



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

LUÍS ALBERTO SCHWIND PEDROSO STUSSI DA SILVA PEREIRA

**ESTUDO, MODELAGEM E CARACTERIZAÇÃO DE PROCESSOS DE
BIODIGESTÃO COM MONITORAMENTO E CONTROLE DA TEMPERATURA**

Ilha Solteira

2017

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: CIÊNCIAS TÉRMICAS

LUÍS ALBERTO SCHWIND PEDROSO STUSSI DA SILVA PEREIRA

**ESTUDO, MODELAGEM E CARACTERIZAÇÃO DE
PROCESSOS DE BIODIGESTÃO COM MONITORAMENTO
E CONTROLE DA TEMPERATURA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador:

Prof. Dr. Ricardo Alan Verdú Ramos

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

P436e Pereira, Luís Alberto Schwind Pedroso Stussi da Silva.
Estudo, modelagem e caracterização de processos de biodigestão com monitoramento e controle da temperatura / Luís Alberto Schwind Pedroso Stussi da Silva Pereira. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2017
100 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Ciências Térmicas, 2017

Orientador: Ricardo Alan Verdú Ramos
Inclui bibliografia

1. Biodigestão. 2. Biogás. 3. Controle.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ESTUDO, MODELAGEM E CARACTERIZAÇÃO DE PROCESSOS DE BIODIGESTÃO COM MONITORAMENTO E CONTROLE DA TEMPERATURA

AUTOR: LUÍS ALBERTO SCHWIND PEDROSO STUSSI DA SILVA PEREIRA

ORIENTADOR: RICARDO ALAN VERDU RAMOS


Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA MECÂNICA, área: CIÊNCIAS TÉRMICAS pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. RICARDO ALAN VERDU RAMOS
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. EMANUEL ROCHA WOISKI
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



PROFESSOR TITULAR MAURO CONTI PEREIRA
Departamento de Engenharia Mecatrônica / UNIVERSIDADE CATOLICA DOM BOSCO

Ilha Solteira, 29 de abril de 2017

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Jane Schwind Pedroso Stussi (*in memoriam*) e a Luís Alberto da Silva Pereira.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu avô Jano Pedroso Stussi (*in memorian*), por despertar a curiosidade na ciência em mim; à minha mãe Jane (*in memorian*) por minha criação e incentivo; ao meu pai Luís, por me guiar e me apoiar; à minha irmã Verônica Schwind Pedroso Stussi da Silva Pereira, por sempre me ajudar; à minha namorada Bruna Viana Ito, por me confortar nos meus momentos de dor e mágoas; aos meus melhores amigos, por tornarem minha vida mais engraçada e divertida; aos meus colegas de república, por me ajudarem nos meus momentos de dificuldade e serem parceiros nos momentos de lazer; aos meus tios Ana Lúcia, Alda Luzia, Regina, José Manuel, Antônio Roberto e Jano Schwind Pedroso Stussi, por sempre me animarem e elevarem minha autoestima; aos meus primos Bruno, Jano Lima Stussi, Luciana e Jéssica, por serem companhias prazerosas nas horas vagas.

Gostaria de agradecer à UCDB de Campo Grade (MS), pelo meu berço científico e pelas experiências fantásticas de aprendizagem que me proporcionou; à UNESP, por proporcionar a complementação da minha formação em nível de pós-graduação na Área de Ciências Térmicas e ceder seus laboratórios para pesquisa; e, também, ao Prof. Dr. Ricardo Alan Verdú Ramos, pela orientação.

Por fim, gostaria de agradecer ao CNPq pela concessão de bolsa de iniciação científica na UCDB e de mestrado na UNESP.

PREÂMBULO

Esta dissertação foi desenvolvida no Laboratório do IPBEN (Instituto de Pesquisa em Bioenergia) e está inserido dentro da linha de pesquisa de “Energia e Sistemas Térmicos” do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS), sendo a sua estruturação apresentada a seguir.

No Capítulo 1 são mostrados o histórico e os conceitos básicos para o entendimento da biodigestão de forma progressiva em relação à complexidade, assim como os fundamentos dos métodos e ferramentas usadas para esta pesquisa.

No Capítulo 2 são discutidos os métodos para a análise e controle da biodigestão, é mostrado o dimensionamento da bancada experimental e, também, seus mecanismos de controle.

No Capítulo 3 são apresentados os resultados de cada tipo de teste realizado e feita a comparação com a respectiva simulação.

No Capítulo 4 são discutidos os resultados do trabalho, apontados os problemas encontrados e feitas sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, é apresentada uma lista de bibliografias utilizadas para o desenvolvimento do trabalho, bem como apêndices nos quais são apresentados os programas para aquisição de dados e os procedimentos e resultados das calibrações.

RESUMO

Ao longo do tempo o processo de biodigestão vem sendo usado para conversão de dejetos em biogás e esse processo vem evoluindo no sentido de otimizar o desempenho energético e a conversão dejetos/gás e gás/metano. A eficiência é proporcional à adaptação celular ao substrato, no entanto existem temperaturas que contribuem para que as células (bactérias) melhorem a eficiência. O objetivo deste trabalho é simplificar este sistema, encontrar as equações que o regem o processo, aplicando sinais básicos, observar o comportamento (a eficiência) e realizar a regressão da resposta do sistema. Foram feitas simulações do resultado e construído um biodigestor com sistema de controle para a comparação com a simulação. Os resultados foram muito próximos ao simulado e a proporção de metano no biogás aumentou com o aumento da temperatura até 51°C.

Palavras-Chaves: Biodigestão. Biogás. Controle.

ABSTRACT

Over time the biodigestion process came to be used to convert waste into energy and biogas, this process evolved through the necessity of viability and energetic optimization and conversion waste/gas and gas/methane. The efficiency is proportional to cell's adaption of the substrate, but there are temperatures that force cells to improve efficiency. The work's objective to simplify the system, finding the fundamental equations applying basic signals, observing the behavior (the efficiency) and doing regression of the system's response. It was done simulations of the results and a bioreactor was assembled with a control system to compare the results with the simulation. The results matched and the proportion of methane increased as the temperature rise, until 51°C.

Keywords: Biodigestion. Biogas. Control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Desenho de um biodigestor modelo indiano.....	18
Figura 2	- Desenho de um biodigestor modelo chinês.....	18
Figura 3	- Desenho esquemático de um biodigestor modelo canadense.....	19
Figura 4	- Desenho esquemático de um biodigestor CSTR.....	20
Figura 5	- Desenho esquemático de um biodigestor UASB.....	21
Figura 6	- Desenho esquemático de um biodigestor de contato.....	22
Figura 7	- Desenho esquemático de um biodigestor com filtro anaeróbio.....	23
Figura 8	- Desenho esquemático de um biodigestor de leito híbrido.....	23
Figura 9	- Esquema das etapas bioquímicas da fermentação anaeróbia.....	26
Figura 10	- Reação química da produção de monômeros.....	27
Figura 11	- Gráfico do modelo de crescimento bacteriano de Monod.....	35
Figura 12	- Diagrama clássico de um sistema de controle.....	38
Figura 13	- Desenho esquemático de um controlador PID.....	40
Figura 14	- Diferentes tipos de sinais.....	41
Figura 15	- Diagrama geral de um sistema de controle digital.....	42
Figura 16	- Modelo em Simulink do transdutor NTC103.....	43
Figura 17	- Modelo em Simulink da resposta do sensor NTC103.....	44
Figura 18	- Esquemático do divisor de tensão.....	45
Figura 19	- Modelo do divisor de tensão.....	45
Figura 20	- Desenho esquemático da Ponte de Wheatstone.....	46
Figura 21	- Modelo do processamento da informação recebida pelo computador do ADC.....	46
Figura 22	- Modelo da aquisição de dados da temperatura.....	47
Figura 23	- Resultado da simulação em Simulink do sistema da Figura 22.....	47
Figura 24	- Modelo térmico do tambor, feito no <i>software</i> Simulink.....	49
Figura 25	- Modelo térmico do aquecedor.....	50
Figura 26	- Modelo de controle térmico do biodigestor.....	50
Figura 27	- Esquema do sistema de biodigestão construído.....	51
Figura 28	- Biodigestor revestido com manta térmica de EVA.....	51
Figura 29	- Placa de controle e aquisição de dados.....	52
Figura 30	- Morfologia do tanque de fermentação do biodigestor maior.....	53
Figura 31	- Dimensões do tanque do biodigestor maior.....	53
Figura 32	- Aquecedor e bomba do trocador de calor.....	54
Figura 33	- Biodigestor montado.....	54
Figura 34	- Filtro de gases não reativos.....	55
Figura 35	- Diagrama esquemático do filtro de gás na saída do biodigestor.....	55

Figura 36 - Placa com ponte de Wheatstone.....	56
Figura 37 - Fotografia do encapsulamento de proteção do sensor de temperatura. .	56
Figura 38 - Diagrama esquemático do sensor de temperatura com proteção de cobre.....	57
Figura 39 - Circuito do condicionador de sinal analógico.....	57
Figura 40 - Esquema do circuito de condicionamento de sinal.	58
Figura 41 - Placa de aquisição de dados.....	58
Figura 42 - Esquema da placa de aquisição de dados.	59
Figura 43 - Esquema do circuito de condicionamento e aquisição dos sinais dos sensores.	60
Figura 44 - Placa de comunicação.	60
Figura 45 - Esquema do circuito de comunicação.	61
Figura 46 - Esquema do circuito de sincronização da rede AC.	61
Figura 47 - Placa de protótipo do sistema de aquisição e controle.....	62
Figura 48 - Placa de controle.	63
Figura 49 - Resultados térmicos para tanque estéril (sem substrato).	65
Figura 50 - Resultados térmicos para tanque com substrato.....	65
Figura 51 - Resultado da aquisição versus simulação da temperatura de uma entrada degrau, 467 W e bombeamento no fluido no sistema.....	66
Figura 52 - Regressão do sinal de descarga do sistema com ajuste de curva para o modelo da capacitância térmica.	67
Figura 53 - Resultados do teste de acionamento de acionamento de longa duração aplicando 20% da potência máxima do sistema.	68
Figura 54 - Análise de perda térmica do sistema para uma diferença média de temperatura de 5,62°C entre o fluido de aquecimento e o ambiente.	69
Figura 55 - Análise de transferência térmica entre os fluidos do sistema repetindo o procedimento usado para a análise feita na Figura 52.	70
Figura 56 - Análise da transferência térmica entre os dois sistemas durante o teste de acionamento com 20% da potência máxima.....	71
Figura 57 - Análise de estabilização entre as temperaturas comparando a potência dissipada entre os dois meios.....	72
Figura 58 - Modelo em MatLab do teste feito para regressão.....	73
Figura 59 - Resultado da simulação baseada no teste de aquecimento do sistema aplicando 20% da potência máxima.....	74
Figura 60 - Simulação do teste feito no sistema com aquecimento usando 20% da potência total, apresentando a diferença de temperaturas.....	75
Figura 61 - Modelo do sistema de controle analógico e somente proporcional em malha fechada do sistema.....	75

Figura 62 - Resultado da simulação da malha de controle com ganho 10 partindo da condição inicial de 27°C.	76
Figura 63 - Modelo do sistema de controle com controlador PID analógico.	77
Figura 64 - Resposta do controlador proporcional com ganho de 10,4 nas temperaturas dos dois fluidos.....	77
Figura 65 - Resposta do controlador PID de temperatura com ganhos de 10,4; 0,2 e 12,1, respectivamente.	78
Figura 66 - Primeiro teste da vazão de biogás sem a agitação e sem o aquecimento, fase pré-metanogênese.	79
Figura 67 - Segundo teste de vazão de biogás, mantendo as mesmas condições do primeiro teste.	79
Figura 68 - Vazão do biogás gerado com agitação e sem aquecimento, mostrando tendência de diminuição da produção de biogás com o tempo.	80
Figura 69 - Aumento da proporção de metano com o tempo, facilitado pela agitação, sem aquecimento.....	80
Figura 70 - Aquecimento do substrato em rampa e estabilizador da temperatura pós-aquecimento.....	81
Figura 71 - Primeiro teste com sinal degrau e espera até a estabilização.	82
Figura 72 - Segundo teste com degrau com amplitude menor que o primeiro teste.	82
Figura 73 - Vazão de biogás com substrato aquecido e estabilizado.	83
Figura 74 - Proporção de metano após a estabilização da vazão de biogás, com o substrato aquecido a 51°C e com agitação constante.	83
Figura 75 - Regressão e curva de calibração do sensor de terminal preto.	89
Figura 76 - Gráfico da linearização por ponte de Wheatstone do sensor de terminal preto.	89
Figura 77 - Regressão e curva de calibração do sensor de terminal branco.	90
Figura 78 - Gráfico da linearização por ponte de Wheatstone do sensor de terminal branco.	97
Figura 79 - Regressão e curva de calibração do sensor de terminal amarelo.....	98
Figura 80 - Gráfico da linearização por ponte de Wheatstone do sensor de terminal amarelo.	98
Figura 81 - Regressão e curva de calibração do sensor de terminal vermelho.....	99
Figura 82: Gráfico da linearização por ponte de Wheatstone do sensor de terminal vermelho.	99
Figura 83 - Curva de calibração do sensor de gás metano MQ-4, utilizando placa de condicionamento de sinal para faixa de 100-10000 ppm.	100

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno;
AC	Corrente Alternada;
AD	Analógico/Digital;
COM-Serial	Comunicação serial;
CSTR	<i>Continuous Stirred Tank Reactors;</i>
DA	Digital/Analógico;
PID	Proporcional Integral Derivativo;
PWM	<i>Pulse Width Modulation;</i>
PVC	<i>Polyvinylchloride;</i>
UART	<i>Universal asynchronous receiver/transmitter;</i>
UASB	<i>Upward-flow Anaerobic Sludge Blanket;</i>
USB	<i>Universal Serial Bus;</i>
TRIACS	<i>Triode for Alternated Current;</i>
TTL	<i>Transistor-Transistor Logic.</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Raio da partícula hidratada (m);
A	Área total da membrana que separa o gradiente (m);
A_s	Área superficial do volume de controle (m ²);
B	Constante beta definida pelo fabricante (°C);
c	Calor específico do meio (J/kg.K);
C	Concentração (mol/m ³);
D	Coeficiente de difusão no meio (m ² /s);
D_m	Coeficiente de difusão membrana (m ² /s);
<i>Feedback</i>	Retroalimentação (adimensional);
g	Tempo necessário para formação de uma nova geração de células (dia);
G	Ganho (adimensional);
h	Resistência térmica do sistema (K.m/W);
h_{ar}	Coeficiente de convecção do ar (W/m ² .K);
h_{subs}	Coeficiente de convecção do fluido no interior do biodigestor (W/m ² .K);
$H_{(s)}$	Planta (adimensional);
J	Velocidade de difusão no meio (mol/m ² .s);
K	Constante de Boltzmann (J/K);
K_1	Ganho proporcional (adimensional);
K_2	Ganho integral (adimensional);
K_3	Ganho derivativo (adimensional);
k_{iso}	Coeficiente de condução da camada de isolamento térmico do tambor (W/m.K);
k_{poli}	Coeficiente de condução da parede do tambor (W/m.K);
k_s	Concentração de semisaturação (mol/m ³);
L	Comprimento do tambor, juntamente com a camada isolante (m);
n_0	Número inicial de bactérias (adimensional);
n_{max}	Número final de bactérias na saturação do meio (adimensional);
N	Número de moléculas por unidade de volume (mol/m ³);
N_0	Número inicial de células (adimensional);
N_f	Número final de células (adimensional);
q_{perda}	Fluxo de calor que sai do sistema (W);
r_e	Raio externo do tambor, sem a camada isolante (m);

r_i	Raio interno do tambor (m);
r_{iso}	Raio da camada externa de isolamento do tambor (m);
R	Resistência atual (ohm);
R_0	Resistência original definida pelo fabricante (ohm);
R_d	Valor do resistor de comparação do divisor de tensão (ohm);
R_s	Valor da resistência do sensor (ohm);
s	Concentração de nutrientes (mol/m ³);
t	Tempo decorrido (s);
t_r	Tempo de resposta (s);
T	Temperatura atual (s);
T_0	Temperatura original definida pelo fabricante (°C);
T_i	Temperatura inicial do sistema (°C);
T_e	Temperatura do estímulo (°C);
$T_{externo}$	Temperatura exterior do sistema (°C);
$T_{interno}$	Temperatura interna do tambor (°C);
T_∞	Temperatura externa ao sistema (°C);
V	Volume do meio (m ³);
V_{ADC}	Tensão em cima do R_s que será enviada ao ADC (V);
V_{fs}	Tensão <i>full scale</i> do ADC (V);
Z	Distância difundida (m);
λ	Tempo de início da multiplicação exponencial (s);
η	Viscosidade (Pa.s);
μ	Taxa de crescimento (adimensional);
μ_{max}	Taxa de crescimento máxima da cultura de bactérias (adimensional);
ρ	Massa específica do meio (kg/m ³).

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	HISTÓRIA DOS BIODIGESTORES	16
1.2	TIPOS DE BIODIGESTORES	17
1.2.1	Biodigestor Indiano	17
1.2.2	Biodigestor Chinês	18
1.2.3	Biodigestor Canadense	19
1.2.4	Biodigestor de Tanque com Agitação Contínua (CSTR)	19
1.2.5	Biodigestor com Manta de Lodo Anaeróbio de Fluxo Ascendente (UASB)	20
1.2.6	Biodigestor de Contato	21
1.2.7	Biodigestor com Filtro Anaeróbico	22
1.2.8	Biodigestor de Leito Híbrido	23
1.2.9	Comparação entre os tipos de biodigestores	23
1.3	PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DE BIODIGESTORES	24
1.3.1	Princípios bioquímicos da fermentação bacteriana	25
1.3.1.1	<i>Hidrólise</i>	26
1.3.1.2	<i>Acidogênese, acetogênese e metanogênese</i>	27
1.3.2	Parâmetros de eficiência e estabilidade da biodigestão	28
1.4	PROPRIEDADES DO BIOGÁS	28
1.4.1	Propriedades do biogás	28
1.4.1.1	<i>Poder calorífico da mistura</i>	29
1.4.1.2	<i>Ponto de orvalho</i>	29
1.4.1.3	<i>Quantidade de fluidos corrosivos</i>	29
1.4.1.4	<i>Quantidade de gases inertes</i>	30
1.4.1.5	<i>Quantidade de gases combustíveis</i>	30
1.4.2	Meios para a manipulação das propriedades do biogás	30
1.4.2.1	<i>Manipulação das propriedades por meios térmicos</i>	30
1.4.2.2	<i>Manipulação das propriedades por meios bioquímicos</i>	31
1.5	MODELOS RELACIONADOS À BIODIGESTÃO	31
1.5.1	Introdução à Difusão Membranar de Fick & Stokes-Einstein	32
1.5.2	Introdução à Dinâmica de Crescimento Celular de Monod	34
1.5.3	Modelo do Sensor Térmico de Coeficiente Negativo (Steinhart)	36
1.5.4	Modelo da Capacitância Térmica	36

1.6	SISTEMAS DE INTERFACE E MÉTODOS DE AQUISIÇÃO DE DADOS	37
1.7	SISTEMA DE CONTROLE.....	38
1.7.1	Controle liga/desliga	39
1.7.2	Controlador proporcional integral derivativo.....	39
1.7.3	Domínio da frequência.....	40
1.7.4	Controle discreto.....	41
2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
2.1	MODELAMENTOS	43
2.1.1	Modelamento dos sensores de temperatura	43
2.1.2	Modelamento do Sistema de Aquisição de Dados (ADC, Divisor de Tensão & Processamento).....	44
2.1.3	Modelamento da Temperatura no Interior do Tambor	48
2.1.4	Modelamento da Temperatura no Sistema de Aquecimento	49
2.1.5	Modelamento do Controle Térmico.....	50
2.2	DESENHO E CONSTRUÇÃO DO BIODIGESTOR	50
2.2.1	Modelo menor	51
2.2.2	Modelo maior.....	52
2.3	PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO	63
2.3.1	Sinal de entrada em rampa.....	63
2.3.2	Sinal de entrada em degrau	64
3	RESULTADOS.....	65
4	CONCLUSÕES	84
4.1	CONCLUSÕES ACERCA DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA	84
4.2	CONCLUSÕES ACERCA DO BIOGÁS	84
4.3	CONCLUSÕES SOBRE AS VARIAÇÕES BRUSCAS NA PRODUÇÃO DE GÁS.....	84
4.4	CONCLUSÕES SOBRE A GERAÇÃO DE CALOR DENTRO DO SUBSTRATO	85
	REFERÊNCIAS.....	92
	APÊNDICE A - <i>FIRMWARE</i> DO CONTROLADOR PID	94
	APÊNDICE B - REGRESSÃO, CURVAS DE CALIBRAÇÃO E LINEARIZAÇÃO.....	101

1 INTRODUÇÃO

A Biodigestão é uma forma eficiente de degradação de dejetos orgânicos, transformando-os em produtos de potencial econômico, que pode agregar valor ao processo produtivo na forma de créditos de carbono (BALMANT, 2009).

Segundo Balmant (2009), em ambiente controlado os gases liberados por dejetos têm maior potencial combustível com o aumento da proporção de metano. Quando a biodigestão é feita de forma controlada seus produtos podem servir de combustível, aumentar a qualidade do biofertilizante produzido. Para que isso seja viável é necessário um biodigestor ou um biorreator.

Porém, escolhas malfeitas ou mal planejadas podem reduzir drasticamente a eficiência do biodigestor. Por se tratar de um processo executado por micro-organismos, este se torna muito susceptível a variações bruscas de temperatura, pH e concentração de nutrientes no processo (BORBA; SOUZA; SCHAEFFER, 2012).

Por meio de estudos preliminares, é possível perceber que quanto maior a detalhamento do modelo e o controle sobre o processo de biodigestão maior é o rendimento, menor é o tempo de biodigestão e melhor a conversão de biomassa em metano. No entanto, a maioria dos modelos tem aplicações muito restritas, limitando a controlabilidade para estes processos, acabando por comprometer o desempenho da biodigestão. As limitações dos modelos serão tratadas no capítulo de modelamento matemático.

O objetivo deste trabalho é a construção de uma bancada genérica para biodigestão e o teste do modelo matemático, utilizando esterco como substrato, e adquirindo os dados de maneira automática. Para tanto, é necessário dimensionar uma malha de controle para funcionar de modo autônomo e calibrar todos os sensores seguindo protocolos sugeridos pelos fabricantes. Para criar um modelo de observador para futuro controle deve ser utilizada uma placa para aquisição dos dados de interesse em bancada experimental, tendo sido construídas duas bancadas com esta finalidade, uma de 10 e outra de 80 litros.

1.1 HISTÓRIA DOS BIODIGESTORES

Uma análise histórica se faz pertinente, para o entendimento da evolução dos processos de biodigestão.

Por ordem cronológica e de simplicidade, o primeiro modelo de biodigestor foi inventado na Índia em 1857, sendo o primeiro dispositivo construído para o aproveitamento da matéria orgânica para produção de gás metano por meio de fermentação anaeróbia. Sua confecção foi feita com o objetivo de suprir parte da demanda energética da Índia, atendendo inicialmente à um hospital de hansenianos (BALMANT, 2009). Porém, o conhecimento sobre o processo de biodigestão e utilização é datado desde épocas mais remotas. Vale destacar que, atualmente o modelo indiano é um dos mais difundidos no mundo.

O segundo modelo de biodigestor desenvolvido foi o Chinês, sendo utilizado não para a finalidade de suprir uma fonte deficitária de energia, como é o caso do modelo indiano, mas sim para suprir a demanda alimentícia, produzindo biofertilizante e estocando combustível, no caso de um eventual ataque a China, uma vez que foram construídos durante o período da Guerra Fria.

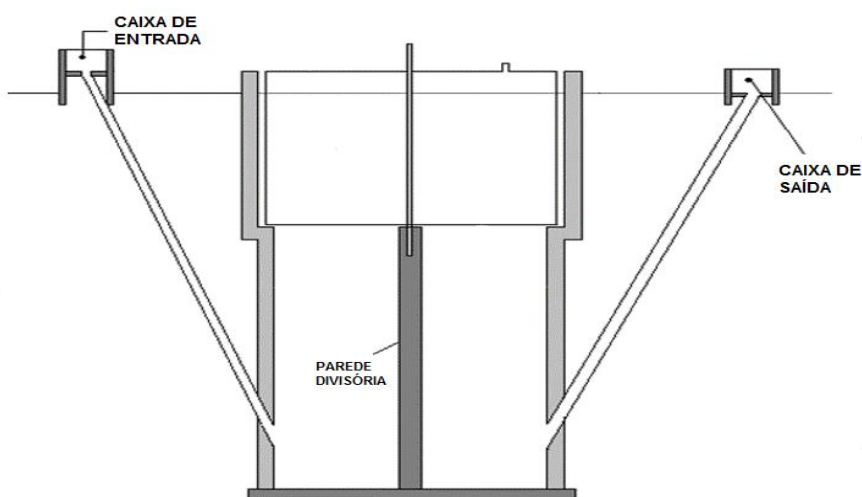
Outro parâmetro que contribui para a difusão dos biodigestores nestes dois países é a simplicidade tanto de construção quanto de operação. A seguir serão detalhados cada um destes tipos de biodigestores precursores como, também, outros que vieram na sequência.

1.2 TIPOS DE BIODIGESTORES

1.2.1 Biodigestor Indiano

Este modelo, mostrado na Figura 1, possui um gasômetro anexado à câmara de digestão, sendo um embolo móvel, que permite que a pressão dentro do biodigestor seja constante, podendo ainda, armazenar gás para uso posterior.

Figura 1 - Desenho de um biodigestor modelo indiano.

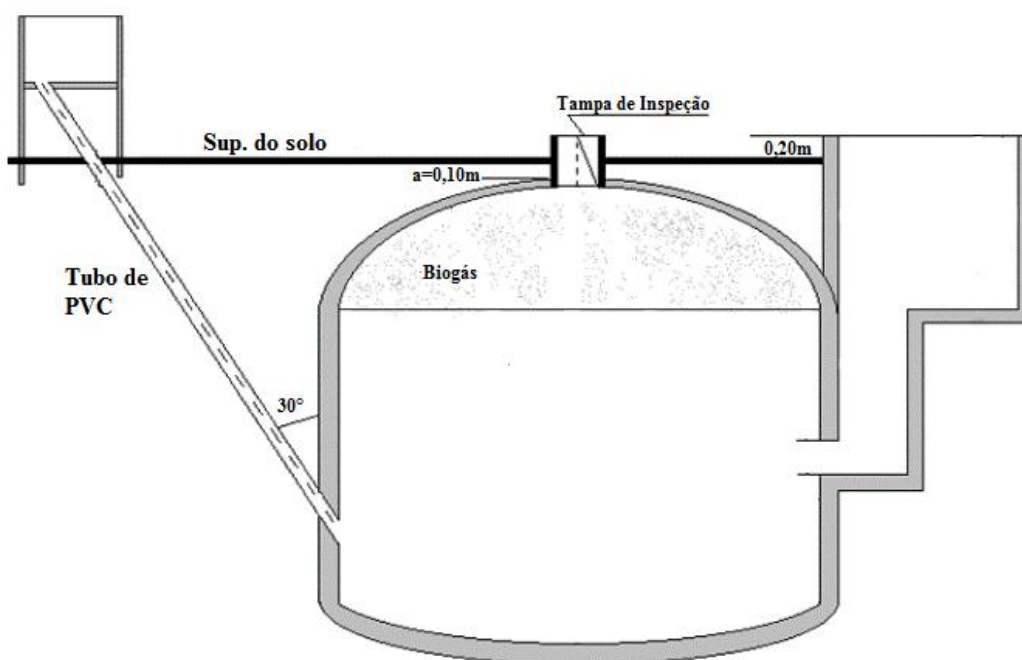


Fonte: Adaptado de Deganutti et al. (2002).

1.2.2 Biodigestor Chinês

Por eliminar o uso do gasômetro por embolo, este modelo, mostrado na Figura 2, diminui a complexidade da montagem, comprime o biogás e acaba com a necessidade do consumo constante do gás. Neste biodigestor, o gás é acumulado por pressão, sendo o inverso do modelo indiano, no qual o gás é armazenado alterando o volume do gasômetro.

Figura 2 - Desenho de um biodigestor modelo chinês.

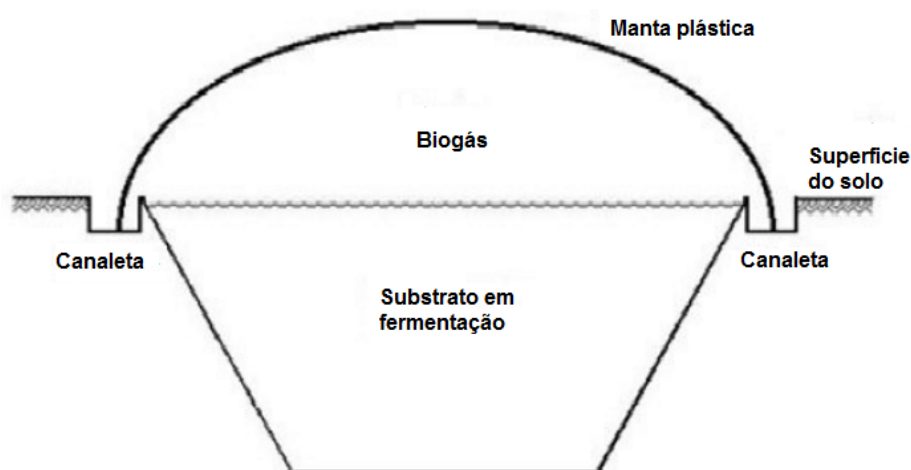


Fonte: Adaptado de Deganutti et al. (2002).

1.2.3 Biodigestor Canadense

O modelo canadense, mostrado na Figura 3, é um digestor de manta em fluxo tubular (lona), sendo o mais utilizado no Brasil. Ele é mais simples que os modelos Indiano e Chinês, utiliza parte do aquecimento solar como agente catalizador para o processo (aumentando a velocidade de fermentação) e armazena grandes quantidades de gás, pois sua manta é elástica (BALMANT, 2009).

Figura 3 - Desenho esquemático de um biodigestor modelo canadense.



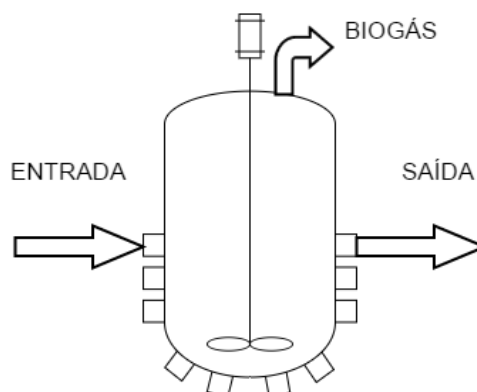
Fonte: Adaptado de Cervi, Esperancini e Bueno (2010).

1.2.4 Biodigestor de Tanque com Agitação Contínua (CSTR)

Esse tipo de biodigestor, também conhecido como CSTR (*Continuous Stirred Tank Reactors*), é capaz de processar com rapidez e desempenho dejetos de suínos, avícolas, bovinos, dentre outros. Sua capacidade de conversão de biomassa em metano é maior que os dos biodigestores tradicionais, porém, é de complexa confecção (BORTOLI; KUNZ; SOARES, 2009).

Na Figura 4 este modelo é apresentado este modelo de biodigestor, sendo possível notar que o agitador aparece na câmara de fermentação.

Figura 4 - Desenho esquemático de um biodigestor CSTR.



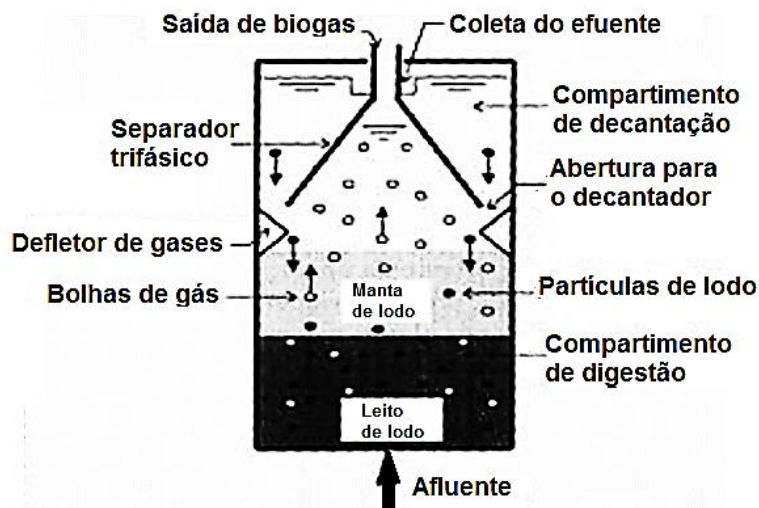
Fonte: Elaboração própria.

O maior problema deste modelo é o tempo necessário para que as bactérias em seu interior possam se multiplicar e se fixar no substrato novo (BALMANT, 2009) e o consumo da matéria prima que demora em torno de 47 dias na faixa mesofílica (entre 20 e 45 °C), segundo Konrad et al. (2014), ou 15 dias na termofílica (45 e 70 °C), segundo Boe e Angelidaki, (2009).

1.2.5 Biodigestor com Manta de Lodo Anaeróbico de Fluxo Ascendente (UASB)

Esse tipo de biodigestor, também conhecido como UASB (*Upward-flow Anaerobic Sludge Blanket*), é um biodigestor de fluxo contínuo baseado em agitação no sentido ascendente da corrente de dejetos. Ele tem uma capacidade de conversão de biomassa em metano notavelmente alta (BORTOLI; KUNZ; SOARES, 2009), superando os modelos tradicionais (BALMANT, 2009), e seu tempo de consumo da matéria-prima com 92% de redução de DQO (Demanda Química de Oxigênio para a neutralização da matéria na atmosfera) é da ordem de 4 dias (CHELLIAPAN; WILBY; SALLIS, 2011). A Figura 5 esquematiza o funcionamento deste tipo de biodigestor.

Figura 5 - Desenho esquemático de um biodigestor UASB.



Fonte: Adaptado de Balmant (2009).

A rapidez do processo no biodigestor UASB torna sua utilização viável nos casos de grandes vazões de resíduo, como em centrais de tratamento de águas e grandes indústrias de alimentos (BALMANT, 2009).

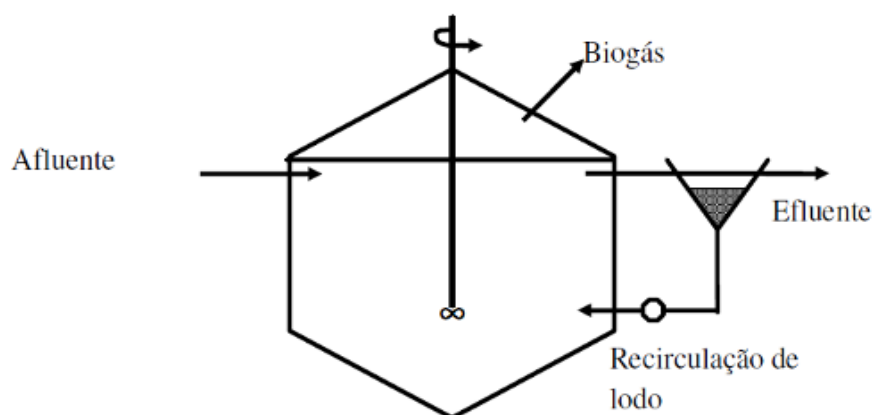
No seu processo, as bactérias formam grânulos densos que precipitam no fundo da câmara de fermentação, impedindo que saiam com o fluxo (BALMANT, 2009).

Isto elimina etapas do ciclo de reprodução bacteriana (após sua estabilização), por manter as quantidades de bactérias como consequência a velocidade do processo aumenta, no entanto seu período transiente (criação dos grânulos) é lento.

1.2.6 Biodigestor de Contato

Este biodigestor, mostrado na Figura 6, é semelhante ao CSTR em sua confecção, mas utiliza seu lodo resultante como realimentação, permitindo que as bactérias completem seu ciclo metabólico de conversão de energia e tornando o processo contínuo, mantendo seu funcionamento mais constante que o CSTR durante todo o processo de biodigestão (BALMANT, 2009).

Figura 6 - Desenho esquemático de um biodigestor de contato.



Fonte: Balmant (2009).

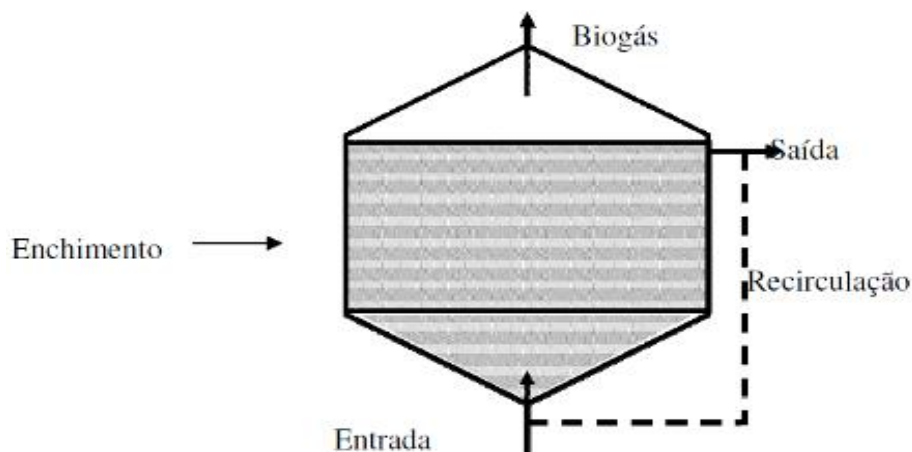
1.2.7 Biodigestor com Filtro Anaeróbico

É um dos biodigestores que se utiliza de arcabouço biológico (material poroso que consegue fixar bactérias no seu interior, permitindo o fluxo de nutrientes para dentro e de resíduos para fora) para fixar as bactérias e, desta maneira, evitar que o lodo seja descartado da câmara de fermentação juntamente com as bactérias responsáveis pelo processo (BALMANT, 2009).

O arcabouço biológico também ajuda o aumento do número de células, pois é possível dopá-lo com substâncias anabólicas para a cultura de células alvo. Desta maneira, o processo reprodutivo das mesmas torna-se mais rápido e, conseqüentemente, os ciclos de digestão ficam mais curtos (BALMANT, 2009).

Na Figura 7 é possível verificar o esquema de funcionamento deste biodigestor, com os arcabouços biológicos representados em cinza. Esses arcabouços são feitos de camadas de polímero de alta porosidade, permitindo que o substrato se desloque facilmente para dentro do sítio de ação catalisadora das células.

Figura 7 - Desenho esquemático de um biodigestor com filtro anaeróbio.



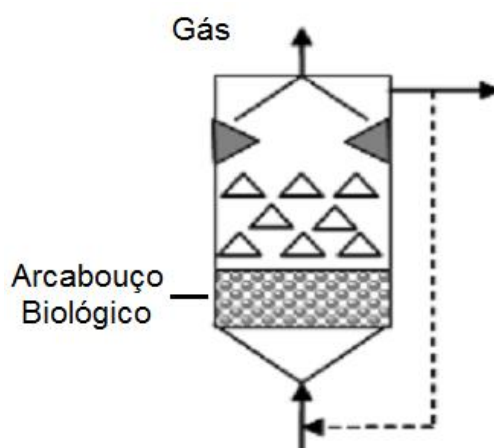
Fonte: Balmant (2009).

1.2.8 Biodigestor de Leito Híbrido

Este tipo de biodigestor une os dois processos de maior taxa de conversão metano/biomassa (o Filtro Anaeróbio e o UASB), e com tempo de retenção hidráulica ainda menor (volume de biomassa/tempo), pois, além da formação dos grânulos de bactérias, ele também é munido de uma camada de arcabouço biológico de polímero que fixa as células, podendo aumentar a população das mesmas rapidamente e tornar o processo menos susceptível a variações de metabolismo celular (BALMANT, 2009).

Na Figura 8 um desenho esquemático de um biodigestor de leito híbrido é apresentado.

Figura 8 - Desenho esquemático de um biodigestor de leito híbrido.



Fonte: Adaptado de Balmant (2009).

1.2.9 Comparação entre os tipos de biodigestores

As principais diferenças entre os biodigestores estão no tipo de entrada do substrato, que podem ser de batelada, fluxo contínuo, ou uma mistura dos dois tipos. Eles podem também ser classificados em tubular, tambor, garrafa ou tanque. E, por fim, podem ser com aquecimento ou sem aquecimento (BORBA; SOUZA; SCHAEFFER, 2012).

O tempo de retenção hidráulica (tempo que a biomassa demora para ser processada dentro do biodigestor) é um fator muito importante para determinar o volume a ser tratado. Processos muito demorados tendem converter mais metano e reduzir mais DQO que os processos mais rápidos, mas é possível obter resultados satisfatórios mesmo com os processos mais rápidos, tudo depende da finalidade e da concepção do biodigestor.

Existem, também, caracterizações de biodigestores por quantidades e tipos de fases, como, por exemplo, biodigestores com ou sem hidrólise separada, pois no caso da digestão de óleos e lipídios é necessário o tratamento anterior com enzimas do tipo lipases. Porém, como esse processo pode ou não ser um pré-requisito para o tratamento deste tipo de substrato, esta caracterização é bastante controversa (DORS, 2006).

A seguir serão explicados os princípios bioquímicos da fermentação bacteriana e a importância de cada fase da digestão.

1.3 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DE BIODIGESTORES

O biodigestor funciona como uma enorme câmara de fermentação, que cria condições próximas das condições ideais de trabalho das células na função de digestão anaeróbia (DORS, 2006).

Estas bactérias que estão contidas neste equipamento, em sua maioria *Acetobacterium* e *Eubacterium*, em condições de ausência de oxigênio, têm a capacidade de produzir gás metano e participam de todos os estágios da fermentação (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2014).

O substrato, a princípio, fica em um compartimento separado, tão concentrado que sua molaridade não permite que as bactérias se proliferem abundantemente, podendo ser armazenado tempo suficiente sem alteração da DQO, até ser hidratado.

A seguir, o substrato é hidratado, a ponto de criar a condição de pH neutro, molaridade e difusão, propiciando a proliferação das células, sendo depois adicionado

a câmara de fermentação como substrato para as culturas de células previamente contidas na câmara e no próprio substrato.

Após a hidratação, as células começam a entrar na fase de adaptação ao novo tipo de substrato. Nessa fase todo o seu mecanismo fisiológico passa funcionar com a molaridade, pH e concentração de água presentes no substrato e, após a seleção natural das células mais propícias àquele novo ambiente, estas começam a melhorar a eficiência até chegar ao ponto que conseguem metabolizar com bastante rapidez sua matriz extracelular.

A cultura de células começa, então, a se reproduzir dentro da câmara de fermentação e, paralelamente, começa a consumir o substrato e transformá-lo em monômeros (carboidratos, proteínas e lipídios). O nome deste processo é hidrólise, e será descrito mais adiante.

A seguir as células se utilizam destes monômeros que contém energia na forma química, para a produção de ácidos graxos e hidrogênio, na fase chamada de acidogênese. É necessária muita atenção a esta característica das células, pois um excesso de substrato bruto pode acentuar a produção destes ácidos e, conseqüentemente, aumentar o pH, o que é letal para as células (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2014).

1.3.1 Princípios bioquímicos da fermentação bacteriana

Em geral, um organismo multicelular consegue produzir Adenosina Trifosfato (ATP), que é o tipo mais simples de energia da célula, tanto por vias aeróbicas (presença de Oxigênio) quanto anaeróbicas (sem presença de Oxigênio), não diferindo no caso da fermentação (unicelular com células procariontes), que pode ser tanto aeróbica quanto anaeróbica (COX; NELSON, 2014).

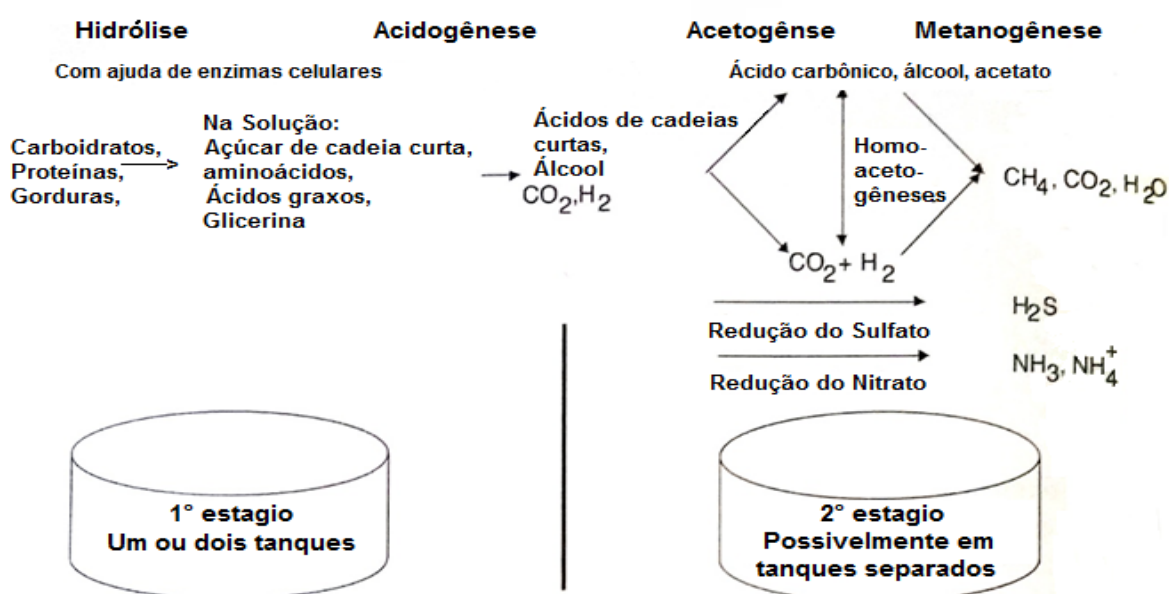
No metabolismo anaeróbico, a célula converte glicose em ATP para suas atividades fisiológicas de modo menos eficiente (menor quantidade de energia e maior quantidade de resíduo metabólico) que no metabolismo aeróbico, logo o produto excretado no primeiro tem maior potencial energético em relação ao segundo e isso se expressa, principalmente, pela diferença das vias metabólicas. No caso aeróbio, o oxigênio auxilia a quebra do glicogênio produzindo ATP para a célula; o processo é mais lento, porém é possível o aproveitamento de todo o glicogênio pela célula, sendo liberado, no final, gás carbônico. Já no caso anaeróbio, o resultado da lise (quebra) de glicogênio ocorre por outros agentes oxidantes, resultando em um processo diferente

de produção de ATP que leva, em maior proporção, à metanogênese, sendo seu produto final o metano (COX; NELSON, 2014).

Uma das maneiras de induzir a fermentação anaeróbica é o armazenamento da cultura de bactérias em um ambiente separado do oxigênio, forçando as células anaeróbicas a produzirem seus substratos sem oxigênio. Esta técnica é amplamente utilizada na indústria para produção de álcool e ácido lático, dentre outros. Todavia, se o meio e as condições térmicas não forem propícios, as células podem reduzir ou alterar seu metabolismo, entrar em estado de latência, e até mesmo morrer (COX; NELSON, 2014).

Segundo Deublein e Steinhauser (2008) existem quatro etapas conhecidas da fermentação anaeróbia responsáveis por transformar a matéria orgânica, a saber: a hidrólise, a acidogênese, a acetogênese e a metanogênese (ou metanização), as quais podem ser vistas na Figura 9, sendo que detalhes das mesmas são dados na sequência.

Figura 9 - Esquema das etapas bioquímicas da fermentação anaeróbia.



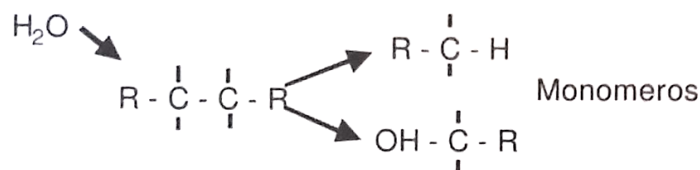
Fonte: Adaptado de Deublein; Steinhauser (2008).

1.3.1.1 Hidrólise

É o processo que separa os polímeros em monômeros, como é o caso dos carboidratos em glicose, e as proteínas em aminoácidos, pela ação de enzimas hidrolases produzidas obrigatoriamente por bactérias anaeróbicas, sendo necessária a

presença de água. A reação é mostrada na Figura 10 (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008).

Figura 10 - Reação química da produção de monômeros.



Fonte: Adaptado de Deublein e Steinhauer (2008).

Alguns biodigestores necessitam de uma fase de hidrólise separada das etapas padrões de biodigestão, pois alguns substratos, como restos de cortes de carnes de avícolas, suínos e bovinos, são processados mais lentamente pelas culturas de bactérias padrões (ORRICO JUNIOR; ORRICO; LUCAS JUNIOR, 2010A).

Em geral, esta fase é executada por enzimas comerciais que fazem com que haja a separação dos monômeros mais rapidamente que as enzimas bacterianas produzidas pelas mesmas no processamento anaeróbio do substrato (DORS, 2006).

A fabricação de enzimas pode ser de origem animal, química ou bacteriana, sendo essa última a maior, representando quase a totalidade das enzimas comerciais, também chamadas de biocatalizadores (DORS, 2006).

As enzimas se dividem em seis grupos, a saber: Oxidorredutases, Transferases, Hidrolases, Liases, Isomerases e Ligases. Sendo que, dentro das Hidrolases, destacam-se as Lipases, que são enzimas muito importantes para a clivagem das moléculas de gordura e graxa.

1.3.1.2 *Acidogênese, acetogênese e metanogênese*

Na acidogênese os monômeros se transformam em ácidos orgânicos de cadeia curta (ácido butírico, acetílico e acético), álcoois, hidrogênio e dióxido de carbono, contribuindo para a diminuição do pH do sistema (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008).

A acetogênese transforma os ácidos graxos em amônia, dióxido de carbono e óxidos sulfurados, ajudando a controlar e até neutralizar o pH do sistema. Esta fase é paralela à metanogênese, de forma que quanto mais o sistema tender para esta fase, menor será a produção de metano e maior será a produção de dióxido de carbono (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008).

Na metanogênese é produzido o metano, porém nessa etapa também se produz dióxido de carbono como produto da degradação do substrato com a presença de resquícios de oxigênio (BALMANT, 2009). No entanto, quanto maior a presença de hidrogênio nesta fase, menor será a geração de dióxido de carbono e maior será a produção de metano e água (VILLEN et al., 2001).

1.3.2 Parâmetros de eficiência e estabilidade da biodigestão

Os tipos das células variam com a composição do substrato, pois as células só podem aumentar seu número em condições básicas de suporte da matriz extracelular para a célula. Neste ponto, apenas as células que degradam o substrato contido no biodigestor têm condições para procriar (ORRICO JUNIOR; ORRICO; LUCAS JUNIOR, 2010b).

Outros fatores de eficiência e estabilidade são a pressão parcial do hidrogênio, a concentração de microrganismos, a superfície específica de material, a desintegração, o cultivo, a agitação, a retenção hidráulica, a luz, a temperatura, o pH, o potencial redox, os nutrientes (Carbono/Nitrogênio/Fósforo), os precipitantes e a remoção de biogás (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008). No entanto, os mais importantes para a estabilidade do processo são o pH, a concentração de microrganismos e a temperatura.

Mesmo com a máxima conversão de biomassa em metano, algumas propriedades do biogás precisam ser observadas, pois da maneira que o biogás é produzido não é possível comercializá-lo, nem usar em qualquer motor, pois ele precisa ser acondicionado. No tópico a seguir serão mostradas quais são as propriedades e como é possível condicionar o biogás.

1.4 PROPRIEDADES DO BIOGÁS

Os componentes principais e, conseqüentemente, os que influenciam o poder calorífico do biogás são o metano e o dióxido de carbono. Quanto maior for a conversão em metano melhor será a qualidade do biogás.

1.4.1 Propriedades do biogás

Para o entendimento da influencia das variáveis dos gases é necessário o

entendimento das propriedades do biogás, os quais são mostrados nos tópicos a seguir.

1.4.1.1 Poder calorífico da mistura

O poder calorífico da mistura é diretamente proporcional a quantidade de gás metano contido nela. Ou seja, quanto maior for a quantidade de metano maior será o poder calorífico da mistura. Como exemplo, reduzindo-se a quantidade de dióxido de carbono de 33% para 15%, numa mistura com gás metano, ocorre um aumento de 57% no poder calorífico da mistura (SOUZA et al., 2006).

Em uma conversão eficiente do biogás pode ter um poder calorífico parecido com o metano, que é de $9,9 \text{ kWh/m}^3$, porém, em condições mesofílicas, ele oscila entre $4,95$ e $7,9 \text{ kWh/m}^3$, sendo seu poder calorífico médio de $5,5 \text{ kWh/m}^3$ (JUNQUEIRA, 2014).

1.4.1.2 Ponto de orvalho

O ponto de orvalho é uma associação entre a temperatura e a pressão na qual a umidade do biogás começa a condensar, em outras palavras é o ponto em que ocorre a mudança de fase do vapor para água dentro da mistura do biogás. A determinação deste ponto tem especial importância para o transporte do biogás, pois seu precipitado pode ocasionar a formação de hidratos e causar entupimentos nos dutos (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008).

O conhecimento do ponto de orvalho é essencial para a determinação da pressão e da temperatura de trabalho da linha de biogás, evitando, assim, acidentes, paradas de máquinas, danos a equipamentos subjacentes, maior consumo de energia, redução da capacidade da linha e perda de pressão (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008).

1.4.1.3 Quantidade de fluidos corrosivos

Apesar das quantidades pequenas de hidrogênio e sulfeto de hidrogênio, a mistura resultante do biogás é corrosiva e pode danificar equipamentos e a própria estrutura do biodigestor. Por essa razão, existem vários processos de filtragem e tratamento pelos quais o biogás deve passar antes que possa ser utilizado (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008).

A filtração pode ser feita passando o biogás por uma limalha ou cavaco de aço poroso o que faz com que o sulfeto de hidrogênio se ligue com o metal formando óxido de ferro III. Dependendo do volume de biogás, deve-se fazer a manutenção diariamente para evitar que gás não inerte saia pelo filtro.

No caso em que se utiliza esterco bovino, por exemplo, a concentração de sulfeto de hidrogênio no biogás gerado, que em contato com a água reage se transformando em ácido sulfúrico, é de 0 a 1% do volume total da mistura. Já o hidrogênio representa de 0 até 5% do volume total da mistura (JUNQUEIRA, 2014).

1.4.1.4 Quantidade de gases inertes

Os gases inertes são a parte menor da produção na fermentação anaeróbia (cerca de 35%), porém, durante o período transiente do processo, praticamente todo o gás gerado será dióxido de carbono, consequência da adaptação das colônias de bactérias ao novo ambiente (JUNQUEIRA, 2014).

1.4.1.5 Quantidade de gases combustíveis

A quantidade de gases combustíveis é maior que a de gases pseudo-inertes (75% do volume total da mistura), sendo o principal deles o metano, mas podem ser encontrados também o hidrogênio e a amônia (JUNQUEIRA, 2014).

1.4.2 Meios para a manipulação das propriedades do biogás

Existem na prática duas formas principais de manipulação das propriedades do biogás dentro de um biodigestor, a saber: por meios térmicos e por meios químicos (VILLEN et al., 2001).

1.4.2.1 Manipulação das propriedades por meios térmicos

Existem três faixas térmicas para manipulação do metabolismo celular, porém apenas a termofílica e a mesofílica são de interesse para a biodigestão.

A mesofílica é a faixa de temperatura entre 20 e 45 °C, na qual as células podem se adaptar naturalmente ao meio, não ocorrendo a esterilização da cultura. A maioria das bactérias encontradas na natureza são mesofílicas, as quais não necessitam de um controle refinado da temperatura, sendo que a tolerância a oscilações na temperatura é maior (VILLEN et al., 2001).

A termofílica é a faixa de temperatura entre 45 a 70 °C, sendo a mais eficiente, produzindo proporcionalmente três vezes mais gás (CHOORIT; WISARNWAN, 2007) e mais rápida em comparação à mesofílica, porém necessita de um controle de temperatura refinado, pois variações bruscas na temperatura esterilizam o biodigestor, ou fazem com que a cultura de bactérias retroceda na sua fase metabólica perdendo a eficiência e/ou até mesmo desestabilizando o biodigestor (VILLEN et al., 2001).

1.4.2.2 Manipulação das propriedades por meios bioquímicos

A conversão de energia celular segue um ciclo, no qual cada etapa é dependente da anterior (como uma reação em cadeia), porém existem formas de transpor etapas. Algumas substâncias funcionam como facilitadoras de processos e outras como inibidoras de processos, causando disfunção metabólica na geração de dióxido de carbono, diminuindo, assim, a proporção de metano na mistura do gás final (COX; NELSON, 2014).

Ao inibir o processo metabólico de alguma célula que está aumentando excessivamente seus produtos metabólicos e tornando o ambiente tóxico para as outras culturas de célula, o sistema será protegido e o processo metabólico da célula dominante aumentará.

1.5 MODELOS RELACIONADOS À BIODIGESTÃO

Como visto nos tópicos anteriores, sistemas de controle são necessários para manter a estabilidade e a eficiência do processo de biodigestão. Porém, não é possível dimensionar sistemas de controle sem ter modelos matemáticos do processo (planta) em que deve ser feito o controle.

Vale destacar que quanto mais próximo for o comportamento do modelo em relação à situação real melhor será a eficiência do controle. Ou seja, a modelagem do sistema é a descrição matemática do funcionamento do mesmo. No caso do biodigestor, é utilizado o balanço de massa dos compostos e dos microrganismos presentes como estrutura matemática para o modelamento (BALMANT, 2009).

O número de indivíduos da cultura de bactérias é descrito com o modelo de cinemática de Monod (BALMANT, 2009).

1.5.1 Introdução à Difusão Membranar de Fick & Stokes-Einstein

Com o modelo de difusão estudado primeiramente por Fick, foi verificado experimentalmente que a difusão era proporcional a (CALLISTER; WILLIAM, 2002):

$$D_f = \frac{\partial N}{\partial z} \quad (1)$$

onde:

D_f : Difusão no meio unidimensional;

N : Número de moléculas por unidade de volume;

Z : Distância difundida.

Porém, a difusão também é proporcional à difusão no meio, ou seja, a facilidade com que a molécula tem de atravessar o meio através da difusão:

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial z} \quad (2)$$

onde:

J : Velocidade de difusão no meio;

C : Concentração.

Note que, nesta aproximação, é excluída a difusão nos outros sentidos, no caso de uma difusão em um meio livre de barreiras o gradiente também tenderia a ocupar as outras direções, não necessariamente com a mesma velocidade.

As unidades da velocidade de difusão e da difusão são apresentadas, respectivamente, pelas seguintes equações:

$$J = \frac{Mol}{m^2 \cdot s} \quad (3)$$

$$D = \frac{m^2}{s} \quad (4)$$

Este é o modelo para o meio e a capacidade do substrato de difundir, além da velocidade em atingir as células alvo.

O modelo de difusão membranar é fornecido pela equação de Stokes-Einstein, definida como sendo a velocidade que um gradiente tem para ser difundido através de

uma membrana. Este tipo de equação não define a velocidade que o substrato é consumido, pois existem outros fatores que definem o tempo que o substrato que já está dentro da célula seja consumido, porém ele define o tempo adicional que o substrato demora para ficar disponível para a mesma.

A equação de Stokes-Einstein é definida como (CALLISTER; WILLIAM, 2002):

$$D_m = \frac{k \cdot T}{6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot a} \quad (5)$$

onde:

D_m : Coeficiente de difusão membranar (m^2/s);

k : Constante de Boltzmann (J/K);

T : Temperatura absoluta (K);

η : Viscosidade (Pa.s);

a : Raio da partícula hidratada (m).

Unindo as Eqs. (2) e (5), temos que a velocidade da difusão através da membrana é:

$$J = - D_m \frac{\partial C}{\partial z} \quad (6)$$

Expandindo a Eq. (6), resulta:

$$J = - \left(\frac{k \cdot T}{6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot a} \right) \frac{\partial C}{\partial z} \quad (7)$$

onde D da equação (2) foi substituído por D_m , da equação de Stokes-Einstein (Eq. 5).

Com isso, pode-se concluir que quanto maior a área desta membrana, maior a quantidade de partículas transferidas, pois:

$$J \cdot A = \frac{Mol}{s} \quad (8)$$

onde:

A : Área total da membrana que separa o gradiente (m^2).

Sendo as áreas superficiais destes tipos de células praticamente iguais, por apresentar proporções muito próximas de lipídios na membrana celular, então, ao

aumentar seu número, aumenta-se a área superficial total membrada a ser atravessada pelo gradiente de concentração, de maneira proporcional.

1.5.2 Introdução à Dinâmica de Crescimento Celular de Monod

A dinâmica de Monod é um conjunto de equações de balanço enzimático que, em condições ótimas para a reprodução celular, retornam a cinemática de crescimento de uma população de células imersa em um substrato definido, de modo que, se não ocorrerem intervenções externas, a equação deve acompanhar a acomodação dos gradientes químicos e do número de células do sistema (BALMANT, 2009).

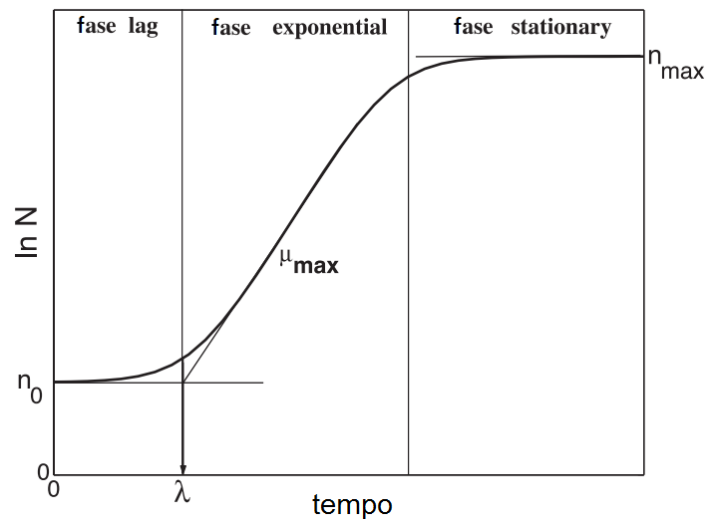
Este modelo não é geral, existem outros mais aconselhados para casos específicos, porém ele é válido para a maior parte das situações. Com ele é possível prever, por exemplo, o tempo de retenção hidráulica do sistema, ou seja, verificar a vazão ótima do sistema (BALMANT, 2009).

Para o modelo de Monod, a quantidade de células fase exponencial tem comportamento de uma função exponencial onde cada célula dobra seu número a cada ciclo, formando novas células que, assim, prosseguem até o consumo total dos nutrientes disponíveis no ambiente, quando entram em fase de latência (SWINNEN, 2004).

Existem ao todo 3 fases para o crescimento celular, a saber: *Lag* (atraso), *Exponencial* (exponencial) e *Stationary* (estacionária). Na fase *Lag*, as células aguardam pelas condições ideais para a multiplicação. Nesta fase o crescimento é muito lento e imperceptível. Na fase *Exponential* as células se multiplicam em progressivamente duplicando a cada geração. Na fase *Stationary* as células interrompem o seu crescimento e entram em latência. Por fim, entram numa nova fase (fase *Death*) na qual as células começam a se extinguir (SWINNEN, 2004).

Na Figura 11 é mostrada a separação das fases com os respectivos parâmetros, como tempo de início do crescimento exponencial (λ), concentração máxima de nutrientes (μ_{max}), número inicial de bactérias (n_0), e número final de bactérias na saturação do meio (n_{max}).

Figura 11 - Gráfico do modelo de crescimento bacteriano de Monod.



Fonte: Adaptado de Swinnen (2004).

Como o modelo de Monod não prevê o número de células nem na fase *Lag*, nem na fase *Death*, este modelo é aplicável apenas aos reatores onde existe fluxo contínuo e onde as condições para o crescimento microbiano são favoráveis (PEREIRA, 2010).

O número de células é definido pelo modelo de Monod, pois, tendo-se um número inicial e o tempo de formação de novos ciclos, é possível ter a quantidade final de uma determinada população (SWINNEN, 2004).

Este modelo é dividido em duas equações. A equação que descreve o crescimento exponencial da cultura é definida como uma função no tempo (SWINNEN, 2004):

$$N_f(t) = N_o \cdot 2^{\frac{t}{g}} \quad (9)$$

onde:

N_f : Número final de células (adimensional);

N_o : Número inicial de células (adimensional);

t : Tempo decorrido desde N_o (s);

g : Tempo necessário para formação de uma nova geração de células (s).

A equação que descreve a fase estacionária é definida como (PEREIRA, 2010):

$$\mu = \mu_{max} \frac{s}{k_s + s} \quad (10)$$

onde:

μ : Taxa de crescimento (adimensional);

μ_{max} : Taxa de crescimento máxima da cultura (adimensional);

s : Concentração de nutrientes (mol/m³);

k_s : Concentração de semisaturação (mol/m³).

1.5.3 Modelo do Sensor Térmico de Coeficiente Negativo (Steinhart)

Para o termistor tem-se o modelo de Steinhart. De acordo com o manual da VISHAY, a equação que descreve o comportamento termorresistivo deste tipo de transdutor é (VISHAY, 2012):

$$\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right) \cdot B = \ln\left(\frac{R}{R_0}\right) \quad (11)$$

onde:

T : Temperatura atual (°C);

T_0 : Temperatura original definida pelo fabricante (°C);

R : Resistência atual (ohm);

R_0 : Resistência original definida pelo fabricante (ohm);

B : Constante definida pelo fabricante (°C).

É possível transformar este modelo em uma função resistência em função da temperatura, logo, isolando R , tem-se:

$$R(T) = R_0 \cdot e^{B \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (12)$$

1.5.4 Modelo da Capacitância Térmica

São métodos análogos ao circuito elétrico, representando uma massa térmica isolada por uma resistência. Este modelo calcula o atraso de um determinado corpo de entrar em equilíbrio com o meio exposto, como, por exemplo, a demora para uma garrafa térmica entrar em equilíbrio com o ambiente (INCROPERA, 2008).

Já a resistência térmica representa a dificuldade de um local de trocar calor com outro, seja na condução, com a resistência de contato, na convecção, ou na radiação. Quanto maior a resistência térmica, maior será o isolamento térmico do material (INCROPERA, 2008).

A relação é uma exponencial negativa, sendo seu coeficiente de amortecimento dependente da área da troca de calor e da eficiência do isolante, como segue (VISHAY, 2012):

$$\frac{T - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = e^{[-(\frac{h \cdot A_s}{\rho \cdot V \cdot c}) \cdot t]} \quad (13)$$

onde:

T : Temperatura atual do sistema (K);

T_i : Temperatura inicial do sistema (K);

T_{∞} : Temperatura externa ao sistema (K);

h : Resistência térmica do sistema (K.m/W);

A_s : Área superficial do volume de controle (m²);

ρ : Massa específica do meio (kg/m³);

V : Volume do meio (m³);

c : Calor específico do meio (J/kg.K);

t : Tempo decorrido (s).

1.6 SISTEMAS DE INTERFACE E MÉTODOS DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Existem inúmeros dispositivos e métodos de aquisição de dados, porém, independentemente do método, todos os dispositivos de aquisição de dados devem ter no mínimo uma impedância interna de uma ordem de grandeza maior que a impedância do sistema para que o instrumento não altere a medida (HAYKIN; VEEN, 2008).

A precisão da aquisição de dados é diretamente proporcional à calibração dos sensores, à resolução da conversão para sinal digital, à propagação da incerteza do próprio sistema, ao nível do ruído, e ao posicionamento dos sensores em relação aos respectivos alvos.

De acordo com o Teorema de Nyquist, a frequência de aquisição deve ser no mínimo duas vezes maior que a maior frequência do sistema, para que não haja

aliasing (erro que insere uma frequência não existente no sistema por amostrar poucos pontos) na medição e para que o sinal possa ser reconstituído (HAYKIN; VEEN, 2008).

Para que a aquisição de dados seja viável, deve-se definir uma frequência de amostragem compatível com a resolução desejada e com o sistema de armazenamento de informações (HAYKIN; VEEN, 2008).

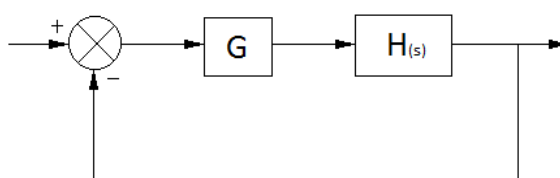
A *Toolbox* de identificação de sistemas é uma ferramenta para a obtenção de um modelo de um sistema, sendo parecido com as regressões usadas em estatística para obtenção da equação de curvas ou da tangente, porém é muito mais sofisticada, podendo encontrar parâmetros de sistemas complexos, como circuitos térmicos.

1.7 SISTEMA DE CONTROLE

É um sistema que tem uma retroalimentação, que faz com que ele tenha uma resposta ao estado atual e não somente a entrada. Dessa forma, é possível projetar sistemas que podem estabilizar em determinados valores e até aumentar a precisão de sistemas adjacentes.

Geralmente, um sistema de controle apresenta 3 estruturas em seu diagrama, a saber: Planta ($H(s)$), Controlador (G) e Retroalimentação (*Feedback*). Estas estruturas são mostradas no diagrama da Figura 12.

Figura 12 - Diagrama clássico de um sistema de controle.



Fonte: Elaboração própria.

Existem dois tipos de controles amplamente utilizados, o controle analógico e o controle digital. Por ser um sinal contínuo, o controle analógico é dimensionado com auxílio da transformada de Laplace (transfere o sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência), com o objetivo de impor ao sistema a resposta mais rápida ao valor alvo desejado; já o controle digital, como trabalha com tempo por amostragem, utiliza como ferramenta matemática a transformada Z (análoga de Laplace para tempo discreto) para mesma finalidade (NISE, 2011).

1.7.1 Controle liga/desliga

É o tipo de controle mais simples que existe no mercado, sendo amplamente utilizado, tanto domesticamente quanto industrialmente. Ele consiste em uma chave que, ao receber a realimentação da planta e perceber que o nível do sinal do sistema está abaixo do desejado, alimenta o sistema com 100% da carga disponível e, caso ocorra o contrário, corta completamente a carga de alimentação do sistema.

Geralmente, este tipo de controlador é utilizado com histerese, para trabalhar em uma faixa de nível, reduzindo, assim, a frequência de acionamento da carga e aumentando a vida útil da chave que o aciona.

O grande problema desse tipo de controlador é que ele nunca atinge a estabilidade, ele sempre oscila ao redor do valor final. Processos que necessitam de precisão não podem usar esse tipo de controle, pois a incerteza do valor final é muito grande.

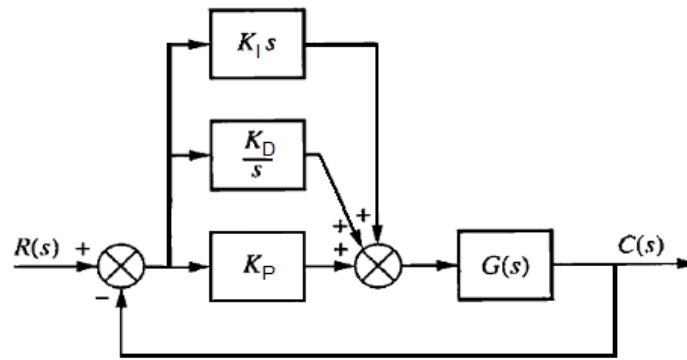
1.7.2 Controlador proporcional integral derivativo

O controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) permite que funções transferências, de até segunda ordem, sejam controladas relativamente ao tempo de assentamento, sobressinal e tempo de resposta do sistema (NISE, 2011).

Este controlador, para fins de descrição matemática, é um controlador que tem 3 ganhos, sendo um dos ganhos ligado diretamente ao erro (k_p), outro ganho ligado a um derivador (k_d), e o último ganho ligado a um integrador, denominado k_i (NISE, 2011).

A Figura 13 mostra a disposição da soma dos componentes Proporcional (K_P), Integral (K_I) e Derivativo (K_D), em série à planta do sistema $G(s)$.

Figura 13 - Desenho esquemático de um controlador PID.



Fonte: Nise (2011).

Existem vários métodos de calibração de um controlador PID para o sistema, sendo que alguns deles são práticos (utilizados quando o modelo matemático da planta é desconhecido), e outros são teóricos, como o método de Ziegler Nichols, para análise de estabilidade em malha fechada, o método *Root-Locus* e o método da resposta em frequência (OGATA, 1995).

Existem várias formas para calibração, sendo que as duas mais comuns são: pela resposta transitória e pelo ganho crítico. O controle pela resposta transitória, como o próprio nome já diz, é baseado na tangente da fase transitória da resposta do sistema, desta forma ajusta-se a resposta para que a tangente seja a da resposta o mais rápido possível sem o sobre sinal, ou seja, superamortecida. No controle pelo ganho crítico, o ganho é ajustado utilizando o método de Routh, no limite da estabilidade do sistema, ou seja, zerando algum termo da tabela de Routh para que o sistema seja criticamente amortecido (NISE, 2011).

1.7.3 Domínio da frequência

Em geral, os sistemas são descritos com equações diferenciais que, dependendo da ordem, podem ou não ser de difícil solução. Porém, existem métodos que podem ser utilizados para a solução destas equações diferenciais, simplificando o sistema e reduzindo muitas vezes a sua ordem (NISE, 2011).

Para sistemas discretos (digitais ou de aquisição pontual), utilizam-se a transformada Z , que transfere o sinal do domínio do tempo discreto para o domínio da frequência, sendo, assim, possível resolver as equações com somas, adições, divisões, multiplicações e convoluções (OGATA, 1995).

Para sinais contínuos no tempo, utiliza-se a transformada de Laplace e a transformada de Fourier, onde ambas trabalham no domínio da frequência, tornando as equações, assim como na transformada Z, passíveis de resolução com operadores simples (NISE, 2011).

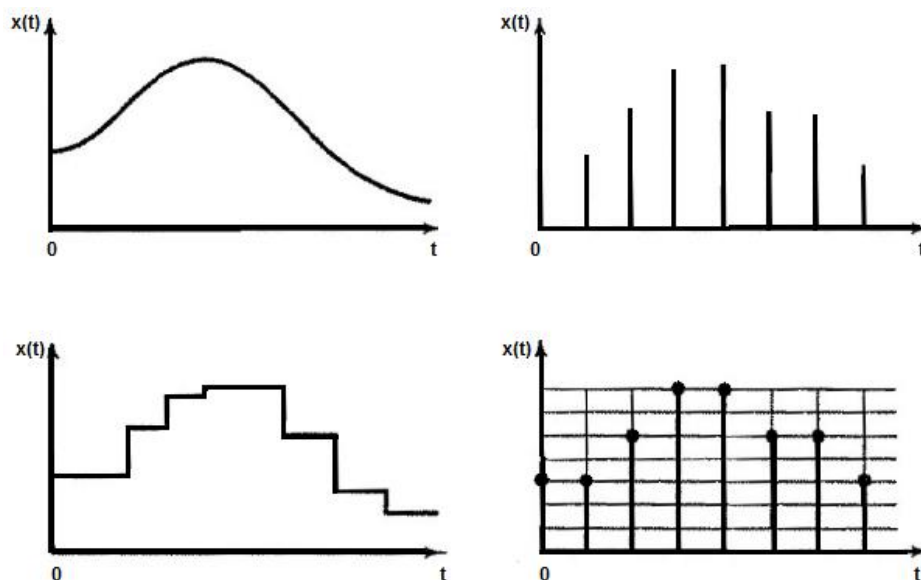
1.7.4 Controle discreto

O controle discreto, controlador que trabalha baseado no tempo discreto, não se diferencia do controle analógico em sua estrutura, a diferença está nas técnicas de análise de estabilidade e dimensionamento.

Para os sinais discretos têm-se tempos de amostragem que influenciam na estabilidade e na velocidade do controlador. É um controle de dimensionamento mais difícil, porém de implementação mais fácil e barata.

Na Figura 14 é possível ver nos gráficos à direita sinais discretos e à esquerda sinais contínuos, sendo o sinal digital dividido em níveis (chamado de quantização) em seu tempo e em sua amplitude, como mostrado no gráfico inferior direito.

Figura 14 - Diferentes tipos de sinais.



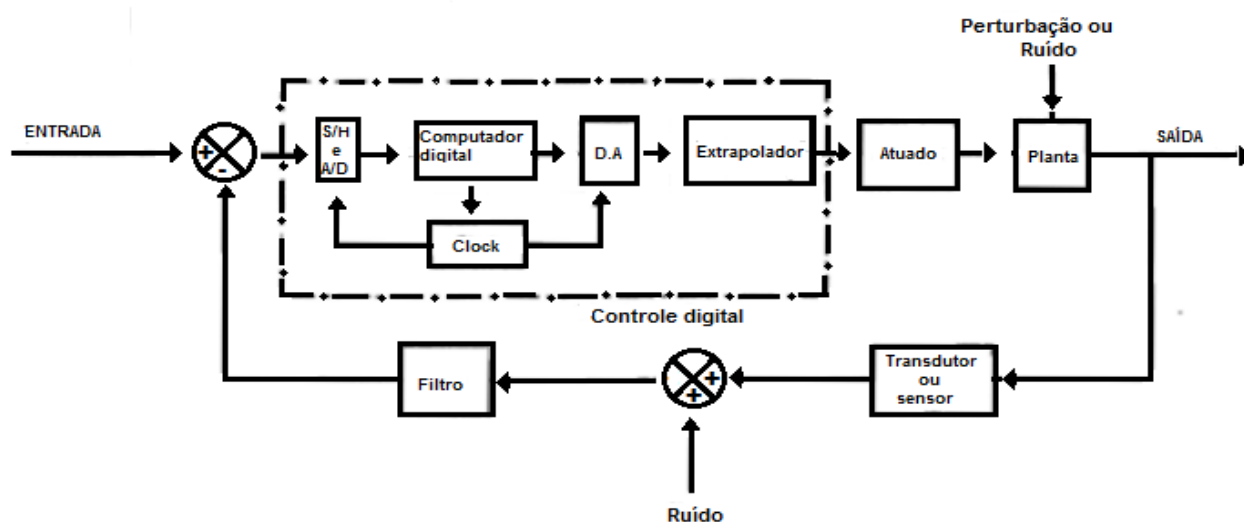
Fonte: Ogata (1995).

Para que o dado amostrado possa ser processado digitalmente é necessário ser convertido em um dado digital. O componente responsável por essa conversão é chamado de conversor AD (Analógico/Digital). Este conversor adequa o sinal em um espaço limitado de níveis, sendo na maior parte dos casos binários.

A conversão da resposta digital acontece de forma semelhante, porém por um componente chamado de conversor DA (Digital/Analogico), o qual, na maior parte dos casos, utiliza a modulação por frequência (PWM) para a conversão.

O sistema de controle precisa lidar com essas conversões entre os sinais analógicos e digitais de forma que mantenha a estabilidade do sistema. Um diagrama geral de um sistema de controle digital é mostrado na Figura 15.

Figura 15 - Diagrama geral de um sistema de controle digital.



Fonte: Adaptado de Ogata (1995).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

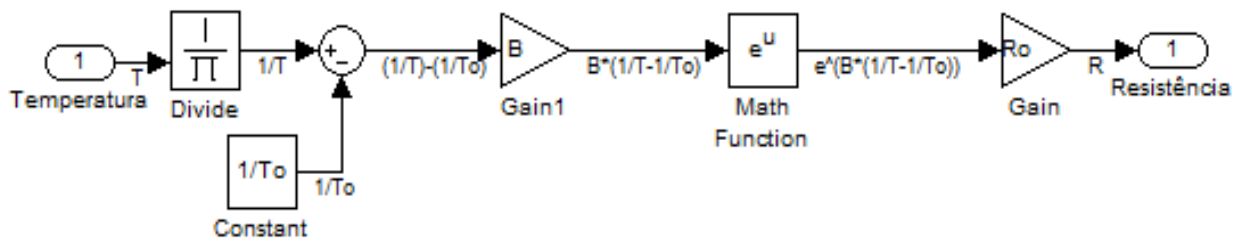
2.1 MODELAMENTOS

O modelamento do sistema deve ser feito em partes, detalhando principalmente sensores e atuadores, os quais têm o maior destaque na regressão e ajuste dos dados. Os modelos foram feitos com ajuda do *software* Simulink (MATLAB), sendo que cada parte foi transformada em um subsistema.

2.1.1 Modelamento dos sensores de temperatura

O modelo do transdutor de temperatura NTC103, conforme mostrado na Figura 16, é conversão direta da temperatura em resistência, sem o tempo de resposta.

Figura 16 - Modelo em Simulink do transdutor NTC103.



Fonte: Elaboração própria.

A resposta do termistor no tempo obedece a seguinte equação:

$$T(t) = T_e + (T_i - T_e) \cdot e^{-t/t_r} \quad (14)$$

onde:

T : Temperatura no tempo (°C);

T_e : Temperatura do estímulo (°C);

T_i : Temperatura inicial interna do sensor (°C);

t : Tempo transcorrido desde o estímulo (s);

t_r : Tempo de resposta (s).

Este comportamento é observado de fato na calibração, o valor da resistência demora para atingir o regime.

Derivando a Eq. (14) no tempo será obtida a taxa de variação da temperatura no tempo, que será igual a:

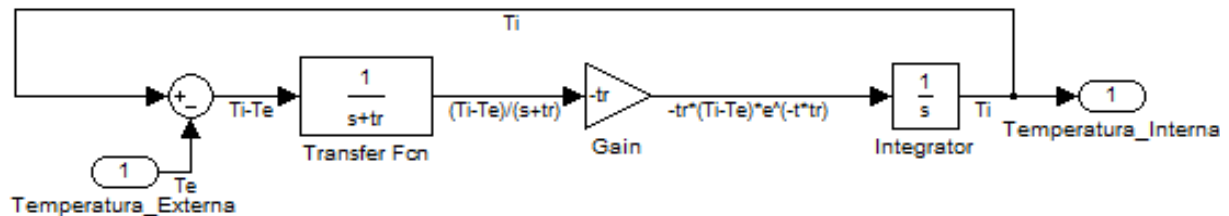
$$\frac{\partial T}{\partial t} = -t_r \cdot (T_i - T_e) \cdot e^{-t/t_r} \quad (15)$$

Transpondo para o domínio da frequência, para facilitar a manipulação pelo *software*, o sistema apresentará a seguinte função transferência:

$$-t_r \cdot (T_i - T_e) \frac{1}{s + t_r} \quad (16)$$

O modelo da resposta do transdutor de temperatura no tempo, feita no domínio da frequência, é mostrado na Figura 17. O parâmetro inicial do sistema é a temperatura externa do sistema inteiro, definida como a temperatura externa do tambor.

Figura 17 - Modelo em Simulink da resposta do sensor NTC103.



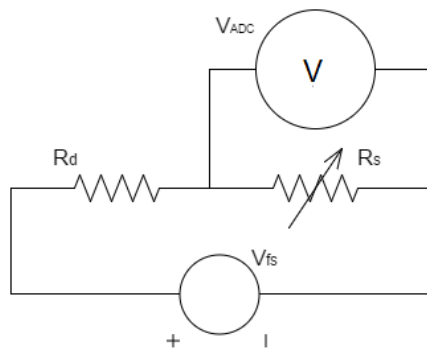
Fonte: Elaboração própria.

2.1.2 Modelamento do Sistema de Aquisição de Dados (ADC, Divisor de Tensão & Processamento)

Este sistema é o caminho inverso do sensoriamento. Uma vez tendo todas as equações em mãos é possível refazer passo a passo digitalmente a informação e reconstituir o sinal.

A princípio foi utilizado para adquirir o valor da resistência oferecida pelo termistor, um resistor de valor 10 k Ω , disposto como um divisor de tensão, mostrado na Figura 18.

Figura 18 - Desenho esquemático do divisor de tensão.



Fonte: Elaboração própria.

Desta forma, a resistência oferecida pelo transdutor obedecerá a seguinte relação:

$$R_s = \left(\frac{V_{fs} \cdot R_d}{V_{fs} - V_{ADC}} \right) - R_d \quad (17)$$

onde:

R_s : Valor da resistência do sensor (ohm);

R_d : Valor do resistor de comparação do divisor de tensão (ohm);

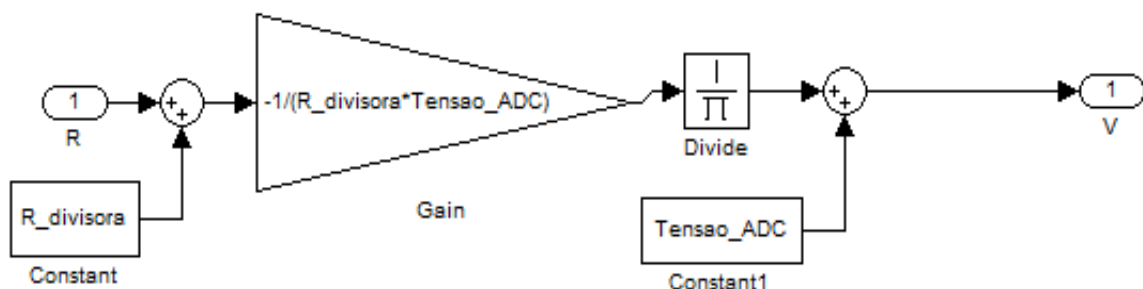
V_{fs} : Tensão *full scale* do ADC (V);

V_{ADC} : Tensão em cima do R_s que será enviada ao ADC (V).

Dessa forma, a conversão do sinal em dados fica dependente de uma equação não linear, fazendo com que o erro seja diferente em cada faixa de temperatura, dificultando os cálculos futuros e a análise de incertezas.

O modelo esquemático da conversão direta do sinal em tensão pelo divisor de tensão é mostrado na Figura 19.

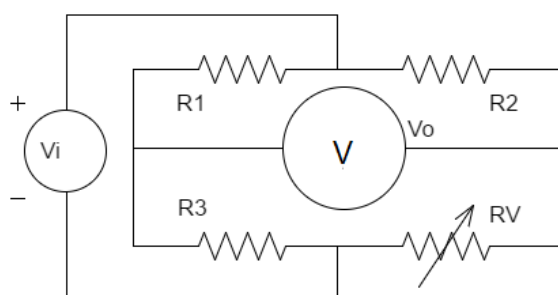
Figura 19 - Modelo do divisor de tensão.



Fonte: Elaboração própria.

Por outro lado, é possível usar a ponte de Wheatstone, tornando a equação um pouco mais linear, facilitando o processamento futuro e diminuindo o erro de conversão quando os valores ficarem muito distantes da zona de crescimento linear do sensor. Esta disposição é mostrada na Figura 20, onde R_V é o valor da resistência do sensor; R_1 , R_2 e R_3 são valores de resistores de comparação da ponte; V_i é a tensão *full scale* do ADC; e V_o é a tensão em cima do R_s , que será enviada ao ADC.

Figura 20 - Desenho esquemático da Ponte de Wheatstone.



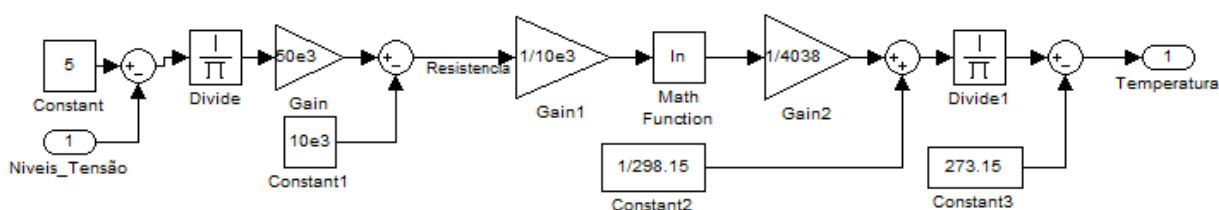
Fonte: Elaboração própria.

A equação para a ponte de Wheatstone é mais complexa que a equação do divisor de tensão, porém mais facilmente linearizada, sendo dada por:

$$G = V \cdot \left(\frac{R_2 \cdot R_3 - R_1 \cdot R_4}{(R_1 + R_3) \cdot (R_2 + R_4)} \right) \quad (18)$$

O processamento da informação e de recuperação dos dados coletados é feito digitalmente através de um computador ligado ao sistema de aquisição de dados. Nele é recebido o valor do conversor analógico digital e este faz a regressão do sinal para o valor da temperatura. A interpretação computacional desta conversão é mostrada na Figura 21.

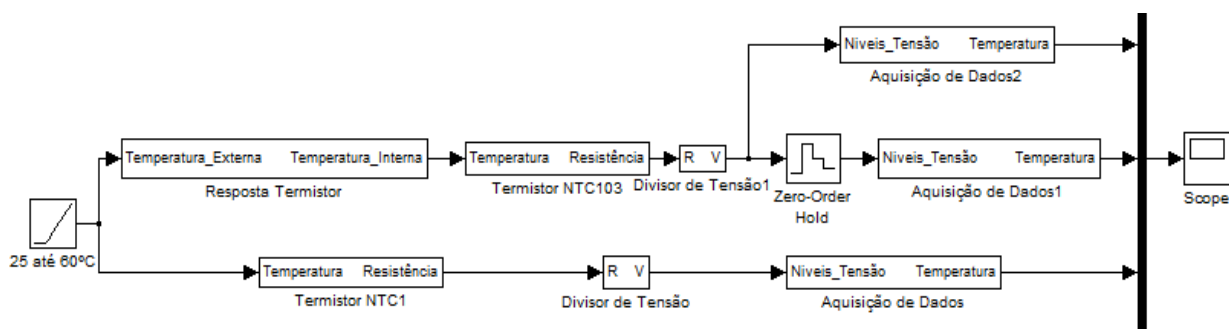
Figura 21 - Modelo do processamento da informação recebida pelo computador do ADC.



Fonte: Elaboração própria.

Para fins de teste são comparados os sistemas com conversão ideal, com atraso na aquisição e com quantização do sinal somado ao atraso. Este modelo teste é mostrado na Figura 22.

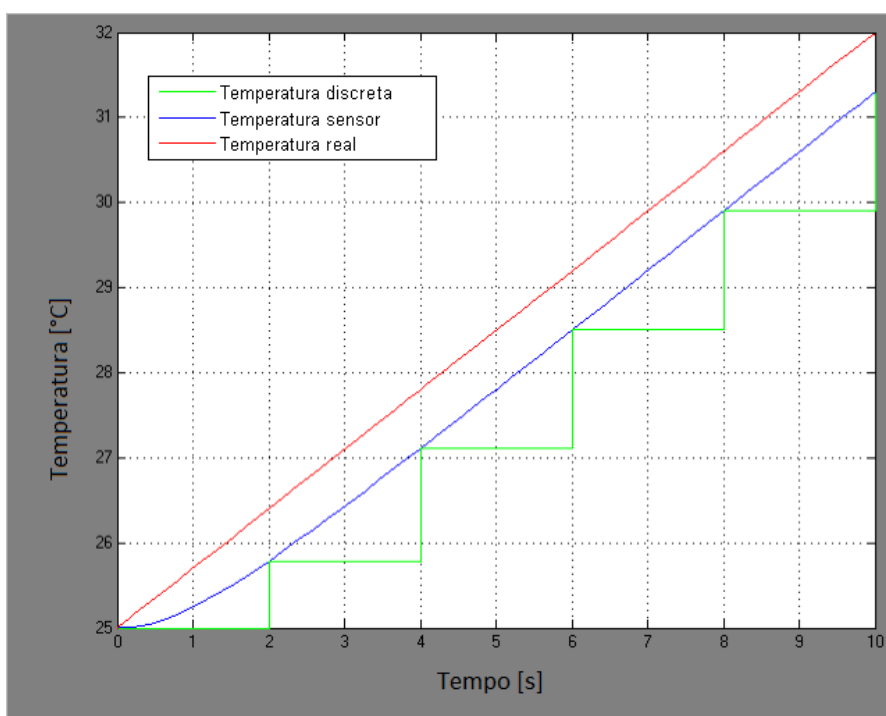
Figura 22 - Modelo da aquisição de dados da temperatura.



Fonte: Elaboração própria.

O extrapolador de ordem zero, observado na Figura 22, é uma tentativa de simulação do processamento do ADC, transformando o sinal em níveis de tensão. O tempo escolhido de intervalo para aquisição do sinal foi de 2 segundos, sendo igual ao tempo de aquisição do sinal pelo supervisor. O resultado da simulação é visto na Figura 23, nela estando em vermelho a resposta ideal do sensor, em azul a resposta analógica do sistema, e em verde a resposta discreta do sistema.

Figura 23 - Resultado da simulação em Simulink do sistema da Figura 22.



Fonte: Elaboração própria.

2.1.3 Modelamento da Temperatura no Interior do Tambor

A temperatura no interior da câmara de fermentação é uma função da potência dissipada no interior do tambor pelo trocador de calor subtraído da potência dissipada pelo próprio tambor somada ao calor proveniente do metabolismo das bactérias. A soma destas no tempo é a energia total entregue ao sistema. Logo esta energia é inculcida no sistema e transformada em energia térmica agitando as moléculas do substrato.

Assim, tem-se:

$$q_g = q_p + q_t + q_{met} \quad (18)$$

$$q_p = \frac{T_i - T_e}{R_{iso}} \quad (19)$$

$$q_t = \frac{T_i - T_c}{R_{toc}} \quad (20)$$

onde:

q_g : Fluxo de calor que entra no sistema (W);

q_p : Fluxo de calor que sai do sistema (W);

q_t : Fluxo de calor transferido para a câmara de fermentação (W);

q_{met} : Fluxo de calor causado pelo metabolismo celular (W);

T_i : Temperatura interna do banho térmico (K);

T_e : Temperatura exterior do sistema (K);

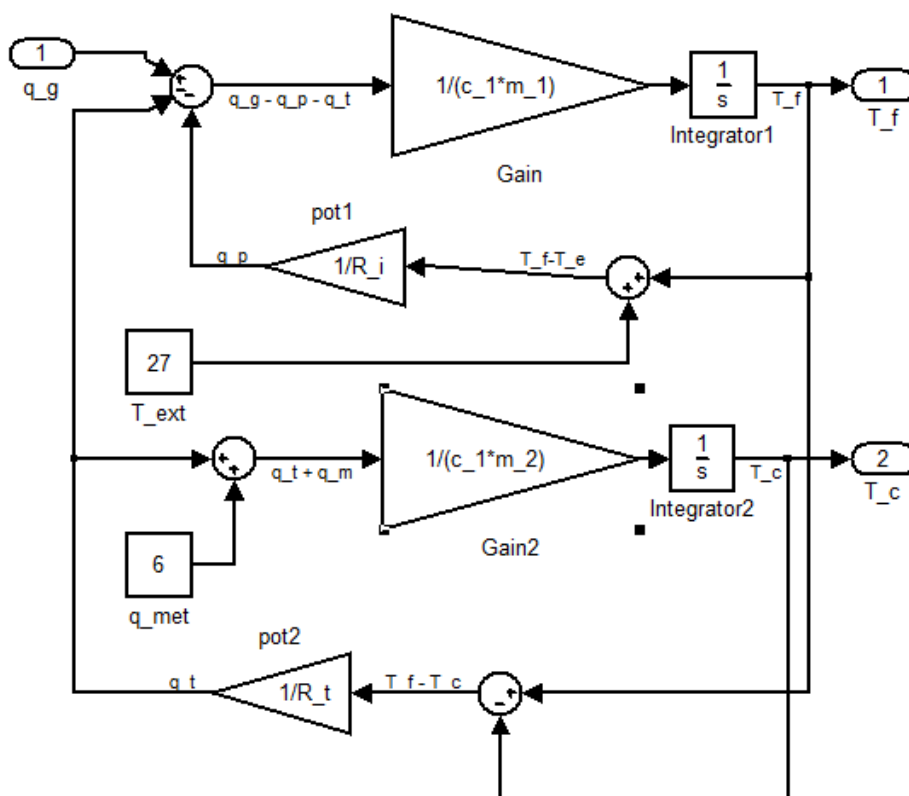
T_c : Temperatura da câmara de fermentação (K);

R_{iso} : Coeficiente de condução da camada de isolamento térmico do tambor (K/W);

R_{toc} : Comprimento do tambor, juntamente com a camada isolante (K/W).

O modelo desta equação é visto na Figura 24, sendo que as condições iniciais dos integradores são iguais a T_e , que é a temperatura externa do tambor.

Figura 24 - Modelo térmico do tambor, feito no *software* Simulink.



Fonte: Elaboração própria.

2.1.4 Modelamento da Temperatura no Sistema de Aquecimento

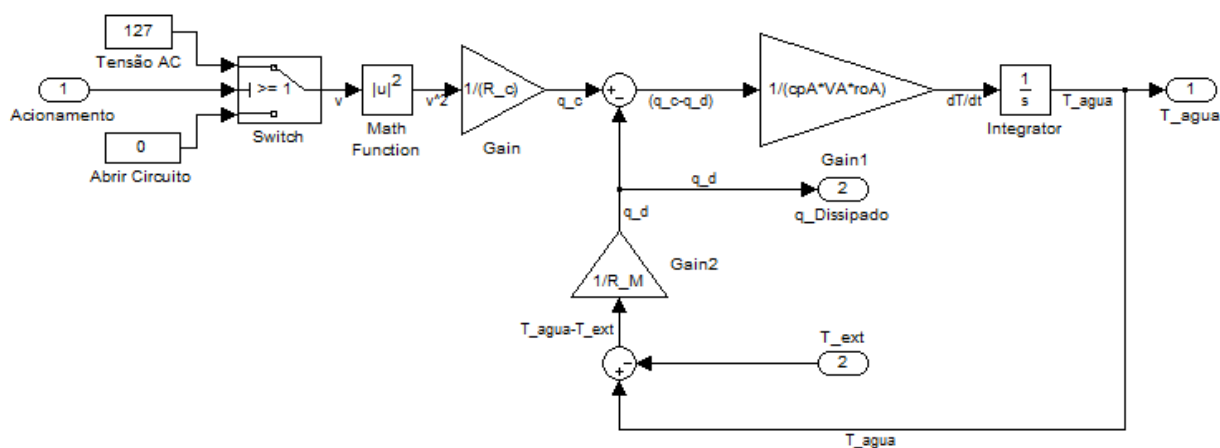
A planta deste sistema é constituída de uma resistência elétrica, que converte energia elétrica em calor, em um fluxo de água constante e contínuo que o circunda.

Por este sistema ser isolado termicamente do meio externo, perdas mínimas de calor, praticamente todo o fluxo de calor gerado será dissipado no trocador de calor ligado ao tambor no biodigestor e as perdas para o meio serão insignificantes relativamente ao resto do sistema.

A potência térmica dissipada no sistema é, pelos motivos citados anteriormente, uma função da potência, do calor específico do fluido de troca de calor e a massa do fluido.

Na Figura 25 observa-se que o acionamento deste apenas é possível em dois níveis, 127 V e 0 V, e a energia térmica deste aquecedor será dissipada através da variável q_d , ligada a retroalimentação negativa do modelo.

Figura 25 - Modelo térmico do aquecedor.

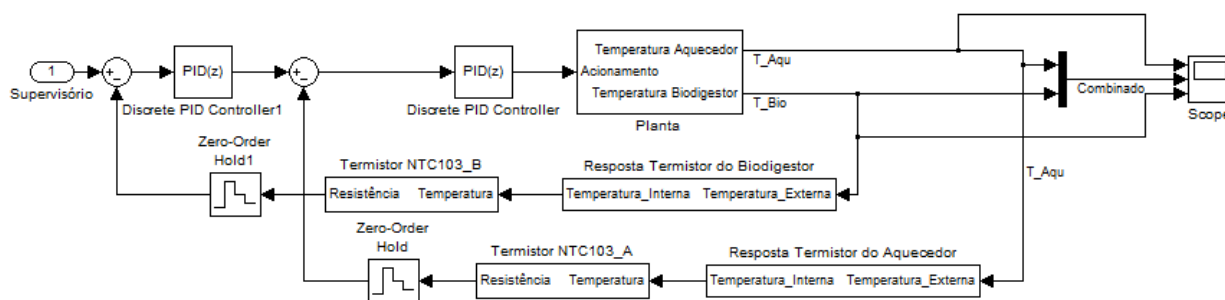


Fonte: Elaboração própria.

2.1.5 Modelamento do Controle Térmico

O controle de temperatura foi feito digitalmente no microcontrolador (vide programa no Apêndice 1). Este programa implementa a resposta de um controlador que é substituído pelos componentes mostrados na Figura 26.

Figura 26 - Modelo de controle térmico do biodigestor.

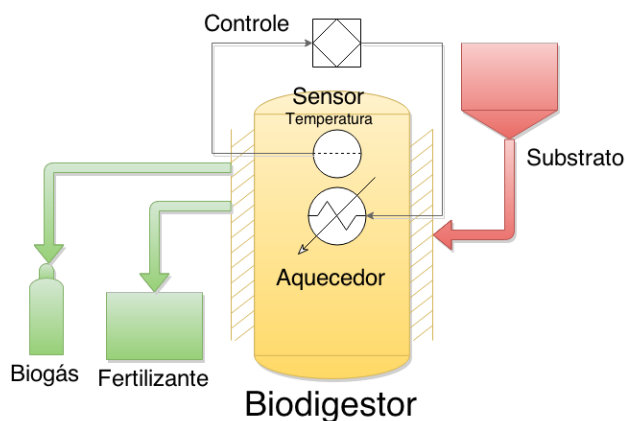


Fonte: Elaboração própria.

2.2 DESENHO E CONSTRUÇÃO DO BIODIGESTOR

Baseado nos modelos apresentados e nos modelos de biodigestores mais recentes a planta foi desenhada para atender as características principais dos tipos de digestores mais eficientes, sendo, assim, um CSTR, utilizando futuramente em outras pesquisas. A multifuncionalidade deste desenho possibilita a simulação de qualquer tipo de planta biodigestora com modificações mínimas na estrutura. Na Figura 27 é apresentado o esquema com diagrama de blocos do sistema de biodigestão construído.

Figura 27 - Esquema do sistema de biodigestão construído.



Fonte: Elaboração própria.

2.2.1 Modelo menor

A planta menor pode digerir até 10 litros por batelada, consiste em um tambor de capacidade de 20 l, isolamento refratário e térmico (com índice de condução térmica de $0,025 \text{ kJ/hm}^\circ\text{C}$), um aquecedor do tipo *skin heater*, agitadores à ar, e válvula esférica (controladora da vazão do substrato). O sistema é mostrado na Figura 28.

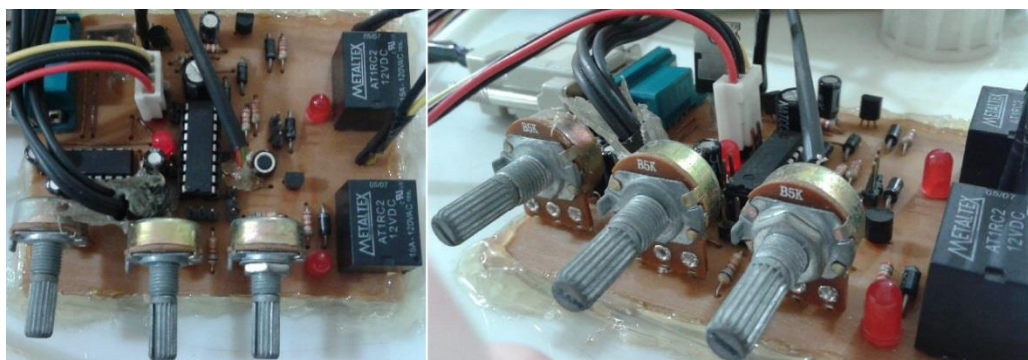
Figura 28 - Biodigestor revestido com manta térmica de EVA.



Fonte: Elaboração própria.

A placa de aquisição e controle contém 2 relés, MCU PIC16F818, comunicação padrão RS232 (com conector DB9) para o padrão TTL, cabo fêmea duas vias no padrão DB9, placa conversora USB para SERIAL, fonte de tensão de 300 W, 2 sensores de temperatura com display embutido, 3 termistores NTC103. O circuito é apresentado na Figura 29.

Figura 29 - Placa de controle e aquisição de dados.



(a) Vista Superior

(b) Vista Lateral

Fonte: Elaboração própria.

Os dados enviados são analisados e interpretados no programa supervisor em Java, para fazer as conversões necessárias para apresentação dos resultados e futura regressão.

O sistema foi testado com e sem substrato, a fim de obter a resposta do sistema a variações de temperatura e a capacidade de crescimento de células no ambiente interno do biodigestor, servindo de teste para o desenho em escala maior do mesmo biodigestor.

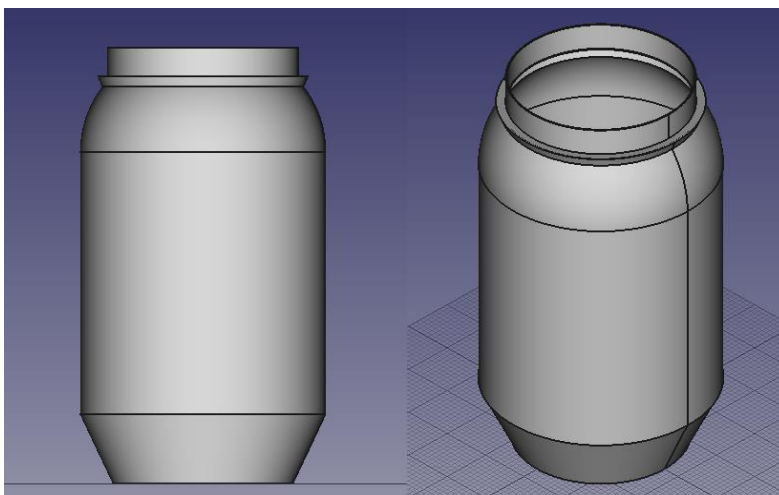
2.2.2 Modelo maior

A planta maior, com capacidade de 80 litros por batelada, tem as mesmas características que a menor, com implementos adicionais para compensar seu tamanho, como o sistema de aquecimento, que é feito por um trocador de calor, cujo fluido do aquecedor não é misturado com o fluido interno do biodigestor, evitando que o fluido ácido e viscoso do biodigestor danifique o sistema de aquecimento.

A câmara de digestão é cilíndrica com 83 cm de altura e 44 cm de diâmetro, composta de poliestireno de alta densidade (HDPE), com paredes de 8 mm de espessura, suportando cargas suficientes para o funcionamento da digestão.

A geometria da câmara de digestão está exposta na Figura 30, onde podem ser vistos todos os chanfros e chavetas da peça.

Figura 30 - Morfologia do tanque de fermentação do biodigestor maior.

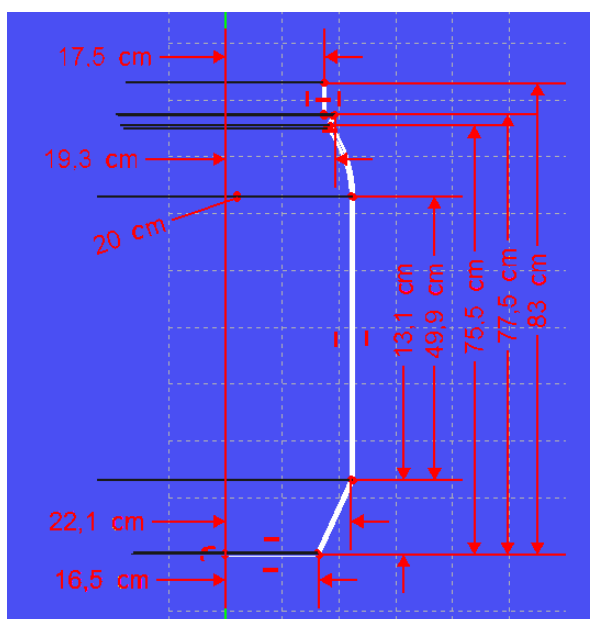


Fonte: Elaboração própria.

As dimensões do tanque de fermentação foram escolhidas para que fosse uma morfologia intermediária entre o CSTR e o UASB, podendo se comportar com poucas modificações como os dois tipos de digestores.

As medidas da câmara estão na Figura 31, os diâmetros na base, na tampa e no centro aparecem nas cotas.

Figura 31 - Dimensões do tanque do biodigestor maior.



Fonte: Elaboração própria.

O fluido no interior do trocador de calor é aquecido em um banho térmico, que o mantém em uma temperatura definida pelo controlador. Este fluido é bombeado por uma

bomba, também controlada, que, dependendo da rapidez necessária da troca de temperatura, varia o coeficiente convectivo, possibilitando, assim, sinais de entrada do tipo rampa suave. A Figura 32 mostra o banho térmico e a bomba.

Figura 32 - Aquecedor e bomba do trocador de calor.



Fonte: Elaboração própria.

O biodigestor foi colocado dentro de outro tambor maior e o vão entre as paredes dos mesmos foi preenchido com vermiculita de grãos finos, um material atóxico, inorgânico e leve, que isola a temperatura interna do biodigestor, simplificando seu modelo térmico por reduzir a perda por convecção. Essa montagem pode ser vista na Figura 33.

Figura 33 - Biodigestor montado.



Fonte: Elaboração própria.

Existe uma tubulação de saída de gás, localizada na tampa do biodigestor, que possui um filtro de HS e umidade, para filtrar todos os gases não inertes e resíduos que puderem ser expurgados pelo biodigestor, conforme mostrado na Figura 34. Existe ainda uma vedação com válvula anti-retorno, evitando que a tubulação se encha de substrato, ou que o gás filtrado seja contaminado com o gás recém-produzido.

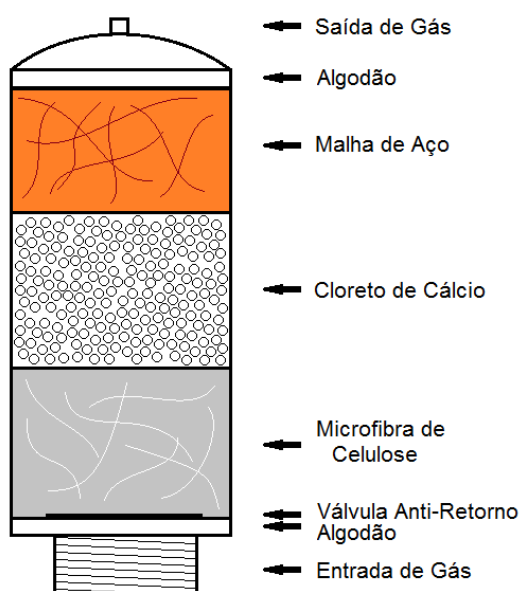
O filtro de gás consiste em um tubo que direciona o fluido por compostos que reagem com componentes ativos do biogás. Os compostos são oxigênio, gás sulfídrico e umidade. Já os reagentes são: malha de aço, microfibras de celulose e cloreto de cálcio. A Figura 35 apresenta o diagrama do filtro.

Figura 34 - Filtro de gases não reativos.



Fonte: Elaboração própria.

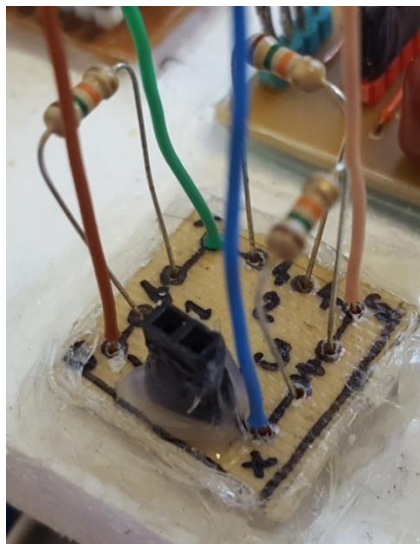
Figura 35 - Diagrama esquemático do filtro de gás na saída do biodigestor



Fonte: Elaboração própria.

Devido aos benefícios do uso da ponte de Wheatstone, relativamente à associação de resistores, com a finalidade de encontrar o valor do termistor, três pontes e o respectivo sistema de conversão do sinal em dados foram montado na placa de aquisição, conforme mostra a Figura 36.

Figura 36 - Placa com ponte de Wheatstone.



Fonte: Elaboração própria.

Os sensores, mostrados na Figura 37, foram calibrados, sendo identificados pelas cores: preto, branco, amarelo e vermelho. As curvas de calibração e o gráfico da linearização do sinal podem ser consultados no Apêndice 2.

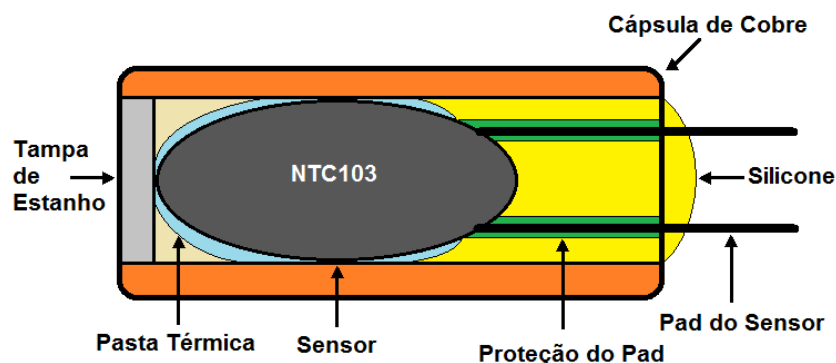
Figura 37 - Fotografia do encapsulamento de proteção do sensor de temperatura.



Fonte: Elaboração própria.

Ele tem uma camada de cobre, para proteção e para melhor condutividade térmica, acoplada por pressão com uma interface de pasta térmica. O cabo é blindado e com comprimento de 1,5 m. A Figura 38 mostra o diagrama da montagem do sensor.

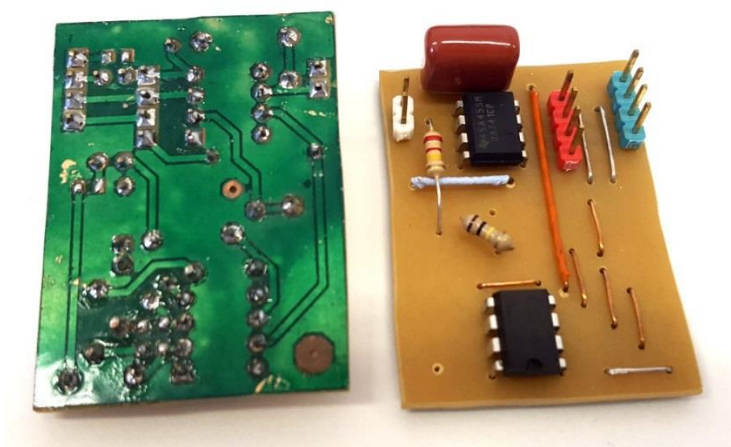
Figura 38 - Diagrama esquemático do sensor de temperatura com proteção de cobre.



Fonte: Elaboração própria.

Nas saídas dos sensores, para garantir a qualidade da amostra, foram utilizados filtros analógicos ativos (com isso o ruído é reduzido) e conversão para sinal digital (para processamento dos dados), tratando os sinais para eliminar ruídos (com filtros passa baixa digitais), conforme mostra a Figura 39.

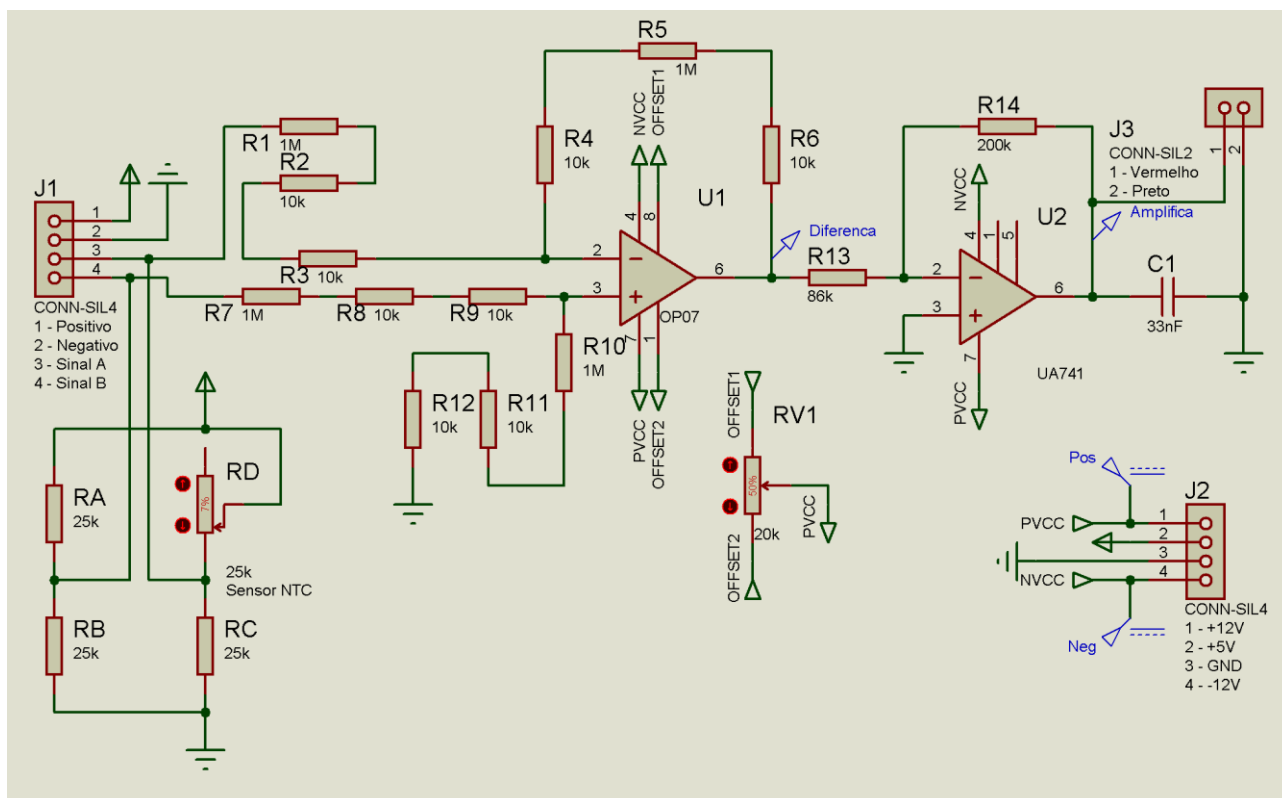
Figura 39 - Circuito do condicionador de sinal analógico.



Fonte: Elaboração própria.

Para o condicionamento do sinal da temperatura foi utilizado o amplificador operacional OP07 (amplificador operacional de precisão com baixo *offset*) e para a amplificação do sinal condicionado foi usado o amplificador operacional de uso geral UA741. A Figura 40 apresenta o diagrama do circuito. O fator multiplicativo do ganho foi reajustado via *software*, pois os valores indicados nos resistores não correspondiam com os valores reais, divergindo em 3% de *full scale*.

Figura 40 - Esquema do circuito de condicionamento de sinal.

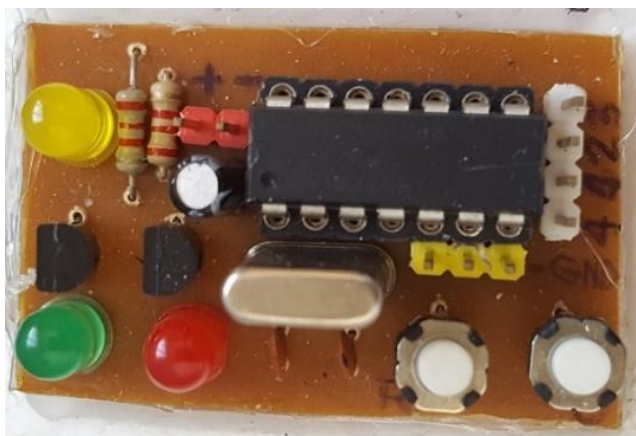


Fonte: Elaboração própria.

A regressão para obtenção da curva de calibração (Apêndice 2) foi feita pelo software “*Thermistor Calculator v1.1*” da Universidade de Stanford.

O sistema de aquisição é mostrado na Figura 41, tendo este como núcleo de processamento um micro controlador PIC16F688.

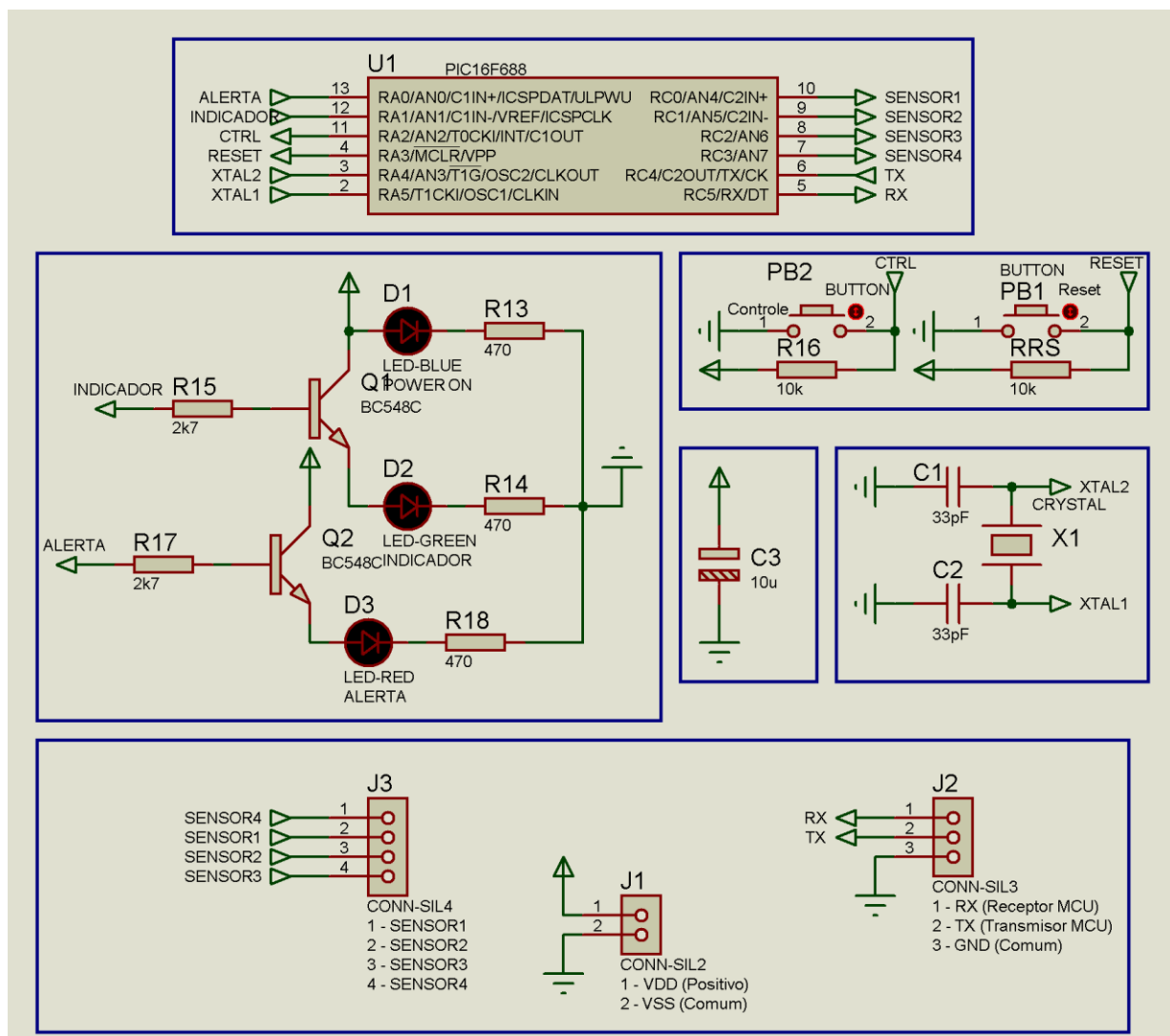
Figura 41 - Placa de aquisição de dados.



Fonte: Elaboração própria.

Vale destacar que a porta C é utilizada para a conversão analógica/digital, com erro de 1% *full-scale* já computado via *software* na propagação de erro. O desenho esquemático é mostrado na Figura 42.

Figura 42 - Esquema da placa de aquisição de dados.

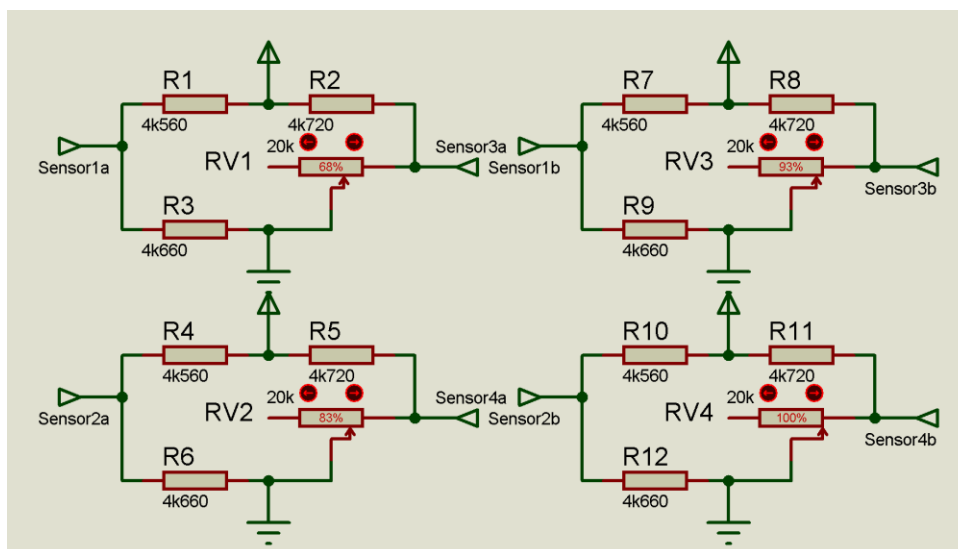


Fonte: Elaboração própria.

Para a linearização da função de resposta da ponte de Wheatstone foram levados em consideração todos os valores das resistências soldadas no sistema, conseguindo, assim, maior precisão nas medidas e, conseqüentemente, reduzindo o erro propagado.

A Figura 43 mostra o esquema do circuito de condicionamento e aquisição dos sinais dos sensores.

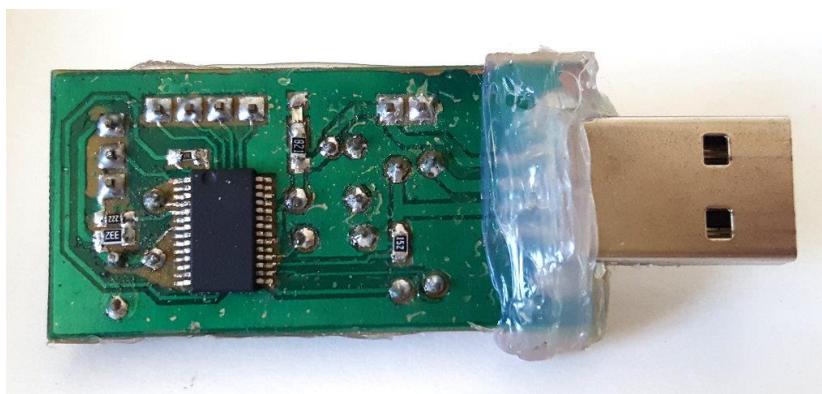
Figura 43 - Esquema do circuito de condicionamento e aquisição dos sinais dos sensores.



Fonte: Elaboração própria.

Foi feito um circuito auxiliar de comunicação (Figura 44) com a intenção de tornar o circuito versátil, dando suporte a maneiras mais eficientes de comunicação a longa distância, como Bluetooth ou Cabo Coaxial.

Figura 44 - Placa de comunicação.

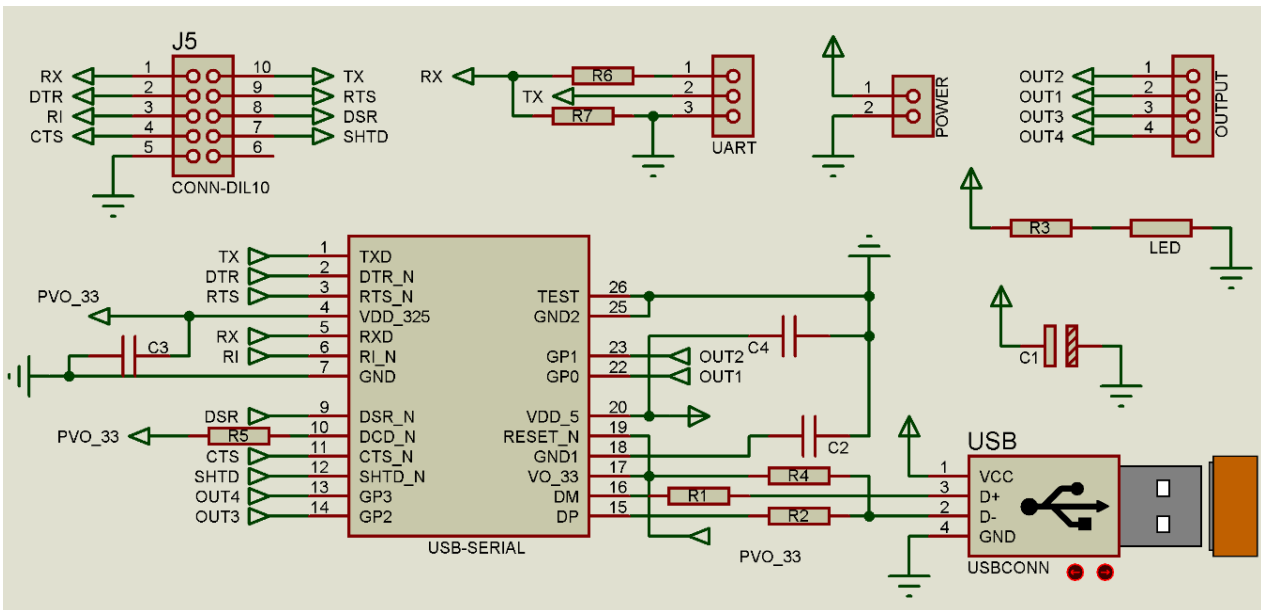


Fonte: Elaboração própria.

Além de permitir a conexão direta entre o micro controlador e o computador por diferentes tipos de protocolo, ele suporta diferentes tipos de tensão, que podem variar entre 3,3 V, 5 V e 15 V, suportando redes industriais e domésticas.

A Figura 45 apresenta o diagrama esquemático do circuito de comunicação, suas conexões de entrada e saída e seus protocolos de comunicação (UART-TTL, COM-Serial e USB).

Figura 45 - Esquema do circuito de comunicação.

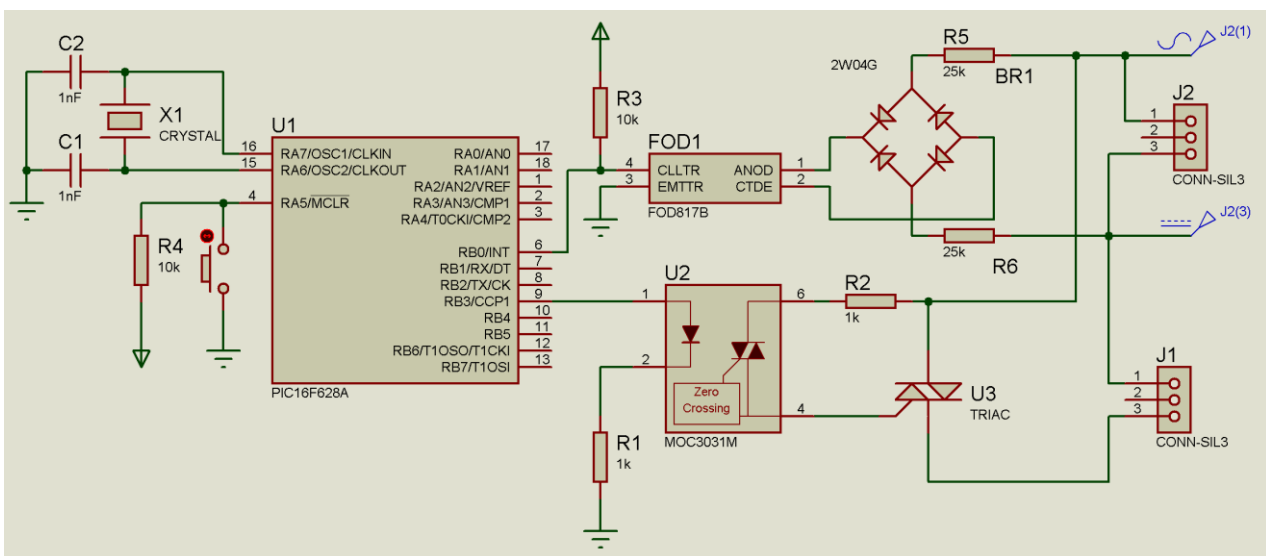


Fonte: Elaboração própria.

Dada a necessidade da sincronização do circuito com a rede AC para o gatilho dos TRIACS, o circuito de *zero-crossing* (cruzamento de zero) se fez necessário para, dessa forma, modular a quantidade de energia liberada do tiristor para o sistema.

A Figura 46 mostra o diagrama do circuito de identificação e sincronização com a rede AC.

Figura 46 - Esquema do circuito de sincronização da rede AC.



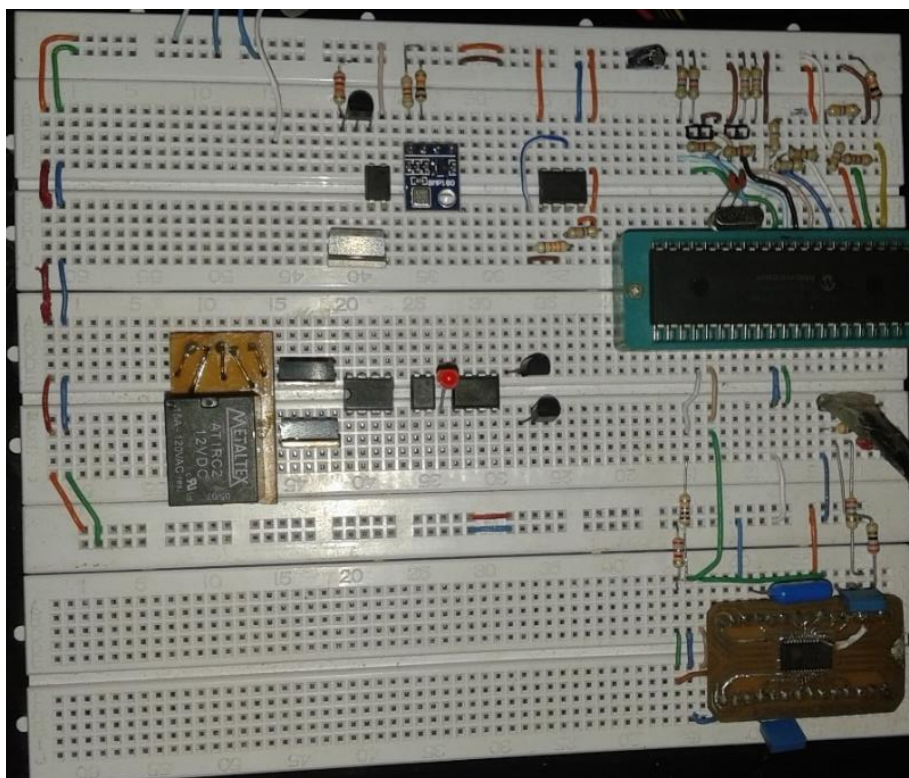
Fonte: Elaboração própria.

Os resultados das simulações foram validados com os sinais esperados e os componentes analógicos foram calibrados, finalizando a etapa de desenvolvimento e iniciando a montagem física das placas.

O circuito piloto foi montado para teste sobre uma placa de desenvolvimento e foram realizados os primeiros testes, sendo que o circuito apresentou instabilidade, possivelmente causada pelo não isolamento dos atuadores. Este problema foi corrigido, posteriormente, com o uso de optoacopladores e optotriacs para o acionamento.

A Figura 47 mostra a placa de desenvolvimento com os sistemas básicos mostrados nas Figuras 43, 45 e 46.

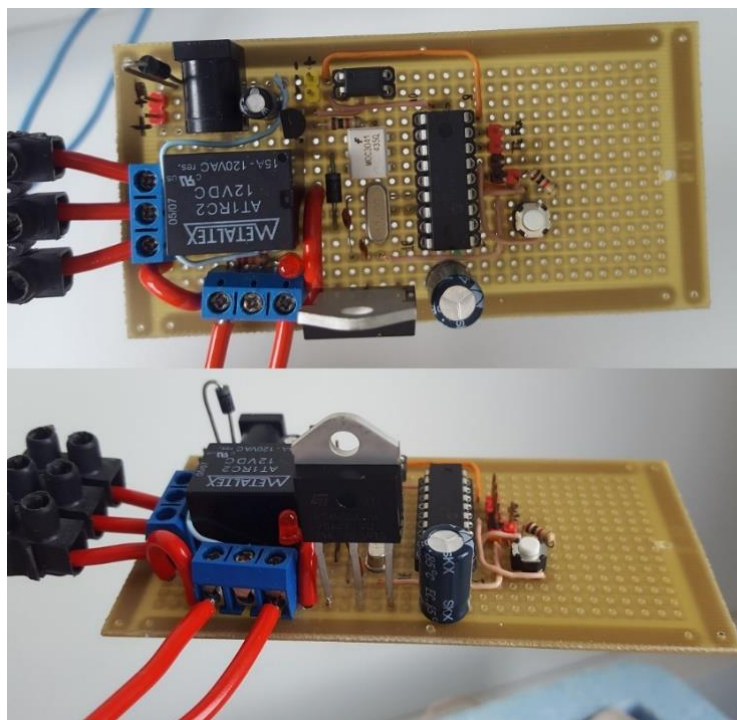
Figura 47 - Placa de protótipo do sistema de aquisição e controle.



Fonte: Elaboração própria.

Para melhor desempenho do sistema este circuito foi montado em uma placa ilha, facilitando o manuseio e diminuindo a quantidade de conexões, evitando assim falhas nos contatos dos conectores. Este circuito pode ser visto na Figura 48.

Figura 48 - Placa de controle.



Fonte: Elaboração própria.

2.3 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO

Para encontrar o melhor *startup* da cultura de bactérias, várias rampas de temperaturas foram testadas com a finalidade de encontrar a taxa de variação de temperatura mais rápida possível para a adaptação celular sem ocorrer apoptose (morte celular).

Como se espera que a maior frequência do sistema seja a do sinal de temperatura, a frequência de aquisição será o dobro da frequência de resposta do sensor, que é aproximadamente de 20 segundos. Já o tempo de aquisição será o tempo necessário para que todo o substrato de uma batelada seja consumido.

2.3.1 Sinal de entrada em rampa

Para encontrar a rampa ideal o controlador está programado para utilização de método de convergência para a regressão, o qual funciona fazendo a média do último valor de entrada válido com o último inválido e substituindo os respectivos valores pela resposta mais recente válida ou inválida, encontrando, assim, a região de convergência entre eles.

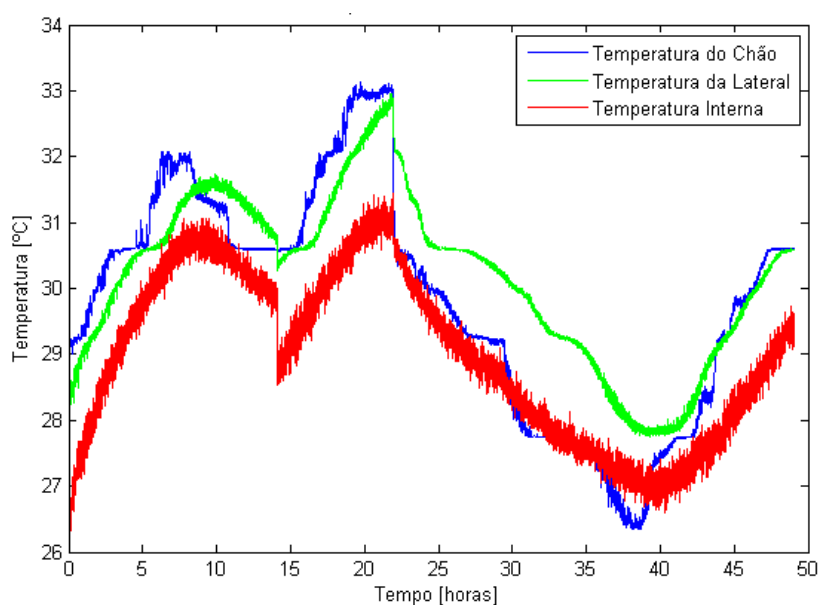
2.3.2 Sinal de entrada em degrau

Da mesma forma que o sinal da temperatura em rampa, foram testados os sinais em função degrau com a finalidade de verificar a robustez das células e a sua capacidade de adaptação. Quanto maior a robustez dos microrganismos maior será a diferença de temperatura suportada.

3 RESULTADOS

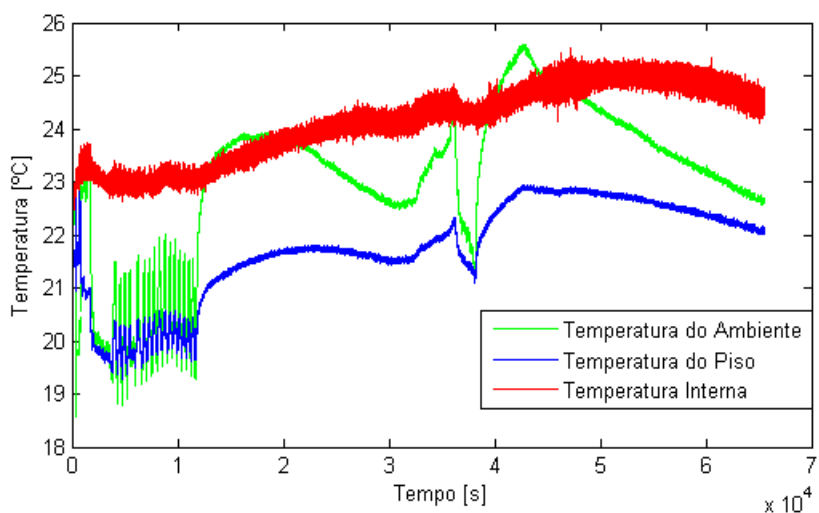
No biodigestor menor, a cultura de bactérias presente no substrato controlou a temperatura no seu interior, mantendo numa faixa ótima para o metabolismo anaeróbico mesofílico, cabendo ao sistema de controle contornar esta situação compensando o sistema com aquecimento e pressão no interior do tanque. Nas Figuras 49 e 50 são apresentadas as variações de temperatura com o tempo para tanque estéril e com substrato, respectivamente.

Figura 49 - Resultados térmicos para tanque estéril (sem substrato).



Fonte: Elaboração própria.

Figura 50 - Resultados térmicos para tanque com substrato.



Fonte: Elaboração própria.

Para as funções em rampa as variações mais rápidas de temperatura acabaram esterilizando o sistema, com variações pequenas, suficiente para fazer as bactérias se adaptarem, o processo fermentativo entra em equilíbrio em alguns dias.

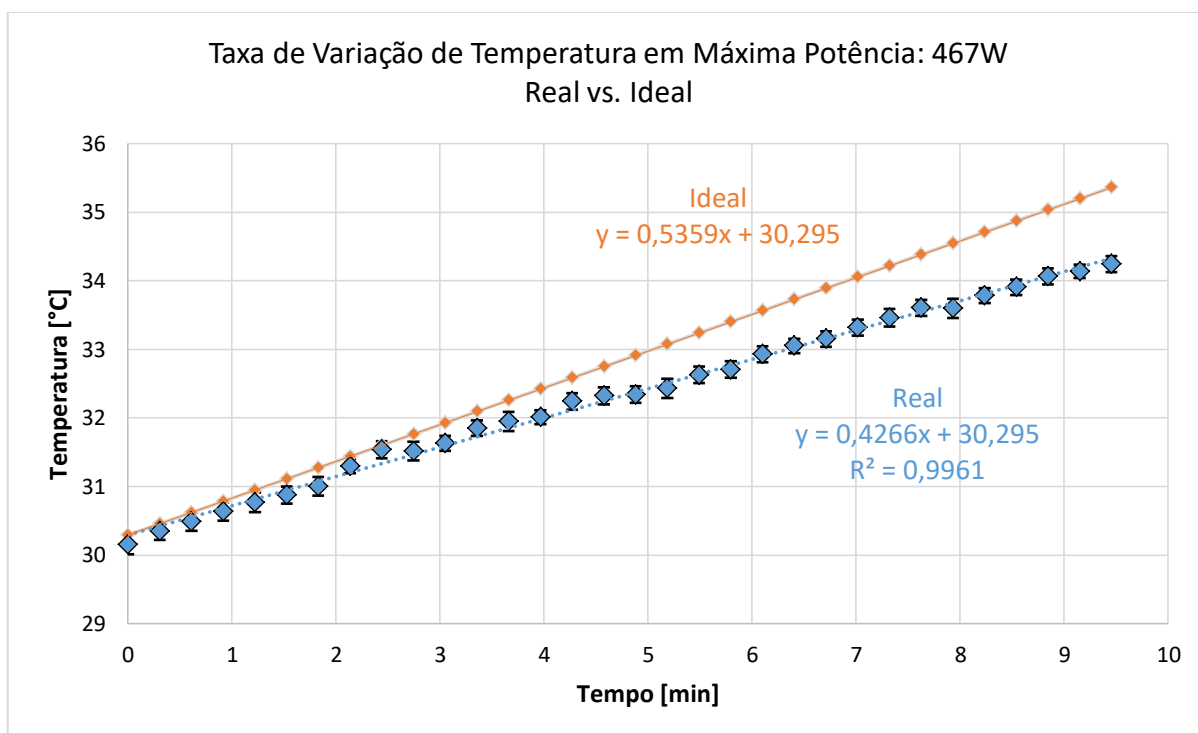
Para as funções em degrau a resposta adaptativa das bactérias é mais instável, pelas próprias características de crescimento das colônias bacterianas, tendo uma zona de erro entre taxas de variação de temperatura não letais e letais à cultura.

A repetitividade de resultados da bancada foi verificada, em relação aos mesmos estímulos iniciais.

O primeiro teste foi uma função degrau com a potência total do sistema. Foram medidas a corrente e a tensão no sistema (3,8 A e 123 V, respectivamente) e depois calculada a potência (467 VA). Como é sabido que a carga é totalmente resistiva, ela foi assumida como sendo 467 W com desfasamento 0.

Foi produzida então uma projeção baseada no aquecimento ideal do fluido circulante, no caso a água, e também uma regressão (linear) dos valores da temperatura adquiridos do sistema, conforme mostra a Figura 51.

Figura 51 - Resultado da aquisição versus simulação da temperatura de uma entrada degrau, 467 W e bombeamento no fluido no sistema.

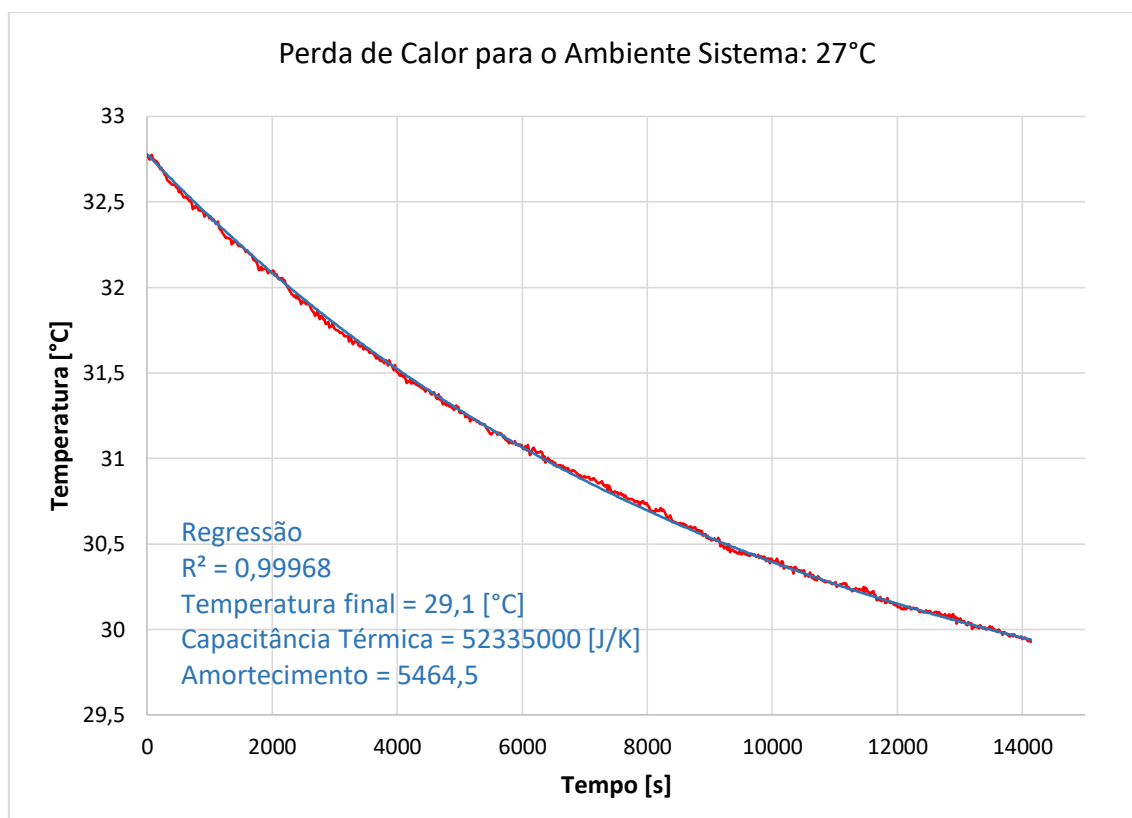


Fonte: Elaboração própria.

Como é visível, o sistema real não dissipa toda a potência no fluido. Isso se deve a perdas em vários pontos do sistema, como cabos, evaporação do fluido, transferência de calor para o ambiente e aquecimento do entorno do sistema. Porém, a maior parte delas é de ordens de grandeza muito menores que outras (10000 vezes menores). Dessa forma foram analisadas apenas as perdas relevantes, como é o caso da transferência térmica para o ambiente.

Para uma regressão realista foi usado o modelo da capacitância térmica, descrito no item 1.5.4. Sendo que os resultados da regressão podem ser vistos na Figura 52.

Figura 52 - Regressão do sinal de descarga do sistema com ajuste de curva para o modelo da capacitância térmica.



Fonte: Elaboração própria.

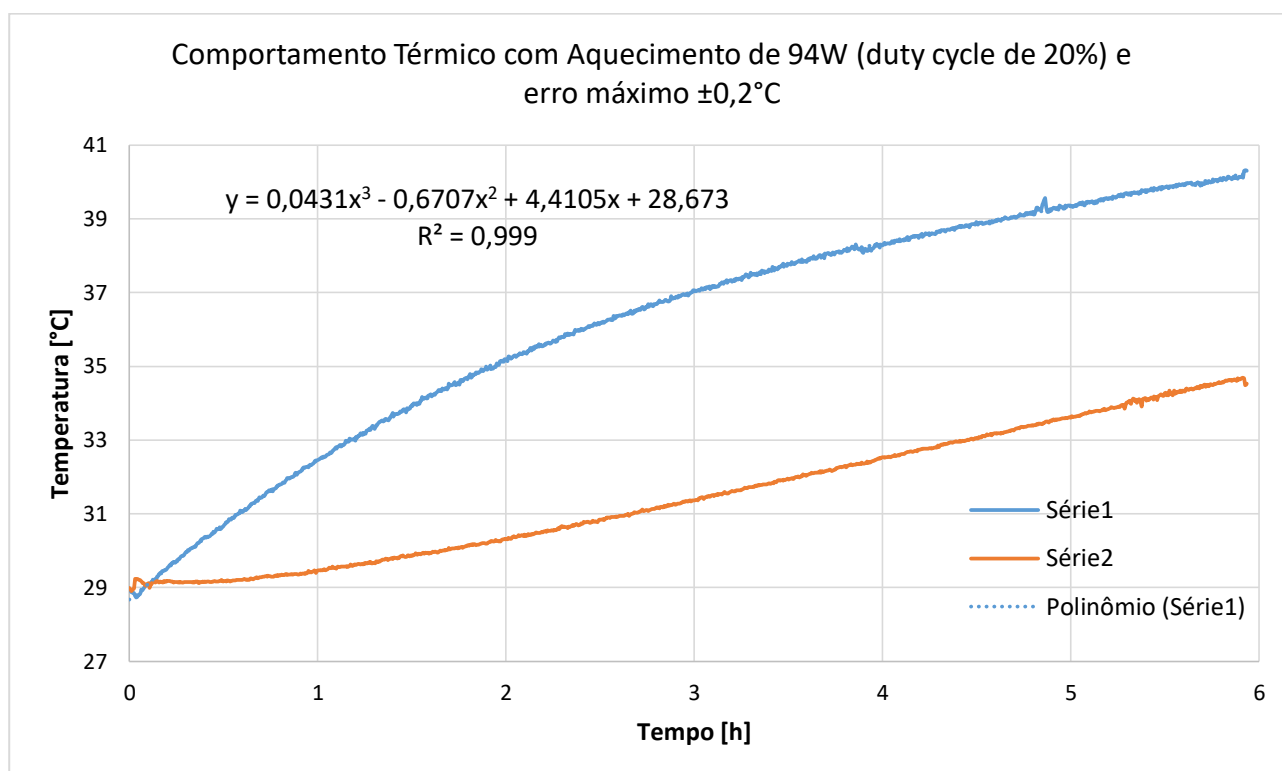
Este teste foi feito com o sistema de aquecimento desligado, e foi aguardado até que o sistema esfriasse, apenas com a operação da bomba centrífuga do banho térmico, dessa forma a maior perda foi por convecção.

Com estes dados, a resistência térmica do sistema para o ambiente foi determinada e o modelo em MatLab foi alimentado com estas informações.

No teste seguinte outro sinal degrau foi aplicado, porém desta vez com 20% da potência total por um período mais longo, com a finalidade de adquirir os dados de resistência térmica da câmara de fermentação.

Os dados adquiridos são mostrados na Figura 53, assim como a equação que descreve a temperatura do fluido de aquecimento. A Série 1 é a temperatura do fluido de aquecimento enquanto a Série 2 é o fluido da câmara de fermentação.

Figura 53 - Resultados do teste de acionamento de acionamento de longa duração aplicando 20% da potência máxima do sistema.

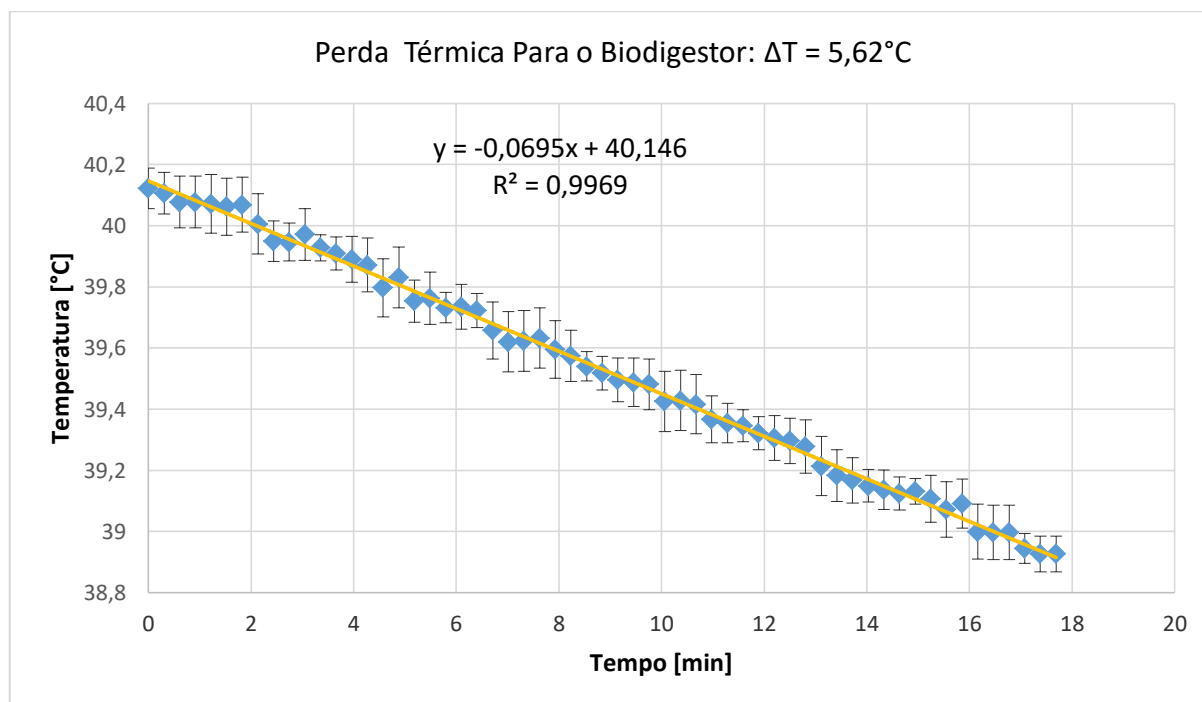


Fonte: Elaboração própria.

Como é visível no resultado do teste, a temperatura da câmara de fermentação não acompanha de imediato a do banho térmico, isso se deve à grande capacitância térmica do tanque de fermentação, que tende a defasar a forma de onda da temperatura, assim como a de um capacitor em um circuito elétrico AC.

Em seguida, a alimentação foi cortada do aquecedor, e novos dados foram obtidos durante o processo de resfriamento do sistema, para análise da resistência térmica do sistema. Os resultados são mostrados na Figura 54.

Figura 54 - Análise de perda térmica do sistema para uma diferença média de temperatura de 5,62°C entre o fluido de aquecimento e o ambiente.

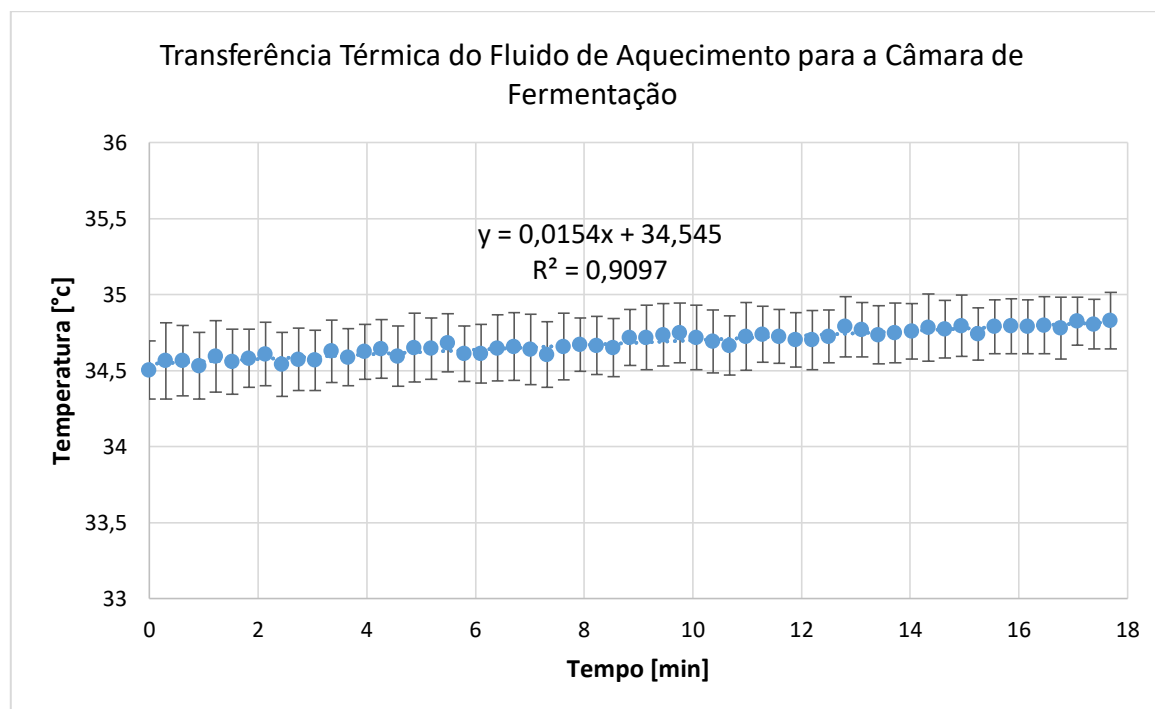


Fonte: Elaboração própria.

Analisando a potência dissipada, a qual diminui a temperatura do fluido de aquecimento, encontra-se uma potência térmica de aproximadamente 60 W, transferida tanto para o ambiente quanto para o biodigestor.

Para fazer o balanço de perdas térmicas e a determinação da transferência efetiva de calor para a câmara de digestão, foi repetida a mesma análise com o resfriamento do substrato. O resultado é mostrado na Figura 55.

Figura 55 - Análise de transferência térmica entre os fluidos do sistema repetindo o procedimento usado para a análise feita na Figura 52.

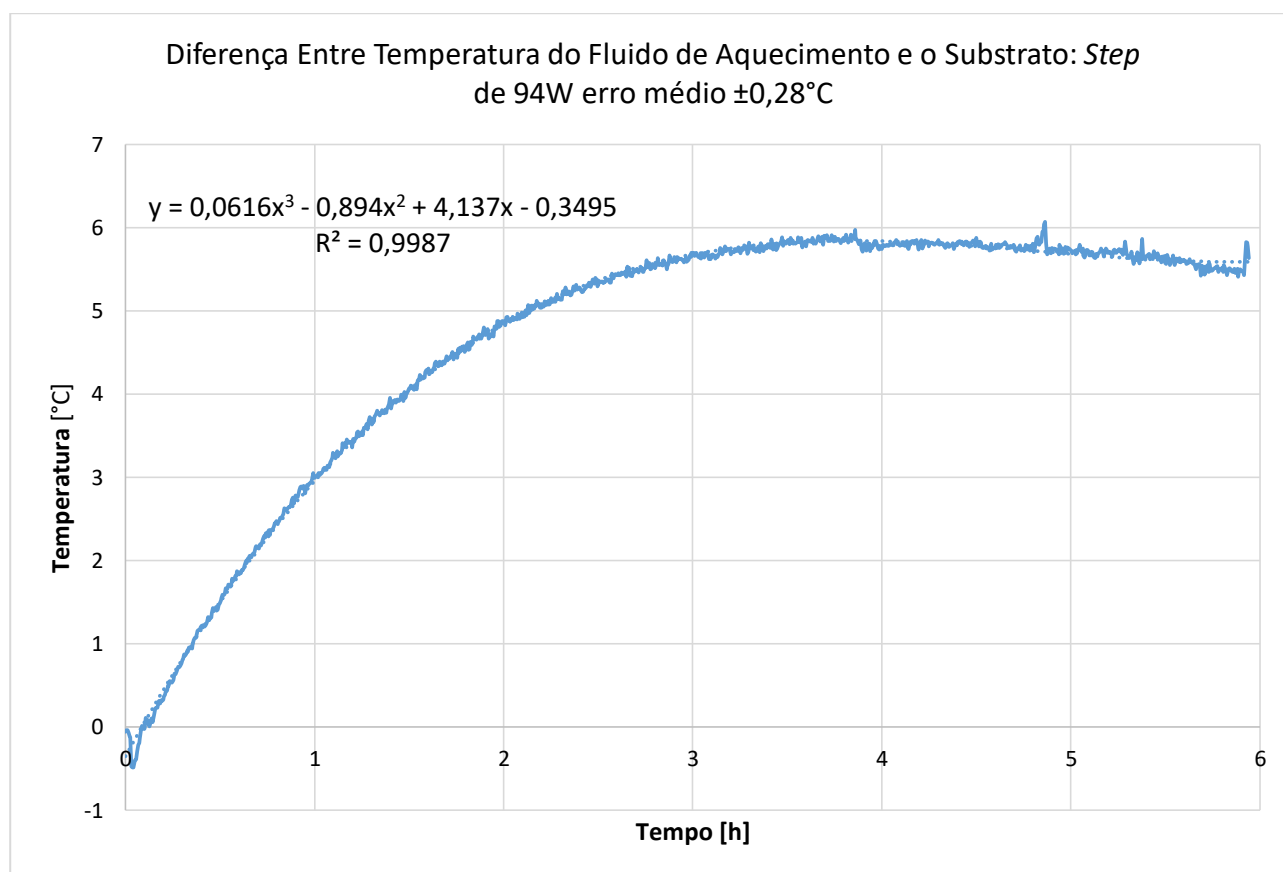


Fonte: Elaboração própria.

Da Figura 55 foi retirada a potência acrescida do sistema (43 W), computando, assim, uma perda térmica do fluido de aquecimento para o ambiente de 17 W.

A transferência de calor entre os dois fluidos, mostrada na Figura 53, é analisada, obtendo-se a diferença entre a temperatura do fluido interno e a do banho térmico, encontrando-se assim o ponto de estabilização, o qual é visível na Figura 56.

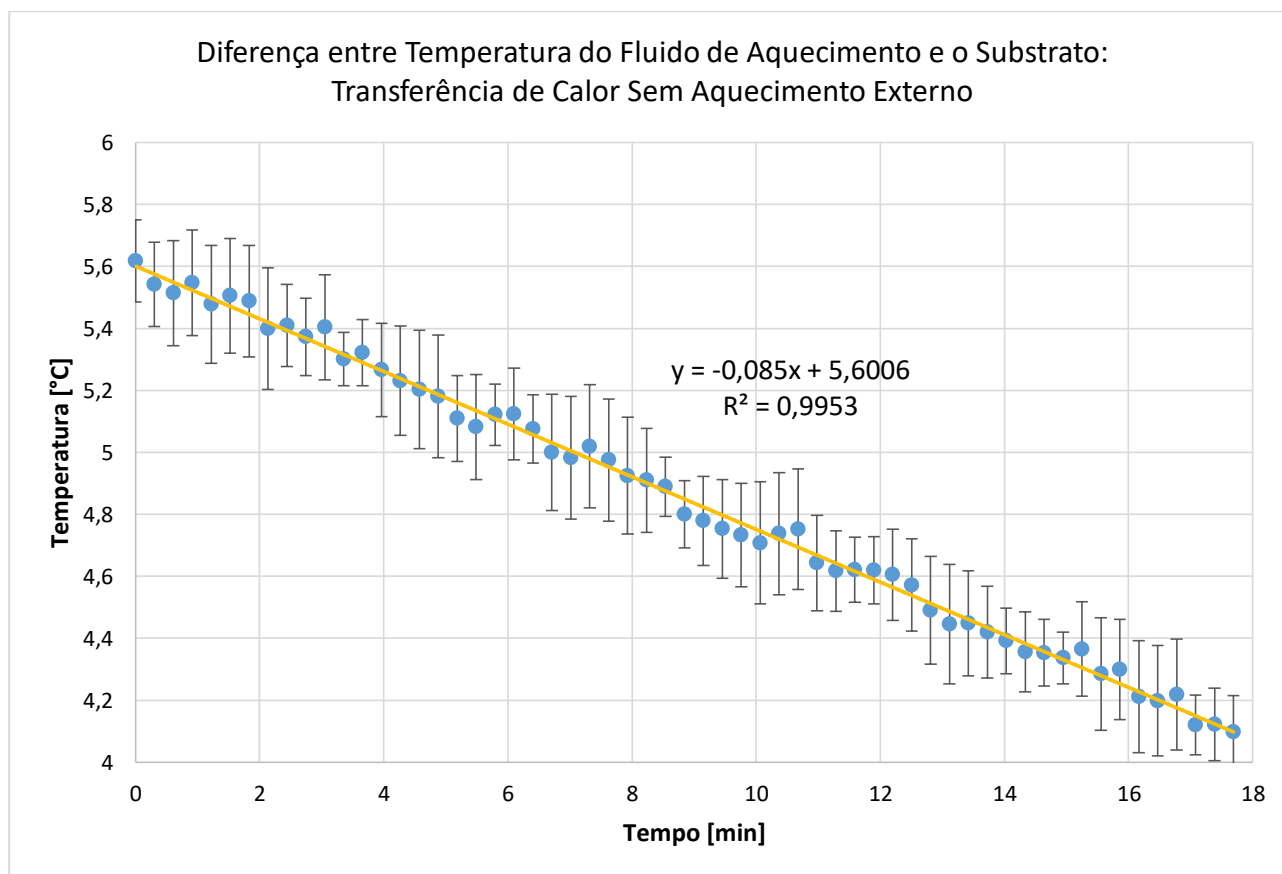
Figura 56 - Análise da transferência térmica entre os dois sistemas durante o teste de acionamento com 20% da potência máxima.



Fonte: Elaboração própria.

É retirada a potência em regime entre as duas temperaturas dos valores do teste de perda térmica do sistema. Fazendo-se uma análise da diferença entre o fluido interno e o banho térmico sem aquecimento, é encontrado o ponto de estabilização, o qual é visível na Figura 57, permitindo, assim, encontrar a potência transferida entre os dois meios.

Figura 57 - Análise de estabilização entre as temperaturas comparando a potência dissipada entre os dois meios.



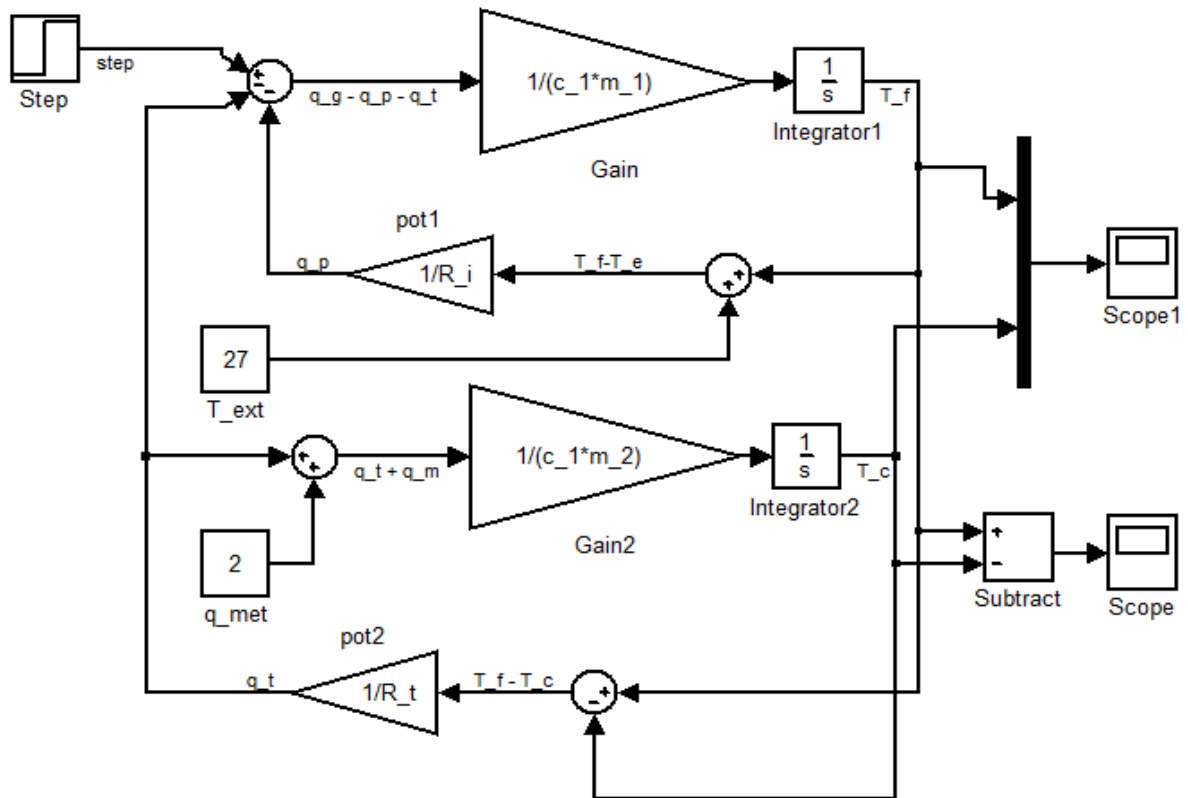
Fonte: Elaboração própria.

Feita a regressão foram encontrados os valores das respectivas potências dissipadas, levando em consideração a potência total injetada no sistema pela resistência elétrica no banho térmico, sendo que os resultados foram: 27,9 W de perda para o ambiente, 50,4 W transferidos para o substrato e 15,7 W permaneceram no fluido de aquecimento.

Fazendo a regressão dos valores e alimentando-os no modelo do MatLab podem ser obtidos os valores para a resistência térmica global do sistema de 1,7 °C/W e a resistência entre o fluido de aquecimento e o substrato de 0,13°C/W:

Para fins de regressão, o modelo da Figura 24 foi adaptado para mostrar os detalhes e permitir que diferentes tipos de sinal de entrada possam ser testados. A Figura 58 mostra o diagrama de blocos usado na regressão.

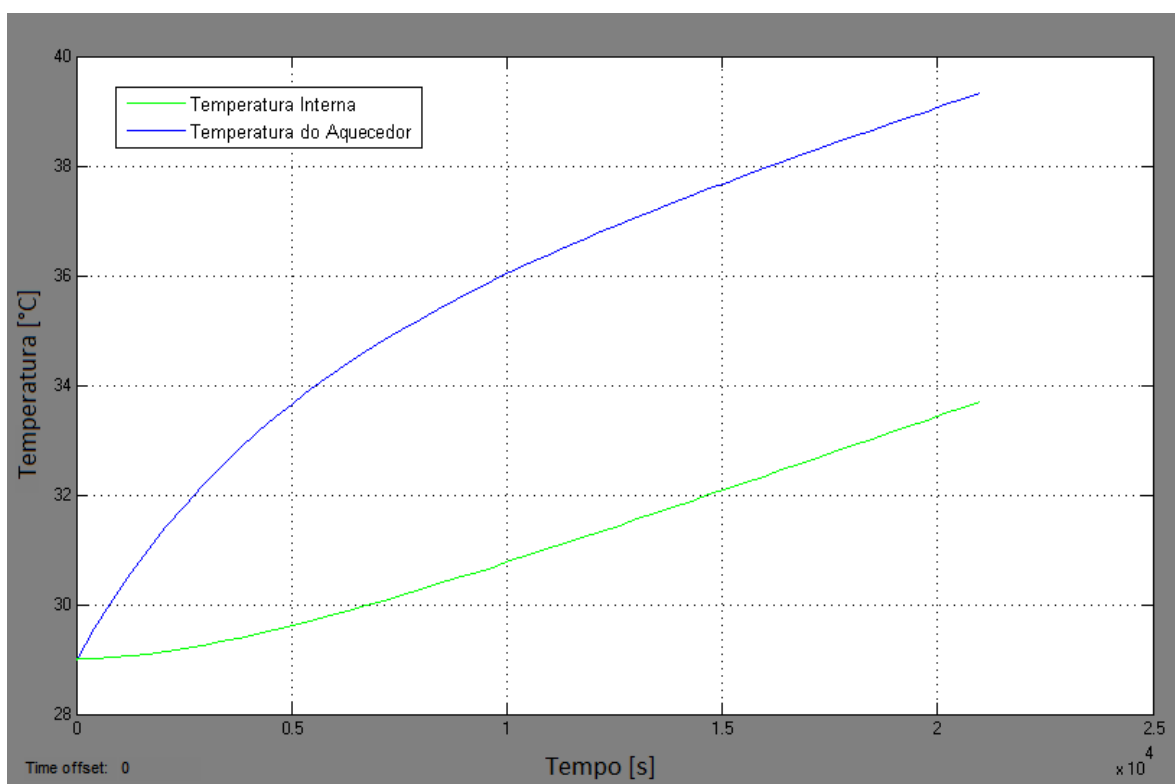
Figura 58 - Modelo em MatLab do teste feito para regressão.



Fonte: Elaboração própria.

A partir de testes de interação na regressão, valores muito próximos dos adquiridos no sistema foram encontrados. O resultado é mostrado na Figura 59, na qual a linha azul é a temperatura do fluido de aquecimento e a linha verde a temperatura do substrato.

Figura 59 - Resultado da simulação baseada no teste de aquecimento do sistema aplicando 20% da potência máxima.



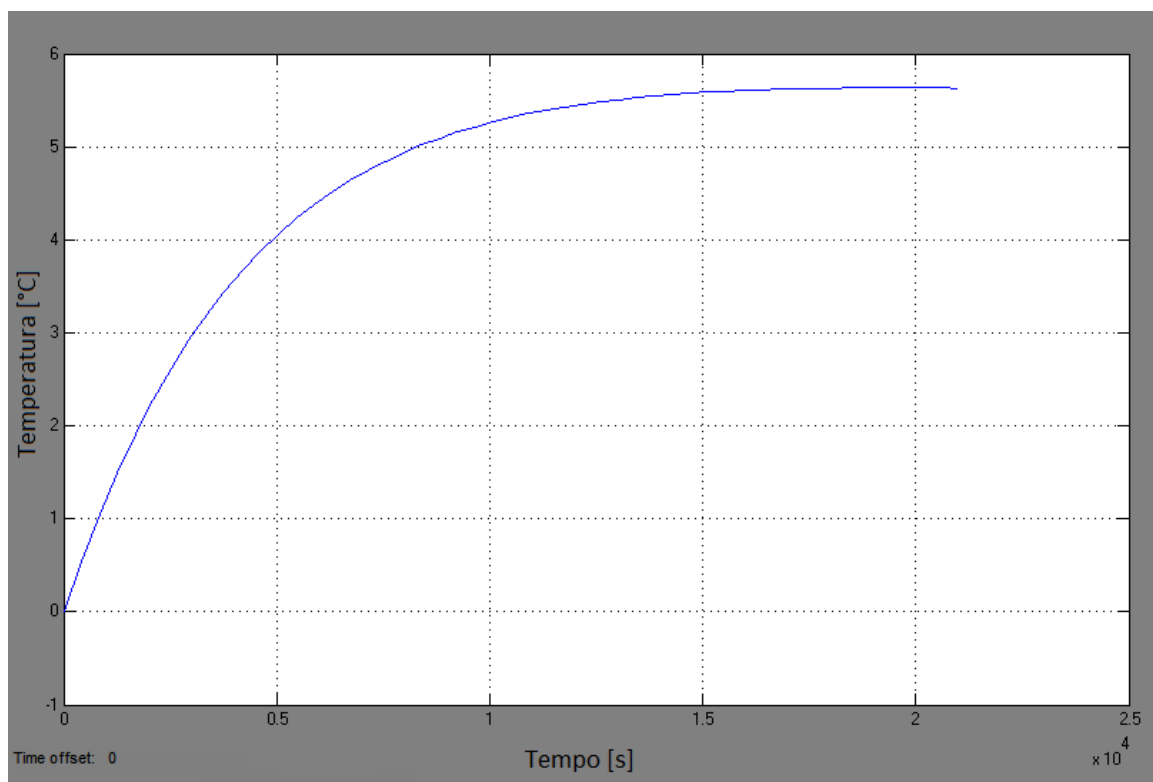
Fonte: Elaboração própria.

Os resultados desta regressão foram: geração de potência térmica de 2 W decorrente de ineficiências no metabolismo das bactérias, resistência do sistema de 1,7 °C/W e resistência interna de troca de calor de 0,17 °C/W.

Já na regressão, os resultados iniciais foram validados com os resultados obtidos no sistema real, porém a partir do ponto onde foi necessário o reabastecimento de água, que havia evaporado do sistema, os valores começaram a se diferenciar.

O gráfico da regressão é mostrado na Figura 60, nele é clara a maior lentidão de acomodação da diferença de temperatura, que é observada no sistema pela Figura 56, no qual depois de 4 horas é acrescentado água em temperatura ambiente.

Figura 60 - Simulação do teste feito no sistema com aquecimento usando 20% da potência total, apresentando a diferença de temperaturas.

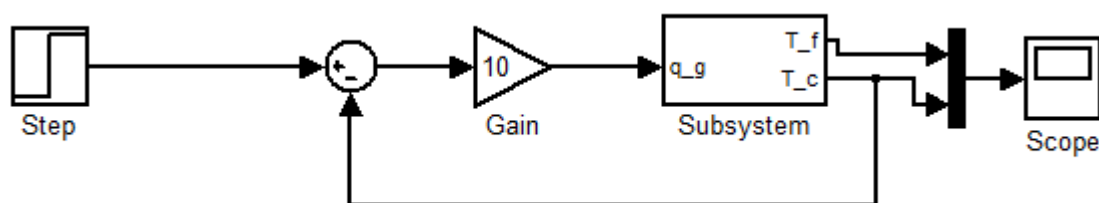


Fonte: Elaboração própria.

Com o sistema modelado corretamente é possível calibrar-se a malha de controle com os ganhos corretos. Porém, para fins de calibração o sistema foi projetado com uma malha de controle analógica.

A Figura 61 mostra em diagrama de blocos o sistema de controle analógico proporcional, no qual a retroalimentação é feita com a temperatura do tambor.

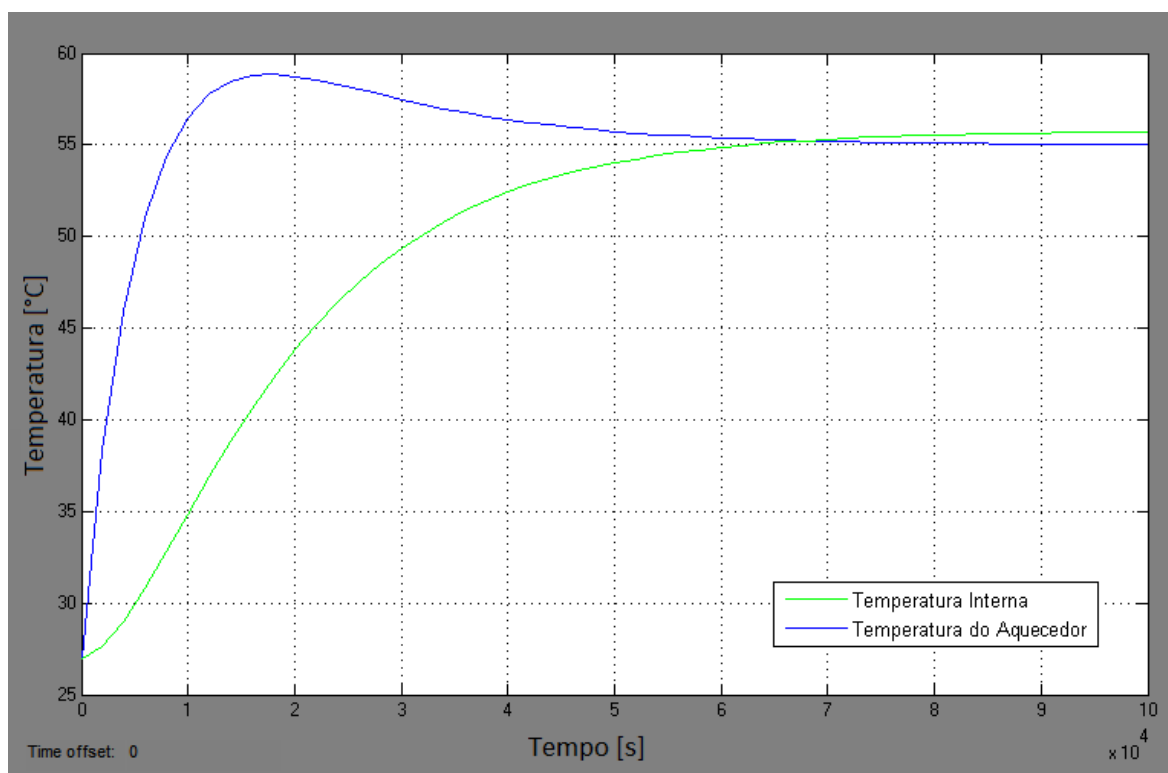
Figura 61 - Modelo do sistema de controle analógico e somente proporcional em malha fechada do sistema.



Fonte: Elaboração própria.

Para um ganho de 10, o resultado é mostrado na Figura 62. O tempo de acomodação é o parâmetro base para este controle, no entanto o *overshoot* não deve exceder de forma alguma 60 °C para não comprometer a cultura de bactérias. Ao diminuir o tempo de acomodação aumenta-se o *overshoot*, logo este parâmetro deve ser adquirido de forma interativa. A linha azul representa a temperatura do fluido de aquecimento e a linha verde representa a temperatura do substrato.

Figura 62 - Resultado da simulação da malha de controle com ganho 10 partindo da condição inicial de 27°C.



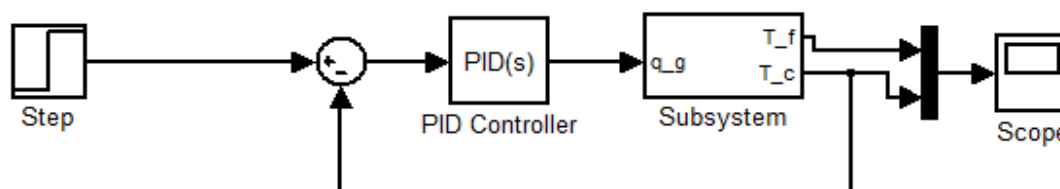
Fonte: Elaboração própria.

Utilizando método da substituição sucessiva como meio de convergência interativa o resultado para o ganho seria (no caso de um controle de ganho apenas proporcional) de 10,4.

A partir disso pode-se tentar melhorar o sistema com um controlador PID, colocando valores próximos do valor ótimo do ganho proporcional e repetindo o teste interativo até a convergência para o valor ótimo.

Na Figura 63 é mostrado o diagrama de blocos da malha de controle. Note que a única mudança foi a troca do ganho proporcional por um PID.

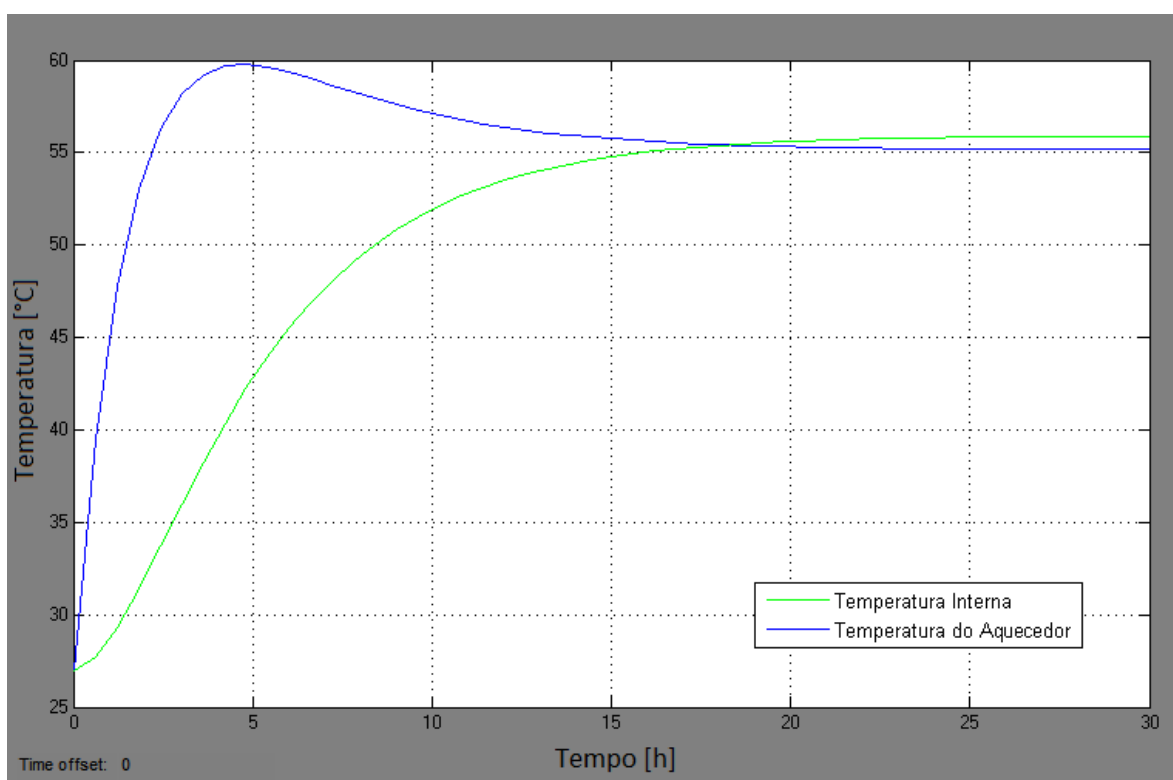
Figura 63 - Modelo do sistema de controle com controlador PID analógico.



Fonte: Elaboração própria.

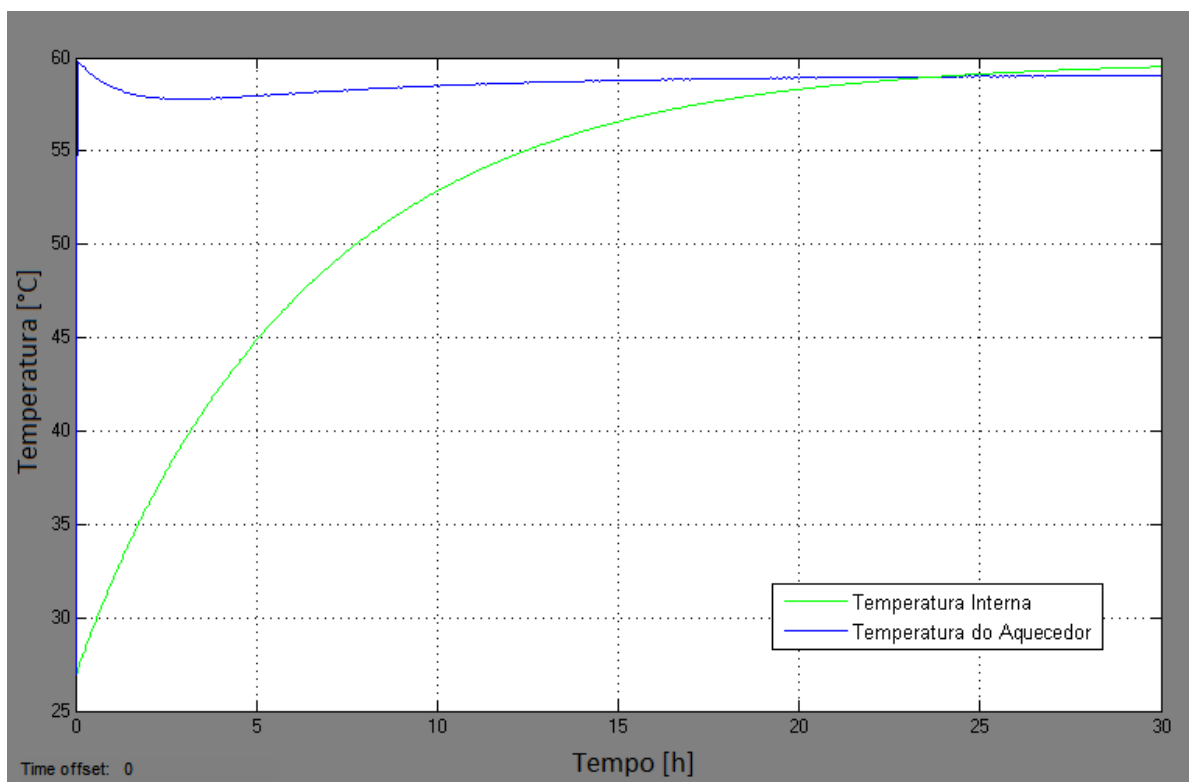
Pelo método iterativo foram encontrados os melhores parâmetros possíveis para o controle, que são: ganho proporcional 10,4, ganho integral 0,2 e ganho derivativo 12,1. Observando que na malha de controle puramente proporcional o valor do controlador nunca consegue acompanhar o objetivo (*step* com 60°C), como mostrado na Figura 64, já o controlador PID atinge o regime permanente em 28 horas (Figura 65). A curva azul e a curva verde são as do fluido do aquecedor e do substrato, respectivamente.

Figura 64 - Resposta do controlador proporcional com ganho de 10,4 nas temperaturas dos dois fluidos.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 65 - Resposta do controlador PID de temperatura com ganhos de 10,4; 0,2 e 12,1, respectivamente.

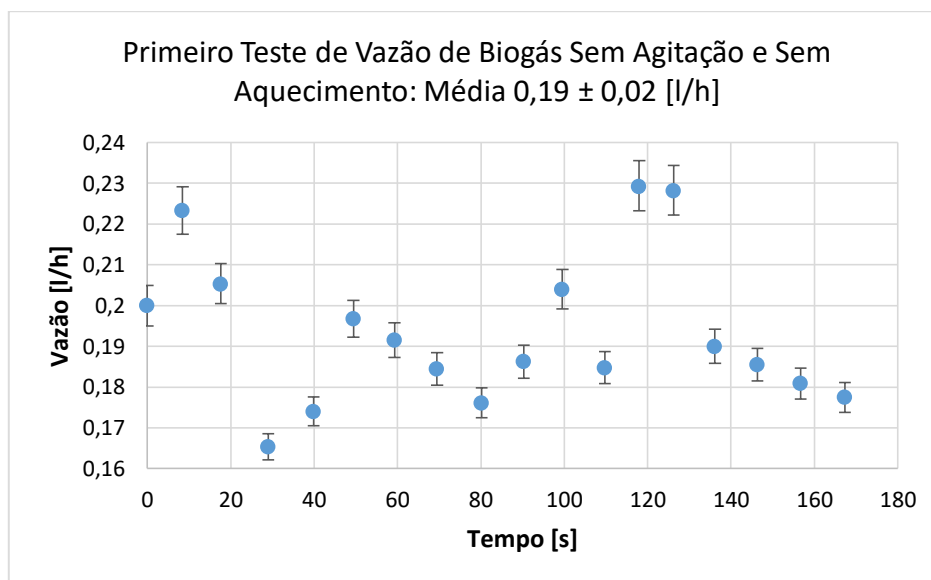


Fonte: Elaboração própria.

A vazão de gás para o tempo e o aquecimento usados não foram maiores, porém, com a agitação, o crescimento tornou-se exponencial. A produção do biogás no grupo controle é mostrada nas Figuras 66 e 67.

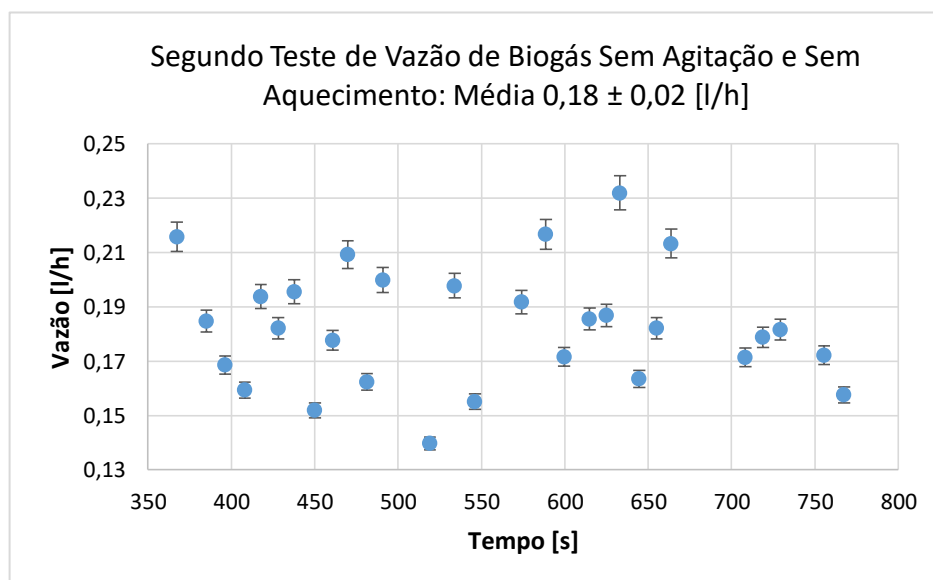
A quantidade de metano gerado nesta etapa é menor que o limite de escala do sensor. Por esta razão não foram mostrados os dados, mas pelo manual de calibração do fabricante deve ser menor que 100 ppm.

Figura 66 - Primeiro teste da vazão de biogás sem a agitação e sem o aquecimento, fase pré-metanogênese.



Fonte: Elaboração própria.

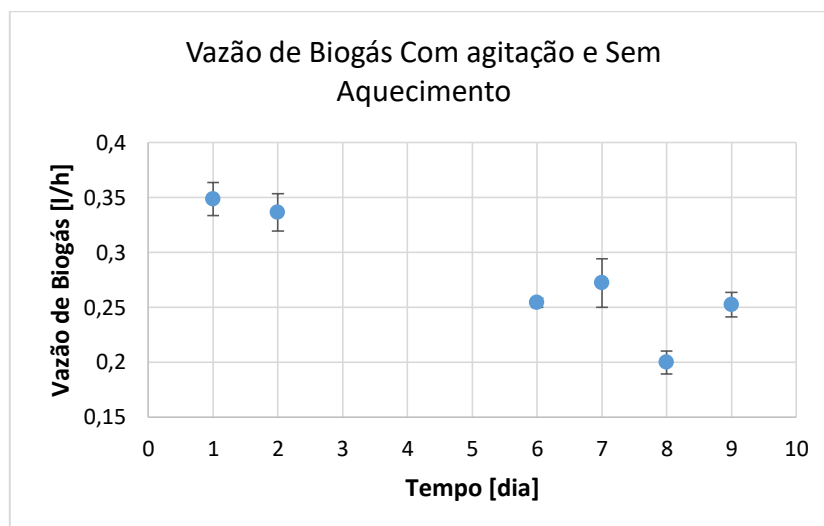
Figura 67 - Segundo teste de vazão de biogás, mantendo as mesmas condições do primeiro teste.



Fonte: Elaboração própria.

Ao começar o teste com agitação, a produção de biogás aumenta instantaneamente. Porém com o tempo a produção parece diminuir. A Figura 68 mostra o acompanhamento da vazão de biogás a partir da primeira semana de agitação, quando a vazão começa a estabilizar.

Figura 68 - Vazão do biogás gerado com agitação e sem aquecimento, mostrando tendência de diminuição da produção de biogás com o tempo.

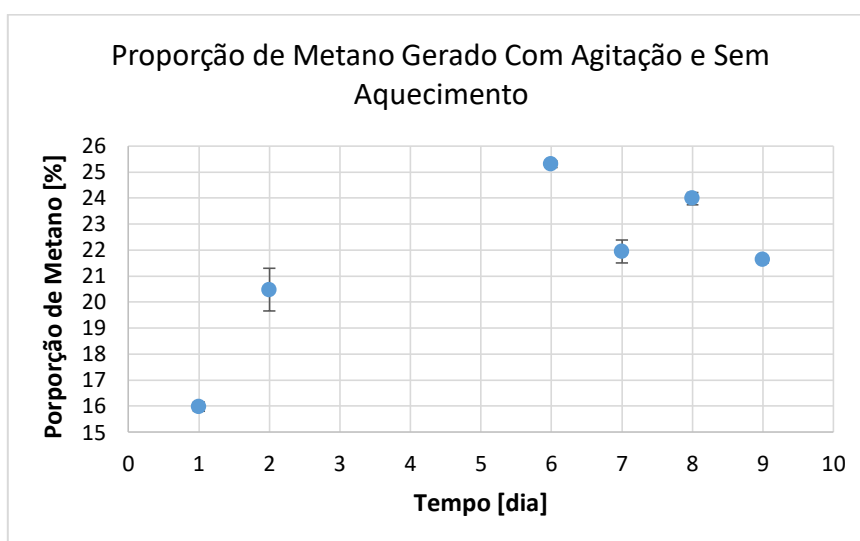


Fonte: Elaboração própria.

Com o tempo de digestão e com a ajuda da agitação a produção de metano no biogás tornou-se mensurável. A partir deste ponto, mais este parâmetro foi acompanhado.

O valor inicial detectado de metano foi da ordem de 4% no biogás, 23 dias após o início da batelada, sendo mantido este valor por uma semana, aumentando na taxa de 3% por dia até o início da aquisição dos dados e da estabilização da vazão. Os valores adquiridos são mostrados na Figura 69.

Figura 69 - Aumento da proporção de metano com o tempo, facilitado pela agitação, sem aquecimento.

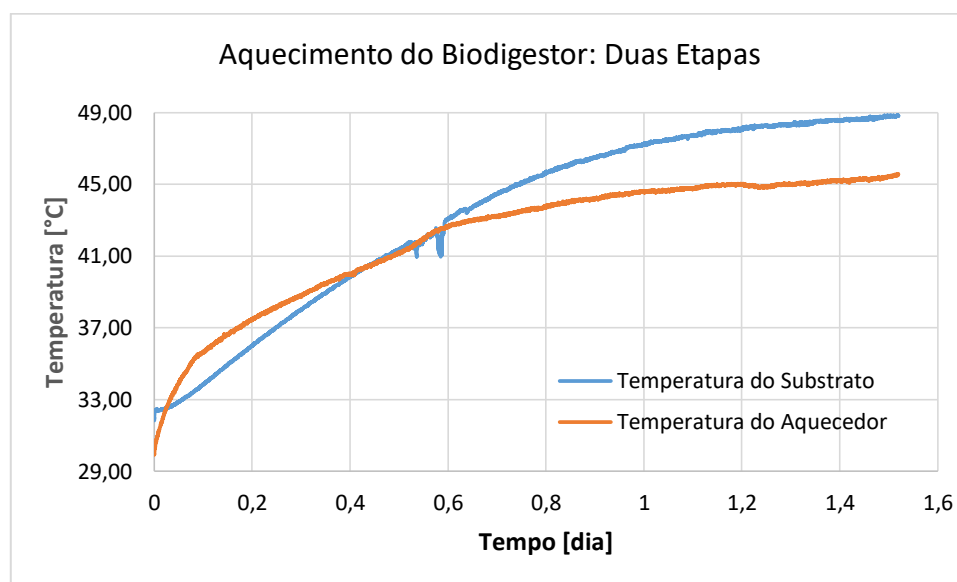


Fonte: Elaboração própria.

Durante o aquecimento uma função rampa foi colocada para a chegada até a temperatura de início da fase termofílica para a adaptação das bactérias, e após a estabilização em cada fase a temperatura é incrementada em 1°C a cada dia.

A Figura 70 mostra o aquecimento ao longo do tempo do biodigestor.

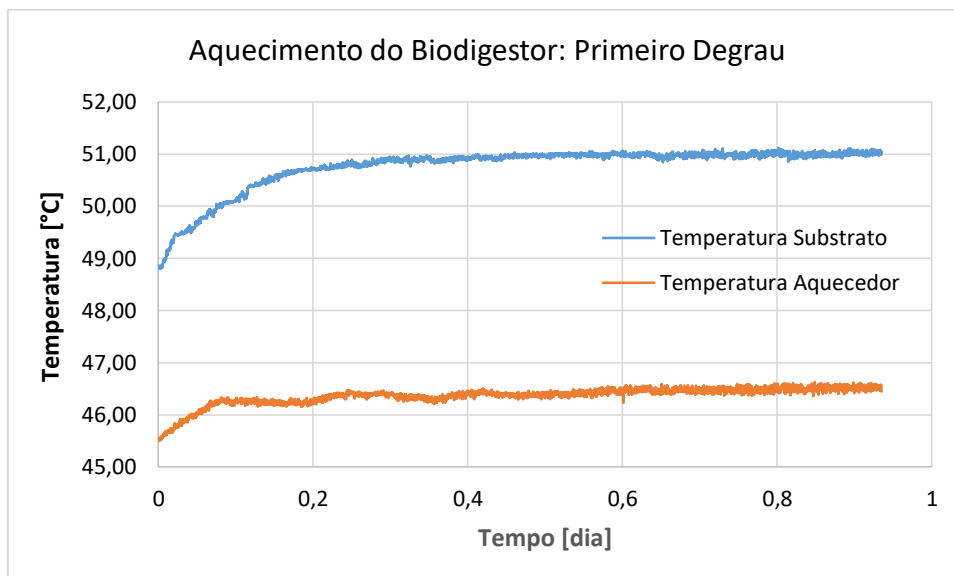
Figura 70 - Aquecimento do substrato em rampa e estabilizador da temperatura pós-aquecimento.



Fonte: Elaboração própria.

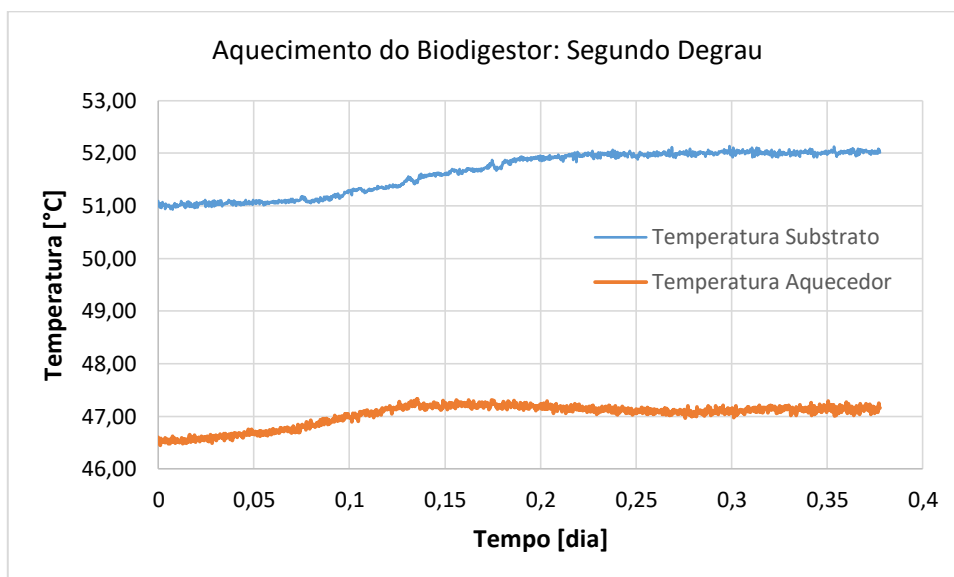
As Figuras 71 e 72 apresentam os incrementos até a temperatura alvo da fase termofílica.

Figura 71 - Primeiro teste com sinal degrau e espera até a estabilização.



Fonte: Elaboração própria.

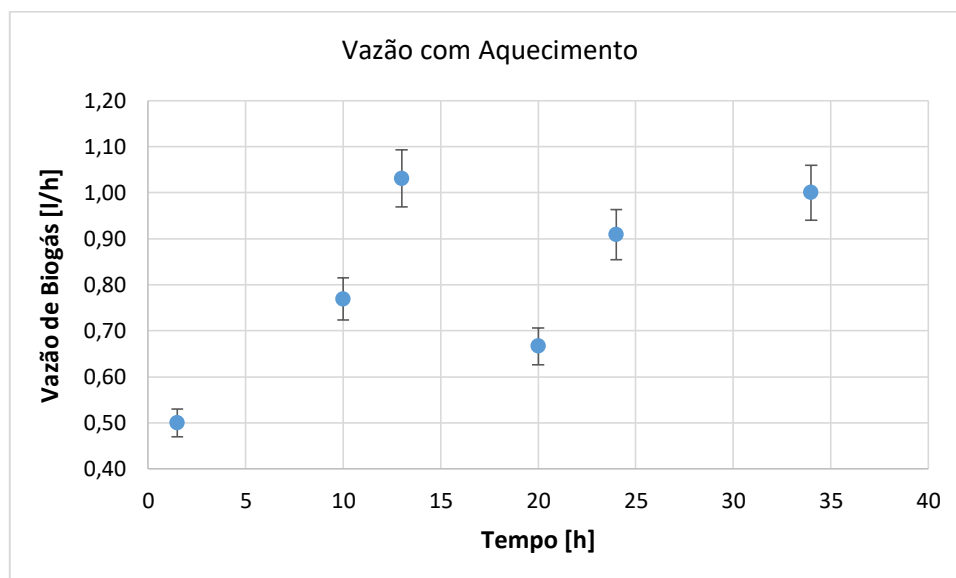
Figura 72 - Segundo teste com degrau com amplitude menor que o primeiro teste.



Fonte: Elaboração própria.

Após o aquecimento, para garantir que os gases são provenientes da biodigestão, não foi adquirida a vazão durante todo o processo de aquecimento, sendo os valores mostrados na Figura 73.

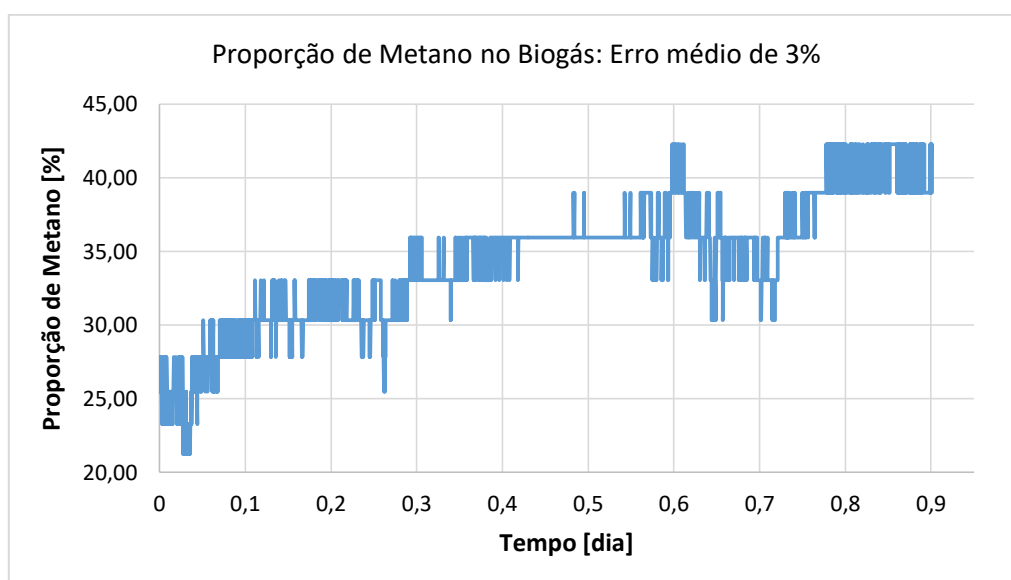
Figura 73 - Vazão de biogás com substrato aquecido e estabilizado.



Fonte: Elaboração própria.

A presença de metano no biogás aumenta (como esperado) com o aumento da temperatura, porém a estabilização da produção de gás é demorada, sendo que somente após 5 dias de estabilização da temperatura a vazão e a proporção de metano começaram a estabilizar. A estabilização da proporção de metano é mostrada na Figura 74.

Figura 74 - Proporção de metano após a estabilização da vazão de biogás, com o substrato aquecido a 51°C e com agitação constante.



Fonte: Elaboração própria.

4 CONCLUSÕES

4.1 CONCLUSÕES ACERCA DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA

Variações de temperatura naturais de características senoidais aparentam ter pouco impacto sobre o metabolismo das bactérias na faixa de temperatura mesófila, conforme esperado, pois isso acontece naturalmente nos biodigestores que não tem sistema de aquecimento.

Variações bruscas e repetitivas com frequências acima de 10^{-3} Hz também aparentam não ter efeito sobre a cultura de bactérias, o que leva a crer que o efeito da capacitância térmica funciona como um filtro passa baixa, que corta os efeitos das altas frequências, permitindo apenas que se conserve o nível DC do sinal.

Pode ser observado também que o ruído provocado pelo fluido é maior que o ruído externo (que está exposto apenas à atmosfera) no primeiro teste de biodigestão. Como os resultados foram vistos apenas no primeiro teste pode ser concluído que a imersão direta do sensor sem as devidas proteções acrescenta ruído de alta frequência no sistema.

4.2 CONCLUSÕES ACERCA DO BIOGÁS

Depois de algumas modificações, com a finalidade de otimizar o sistema, foi verificado ser desnecessário o sensor de CO_2 porque na filtragem do biogás, pela malha de aço foi eliminado qualquer traço de ácido sulfídrico e hidrogênio, sobrando dois componentes, o CO_2 e o CH_4 , sendo que se estiver calibrado o sensor de metano para concentração máxima em partes por milhão é possível que ele dê a quantidade percentual do volume de metano.

A proporção de metano aumenta proporcionalmente com a temperatura, porém a geração e a proporção de metano demoram para atingir a estabilidade.

4.3 CONCLUSÕES SOBRE AS VARIAÇÕES BRUSCAS NA PRODUÇÃO DE GÁS

Pelo aquecimento do sistema, o biogás expande e passa a falsa impressão de que o sistema está gerando mais gás, porém, com a estabilização da temperatura, foi verificado que a saída de biogás não foi tão expressiva, logo pode ser concluído que não foi gerada quantidade relevante de biogás no período que estava em processo de aquecimento, tendo ocorrido apenas a expansão do biogás já existente.

Logo, com o aquecimento do biogás, independente da velocidade, ocorre uma interferência na medida do volume do gasômetro. Uma estratégia para contornar o

problema seria a conversão de molaridade do gás e a temperatura para poder descontar o efeito do volume do gás expandido no volume final.

4.4 CONCLUSÕES SOBRE A GERAÇÃO DE CALOR DENTRO DO SUBSTRATO

À medida que o tempo passou a temperatura dentro do biodigestor subiu sozinha. Uma suposição seria a do crescimento celular porque quanto maior a quantidade de células dentro do biodigestor maior a quantidade de perdas por atividade metabólica, se essas perdas forem lineares a quantidade de calor dissipado dentro do biodigestor vai ser linear também.

Mesmo sem metano, o processo de biodigestão continua ocorrendo dentro do biodigestor. A temperatura dentro dele sempre fica cerca de 1 grau acima da temperatura exterior, indicando atividade celular mesmo que modesta, talvez indicando que as bactérias estejam na fase *lag* ou na fase *death*, de modo que se possa acompanhar o crescimento celular através do calor que ela dissipa.

REFERÊNCIAS

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.

BOE, K.; ANGELIDAKI, I. Serial CSTR digester configuration for improving biogas production from manure. **Water Resource**, Moscow, v. 43, n. 1, p. 166-72, 2009.

BORBA, A. P.; SOUZA, J.; SCHAEFFER, L. Ferramentas computacionais aplicadas em processos de fabricação de plantas de biodigestão. In: INOVA MUNDI, 2012, Novo Hamburgo. **Anais...** Novo Hamburgo: Feevale, 2012. p. 1-4.

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.

CALLISTER, JR.; WILLIAM, D. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CERVI, R. G.; ESPERANCINI, M. S. T.; BUENO, O. C. Viabilidade econômica da utilização do biogás produzido em granja suinícola para geração de energia elétrica. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 5, p. 831-844, 2010.

CHELLIAPAN, S.; WILBY, T.; SALLIS, P. J. Effect of hydraulic retention time on up-flow anaerobic stage reactor performance at constant loading in the presence of antibiotic tylosin. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, São Paulo, v. 28, n. 1, p. 51-61, 2011.

CHORIT, W.; WISARNWAN, P. Effect of temperature on the anaerobic digestion of palm oil mill effluent. **Electronic Journal of Biotechnology**, Valparaiso, v. 10, n. 3, p. 376-386, 2007.

COX, M. M.; NELSON, D. L. **Princípios de bioquímica de Lehninger**. 6. ed. Cidade: Artmed, 2014.

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M. C. J. P.; ROSSI, M. et al. Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas. **Anais...** Campinas: [s. n.], 2002.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from waste and renewable resources**. [S. l.: s. n.], 2008.

DORS, G. **Hidrólise enzimática e biodigestão de efluentes da indústria de produtos avícolas**. 2006. 101 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Processos Químicos e Biotecnológicos) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

HAYKIN, S.; VEEN, B. V. **Sinais e sistemas**. 2. ed. Cidade: Bookman, 2008.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

KONRAD, O. et al. Potential of biogas production from swine manure supplemented with glycerine waste. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, n. 5, p. 844-853, 2014.

NISE, N. S. **Control systems engineering**. 6. ed. Hoboken: Wiley, 2011.

OGATA, K. **Discrete-time control systems**. 2. ed. Minnesota: Prentice-Hall, 1995.

ORRICO JUNIOR, M. A. P.; ORRICO, A. C. A.; LUCAS JUNIOR, J. Biodigestão anaeróbia dos resíduos da produção avícola: cama de frangos e carcaças. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 3, p. 546-554, 2010.

ORRICO JUNIOR, M. A. P.; ORRICO, A. C. A.; LUCAS JUNIOR, J. Avaliação de parâmetros da biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos alimentados com dietas à base de milho e sorgo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 4, p. 600-607, 2010.

SWINNEN, I. A. M. et al. Predictive modelling of the microbial lag phase: a review. **International Journal of Food Microbiology**, Amsterdam, v. 94, p. 137-159, 2004.

VILLEN, R. A.; LIMA, U. A.; AQUERONE, E.; BORZONI, W.; SCHIMIDELL, W. **Tratamento biológico de efluentes**. São Paulo: Edgar Blucher, 2001. (Biotecnologia Industrial, v. 3)

PEREIRA, F. M. **Modelagem e simulação de processos fermentativos**. São Paulo, 2015. Disponível em: <<http://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5817066/94/MSPF.pdf>>. Acesso em: 03 maio 2015.

VISHAY. **Application note of resistive products: NTC Thermistors**. [S. l.], 2012.

THERMISTOR calculator. v1.1. [S. l.]: Stanford Research Systems, 2016. Disponível em: <<http://www.thinksrs.com/downloads/programs/Therm%20Calc/NTCCalibrator/NTCCcalculator.htm>>. Acesso em: 12 mar. 2016.

APÊNDICE A - *FIRMWARE* DO CONTROLADOR PID

Os *firmwares* do micro controlador responsáveis pelo controle da temperatura foram desenvolvidos em linguagem C e são mostrados e comentados a seguir.

PROGRAMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS:

```
#include <aquisicao01.h>
#include <math.h>

int1 iniciar;

#define NDADOS 255
#define NFDESV 64.0
#define NDESVI 64
#define TFILTR 43
#define T_ERRO 10
#define T_AQUI 2820 //Período da aquisição - (offset de 7,18 segundos)
#define CONVER 0.0195
#define RES_01 14820.0
#define RES_02 14680.0
#define FATMT1 2.07
#define FATMT2 2.448

#INT_EXT
void EXT_isr(void)
{
    iniciar = true;
    output_low(PIN_A0);
}

#INT_RDA
void RDA_isr(void)
{

}

float NTC(float rpw, float vt, float fm);
void JLine(void);
```

```

void main()
{
    int8 i,j,k;
    int8 nv[NDESVI];
    int16 M,bf;
    int32 t = 0;
    float vt,Md,s,dm,r,vr,res,ps,ng;

    output_high(PIN_A0);
    output_high(PIN_A1);

    setup_adc_ports(sAN4|sAN5|sAN6|sAN7);
    setup_adc(ADC_CLOCK_DIV_2);

    enable_interrupts(INT_EXT);
    enable_interrupts(INT_RDA);
    enable_interrupts(GLOBAL);

    iniciar = false;
    delay_ms(1000);

    //-----Iniciar ADC-----
    output_low(PIN_A0);
    set_adc_channel(4);
    delay_ms(30);

    while(true)
    {
        printf("T:%lu ",t);
        for(i=4;i<8;i++){
            set_adc_channel(i);
            delay_ms(T_AQUI);
        }
        //-----Aquisição-----
        for(j=0;j<NDESVI;j++){
            delay_ms(T_ERRO);
            bf=0;
            for(k=0;k<NDADOS;k++){
                delay_us(TFILTR);
                bf += read_adc();
            }
            nv[j] = (int8)(bf/NDADOS);
        }
    }
}

```

```

//-----Média-----
    M = 0;
    for(j=0;j<NDESVI;j++){
        M += nv[j];
    }
    Md = (float)M/NFDESIV;
//-----Desvio Padrão-----
    s=0;
    for(j=0;j<NDESVI;j++){
        dm = (float)nv[j]-Md;
        dm = dm*dm;
        s += dm;
    }
    s = s/NFDESIV;
    r=sqrt(s);
//-----Conversão-----
    vt = Md*CONVER;
    vr = r*CONVER;
    switch(i){
        case 4:
            res = NTC(RES_01,vt,FATMT1);
            ng = NTC(RES_01,vt-vr,FATMT1);
            ps = NTC(RES_01,vt+vr,FATMT1);
            break;
        case 5:
            res = NTC(RES_02,vt,FATMT2);
            ng = NTC(RES_02,vt-vr,FATMT2);
            ps = NTC(RES_02,vt+vr,FATMT2);
            break;
        default:
            res = vt;
            ng = vt-vr;
            ps = vt+vr;
    }
    printf("C%u: %.1f +%.1f -%.1f ",i-3,res,ps,ng);
}
JLine();
t += 1;
}
}

```

```
float NTC(float rpw, float vt, float fm){ return (rpw-(2.0*rpw*vt/(5.0*fm)))/(1.0+(vt*2.0/(5.0*fm)));}
void JLine(void){printf("%c%c",0x0d,0x0a);}
```

Obs.: foi respeitado o tempo de conversão dos dados pelo conversor A/D.

PROGRAMA AUXILIAR DO AQUISITOR DE DADOS:

```
#include <16F688.h>
#device ADC=8

#FUSES NOWDT           //No Watch Dog Timer
#FUSES NOBROWNOUT     //No brownout reset

#use delay(crystal=4MHz)
#use rs232(baud=9600,parity=N,xmit=PIN_C4,rcv=PIN_C5,bits=8,stream=PORT1)
```

Obs.: Os pinos usados pelo RS232 são nativos neste MCU.

PROGRAMA DE CONTROLE:

```
#include <aquecimento01.h>
#include <stdlib.h>

#ZERO_RAM

int1 hb;
int1 p1;
int1 p2;
int16 inter;
int16 cont1;
int16 ton;

#INT_RTCC
void RTCC_isr(void)
{
    cont1++;
    if(cont1<ton)
        output_high(PIN_B3);
    else if(cont1<8000)
        output_low(PIN_B3);
```

```

else
    cont1=0;
}

void main()
{

    inter=0;
    cont1=0;
    ton = 0;
    int8 cc;
    int i;
    int16 TEMR;
    int32 TEMR32;
    int16 TEMD = 8405; // 30°C
    char bt;
    char msg[11];
    char msgb[5];
    float PID[3]; // variáveis de ganhos pid do controle da temperatura
    float VAL[3]; // variáveis processadas de sinais do controlador do motor
    float CONTA; // Sinal do Controlador
    float CONTB; // Sinal Buffer de Operação
    VAL[0] = 0; // Sinal anterior do controlador
    VAL[1] = 0; // $ V dt integral de V no tempo
    VAL[2] = 0; // dV/dt variação da temperatura
    int16 TEMA = TEMD; // rpm anterior
    signed int16 DCPWM = 0; // variável de saída do duty cycle do PWM
    TEMD = 8405; // RPM desejado
    PID[0] = 0.014; // Ganho P
    PID[1] = 0; // Ganho I
    PID[2] = 0; // Ganho D

    setup_timer_0(RTCC_INTERNAL|RTCC_DIV_16|RTCC_8_bit); //1.3 ms overflow

    enable_interrupts(INT_RTCC);
    enable_interrupts(GLOBAL);

    while(TRUE)
    {
        if(kbhit()){
            inter++;
            bt = getc();

```

```

if(p1){
    if(bt!='.'){
        msg[cc] = bt;
        cc++;
    }
    else{
        p1 = false;
        p2 = true;
    }
}
if(bt=='C'){
    p1 = true;
    cc=0;
}
}
if(p2){
    if(msg[0]=='2'){
        for(i=3;i<cc;i++){
            msgb[i-3] = msg[i];
        }
        TEMR32 = atoi32(msgb);
        TEMR = (unsigned int16)TEMR32;
        hb = true;
        msgb[3]=' ';
        msgb[4]=' ';
    }
    p2 = false;
}
if(hb){
    //-----
    VAL[0] = ((float)TEMR-(float)TEMD); // Erro da malha de controle
    VAL[1] = VAL[1]+VAL[0]; // Integral da malha de controle
    VAL[2] = (TEMA-TEMR); // Derivada da malha de controle
    TEMA = TEMR; // Atualiza rotação anterior
    CONTB = 0;
    for(i=0;i<3;i++){CONTB+=(VAL[i]*PID[i]);} // Soma os ganhos para saída do controlador
    CONTA += CONTB; // Define o novo duty cycle
    DCPWM = (signed int16)CONTA; // Passa o parâmetro de controle para variável de comando
    if(DCPWM > 8000){ // Verifica possível overflow da variável de comando
        DCPWM = 8000; // Caso de overflow, setar a variável no máximo
        CONTA = 8000.0; // Atualiza a variável de controle
    }
}

```

```

if(DCPWM < 0){           // Verifica possível estouro de piso da variável de comando
    DCPWM = 0;           // Caso de estouro de piso, setar a variável no piso
    CONTA = 0.0;         // Atualiza a variável de controle
}
ton = (unsigned int16)DCPWM;           // Atualiza o PWM
//-----
hb = false;
}

}

}

```

PROGRAMA AUXILIAR DO CONTROLADOR:

```

#include <16F628A.h>
#device ADC=16

#FUSES NOWDT           //No Watch Dog Timer
#FUSES NOBROWNOUT     //No brownout reset
#FUSES NOLVP          //No low voltage prgming, B3(PIC16) or B5(PIC18) used for I/O

#use delay(crystal=12MHz)
#use FIXED_IO( B_outputs=PIN_B3 )
#define RELE  PIN_B3

#use rs232(baud=9600,parity=N,xmit=PIN_B2,rcv=PIN_B1,bits=8,stream=PORT1)

```

Obs.: Os pinos usados pelo RS232 são nativos neste MCU.

APÊNDICE B - REGRESSÃO, CURVAS DE CALIBRAÇÃO E LINEARIZAÇÃO

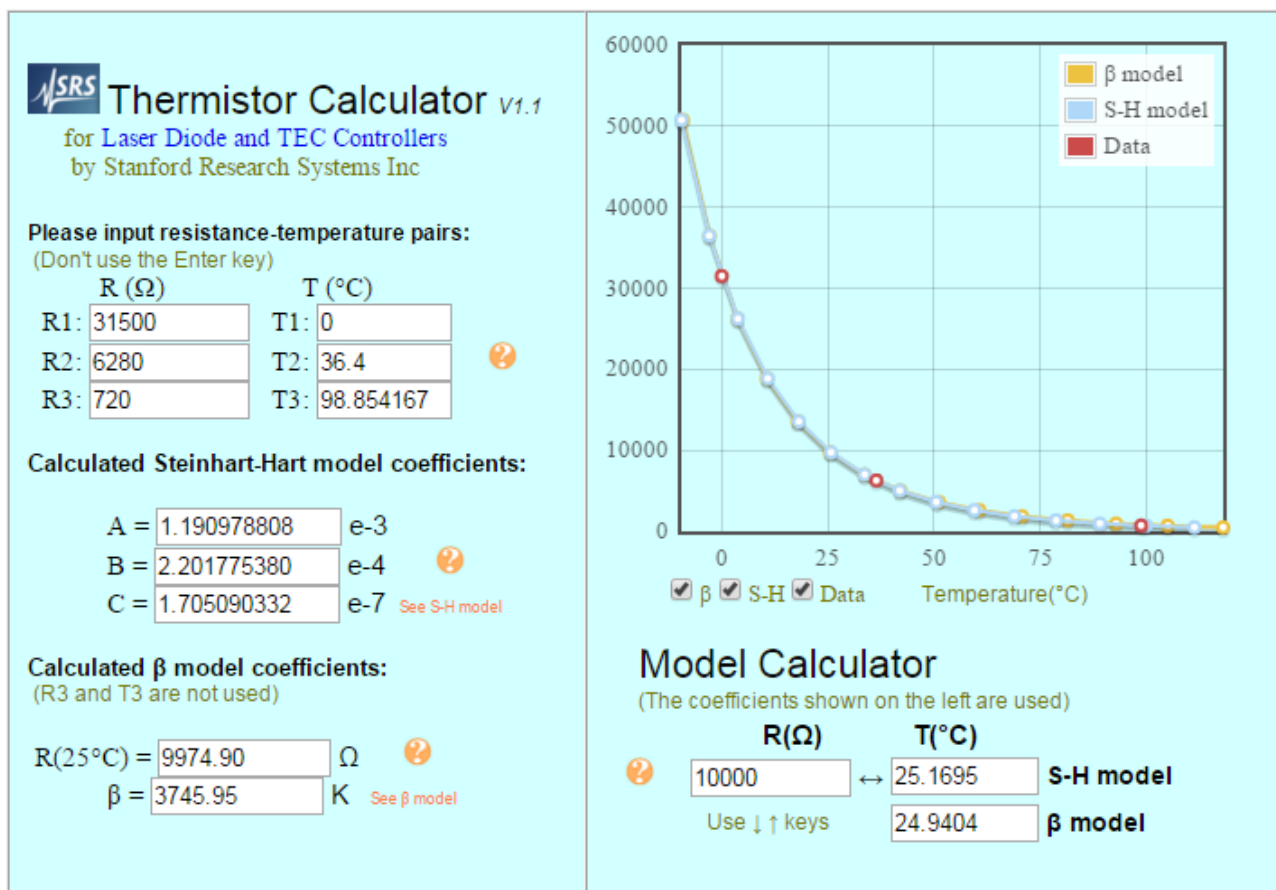
As calibrações foram feitas com água pura na forma de gelo fundente, água em ebulição na pressão de Ilha Solteira e água na temperatura ambiente, utilizando um termômetro pré-calibrado.

As Figuras 75, 77, 79 e 81 apresentam a regressão e a curva de calibração para os sensores de terminal preto, branco, amarelo e vermelho, respectivamente.

Por outro lado, as Figuras 76, 79, 80 e 82 mostram os gráficos da linearização por ponte de Wheatstone dos sensores de terminal preto, branco, amarelo e vermelho, respectivamente.

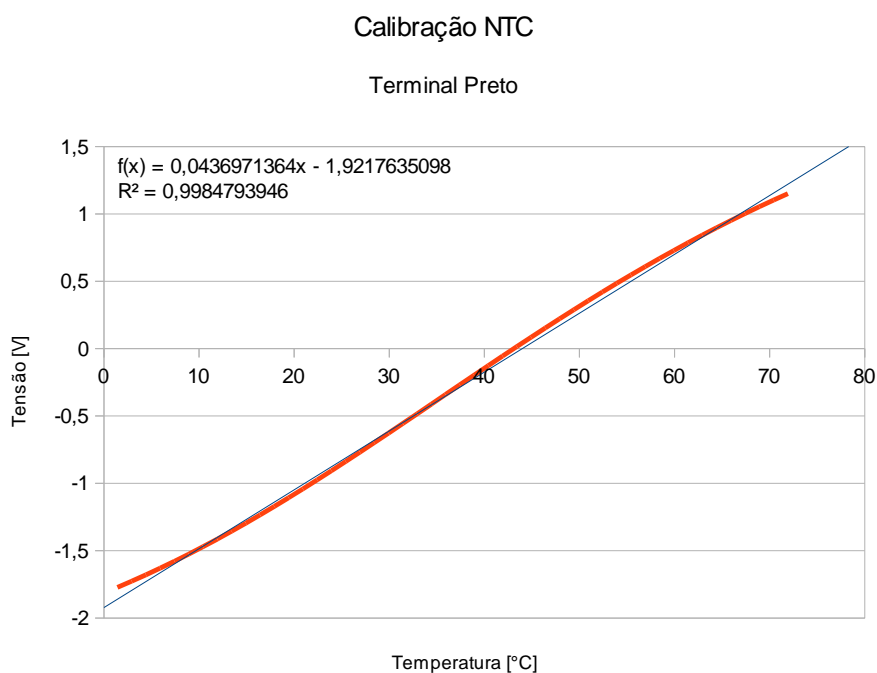
Por fim, a Figura 83 mostra a curva de calibração do sensor de gás metano MQ-4, utilizando placa de condicionamento de sinal para faixa de 100-10000 ppm.

Figura 75 - Regressão e curva de calibração do sensor de terminal preto.



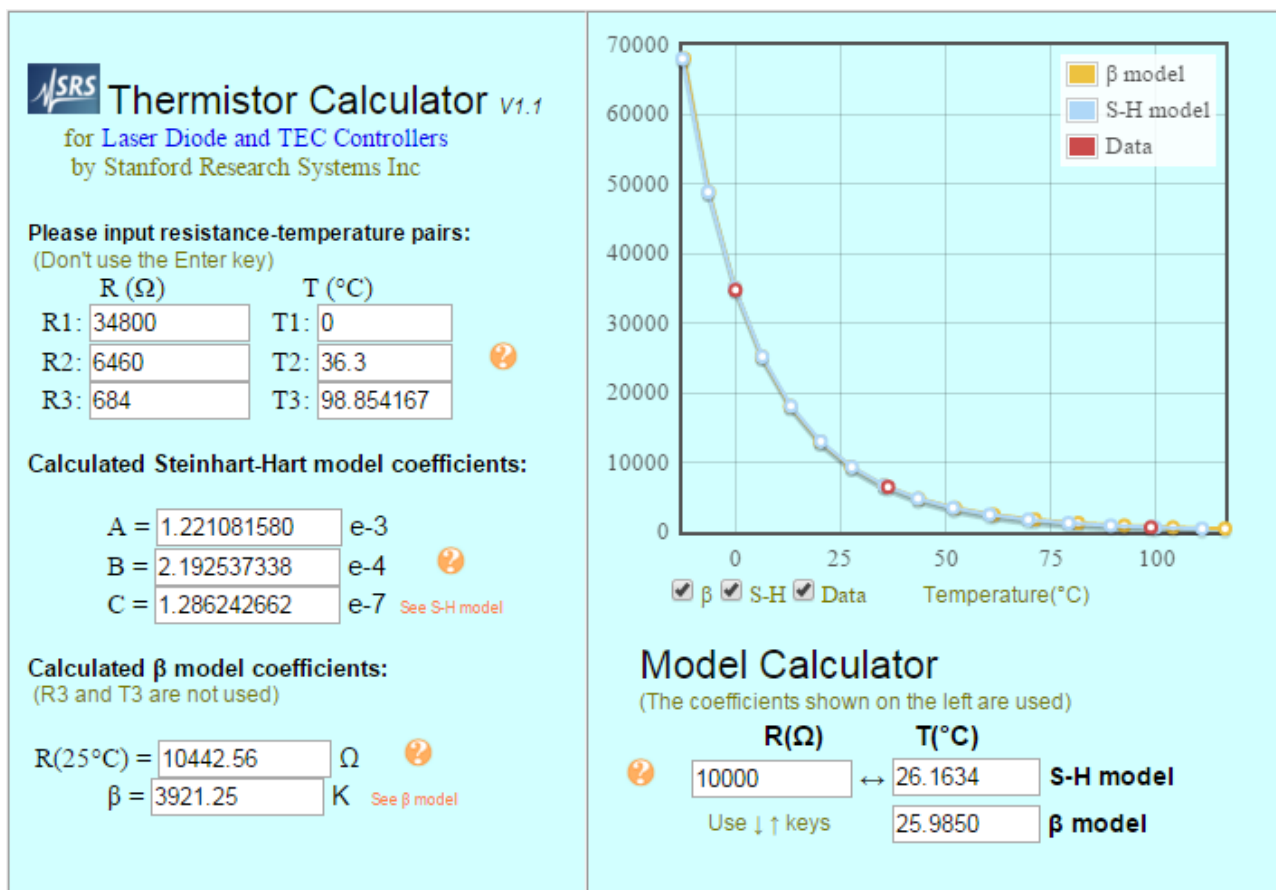
Fonte: Elaboração própria.

Figura 76 - Gráfico da linearização por ponte de Wheatstone do sensor de terminal preto.



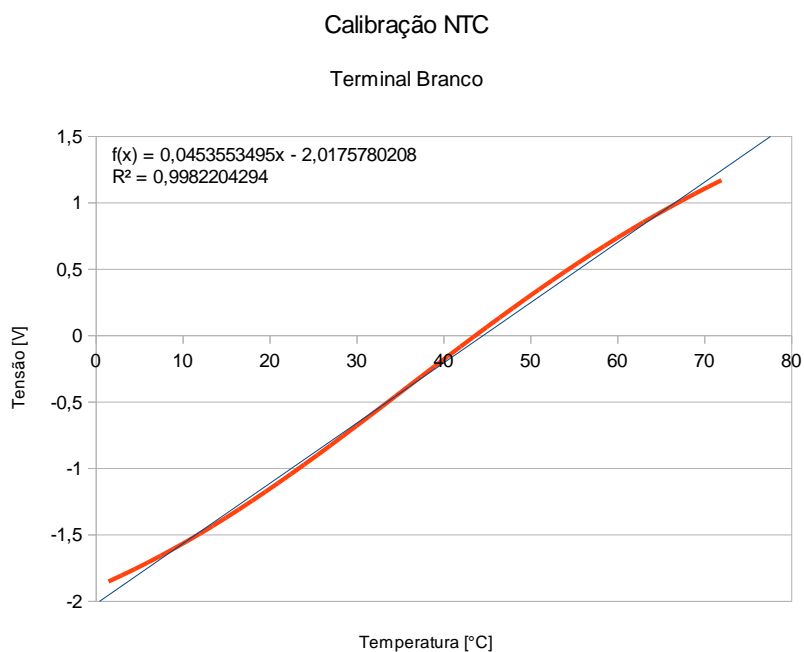
Fonte: Elaboração própria.

Figura 77 - Regressão e curva de calibração do sensor de terminal branco.



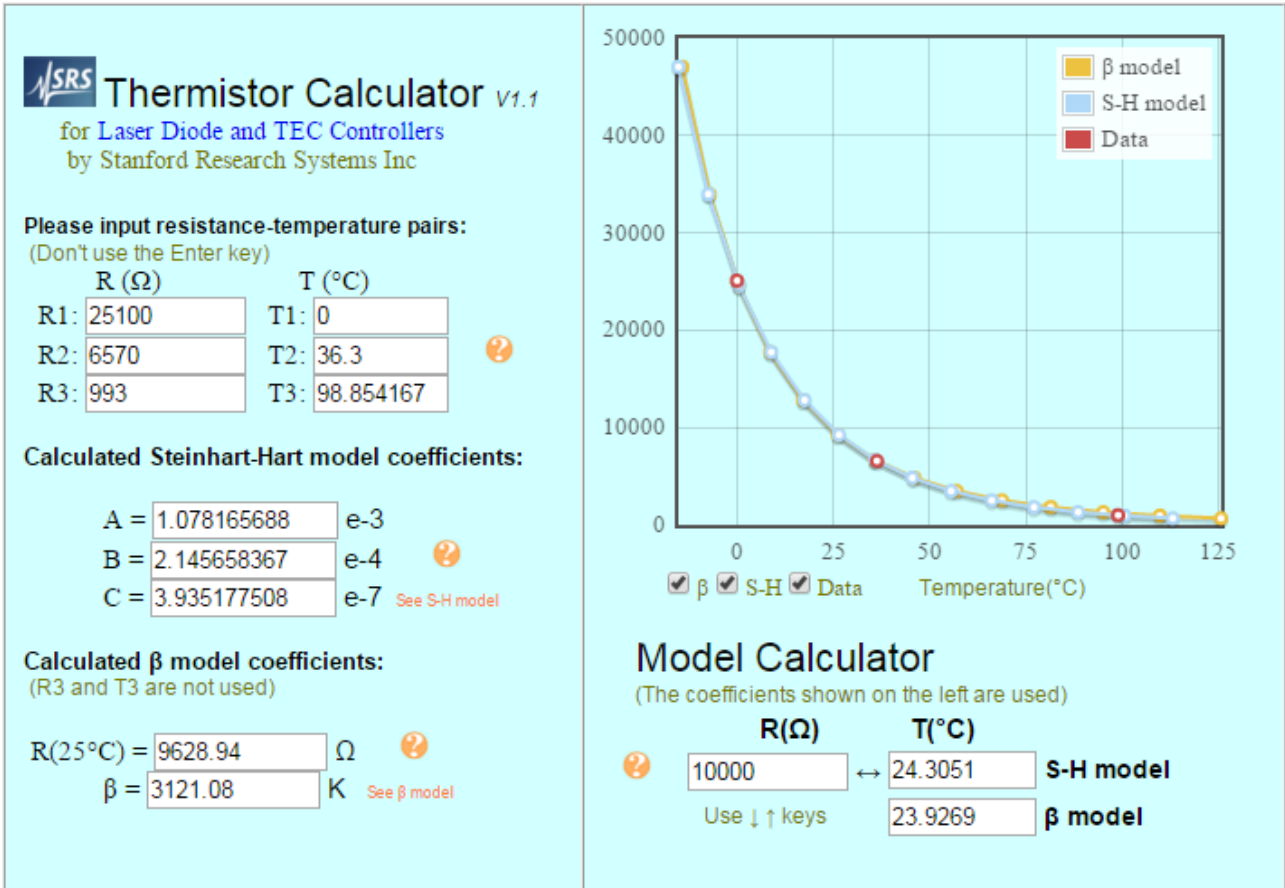
Fonte: Elaboração própria.

Figura 78 - Gráfico da linearização por ponte de Wheatstone do sensor de terminal branco.



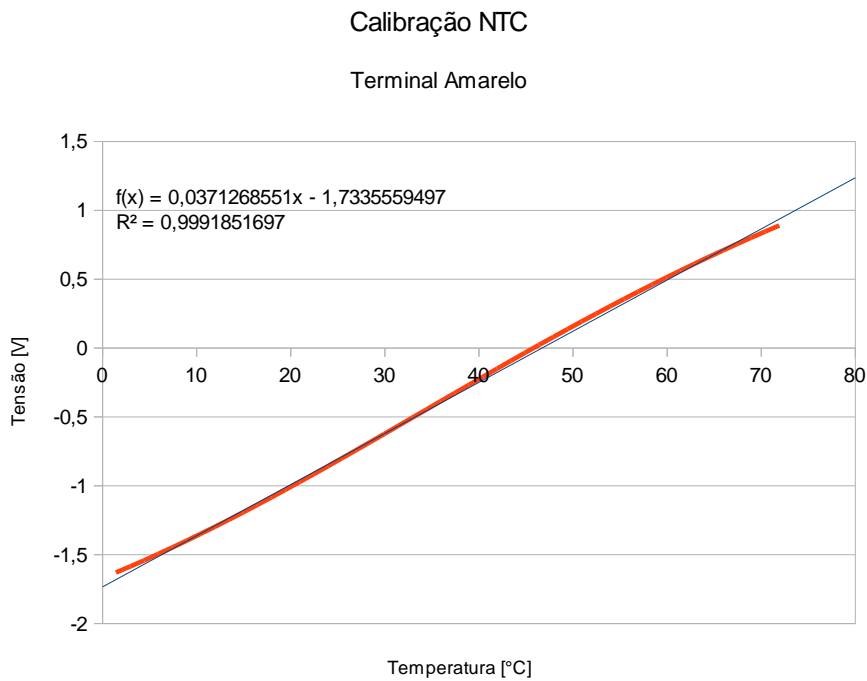
Fonte: Elaboração própria.

Figura 79 - Regressão e curva de calibração do sensor de terminal amarelo.



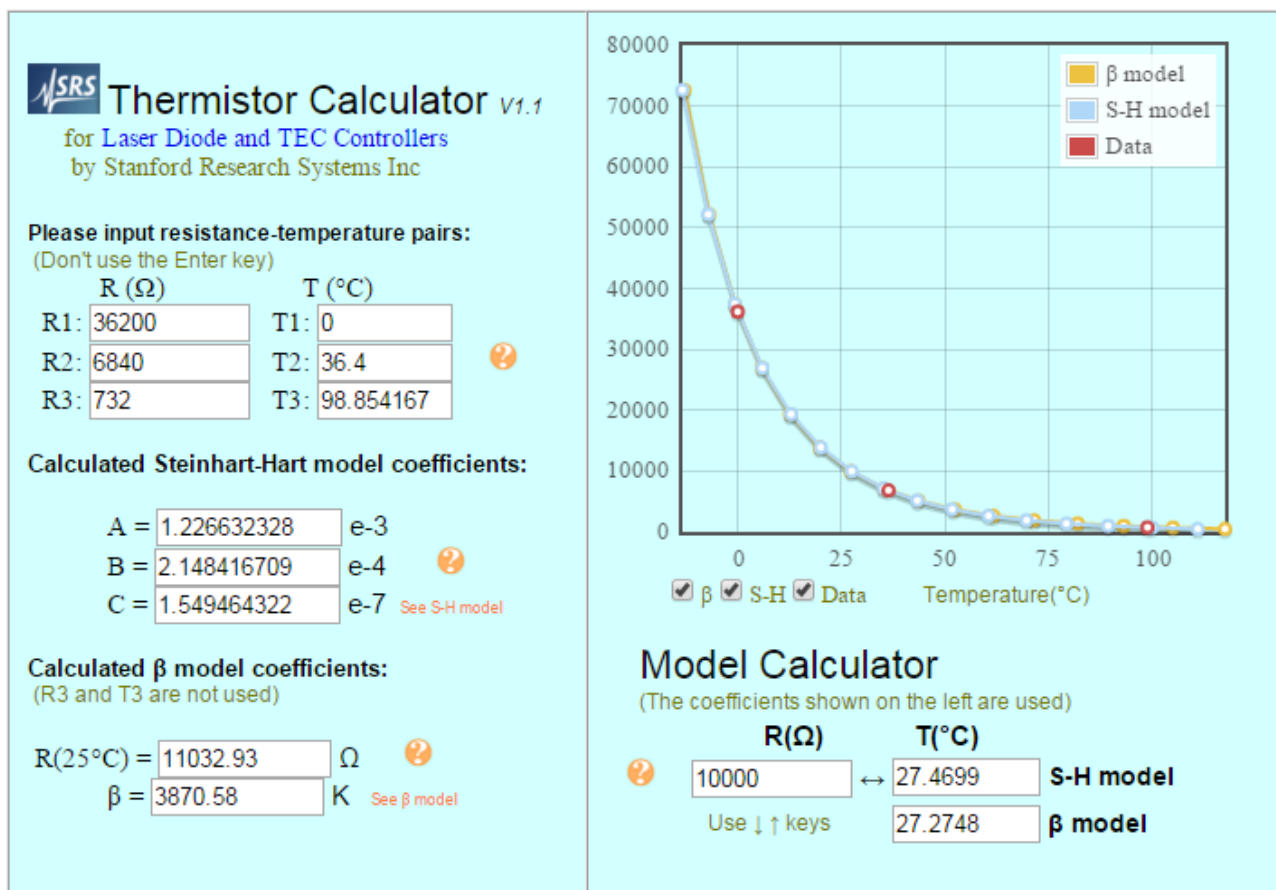
Fonte: Elaboração própria.

Figura 80 - Gráfico da linearização por ponte de Wheatstone do sensor de terminal amarelo.



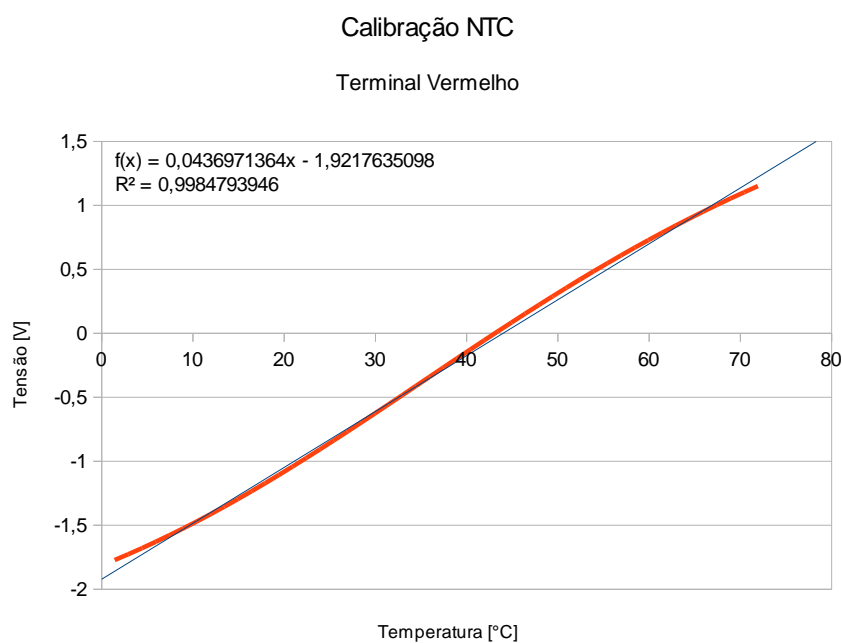
Fonte: Elaboração própria.

Figura 81 - Regressão e curva de calibração do sensor de terminal vermelho.



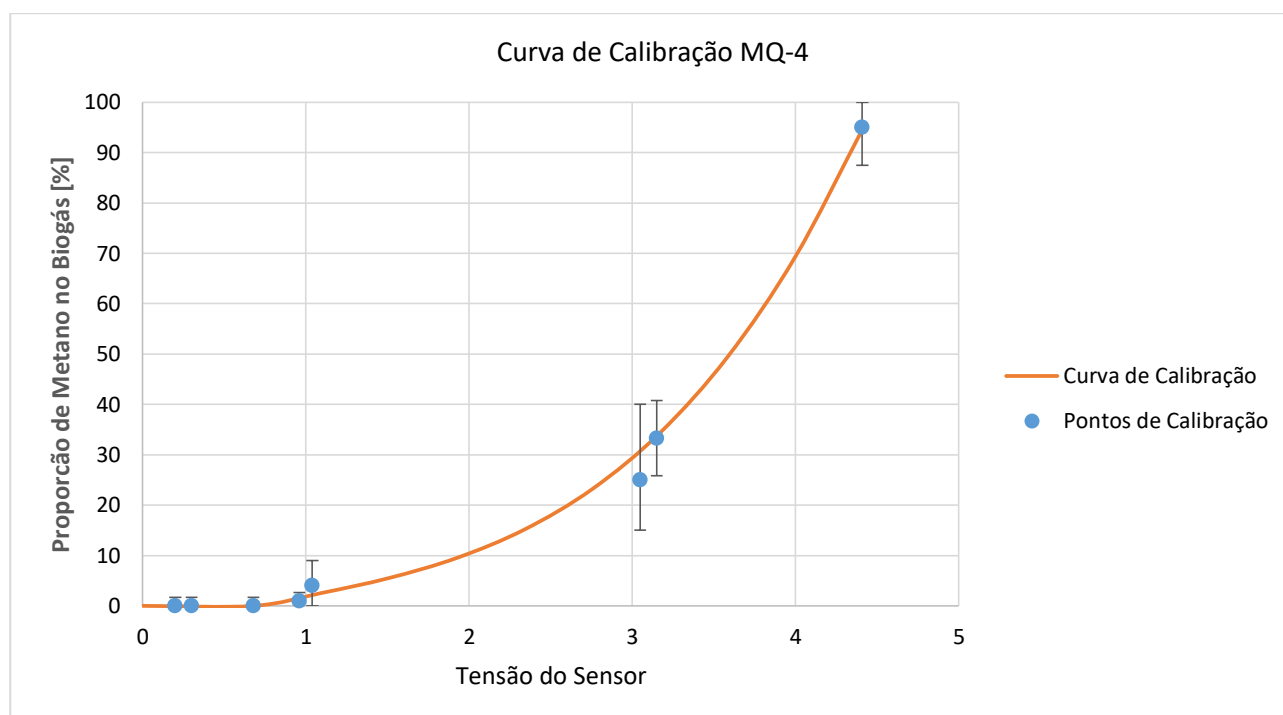
Fonte: Elaboração própria.

Figura 82 - Gráfico da linearização por ponte de Wheatstone do sensor de terminal vermelho.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 83 - Curva de calibração do sensor de gás metano MQ-4, utilizando placa de condicionamento de sinal para faixa de 100-10000 ppm.



Fonte: Elaboração própria.