



**INSTITUTO FEDERAL**  
**MINAS GERAIS**

Aryelton Dias Gonçalves  
Douglas Melo Santos  
Gabriel Sander Pereira de Oliveira  
Jhonata Igor Carvalho Ferreira  
Leandra de Campos Gabriel

Aprimoramento do projeto de um biodigestor tubular através de lógica *Fuzzy*, balanço de energia e método de flexão e cisalhamento transversal

ARCOS-MG,  
2018

# Resumo

Atualmente é bastante comum encontrar biodigestores reaproveitando resíduos orgânicos descartados de alguma atividade para produzir biogás. Havendo um local apropriado e boa quantidade de matéria orgânica sendo rejeitada é considerado suficiente para a instalação do mesmo. Porém, para que o biodigestor consiga operar de maneira eficiente, e o biogás produzido tenha boa qualidade é necessário se atentar a diversos fatores como por exemplo a temperatura, pH, concentração de água na biomassa e tempo de retenção. Dentre os fatores mencionados, a temperatura e pH da matéria orgânica quando não controlados interferem diretamente na concentração de metano no biogás e conseqüentemente no seu potencial de utilização. O presente trabalho utilizou as dimensões e dados do fluxo de dejetos diário de um projeto de um biodigestor de grande porte já dimensionado (SANTOS et al., 2018) para realizar um estudo da transferência de calor que ocorre no biodigestor e também complementar o projeto com o cálculo da menor espessura possível aplicável para as paredes do biodigestor de forma a evitar o rompimento por esforços aplicados pela carga dentro da caixa de biodigestão. Para executar o balanço de energia, foi feito um mini biodigestor representativo com materiais similares do modelo real coletando dados de temperatura. Para analisar os efeitos causados na produção de biogás pela variável temperatura combinada com a variável pH foi construído um Sistema Baseado em Regras *Fuzzy* (SBRF), definindo temperatura e pH como variáveis linguísticas de entrada e a concentração de gás metano presente no biogás como variável linguística de saída. Com o SBRF foi possível estudar a concentração de gás metano presente no biogás através de várias simulações com diferentes valores das variáveis de entrada temperatura e pH.

**Palavras-chaves:** Sistema Fuzzy, biogás, biodigestor.

# Sumário

<b>Resumo</b>	<b>2</b>
<b>Sumário</b>	<b>4</b>
<b>Introdução</b>	<b>5</b>
<b>Objetivos</b>	<b>6</b>
<b>Cronograma</b>	<b>7</b>
<b>Justificativa</b>	<b>8</b>
<b>1 Referencial teórico</b>	<b>9</b>
1.1 Biodigestor e biogás . . . . .	9
1.2 Balanço de Energia . . . . .	9
1.2.1 Irradiação solar . . . . .	10
1.2.2 Transferência de calor por convecção . . . . .	10
1.3 Temperatura e pH . . . . .	11
1.4 Sistema <i>Fuzzy</i> . . . . .	11
1.4.1 Lógica <i>Fuzzy</i> . . . . .	11
<b>2 Metodologia</b>	<b>13</b>
2.1 Montagem e obtenção de dados . . . . .	13
2.1.1 Estrutura Mini Biodigestor . . . . .	13
2.1.2 Instrumentação Eletrônica . . . . .	13
2.1.3 Programação desenvolvida . . . . .	14
2.1.4 Coleta de dados de Temperatura . . . . .	16
2.2 Equações do balanço de energia . . . . .	16
2.2.1 Cálculo da energia energia solar incidente no biodigestor . . . . .	16
2.2.2 Cálculo da transferência de calor por convecção . . . . .	17
2.3 Sistema Baseado em Regras <i>Fuzzy</i> (SBRF) . . . . .	18
2.3.1 Definição das variáveis, termos linguísticos e arquitetura do SBRF . . . . .	18
2.3.2 Construção do SBRF . . . . .	20
2.4 Cálculo da espessura da parede de concreto . . . . .	21

2.4.1	Espessura para parede de concreto simples com tensão média aplicada . .	21
2.4.2	Espessura para parede de concreto armado . . . . .	22
<b>3</b>	<b>Resultados e discussões</b>	<b>24</b>
3.1	Resultados do balanço de energia . . . . .	24
3.1.1	Simulação da concentração de metano no biogás através das variáveis lingüísticas temperatura, pH . . . . .	27
<b>4</b>	<b>Conclusões</b>	<b>28</b>

# Introdução

O biodigestor é um sistema de reaproveitamento de matéria orgânica para a produção de biogás, uma mistura de gases que pode ser utilizado para produção de energia elétrica e aquecimento. Este equipamento é versátil, podendo ser usado em residências, indústrias, fazendas e aterros sanitários. É comum encontrar biodigestores na pecuária e na suinocultura, atividades que geram grande quantidade de dejetos, no qual, ao invés de serem descartados, são reaproveitados para produção de biogás e biofertilizante.

Após o dimensionamento e a instalação, é fundamental entender o funcionamento do processo de biodigestão anaeróbia para que a geração de biogás seja eficiente. São diversas as variáveis que influenciam na produção sendo, as principais, a temperatura e o pH da biomassa, pois afetam diretamente o desempenho dos microrganismos que produzem metano. Este trabalho se atenta ao estudo da transferência de calor no biodigestor e como a temperatura e o pH, juntos, influenciam na concentração de metano no biogás, parâmetros verificados através de uma simulação feita em um Sistema Baseado em Regras Fuzzy (SBRF). Usando as dimensões de um biodigestor de grande porte dimensionado para a fazenda Mato Grosso (SANTOS et al., 2018) em Pompéu MG. A espessura mínima das paredes da câmara de biodigestão também foram calculadas usando o método de cisalhamento transversal.

# Objetivos

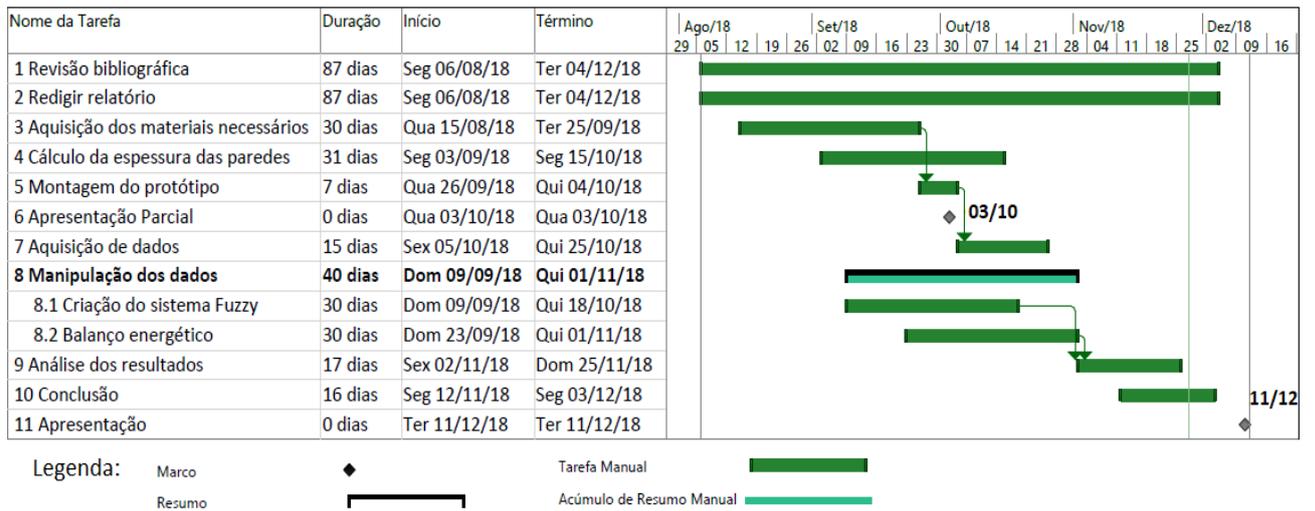
## Objetivo Geral

Modelar, através de lógica *fuzzy*, como a concentração de metano no biogás é afetada por variações na temperatura e no pH da matéria orgânica. Em relação ao dimensionamento do biodigestor, calcular a espessura mínima das paredes da câmara de biodigestão e realizar o balanço de energia do biodigestor, calculando a quantidade de energia necessária para operação na temperatura adequada.

## Objetivos Específicos

- Realizar o estudo dos meios de transferência de calor que ocorrem no biodigestor e coletar dados da temperatura onde o biodigestor será instalado durante um intervalo de tempo especificado para executar o balanço de energia .
- Pesquisar sobre como diferentes faixas de valores de temperatura e pH da biomassa podem afetar a concentração de metano no biogás, para então definir os graus de pertinência nos conjuntos *fuzzy*.
- Construir do sistema baseado em regras *fuzzy* (SBRF) e simular a concentração de metano através das variáveis linguísticas temperatura e pH.
- Calcular a espessura mínima das paredes da camará de biodigestão, com base nos esforços (SANTOS et al., 2018) utilizando o método de flexão e cisalhamento transversal.

# Cronograma



Próprios autores via aplicativo *MS Project* (Adaptado)

# Justificativa

A tecnologia dos biodigestores vem se disseminando cada vez mais, muito pelo fato de que as formas de produção de energia através de fontes renováveis serem uma grande tendência e necessidade atualmente (ALVES, 2017). Tendo isso em vista essa expansão, não é difícil entender o motivo pelo qual se buscam avanços e constantes melhoramentos destes dispositivos, com o objetivo de aumentar seu rendimento e reduzir gastos, além do ganho ambiental.

Com o objetivo de buscar melhores aproveitamentos no processo de biodigestão, o presente trabalho utiliza um SBRF para entender como a temperatura e o pH da biomassa alteram a concentração de metano no biogás. Temperatura e o pH são dois dos parâmetros que mais influenciam no processo de produção do biogás. Como foi observado por Castro e Cortez (1998) em seus experimentos houve uma redução significativa na produção de metano para temperaturas fora da faixa de  $30^{\circ}C$  a  $40^{\circ}C$ . O pH favorável para atividade das bactérias segundo Moura (2014), se encontra por volta de 7,5.

É evidente que não é possível atingir a faixa de temperatura ideal em todas as épocas do ano, devido a menor incidência de radiação solar em alguns períodos. O balanço de energia tem o propósito de analisar a quantidade de energia necessária para a operação na temperatura ideal do biodigestor, computando todas as entradas e saídas de calor, e posteriormente, o que não é objetivo deste trabalho, analisar a necessidade da utilização de sistemas de aquecimento para manter o biodigestor operando no intervalo de temperatura de operação apropriado, principalmente para os meses em que há menor incidência de energia solar.

Como base em dados de um biodigestor tubular de grande porte já dimensionado por (SANTOS et al., 2018), busca-se tornar mais completo o projeto com o cálculo da espessura das paredes da câmara de biodigestão para evitar o seu rompimento.

# Capítulo 1

## Referencial teórico

Neste capítulo é descrito os principais conceitos utilizados neste trabalho, bem como a base teórica utilizada para a execução do balanço de energia e cálculo da espessura das paredes do biodigestor. É dada uma breve explicação sobre o conceito lógica *fuzzy* e seu contexto histórico. A importância do controle da temperatura e pH no biodigestor é mencionada de acordo com a revisão bibliográfica em trabalhos anteriores.

### 1.1 Biodigestor e biogás

Um biodigestor é um equipamento utilizado para produção de biogás e biofertilizante através da decomposição de matéria orgânica. Seus principais componentes são a câmara de biodigestão, recipiente fechado onde ocorre a fermentação anaeróbica da matéria orgânica, e o gasômetro, onde o biogás é armazenado (ALVES, 2017). O produto principal, biogás, caracteriza-se por uma mistura gasosa derivada de compostos orgânicos, em maior parte metano, que possui alto poder calorífico. Após ser produzido e tratado corretamente, pode ser usado para aquecimento e produção de energia (TAHERZADEH; KARIMI, 2008).

Existem vários modelos de construção de biodigestores, tendo assim uma ampla aplicabilidade para diferentes tipos de biomassa. Os modelos frequentemente utilizados são os do tipo contínuo, no qual o fluxo de dejetos é diário, sendo eles o modelo tubular, indiano e chinês (ALVES, 2017)

### 1.2 Balanço de Energia

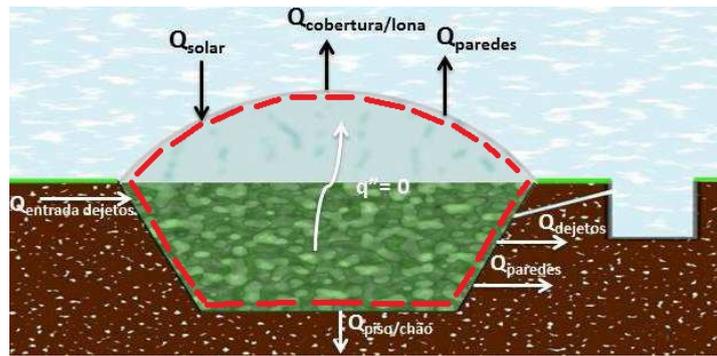
O balanço de energia de um processo geralmente é definido por  $E_{ent} - E_{sai} = \Delta E$  (BOLES; ÇENGEL, 2013). Para sistemas abertos como biodigestores essa equação fica bem mais complexa, incluindo a energia adquirida devido ao fluxo de massa. O sistema pode ser ilustrado pela Figura 1.1.

O balanço de energia para o biodigestor tubular segue a seguinte equação (SCHMOELLER, 2016).

$$\Delta Q = Q_{solar} - [Q_{massa} + Q_{lona} + Q_{condução}] \quad (1)$$

Onde  $\Delta Q$  é a variação total de energia no sistema,  $Q_{solar}$  é a energia adquirida por meio de irradiação solar,  $Q_{massa}$  é energia resultante pelo fluxo da biomassa (entrada e saída de dejetos),  $Q_{lona}$  é a energia dissipada por convecção e  $Q_{condução}$  é a energia perdida pelas paredes e em contato com o solo ( $Q_{chão}$  e  $Q_{paredes}$ ). Como o biodigestor é um sistema que opera com fluxo contínuo de biomassa, com a mesma quantidade de dejetos que entra logo após sai do sistema como biofertilizante, a parcela de energia adquirida pelo fluxo de massa é pequena em relação a energia absorvida na forma de calor por radiação solar (SCHMOELLER, 2016), podendo ser

Figura 1.1 – Fluxo de calor no biodigestor



Schmoeller (2016)

desconsiderado nos cálculos. Esta simplificação é útil pois permite que o balanço de energia seja feito admitindo o sistema como fechado, sem fluxo de massa.

### 1.2.1 Irradiação solar

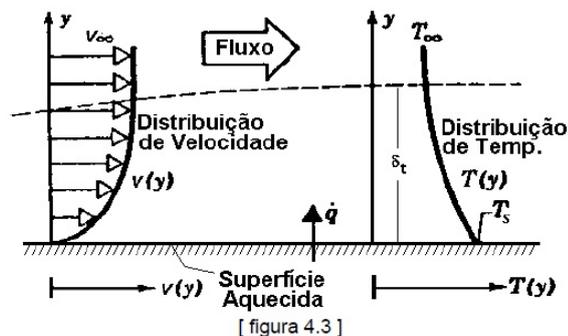
A irradiância solar é a energia transmitida pelo sol sob a forma de radiação eletromagnética. É necessário quantificar a energia solar absorvida pelo biodigestor, uma vez que mostra a quantidade de energia incidente na posição geográfica do local (MARTINS et al., 2005). Para determinar os valores de irradiância solar diversos métodos numéricos podem ser aplicados para compensar a escassez dados reais (TULCAN-PAULESCU; PAULESCU, 2008).

Existem estações meteorológicas especializadas para determinar os valores de irradiância solar, mas a quantidade dessas estações equipadas para observar a radiação solar é muito pequeno, e por consequência diversos métodos numéricos podem ser aplicados para compensar a escassez desses dados (TULCAN-PAULESCU; PAULESCU, 2008). Porém adotamos o mais pratico para este trabalho, que utiliza da longitude e da latitude para uma aproximação do valor real.

### 1.2.2 Transferência de calor por convecção

A troca de calor entre o biodigestor e o ambiente se dá por diversos fatores, para facilitar vamos levar em consideração somente a perda por convecção na superfície da lona. Convecção nada mais é, que escoamento de um fluido ao longo de uma superfície em que há diferença substancial de temperatura é chamado de camada limite térmica, em que ocorre transferência de calor em uma região de baixa velocidade (camada limite hidrodinâmica) (QUITES; LIA, 2005). A Figura 1.2 ilustra o mecanismo da convecção.

Figura 1.2 – Camada limite



Quites e Lia (2005)

## 1.3 Temperatura e pH

É extremamente importante o controle da temperatura no biodigestor, visto que a temperatura pode comprometer significativamente a produção, uma vez que altera a atividade das bactérias.

No trabalho de Castro e Cortez (1998), foi monitorada a produção de biodigestores indianos operando em diferentes temperaturas, e os resultados mostraram que em temperaturas abaixo de  $10^{\circ}C$  não se produziu gás, e baixa produção acima de  $50^{\circ}C$ . Os resultados também indicaram que mudanças súbitas de temperaturas, mais de  $5^{\circ}C$ , interrompem a atividade de bactérias metanogênicas. A temperatura em que a produção ocorreu de forma mais eficiente de biogás foi de  $31^{\circ}C$ , o que condiz com a faixa de valores mostrada na literatura, entre  $30^{\circ}C$  e  $40^{\circ}C$  (faixa mesolífica) (GONÇALVES, 2018). A partir destes resultados, é evidente que se deve ter atenção para a temperatura de operação dos biodigestores, principalmente em regiões onde há grande amplitude térmica.

O pH do meio em que ocorre a biodigestão influencia também o processo de digestão anaeróbia. Quando ácido, a atividade enzimática das bactérias é nula, em meio básico a fermentação produz quantidades maiores de outros compostos do que metano, sendo que a faixa ideal está entre os pH's de 6,6 e 7,6 (MOURA, 2014).

Para a construção de um Sistema Baseado em Regras *Fuzzy* (SBRF), faz-se necessário a definição de variáveis de entradas para o sistema. A partir dos fatos mencionados, foi definido as variáveis temperatura e pH, como sendo as variáveis de entrada.

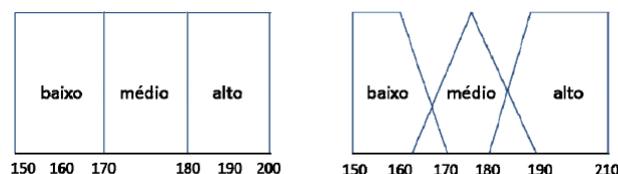
## 1.4 Sistema *Fuzzy*

### 1.4.1 Lógica *Fuzzy*

Em 1930, o filósofo e lógico polonês Jan Lukasiewicz introduziu a Lógica *Fuzzy*, também conhecida por lógica multivalorada. Através do estudo de termos do tipo alto, velho e quente, ele propôs a utilização de um intervalo de valores  $[0,1]$  que indicaria a possibilidade que uma hipótese fosse verdadeira ou falsa. Em 1937, o filósofo Max Black propôs a idéia de que continuidade descrevia graus. Ele definiu o primeiro conjunto *fuzzy* e descreveu algumas idéias básicas de operações com conjuntos *fuzzy*. Em 1965, Lofti Zadeh publicou o artigo *Fuzzy Sets* no jornal *Journal Information and Control*, que ficou conhecido como a origem da Lógica *Fuzzy* (MARRO et al., 2008).

Diferentemente da lógica clássica, essa que, utilizando a teoria dos conjuntos, que pode ser vista em (DIAS, 2014), um determinado elemento pertence à apenas um conjunto. Já a lógica *fuzzy*, um determinado elemento possui graus de pertinência para pertencer a algum conjunto. A figura 1.3 mostra um comparativo entre as duas lógicas, utilizando como exemplo a altura de uma pessoa através de três conjuntos: baixo, médio e alto. O gráfico da esquerda representa a lógica clássica e o da direita a lógica *fuzzy*.

Figura 1.3 – Representação na forma de conjuntos da altura de uma pessoa, sob o ponto de vista da Lógica convencional (à esquerda) e do da Lógica *Fuzzy* (à direita)



(MARRO et al., 2008)

Assim, a Lógica *Fuzzy* pode ser considerada como um conjunto de princípios matemáticos

para a representação do conhecimento baseado no grau de pertinência dos termos (graus de verdade) (MARRO et al., 2008). O intervalo de pertinência é  $[0,1]$ , onde 0 significa que um elemento não pertence a um determinado conjunto, 1 significa completa pertinência ao conjunto, e valores entre 0 e 1 representam graus parciais de pertinências.

Atualmente essa lógica é essencial em diversos sistemas, estando por trás de diversos programas computacionais. O conceito *fuzzy* pode ser entendido como uma situação em que não é possível responder simplesmente "sim" ou "não", mesmo conhecendo as informações necessárias sobre a situação, dizer algo entre "sim" e "não", como "talvez" ou "quase", torna-se mais apropriado (RIGNEL; CHENCI; LUCAS, ).

# Capítulo 2

## Metodologia

Neste capítulo é descrito como foi feita a montagem do mini biodigestor junto com o sistema de coleta de dados. Além disso, são mostradas todas as equações utilizadas no balanço de energia e no dimensionamento da espessura das paredes do biodigestor. E por fim será utilizado um SBRF para o estudo da concentração de metano através das variáveis temperatura e pH da biomassa.

### 2.1 Montagem e obtenção de dados

#### 2.1.1 Estrutura Mini Biodigestor

Um mini biodigestor foi construído em escala de 1 : 29 do modelo tamanho real projetado para a fazenda Mato Grosso (SANTOS et al., 2018) para ser utilizado nas medições da temperatura da lona. Os materiais utilizados foram os mais similares possíveis dos biodigestores reais, como por exemplo a lona, que é fabricada de Policloreto de Vinil (PVC).

Foi decidido que no modelo representativo não seria colocado matéria orgânica, devido a dificuldade de vedação do mini biodigestor, quando o biogás começa a ser produzido. Entretanto para manter a lona a uma altura necessária da base da câmara de biodigestão foi feito em uma impressora 3D a estrutura em Ácido Polilático (PLA) para suportar o peso da lona como mostrado na Figura 2.1. A partir dos dados obtidos com a medição das temperaturas, foram calculadas as entradas e perdas de calor no interior do biodigestor.

Figura 2.1 – Estrutura



Próprios Autores

#### 2.1.2 Instrumentação Eletrônica

Para medir a temperatura foram usados dois termômetros digitais DS18B20 com escala de 0,01 °C, precisão de  $\pm 0,05\%$  e faixa de medição 0 – 100 °C, que envia sinais para placa

Arduíno UNO R3, que processa, organiza e salva. Esses dados são salvos com a ajuda do *shield de ethernet*, que arquiva um micro cartão SD removível.

Contudo um *display* foi colocado para monitorar as variáveis em tempo real, prevenindo assim erros já no começo do experimento.

Como já previsto, um sistema de arrefecimento utilizando *cooler*, o mesmo não se encontra na Tabela 2.1 pois foi doado para o grupo. Sua necessidade se da por conta do aquecimento das placas, fios e resistores, causado pelo efeito Joule (SANTOS et al., 2018), que transforma energia elétrica em energia térmica, devido a sua resistência em passar corrente.

O sistema de aquisição de dados citado acima, foi o investimento total do projeto que teve custo de R\$142,70, os demais componentes e seus preços unitários estão listados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Componentes

Componente	Quant.	Preço un.
Sensor de Temperatura (DS18B20)	2	R\$14,90
Arduino Uno	1	R\$38,00
Protoboard 400 pontos	1	R\$13,00
Display 16x2	1	R\$20,00
Ethernet Shield	1	R\$40,00
Pontecímetro 10 $\Omega$	1	R\$01,50
Resistores 330 $\Omega$ e 4.7 $\Omega$	2	R\$00,20
Jumpers	20	R\$00,05
		Total R\$142,70

Próprios autores

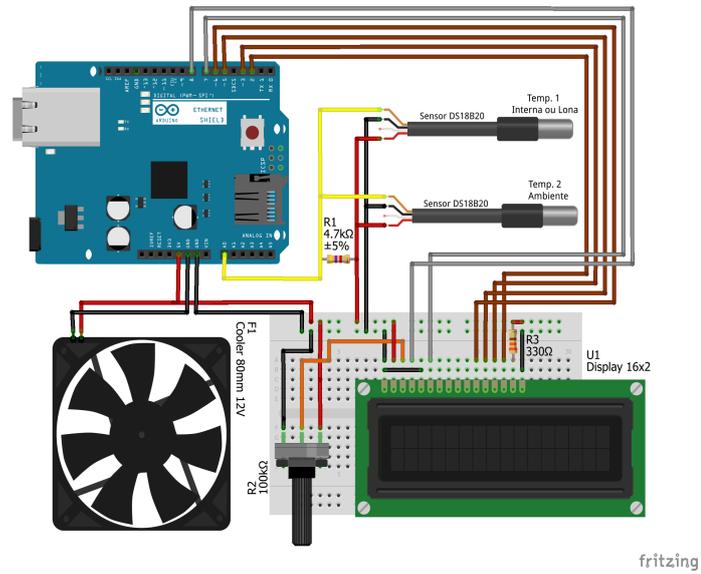
A montagem dos componentes está esquematizado na Figura 2.2

### 2.1.3 Programação desenvolvida

A programação foi escrita em linguagem C++ compatível com o Arduíno, trabalhando as variáveis tempo e temperatura. Existem placas próprias para controlar a variável tempo como por exemplo o Módulo Clock Ds3231, porém optou-se por economizar e desenvolver uma programação semelhante que tenha o mesmo resultado integrado com os dados obtidos pelos termômetros. Os dados foram salvos em formato de planilha eletrônica (.csv) para facilitar a manipulação e plotagem, conforme demonstrado pelo fluxograma da Figura 2.3.

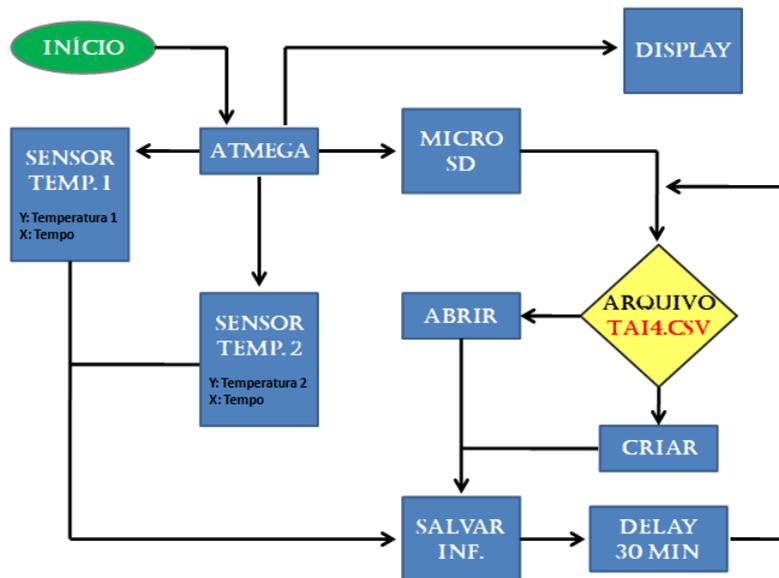
Após ligar o Arduíno, o programa inicializa e começa a cronometrar o tempo, identificar a temperatura e procurar o micro cartão SD. Caso não encontre cartão, o processador ATmega 328 do Arduíno envia uma mensagem de erro para o *display*, caso contrario ele prosseguirá com programação iniciando um *loop* com uma condicional, que consiste em procurar o arquivo TAI4.csv se existir ele simplesmente abre o arquivo e já começa a salvar os dados das variáveis, se não existir o mesmo cria um arquivo e salva as informações, dá uma pausa de 30 minutos e inicia o *loop* novamente.

Figura 2.2 – Montagem dos componentes



Próprios autores via aplicativo *Fritzing*

Figura 2.3 – Fluxograma



Próprios autores

### 2.1.4 Coleta de dados de Temperatura

Para a medição da temperatura ambiente e da lona do biodigestor para serem usados no balanço de energia, o teste teve duração de 4 dias, 11/10/2018 até 14/10/2018, em intervalos de 30 em 30 minutos, obtendo 48 leituras em cada dia.

Embora o biodigestor real tenha sido dimensionado para a fazenda Mato Grosso (SANTOS et al., 2018) situada em Pompeu-MG, as temperaturas foram coletadas na cidade de Arcos-MG devido a maior facilidade de monitoramento. Apesar da distância de mais de 160 *km* entre as cidades, a diferença na variável de temperatura usado nos cálculos são consideradas irrelevantes. Embora recomenda-se a extração dos dados o mais próximo possível do local onde o biodigestor sera implementado, ou se já possui o biodigestor, faça as análises no próprio.

## 2.2 Equações do balanço de energia

### 2.2.1 Cálculo da energia energia solar incidente no biodigestor

Para calcular a energia solar incidente no biodigestor, será utilizado o método empregado por Marin (2016). Foram analisados os dados dos dias 11 a 14 de outubro, que são referentes as datas do experimento com o mini-biodigestor.

O método empregado consiste em calcular a energia solar diária incidente por unidade de área, numa superfície posicionada paralelamente à superfície da terra, sem considerar a interferência da atmosfera. A Equação 2, é uma função da latitude, da época do ano e do ângulo de inclinação dos raios solares, que variam ao longo do dia.

$$Q_0 = 37,6 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 \cdot \left[ \left(\frac{\pi}{180}\right) \cdot hn \cdot \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \sin hn \right] \quad (2)$$

Onde:

- $Q_0$ : Energia solar diária em  $W/m^2$ ;
- 37,6= constante solar;
- $\left(\frac{d}{D}\right)^2$ : fator de correção da excentricidade da terra;
- $hn$ : ângulo de inclinação dos raios solares;
- $\phi$ : Latitude do local;
- $\delta$ : Declinação do sol.

### Fator de correção da excentricidade da terra

Este fator nos fornece uma média adimensional, e pode ser calculada de acordo com a seguinte expressão:

$$\left(\frac{d}{D}\right)^2 = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{NDA \cdot 360}{365}\right) \quad (3)$$

- $NDA$ : Dia do ano, onde o primeiro de janeiro vale 1, e assim sucessivamente até do dia 365.

## Declinação do sol

O cálculo da declinação solar se dá em função do dia do ano, e é calculado da seguinte forma:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left[ \frac{360 \cdot (NDA - 80)}{365} \right] \quad (4)$$

## Ângulo de inclinação dos raios solares

O ângulo de inclinação dos raios solares, é calculado utilizando os valores já encontrados para  $\phi$  e  $\delta$  anteriormente, pela seguinte expressão:

$$hn = \arccos(-tg \phi \cdot tg \delta) \quad (5)$$

## Energia solar diária

Como já descrito, a Equação 2 fornece a quantidade de energia em  $W/m^2$ . Como Watts é joule por segundo, faz-se necessário então multiplicá-la pelo tempo que se deseja analisar, e pela área da lona do biodigestor, que no caso do biodigestor analisado, é de  $315,2 m^2$ :

$$Q_d = Q_0 \cdot t_s \cdot A \quad (6)$$

Onde:

- $t_s$ : tempo em segundos.
- $A$ : Área de contato.

### 2.2.2 Cálculo da transferência de calor por convecção

Para o cálculo da quantidade de calor que é cedido do biodigestor ao ambiente utilizou-se a equação de troca de calor por convecção, para a qual é necessário calcular o coeficiente de convecção  $h$  em função das propriedades do fluido. Para o caso da lona do biodigestor (SCHMOELLER, 2016) apresenta um modelo de cálculo em seu trabalho como mostrados nas equações 7 e 8 com base nas características do material da lona e admitindo-se um escoamento laminar na superfície devido a baixa velocidade dos ventos.

$$Nu = \frac{h \cdot L_{lona}}{k} = 0,664 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad Re = \frac{\mu \cdot L_{lona}}{\nu} \quad (7)$$

$$Q = (T_{lona} - T_{\infty}) \cdot h \quad (8)$$

- $Nu$  : Número de Nusselt = 21,1
- $Re$  : Número de Reynolds = 1280,4
- $Pr$  : Número de Prandtl = 0,7
- $L_{lona}$  : Espessura da lona = 8 mm
- $k$  : Condutividade térmica do material (PVC) = 0,17 W/mK
- $\mu$  : Velocidade do vento 2,5 m/s

- $\nu$  : Viscosidade cinemática do ar =  $1,562 \cdot 10^{-5} m^2/s$
- $h$  : Coeficiente de película =  $448,3 W/(m^2 \cdot K)$
- $T_{lona}$  e  $T_{\infty}$  = Temperatura da lona e do ambiente

Utilizando deste modelo de cálculo, o valor encontrado de  $h = 448,3 W/m^2 \cdot K$  é considerado extremamente alto comparando com a ordem de grandeza dos valores médios de  $h$  por convecção natural mostrados na Tabela 2.2 abaixo:

Tabela 2.2 – Valores médios do Coeficiente de convecção

Convecção Natural	$h [W/m^2 \cdot K]$
Ar	5 - 30
Gases	4 - 25
Líquidos	120 - 1.200
Água líquida	20 - 100
Neto (2010)	

Foi adotado um valor médio ( $h = 17,5 W/m^2 \cdot K$ ) para os cálculos, estando na faixa de valores de convecção natural. Para o cálculo da quantidade de calor, utiliza-se a equação abaixo onde (A) é a área de superfície, (t) o tempo entre as medições.

$$Q_{conv} = h \cdot A \cdot (T_{lona} - T_{am}) \cdot t \quad [J] \quad (9)$$

Após calculadas as fontes de ganho e perda de calor foi feito o balanço de energia com o objetivo de quantificar a energia necessária para manter o biodigestor na temperatura ideal. A energia requerida é referente ao calor necessário para elevar a temperatura da biomassa até  $37,5^\circ C$  ( $Q_{req}$ ) somado com as fontes de perda e ganho de calor ( $Q_{sol}$ ) e ( $Q_{lona}$ ), de acordo com a equação 2.2.2 :

$$Q_{rec} = m \cdot c \cdot (37,5 - T_{am}) \quad (10)$$

$$E_{req} = Q_{req} + Q_{lona} - Q_{sol} \quad (11)$$

Onde  $Q_{lona}$  é referente a troca de calor entre a lona e o ambiente e  $Q_{sol}$  referente ao calor irradiado pelo sol, análogo a representação da Figura 1.1. Na equação 10  $Q_{req}$  é calculado conforme a equação fundamental da calorimetria, em que  $m$  é a massa dos dejetos,  $c$  o calor específico a pressão constante da biomassa e  $T_{am}$  a temperatura ambiente .

## 2.3 Sistema Baseado em Regras *Fuzzy* (SBRF)

### 2.3.1 Definição das variáveis, termos linguísticos e arquitetura do SBRF

O SBRF possui quatro componentes: um processador de entrada que realiza a fuzzyficação dos dados de entrada, uma base de regras, uma máquina de inferência *fuzzy* e um processador de saída. A figura 2.4 indica como estes componentes estão conectados.

No componente processador de entrada têm-se a definição das variáveis, além de determinar os parâmetros das funções de pertinência. A componente base de regras é composta

Figura 2.4 – Arquitetura do SBRF



(DIAS, 2014)

por várias proposições, essas que podem ser vistas na tabela 2.4. Já a componente máquina de inferência *fuzzy* é essencial para o sucesso do SBRF, já que ela fornece a saída a partir de cada entrada *fuzzy* e da relação definida pela base de regras 2.4. Existem dois métodos de inferência *fuzzy*, sendo eles: Método Mamdani e o Método Takagi-Sugeno. (DIAS, 2014). Nesse trabalho será utilizado o Método de Mandani. Por fim, mas não menos importante, têm-se o componente processador de saída, etapa na qual ocorre a defuzzificação dos dados, ou seja, representação de um conjunto *fuzzy* através de um número real. O método utilizado para a defuzzificação dos dados é conhecido como "Centro de Gravidade". (DIAS, 2014).

Com base na literatura, foi observado que as principais variáveis que influenciam na produção de biogás são a temperatura e o pH da biomassa. Experimentos em laboratório com um biodigestor indiano, conduzidos por Castro e Cortez (1998), mostraram a degradação significativa da produção em temperaturas fora da faixa mesolífica ( $30^{\circ}C - 40^{\circ}C$ ).

Segundo (Moura, 2014) o pH ideal deve ser próximo de 7,5, e no caso do estrume bovino após regulado o pH não varia no decorrer do processo.

Sendo assim, definiu-se temperatura e pH como as variáveis linguísticas de entrada para a construção do SBRF. Variáveis linguísticas são criadas para dar nomes aos conjuntos *Fuzzy*, sua função é fornecer uma maneira sistemática de aproximação de fenômenos complexos ou mal definidos, podendo ser sentenças em uma linguagem especificada, construída a partir de termos próprios (RIGNEL; CHENCI; LUCAS, ), sendo qualificada em termos linguísticos. Para o problema proposto a temperatura será qualificada como (baixa, média e alta) e o pH como (ácido, neutro e alcalino). Os termos linguísticos para as variáveis de entrada são quantificados por conjuntos *fuzzy* com base nos valores de referência encontrados na literatura mostrados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Classificação das variáveis

Classificação	pH (0 - 14)	Temperatura °C
Baixo	6,5 (Ruim - meio ácido)	15 - 28 (Ruim - Baixa Produção)
Ideal	6,5 - 7,6 (Ideal - Neutro)	28 - 40 ( Ideal - Boa Produção)
Alto	> 7,6 ( Ruim - meio alcalino)	40 - 60 ( Ruim - Baixa Produção)

Moura; Gonçalves; Castro e Cortez (2014)

O gás metano é o composto principal desejado na produção do biogás, pois quanto maior a concentração do gás metano maior o seu poder calorífico. Sendo assim, a concentração de metano será a variável linguística de saída para o SBRF sendo qualificada com os termos linguísticos (ruim, boa e ótima), dado que concentração de gás metano pode variar entre 50% e 75% (CARPIO, 2016) dependendo do processo de produção. Cada termo linguístico será quantificado por um conjunto *fuzzy*.

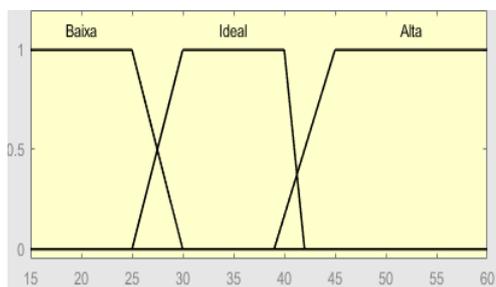
### 2.3.2 Construção do SBRF

Para a criação do SBRF, foi utilizado o software *MATLAB* (MATLAB, 2015) disponível no laboratório de informática do Instituto Federal de Minas Gerais *Campus* Avançado Arcos, utilizamos o método de inferência de Mamdani. Esse método agrega as regras através do operador lógico OU, que é modelado pelo operador máximo, e em cada regra o operador lógico E é modelado pelo operador mínimo (DIAS, 2014).

Para cada termo linguístico de entrada e saída deve-se associar um conjunto *fuzzy* por meio de uma função de pertinência. Utilizou-se funções de pertinência do tipo Trapezoidal, que requer quatro parâmetros para cada termo linguístico.

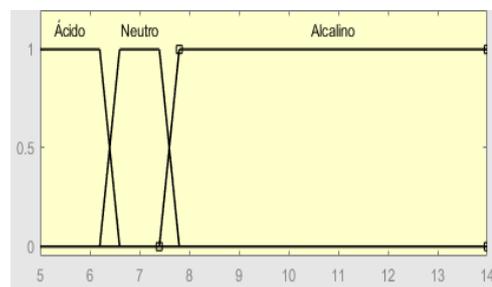
Após obter e qualificar os dados das variáveis linguísticas de entrada temperatura e pH, dispostos na Tabela 2.3 e da variável linguística de saída concentração de metano no biogás (CARPIO, 2016), definimos os quatro parâmetros para cada um dos termos linguísticos de cada variável linguística. Assim, a representação gráfica das variáveis temperatura, pH e concentração de metano no biogás com seus respectivos termos linguísticos estão exibidos respectivamente nas Figuras 2.5, 2.6, e 2.7

Figura 2.5 – Função de pertinência temperatura



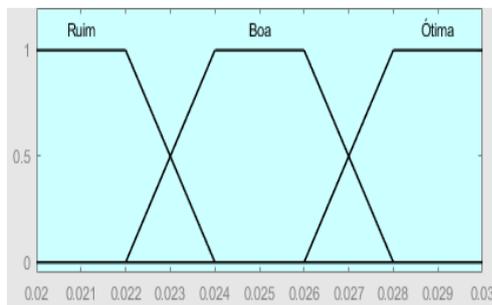
Próprios autores

Figura 2.6 – Função de pertinência pH



Próprios autores

Figura 2.7 – Função de pertinência da concentração de metano no biogás



Próprios autores

A Tabela 2.4, fornece a base de regras da concentração do gás metano presente no biogás.

Tabela 2.4 – Base de Regras *Fuzzy*

Temperatura	pH	Ácido	Neutro	Alcalino
Baixa		Ruim	Boa	Ruim
Ideal		Boa	Ótima	Boa
Alta		Ruim	Boa	Ruim

Próprios autores

Leia-se a regra da seguinte forma:

**"Se a Temperatura for *ideal* e o pH for *neutro***

**Então a concentração de gás metano no biogás é ótima"**

No tópico 3 é mostrado as simulações feitas a partir da base de regras 2.4, para obter as faixas de valores da concentração de metano presente no biogás.

## 2.4 Cálculo da espessura da parede de concreto

### 2.4.1 Espessura para parede de concreto simples com tensão média aplicada

A partir dos dados obtidos sobre o concreto (ARAÚJO, 1997) onde a tensão de ruptura ao cisalhamento é de  $5,44 \text{ MPa}$  e visando descobrir a espessura das paredes que suportariam a carga aplicada, a partir da tensão de ruptura ao cisalhamento do material que seria utilizado para sua construção sendo este o concreto, foi calculada a princípio uma força cisalhante média onde sua intensidade tem o mesmo valor que a força  $F$  aplicada nas paredes.

De posse do valor da tensão de ruptura ao cisalhamento do concreto e visto que possíveis erros não previstos pode estar contidos nos cálculos utilizamos um fator de segurança  $F.S = 2$ , calculando assim uma tensão de cisalhamento admissível  $T_{adm}$  a partir da divisão da tensão de ruptura pelo fator de segurança para que o resultado de espessura seja obtido com maior segurança (BEER; JOHNSTON, 1982).

$$T_{adm} = \frac{T_{rup}}{F.S.} \quad (12)$$

Sabendo que para este caso a tensão admissível é igual a tensão média, e aplicando a fórmula em que a tensão de cisalhamento admissível é igual a força de cisalhamento representado pela letra  $V$  é dividida pela área de atuação da força cisalhante  $A_c$  e considerando esta área de atuação como sendo  $A_c = (2 \cdot h + L) \cdot E$  para as paredes laterais temos que (BEER; JOHNSTON, 1982):

$$T_{adm} = \frac{V}{A_c} \quad (13)$$

Substituindo então na equação e isolando a espessura ( $E$ ):

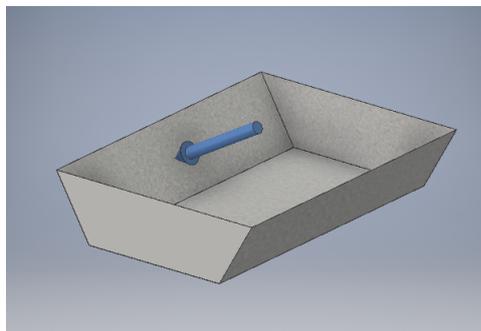
$$E = \frac{V}{(2 \cdot h + L) \cdot T_{adm}} \quad (14)$$

Já para as paredes frontais outra força  $F'$  é encontrada diferente da força aplicada na parede lateral, sendo  $V'$  igual a  $F'$ . Substituindo na fórmula de tensão de cisalhamento admissível e considerando a área de atuação da força cisalhante como sendo  $A'_c = (2 \cdot h + b) \cdot E$  temos que:

$$E' = \frac{V'}{(2 \cdot h + b) \cdot T_{adm}} \quad (15)$$

A partir dos resultados obtidos de E e E' e comparando os valores, será utilizado o de maior valor sendo ele das paredes laterais de  $139\text{ mm}$  pois ele atende todos os requisitos médios de ambas as paredes de forma a suportar a carga simplificada como um único vetor demonstrada na Figura 2.8.

Figura 2.8 – Aplicação da força nas paredes laterais



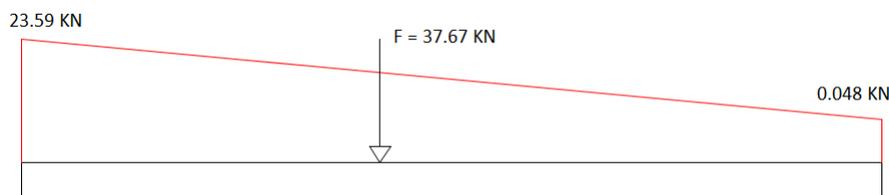
Próprios autores via aplicativo AutoDesk Inventor

### 2.4.2 Espessura para parede de concreto armado

O concreto simples não pode ser utilizado quando ocorre flexão (TÉCNICAS, 2007), pois ele não possui grande resistência a este tipo de esforço, então o concreto armado deve ser utilizado se a sua tensão de ruptura ao cisalhamento é de  $25\text{ MPa}$  e a tensão admissível é de  $12,5\text{ MPa}$ .

A partir da espessura encontrada anteriormente, foi calculada a tensão de ruptura a flexão e comparada com a do concreto armado, caso esta fosse menor que o valor da tensão do concreto armado, a espessura encontrada anteriormente poderia ser utilizada.

Figura 2.9 – Viga



Próprios autores via aplicativo GeoGebra (GEOGEBRA, 2014)

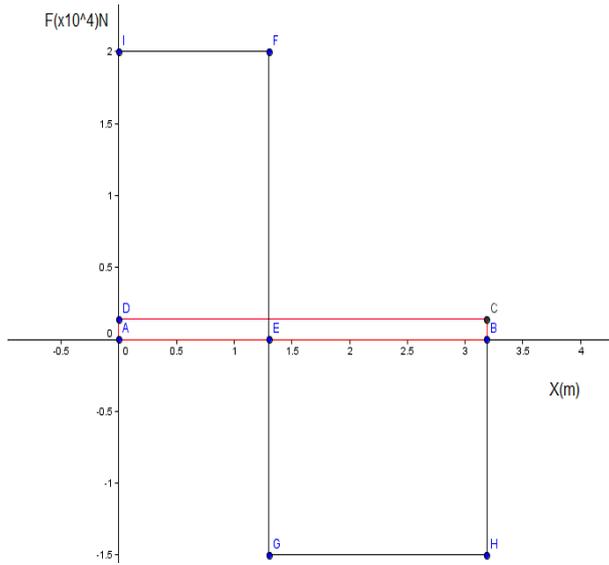
Considerando que os pontos de contato entre as paredes são pontos de apoio, então pode ser suposto um problema de viga simples conforme a Figura 2.9, onde a partir das forças de reações calculadas por somatórios de força em x e y e pelo somatório de momento ( $\sum F_x$ ,  $\sum F_y$  e  $\sum M$ ) nos pontos pode ser construído o gráfico de força por distância Figura 2.10 onde a força de reação em A tem o seguinte valor de  $R_a = 21,97\text{ kN}$  e a força de reação em B tem o seguinte valor de  $R_b = 15,70\text{ kN}$  considerando que a força é aplicada em um ponto único e não distribuída conforme Figura 2.8 onde a força aplicada está no centroide de área do trapézio da força distribuída para simplificação dos cálculos.

Para calcular a tensão de flexão, primeiramente é necessário saber o momento máximo que ocorre na estrutura definido pela Equação 2.11

Onde o momento máximo ocorrido na estrutura está no vértice da função momento com valor de  $M = 17,50\text{ kN.m}$ .

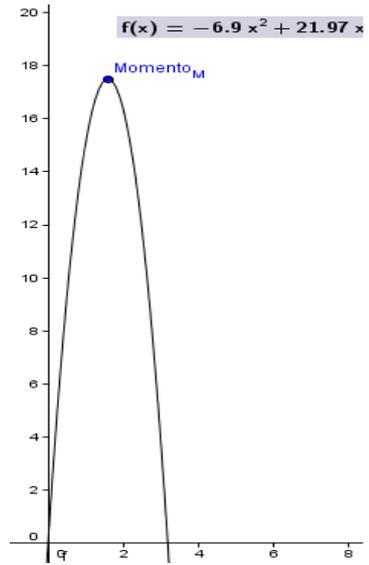
A tensão de flexão pode ser calculada utilizando a fórmula apresentada por Beer e Johnston (1982):  $T_f = \frac{M}{W}$ ; onde  $W = \frac{2 \cdot E \cdot h^3}{12 \cdot L}$

Figura 2.10 – Gráfico das forças atuantes na viga



Próprios autores via aplicativo GeoGebra (GEOGEBRA, 2014)

Figura 2.11 – Função momento atuante na viga



Próprios autores via aplicativo GeoGebra (GEOGEBRA, 2014)

Então:

$$T_f = \frac{M}{\frac{2 \cdot E \cdot h^3}{12 \cdot L}} \quad (16)$$

De posse da equação 16 foi calculada a tensão de flexão para a espessura encontrada  $E = 0,139 \text{ mm}$  onde  $T_f = 0,812 \text{ MPa}$  que comparada com a tensão do concreto armado observa-se um valor inferior demonstrando assim que essa espessura pode ser utilizada sem que ocorra problemas com a estrutura.

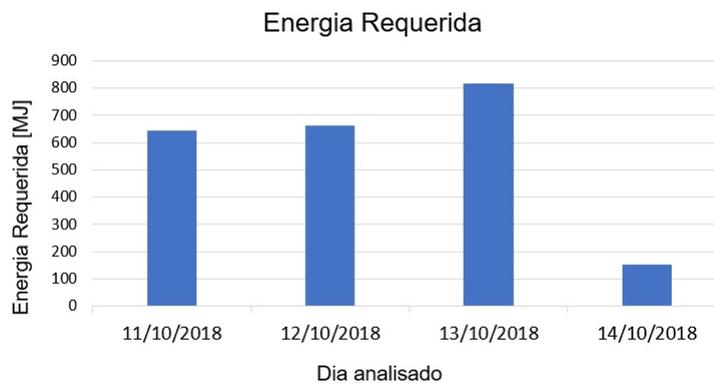
# Capítulo 3

## Resultados e discussões

### 3.1 Resultados do balanço de energia

A energia requerida para o biodigestor operar a  $37,5^{\circ}C$ , representa o saldo final de cada dia analisado das entradas e saídas de calor, calculada entre 11/10/2018 e 14/10/2018 de acordo com a equação 2.2.2, mostrado no gráfico da Figura 3.1.

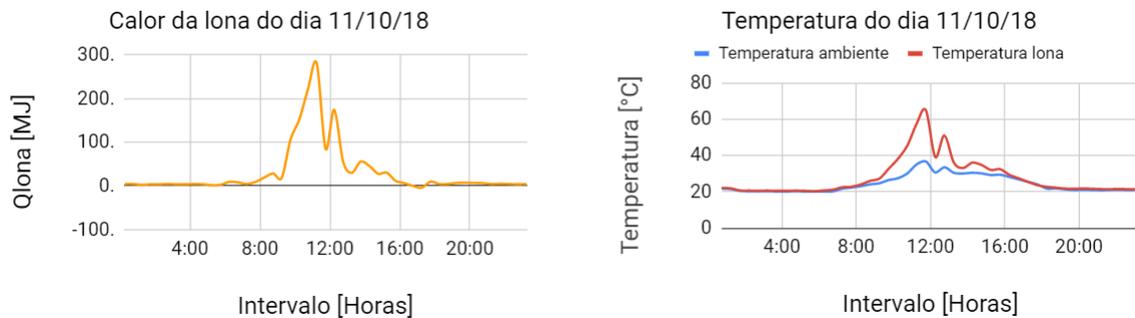
Figura 3.1 – Balanço de Energia



Próprios autores

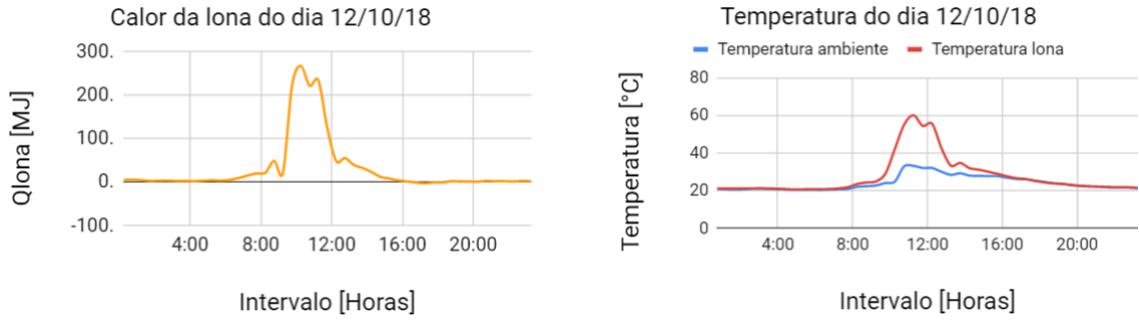
As Figuras 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5 são referentes a variação da transferência de calor por convecção ( $Q_{lona}$ ) de acordo com a equação 9 na superfície da lona do biodigestor e da temperatura ambiente nos respectivos dias analisados.

Figura 3.2 – Valores de  $Q_{lona}$  e temperatura ao longo do primeiro dia



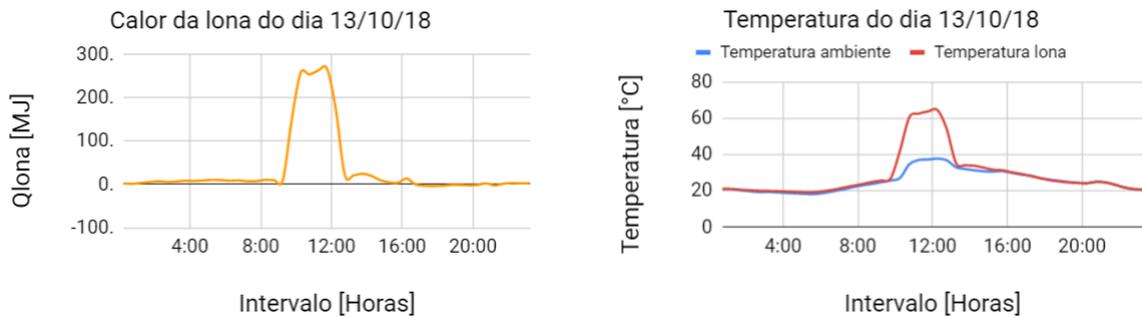
Próprios autores

Figura 3.3 – Valores de  $Q_{lona}$  e temperatura ao longo do segundo dia



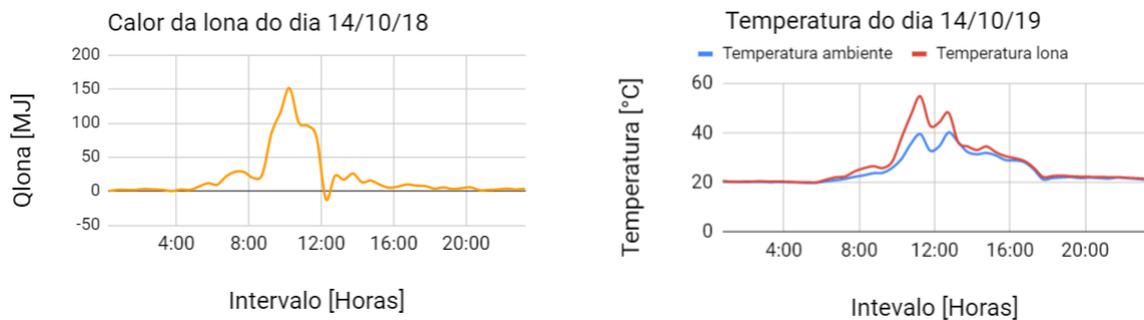
Próprios autores

Figura 3.4 – Valores de  $Q_{lona}$  e temperatura ao longo do terceiro dia



Próprios autores

Figura 3.5 – Valores de  $Q_{lona}$  e temperatura ao longo do quarto dia



Próprios autores

No dia 14/10, a energia requerida teve um valor abaixo da média, devido que nesse dia específico o clima estava chuvoso, onde a troca de calor entre o biodigestor e o ambiente de acordo com as temperaturas coletadas foi menor, como mostrado nos gráficos das Figuras 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5 acima. A maior perda foi registrada no ultimo dia de medição sendo de  $151,4 MJ$ , bem menor em relação aos dias 11, 12 e 13 onde as maiores perdas registradas foram  $280,5 MJ$ ,  $267,5 MJ$  e  $266,79 MJ$ .

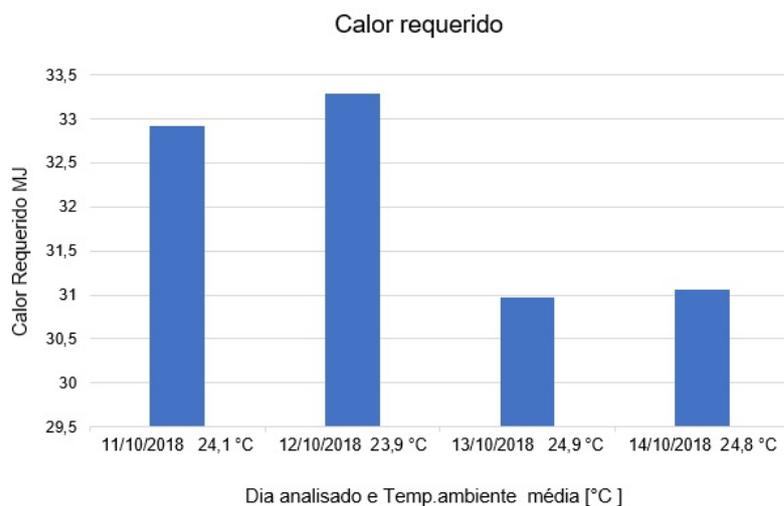
Observando que a energia requerida para o biodigestor operar em um dia chuvoso foi menor do que os dias anteriores, onde o clima estava limpo, percebe-se um problema em utilizar esta metodologia em dias em que a incidência solar é reduzida pelo clima chuvoso. No método de cálculo descrito na seção 2.2.1 em que estima-se o calor por unidade de área em que uma superfície recebe pelo sol em função da latitude e longitude do local, não há como mensurar a energia que deixa de incidir em um dia nublado. Portanto, esse método se apresenta inadequado neste caso, pois em um dia com menor incidência do sol, a energia requerida deve ser maior para compensar a quantidade menor de calor fornecido pelo sol.

O mesmo método de cálculo foi utilizado por Schmoeller, 2016 para estimar a quantidade de calor diária fornecida pelo sol, também desprezando os efeitos das condições climáticas para executar o balanço de energia do biodigestor em todos os dias do ano. Para efeito de comparação, o valor mínimo e máximo para a energia requerida necessária para o funcionamento do biodigestor a  $37,5^{\circ}C$  foram  $2,7 GJ$  e  $6,02 GJ$  respectivamente.

Comparando com os valores calculados neste trabalho observa-se que estão uma ordem de grandeza menor, porém vale ressaltar que neste método de cálculo da transferência de calor por convecção utilizou-se um valor médio para o coeficiente  $h$  além das temperaturas terem sido coletadas experimentalmente, buscando ser mais condizente como caso de convecção natural dado que um valor de coeficiente de convecção de  $h = 448,3 W/m^2 \cdot K$  é referente a um caso de convecção forçada (QUITES; LIA, 2005).

Como visto na seção 2.2.2 o calor necessário para elevar a temperatura da biomassa até  $37,5^{\circ}C$  ( $Q_{req}$ ) calculado pela equação 10 variou pouco, devido também a baixa variação da temperatura ambiente nos dias analisados, mostrado na Figura 3.6 a seguir.

Figura 3.6 – Variação de  $Q_{req}$



Próprios autores

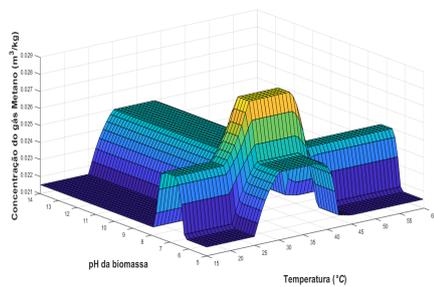
### 3.1.1 Simulação da concentração de metano no biogás através das variáveis linguísticas temperatura, pH

Para simular uma saída para o SBRF têm-se a seguinte situação:

Considera-se que a temperatura interna do biogás seja de  $37^{\circ}C$  e o pH da biomassa seja 7. Após entrar com esses valores o SBRF processa os dados utilizando o método de *max-min* de Mandani e em seguida retorna com o valor de 0,0285. Esse valor informa que se a temperatura interna do biogás for de  $37^{\circ}C$  e o pH da biomassa for 7, então a concentração de gás metano no biogás será ótima.

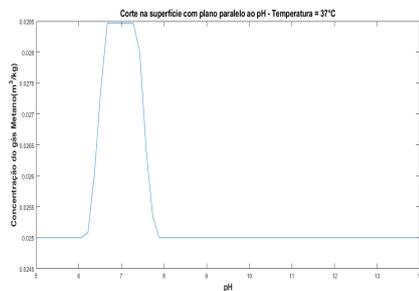
As Figuras 3.7 e 3.8 mostram a superfície em terceira dimensão das possíveis soluções da concentração do gás metano presente no biogás. A figura 3.9 representa o corte feito na superfície considerando a temperatura constante de  $37^{\circ}C$ , e o pH variando no intervalo de  $[5,14]$ . Já a figura 3.10 representa o corte feito na superfície considerando o pH constante igual a 5 e a temperatura variando no intervalo de  $[15^{\circ}C, 60^{\circ}C]$ . Foi utilizado 60 valores aleatórios para as variáveis de entrada, Temperatura e pH.

Figura 3.7 – Perspectiva da superfície



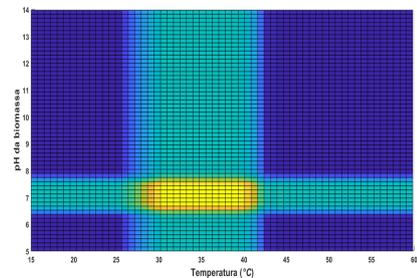
Próprios autores

Figura 3.9 – Corte A



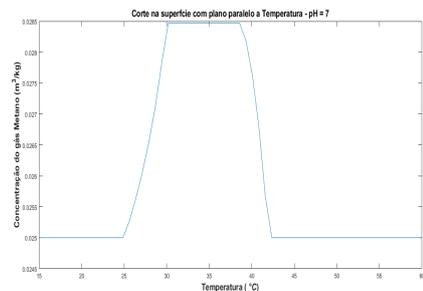
Próprios autores

Figura 3.8 – Vista superior da superfície



Próprios autores

Figura 3.10 – Corte B



Próprios autores

## Capítulo 4

# Conclusões

Neste trabalho, buscou-se melhorar o projeto de um biodigestor tubular através do estudo dos principais fatores que afetam a produção de um biogás. Além disso, foi feito cálculo da menor espessura possível para o menor gasto de materiais na construção do biodigestor.

Na execução do balanço de energia, foram identificadas e calculadas as principais fontes de perdas e ganhos de calor no sistema para obter o saldo final da energia requerida para o biodigestor operar na temperatura ideal. O valor máximo da energia requerida diário foi de  $816 MJ$ , o que segundo Schmoeller, (2016) é um valor pequeno que dispensa a utilização, por exemplo de trocadores de calor, que no caso demandaria uma potência de  $9,5 kW$ .

De acordo com o gráfico na Figura 3.1, observa-se que a energia requerida depende principalmente da temperatura ambiente, que é a temperatura inicial da biomassa ao entrar no biodigestor. O período do dia em que há a maior troca de calor entre o biodigestor e o ambiente é entre 7 e 16 h, visto nos gráficos da seção 3.1.

O resultado do balanço de energia para o dia 14/10 foi comprometido devido a impossibilidade de estimar corretamente a energia incidente do sol em dias chuvosos pelo método de cálculo disponível descrito na seção 2.2. As dimensões utilizadas nas equações de transferência de calor são referentes ao biodigestor dimensionado no Trabalho Acadêmico Integrador III (TAI III) (SANTOS et al., 2018) para a Fazenda Mato Grosso em Pompéu-MG.

Para o cálculo da espessura das paredes, primeiramente foi calculada uma espessura para uma tensão média onde não foi considerado os esforços de flexão utilizando dos métodos apresentados em Beer e Johnston (1982), dessa forma poderiam ser utilizadas as propriedades do concreto simples. Posteriormente, foi analisado que o concreto no que deveria ser utilizado como material seria o concreto armado por suportar esforços de flexão (ARAÚJO, 1997).

De posse dessas informações e ainda utilizando dos métodos apresentados por Beer e Johnston (1982), foi calculada uma tensão de flexão para a espessura encontrada para o concreto simples, que ao ser comparada com a tensão suportada pelo concreto armado, deveria estar abaixo do valor para que assim essa espessura de  $0,139 mm$  pudesse ser utilizada nas paredes do biodigestor e suportar todos os esforços, fato esse confirmado após o término dos cálculos.

Pode-se constatar que com os estudos sobre a lógica *fuzzy* e o SBRF foi possível determinar um método eficaz para a determinação da concentração do gás metano presente no biogás, uma vez que as variáveis são qualificadas por termos linguísticos e quantificadas por funções de pertinência. Sendo assim, consegue-se dizer que a representação das variáveis linguísticas Temperatura e pH por termos linguísticos tornou a proposta desse trabalho menos complexa.

A construção do SBRF foi baseada em dados obtidos com base na revisão bibliográfica de trabalhos anteriores, que estudaram experimentalmente a influência de diferentes faixas de temperatura e pH na produção de biogás. Para trabalhos futuros seria pertinente uma pesquisa e obtenção de dados de um biodigestor real em operação, o qual forneceria um resultado mais realístico sobre em que condições o biogás apresentará maior concentração de metano.

# Referências Bibliográficas

ALVES, A. M. Desenvolvimento de um aplicativo computacional para dimensionamento técnico e econômico de biodigestores tipo tubular. *Universidade Estadual do Oeste do Paraná*, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 9.

ARAÚJO, D. d. L. *Cisalhamento na interface entre concreto pré-moldado e concreto moldado no local em elementos submetidos à flexão*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 1997. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 28.

BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R. *Resistência dos materiais*. [S.l.]: McGraw-Hill, 1982. v. 5. Citado 3 vezes nas páginas 21, 22 e 28.

BOLES, M. A.; ÇENGEL, Y. A. *Termodinâmica*. 7. ed. São Paulo: AMGH EDITORA LTDA, 2013. v. 1. Citado na página 9.

CARPIO, P. R. C. *Produção de energia elétrica a partir do biogás*. 2016. Citado na página 20.

CASTRO, L. R. de; CORTEZ, L. A. B. Influência da temperatura no desempenho de biodigestores do esterco bovino. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 2, n. 1, p. 97–102, 8 1998. Citado 3 vezes nas páginas 8, 11 e 19.

DIAS, L. J. do C. Estudo sobre os sistemas /fuzzy e a aplicação do algoritmo asbrf. v. 1, 1 2014. Citado 3 vezes nas páginas 11, 19 e 20.

GEOGEBRA, I. *GeoGebra Clássico*. [S.l.]: GNU General Public, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.

GONÇALVES, M. N. *Os efeitos da temperatura na produção de biogás em biodigestores*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 19.

MARIN, F. *Micrometeorologia da Radiação I*. [S.l.]: Universidade de São Paulo, 2016. Citado na página 16.

MARRO, A. A. et al. Lógica fuzzy: Conceitos e aplicações. *Departamento de Informática e Matemática Aplicada - Universidade Federal do Rio Grande do Norte*, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 12.

MARTINS, F. R. et al. Mapas de irradiação solar para o brasil—resultados do projeto swera. *Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil*, p. 16–21, 2005. Citado na página 10.

MATLAB. *version R2015b*. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc., 2015. Citado na página 20.

MOURA, J. P. de. *Estudo de casos das rotas tecnológicas para produção de biogás e da influência da composição química de dejetos de matrizes suínas na qualidade do biogás gerada por biodigestor*. Tese (Doutorado) — UFPE, Paraná, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 8, 11 e 19.

NETO, P. C. B. *Transferência de calor*. São José - SC, 2010. Citado na página 18.

- QUITES, E. E.; LIA, L. R. B. Introdução à transferência de calor. *Universidade Federal*, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 26.
- RIGNEL, D. G. de S.; CHENCI, G. P.; LUCAS, C. A. Uma introdução a lógica fuzzy. *Revista eletrônica de sistemas de informação e gestão tecnológica*, year = 2011, month = 1, volume = 1. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 19.
- SANTOS, D. M. et al. Dimensionamento e análise da viabilidade técnica e econômica de um biodigestor tubular. *Instituto Federal de Minas Gerais - Campus Arcos*, 6 2018. Citado 8 vezes nas páginas 2, 5, 6, 8, 13, 14, 16 e 28.
- SCHMOELLER, L. Modelagem matemática e estudo de caso da transferência de calor em um biodigestor fluxo tubular na unidade granja colombari. Foz do Iguaçu, 2016. Citado 5 vezes nas páginas 9, 10, 17, 26 e 28.
- TAHERZADEH, M. J.; KARIMI, K. Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: a review. *International journal of molecular sciences*, Molecular Diversity Preservation International, v. 9, n. 9, p. 1621–1651, 2008. Citado na página 9.
- TÉCNICAS, A. B. de N. *ABNT NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto-procedimento*. [S.l.]: ABNT, 2007. Citado na página 22.
- TULCAN-PAULESCU, E.; PAULESCU, M. Fuzzy modelling of solar irradiation using air temperature data. *Theoretical and Applied Climatology*, Springer, v. 91, n. 1-4, p. 181–192, 2008. Citado na página 10.