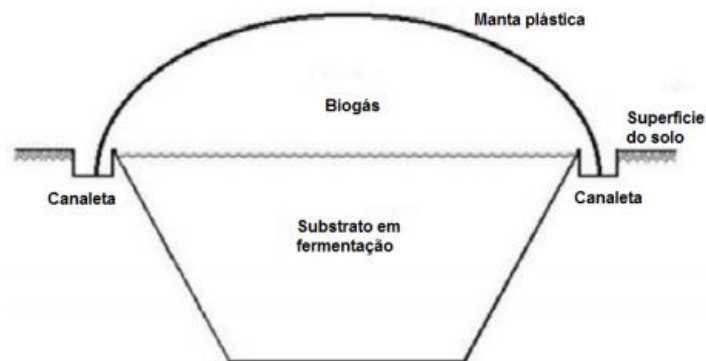


Figura 1: Exemplo de um biodigestor de lagoa coberta.

Fonte: Pereira (2017).

### 2.3. CONDIÇÕES E CARACTERÍSTICAS DO MEIO

Os biodigestores podem operar de várias formas, e a Tabela 1 apresenta os critérios e condições para os tipos de operação que é possível serem realizadas.

Os biodigestores que este experimento expõe são os que normalmente operam na faixa psicofísica. Para que esses microorganismos se desenvolvam, é necessário um ambiente anaeróbio, um pH entre 6 e 8, além de uma temperatura de 25°C (FRIEHE; WEILAND; SCHATTAUER, 2010).

Tabela 1: Classificação das técnicas para a geração de biogás de acordo com diferentes critérios.

<b>Critério</b>	<b>Tipo</b>
Teor de matéria seca dos substratos	- Digestão úmida - Digestão seca
Tipo de alimentação	- Descontínuo - Semicontínuo - Contínuo
Temperatura do processo	- Psicofílico - Mesofílico - Termofílico

Fonte: Postel *et al.* (2010).

### 2.3.1. Teor de matéria seca dos substratos e tipos de alimentação

O tipo de digestão está vinculado à quantidade de matéria seca introduzida nos biodigestores. Para os casos em que a matéria chega a ser superior a 30%, é considerada seca e, para casos em que a matéria seca inserida, é, no máximo 12%, é considerada úmida (POSTEL *et al.*, 2010).

Rostoffe (2010) diz que a maioria dos biodigestores atuam com o tipo de fermentação úmida, pois utilizam bombas para o movimento da matéria, facilitando o trabalho. Além disso, é preferível a fermentação úmida por causa do substrato escolhido, que normalmente são dejetos de animais confinados e, com a lavagem do confinamento, o dejetos é condicionado até os biodigestores.

Outro fator importante, de acordo com POSTEL *et al.* (2010), é a alimentação dos biodigestores, no qual se dividem em contínua, semicontínua e descontínua. A contínua é o processo em que o substrato é inserido constantemente no biodigestor, normalmente sendo inviável devido ao grande trabalho envolvido continuamente. Já a semicontínua é a introdução de substrato a cada determinado período de tempo, normalmente diariamente. A alimentação descontínua é conhecida como alimentação de batelada, em que se adiciona o substrato a cada período fechado de biodigestão e, normalmente, é utilizado um período de 20 a 30 dias; sendo que, cada alimentação nesses, retira-se todo o material antigo e adiciona-se o material novo.

### 2.3.2. Temperatura em biodigestores

Segundo Chernicharo (2007), o crescimento microbiano é possível nos biodigestores em três fases de temperatura: a termofílica, que varia de 50°C a 60°C; a mesofílica, que pode variar de 20°C a 42°C ou a psicofílica, que atua em temperaturas menores de 20°C. Cada uma dessas possui seu ponto ótimo de operação, cujo crescimento é máximo, e o ponto mínimo, cujo o crescimento é ínfimo ou até inibido. O mesmo autor relata que quanto maior a temperatura, maior a produção de biogás.

Atualmente, a maioria dos biodigestores existentes na região Sul do Brasil não possuem sistemas de aquecimento, pois demanda um maior gasto com a construção

e manutenção dos biodigestores. Porém, existem vários estudos que buscam mostrar que a temperatura possui uma grande importância no sistema.

Miranda, Amaral e Junior (2006) fizeram um experimento comparando três diferentes temperaturas de operação em biodigestores, sendo de 40°C, 35°C e 25°C. Neste, foi verificado que nos processos em que as temperaturas eram de 35°C e 40°C, os resultados obtidos eram equivalentes, tanto na produção de biogás, quanto na diminuição de sólidos voláteis. A temperatura de 25°C obteve o pior resultado.

Souza *et al.* (2005) realizaram um experimento em escala experimental variando a agitação, TRH e temperatura. Nele, constatou-se que, quando foram mantidas as condições de 30 dias de TRH, sem agitação e uma temperatura de 35°C, observou-se a melhor produção de gás. Também constatou-se que a temperatura de 40°C possuiu eficiência semelhante. Com a realização de outro experimento semelhante, os resultados apontaram que a agitação possui efeito apenas para casos em que o TRH for baixo, além de que, quanto maior a temperatura, maior a produção de gás (SOUZA *et al.* 2008).

Cremones *et al.* (2015) relatam que o processo de biodigestão foi consideravelmente influenciado pela temperatura, registrando uma maior produção de biogás e, conseqüentemente, de metano em um biodigestor com temperatura de 35°C, quando comparado com um na temperatura ambiente.

Segundo Tavares *et al.* (2016), a variação de temperatura da biomassa de um biodigestor modelo Bioköhler apresenta as características mostradas pelo Gráfico 1. Foi medida a temperatura da biomassa em três pontos distintos, sendo na parte superior, com 0,80m abaixo do nível máximo da biomassa, a intermediária, com 2,5m e o inferior com 4,2m.

Os mesmos autores também verificaram o efeito da temperatura do ar na produção do biogás, em que foi observado que, quando a temperatura do ar atingiu baixos valores, a produção de gás caiu drasticamente, quase zerando. Tal fato é mostrado pelo Gráfico 2.

Este experimento também constatou que altas temperaturas não tiveram redução na produção de biogás, sendo possível produzir esse gás normalmente com temperaturas acima de 40°C (TAVARES *et al.*, 2016).

Um dos grandes fatores que influenciam o ganho de temperatura é a radiação solar incidente, fazendo no com que a temperatura da biomassa do termopar superior



chegue a valores maiores que 42°C (TAVARES *et al.*, 2016).

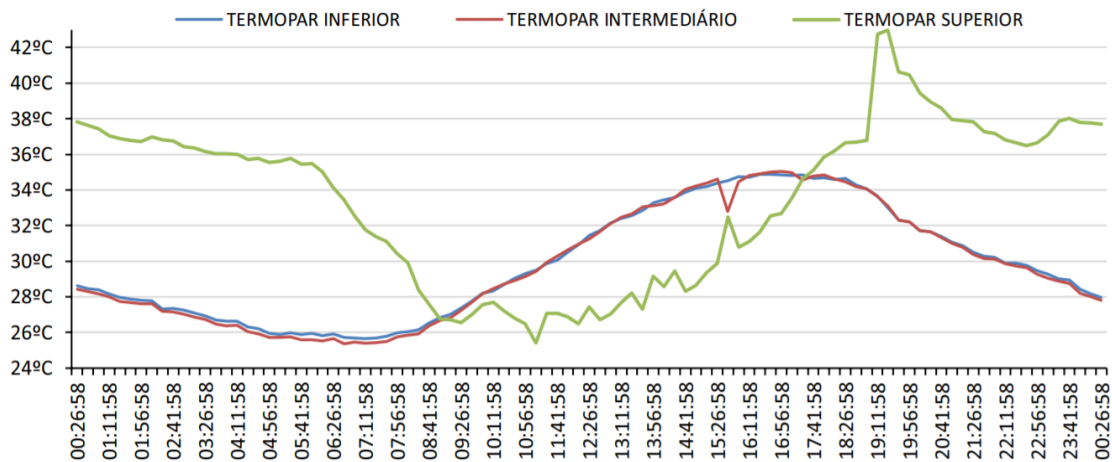


Gráfico 1: Comportamento das temperaturas internas do biodigestor em um dia.

Fonte: TAVARES *et al.*,2016.

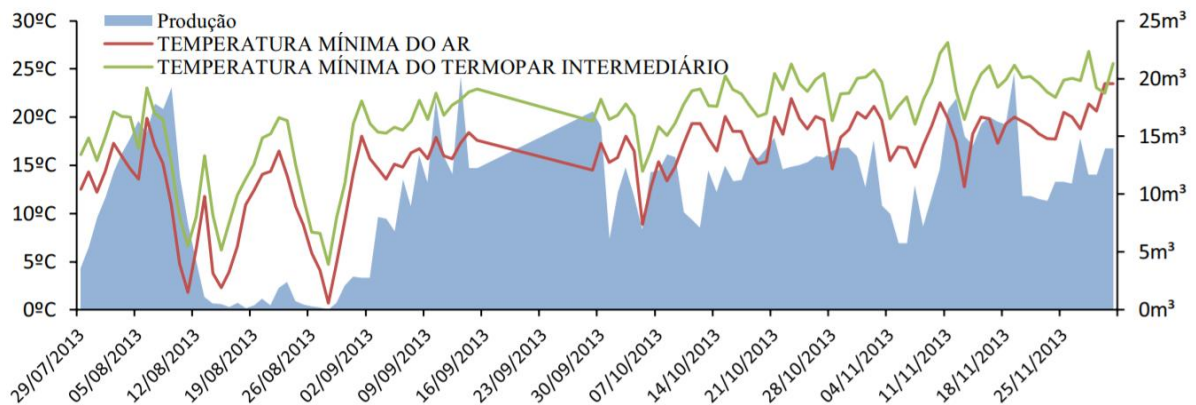


Gráfico 2: Produção de biogás, temperatura mínima do ar e temperatura mínima do termopar intermediário.

Fonte: TAVARES *et al.*, 2016.

Sendo assim, verifica-se que, conforme aumenta-se a temperatura da biomassa, o processo de biodigestão é acelerado. Visando isto, é possível buscar meios de fazer com que a temperatura do sistema aumente de modo a influenciar positivamente neste processo. Um destes meios é a utilização da radiação solar, para que essa energia seja utilizada em aquecimento dos biodigestores.

Desta forma, este trabalho busca entender como funciona os processos de transferência de calor dos biodigestores do tipo *plug-flow*, para que possa estar

buscando aprimorar os conhecimentos, com a finalidade de melhorar o processo de biodigestão.

### 2.3.3. Agitação, oxigênio, pH e disponibilidade de nutrientes

Segundo Hardoim, Júnior e Campos (2000), a agitação em um biodigestor possui a funcionalidade de fazer o material sólido orgânico se misturar com o meio líquido. Dessa forma, os microrganismos conseguem entrar em contato com esse material e fazer as reações biológicas.

Biodigestores sem agitação acarretam a formação de aglomerações e camadas, devido à diferença de densidade dos materiais e do meio líquido, resultando em uma área restrita de contato entre o microrganismo e o material orgânico e, conseqüentemente, uma baixa decomposição e produção de gás. Além disso, o substrato acumulado na parte superior pode acabar impedindo a saída de gás. Além, elevados níveis de agitação podem influenciar negativamente no sistema, pois interferem na vida microbiana e acabam inibindo o processo de biodigestão (FRIEHE; WEILAND; SCHATTAUER, 2010).

Biodigestor *plug-flow* é um sistema em que o biodigestor se comporta como se fosse um tubo e a biomassa se comporta como se fosse a água dentro. Desta forma, quando é inserido uma nova quantidade de dejetos dentro do biodigestor, ele irá empurrar a biomassa antiga, que sairá do mesmo, não ocorrendo a mistura interna.

De acordo com Rostoffe (2010), uma das principais características para que os microrganismos se desenvolvam, é a necessidade de um ambiente na ausência de oxigênio, ou seja, de um ambiente anaeróbio.

Na prática, Zitomer e Shrout (1998) dizem que os microrganismos conseguem sobreviver em um ambiente com uma quantidade mínima de oxigênio, porém é preciso controlar corretamente para que não iniba suas atividades. Isso ocorre por causa das bactérias denominadas anaeróbias facultativas, que possuem a capacidade de se desenvolver em um ambiente tanto com oxigênio quanto sem. Essas bactérias facultativas possuem a capacidade de consumir o oxigênio antes que seja prejudicial às arqueas metanogênicas.

Em biodigestores, o pH do substrato possui a mesma importância que a

temperatura, pois os microrganismos que estão dispostos nos diversos estágios de decomposição precisam de diferentes valores de pH para se desenvolverem (AL SEADI et al., 2008).

O mesmo autor também relata que, para as bactérias hidrolíticas e as acidogênicas, o pH ideal é de 5,2 e 6,3, respectivamente. Esses microorganismos conseguem sobreviver e realizar sua função com valores de pH próximos a este, porém, suas atividades terão uma menor eficiência. Já as acetogênicas e as arqueas metanogênicas são muito mais sensíveis à essa variação, possuindo um pH ideal entre 6,5 e 8.

Desta forma, o pH do sistema deve ser mantido entre 6,5 e 8 de forma constante, para que não afete a população das arqueas metanogênicas, pois elas são as mais sensíveis no processo de biodigestão.

De acordo com Silveira (2016), como qualquer ser vivo, cada tipo de microrganismos envolvidos no processo de decomposição anaeróbia precisa se alimentar. Sendo assim, a velocidade de crescimento e as atividades microbiana estão ligadas diretamente à disposição dos nutrientes; porém, é muito difícil definir a quantidade mínima desses para que a cultura possa se desenvolver corretamente.

## **2.4. TRANSFERÊNCIA DE CALOR**

A transferência de calor se preocupa com as taxas de transferência de energia, ou seja, a quantidade de energia que se transfere por unidade de tempo (ÇENGEL e GHAJAR, 2011). Segundo Incropera *et al.* (2007), transferência de calor é o movimento da energia térmica que ocorre devido à diferença de temperatura no espaço. Já Çengel e Boles (2011) afirmam que, se houver uma diferença de temperatura entre dois meios, a energia pode ser transferida entre eles.

Desta forma, a transferência de energia em forma de calor pode ocorrer de três modos distintos, sendo: a condução, a convecção e a radiação, no qual foram utilizadas para a determinação do balanço de energia do sistema, que é mostrado pela Equação (1):

$$\dot{E}_g + \dot{E}_a + \dot{E}_e - \dot{E}_s = \Delta \dot{E} \quad (1)$$

em que  $E_g$  e  $E_a$  são energia gerada e acumulada, respectivamente,  $E_e$  é a energia de entrada,  $E_s$  é a energia saindo e  $\Delta E$  a variação de energia.

Uma forma simples de encontrar a quantidade de energia ganha ou perdida por um sistema consiste em determinar a variação de temperatura do mesmo, como mostrado pela Equação (2) (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2006):

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (2)$$

em que  $Q$  é a quantidade de energia ganha pelo sistema,  $m$  é a massa,  $C_p$  é o poder calorífico do material e  $\Delta T$  é a variação de temperatura.

#### 2.4.1. Condução

Segundo Filho (2012), a condução é a transferência de energia das partículas mais energéticas para as menos energéticas de uma substância devido às interações entre elas.

A condução pode ocorrer nos sólidos, líquidos ou gases, de tal forma que nos sólidos ela ocorre devido às vibrações das moléculas, em que a energia é transferida por elétrons livres. Enquanto nos líquidos e gases, a condução ocorre devido a colisão dos movimentos aleatórios das moléculas, em que a energia líquida transferida pelo movimento molecular é chamada de difusão.

A taxa de calor transferida no meio depende diretamente da geometria, espessura, tipo de material e diferença de temperatura.

#### 2.4.2. Convecção

Segundo Fox, Mcdonald e Pritchard, (2006), convecção é a forma de transferência de energia através do movimento de um gás ou líquido em uma

superfície sólida. Ela envolve o efeito combinado de condução e movimento de um fluido, de modo que a transferência de calor aumenta de acordo com o aumento da velocidade do fluido, ou seja, caso a velocidade do fluido for nula, a transferência de calor ocorrerá por condução em vez de convecção.

Para Bird, Stewart e Lightfoot (2004), o movimento molecular aleatório (difusão) e o movimento global, ou macroscópica, são as formas de transferência de calor da convecção, de tal forma que tal transferência de calor ocorre quando há o contato de um fluido em movimento sob uma superfície sólida que possuem temperatura diferente entre si.

### 2.4.3. Radiação

Segundo Welty, Rorrer e Foster (2017), a radiação térmica é a energia emitida pelo corpo que se encontra a uma temperatura diferente de zero Kelvin, ou seja, não-nula.

Para Çengel e Ghajar (2011), além da radiação ser um fenômeno volumétrico, todos os sólidos líquidos ou gases transmitem radiação em certo grau.

Desta forma, dois corpos separados pelo vácuo, no qual possuem uma diferença de temperatura, também irão trocar calor até ao equilíbrio, mesmo não possuindo algum meio físico para a troca de calor por condução e convecção. Este processo está associado à redução de energia interna armazenada do corpo com maior energia, sendo transmitida por radiação para o corpo de menor energia. O sol seria um exemplo do dia a dia de radiação, pois este transmite calor por radiação para a terra.

Todos os sólidos, líquidos e gases podem emitir radiação, mas nem todos na mesma quantidade, sendo essa taxa de emissão de radiação definida como emissividade. Um corpo que possui maior emissividade, ou seja, que possa emitir uma taxa máxima, é chamada de corpo negro. A emissividade pode ser definida de acordo com o material e varia entre  $0 < \epsilon < 1$ , sendo 1 o valor da emissividade de um corpo negro.

Como qualquer corpo emite radiação, no período noturno um corpo ao ar livre irá irradiar ou receber radiação do céu. Como a temperatura do céu é baixa, atingindo

temperaturas negativas, as superfícies no ar livre noturno, perdem calor por irradiação para o céu.

#### 2.4.4. Resistência térmica

Segundo Filho (2012), para o caso especial em que a transferência de calor unidimensional sem geração de energia interna e com propriedades constantes, pode-se utilizar resistência térmica para a condução de calor, no qual esse conceito é parecido com o da resistência elétrica e condução de eletricidade, podendo ser utilizado tanto para condução, convecção e radiação.

Incropera *et al.* (2007) afirmam que a resistência térmica de condução em uma parede plana é apresentado pela Equação (3):

$$R_{t,cond} = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{\dot{Q}} = \frac{L}{K \cdot A} \quad (K/W) \quad (3)$$

em que  $T_{s,1}$  e  $T_{s,2}$  são as temperatura da superfície 1 e da superfície 2, respectivamente ( $^{\circ}C$ ),  $A$  é a área ( $m^2$ ),  $L$  a espessura ( $m$ ) da placa plana e  $K$  o coeficiente de transferência de calor por condução ( $W/m.K$ ) e  $\dot{Q}$  é a taxa de transferência de calor ( $W$ ).

A Figura 2 mostra o esquema de resistência térmica, para encontrar a resistência térmica equivalente.

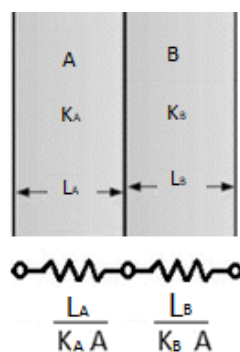


Figura 2: Sistema de Resistência Térmica.

Fonte: Çengel e Ghajar (2011), adaptado pelo autor.

Ao relacionar as resistências térmicas com resistências elétricas, também é necessário calcular a resistência total do sistema considerando um sistema elétrico, ou seja, para quando duas resistências estiverem em séries às resistências térmicas equivalentes, são calculadas de acordo com a Equação (4):

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \quad (K/W) \quad (4)$$

em que  $R_{eq}$  é a resistência equivalente e  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  e  $R_n$  são as diversas resistências em série.

Já a taxa de transferência de calor é calculada utilizando a Equação (5):

$$\dot{Q} = \frac{R_{\infty,1} - R_{\infty,2}}{R_{eq}} \quad (W) \quad (5)$$

na qual  $R_{\infty,1}$  e  $R_{\infty,2}$  são as resistências de convecção do meio 1 e 2, respectivamente.

Segundo Çengel e Ghajar (2011), o coeficiente global de transferência de calor (U) é dado pela Equação (6):

$$U = \frac{1}{R_{eq} \cdot A} \quad (W/m^2 \cdot K) \quad (6)$$

em que, A é a área da superfície.

O biogás dentro do biodigestor não possui movimento, desta forma, para calcular a perda de calor da biomassa para o biogás, deve-se utilizar o conceito de convecção natural, o qual ocorre no movimento do fluido pela diferença de densidade, em vez de movimento forçado. Sendo assim, as Equações (7), (8), (9), (10) e (11) mostram como encontrar essa transferência de calor (FILHO, 2012; ÇENGEL e GHAJAR, 2011):

$$L_c = \frac{A_s}{p} \quad (7)$$

$$Ra_L = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_1 - T_\infty) \cdot L_c^3 \cdot Pr}{\vartheta^2} \quad (8)$$

$$Nu = 0,54 \cdot Ra_L^{1/4} \quad (9)$$

$$h = \frac{k \cdot Nu}{L_c} \quad (10)$$

$$\dot{Q} = h \cdot A_s \cdot (T_1 - T_\infty) \quad (11)$$

Sendo assim,  $L_c$  é o comprimento característico,  $A_s$  é a área da superfície,  $p$  é o perímetro,  $Ra_L$  é o Rayleigh,  $g$  é a gravidade,  $\beta$  é a expansão volumétrica,  $T_1$  é a temperatura da superfície,  $T_\infty$  é a temperatura do fluido,  $Pr$  é o número de Prandtl,  $\vartheta$  é a viscosidade cinemática ( $m^2/s$ ),  $Nu$  é o número de Nusselt,  $h$  é o coeficiente de convecção do fluido,  $k$  é o coeficiente de condução da placa e  $\dot{Q}$  taxa de transferência de calor.

## 2.5. TEMPERATURA DO SOLO

Quando é realizado um estudo de transferência de calor onde o meio está em contato com o solo, esse pode possuir interferência devido a este contato, pois a diferença de temperatura do solo com o ambiente a ser estudado irá influenciar diretamente no ganho e perda de calor (TIECHER, 2016).

Alguns estudos realizados por Pereira, Angelocci e Sentelhas (2007) que buscaram identificar a temperatura de um latossolo de acordo com a sua



profundidade, resultaram na distribuição da temperatura como mostrada na Figura 3, de tal forma que, depois de uma determinada profundidade, a temperatura permaneceu constante, pois existe uma faixa de variação até que o sistema fique constante.

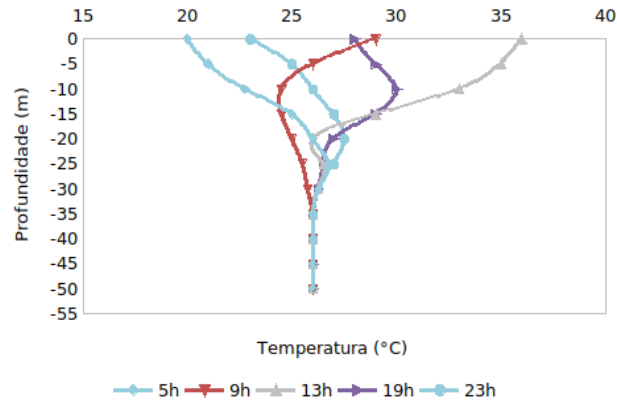


Figura 3: Temperatura do solo de acordo com sua profundidade.

Fonte: Pereira, Angelocci e Sentelhas (2007), adaptado pelo autor.

## 2.6. RADIAÇÃO E AMBIENTE

Radiação térmica são ondas resultantes das transições de energia de moléculas, átomos, elétrons da substância. Essa radiação é emitida por toda substância que possui temperatura maior que o zero absoluto. A radiação térmica também é definida como parte do espectro eletromagnético que se estende de cerca de 0,1 a 100 $\mu\text{m}$ , ou seja, a radiação térmica inclui a totalidade das radiações visível, e IV e uma parte da radiação UV. Já a parte visível do espectro é chamado de luz, que situa entre 0,4 $\mu\text{m}$  a 0,76 $\mu\text{m}$  (INCROPERA *et al.*, 2007). O espectro de ondas eletromagnético está sendo mostrada na

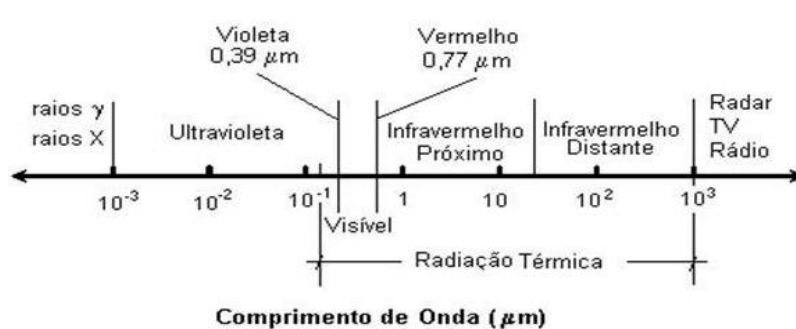


Figura 4.

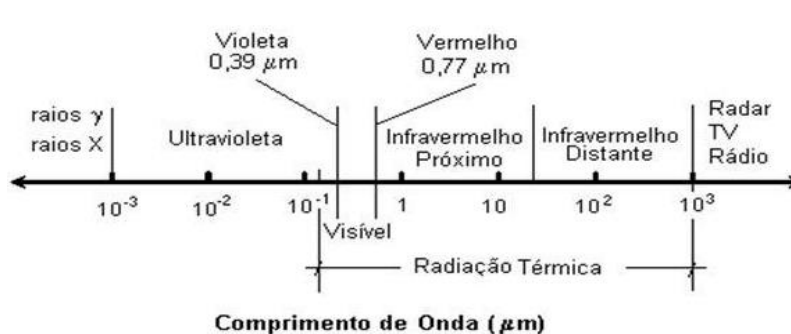


Figura 4: Espectro de ondas eletromagnéticas com a faixa da radiação térmica.

Fonte: Çengel e Ghajar (2011), adaptado pelo autor.

A radiação emitida pelos corpos na temperatura ambiente está na região infravermelho do espectro, situando-se entre  $0,76\mu\text{m}$  a  $100\mu\text{m}$ , de tal forma que apenas acima de  $800\text{K}$  os corpos começam a emitir radiação visível.

Alguns fatores auxiliam no entendimento do funcionamento da radiação, em que a emissividade de uma superfície é a razão entre a radiação emitida de uma superfície em uma determinada temperatura e a radiação emitida por um corpo negro na mesma temperatura (FILHO, 2012).

Quando uma superfície recebe um fluxo de radiação, chamamos de irradiação, e fatores como absorvidade, refletividade e transmissividade são diretamente ligados a este fluxo. Nisso, a absorvidade é a fração da irradiação absorvida por uma superfície, enquanto a parte refletida é chamada de refletividade e a fração transmitida, que atravessa o material, é chamada de transmissividade (WELTY; RORRER; FOSTER, 2017).

### 2.6.1. Radiação solar

O sol emite radiação em direção à Terra, e essas podem ser divididas em três fases: as regiões ultravioleta, visível e infravermelho. A radiação UV é muito energética e é emitida na faixa de  $100$  a  $380\text{nm}$ , porém, é praticamente absorvida pela camada de ozônio ao entrar em contato com a terra, enquanto que a região visível do

espectro solar é a faixa sensível do olho humano, variando entre 380 a 780nm (CARAM, 1998). O mesmo autor relata que a radiação infravermelho é invisível ao olho humano e seu efeito principal é o térmico, ou seja, ele é o responsável pelo aquecimento dos ambientes.

A radiação solar que atinge a superfície terrestre é chamada de “Radiação Global” e é dividida em duas formas, sendo a “Radiação Direta” e a “Radiação Difusa”. A primeira é considerada a parte incidente sobre a superfície terrestre em diferentes ângulos que depende da posição relativa do sol a cada momento; a segunda é a parte dispersa pela atmosfera, refletida pelas nuvens e pelos objetos da própria superfície terrestre (DUFFIE; BECKMAN, 1984).

A *American Society for Testing and Materials (ASTM)* definiu um espectro solar padrão com base em série de dados medidos nos Estados Unidos, onde a curva de Radiação Global representa o espectro solar padrão e indica a proporção de energia proveniente do Sol que atravessa a atmosfera e atinge a superfície terrestre, sendo aproximadamente 3% na região ultravioleta, 45% no visível e 52% no infravermelho a cada região do espectro solar (ASTM, 2003).

#### 2.6.2. Cores e absorvância solar

Dornelles, Caram e Sichieri (2013) dizem que, quando a radiação solar direta atinge uma superfície, a mesma tende a aumentar a temperatura devido à sua absorvância solar. Cores que apresentam baixa absorvância e altas emissividades são consideradas cores “frias”, enquanto que cores com alta absorvância e baixa emissividade são considerados cores “quentes”.

Grande parte dos estudos realizados para o ganho de energia pelas cores devido à radiação solar ocorre quando se busca o conforto térmico em edificações, que normalmente possuem como objetivo de melhorar o conforto para as pessoas (UEMOTO, SATO e JOHN, 2010).

#### 2.6.3. Corpo negro

É preciso conhecer o conceito de corpo negro para determinar a radiação, irradiação, poder emissivo ou a radiosidade de uma superfície, pois ele foi criado como um padrão para comparar com as superfícies reais (INCROPERA *et al.*, 2007). Os mesmos autores também dizem que o corpo negro possui alguns conceitos bases que devem ser levados em consideração, entre eles estão:

- Que ele absorve toda a radiação incidente, independente do comprimento de onda e de sua direção;
- Para dada temperatura e comprimento de onda, nenhuma superfície pode absorver mais que o corpo negro;
- O corpo negro emite ondas indiferente da direção, ou seja, o corpo negro é um emissor difuso;
- O corpo negro também é o emissor e absorvedor perfeito.

#### 2.6.4. Superfícies opacas

Em edificações, o envelope dos edifícios é a divisa entre o ambiente externo e o interno, em que este tem influência direta na energia solar que o edifício consegue absorver. O envelope indica qual a fração da energia que é absorvida, afetando o ganho de calor e, conseqüentemente, na temperatura interna, além de determinar qual a fração que é refletida (GIVONI, 1988). Parte da energia absorvida será perdida por meio da convecção e radiação para o ambiente externo, enquanto que o restante do calor será conduzido via condução para o interior do edifício (DORNELLES, 2008).

Segundo o mesmo autor, para entender como uma superfície opaca absorve calor, deve-se primeiramente saber o conceito de absorptância, que é definida como a razão entre a energia solar absorvida e a energia total incidente sobre uma superfície, ou seja, ela é quem determina o impacto de uma carga térmica da incidência solar sobre uma superfície.

A escolha de certas absorptâncias, cores claras, no envelope de um edifício, há uma minimização de gastos excessivos com equipamentos de climatização artificial, resultando em uma diminuição da energia gasta e contribuindo com o conforto do estabelecimento (ROSADO; PIZZUTTI, 1997). Desta forma, a escolha de cores

reflexivas é considerada uma característica arquitetônica para o controle climático e ao mesmo tempo é uma maneira viável de minimizar as cargas térmicas (GIVONI, 1994).

Já Dornelles (2011) afirma que a refletância solar das tintas afeta diretamente o desempenho térmico das superfícies pintadas, comprovando que quanto maior refletância solar da tinta, menor a temperatura das superfícies dos edifícios.

Do mesmo modo, a maior parte da radiação solar refletida ocorre por meio de superfícies com baixas absorvância solar, que normalmente são lisas e pintadas com cores “claras” (GIVONI, 1981. RODRIGUES; PEZZUTO, 2013). Já outros estudos apontam que ao aumentar a refletância solar das superfícies opacas externas de edifícios, ocorre uma diminuição da temperatura externa e conseqüentemente há um menor no ganho de calor da parte interna (BERDHAL; BRETZ, 1997).

Para os biodigestores que possuem gasômetro de cor preta ou branca, a radiação solar aquece o próprio gasômetro, resultando na perda de calor por convecção para o meio externo, enquanto que, para a parte interna, o calor terá que passar por condução pela resistência da lona e por convecção natural, aquecendo o biogás, em que esse, conseqüentemente, irá aquecer a biomassa, conforme a Figura 5.

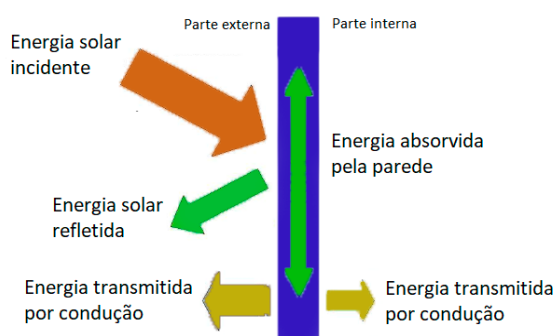


Figura 5: Energia ganho por superfícies opacas.

Fonte: Autoria própria, 2019.

#### 2.6.5. Superfícies transparentes e o efeito estufa

Objetos transparentes normalmente deixam passar a radiação solar na faixa visível e são opacos em relação às radiações solares infravermelhas. Um carro

estacionado debaixo do sol é aquecido por este efeito, o qual o vidro deixa a radiação solar visível atravessar, porém impede a radiação penetração da infravermelha (radiação que a parte interna do carro emite) sair (ÇENGEL e GHAJAR, 2011).

Ao entender todos estes conceitos e utilizá-los com a finalidade de aquecer o ambiente interno, ao contrário dos estudos realizados acima, é possível verificar que as utilizações de cores corretas podem fazer com que o ambiente ganhe uma quantidade maior ou menor de energia (DORNELLES, 2008).

Porém, de acordo com Cermaño (2005), ao utilizar biodigestores de gasômetros transparente, a radiação solar passará pelo mesmo e será a biomassa que a absorverá diretamente e, conseqüentemente, aumentará sua temperatura. Este conceito é conhecido como efeito estufa.

O efeito estufa ocorre principalmente devido à curva espectral da transmissividade do corpo em questão, no caso do vidro, sendo possível observar que a radiação na faixa visível é praticamente toda transmitida e, ao mesmo tempo, é quase totalmente opaco à faixa da região infravermelha. Desta forma, o mesmo pode ser utilizado como uma armadilha de calor, ou seja, o vidro deixa que a radiação solar entre, aquecendo seu interior, e, ao mesmo tempo, não permite que a radiação infravermelha saia (INCROPERA *et al.*, 2007). Tais autores afirmam que, para plásticos claros, o mesmo efeito pode ocorrer. A Figura 6 mostra a transmissividade espectral do vidro, do policloreto de vinila (PVC) e do polietileno.

A Figura 7 ilustra como seria a perda e o ganho de calor para um vidro, sendo que, no caso do vidro de 6mm de espessura, aproximadamente 84% da radiação solar é transmitida para o interior ao vidro, enquanto apenas 16% é perdida para a parte externa. Com isto, a radiação solar dentro de estufas é sempre menor que fora das mesmas, pois a proteção das estufas reflete e absorve parte da radiação incidente, enquanto que a parte externa da estufa não possui esse obstáculo (ÇENGEL e GHAJAR, 2011). Mesmo que a radiação interna seja menor, esta irá incidir diretamente nos componentes internos de uma estufa, resultando em um aquecimento do mesmo (CERMEÑO, 2005).

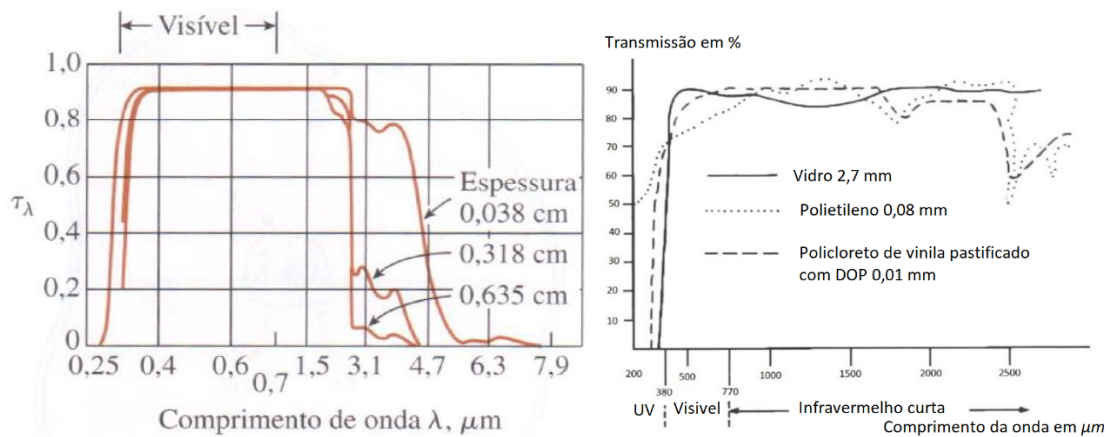


Figura 6: Transmissividade espectral dos vidros com baixo teor de ferro, policloreto de vinila (PVC) e polietileno na temperatura ambiente para diferentes temperaturas  
 Fonte: Çengel e Ghajar (2011) e Cermeño (2005), adaptado pelo autor.

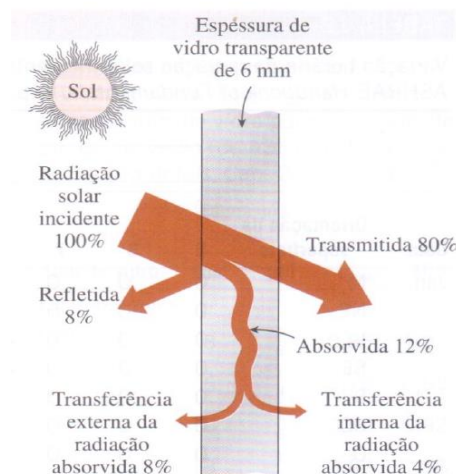


Figura 7: Transmissividade, absorção e reflexão da radiação solar de um vidro.  
 Fonte: Çengel e Ghajar (2011).

Devido aos biodigestores possuírem água, o biogás gerado nos mesmos tem elevada umidade relativa, no qual pode ocorrer a condensação desta na superfície do gasômetro caso tenha uma grande diminuição de temperatura externa. Quando o biogás saturado entra em contato com uma superfície mais fria, ele atingirá seu ponto de orvalho e, conseqüentemente, ocorrerá a condensação da água saturada. Essa água na superfície da lona diminuirá a quantidade de radiação incidente dentro do biodigestor, porém, ao mesmo tempo, diminuirá a quantidade de energia que o mesmo irá perder (CERMEÑO, 2005).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

Nesta seção, será apresentado como foram realizadas as construções dos biodigestores e quais os materiais utilizados para a obtenção dos dados.

#### 3.1. BIODIGESTORES

Para a realização deste experimento, foram construídos quatro biodigestores do tipo lagoa coberta, localizados na Unidade de Demonstração Itaipu, situada na cidade de Foz do Iguaçu - PR (25° 32' 49" Sul, 54° 35' 18" Oeste, 174m) no hemisfério sul do globo terrestre.

Nestes, foi verificado o efeito do ganho de calor pela radiação solar e também o comportamento térmico dentro dos mesmos, com a finalidade de buscar alternativas de aumentar as temperaturas internas, afim de obter uma melhor qualidade e ou uma maior produção de biogás.

Os biodigestores construídos foram do tipo lagoa coberta com o intuito de buscar a representação de um biodigestor próximo da escala real. Desta forma, os biodigestores construídos, possuem dimensão de 2,1x0,7m de comprimento e largura respectivamente e 0,4m de profundidade com um ângulo de 60°, resultando em um biodigestor de aproximadamente 250L, sendo cerca de 10 vezes menor que um biodigestor convencional.

Destes, dois buscaram reproduzir os biodigestores mais comuns na região oeste do Paraná, no qual um possuiu o gasômetro de lona branca, enquanto outro teve de gasômetro de lona preta, de tal forma que esses dois biodigestores não possuem isolante térmico em sua base. Também foi construído um biodigestor com gasômetro de lona preta, em que na parte inferior o contato com o solo possui uma camada de isolante térmico. Já o último biodigestor possui como gasômetro uma lona transparente com isolante térmico em sua base em contato com o solo.

O biodigestor 1 possui gasômetro de lona preta e isolante térmico em sua base em contato com o solo. Ele tem como finalidade comparar com o biodigestor 3 e verificar qual o efeito do isolante térmico.



O biodigestor 2 tem gasômetro de lona transparente e possui isolante térmico em sua superfície inferior que está em contato com o solo. Ele tem como finalidade mostrar o efeito da lona transparente pode trazer ao biodigestor. Será comparado com o biodigestor 1, pois a única diferença entre esses é a cor da lona, pois ambos possuem isolante térmico em suas bases.

O biodigestor 3 foi escolhido o modelo mais usual neste ramo, possuindo a cor do gasômetro preta e sem isolante térmico em sua superfície inferior em contato com o solo. Este biodigestor possuiu como objetivo ser o ponto inicial para o comparativo com os outros biodigestores.

Já o biodigestor 4 foi feito de lona branca e sem isolante, que possuiu como objetivo ser um comparativo com o biodigestor mais comum, o de lona preta sem isolante, e identificar qual o efeito da cor da lona para o ganho de calor.

Outro fator importante realizado no experimento foi a adição de isolante térmico na superfície do solo que está em volta dos biodigestores. Isso foi realizado com a finalidade de evitar que o solo ao redor do experimento e em contato com os biodigestores aqueça e esse, conseqüentemente, gere uma influência térmica nos biodigestores.

Nas Figuras 8, 9 e 10 mostra como o experimento foi instalado.

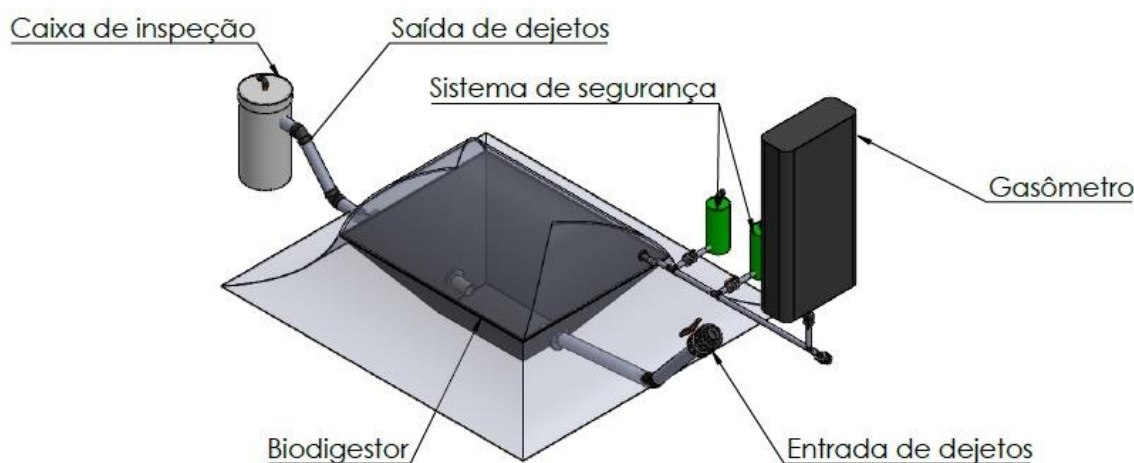


Figura 8: Modelagem de um biodigestor.

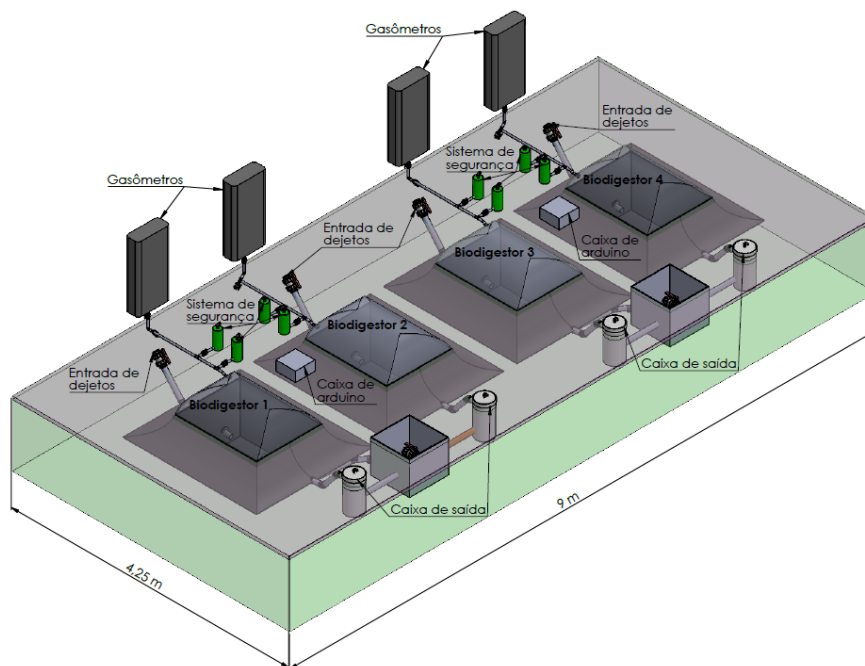


Figura 9: Montagem do experimento.



Figura 10: Instalação dos biodigestores no local.

### 3.2. TEMPERATURA E OS SENSORES DE TEMPERATURA

É importante ressaltar que este trabalho visou verificar tanto o ganho quanto a perda de calor nos biodigestores. O controle de temperatura foi realizado em 8 pontos de cada biodigestor, de tal forma que os resultados obtidos permitiram a obtenção do comportamento térmico e valor médio da temperatura tanto da biomassa, quanto do biogás. Com estes sensores, foi possível determinar o ganho e a perda de calor pelos

biodigestores durante o experimento.

Os pontos de instalação dos sensores foram no biogás, na biomassa e no solo. No biogás somaram-se três sensores: um próximo da superfície do gasômetro, um no meio do gasômetro e um próximo da biomassa. Já na biomassa, os sensores foram instalados em quatro pontos: próximo da superfície em contato com o biogás, no meio da biomassa, próximo da superfície inferior da lona e um instalado na lona inferior. O sensor instalado no solo está em contato com a lona inferior, porém em contato com o solo, por fora do biodigestor. Foram selecionados esses pontos visando entender como o calor se comporta dentro do biodigestor, ou seja, como ocorre o fluxo interno. Além disso, também foi instalado um sensor para verificar a temperatura ambiente. A Figura 11 mostra onde os sensores foram instalados nos biodigestores construídos.

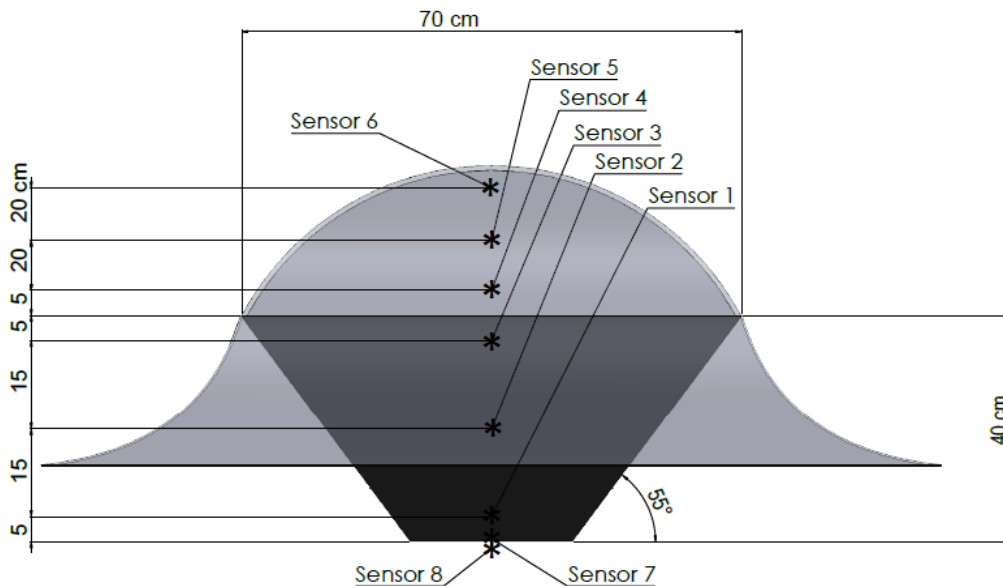


Figura 11: Instalação dos sensores de temperatura nos biodigestores.

Em razão dos biodigestores estarem em uma escala 10 vezes menor que a usual, para evitar o efeito do ganho de calor pelo solo devido ao aquecimento do mesmo pela radiação solar, foi adicionado uma camada de isolante térmico em toda superfície do solo em volta da área de experimento, de 1m de comprimento. A distância entre biodigestor é de 1 metro, com a finalidade não haver influência entre eles.

Para medir as temperaturas interna dos biodigestores, foi utilizado um sensor de temperatura compatível com arduino e de boa resolução, com a finalidade de

diminuir os erros. Para este experimento foi utilizada o sensor de temperatura modelo DS18B20, que possui como tensão de operação entre 3V a 5,5V, uma faixa de medição de -55°C a 125°C, além de possuir uma precisão de  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  se estiver em uma faixa de -10°C a 85°C.

Como o experimento foi realizado na cidade de Foz do Iguaçu - Paraná, o Gráfico 3 apresenta a temperatura máxima e mínima histórica na região. Sendo o experimento foi realizado no mês de setembro e outubro, mais especificamente, entre os dias 02/09/2019 até 03/10/2019, é possível observar que o mesmo não foi realizado na época mais quente e nem na época mais fria.

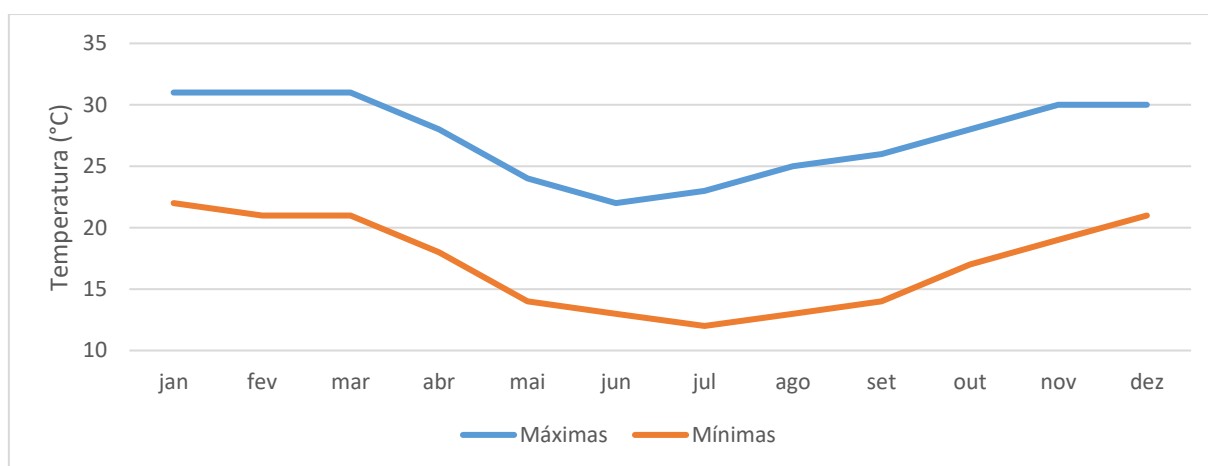


Gráfico 3: Temperatura máxima e mínima na cidade de Foz do Iguaçu.

Fonte: *National Centers for Environmental Information, 2019.*

### 3.3. RADIAÇÃO E SENSORES DE LUMINOSIDADE

Como o experimento visa compreender qual o ganho de calor nos biodigestores, tanto da energia solar, quanto da temperatura ambiente, o local escolhido fez com que todos os biodigestores possuíssem as mesmas condições ao longo do dia, onde tinham radiação solar em todo o gasômetro a partir de aproximadamente 7:00 horas da manhã. Para verificar este fator, foi instalado um sensor de luminosidade em cima de cada biodigestor.

Para determinar corretamente qual o horário do dia há claridade, os sensores utilizados foram o LDR 5mm para determinar se o local está sendo completamente

iluminado, se há uma sombra ou está de noite. Foi utilizado o modelo GL5528, que possui como características, tensão máxima 150 VDC, potência máxima 100mW, temperatura de operação de -30°C a 70°C e um espectro de 540nm, resistência no escuro de 1MΩ e na luz de 10-20KΩ.

Foi utilizado o site SunData, o qual destina-se a calcular a irradiação solar média mensal em qualquer ponto do Brasil, sendo que este foi atualizado de acordo com o banco de dados da segunda edição do Atlas Brasileiro de Energia Solar (CRESESB, 2018). Desta forma, o Gráfico 4 apresenta a média de irradiação solar ao longo do ano em Foz do Iguaçu. É possível observar que, na data da realização do experimento, não foi o caso com menor e nem o de maior irradiação.

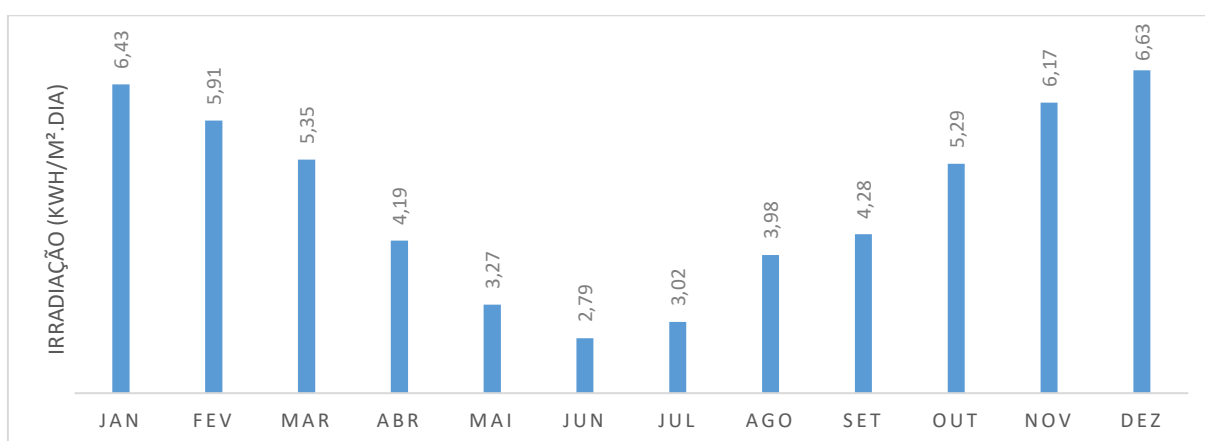


Gráfico 4: Média de irradiação solar em Foz do Iguaçu ao longo do ano.

Fonte: Sundata, 2019.

### 3.4. OBTEÇÃO DE DADOS E COMPARAÇÃO

Todos os sensores foram ligados a um arduino e os dados foram armazenados utilizando o módulo “micro expansão de armazenamento SD”. Desta forma, os valores foram coletados a cada 10 minutos e armazenados dentro de um cartão micro SD, no qual a cada sete dias os dados foram recolhidos e analisados.

Para a comparação dos modelos realizados e dados obtidos, foram realizadas várias medidas de temperatura para cada um dos tipos diferente de lagoa, e assim comparado os resultados para identificação de diferença entre os experimentos.

### **3.5. SUBSTRATO**

O substrato inserido no sistema foi o mesmo utilizado na alimentação dos biodigestores da Unidade de Demonstração Itaipu Binacional. A biomassa é oriunda da coleta de sobra orgânica dos estabelecimentos, como restaurantes e lanchonetes, localizados no Complexo Itaipu (CIBIOGAS, 2018).

Além disso, a biomassa é integrada à materiais orgânicos de apreensões da Polícia Federal, Polícia Rodoviária Federal e Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), na região oeste do Paraná, como, por exemplo, carnes, feijão, fumo, alimentos embutidos, óleo vegetal, entre outros, por conta do seu tamanho (CIBIOGAS, 2018).

Este trabalho buscou alimentar todos os biodigestores com a mesma matéria orgânica, com a finalidade de manter os mesmos macronutrientes em todos, da melhor forma possível.

### **3.6. TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO SISTEMA**

A perda de calor nas superfícies foi estimada de acordo com os valores medidos nos sensores de temperatura. Para determinar o ganho líquido de calor real destes, foi utilizada a Equação 2 e comparou-se a diferença de temperatura da biomassa no início do dia com a do final do dia. Também foi utilizado esse mesmo padrão para o período noturno.

Para determinar a perda de calor da biomassa com a superfície em contato com o solo, foram utilizadas as Equações 3, 4 e 5, no qual considerou-se que o coeficiente de condução da lona de PVC como uma placa plana. Já da biomassa para o biogás, foram aplicadas as equações 7, 8, 9, 10 e 11, no qual foi considerado que o biogás possui 50% de metano e 50% de dióxido de carbono para encontrar o coeficiente de condução e viscosidade cinemática do biogás e encontrar o valor de convecção natural.

### 3.7. O EXPERIMENTO

O experimento foi realizado construindo os quatro biodigestores de modo similar a um de tamanho real, com a finalidade de tentar ao máximo se aproximar destes. Sendo assim, os biodigestores foram selados e colocados gasômetros para medir a produção de biogás de cada um dos modelos construídos, buscando fazer uma comparação quantitativa. Foi escolhido como gasômetro secundário o uso de sacos de silagem, porém, no decorrer do experimento, eles acabaram furando devido a radiação solar e a medição do gás ficou comprometida.

Além disto, para aproximar o modelo ainda mais do real, foi utilizada a biomassa que é inserida no biodigestor da Unidade de Demonstração da Itaipu Binacional, com as mesmas condições de entrada, com ressalva que é inserida manualmente no experimento, enquanto que na UD-Itaipu é por uma moto-bomba.

A temperatura de entrada da biomassa foi a ambiente, além disto, ela sempre foi inserida entre os horários das 13:00 e 16:00, no qual a biomassa era terminada de ser preparada para os biodigestores da UD-Itaipu.

Os biodigestores experimentais eram alimentados de segunda à sexta feira, porém nos sábados e domingos não havia alimentação devido às limitações de horários dos operadores da unidade.

Os resíduos gerados eram descartados juntamente com os resíduos dos biodigestores da unidade, e os mesmos foram utilizados para a fertirrigação da Itaipu Binacional.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com os objetivos deste trabalho, neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos e a discussão sobre estes. Os dados apresentados foram retirados dos sensores instalados no experimento, com um intervalo entre as medidas de 10 minutos. Além disso, foi utilizado um sensor para a mediação da temperatura do solo no local, que possuiu uma média de 24,37°C.

Os gráficos apresentados com período de um dia foram retirados entre os dias 02/09/2019 e 03/09/2019. Já os gráficos de sete dias, mostram o comportamento do dia 02/09/2019 a 09/09/2020, enquanto que o experimento total foi do dia 02/09/2019 a 03/10/2019.

### 4.1. COMPORTAMENTO TÉRMICO DOS BIODIGESTORES

Em biodigestores do tipo canadense e *plug-flow*, tanto o biogás quanto a biomassa possuem baixo movimento e, por consequência disso, é possível considerar que eles estejam inertes para a realização do cálculo de perda de calor.

No experimento, é possível observar que a temperatura da biomassa possui uma baixa variação diária; isso ocorre principalmente por causa do poder calorífico da biomassa, que é composta por aproximadamente 90% de água. Já a temperatura do biogás ocorre elevadas variações, por causa, também, do seu baixo poder calórico.

#### 4.1.1. Sensores de temperatura

Devido ao modo de comportamento térmico e a instalação dos sensores, foi possível observar que, em todos os casos, os sensores de temperatura possuíram certo comportamento padrão.

O sensor 1 foi mais estável, possuindo a menor variação em todos os casos, isso ocorre principalmente pela maior constância na temperatura do solo, fazendo com que o biodigestor tenha basicamente ganho ou perda contínuo de calor pela superfície



inferior do biodigestor.

Já o sensor 2, que se encontra no centro da biomassa, possui a segunda maior variação térmica em quase todos os casos, pois a transferência de calor ocorre principalmente da superfície superior da biomassa, fazendo com que o centro perca ou ganhe calor para esta.

O sensor 3 possuiu a maior variação térmica por estar mais próximo da superfície da biomassa, ou seja, mais próximo do gasômetro. Este possui elevadas temperatura durante o dia, por conta da absorção da radiação solar, e baixas temperatura durante a noite, devido à perda de calor do biogás para o ambiente externo por convecção e radiação.

Os sensores 4, 5 e 6, como estão instalados no biogás, tenderam a acompanhar a temperatura ambiente, pois, devido ao baixo poder calorífico, eles terão grande variações de temperatura.

#### 4.1.2. Efeito do solo e isolamento térmico no experimento

Outro fator importante observado no experimento foi a utilização do isolante térmico na base dos biodigestores. Quando a temperatura do biodigestor era menor que a do solo, o isolante térmico dificultou a passagem de calor, fazendo com que o mesmo deixasse de ganhar calor do solo. Porém, quando a temperatura do biodigestor era maior que a temperatura do solo, o isolante térmico agia favorecendo que o mesmo não perdesse calor para o solo.

Os casos que não utilizaram isolante térmico na base do biodigestor, esses efeitos eram mais claros. Pois o ganho e a perda de calor dos biodigestores para o solo eram muito mais expressivos.

#### 4.1.3. Comportamento térmico do biodigestor 1

O Gráfico 5 e o Gráfico 6 apresentam o comportamento de temperatura da biomassa e do biogás respectivamente ao longo de um dia, dentro do período de 02/09/2019 a 03/09/2019. Já o Gráfico 7 e o Gráfico 8 mostram o mesmo

comportamento da biomassa e do biogás, respectivamente, porém para um período de sete dias, sendo do dia 02/09/2019 a 09/09/2020.

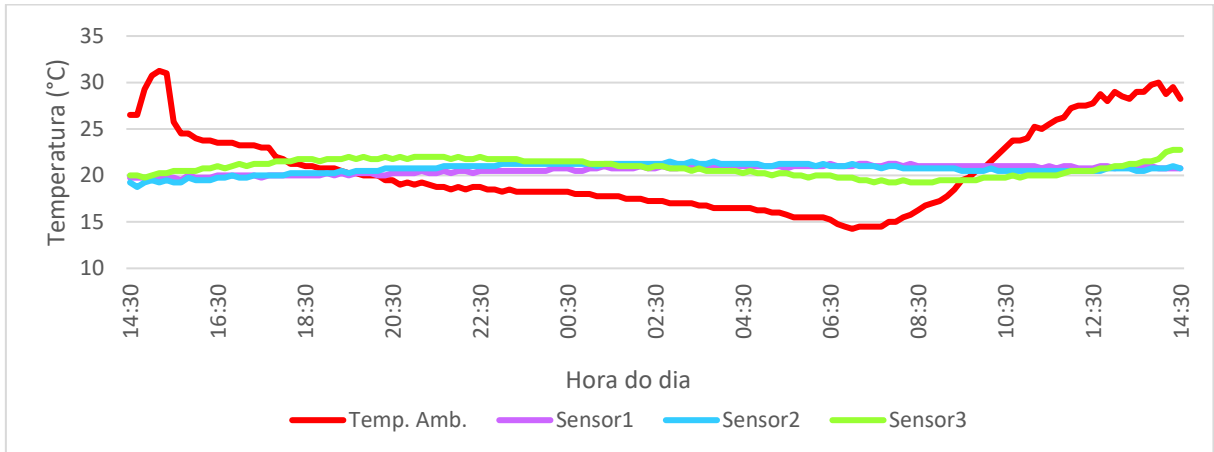


Gráfico 5: Comportamento da biomassa do biodigestor 1 no período de 24 horas.

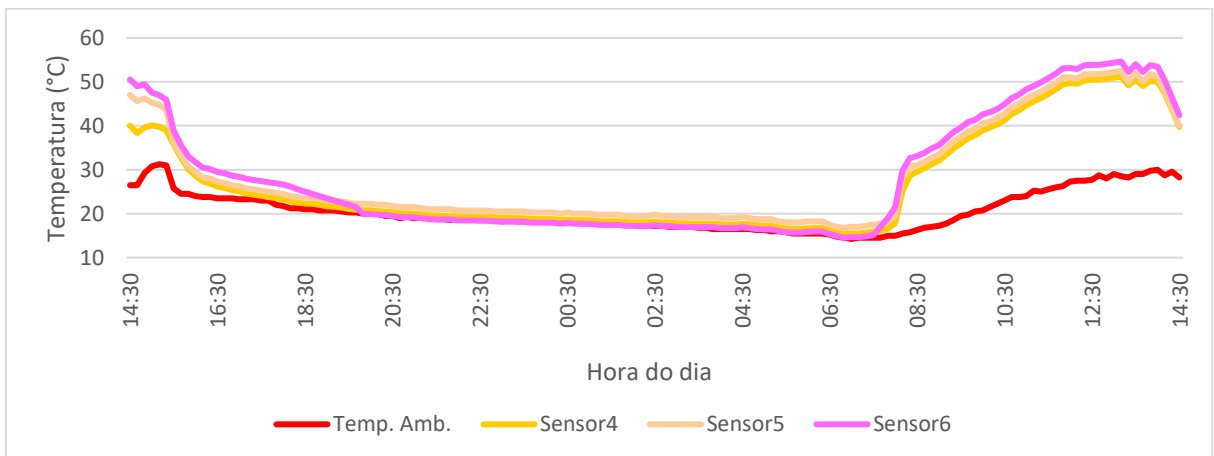


Gráfico 6: Comportamento do biogás do biodigestor 1 no período de 24 horas.

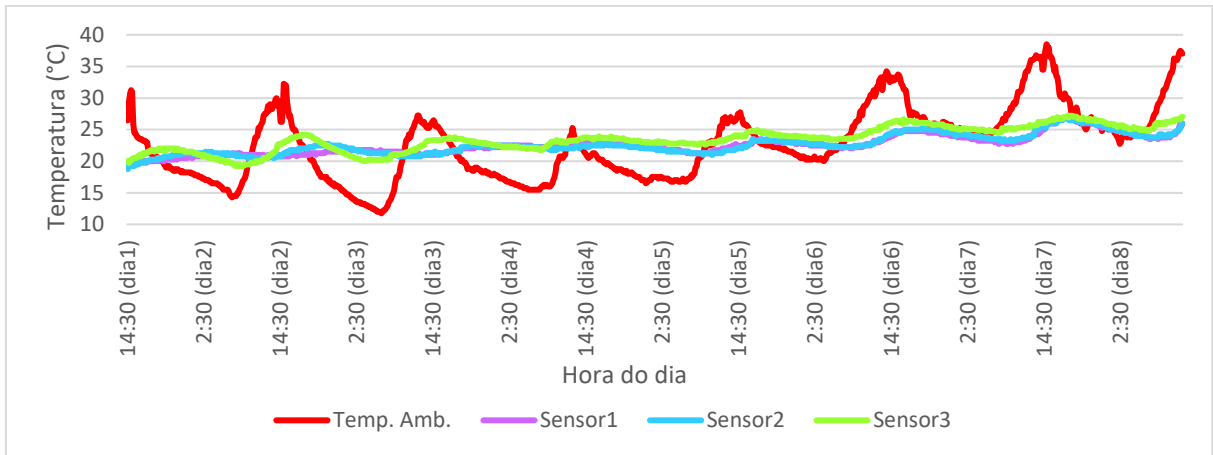


Gráfico 7: Comportamento da biomassa do biodigestor 1 em um período de 7 dias.

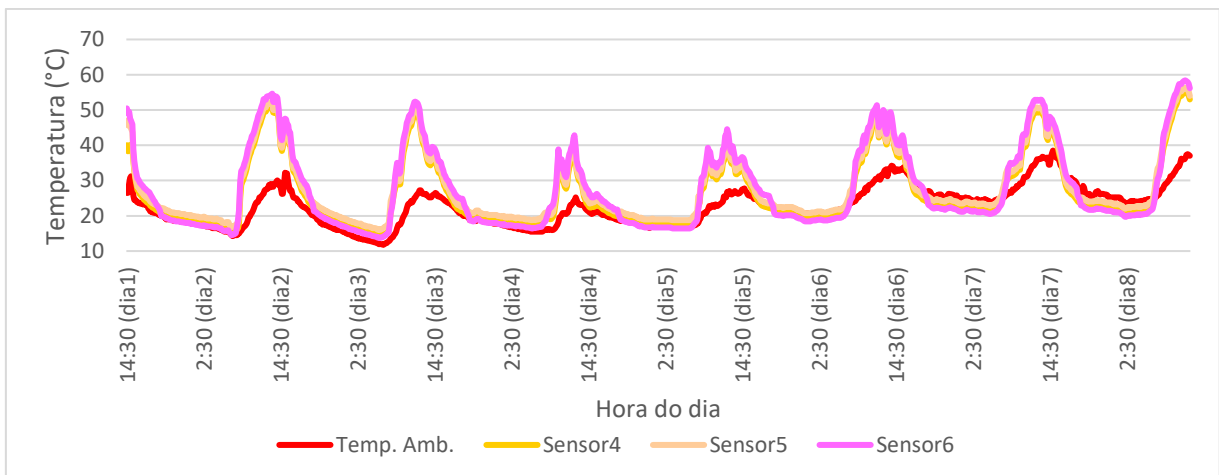


Gráfico 8: Comportamento do biogás do biodigestor 1 no período de 7 dias.

A Tabela 2 apresenta os valores de temperatura média e variação de temperatura, de acordo com os resultados apresentados nessa seção.

Tabela 2: Variação de temperatura e temperatura média da biomassa ao longo de um dia do biodigestor 1

	Sensores		
	1	2	3
Varição de temperatura em um dia (°C)	1,75	2,75	3,5
Temperatura média em um dia (°C)	20,69	20,69	20,78
Varição de temperatura em sete dias (°C)	2,25	2,57	2,78
Temperatura média em sete dias (°C)	22,61	22,70	23,53

#### 4.1.1. Comportamento térmico do biodigestor 2

O Gráfico 9 e o Gráfico 10 apresentam o comportamento de temperatura da biomassa e do biogás, respectivamente, ao longo de um dia, dentro do período de 02/09/2019 a 03/09/2019. Já o Gráfico 11 e o Gráfico 12 mostram o mesmo comportamento da biomassa e do biogás, respectivamente, porém para um período de sete dias, sendo do dia 02/09/2019 a 09/09/2020.

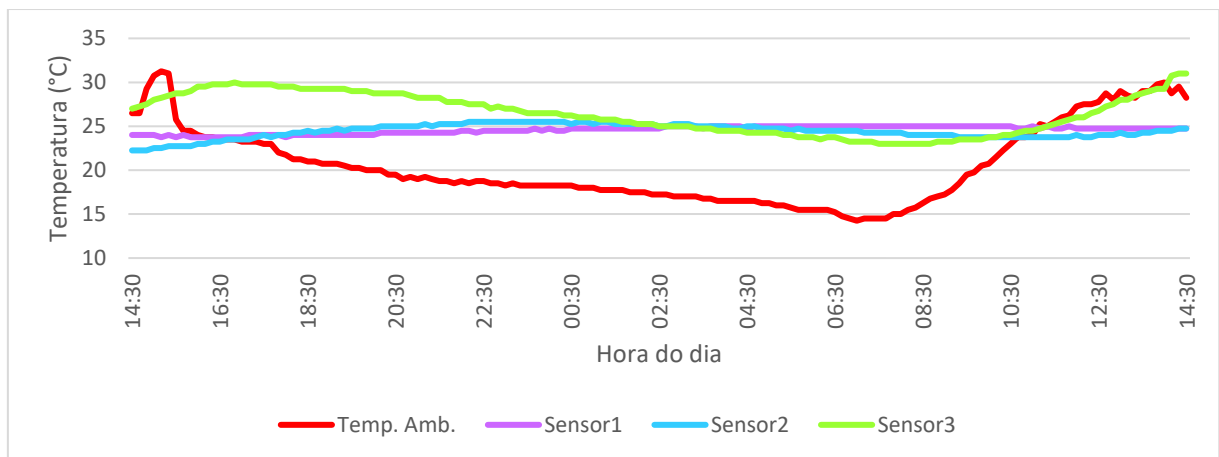


Gráfico 9: Comportamento da biomassa do biodigestor 2 no período de 24 horas.

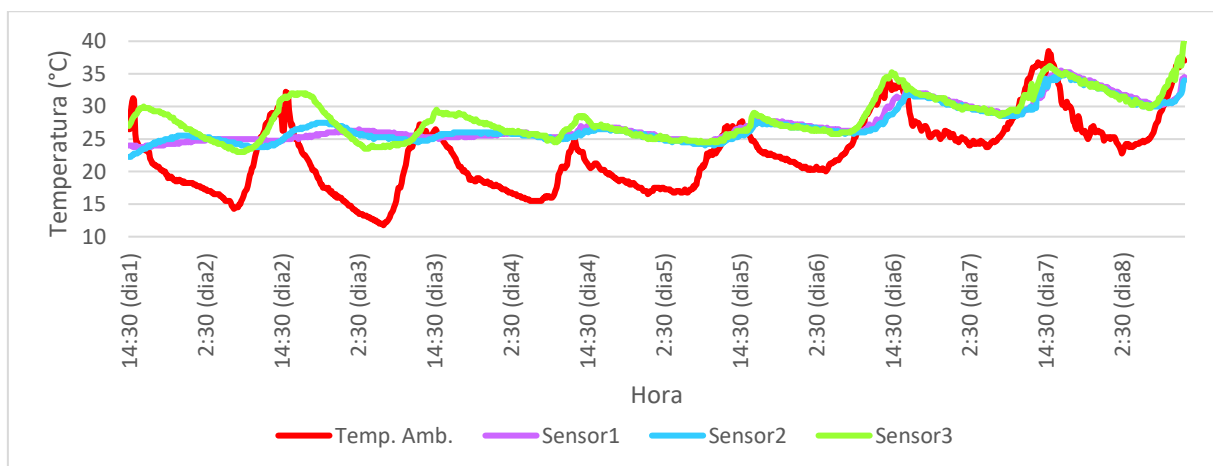


Gráfico 10: Comportamento da biomassa do biodigestor 2 em um período de 7 dias.

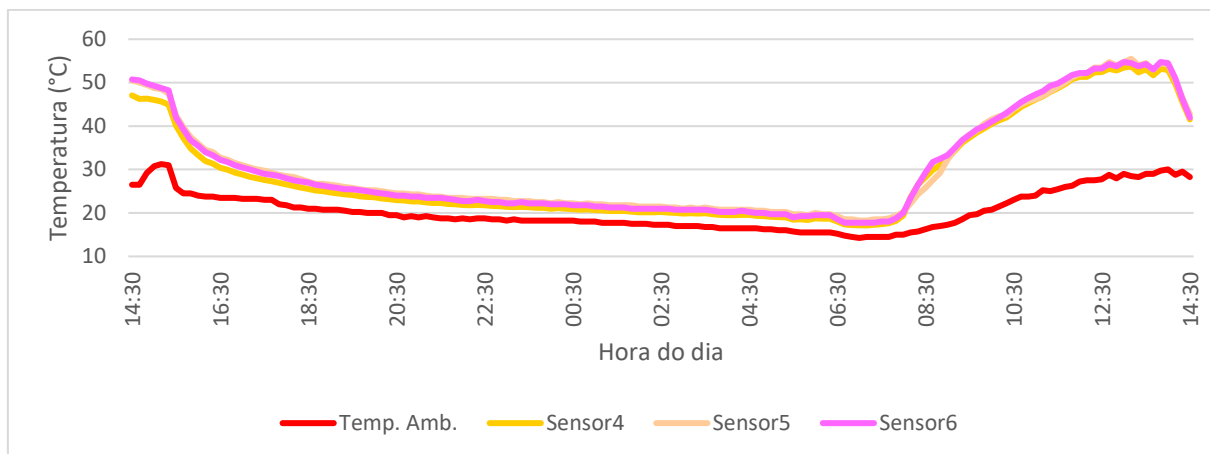


Gráfico 11: Comportamento do biogás do biodigestor 2 no período de 24 horas.

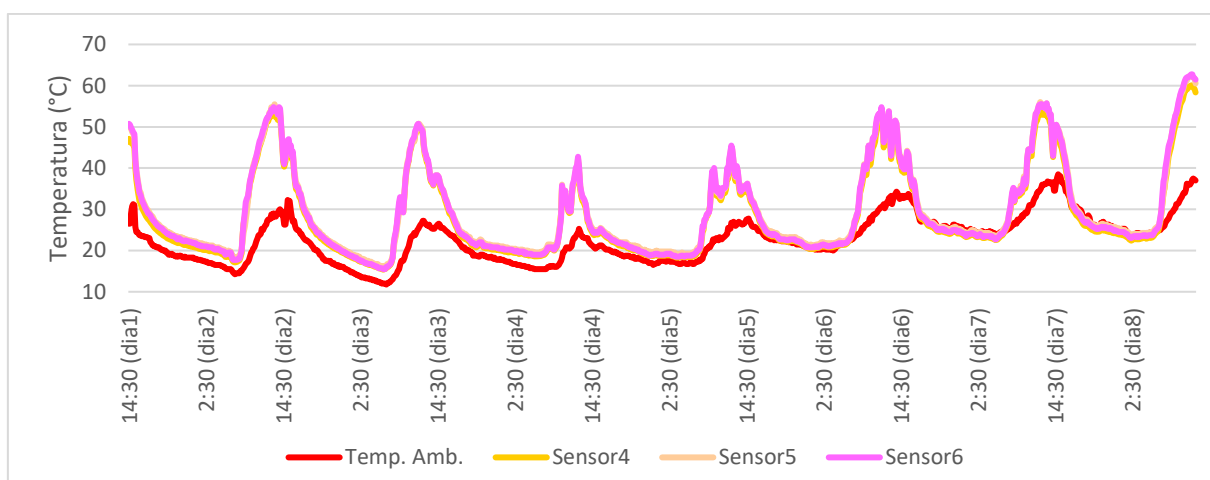


Gráfico 12: Comportamento do biogás do biodigestor 2 no período de 7 dias.

A Tabela 3 apresenta os valores de temperatura média e variação de temperatura de acordo com os resultados apresentados nessa seção.

Tabela 3: Variação de temperatura e temperatura média da biomassa ao longo de um dia do biodigestor 2

	Sensores		
	1	2	3
Variação de temperatura em um dia (°C)	1,25	3,25	7,75
Temperatura média em um dia (°C)	24,58	24,42	26,41
Variação de temperatura em sete dias (°C)	3,21	3,64	7,61
Temperatura média em sete dias (°C)	27,44	27,22	28,36

#### 4.1.2. Comportamento térmico do biodigestor 3

O Gráfico 13 e o Gráfico 14 apresentam o comportamento de temperatura da biomassa e do biogás, respectivamente, ao longo de um dia, dentro do período de 02/09/2019 a 03/09/2019. Já o Gráfico 15 e o Gráfico 16 mostram o mesmo comportamento da biomassa e do biogás, respectivamente, porém para um período de sete dias, sendo do dia 02/09/2019 a 09/09/2020.

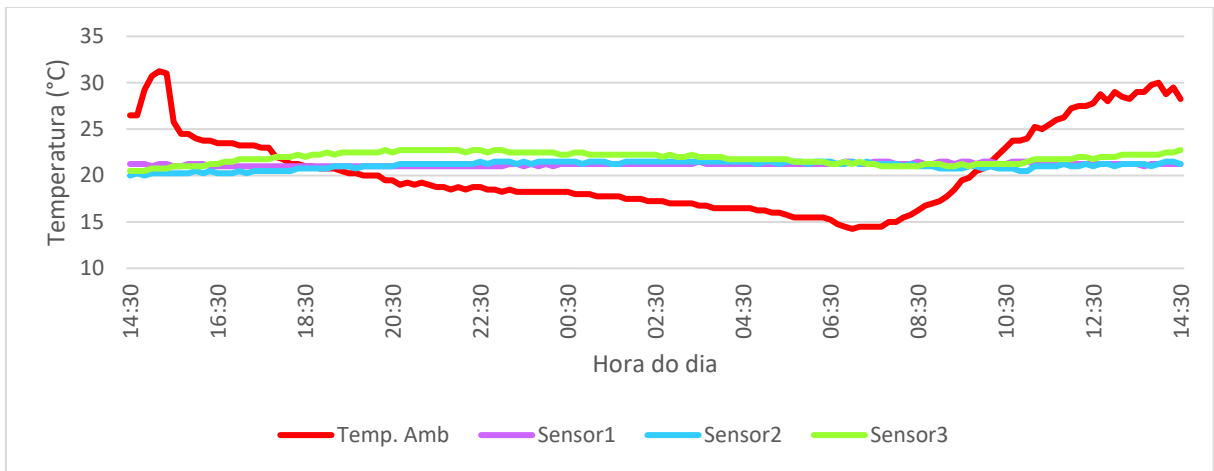


Gráfico 13: Comportamento da biomassa do biodigestor 3 no período de 24 horas.

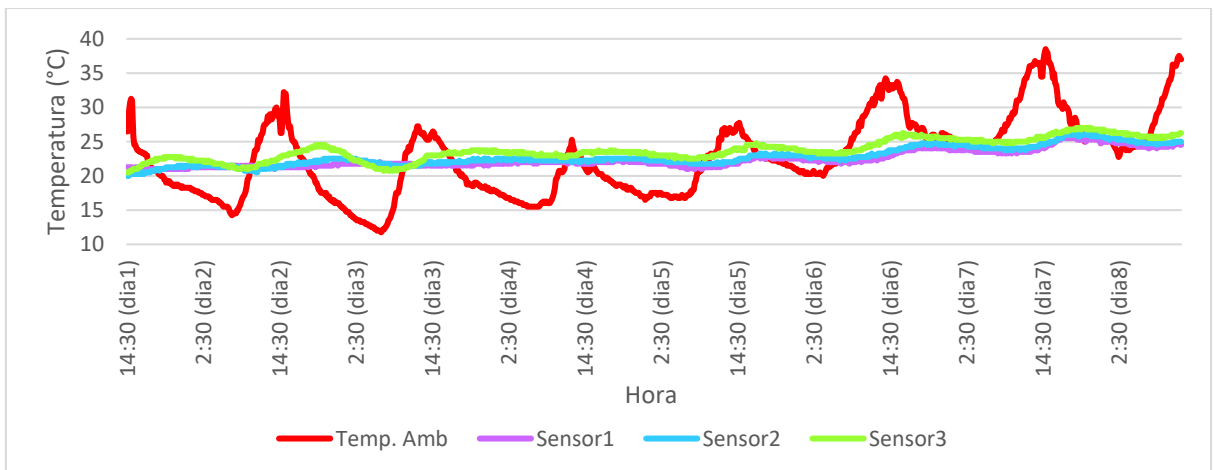


Gráfico 14: Comportamento da biomassa do biodigestor 3 em um período de 7 dias.

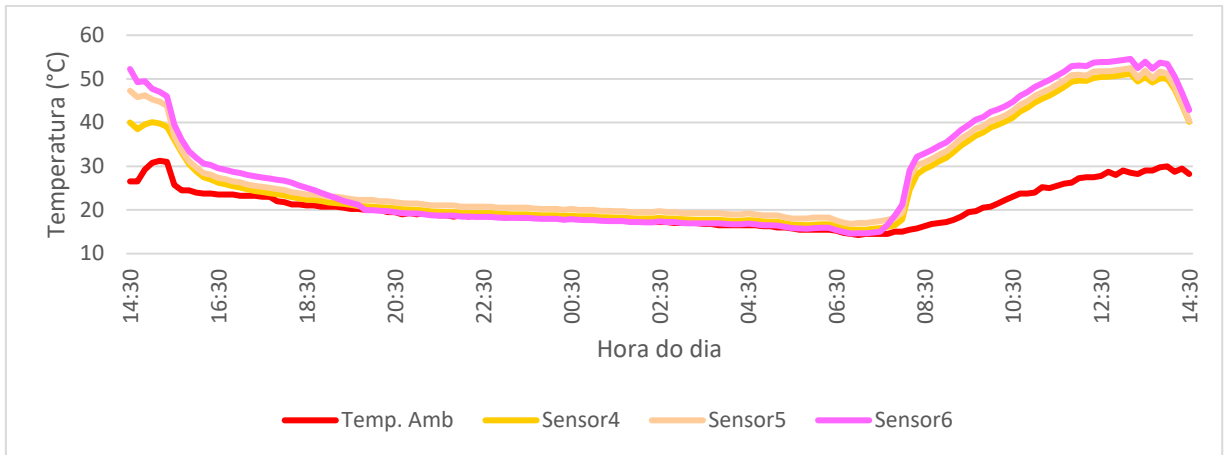


Gráfico 15: Comportamento do biogás do biodigestor 3 no período de 24 horas.

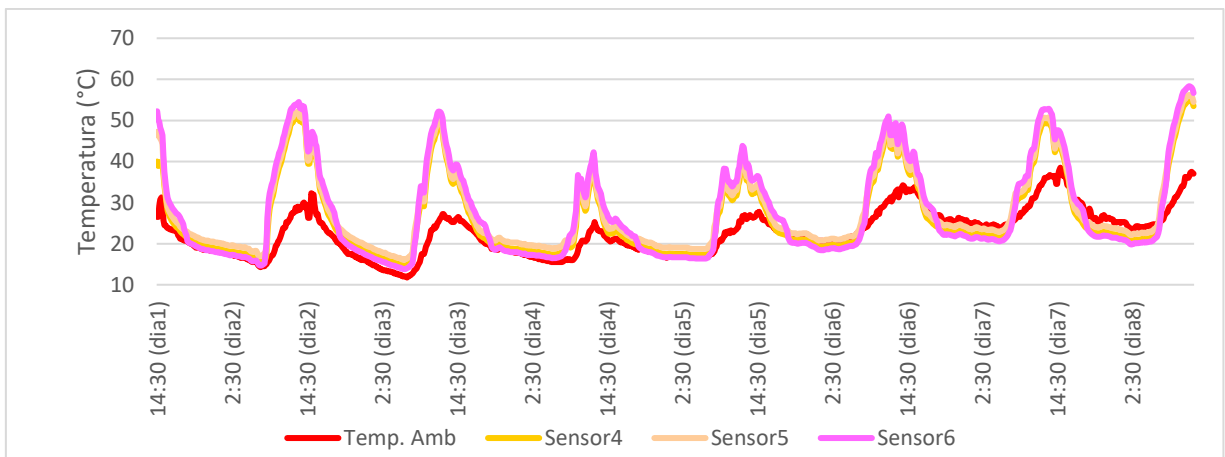


Gráfico 16: Comportamento do biogás do biodigestor 3 no período de 7 dias.

A Tabela 4 apresenta os valores de temperatura média e variação de temperatura de acordo com os resultados apresentados nessa seção.

Tabela 4: Variação de temperatura e temperatura média da biomassa ao longo de um dia do biodigestor 3

	Sensores		
	1	2	3
Variação de temperatura em um dia (°C)	0,5	1,5	2,25
Temperatura média em um dia (°C)	21,19	21,08	21,87
Variação de temperatura em sete dias (°C)	1,29	1,46	2,21
Temperatura média em sete dias (°C)	22,41	22,85	23,81

#### 4.1.3. Comportamento térmico do biodigestor 4

O Gráfico 17 e o Gráfico 18 apresentam o comportamento de temperatura da biomassa e do biogás, respectivamente, ao longo de um dia, dentro do período de 02/09/2019 a 03/09/2019. Já o Gráfico 19 e o Gráfico 20 mostram o mesmo comportamento da biomassa e do biogás, respectivamente, porém para um período de sete dias, sendo do dia 02/09/2019 a 09/09/2020.

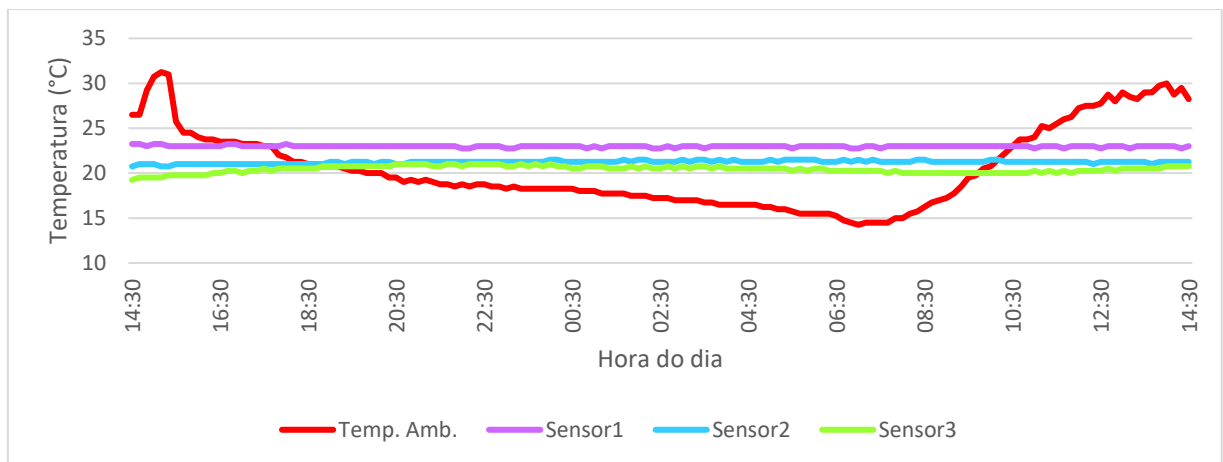


Gráfico 17: Comportamento da biomassa do biodigestor 4 no período de 24 horas.

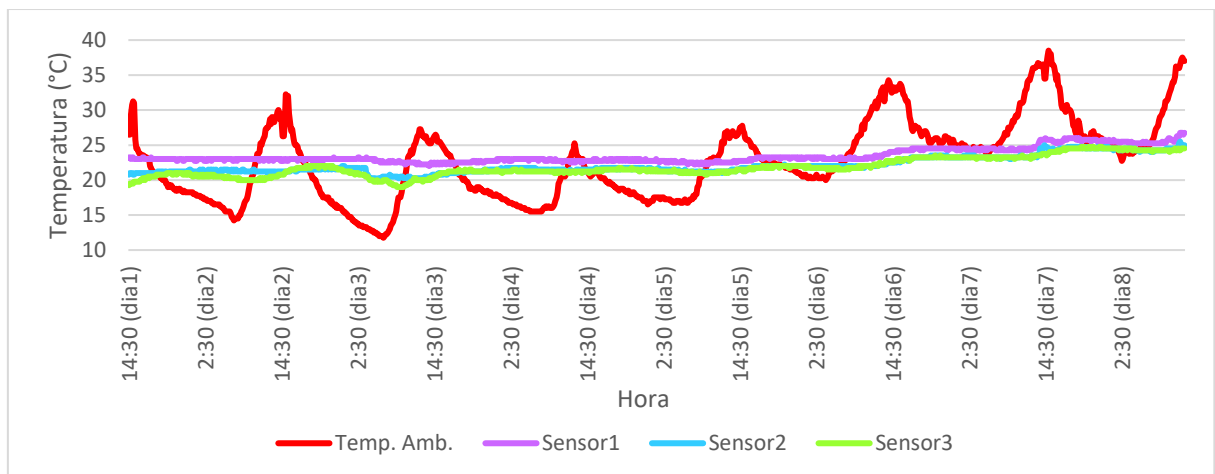


Gráfico 18: Comportamento da biomassa do biodigestor 4 em um período de 7 dias.



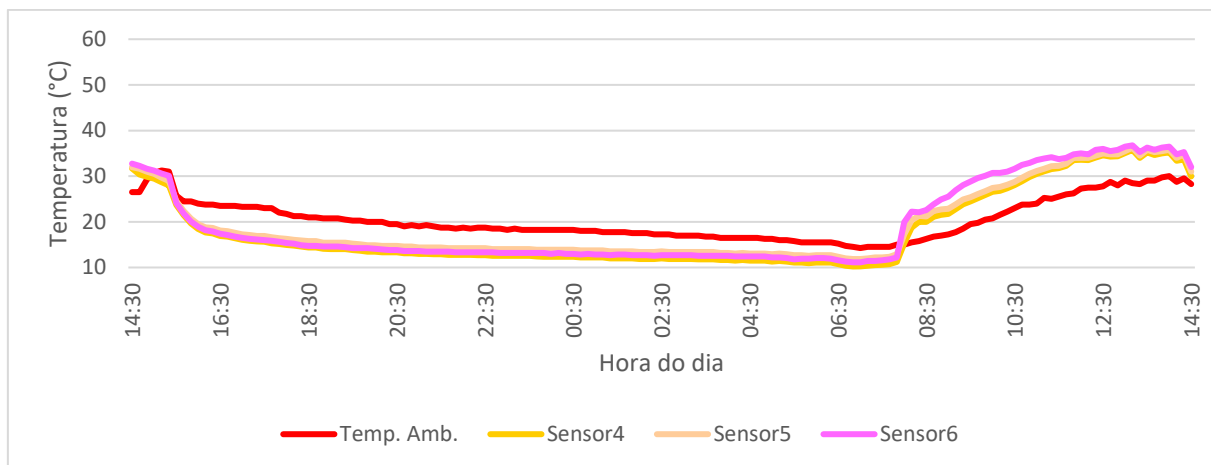


Gráfico 19: Comportamento do biogás do biodigestor 4 no período de 24 horas.

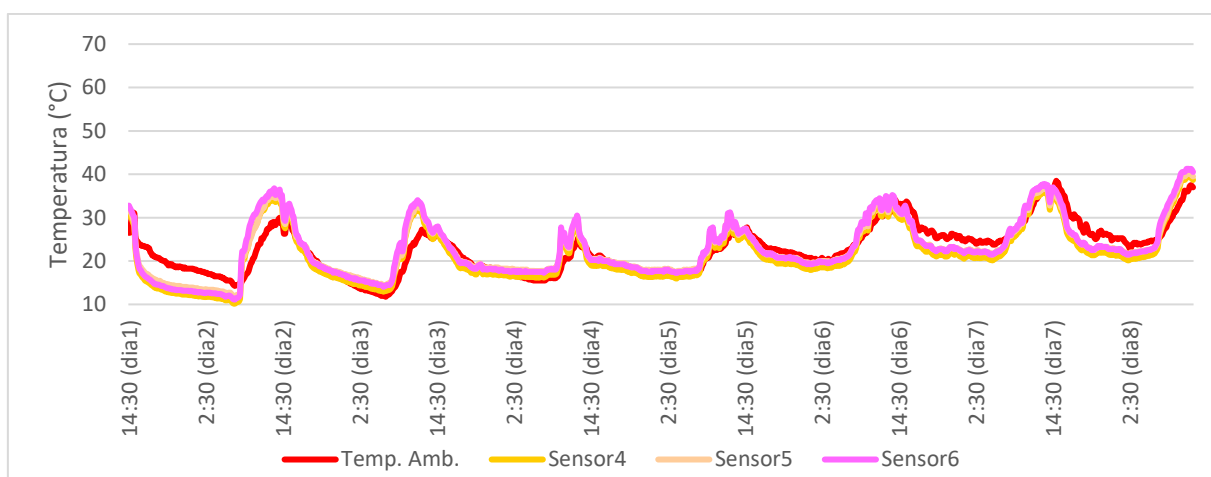


Gráfico 20: Comportamento do biogás do biodigestor 4 no período de 7 dias.

A Tabela 5 apresenta os valores de temperatura média e variação de temperatura de acordo com os resultados apresentados nessa seção.

Tabela 5: Variação de temperatura e temperatura média da biomassa ao longo de um dia do biodigestor 4

	Sensores		
	1	2	3
Variação de temperatura em um dia (°C)	0,5	0,75	1,75
Temperatura média em um dia (°C)	21,95	21,23	20,41
Variação de temperatura em sete dias (°C)	1,25	1,46	1,61
Temperatura média em sete dias (°C)	22,55	22,14	21,86

#### 4.1.4. Comparação do comportamento térmico da biomassa dos biodigestores

Os biodigestores 1 e 3 possuem apenas o isolante térmico como distinção entre si, no qual este componente gera uma resistência para a transferência de calor em relação ao solo. Sendo assim, é possível perceber que o primeiro possui uma maior variação térmica, a qual é justificada devido ao isolante dificultar o ganho e a perda de calor do mesmo pelo solo, fazendo com que sua temperatura acompanhe mais o comportamento da temperatura ambiente.

Desta forma, o biodigestor 1 possui uma maior variação térmica e uma média de temperatura menor quando comparada com o biodigestor 3. Esse fato ocorre devido ao biodigestor 1, no período noturno, perder mais calor para o biogás e o ar externo do que ganhar calor do solo, por causa do isolante térmico.

O biodigestor 2 possui elevadas temperaturas de biomassa, contudo, possui uma maior variação de temperatura, fazendo que o mesmo fique mais instável. É possível verificar que o sensor 3, em alguns horários, ultrapassa a temperatura ambiente. Isso acontece em função do efeito da lona transparente, que permite que a radiação solar incida diretamente na biomassa, ao invés de parte ficar retido na lona. Ou seja, a radiação solar está aquecendo diretamente a biomassa em vez de estar aquecendo o gasômetro e este aquecer a biomassa.

Já o biodigestor 4 possui a menor temperatura e a menor variação, consequentemente, esse é o biodigestor mais estável. Isso ocorre devido à lona ser branca e possuir a menor absorção da radiação solar.

No experimento foi possível verificar que o biodigestor 4 é o mais estável. Os biodigestores 1 e 3, possuem temperaturas semelhantes entre si, sendo que o biodigestor 3 é mais instável que o biodigestor 1. Já o biodigestor 2 é o menos estável, pois possui a maior variação térmica, porém o mesmo apresenta maior média de temperatura da biomassa.

É possível observar que a biomassa, em um período, pode sofrer alterações relativamente grandes. Além disto, o sensor 3 possui uma maior alteração térmica devido à proximidade da extremidade superior do biodigestor, enquanto que o sensor 1, que está próximo ao solo, é o mais estável.

#### 4.1.1. Comparação do comportamento térmico do biogás dos biodigestores

O biogás possui um baixo calor específico em relação à água, como consequência, acompanha a temperatura ambiente, tendo, assim, maior variação térmica.

Os biodigestores 1 e 3 possuem praticamente o mesmo comportamento. Já o biogás do biodigestor 2 possui temperatura um pouco mais elevada no período noturno por causa da maior temperatura da biomassa neste e, também, por conta que a irradiação da lona para o céu pode ser menor que as outras lonas. O biodigestor 4 possui a menor variação de temperatura do biogás, em função principalmente da cor branca, que possui um baixo valor de absorvidade, resultando em uma temperatura diurna menor em comparação aos outros biodigestores.

As medidas de temperatura em um mesmo momento no biodigestor 2 apresentam entre si menor variação, ou seja, a temperatura interna do biogás neste biodigestor é mais homogênea que nos demais. Este fato se dá por causa do efeito estufa que o gasômetro causa no sistema.

Nos biodigestores 1, 2 e 3 percebe-se que a média de temperatura do biogás está acima da temperatura ambiente, porém no biodigestor 4 a temperatura do biogás está tanto mais baixa que a temperatura da biomassa, quanto da temperatura ambiente. Isso pode ter ocorrido pois a lona do gasômetro utilizada é de dupla camada, sendo preto internamente e branco externamente. Esse fato pode influenciar na perda de calor por irradiação para o céu. Porém, para que se tenha uma conclusão mais precisa sobre esse assunto, é preciso um estudo mais aprofundado em relação a perda de calor de biodigestores para o céu durante o período noturno.

Além disso, pode-se perceber que o sensor 6 de todos os biodigestores possui a menor temperatura noturna, o que reforça a perda de calor por radiação para o céu, pois a temperatura do gasômetro é menor que a temperatura ambiente no período noturno devido à essa perda de calor e, consequentemente, o sensor mais próximo a ele terá uma menor temperatura. No biodigestor 4 fica visível esse efeito, enquanto que nos biodigestores 1 e 3 esse impacto é menor, porém ainda visível. Já no biodigestor 2, a implicação é a menor dentre os demais, ficando quase imperceptível.

## 4.2. TEMPERATURAS MÉDIAS DA BIOMASSA

Os Gráficos 21, 22, 23 e 24 mostram a média da temperatura por dia de experimento em cada sensor que estão instalados na biomassa do biodigestor 1, 2, 3 e 4, respectivamente, durante o período de 02/09/2019 a 03/08/2019.

É possível observar que as temperaturas da biomassa em todos os casos possuem uma relação, em que a temperatura externa possui grande influência nos biodigestores, tanto para a perda, quanto para o ganho de calor.

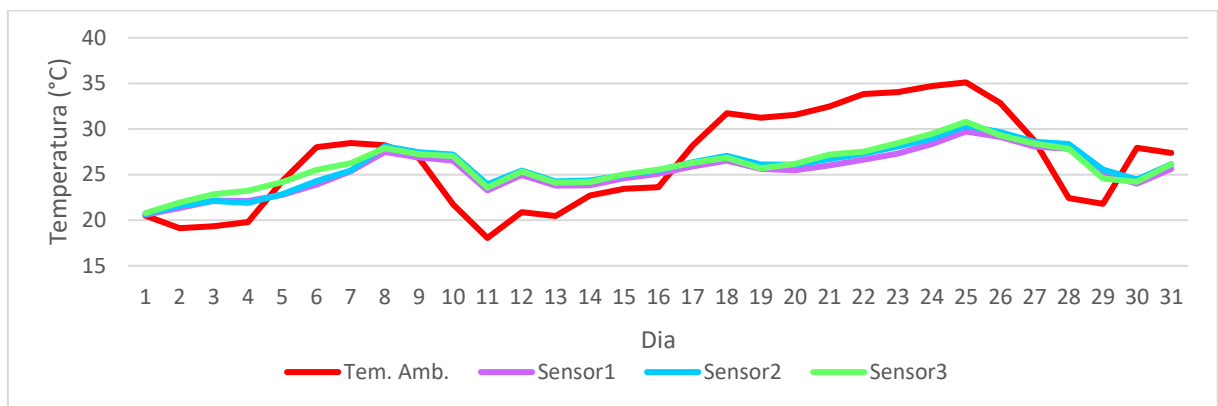


Gráfico 21: Temperatura média dos sensores da biomassa ao longo do experimento no biodigestor 1.

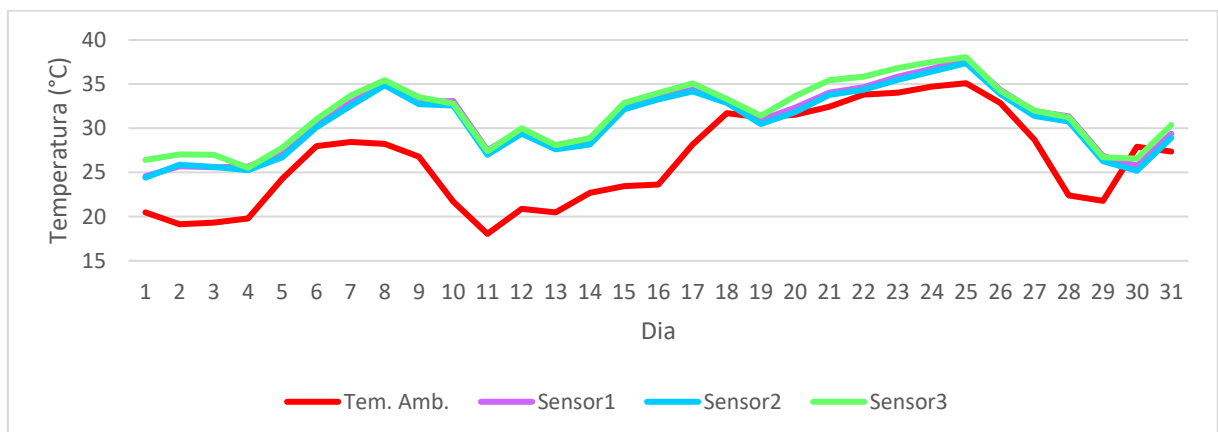


Gráfico 22: Temperatura média dos sensores da biomassa ao longo do experimento no biodigestor 2.

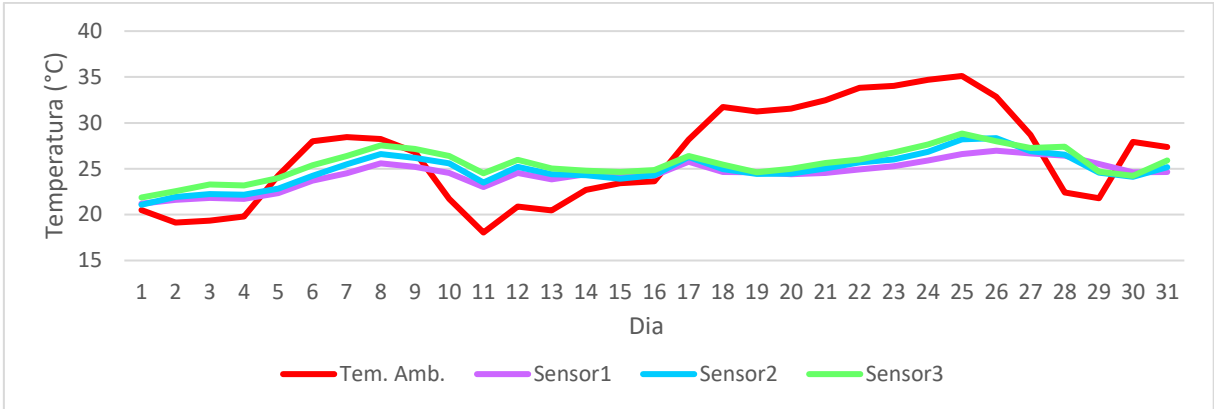


Gráfico 23: Temperatura média dos sensores da biomassa ao longo do experimento no biodigestor 3.

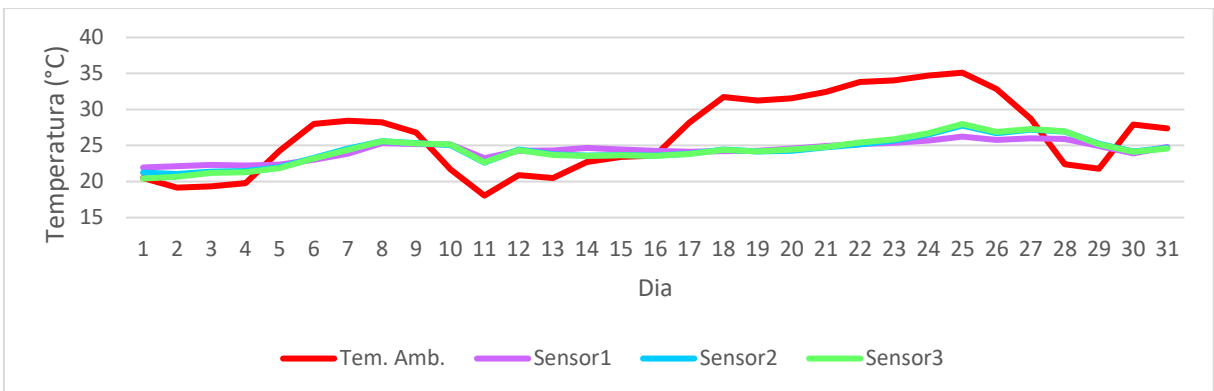


Gráfico 24: Temperatura média dos sensores da biomassa ao longo do experimento no biodigestor 4.

Nos dias 10, 11 e 12, a temperatura ambiente estava abaixo da temperatura da biomassa, mesmo assim, nos três casos, houve aumento da temperatura. Isso ocorre por interferência da radiação solar. Porém, nesses casos, há um menor ganho de calor pelo biodigestor, pois ocorrerá uma maior perda de calor para o meio ambiente devido à menor temperatura do local.

A Tabela 6 mostra a variação de temperatura entre os dias 11 e 12, a qual se pode perceber a influência da lona, em que as pretas possuíam aproximadamente o mesmo valor, enquanto que a lona transparente, devido ao efeito estufa, possuiu uma maior variação. Já a lona branca, devido à baixa absorção da radiação, possuiu menor ganho neste período.

Tabela 6: Variação de temperatura entre os dias 11 e 12 do experimento.

Biodigestor	1	2	3	4
<b>Variação de temperatura (°C)</b>	1,47	2,19	1,51	1,34

As médias de temperatura da biomassa, juntando todos os sensores, e a variação de temperatura dos biodigestores ao longo do experimento estão sendo mostradas pela Tabela 7, enquanto o Gráfico 25 está mostrando as temperaturas médias em cada um dos biodigestores.

Tabela 7: Temperatura média da biomassa e variação de temperatura ao longo do experimento

	Biodigestores				Temperatura Ambiente
	1	2	3	4	
Média de temperatura da biomassa (°C)	25,76	31,13	24,96	24,69	26,43
Média de variação de temperatura (°C)	2,71	5,54	1,92	1,53	17,86

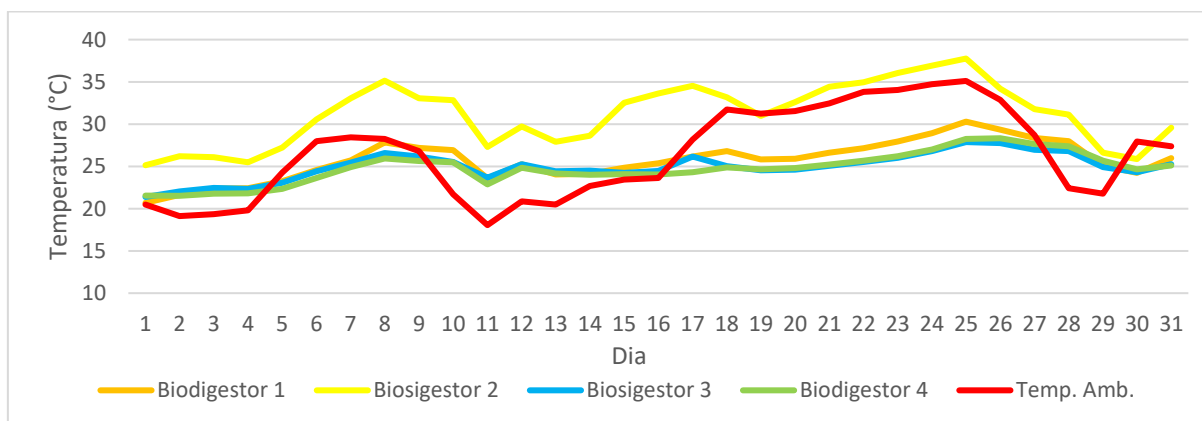


Gráfico 25: Temperatura média dos biodigestores ao longo do experimento.

Pode-se observar que o biodigestor 2 possui a maior média de temperatura e, em maior parte do tempo, uma média superior a 4°C em relação aos outros biodigestores. O biodigestor 4 apresenta a menor temperatura média.

Já os biodigestores 1 e 3 têm basicamente a mesma temperatura média. Nos

dias 1 ao 6, observa-se que o biodigestor 3 possui maior temperatura em relação ao 1, isso pode ter ocorrido em virtude da temperatura média do solo ser 24,37°C, fazendo a biomassa ganhar calor por condução.

Sendo assim, fica mais claro que o isolante térmico é eficaz apenas quando a temperatura da biomassa for maior que a temperatura do solo, pois ela evita que o biodigestor perca calor.

Procurando um período em que a temperatura da biomassa do biodigestor 1 e 3 tenham valores maiores que a temperatura do solo, na Tabela 8 é possível verificar que a variação de temperatura no período entre o dia 4 a 8 corresponde a fator. Ao fazer uma comparação entre esses biodigestores, é observado que o isolante térmico é muito efetivo quando a temperatura da biomassa atinge valores maiores que o do solo, fazendo com que o sistema perca muito menos calor em relação a um sistema sem isolante. Por conta disso, o biodigestor 1 possui aumento de temperatura da biomassa de 45% maior que o biodigestor 3.

Ao comparar os biodigestores 3 e 4 busca-se verificar o efeito da lona do gasômetro, onde se observa que a lona preta possui maior eficiência no aquecimento, possuindo aumento de temperatura da biomassa de 57% em comparação com a lona branca.

Comparando os biodigestores 1 e 2, percebe-se que a única diferença entre eles é a lona do gasômetro, que mostra que o biodigestor 2 é muito mais eficiente no ganho de calor em relação ao biodigestor 1, tendo aproximadamente, neste caso, aumento de 36% a mais de temperatura da biomassa nesse período.

Tabela 8: Variação de temperatura entre os dias 4 e 8 do experimento.

<b>Biodigestor</b>	1	2	3	4
<b>Variação de temperatura (°C)</b>	7,07	9,62	4,88	3,11

O Gráfico 26 mostra as variações de temperatura dos biodigestores ao longo do experimento. Neste, é observado que o biodigestor 2 possui maior variação de temperatura em relação aos outros, fazendo-o ser o mais instável e podendo influenciar negativamente no processo de biodigestão. Essa maior instabilidade térmica ocorre principalmente por causa do mesmo possuir uma maior temperatura

média.

Já o biodigestor 1 possui a segunda maior variação de temperatura ao longo do experimento, enquanto que os biodigestores 3 e 4 possuem, respectivamente, as menores variações térmicas da biomassa. O biodigestor 4 possui a menor variação térmica da biomassa por possuir a menor temperatura média.

As variações de temperatura dos biodigestores ao longo do experimento estão sendo mostrados pela Gráfico 26.

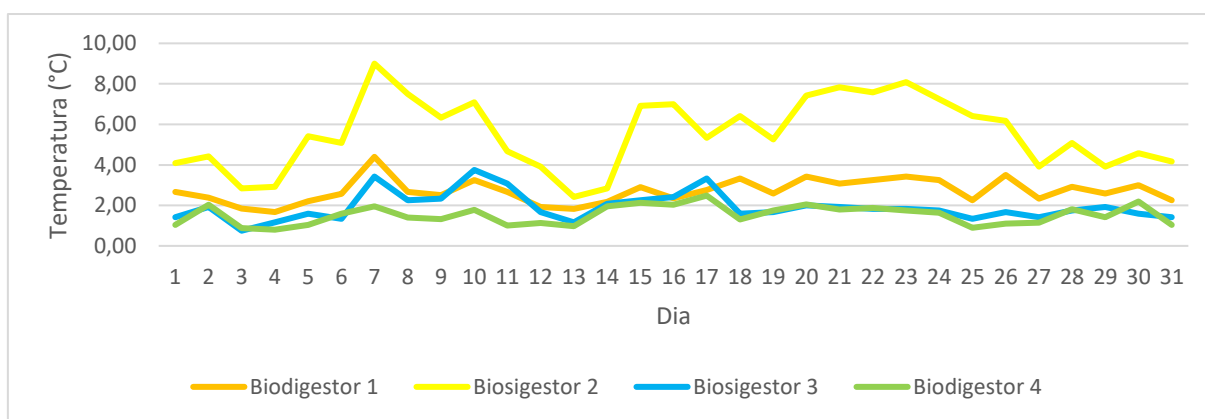


Gráfico 26: Variações das temperaturas dos biodigestores ao longo do experimento.

O fato dos biodigestores 3 e 4 possuírem as menores taxas de variação térmica está diretamente relacionado ao isolante térmico, pois como a temperatura média deles estão em torno de 24°C e 25°C, quando os mesmos começam a perder temperatura no período noturno, em que o tempo está mais frio, o solo fornece energia ao sistema, fazendo com que a perda de calor seja amenizada.

Buscando no Gráfico 25 casos em que o biodigestor 2 possui baixa temperatura, sendo nos dias 1, 2, 3, 4, 5, 6, 11, 12, 13, 14, 29, 30 e 31, observa-se que a variação de temperatura também teve brusca queda aproximando-se à variação de temperatura dos outros biodigestores. Isso mostra que o tipo de lona não possui efeito significativo na perda de calor. A maior causa da perda de calor dos biodigestores está ligada diretamente com a temperatura da biomassa, do solo e ambiente.

A perda de calor, caso todos os biodigestores possuam a mesma temperatura de biomassa, seria semelhante para os biodigestores 1 e 2, sendo de menor porte quando comparado com os biodigestores 3 e 4.



### 4.3. GANHO E PERDA DE ENERGIA AO LONGO DO EXPERIMENTO

Visto que os biodigestores possuem características distintas, foi verificada a eficiência de aproveitamento da radiação solar, da temperatura ambiente e do solo para cada tipo, em que foi separado o ganho de calor no período diurno e noturno. Os Gráficos 27, 28, 29 e 30 mostram o ganho e a perda de calor nesses períodos para cada tipo de biodigestor.

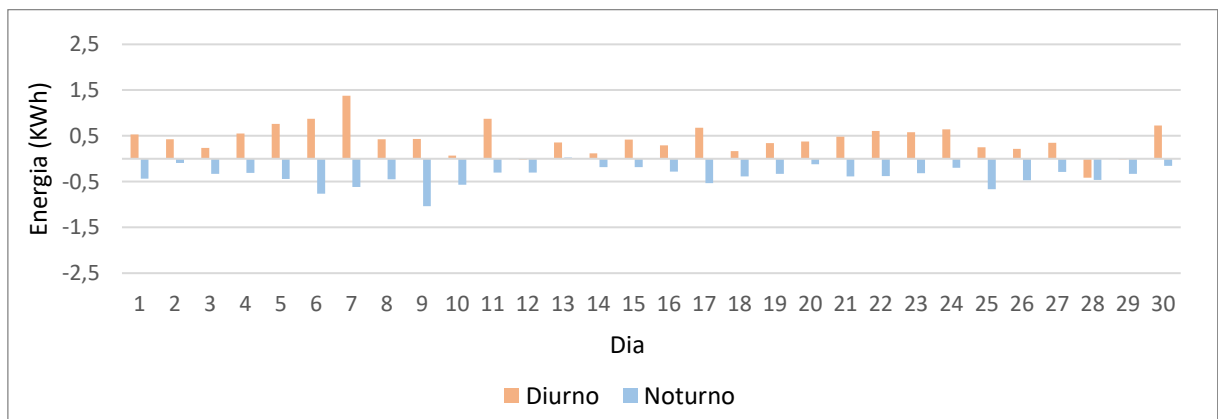


Gráfico 27: Comportamento energético durante o período diurno e noturno ao longo do experimento no biodigestor 1.

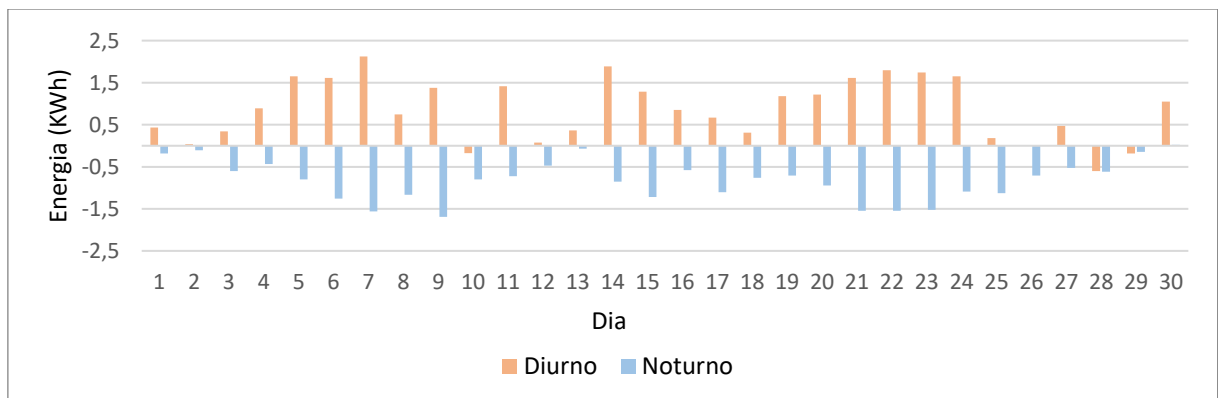


Gráfico 28: Comportamento energético durante o período diurno e noturno ao longo do experimento no biodigestor 2.

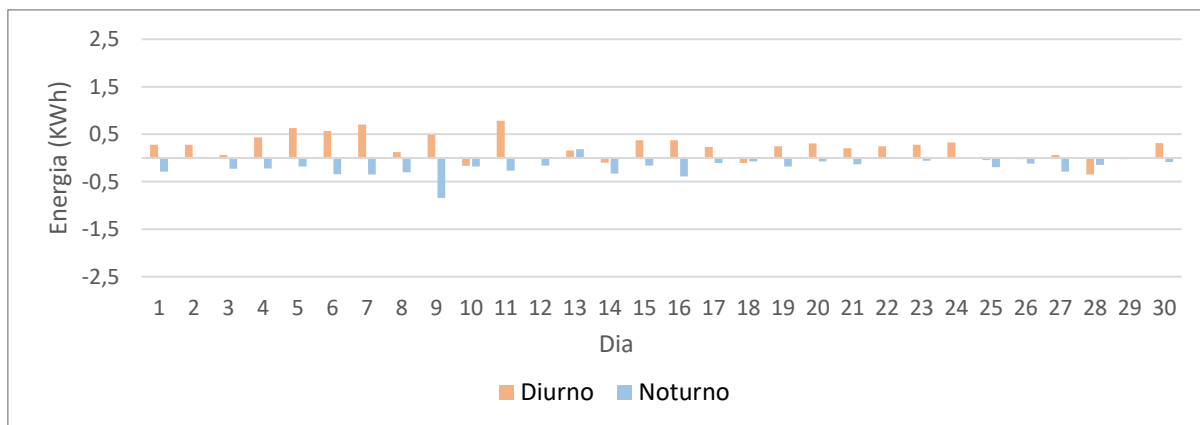


Gráfico 29: Comportamento energético durante o período diurno e noturno ao longo do experimento no biodigestor 3.

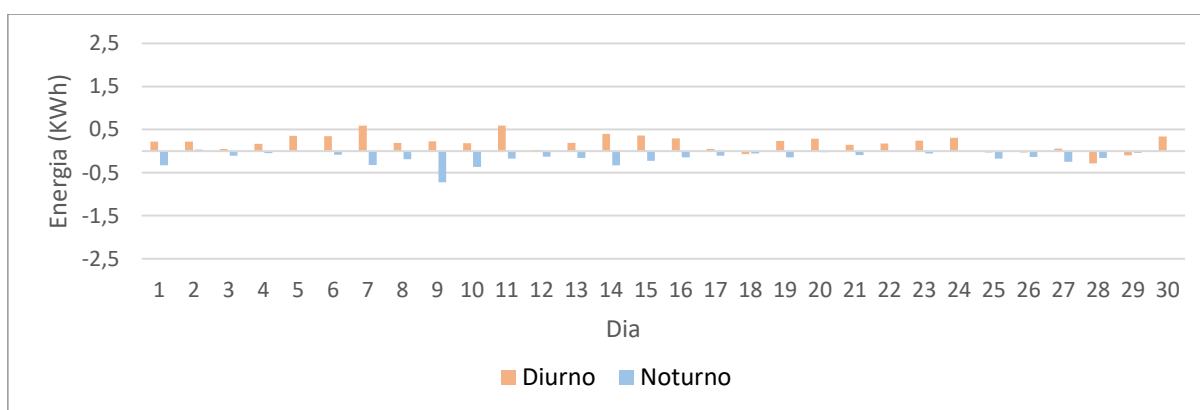


Gráfico 30: Comportamento energético durante o período diurno e noturno ao longo do experimento no biodigestor

É possível perceber que o biodigestor 2 possui uma grande diferença em relação aos outros biodigestores, sendo o caso que consegue melhor aproveitar os meios de ganho de calor. Tal fato ocorre, principalmente, por causa do efeito estufa que o gasômetro gera. Contudo, sua perda também é elevada, tendo como principal consequência maior diferença de temperatura da biomassa com o ambiente. Sendo assim, o tipo de lona não interfere na perda de calor, mas sim por causa da temperatura da biomassa possuir um maior valor.

Já o biodigestor 1 possui a segunda maior eficiência no ganho de calor, porém, também possui a segunda maior perda. A principal característica que interfere neste processo é a cor preta da lona do gasômetro, que atinge elevadas temperaturas devido à absorvidade da cor e do material.

O biodigestor 3 possui o terceiro maior aproveitamento do ganho de calor. Embora ele receba muito calor por radiação solar, também perde muito devido à falta de isolante térmico, fazendo com que praticamente todo ganho seja compensado pela perda. Desta forma, o biodigestor possui uma menor temperatura em relação ao preto com isolante.

O biodigestor 4 possui o menor aproveitamento energético, de modo que o mesmo quase não ganha calor. Sendo assim, suas perdas para o ambiente são muito baixas.

É importante ressaltar que a energia total adquirida durante o período diurno pelos biodigestores pode ser diferente da mostrada, pois os biodigestores perdem energia para o solo ou para o ambiente, durante esse período, dependendo de sua temperatura de biomassa.

#### **4.4.RELAÇÃO ENTRE A TRANSFERÊNCIA DE CALOR CALCULADA E A REAL**

Para este caso, foi desconsiderado o cálculo da transferência de calor por radiação, pois não foi possível medir a incidência solar do local do experimento. Desta forma, os Gráficos 31, 32, 33 e 34, mostram transferência de calor calculada durante o período diurno e noturno, além de comparar com a perda de calor real ocorrida nos biodigestores.

No biodigestor 1, pode-se observar que a variação de energia real é muito semelhante à calculada. As diferenças apresentadas pelo caso real ocorrem, principalmente, devido à presença da radiação solar incidente, que não foi considerada nos cálculos, e também em função de fatores externos, como vento, humidade do ar, entre outros.

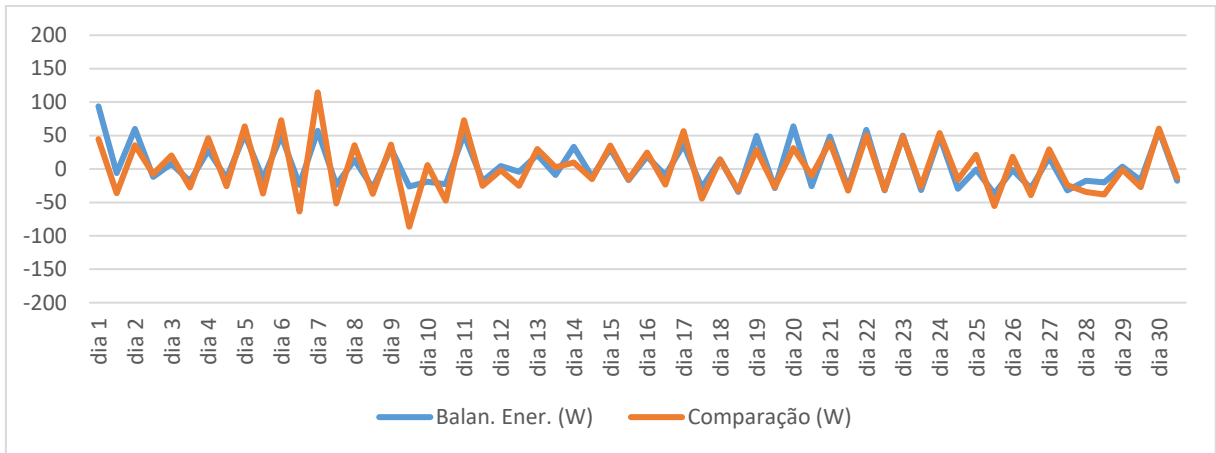


Gráfico 31: Transferência de calor calculado do biodigestor 1 em comparação com o real.

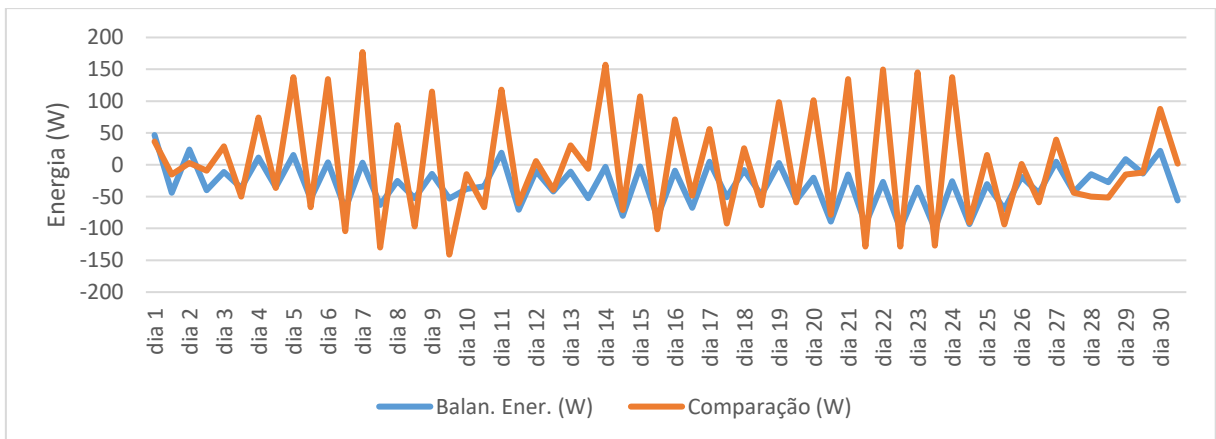


Gráfico 32: Transferência de calor calculado do biodigestor 2 em comparação com o real.

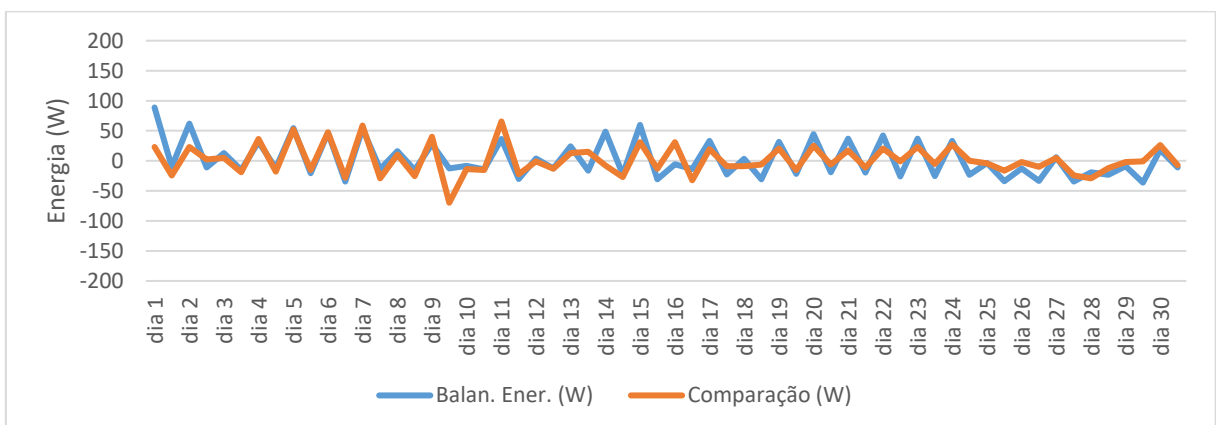


Gráfico 33: Transferência de calor calculado do biodigestor 3 em comparação com o real.

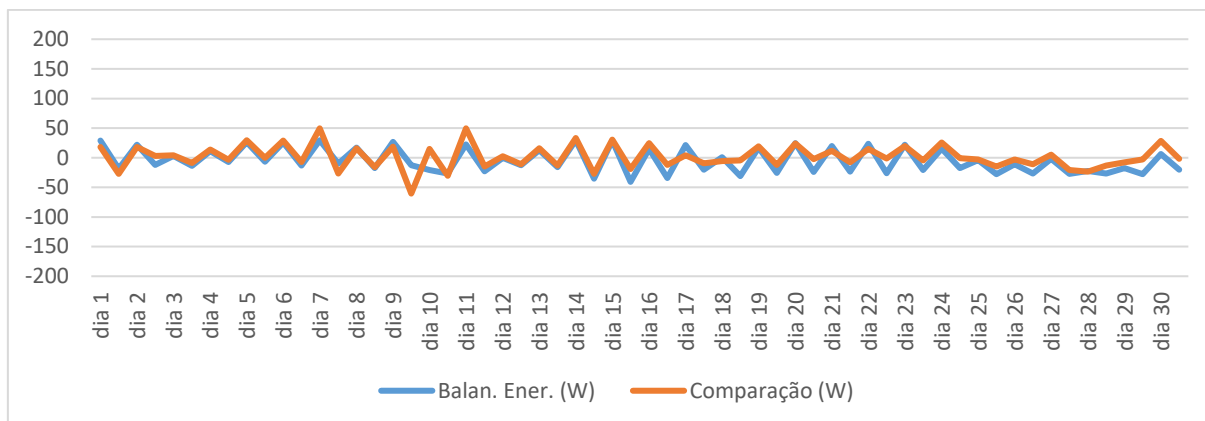


Gráfico 34: Transferência de calor calculado do biodigestor 4 em comparação com o real.

Já no biodigestor 2, pode-se perceber que o padrão de comportamento é muito parecido com o biodigestor 1, porém o ganho de calor real é muito maior que o calculado. Isso se dá pelo fato de que a lona transparente permite que a radiação solar atravesse sem que haja uma grande perda de energia e essa é absorvida pela biomassa, aquecendo-a. Ao contrário do que acontece nas outras lonas, em que a radiação aquece o gasômetro e esse, por consequência, aquece o biogás e a biomassa, de tal forma que a radiação solar incidente nos gasômetros opacos não tem tanto efeito quanto o gasômetro transparente.

Estima-se que a diferença que existe entre os picos reais e calculados, durante o período diurno no biodigestor 2, seja, basicamente, o ganho de radiação solar que o biodigestor possui durante aquele determinado período.

O biodigestor 3 possuiu um comportamento análogo do calculado para o real, visto que o mesmo possui uma baixa variação de calor, por causa de sua menor diferença de temperatura entre a biomassa e o solo. O biodigestor 4 também possui um comportamento calculado próximo ao real, porém com temperaturas mais baixas, o que pode ter sido por causa da influência do gasômetro de cor branca.

Ao comparar os biodigestores 1 e 2, é possível verificar que o segundo perde mais calor durante a noite e ganha menos durante o dia. Isso ocorre por causa da temperatura da biomassa do biodigestor 2 ser mais elevada, o que resulta em maior perda de calor tanto para solo, quanto para o ambiente.

A Tabela 9 mostra a transferência de calor absoluta que ocorre nos biodigestores, utilizando as Equações 3, 4 e 5.

Tabela 9: Porcentagem calculada de perda de calor para o solo e para o biogás

<b>Biodigestor</b>	1	2	3	4
<b>Condução para o solo (%)</b>	27,02	46,48	29,39	20,63
<b>Convecção natural para o biogás (%)</b>	72,98	53,52	70,61	79,39

Essa tabela mostra que a maior parte da perda de calor ocorre pelo biogás, devido às grandes variações térmicas ocasionadas por terem comportamento parecido com o da temperatura ambiente. Sendo assim, tanto para o ganho, quanto para a perda de calor, o biogás é o que possui maior influência em quase todos os casos.

O biodigestor 2 possui uma grande perda de calor para o solo, pois tem uma temperatura de biomassa muito elevada e, mesmo com a adição de isolante térmico no sistema, a área de transferência de calor é muito grande, o que acarreta em uma maior perda. É importante ressaltar que a área de transferência de calor pelo biogás é aproximadamente duas vezes menor que a área de transferência de calor pelo solo.

## 5. CONCLUSÃO

De acordo com os dados analisados neste trabalho, é possível verificar que, em todos os biodigestores, o biogás possui grande variação térmica. Entretanto, o que apresenta a maior média de temperatura, é o biodigestor 2, enquanto que os biodigestores 1 e 3 possuem temperatura e comportamento muito semelhante. Porém, o isolante térmico faz com que o biodigestor 1 possua maiores temperaturas que o biodigestor 3. O biodigestor 4 possui a menor média de temperatura do biogás.

Fazendo uma comparação entre os biodigestores, no qual o fator mais importante é o consumo de energia utilizando em um sistema de aquecimento, tem-se que o melhor caso é biodigestor 2. A perda de calor deste varia, principalmente, por conta da diferença de temperatura da biomassa para o solo e para o ambiente.

O biodigestor 4 é o pior caso, na consideração de ganho de energia, porém é o mais estável termicamente, em contraste com o biodigestor 2. Sendo assim, é possível perceber que a variação de temperatura dos biodigestores está mais ligada à diferença de temperatura da biomassa com o solo e ao ambiente do que com o tipo de lona em si.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA DE NOTÍCIAS DO PARANÁ – GOVERNO DO ESTADO DO PARANÁ. **Governo institui a Política Estadual do Biogás e Biometano**. 2018. Disponível em: <<http://www.aen.pr.gov.br/modules/noticias/article.php?storyid=98383&tit=Governo-institui-a-Politica-Estadual-do-Biogas-e-Biometano>>. Acesso em: jun. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DO PARANÁ - GOVERNO DE ESTADO. **Lei complementar Nº 211 de 07.05.2018**. Curitiba, PR, 2018.

AL SAEDI, T.; RUTZ, D.; PRASSL, H.; KÖTTNER, M.; FINSTERWALDER, T.; VOLK, S.; JANSSEN, R. **Biogas handbook**. Esbjerg, Dinamarca: University of Southern Denmark, 2008. Disponível em: <<http://lemvigbiogas.com>>. Acesso em: nov. 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **G173-03**: standard tables for reference solar spectral irradiances - direct normal and hemispherical on 37° tilted surface. ASTM International, 2003.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Cadernos Temáticos ANEEL: Micro e Minigeração Distribuída - Sistema de Compensação de Energia Elétrica**. Brasília: Virtual Books, 2016.

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução ANP Nº 8, de 30.01.2015 - dou 2.2.2015**. Brasília, DF, 2015.

BALMANT, W. **Concepção, construção e operação de um biodigestor e modelagem matemática da biodigestão anaeróbica**. 2009. 60 f. Dissertação (Mestrado em Processos Térmicos e Químicos) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

BARRERA, P. **Biodigestores: energia, fertilizante e saneamento para a zona rural**. 2ed. São Paulo: Ícone, 2003, 106p.

BERDHAL, P.; BRETZ, S. E. Preliminary survey of the solar reflectance of cool roofing materials. **Energy and Buildings**, v. 25, p. 149-158, 1997.

BIRD, R. B., STEWART, W. E, E LIGHTFOOT, E. N. **Fenômenos de Transporte**. 2 ed. 856 p. Editora LTC, 2004.

BNDS - BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Impactos ambientais da suinocultura: desafios e oportunidades**. BNDES Setorial. v. 44 p. 125-156. Setembro, 2016. Disponível em: <[https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/9974/2/BS%2044%20Impactos%20ambientais%20da%20suinocultura\\_P.pdf](https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/9974/2/BS%2044%20Impactos%20ambientais%20da%20suinocultura_P.pdf)>. Acesso em: dez. 2018.

BORTOLI, M.; KUNZ, A.; SOARES, H. M. **Comparativo entre reatores UASB e**



**biodigestores para geração de biogás no tratamento de dejetos de suínos.** In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS DE ANIMAIS, GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE RESÍDUOS DE ANIMAIS, 2009, Florianópolis. Anais. Florianópolis: Siger, 2009. p. 37-42.

BRASIL. Lei n. 13.576, de 26 de dez. de 2017. **Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências.** Brasília - DF, dez. 2017.

BRASIL. **Resolução ANP N. 8, de 30 de jan. de 2015 – DOU de 2 de fev. de 2015.** Brasília – DF, fev. 2015.

CARAM, R. M. **Caracterização ótica de materiais transparentes e sua relação com conforto ambiental em edificações.** 1998. 196p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 1998.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica.** 7. ed. 1018 p. Porto Alegre: Amgh, 2011.

ÇENGEL, Y. A.; GHJAR A. J. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática.** 4.ed. [S.l.]: McGraw Hill; [S.l.]: bookman, 2012

CERMEÑO, Z. C. Construcción de invernaderos. 3. ed. Espanha, Madri: Mundi-Prensa 2005.

CHERNICHARO, C. A. L. Reatores Anaeróbios. 2. ed. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias**, v. 5, 380 p. Belo Horizonte - MG: UFMG, 2007.

CIBIOGÁS - CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS-BIOGÁS. **O biogás.** 2018. Disponível em: <<https://www.cibogas.org/biogas>>. Acesso em: dez. 2018.

CORTES, D. A.; ROCHA, E. M. D.; CORTES, T. A. Biodigestores rurais e sua importância na sustentabilidade ambiental. Revista Multidisciplinar - Faculdade do Noroeste de Minas. **Humanidades & Tecnologia em revista (FINOM)** - ISSN: 1809-1628. Ano XIII, vol. 18. Jan - Dez 2019.

CREMONEZ P. A. et al. Codigestão de água residual de suinocultura e vinhaça sob diferentes condições térmicas. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 38, p. 103-110, 2015.

CRESESB - CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M. C. J. P.; ROSSI, M.; TAVARES, R; SANTOS, C. **Biodigestores rurais: modelos indiano, chinês e batelada.** Disponível na World Wide Web acesso em junho de 2019.

DORNELLES, K. A. **Absortância solar de superfícies opacas: Métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA.** 142p. Tese

(Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP. 2008.

DORNELLES, K. A. et al. Desempenho térmico de tintas brancas com microesferas cerâmicas para uso em coberturas de edifícios. **Anais do Encontro latino americano de conforto no ambiente construtivo**, v. 7, 10p, Búzios - RJ, 2011.

DORNELLES, K. A.; CARAM, R. M.; SICHIERI, E. P. Absortância solar e desempenho térmico de tintas frias para uso no envelope construtivo. **XII Encontro Nacional e VIII Latinoamericano de Conforto no Ambiente Construído - ENCAC/ELACAC**. Brasília, 2013.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1984.

EDER L. P. **Otimização da produção de biogás utilizando aquecimento e agitação com automação de biodigestores**. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2017.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**. 2018. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/0/PDE2026.pdf/474c63d5-a6ae-451c-8155-ce2938fbf896>>. Acesso em: maio 2018

FILHO, W. B. **Fenômenos de transporte para engenharia**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2012.

FOX, R. W.; MCDONALD A. T. E.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 6. ed. Editora LTC, 2006.

FRIEHE, JÖRG; WEILAND, PETER; SCHATTAUER, ALEXANDER. **Fundamentos da Fermentação Anaeróbia**. In: FNR. FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (Alemanha) (Org.). Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização. 5. ed. Gülzow: FNR, 2010.

GALVÃO, R. R. A.; GONZALEZ, R. H. A.; FRANCA, T. J. L.; PINHEIRO, B. C. **Monitoring and control system for distributed energy generation plants. International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)**. v. 6, p. 833-838, 2017.

GARCIA, J. L.; PATEL, B. K. C.; OLLIVER, B. Taxonomic, phylogenetic, and ecological diversity of methanogenic Archae. **Anaerobe**. v. 6, p. 205-226, 2000

GIVONI, B. **Man, climate and architecture**. London: Applied Science Publishers, 1981.

GIVONI, B. **Passive and low energy cooling of buildings**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1994.

GIVONI, B. **Climate considerations in building and urban design**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1998.

HARDOIM, P. C.; JÚNIOR, L. J.; CAMPOS, C.M.M. Efeito do controle da temperatura e da agitação mecânica na produção de metano em biodigestor anaeróbio operados com dejetos de bovinos. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**, v. 29, 2000, Fortaleza. Anais, 2000.

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 6. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2008.

IPARDES - INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Leituras regionais: Mesorregião Geográfica Oeste Paranaense**. Curitiba, 2003.

KALSSON, T et al. **MANUAL BÁSICO DE BIOGÁS**. 1. ed. Lajeado – RS. Univates, 2014.

LOPES, C. R. M.; FILHO, N. R. A.; ALVES, M. I. R. A. Impactos ambientais e sociais causados por voláteis emanados por excretos de suínos. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer, Goiânia, v. 9, n. 17, p.3556-3565, 2013. Disponível em: <<http://www.conhecer.org.br/enciclop/2013b/MULTIDISCIPLINAR/IMPACTOS%20AMBIENTAIS.pdf>> Acesso em: 18, mar. 2019.

MAZZUCCHI, O. A. J. **Biodigestor rural**. São Paulo, CESP, 1980. 29p.

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Acordo de Paris**. 2018a. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris>>. Acesso em: jan. 2019.

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Renovabio**. 2018b. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/petroleo-gas-natural-e-combustiveis-renovaveis/programas/renovabio/principal>>. Acesso em: maio 2018.

MIRANDA, A. P.; AMARAL, L. A.; JUNIOR, J. L. Influência da temperatura na biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos e suínos. **Revista Univap**. p. 2928 - 2931. 2006.

OLIVEIRA, L. R. P., Biodigestor. Seminários Técnicos de Suinocultura. **VII Simpósio Goiano de Avicultura e II Simpósio Goiano de Suinocultura**. 13 a 15 de setembro de 2005, Goiânia, Goiás.

PEREIRA, A. R.; ANGLOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Meteorologia agrícola**. PIRACICABA, SP: [s.n.] 2007.

PEREIRA, L. A. S. P. S. S. **Estudo, modelagem e caracterização de processos de biodigestão com monitoramento e controle da temperatura**. 102p. Dissertação (Programa de pós-graduação em engenharia mecânica) - Universidade estadual paulista, Ilha Solteira - SP, 2017.

PICANÇO, A. P. **Influência da recirculação de percolado em sistemas de batelada de uma fase e híbrido na digestão da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos**. Tese de doutorado da escola de engenharia de São Carlos – USP em engenharia civil, 2004.

PORTAL DO BIOGÁS. **Biodigestão anaeróbia**. 2013. Disponível em: <<https://www.portaldobiogas.com/biodigestao-anaerobia/>>. Acesso em: jul. 2019.

POSTEL, J. et al. **Tecnologia de usinas para a produção de biogás**. In: FNR. FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (Alemanha) (Org.). Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização. 5. ed. Gülzow: FNR, 2010.

PREFEITURA MUNICIPAL DE ENTRE RIOS DO OESTE. **Projeto de biogás tem início em Entre Rios do Oeste**. 2018. Disponível em: <<http://entrierosdoeste.pr.gov.br/noticia/211/projeto-do-biogs-tem-inicio-em-entre-rios-do-oeste>>, Acesso em: jul. 2019.

ROSADO, C.; PIZZUTTI, J. L. A influência das cores no conforto térmico-lumínico e na redução do consumo de energia nas edificações. **Anais Encontro nacional sobre conforto no ambiente construtivo**, v. 4, Salvador, BA, 1997.

RODRIGUES, G. K.; PEZZUTO, C. C. Medição da refletância e análise da sua influência nos materiais construtivos da envoltória da edificação. **Anais do Encontro de iniciação científica**, v. 18, 5p, 2013.

SÉRGIO DE S. BRITO. **Potencial solar - SunData v 3.0. 2018**. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>. Acesso em: mar. 2019.

SILVEIRA, N.C. **Codigestão de lodo de esgoto e fração orgânica de resíduo de restaurante**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, 2016

SOARES, M. T. S. et al. Caracterização físicoquímica de efluentes líquidos de granjas suínas tratados em biodigestor. In: **5° Simpósio Recursos Naturais e Socioeconômicos do Pantanal**, Corumbá- MS. p. 1-4, 9 a 12 nov, 2010.

SOUZA, C. F. et al. Produção volumétrica de metano - Dejetos suínos. **Lavras**, v. 32 n. 1, p. 219-224, 2008.

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

SOUZA, C. F. et al. Potencial de dejetos de suínos como substrato na biodigestão anaeróbia sob efeito de diferentes temperaturas e tempos de retenção hidráulica. **Revista Ceres**. v. 52, n. 300, p. 255-265, 2005.

SUINOCULTURA. **Suinocultores do Oeste do Paraná terminam 2017 com**

**mercado em expansão.** 2017. Disponível em: <<https://www.suinoculturaindustrial.com.br/imprensa/suinocultores-do-oeste-do-parana-terminam-2017-com-mercado-em-expansao/20171211-135601-e130>>. Acesso em: dez. 2018.

TAVARES, S. G. et al. Influência das variações térmicas e climáticas na produção de biogás. **Nativa Sinop**, v. 4, n. v5, p. 287-295, 2016.

TIECHER, T. **Manejo e conservação do solo em pequenas propriedades rurais no sul do Brasil: praticas alternativas de manejo visando a conservação do solo e da agua.** UFRGS. Porto Alegre, 2016.

TIETZ, C. M. Et al. Influência da temperatura na produção de biogás a partir de dejetos da bovinocultura de leite. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v.3, s. I., p. 80-96. 2014.

TIETZ, C.M. **Influência da temperatura na produção de biogás a partir de dejetos da bovinocultura de leite.** 2013. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Biocombustíveis) - Universidade Federal do Paraná, Palotina - PR, 2013.

UEMOTO, K. L.; SATO, N. M. N.; JOHN, V. M. **Estimating thermal performance of cool colored paints.** Energy and Buildings, v.42, p.17-22, 2010.

VON SPERLING, M. **Princípios básicos do tratamento de esgotos.** Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - Universidade Federal de Minas Gerais, 1996.

WELTY, J. R.; RORRER, G. L.; FOSTER, D. G. **Fundamentos de Transferência de Momento, de Calor e de Massa.** 6. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2017.

ZITOMER, D, H.; SHROUT, J. D. Feasibility and benefits of methanogenesis under oxygen-limited conditions. **Wast Management**, v. 18, p. 107-116, 1998.

## APÊNDICE A

Tabela 10: Médias de temperatura ao longo do experimento do biodigestor 1

Dia	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6	Sensor 7	Sensor 8
1	20,60	20,69	20,78	26,77	28,35	28,18	21,09	22,90
2	21,34	21,58	21,92	26,49	27,86	27,53	21,68	22,88
3	22,15	22,11	22,85	22,78	24,14	25,76	22,32	22,40
4	22,12	21,90	23,22	22,87	24,27	23,96	22,30	22,53
5	22,78	22,84	24,18	27,22	28,63	25,39	22,82	22,82
6	23,91	24,29	25,51	29,43	30,83	28,30	23,73	24,76
7	25,39	25,46	26,25	31,53	33,22	30,66	24,91	25,69
8	27,49	28,10	27,91	29,65	30,36	30,30	26,59	25,20
9	26,88	27,46	27,22	28,79	29,85	29,86	26,10	25,31
10	26,55	27,22	27,02	23,55	22,96	22,17	25,83	25,41
11	23,27	23,92	23,60	24,81	26,52	26,98	23,21	23,40
12	24,96	25,44	25,33	24,88	24,61	24,22	24,55	24,62
13	23,79	24,28	24,16	24,52	25,19	24,91	23,61	24,43
14	23,84	24,49	25,59	26,40	29,63	30,71	23,65	24,70
15	24,60	25,10	26,28	27,93	30,83	32,01	24,26	24,86
16	25,10	26,23	27,20	28,13	30,54	31,74	24,65	25,22
17	25,89	26,50	26,46	30,38	31,08	31,74	25,28	25,34
18	26,53	27,06	26,86	26,83	27,57	27,19	25,80	25,64
19	25,62	26,11	25,70	27,11	28,59	28,90	25,07	25,65
20	25,48	26,07	26,16	29,46	32,03	33,15	24,95	25,60
21	25,99	26,72	27,20	31,05	32,95	34,01	25,36	25,80
22	26,62	27,30	27,50	31,15	32,89	33,85	25,86	26,11
23	27,30	28,07	28,45	32,47	34,24	35,19	26,40	26,38
24	28,33	28,98	29,74	35,99	38,07	39,14	27,22	26,85
25	29,73	30,36	30,79	33,51	34,41	34,55	28,34	27,53
26	29,14	29,65	29,29	29,20	29,75	30,67	27,86	27,80
27	28,07	28,59	28,39	30,24	31,61	31,89	27,01	27,52
28	27,84	28,34	27,82	24,95	24,29	23,42	26,82	26,26
29	25,10	25,55	24,56	22,92	22,90	22,40	24,63	25,11
30	24,02	24,45	24,23	28,02	30,40	31,55	23,76	24,07
31	25,63	26,13	26,16	26,12	27,08	27,34	25,04	25,56

Tabela 11: Médias de temperatura ao longo do experimento do biodigestor 2

Dia	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6	Sensor 7	Sensor 8
1	24,58	24,42	26,41	29,20	30,51	30,33	24,63	23,87
2	25,71	25,88	27,04	27,77	28,57	28,27	25,44	24,22
3	25,58	25,63	27,01	24,22	25,13	24,74	25,34	24,18
4	25,66	25,26	25,53	24,31	25,20	24,88	25,15	23,92
5	27,16	26,71	27,80	29,11	30,22	29,88	26,53	24,68
6	30,46	30,12	31,04	31,41	32,61	32,19	29,31	26,07
7	32,91	32,53	33,70	34,81	36,45	36,23	31,36	27,09
8	35,13	34,86	35,45	34,52	33,29	32,92	33,12	27,90
9	32,96	32,72	33,55	33,32	32,57	32,23	31,36	27,06
10	33,10	32,57	32,82	29,69	24,97	24,39	31,33	26,95
11	27,53	26,99	27,40	28,49	29,00	28,83	26,71	24,69
12	29,80	29,38	30,02	29,68	28,37	27,93	28,66	26,04
13	28,08	27,61	28,08	28,73	28,86	28,74	27,19	26,06
14	28,83	28,17	28,88	29,08	28,94	28,79	27,83	26,54
15	32,57	32,15	32,86	29,53	29,03	28,96	30,98	28,91
16	33,57	33,27	33,99	30,87	29,49	29,34	31,84	29,56
17	34,35	34,20	35,09	32,47	30,27	29,99	32,54	30,10
18	33,32	32,87	33,31	33,15	31,25	30,85	31,56	29,33
19	30,96	30,50	31,44	33,09	32,05	31,64	29,67	27,95
20	32,33	31,81	33,63	32,92	32,49	32,18	30,95	28,94
21	34,05	33,78	35,47	33,31	32,77	32,56	32,40	30,03
22	34,66	34,37	35,84	34,23	33,15	32,95	32,87	30,37
23	35,85	35,50	36,84	35,14	33,72	33,48	33,83	31,07
24	36,75	36,43	37,54	35,92	34,43	34,13	34,55	31,60
25	37,84	37,38	38,06	36,70	35,18	34,84	35,36	32,18
26	34,37	33,88	34,27	32,48	32,02	32,60	31,09	28,37
27	31,92	31,39	32,02	31,59	31,78	31,24	30,41	28,47
28	31,36	30,77	31,26	28,03	26,63	25,97	29,91	28,09
29	26,86	26,29	26,71	25,19	23,63	22,81	26,15	25,28
30	25,79	25,18	26,57	24,64	24,88	25,15	25,41	24,78
31	29,39	28,94	30,37	25,27	24,10	24,21	28,44	27,05

Tabela 12: Médias de temperatura ao longo do experimento do biodigestor 3

Dia	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor4	Sensor5	Sensor6	Sensor 7	Sensor 8
1	21,19	21,08	21,87	26,75	28,36	28,13	22,07	22,15
2	21,60	21,92	22,55	26,52	27,89	27,62	22,35	22,43
3	21,82	22,24	23,28	22,83	24,19	23,98	22,46	22,53
4	21,71	22,17	23,17	22,83	24,24	23,80	22,33	22,38
5	22,36	22,85	23,97	27,20	28,60	28,33	22,61	22,62
6	23,70	24,24	25,36	29,42	30,82	30,56	23,44	23,37
7	24,50	25,48	26,40	31,50	33,19	32,91	24,40	24,27
8	25,59	26,60	27,53	29,33	29,23	30,14	25,73	25,65
9	25,21	26,17	27,14	29,56	29,94	31,53	25,52	25,47
10	24,55	25,59	26,38	24,18	24,49	25,15	25,23	25,23
11	22,99	23,50	24,49	24,88	24,92	26,80	23,38	23,41
12	24,54	25,20	25,98	24,70	24,73	25,87	24,56	24,52
13	23,83	24,41	25,02	23,54	24,90	26,60	24,27	24,33
14	24,24	24,33	25,10	25,03	26,05	26,75	24,84	24,93
15	24,11	23,91	24,65	26,71	28,84	29,73	24,60	24,66
16	24,26	24,28	24,87	28,32	30,83	31,87	24,58	24,61
17	25,77	26,28	26,40	29,22	31,69	32,81	25,17	25,09
18	24,65	24,97	25,45	30,80	32,38	33,28	24,52	24,47
19	24,61	24,44	24,60	29,82	30,98	31,23	24,64	24,58
20	24,40	24,49	24,99	29,46	30,78	31,06	24,66	24,65
21	24,54	25,02	25,62	30,46	32,41	33,11	24,88	24,88
22	24,92	25,69	26,01	31,75	33,68	34,56	25,14	25,14
23	25,29	26,00	26,78	32,45	34,28	35,20	25,34	25,31
24	25,89	26,85	27,65	33,46	35,26	36,19	25,65	25,58
25	26,60	28,20	28,84	35,72	37,66	38,67	26,05	25,94
26	26,97	28,34	27,98	35,62	37,04	37,61	26,29	26,14
27	26,67	26,93	27,27	27,30	29,01	28,83	26,16	26,02
28	26,43	26,54	27,41	28,33	30,46	30,72	26,05	25,93
29	25,51	24,59	24,68	20,59	20,99	20,21	25,44	25,42
30	24,61	24,13	24,24	21,72	22,99	22,64	24,50	24,40
31	24,65	25,16	25,91	30,26	34,21	35,83	24,94	24,91



Tabela 13: Médias de temperatura ao longo do experimento do biodigestor 4

Dia	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor4	Sensor5	Sensor6	Sensor 7	Sensor 8
1	21,95	21,23	20,41	18,01	19,35	19,32	22,37	22,41
2	22,15	21,05	20,72	20,27	21,49	21,70	22,50	22,55
3	22,31	21,39	21,22	19,19	20,56	20,45	22,54	22,58
4	22,21	21,45	21,28	19,36	20,71	20,64	22,41	22,45
5	22,37	21,98	21,86	22,77	24,04	24,15	22,45	22,47
6	23,04	23,28	23,22	25,08	26,32	26,48	22,87	22,87
7	23,85	24,57	24,41	26,52	28,22	28,65	23,52	23,51
8	25,31	25,58	25,59	26,09	26,83	26,97	24,91	24,94
9	25,17	25,29	25,27	25,44	25,94	26,03	24,89	24,92
10	25,17	25,06	25,17	20,98	21,48	21,19	24,97	24,99
11	23,36	23,01	23,04	21,53	22,03	22,16	23,50	23,51
12	24,29	24,44	24,36	21,89	22,14	22,04	24,25	24,24
13	24,32	23,78	23,69	22,09	22,34	22,32	24,42	24,45
14	24,67	23,62	23,75	23,56	23,88	24,32	24,81	24,87
15	24,45	23,95	25,44	23,75	24,25	24,75	24,55	24,60
16	24,27	25,16	26,52	23,42	23,92	24,28	24,38	24,41
17	24,14	25,65	27,20	25,26	25,76	26,06	24,18	24,20
18	24,20	24,81	26,03	23,35	23,85	23,80	24,14	24,13
19	24,28	24,32	25,49	23,45	23,95	24,10	24,32	24,32
20	24,56	24,57	25,98	25,23	25,73	26,14	24,57	24,58
21	24,94	25,29	26,67	26,45	26,95	27,31	24,89	24,90
22	25,21	25,70	27,03	26,71	27,21	27,46	25,09	25,09
23	25,39	26,14	27,85	27,93	28,43	28,79	25,20	25,20
24	25,70	27,11	28,80	30,33	30,83	31,35	25,39	25,36
25	26,24	28,41	29,70	29,80	30,30	30,59	25,72	25,67
26	26,24	27,58	28,49	25,75	26,25	26,20	25,83	25,75
27	25,98	26,67	28,07	26,79	27,29	27,44	25,75	25,69
28	25,90	25,92	26,74	22,43	22,93	22,76	25,72	25,66
29	24,96	24,38	24,88	20,34	20,84	20,80	25,09	25,06
30	23,91	24,33	25,29	23,95	24,45	24,70	24,12	24,08
31	24,81	25,14	25,68	22,50	23,00	23,25	24,93	24,93