

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**

**Análise e Modelagem de Sistema de Digestão
Anaeróbica Monitorado para Previsão e
Busca de Eficiência de Operação**

Fauzi de Moraes Shubeita

Tese apresentada como requisito à
obtenção do título de Doutorado em Ciência
da Computação na Pontifícia Universidade
Católica do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Missio Marcon
Coorientadora: Profa. Dra. Leticia Maria Bolzani Poehls

Porto Alegre, Brasil
2016

Ficha Catalográfica

S562a Shubeita, Fauzi de Moraes

Análise e modelagem de sistema de Digestão Anaeróbica monitorado para previsão e busca de eficiência de operação / Fauzi de Moraes Shubeita .

– 2016.

125 f.

Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, PUCRS.

Orientador: Prof. Dr. Cesar Augusto Missio Marcon.

Co-orientadora: Profa. Dra. Leticia Maria Bolzani Poehls.

1. Sensores. 2. Modelo Matemático. 3. Monitoramento. 4. Digestão Anaeróbica. 5. RSSF. I. Marcon, Cesar Augusto Missio. II. Poehls, Leticia Maria Bolzani. III. Título.


Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da PUCRS
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
FACULDADE DE INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

TERMO DE APRESENTAÇÃO DE TESE DE DOUTORADO

Tese intitulada "Análise e Modelagem de Sistema de Digestão Anaeróbica Monitorado para Previsão e Busca de Eficiência de Operação" apresentada por Fauzi De Moraes Shubeita como parte dos requisitos para obtenção do grau de Doutor em Ciência da Computação, aprovada em 23 de agosto de 2016 pela Comissão Examinadora:



Dr. César Augusto Missio Marcon PPGCC/PUCRS
Orientador

Dra. Letícia Maria Bolzani Pöhls PPGEE/PUCRS
Coorientadora



Dr. Fabiano Passuelo Hessel PPGCC/PUCRS



Dr. Eduardo Augusto Bezerra PPGEEL/UFSC



Dr. Leonel Pablo Tedesco PPGSI/UNISC

Homologada em 10/11/2016, conforme Ata No. 023 pela Comissão Coordenadora.



Prof. Dr. Luiz Gustavo Leão Fernandes
Coordenador.

PUCRS

PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM
CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

Campus Central
Av. Ipiranga, 6681 - P. 32 - sala 507 - CEP: 90619-900
Fone: (51) 3320-3611 - Fax (51) 3320-3621
E-mail: ppgcc@pucrs.br
www.pucrs.br/facin/pos

DEDICATÓRIA

Dedico essa Tese a minha família.

AGRADECIMENTOS

Enumerar pessoas sempre soa e parece (e é!) Injusto. Essa Tese foi escrita por muitas mãos, que mesmo invisíveis, ajudaram a pressionar as teclas no computador. Agradeço especialmente a minha esposa Ana Paula e a minha filha Agatha pela paciência e compreensão e por estarem ao meu lado todos os dias desse período. A meus pais, irmãos, cunhados, cunhadas, sogros e sogras (sim, tenho dois de cada nesse momento), sobrinhos e sobrinhas, afilhados e afilhadas. Aos meus colegas da PUC do sétimo e do sexto andar pela parceria, excelente conversa, cafés, almoços, futebol, churrasquinhos e a gelada. Ao meu colega de trabalho e apartamento Marcelo Ruaro pelas longas conversas sobre mecânica nas infinitas, cansativas e semanais viagens entre Três de Maio e Porto Alegre. Ao meu amigo Antônio Rodrigo De Vit pelas horas de papo sobre fazer ou não um Doutorado. As Biólogas do IPR-PUC Adriana Giongo e Renata Vieira pelo apoio na Microbiologia. Aos colegas do Grupo Biogás da SETREM Adalberto Lovato e Cinei Riffel pela parceria e viagens a Alemanha e por acreditarem nas energias renováveis. A direção da SETREM por apoiar a minha iniciativa, especialmente a coordenadora Vera Benedetti e coordenador Gilberto Caramão e também a minha secretaria Fabiula. Aos meus amigos de fé, Marco Moura, Giovani Mascarello, Claudio e Miguel Weber e Edemar Junior com suas respectivas famílias. Aos meus amigos Cristiano Melchior, Douglas Giordani, Carlos Truylio e Ana Baum pela parceria na banda *On The Black*. A HP pelo apoio financeiro nas bolsas de estudo concedidas e finalmente e não menos importante ao meu professor Orientador César Marcon por apoiar e acreditar nesse trabalho, embarcando nessa viagem comigo, que as vezes parecia interminável, mas que se reverteu nessa Tese.

ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMA DE DIGESTÃO ANAERÓBICA MONITORADO PARA PREVISÃO E BUSCA DE EFICIÊNCIA DE OPERAÇÃO

RESUMO

Biodigestores são equipamentos que têm a capacidade de converter resíduos orgânicos, através da Digestão Anaeróbica (DA), em biogás e biofertilizante. A simplicidade conceitual do equipamento oculta grande complexidade dos processos químicos e físicos da DA. Esta complexidade se revela na quantidade de variáveis do meio que devem ser monitoradas para garantir melhor eficiência do processo. As principais variáveis que afetam o processo de DA são temperatura, pressão, mensuração de gases resultantes, ácidos resultantes, potencial Hidrogeniônico (pH) e composição da matéria orgânica. Os biodigestores podem ser utilizados em áreas urbanas e rurais, dependendo do tipo de resíduo orgânico. Em ambos os locais pode haver dificuldade em monitorar e controlar os biodigestores e por consequência comprometer a sua eficiência, o que historicamente é apontado como um elemento de fracasso nos projetos que tentaram implantar estes equipamentos em grande escala. De forma interdisciplinar e com foco na eficiência dos biodigestores, foram desenvolvidos experimentos com coleta e análise de biogás e amostras de dejetos que permitiram explorar a microbiologia de um sistema real de DA. Esta exploração permitiu mapear as bactérias presentes no dejetos, que foram classificadas e agrupadas conforme as quatro fases da DA (Hidrólise, Acidogênese, Acetogênese e Metanogênese). A partir desta análise foi possível desenvolver um modelo matemático e um software para simular o comportamento de um sistema de DA e também um modelo hierárquico de monitoramento, controle e atuação baseado em uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF). Os resultados das simulações possibilitaram compreender e avaliar o comportamento de um sistema de DA, em especial no controle de temperatura, destacando o quanto o monitoramento e controle são essenciais a produção de biogás e biofertilizante.

Palavras-Chave: Sensores, Modelo Matematico, Monitoramento, Digestão Anaeróbica, RSSF

ANALYSIS AND MODELING OF A MONITORED ANAEROBIC DIGESTION SYSTEM FOR ESTIMATING AND SEARCH OF OPERATING EFFICIENCY

ABSTRACT

Digesters are devices capable of converting organic waste into biogas and biofertilizer through an Anaerobic Digestion (AD) process. The conceptual simplicity of the equipment hidden the high complexity of chemical and physical processes of AD. This complexity is revealed by the amount of environmental variables that should be monitored to ensure the process efficiency. The primary variables that affect the DA process are temperature, pressure, resulting gas measurement, resulting acids, hydrogen potential (pH) and composition of organic matter. The digesters may be used in urban and rural areas, depending on the type of organic waste. In both places, it is difficult to monitor and control the digesters and therefore compromising their efficiency, which is historically identified as a failure element in projects that have tried to deploy these devices in large scale. In an interdisciplinary way and focusing on the digesters efficiency, we carried out experiments with collection and analysis of biogas and organic waste samples that allowed exploring the microbiological life of a real AD system. This exploration enables us to map the bacteria present in the organic waste, which were classified and grouped according to the four stages of AD (Hydrolysis, Acidogenesis, Acetogenesis, and Methanogenesis). From this analysis, it was possible to develop a mathematical model and software to simulate the behavior of an AD system and a hierarchical control and monitoring model based on a Wireless Sensor Network (WSN). The results of the simulations made it possible to understand and evaluate the behavior of a DA system, especially in temperature control, highlighting how the monitoring and control are essential to production of biogas and biofertilizers.

Keywords: *sensors, mathematical model, monitoring, Anaerobic Digestion, WSN*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas do delineamento da pesquisa.....	19
Figura 2 - Fases do processo de DA.	22
Figura 3 – Faixa de temperatura ideal para cada tipo de bactéria [42].....	24
Figura 4 – Processo de DA (extraído de [86]).....	28
Figura 5 - Modelo de Biodigestor Indiano (extraído de [87]).	30
Figura 6 - Modelo de Biodigestor Chinês (extraído de [87]).....	31
Figura 7 - Modelo de Biodigestor Canadense [86].....	32
Figura 8 - Modelo de Biodigestor BioKöhler.	33
Figura 9 - Estrutura básica de um nodo sensor (extraído de [82]).	36
Figura 10 - Diagrama de estados de uma RSSF [19].	36
Figura 11 - RSSF com conexão à Internet através de um sorvedouro [76].	39
Figura 12 - Posição de sensores para coleta de temperatura.	54
Figura 13 - Posição dos pontos de coleta das amostras.	54
Figura 14 – Sistema de DA onde foram conduzidos os experimentos práticos.	58
Figura 15 – Variação das temperaturas internas e externas para experimento prático de DA.....	59
Figura 16 – Distribuição de bactérias por fases da DA.	63
Figura 17 – Evolução do percentual total de gêneros de bactérias na hidrólise.	64
Figura 18 - Evolução do percentual total de gêneros de bactérias na acidogênese.....	65
Figura 19 - Evolução do percentual total de gêneros de bactérias na acetogênese.....	65
Figura 20 - Evolução do percentual total de gêneros de cepas metanogênicas.....	66
Figura 21 - Evolução do percentual total de gêneros de bactérias desconhecidas	66
Figura 22 - Níveis de prioridade para o monitoramento/controlado da RSSF.	74
Figura 23 - Fluxo de funcionamento do modelo de RSSF proposto.	76
Figura 24 – Etapa de organização da RSSF.	78
Figura 25 - Descrição das principais etapas da fase de Monitoramento.	79
Figura 26 – Ilustração do esquema de sensoriamento com atuação local/remota. A figura mostra duas regiões de acoplamento que dependem de como o atuador age no ambiente, bem como de como o nodo sensor capta o valor sensoriado. Por exemplo, o atuador pode ser um aquecedor que é acoplado ao digestor através de um meio líquido.....	79
Figura 27 – Análise de dados em sistema de DA.	81

Figura 28 – Atuação em um sistema de DA.	82
Figura 29 - Exemplo de cenário de digestor, salientando sensores de temperatura.	84
Figura 30 - Estrutura básica do simulador	86
Figura 31 - Volume de CH ₄ esperado e calculado.	89
Figura 32 – Volume de biogás total esperado e calculado.	90
Figura 33 - Proporção de CH ₄ produzido por macronutriente em relação a temperatura. .	91
Figura 34 - Sistema de DA monitorado por uma RSSF, e sistemas de controle e atuação	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição do biogás [33].	26
Tabela 2 – Equivalências energéticas [33].	27
Tabela 3 – Modelos de biodigestor e seus principais elementos.	34
Tabela 4 - Técnicas de monitoramento em sistema de DA.	42
Tabela 5 - Parâmetros de monitoramento em sistemas de biodigestor.	42
Tabela 6 – Classificação de métodos de análise multivariada pelo tipo de relação.	45
Tabela 7 – Resumo dos trabalhos relacionados sobre monitoramento, controle e atuação em DA.	48
Tabela 8 – Resumo dos trabalhos relacionados sobre otimização em DA.	52
Tabela 9 – Cronograma de coletas.	53
Tabela 10 – Especificações técnicas dos sensores de temperatura.	55
Tabela 11 – Parâmetros do kit de análise de biogás.	55
Tabela 12 – Relação de temperaturas internas e externas para as amostras coletadas no experimento prático de DA.	59
Tabela 13 – Medidas de concentração de gases observadas em cada coleta de amostra	60
Tabela 14 – Análises da proporção de gases observadas nas amostras.	61
Tabela 15 – Relação de amostras analisadas.	62
Tabela 16 – Percentual de sequências de DNA em boas condições de interpretação para cada uma das 18 amostras coletadas no biodigestor.	62
Tabela 17 – Percentual de filos analisados por fase da DA.	63
Tabela 18 – Variáveis do modelo matemático desenvolvido	68
Tabela 19 – Valores de produção de gases [33] por Kg de macronutrientes inserido no DA.	71
Tabela 20 - Exemplo de valores coletados por nível de monitoramento.	75
Tabela 21 - Classificação quanto à configuração de uma RSSF.	76
Tabela 22 - Classificação quanto ao tipo de comunicação dos nodos em uma RSSF.	77
Tabela 23 - Classificação quanto à coleta de informações em RSSF.	78
Tabela 24 - Exemplo de elementos monitorados em um sistema de DA.	80
Tabela 25 - Classificação quanto ao tipo de processamento da informação.	81
Tabela 26 - Exemplo de ponderação das variáveis em um sistema de DA.	83

Tabela 27 – Faixas de temperatura, fator de digestibilidade utilizada e proporção de macronutrientes utilizadas nos experimentos.	87
Tabela 28 – Valores de referência [33] para produção de biogás e metano em ensilagem de gramíneas.	87
Tabela 29 – Proporções de elementos em percentual em cada fase do sistema de DA [42].	88
Tabela 30 – Volume de biogás e CH ₄ calculado e esperado, em litros, em 1 kg de dejetos.	88
Tabela 31 – Proporção de CH ₄ produzido por macronutrientes em relação à temperatura do sistema de DA.	91
Tabela 32 - Valores das variáveis de entrada do modelo matemático.	107
Tabela 33 – Legenda utilizada nas tabelas de resultados.	109
Tabela 34 - Resultados da simulação com o sistema ajustado para 28 °C.	110
Tabela 35 - Resultados da simulação com o sistema ajustado para 32 °C.	113
Tabela 36 - Resultados da simulação com o sistema ajustado para 37 °C.	116
Tabela 37 - Resultados da simulação com o sistema ajustado para 43 °C.	119
Tabela 38 - Resultados da simulação com o sistema ajustado para 48 °C.	122

LISTA DE SIGLAS

AG	Ácidos Graxos
AGV	Ácidos Graxos Voláteis
CO ₂	Dióxido de carbono
CH ₄	Gás metano
DA	Digestão Anaeróbica
DSP	<i>Digital Signal Processing</i>
FPGA	<i>Field-Programmable Gate Array</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GIS	<i>Geographical Information System</i>
H ₂ S	Sulfeto de Hidrogênio
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
NH ₃	Amônia
OSI	<i>Open System Interconnection</i>
PHY	<i>Physical Layer</i>
pH	Potencial Hidrogeniônico
RSSF	Rede de Sensores Sem Fio
SGDB	Sistema Gerenciador de Banco de Dados
ST	Sólidos Totais
SV	Sólidos Voláteis
VFA	<i>Volatile Fatty Acids</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS.....	16
1.2	ORIGINALIDADE E CONTRIBUIÇÕES.....	17
1.3	HIPÓTESES	18
1.4	DELINEAMENTO DA PESQUISA.....	19
1.5	ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO.....	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	SISTEMAS DE DIGESTÃO ANAERÓBICA (DA).....	21
2.1.1	Digestão Anaeróbica.....	21
2.1.2	Microbiologia do Sistema de DA.....	23
2.1.2.1	<i>Acidez (pH)</i>	23
2.1.2.2	<i>Temperatura</i>	24
2.1.2.3	<i>Proporção de Nitrogênio e Carbono</i>	24
2.1.2.4	<i>Carga Orgânica e Tempo de Retenção Hidráulica</i>	25
2.1.2.5	<i>Potencial de Oxidação/Redução (redox)</i>	25
2.1.2.6	<i>Inibição e Toxicidade</i>	25
2.1.3	Biogás.....	26
2.1.4	Biofertilizante	27
2.2	BIODIGESTORES	27
2.2.1	Histórico dos Biodigestores.....	29
2.2.1.1	<i>Biodigestor Indiano</i>	30
2.2.1.2	<i>Biodigestor Chinês</i>	31
2.2.1.3	<i>Biodigestor por Batelada</i>	31
2.2.1.4	<i>Biodigestor Canadense</i>	32
2.2.1.5	<i>Biodigestor BioKöhler</i>	32
2.2.1.6	<i>Resumo dos Modelos de Biodigestores</i>	33
2.3	REDES DE SENSORES SEM FIO (RSSF).....	34
2.3.1	Uso de RSSF no Monitoramento e Controle de Ambientes.....	38
2.3.2	Monitoramento e Controle em Sistemas de Digestão Anaeróbica.....	40
2.4	ANÁLISE MULTIVARIADA	43
2.4.1	Correlação e Regressão	44
3	TRABALHOS RELACIONADOS	46

3.1	MONITORAMENTO, CONTROLE E ATUAÇÃO EM SISTEMAS DE DA	46
3.1.1	Monitoramento, Controle e Atuação <i>Offline</i>	46
3.1.2	Monitoramento, Controle e Atuação Online	47
3.2	OTIMIZAÇÃO DO MODELO DE DIGESTÃO ANAERÓBICA.....	49
4	EXPERIMENTAÇÃO PRÁTICA	53
4.1	MATERIAIS E MÉTODOS	53
4.1.1	Análise de pH e Gases	55
4.1.2	Coleta de Dejetos.....	56
4.1.3	Análise Microbiológica para Extração de DNA.....	56
4.1.4	Análise Computacional Aplicada.....	57
4.2	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	58
4.2.1	Controle de Temperatura	58
4.2.2	Análise Gasosa	60
4.2.3	Análise Microbiológica das Amostras.....	61
4.2.3.1	<i>Análise das Proporções de Bactérias por Ponto de Amostragem</i>	63
5	MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO	68
5.1.1	Cálculo de Proporções de Macronutrientes*	69
5.1.2	Cálculos de Controle das Proporções de Gás Produzido	70
5.1.3	Cálculos da Hidrólise	71
5.1.4	Cálculos da Acidogênese.....	72
5.1.5	Cálculos da Acetogênese	72
5.1.6	Cálculos da Metanogênese.....	73
5.2	CONSIDERAÇÕES SOBRE AS FUNÇÕES DE CÁLCULO DAS FASES DO SISTEMA DE DA.....	73
6	MODELO DE MONITORAMENTO, ANÁLISE E ATUAÇÃO APOIADO POR RSSF	74
6.1.1	Desenho do Modelo de Monitoramento, Análise e Atuação	75
6.1.2	Etapa de Organização dos Nodos Sensores e Estruturação da RSSF.....	76
6.1.3	Etapa de Monitoramento.....	78
6.1.4	Etapa de Análise	80
6.1.5	Etapa de Atuação.....	82
6.2	EXEMPLO DE MODELO DE NÍVEIS DE MONITORAMENTO.....	82
7	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES	85
7.1	FERRAMENTA PARA SIMULAÇÃO	85
7.2	CONFIGURAÇÃO DE EXPERIMENTO	87

7.3	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DO MODELO MATEMÁTICO	88
7.3.1	Considerações sobre os Resultados Experimentais	92
8	CONCLUSÕES.....	94
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97
10	APÊNDICE A - TABELA COM AS VARIÁVEIS DE ENTRADA DO MODELO MATEMÁTICO	107
11	APÊNDICE B – TABELAS DE RESULTADOS DAS REAÇÕES QUÍMICAS POR FAIXA DE VALORES DE TEMPERATURA	109

1 INTRODUÇÃO

A Digestão Anaeróbica (DA) é definida como um processo microbiológico durante o qual o carbono orgânico presente em biopolímeros e outros compostos degradáveis é convertido em sua forma mais reduzida (gás metano - CH_4) e sua forma mais oxidada (dióxido de carbono - CO_2) na ausência de oxigênio. A DA também é conhecida como biogaseificação ou produção de biogás e pode servir a muitos propósitos, como saneamento urbano e rural de forma ecológica, produção de energia e biofertilizantes [18].

O que torna o processo de DA atraente para pesquisadores são o CH_4 e o biofertilizante resultantes, aproveitados como alternativa de bioenergia e nutrição de plantas, respectivamente. Adicionalmente, o emprego de DA traz ganhos diretos para o meio ambiente e conseqüentemente para a saúde e bem-estar da população, uma vez que permite processar dejetos de diversas naturezas (e.g., origem animal), evitando, por exemplo, que o mesmo seja direcionado para as bacias aquíferas.

Os programas governamentais para produção de bioenergia e biofertilizantes através de sistemas de DA não são novos. Na Ásia, com esse propósito, países como Índia e China iniciaram a implantação de sistemas de DA nas décadas de 80 e 90, mas segundo Kanokwan et al. [53], esses programas fracassaram. Um motivo desse fracasso foi a falta de uma infraestrutura de monitoramento e controle dos processos anaeróbicos, além da ausência de uma assistência técnica adequada aos sistemas de DA.

Esta Tese propõe uma infraestrutura de monitoramento, controle e atuação em sistemas de DA apoiado por uma RSSF. Os resultados e análises obtidos podem ser utilizados como entrada de um sistema que realimenta atuadores de modo a melhorar a operação do sistema de DA e, conseqüentemente, gerar novos dados de monitoramento.

1.1 OBJETIVOS

Esta Tese propõe a análise e modelagem de sistema de monitoramento, controle e atuação em sistema de DA, monitorado para previsão e busca de eficiência de operação. Este modelo apoiará novos estudos sobre o funcionamento de um sistema de DA a partir

dos cálculos resultantes das quatro fases que compõem a DA - hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.

Dentro de cada uma destas fases é essencial monitorar a proporção dos elementos de entrada do digestor (i.e., dejetos e macronutrientes) e acompanhar a decomposição desses dejetos além do comportamento dos principais parâmetros de controle do processo de DA, que são as temperaturas envolvidas (i.e., temperaturas interna e externa), e as variáveis de saída (i.e.; proporção de gases e biofertilizante).

Os principais objetivos foram:

- Compreender o funcionamento de um sistema de DA para modelagem e simulação;
- Análise das amostras de dejetos coletadas e interpretar o comportamento da vida microbológica presente em cada fase do sistema de DA;
- Modelar um sistema de monitoramento, controle e atuação para sistemas de DA apoiados por uma RSSF;
- Desenvolver um modelo matemático para avaliar o desempenho de um sistema de DA;
- Simular o funcionamento de um sistema de DA no modelo matemático proposto e avaliar a sua eficiência.

1.2 ORIGINALIDADE E CONTRIBUIÇÕES

A originalidade da Tese está no desenvolvimento de um modelo de monitoramento, controle e atuação para sistemas de DA apoiado por uma RSSF. Esta rede fica responsável pelo monitoramento de diversas partes do sistema de DA, transferindo dados para um nodo sorvedouro onde uma aplicação, baseada no modelo matemático, analisa o comportamento do sistema, possibilitando uma tomada de decisão.

A Tese contribuiu com os seguintes elementos: análise microbológica de um sistema de DA real, um modelo matemático para representação das fases da DA, software de simulação e um modelo de monitoramento, controle e atuação hierárquico. Ela também propôs o uso de uma RSSF em sistema de biodigestão.

A análise microbiológica permitiu uma melhor compreensão da complexidade que é a vida presente dentro do sistema de DA e o quanto é importante fazer um monitoramento e controle para que as condições ideais do meio se mantenham. Cada fase do sistema tem um comportamento baseado nos gêneros de bactérias que os compõem.

Com base nos resultados operacionais do sistema de DA, a Tese propõe um modelo matemático composto por um conjunto de funções que representam o comportamento das fases da DA. Através do monitoramento e coleta das temperaturas é possível alimentar o modelo matemático para mensurar a produção de Biogás e demais elementos.

Outra contribuição foi a implementação de um software a partir do modelo matemático proposto, o que possibilitou simular os cálculos e mensurar as proporções dos elementos resultantes em cada uma das fases da DA (Hidrólise, Acidogênese, Acetogênese e Metanogênese) em especial as proporções de biogás, CH₄ e CO₂.

Avaliando os resultados obtidos pelas simulações, outra contribuição foi a proposição de um modelo de monitoramento, controle e atuação e a possibilidade de implementação de níveis hierárquicos apoiados pela RSSF. Este modelo se apoia na interpretação das funções matemáticas propostas para ponderar cada um dos sensores responsáveis por enviar os dados coletados no sistema de DA.

1.3 HIPÓTESES

Esta Tese tem as seguintes hipóteses subjacentes: (i) um modelo matemático proposto tem a capacidade de gerar resultados que expressem de forma satisfatória o comportamento de um sistema de DA; (ii) um modelo de análise multivariada fornece informações suficientes para capturar detalhadamente o desempenho do sistema de DA e conseqüentemente estimar o comportamento futuro deste sistema; (iii) os valores gerados pela análise multivariada podem dar suporte a um modelo de monitoramento, controle e atuação.

1.4 DELINEAMENTO DA PESQUISA

A implementação de modelos matemáticos para monitoramento, controle e atuação baseado em RSSF para sistemas de DA envolveu as etapas apresentadas na Figura 1.

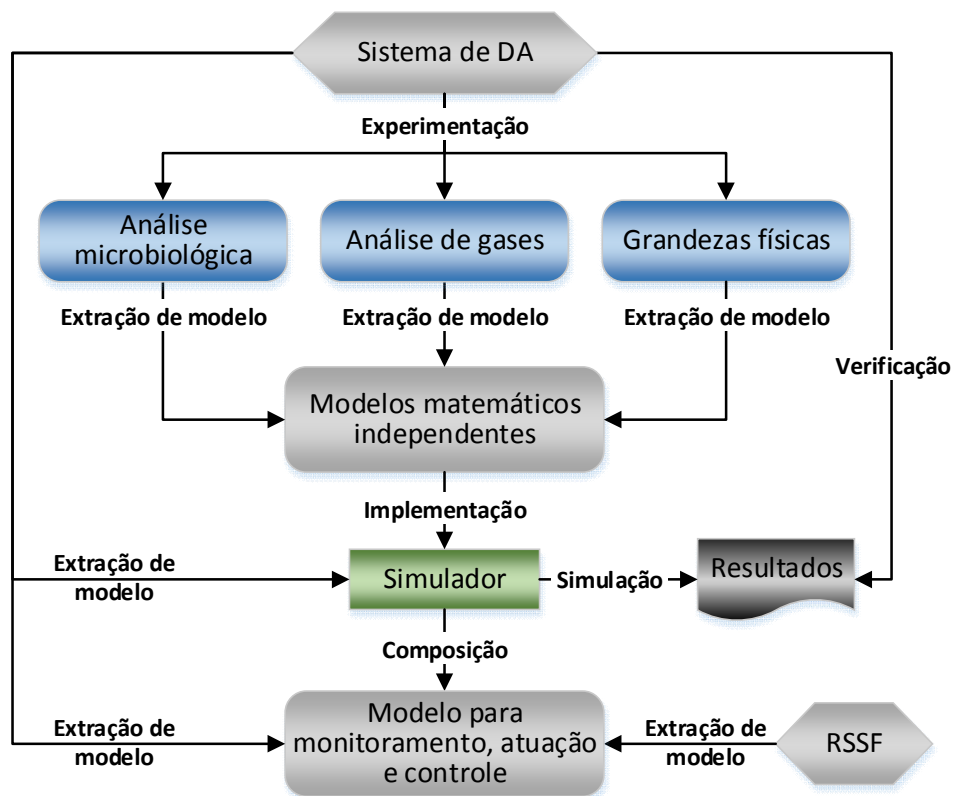


Figura 1 – Etapas do delineamento da pesquisa.

Partindo de um biodigestor de pequeno porte foram conduzidos experimentos que permitiram realizar uma análise microbiológica e de gases. O objetivo foi avaliar a vida microbiana que se desenvolveu em cada uma das quatro fases da DA, bem como o impacto destas fases na produção de gases frente a grandezas físicas, como temperatura e pH.

A segunda etapa foi o desenvolvimento de modelos matemáticos compostos por funções que relacionam as análises microbiológicas e as grandezas físicas com a produção de gás avaliada no experimento real.

Na terceira etapa foi desenvolvido um simulador em linguagem JAVA que implementou o conjunto de funções extraído da experimentação. Os resultados simulados

geraram um conjunto de dados que foram verificados e validados com o comportamento do biodigestor no experimento realizado.

A quarta etapa é a proposição de um modelo de monitoramento, controle e atuação para sistemas de DA baseados em uma RSSF. Sabendo que a DA se divide em duas etapas (líquida e gasosa), e que a frequência de coleta das informações dos elementos monitorados é variável, foi proposta uma abordagem em níveis hierárquicos de monitoramento e controle, com um fluxo de funcionamento dentro desses níveis.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Este documento está dividido nos seguintes capítulos. O Capítulo 2 descreve a fundamentação teórica explicando o processo de DA e, ilustrando alguns tipos básicos de biodigestores. Também descreve elementos principais de uma RSSF e métodos de análise multivariada.

O Capítulo 3 apresenta os trabalhos relacionados ao monitoramento e controle em sistemas de DA, sendo subdividindo em Monitoramento, Controle e Atuação *online* e *offline* e também modelos de otimização para estes sistemas.

O Capítulo 4 descreve os materiais e métodos utilizados na condução dos experimentos práticos de coleta e análise microbiológica e de gás. Também apresenta e discute os resultados obtidos nesta análise. O Capítulo 5 delinea o modelo matemático de análise multivariada proposto, contemplando todas as fases do sistema de DA.

O Capítulo 6 apresenta o modelo de monitoramento, atuação e controle proposto, apoiado por uma RSSF. O Capítulo 7 discute os resultados alcançados com o uso de uma ferramenta de simulação de DA que aplica os modelos matemáticos propostos e, finalmente, o Capítulo 8 apresenta as principais conclusões desta Tese.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 SISTEMAS DE DIGESTÃO ANAERÓBICA (DA)

Os sistemas de DA funcionam na ausência de oxigênio. Estes sistemas são importantes no tratamento da matéria orgânica presente nos resíduos de animais, plantas e águas. Os sistemas de DA utilizam os biodigestores como elemento principal para garantir a fermentação destas matérias orgânicas de forma eficaz e eficiente. As vantagens de se usar os sistemas de DA é a redução da contaminação causada pelos resíduos de matéria orgânica e a produção de energia e biofertilizantes [33] [47].

2.1.1 DIGESTÃO ANAERÓBICA

A DA, também referenciada por biogaseificação ou produção de biogás, pode atender a diversos propósitos sociais, tais como: o foco sustentável e ecológico com o tratamento de esgoto, a destinação e aproveitamento de resíduos orgânicos, o tratamento de efluentes industriais e, especialmente, a geração de energia renovável e a produção de biofertilizantes [53]. A energia que pode ser gerada a partir do biogás produzido pelos sistemas de biodigestão já é utilizada em países da Europa e da Ásia. Da mesma forma, o biofertilizante é uma alternativa viável frente à adubação química em lavouras e pastagens do meio rural [33].

O fluxo de funcionamento de um sistema de DA tem início com a transferência da matéria orgânica (dejetos) para dentro do digestor, sendo este tanto de origem vegetal com animal, e.g., milho e esterco bovino, respectivamente. Uma vez acondicionados, inicia a fase de fermentação, tarefa esta que exige controle de temperatura rígido para ação adequada de bactérias de forma a produzir gás e transformar o substrato resultante em adubo orgânico. O gás e o adubo produzidos pelo processo de fermentação são canalizados até reservatórios específicos. Assim, uma RSSF pode prover informações sobre o meio onde estas bactérias estão inseridas, de forma a produzir um ambiente mais propício para a fermentação e conseqüentemente aumentar a qualidade do processo de biodigestão. A qualidade tanto do gás, quanto do adubo, bem como a eficiência na produção destes é consequência direta da ação das bactérias no processo de fermentação

[33] [62]. A mistura de gás resultante é composta de CH_4 e CO_2 . A qualidade desses gases deve ser medida, pois o ideal é que a proporção de CH_4 esteja acima de 60% e o CO_2 abaixo de 40% [18].

A maneira eficiente de operar um digestor para minimizar problemas de instabilidades térmicas ou de fluxo de dejetos é monitorar e controlar as quatro etapas do processo de DA (Figura 2): hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Os tempos de cada etapa de DA diferem significativamente. Por exemplo, a duração da hidrólise é geralmente entre horas e dias, dependendo da complexidade do substrato e do ambiente químico. As fases intermediárias (acidogênese e acetogênese) também podem durar entre horas e dias enquanto que a metanogênese dura de segundos a minutos [78].

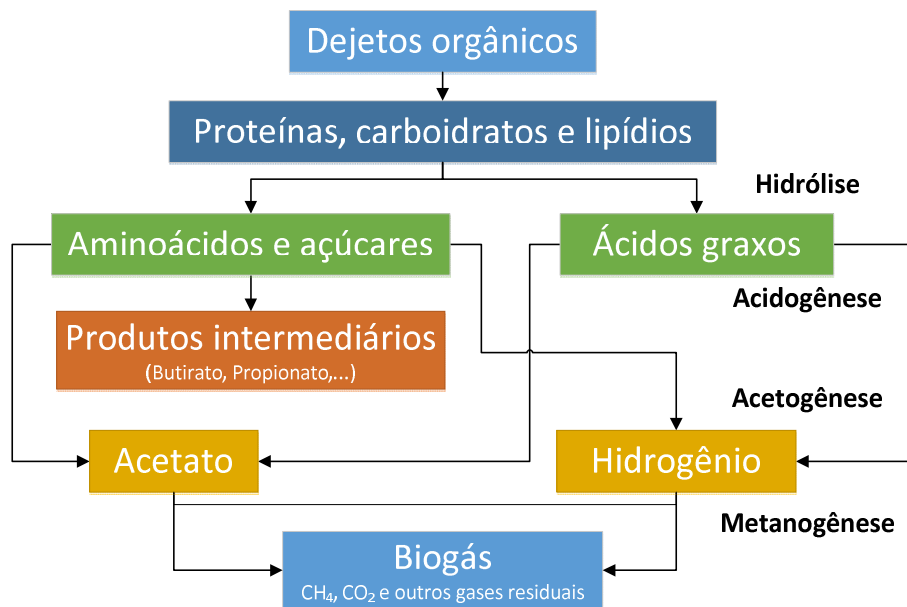


Figura 2 - Fases do processo de DA.

A hidrólise é o processo que quebra as moléculas grandes em moléculas menores permitindo que estas passem pela membrana celular sendo consumidos pelas bactérias. Nessa etapa, o dejetos colocado no tanque de fermentação começa a ser transformada pelo primeiro grupo de bactérias que são responsáveis por consumir as proteínas, carboidratos e lipídios contidos na matéria orgânica. Um exemplo é a quebra de proteínas até se transformarem em um aminoácido ou amido e a celulose se transformar em açúcar. Este costuma ser o primeiro processo de digestão em âmbito químico, que costumam ocorrer depois do material orgânico ter sido triturado fisicamente (trituradores de material orgânico)

em partículas menores. O resultado desta etapa é a produção de açúcares, aminoácidos, e ácidos graxos [78].

A etapa da acidogênese consome os aminoácidos, açúcares e ácidos graxos, continuando a quebra em moléculas menores, ocorrendo formação de ácidos graxos voláteis (e.g., acético, propiônico, butírico, valérico) e produção de amônia (NH_3), CO_2 e sulfeto de hidrogênio (H_2S) como subprodutos [42].

A acetogênese inicia a produção de gases onde as moléculas da acidogênese são digeridas, obtendo como resultado CO_2 , hidrogênio e ácido acético. Estes elementos são fundamentais para que a fase da metanogênese tenha bons resultados. Ambas as etapas finais que indicam a produção de CH_4 e CO_2 .

A metanogênese acontece combinando a concentração de acetato e hidrogênio. O desequilíbrio de um destes elementos, produzidos nas fases anteriores, pode comprometer essa etapa. Existe uma dependência entre as quatro etapas, sendo essencial manter um equilíbrio das condições do meio (temperatura e pH) através de um monitoramento, controle e atuação da DA.

2.1.2 MICROBIOLOGIA DO SISTEMA DE DA

Para garantir tanto a qualidade do biogás, quanto do biofertilizante, é importante destacar quais são os fatores relacionados que implicam as suas produções. São eles: microrganismos, acidez, carga orgânica, potencial de oxidação e redução, toxicidade e inibição, proporção entre nitrogênio e carbono, e temperatura [63].

2.1.2.1 Acidez (pH)

Durante a DA, a acidogênese e metanogênese requerem diferentes níveis de pH que refletem na acidez do meio físico. Bactérias acidogênicas preferem pH entre 5,5 e 6,5, enquanto que bactérias metanogênicas preferem o pH no intervalo de 7,8 a 8,2 [5]. Em um ambiente onde ambas as culturas coexistem, a faixa de pH ideal é de 6,8-7,4 [29].

Os produtos da fase de hidrólise são ácidos orgânicos que diminuem o pH. Se o pH fica muito baixo, as bactérias metanogênicas não podem converter os ácidos em CH_4 , e o sistema falha. Os ácidos orgânicos produzidos são vistos como substâncias inibidoras

e afetam diretamente a produção de biogás, demonstrando que existe um distúrbio a temperatura no processo de DA [63].

2.1.2.2 Temperatura

Em geral, quanto maior a temperatura, maior a eficiência do sistema de DA. Porém, essa não é uma relação direta, pois acima de 65°C as bactérias Termofílicas começariam a morrer, diminuindo o desempenho do sistema. Chegando a 90°C, a maioria da população de bactérias estaria morta e a eficiência do sistema seria mínima ou nula.

Pequenos biodigestores geralmente operam a temperatura ambiente ou a temperatura do solo quando são instaladas abaixo da superfície. A temperatura do solo é geralmente menor do que o intervalo ideal de temperatura necessária, reduzindo assim a taxa de digestibilidade [65]. A Figura 3 apresenta as faixas de temperatura onde três das bactérias mais importantes do processo de DA operam com a melhor eficiência.

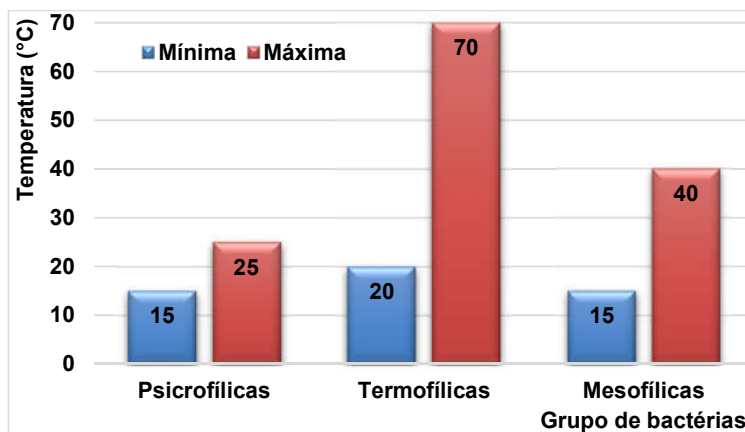


Figura 3 – Faixa de temperatura ideal para cada tipo de bactéria [42]

2.1.2.3 Proporção de Nitrogênio e Carbono

A composição do dejetos interfere diretamente na produção de biogás especialmente no que se refere a proporção de Nitrogênio:Carbono (N:C) [27]. O excesso de nitrogênio aumenta a taxa de NH_3 , que é um elemento inibidor da produção de biogás. Já o excesso de carbono acelera a hidrólise e promove a queda do pH que interfere no desenvolvimento microbiológico. A proporção ideal de N:C é de 20:30 [98].

2.1.2.4 Carga Orgânica e Tempo de Retenção Hidráulica

As taxas de produção e a estabilidade da digestão anaeróbia e o biogás também dependem da carga orgânica que precisa possuir uma boa proporção de proteínas, lipídios e carboidratos, para a máxima produção de gás. Nos casos em que carga orgânica é maior do que o normal, o processo de DA pode ficar instável devido à produção excessiva de ácidos voláteis em concentrações inibitórias [56].

A produção de CO₂, sob estas condições, promove a formação de espuma no digestor e contribui para a ocorrência de problemas operacionais. Fazer cargas uniformes com base em adições frequentes ou contínuas de substrato para o digestor permite um funcionamento mais consistente.

Para a recuperação de energia, o tempo de retenção hidráulica deve ser calculado para dar o máximo de eficiência. Se a taxa de carga hidráulica for muito elevada o sistema pode eliminar uma parte da população microbiana que sai do sistema antes que a população possa se reproduzir e degradar os resíduos.

2.1.2.5 Potencial de Oxidação/Redução (redox)

O potencial de oxidação/redução (redox) dos dejetos é definido pela facilidade com a qual ele ganha ou perde elétrons. Quando um elemento perde elétrons ele é oxidado, ao passo que, quando um substrato ganha elétrons, este foi reduzido.

As cepas metanogênicas produtoras de CH₄ são muito sensíveis ao teor de oxigênio e têm uma atividade menor na sua presença, diminuindo assim o rendimento de biogás. O potencial de redução (medidas de tendência das espécies químicas de adquirir elétrons) pode ser usado como um indicador do processo de fermentação para produção de CH₄, uma vez que o crescimento de bactérias metanogênicas requer um potencial de redução relativamente baixo, onde o favorecimento do crescimento de bactérias anaeróbicas é na faixa de -200 mV a -400 mV [11] [75].

2.1.2.6 Inibição e Toxidade

Os microrganismos responsáveis pela digestão anaeróbia podem ser inibidos pelas substâncias presentes nos resíduos, como compostos halogêneos, metais pesados e

cianeto, ou por produtos metabólicos dos microrganismos, tais como NH_3 , ácidos gordos voláteis e sulfureto. Substâncias tóxicas, antibióticos e componentes do material de alimentação podem causar efeitos adversos no metabolismo bacteriano, sendo responsáveis pela falha ocasional de sistemas de DA [11].

2.1.3 BIOGÁS

O biogás é um dos produtos produzidos pela decomposição de matéria orgânica e é considerado um biocombustível. Ele é muito parecido com o gás natural e é constituído principalmente por uma mistura de hidrocarbonetos (compostos químicos formados por carbono e hidrogênio) como o CO_2 e o CH_4 . Como os outros combustíveis, este também é inflamável quando colocado sob pressão [10].

As maiores concentrações são de CH_4 e CO_2 , onde as proporções destes representam a qualidade efetiva do biogás. Uma maior proporção de CH_4 significa um gás melhor para a queima, onde o mínimo economicamente aceitável de sua proporção no biogás é de 65%.

Tabela 1 – Composição do biogás [33].

Composto	% na mistura
Metano (CH_4)	60 a 75
Dióxido de carbono (CO_2)	25 a 40
Hidrogênio (H_2)	1 a 3
Nitrogênio (N_2)	0,5 a 2,5
Oxigênio (O_2)	0,1 a 1
Ácido Sulfídrico (H_2S)	0,1 a 0,5
Amônia (NH_3)	0,1 a 0,5
Monóxido de carbono (CO)	0 a 0,1
Água (H_2O)	variável

O CO_2 também tem a sua utilidade comercial, pois ele é utilizado na indústria para a gaseificação de bebidas [33]. Para que um sistema de DA produza uma proporção maior deste gás, é necessário reduzir a produção de CH_4 .

Além do CH_4 e do CO_2 , o H_2S e NH_3 precisam ser analisados em sua proporção no biogás. O H_2S é altamente corrosivo, atacando as peças metálicas de queimadores ou de motores. A proporção de H_2S no biogás está relacionada ao tipo de matéria orgânica

utilizada nos sistemas de DA. Já o NH_3 em concentrações mais altas representa um elemento de inibição do processo de fermentação dentro do sistema de DA [33].

Em referência ao CH_4 puro, à temperatura e pressão padrão tem um poder calorífico de cerca de 33.980 kJ/m^3 . O biogás com 65% de CH_4 tem um poder calorífico de cerca de 22.353 kJ/m^3 , porque só queima o CH_4 . A Tabela 2 apresenta a equivalência de 1 m^3 de biogás com 65% de CH_4 em relação a outros biocombustíveis.

Tabela 2 – Equivalências energéticas [33].

Quantidade de combustível equivalente a 1 m^3 de biogás	
Gás natural	$0,6 \text{ m}^3$
Propano	$0,882 \text{ l}$
Butano	$0,789 \text{ l}$
Gasolina	$0,628 \text{ l}$
Óleo combustível	$0,575 \text{ l}$
Carvão betuminoso	$0,455 \text{ kg}$
Madeira seca	$1,602 \text{ kg}$

2.1.4 BIOFERTILIZANTE

O biofertilizante, assim como o biogás, é um subproduto obtido a partir da DA de matéria orgânica. No estado líquido, o biofertilizante contém uma complexa composição de nutrientes essenciais às plantas (principalmente nitrogênio e fósforo), atuando como fertilizante e também como defensivo agrícola, erradicando pragas, doenças e insetos. Através da evaporação, que remove a água presente no biofertilizante, este passa para o estado sólido [10]. Com nível de pH em torno de 7,5, o biofertilizante funciona como corretor de acidez estabilizando o pH, eliminando o alumínio e liberando o fósforo dos sais insolúveis do alumínio de ferro. A elevação do pH dificulta a multiplicação de fungos patogênicos [29]. Além de não propagar mau cheiro e não ser poluente, a obtenção do biofertilizante apresenta um custo muito inferior (ordem de 80%) comparado ao custo da produção de fertilizantes químicos [10].

2.2 BIODIGESTORES

Biodigestor é um equipamento usado para processar matéria orgânica. A matéria orgânica, quando de origem animal, também pode ser chamada de dejetos. O biodigestor é

composto por um ou mais recipientes onde a matéria orgânica é depositada e misturada com água, para então passar por um processo de fermentação anaeróbica que resulta em biogás e biofertilizante [88].

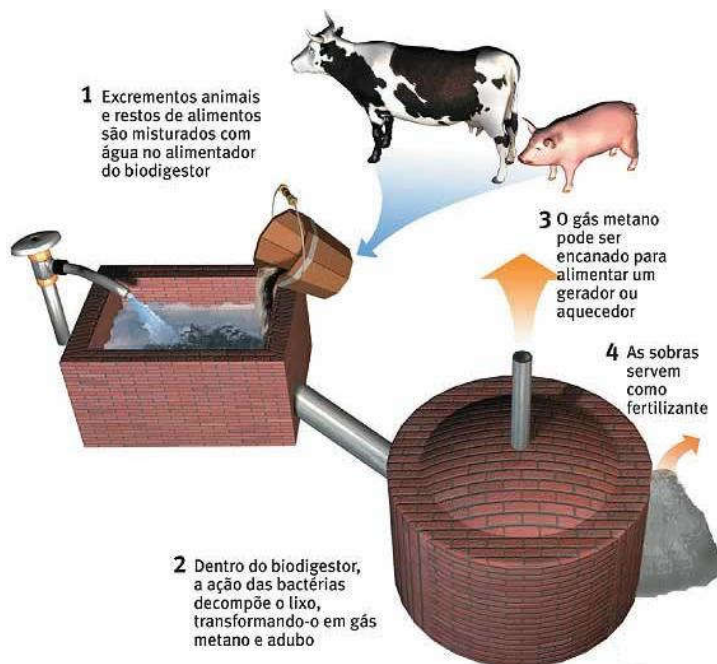


Figura 4 – Processo de DA (extraído de [86]).

Diversos tipos de matéria orgânica podem ser utilizados para abastecer biodigestores e produzir biogás. Esta matéria orgânica pode ser classificada de acordo com a composição, que pode ser de um único tipo (e.g., esterco de gado), ou então misturada (e.g., esterco de gado e esterco suíno, frutas, gramíneas, água residual).

Os sistemas podem funcionar de forma *temporal* (fluxo contínuo) ou *por demanda* (batelada). O funcionamento é chamado de temporal quando o biodigestor recebe uma carga de matéria orgânica com uma base de tempo (e.g., diariamente) e tem uma descarga de biofertilizante. O funcionamento é chamado de “por demanda” quando a referência de carga é a capacidade máxima de armazenamento de matéria orgânica, mantendo-a armazenada até a completa biodigestão [20].

2.2.1 HISTÓRICO DOS BIODIGESTORES

Segundo [62] [100] [91], o uso da DA para gerar energia e também para higienização ocorre a bastante tempo. A utilização de biogás a partir da DA tem evidências de da sua utilização a mais de 3.000 anos para aquecimento de águas balneárias na Assíria. O navegador Marco Polo informou que tanques de esgoto cobertos, construídos para a produção de biogás, a cerca de 2.000 ou 3.000 anos atrás, foram mencionados na literatura chinesa antiga. Na Europa, os primeiros relatórios que citam o biogás datam do século 17. O assunto passou a ser uma questão de pesquisa científica no século 18, onde a quantidade de gás e de matéria orgânica em decomposição foi correlacionada. Também descrevem que o processo foi desenvolvido sob condições anaeróbicas, sendo CH_4 o componente inflamável do gás produzido na DA de dejetos de gado.

A primeira unidade de biogás construída na Índia para produção de gás e para o tratamento de esgoto de uma colônia de leprosos data de 1859. Estações de tratamento de esgoto foram construídas posteriormente na Inglaterra e Alemanha, utilizando o biogás produzido, primeiro para iluminar lanternas de rua e, em seguida, para o aquecimento e depois para fornecer gás público e abastecer veículos de combustível no início do século 20 [100]. O século 20 trouxe o progresso científico, impulsionado a tecnologia de biogás em todo o mundo. Descobriu-se que os microrganismos realizam o processo de DA e são responsáveis pela produção de CH_4 . Nos Estados Unidos, na década de 1930, as ideias foram desenvolvidas para utilizar resíduos ricos em celulose para a produção de biogás. A produção de CH_4 a partir de dejetos animais foi desenvolvida na Índia. Na China, as famílias prósperas construíram algumas unidades de biogás rurais. As primeiras unidades de biogás agrícolas na África foram construídas na Argélia e, com base nessas experiências, este tipo de biodigestor foi espalhada no Sul da França e Itália após a Segunda Guerra Mundial. Na Alemanha, a tecnologia utilizada na produção de biogás agrícola foi inicialmente adotada a partir de águas residuais e de tratamento de lodo de plantas de esgoto municipais [100].

Nos anos 40, durante a Segunda Guerra Mundial e logo após o seu término, houve uma crescente demanda por energia, impulsionando os estudos para ampliar a produção de biogás e melhorar a eficiência do processo. As propriedades agrícolas foram as responsáveis por suprir as demandas de energia em caráter emergencial. Porém, com a

utilização de combustíveis fósseis associado ao baixo custo do óleo mineral, as plantas de biogás foram quase que totalmente desativadas na Europa.

Nas décadas de 60 e 70, com o preço do petróleo em alta e a preocupação com as emissões de gases e o efeito estufa, as plantas de biogás voltaram a pauta de discussão. A China ampliou a quantidade de biodigestores nos anos 70 através de subsídios governamentais, chegando a um total de sete milhões de plantas. A Índia chegou a um milhão de plantas. Na Europa, em especial na Alemanha que desenvolveu uma legislação sobre energias renováveis, houve um grande crescimento nas plantas de biogás. Em 1985 eram 75 plantas e em 1997 chegou a 400, e em 2014 esse número era de 7.720. Os sistemas atuais produzem biogás para geração de energia e aquecimento urbano, além da produção do biofertilizante que foi inserido dentro da cadeia produtiva agrícola.

No Brasil, até 2014, a quantidade de plantas de biogás era de 148, sendo que 48 em uso, 5 em reforma e 6 em planejamento ou instalação [55]. Existem vários modelos de biodigestores, e destes os modelos bem conhecidos no Brasil são o indiano, chinês e canadense, mas também estão descritos os modelos de batelada e BioKöler.

2.2.1.1 Biodigestor Indiano

O modelo de Biodigestor Indiano, ilustrado na Figura 5, possui quatro componentes principais: reservatório de dejetos (1), reservatório de biofertilizante (2), cúpula de gás (3) e tanque de fermentação (4).

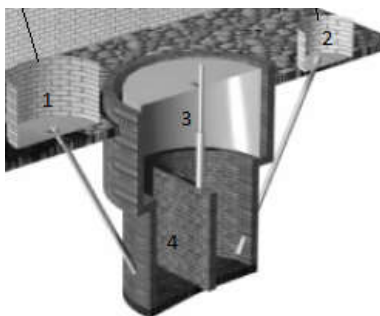


Figura 5 - Modelo de Biodigestor Indiano (extraído de [87]).

O biodigestor possui uma cúpula para armazenar gás, sendo que a sua estrutura inferior, enterrada no solo, se movimenta conforme a quantidade de gás produzido. Quando se enche de biogás, a cúpula sobe em volta de uma guia de metal. Essa guia é móvel e a

pressão é constante. Este modelo tem um processo de fermentação mais rápido, pois o biodigestor é enterrado, aproveitando a temperatura do solo. O tanque de fermentação possui uma divisão que separa o novo dejetos que entra do que já foi fermentado. A passagem de uma divisória para outra é feita por pressão [87].

2.2.1.2 Biodigestor Chinês

O modelo de Biodigestor Chinês é mais rústico que o indiano. A Figura 6 ilustra este modelo que é feito em alvenaria, sendo que o recipiente onde ocorre a fermentação é enterrada. É um modelo que trabalha sob alta pressão que pode variar conforme a quantidade de gás produzida.

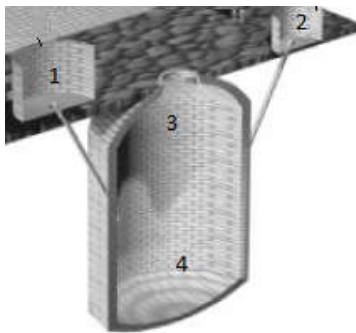


Figura 6 - Modelo de Biodigestor Chinês (extraído de [87]).

Ele também tem um reservatório de dejetos (1), reservatório de biofertilizante (2), cúpula de gás (3) e fermentador (4). Diferentemente do modelo indiano, o Biodigestor Chinês não possui uma divisão no fermentador. O dejetos de entrada é fermentado e ao final do processo removido para o reservatório de biofertilizante. Por ser construído com tijolos, sofre com problemas estruturais como rachaduras e vazamento de gás [87].

2.2.1.3 Biodigestor por Batelada

O Biodigestor por Batelada consiste de um tanque que recebe uma carga única de biomassa, e após passar pelo processo de fermentação, ele é descarregado por completo para receber uma nova carga de biomassa [87].

Esse modelo é adequado para granjas de aves, por exemplo. Nessas granjas, as aves são alimentadas até atingir uma idade de abate, quando são removidas dos

galinheiros. Após a remoção das aves, a biomassa é coletada e colocada no biodigestor e ficam ali até passarem por todo o processo de fermentação anaeróbica, restando ao final o biofertilizante. O processo é reiniciado quando é feita a reposição das aves que irão produzir uma nova quantidade de biomassa e nesse intervalo o biodigestor fica ocioso.

2.2.1.4 Biodigestor Canadense

O modelo de Biodigestor Canadense, apresentado na Figura 7, é formado por uma lagoa de dejetos (6) coberta por uma cúpula de lona (3), que vai inflando conforme a quantidade de biogás é produzida. Ele possui um reservatório de entrada de dejetos (1), um sistema de vedação da cúpula de lona (2), uma saída de gás (4) e uma saída para o reservatório de biofertilizante (5).

Esse modelo de biodigestor possui uma grande área de exposição solar e a sua largura é maior que a profundidade, o que possibilita uma boa produção de gás [87].

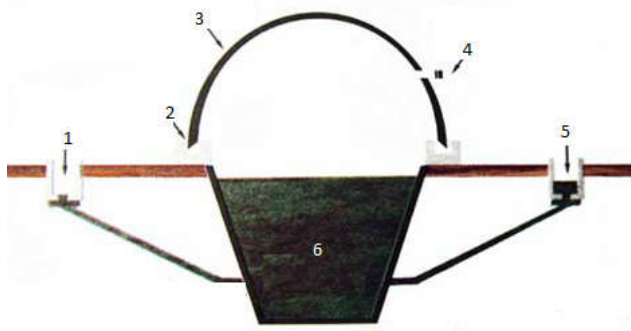


Figura 7 - Modelo de Biodigestor Canadense [86].

2.2.1.5 Biodigestor BioKöhler

A Figura 8 ilustra o modelo de Biodigestor BioKöhler [87], que é desenvolvido por uma empresa brasileira.

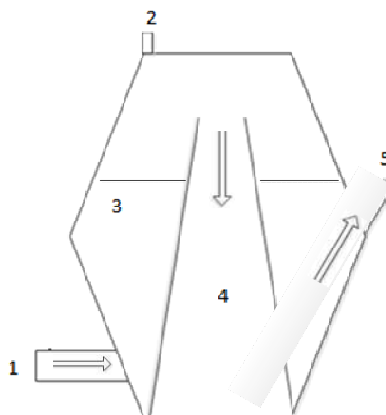


Figura 8 - Modelo de Biodigestor BioKöhler.

O reservatório de fermentação é produzido em fibra de vidro, possuindo uma entrada de biomassa (1), fermentador (3), funil de separação (4), saída de biofertilizantes (5) e válvula de gás (2). O reservatório tem uma parte enterrada e a outra parte fica exposta a radiação solar para facilitar o processo de fermentação. O funcionamento do Biodigestor BioKöhler segue o mesmo princípio dos modelos chinês e indiano, onde uma carga de biomassa é colocada dentro do fermentador pela válvula de entrada (1). A reposição de carga faz com que o dejetos tratados no fermentador (3) seja “empurrado” para a parte superior e desça pelo funil de separação (4), sendo direcionado para a válvula de saída do tanque de biofertilizante (5). O gás é canalizado para fora do tanque de fermentação por um encanamento (2). Esse foi o modelo utilizado nas análises microbiológicas e de coleta de gás descritas nesta Tese.

2.2.1.6 Resumo dos Modelos de Biodigestores

A Tabela 3 apresenta um resumo dos modelos de biodigestores apresentados nesta seção, salientando o fluxo de carregamento de dejetos e os principais elementos do modelo. É importante identificar essas diferenças de elementos pois eles podem se tornar os pontos de monitoramento, controle e atuação.

Tabela 3 – Modelos de biodigestor e seus principais elementos.

Modelo	Fluxo de carregamento de biomassa	Principais elementos do biodigestor
Indiano	Contínuo	Reservatório de biomassa Reservatório de biofertilizante Cúpula de gás Tanque de fermentação com divisão
Chines	Contínuo	Reservatório de biomassa Reservatório de biofertilizante Cúpula de gás Tanque de fermentação sem divisão
Canadense	Contínuo	Lagoa de biomassa Lona para armazenamento de gás Reservatório de biofertilizante
Bioköhler	Contínuo/batelada	Reservatório de biomassa Reservatório de biofertilizante Fermentador com funil de separação
Batelada	Não-contínuo	Fermentador Reservatório de biofertilizante

Os modelos de biodigestores descritos foram desenvolvidos em diferentes regiões geográficas do planeta, considerando condições climáticas, altitude e disponibilidade de matéria orgânica. Apontar qual é o melhor modelo de biodigestor não é tópico desta Tese.

2.3 REDES DE SENSORES SEM FIO (RSSF)

Uma RSSF é definida como um conjunto de nodos sensores distribuídos em um determinado ambiente, cuja comunicação é feita por um meio sem fio e cuja função é monitorar, coletar e enviar dados para um nodo central, onde serão processados [2]. Em [3], os autores descrevem que pesquisas em RSSFs sofrem da falta de cenários de aplicações práticas onde estas redes sejam a melhor solução, pois os pesquisadores geralmente não enfatizam os domínios de aplicação que estão tentando resolver; logo, não podem avaliar com precisão a eficácia de sua proposta porque, para diferentes áreas de aplicação, se têm diferentes questões técnicas envolvidas. Enfocam ainda que para explorar todo o potencial das RSSFs é preciso primeiramente modelar a aplicação. Por outro lado, o desenvolvimento deste tipo de rede está em constante renovação e, sob a perspectiva do campo de aplicações, se mostra uma excelente opção para desenvolver aplicações que tragam benefícios diretos à humanidade [67] [81].

Cordeiro e Agrawal [26] caracterizam uma RSSF por ser uma arquitetura de comunicação que possui topologia dinâmica, largura de banda e capacidade energética muito limitadas. A norma IEEE 802.15.4 oferece a base para desenvolver uma modalidade de rede sem fio e é caracterizado por apresentar baixo custo de comunicação, baixo velocidade de transmissão de dados e comunicação onipresente entre dispositivos. Ela também define apenas as duas camadas mais baixas da arquitetura OSI (*Open Systems Interconnection*), ou seja, a camada física, em inglês *Physical Layer* (PHY) e a camada de controle de acesso ao meio, em inglês *Media Access Control* (MAC).

Segundo [2] os nodos de uma RSSF são densamente implantados dentro de um ambiente que se quer sensoriar ou muito próximos a ele. Ademais, recentes avanços na tecnologia dos sistemas micro eletromecânicos, da comunicação sem fio e da eletrônica digital, permitiram o desenvolvimento de nodos sensores multifuncionais de baixo custo, baixo consumo de energia, pequeno tamanho e com excelente comunicação a curtas distâncias. Isto permitiu que as RSSFs evoluíssem em aplicabilidade e importância em diversos setores produtivos. Estas redes precisam ser eficientes na comunicação e troca de dados e no gerenciamento de energia [3][19]. Para atender estes requisitos, existem obstáculos técnicos que precisam ser superados, destacando os que possibilitam juntar mobilidade e portabilidade com menor consumo de energia, baixa latência e em especial confiabilidade dos valores obtidos.

As dificuldades associadas às RSSFs limitam a sua aplicabilidade em ambientes de missão crítica que exigem monitoramento e controle contínuo. Entretanto, elas são redes com implantação simples e baixo custo de instalação, dispensando cabeamento, favorecendo mobilidade para controle e monitoramento de aplicações na maioria dos setores [24][40][41].

Conforme [82], cada um dos nodos sensores de uma RSSF é composto por quatro subsistemas, mostrados na Figura 9: (i) subsistema computacional, consistindo de um micro controlador e um componente de memória, possuindo a capacidade de executar códigos arbitrários; (ii) subsistema de comunicação, composto por um rádio de alcance variável que permite a comunicação sem fio, podendo utilizar tecnologias como rádio frequência, infravermelho ou tecnologia ótica; (iii) subsistema de sensoriamento, formado por sensores e atuadores que implementam a interface com o mundo físico, sendo

responsável pela gestão dos parâmetros físicos do ambiente monitorado; e (iv) subsistema de fonte de energia que alimenta todo o conjunto.

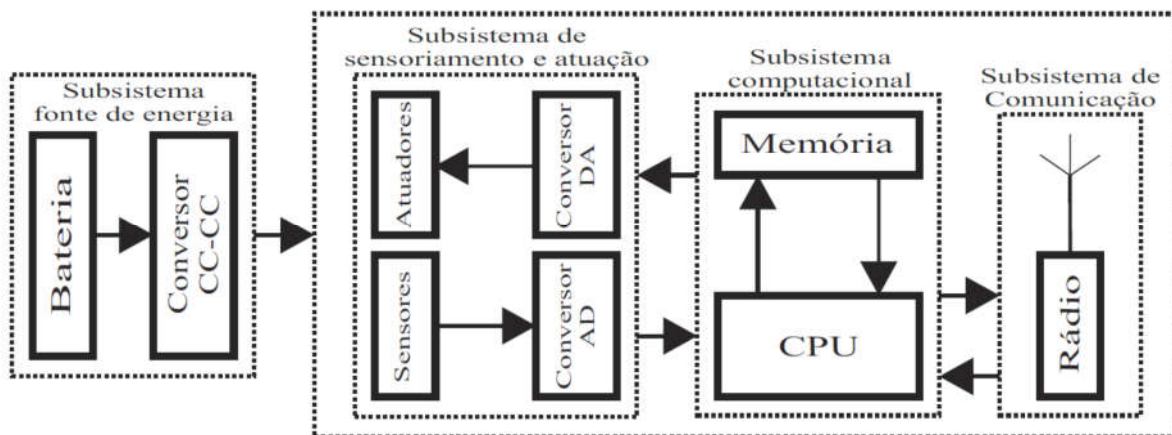


Figura 9 - Estrutura básica de um nó sensor (extraído de [82]).

Braun e Huber[18] descrevem o processo de funcionamento básico de um nó sensor através de uma máquina de estados, ilustrada na Figura 9, que inicia com a ativação do sensor que o leva para o modo de inicialização (*initialize*) para, em seguida, entrar em modo de “dormir” (*sleep state*). Este modo é alterado quando da aquisição de instruções (*acquiring instruction*). Caso não haja dados para coletar, o sensor aguarda a próxima instrução, caso contrário, o nó seleciona o modo de trabalho (*working mode*), que pode ser o estado de dormência (*sleeping mode*), modo de transmissão de dados (*sending mode*), modo de recepção de dados (*receiving mode*) ou o modo de economia de energia (*energy-saving mode*).

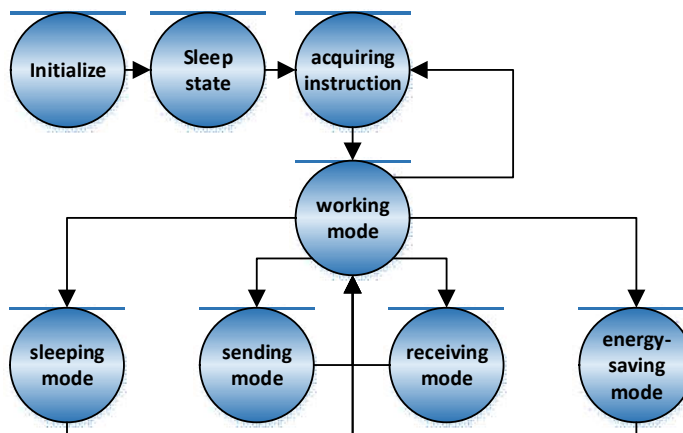


Figura 10 - Diagrama de estados de uma RSSF [19].

Os trabalhos de [12], [74] e [99] observam que as redes sem fio incluem redes de comunicações móveis, RSSFs, “*wireless* LANs”, redes Bluetooth e redes *ad hoc*, com características em comum, descritas nos itens que seguem que determinam os requisitos de projeto e operação das mesmas:

- **Capacidade computacional limitada:** por causa do custo, do tamanho e de consumo de energia, são muito limitados a capacidade do processador e a quantidade da memória de dados e código de cada nodo sensor;
- **Foco em eficiência energética:** os nodos sensores são frequentemente invalidados ou abandonados quando ficam sem energia. Portanto, protocolos e algoritmos eficientes de conservação de energia devem ser considerados. Além disto, o consumo de energia dos nodos para a transmissão/recepção é maior do que o consumo para a computação, que por sua vez é maior que o consumo em repouso. Por exemplo, o consumo para a transmissão de um bit de dados é o mesmo utilizado para executar três mil linhas de instruções [12]. Portanto, transmitir/receber somente informações estritamente necessárias aumenta a autonomia de uma RSSF, assim como ativar o nodo apenas nos momentos necessários para sensoriar, computar, transmitir e/ou receber dados;
- **Comunicação variável:** a largura de banda de comunicação da rede de sensores é estreita e mutável, e sua distância de comunicação varia de dezenas a várias centenas de metros. Ademais, é difícil manter o funcionamento de uma RSSF porque a comunicação com os nodos sensores é influenciada por elementos ambientais, tais como obstáculos topográficos, condições meteorológicas e iluminação. Assim, o hardware e o software de nodos de uma RSSF devem ser robustos e tolerantes a falhas;
- **Dinamicidade:** nodos sensores podem ser excluídos da rede devido à exaustão da energia ou por falhas de hardware, assim como é possível que alguns nodos sensores sejam adicionados à rede por exigência das tarefas propostas. Isto provocará alterações na topologia da rede, de modo que a RSSF deverá ter a capacidade de reconfiguração dinâmica;
- **Comunicação por múltiplos saltos:** nodos sensores somente podem se comunicar com vizinhos que estejam ao alcance do sinal. Caso um nodo

precise se comunicar com nodos que não estejam próximos, ele deve realizar uma transmissão de múltiplos saltos, em inglês *multi-hop*, utilizando para isto, nodos intermediários entre este e seu alvo;

- **Dependência da aplicação:** uma RSSF é uma rede coletora de dados distribuída, embora o tratamento dos dados coletados possa ser centralizado, pois os nodos sensores coletam e repassam suas informações para algum tipo de “sorvedouro”, sendo normalmente comunicação *multi-hop* e padrão de tráfego “muitos-para-um”. O principal objetivo das RSSFs é coletar dados do ambiente e diferentes aplicações de redes de sensores se aplicam a diferentes sinais físicos (por exemplo, temperatura, umidade e pressão), ou seja, um protocolo de roteamento que funciona para um caso pode não ser eficiente para outro.

2.3.1 USO DE RSSF NO MONITORAMENTO E CONTROLE DE AMBIENTES

Monitorar e controlar um ambiente permite manter este conforme parâmetros preestabelecidos. Com a utilização de RSSFs, os dados de fenômenos que podem ser capturados por sensores, tais como temperatura, luz, som, fluxo ou pressão são recolhidos por sensores e, então, transmitidos para um servidor. Os nodos da RSSF são usados para monitorar e controlar o ambiente físico a partir de locais remotos. Nos últimos anos, as aplicações de RSSF têm sido amplamente utilizadas com foco médico, militar, industrial, ambiental e agrícola [35].

A Figura 11 exemplifica uma arquitetura *ad hoc* de uma RSSF que pode ser aplicada ao monitoramento de ambientes. A imagem contém nodos sensores (*Sensor Node*), computador com acesso à rede (*User*) e nodo sorvedouro (*Sink Node*) [76]. Os nodos sensores transmitem dados coletados usando alguma tecnologia de comunicação sem fio. O nodo sorvedouro coleta os dados de todos os demais nodos, e os transmite para o computador do usuário através da Internet ou outro meio disponível.

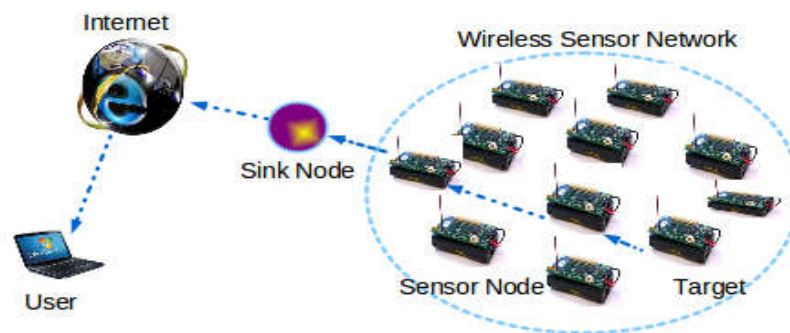


Figura 11 - RSSF com conexão à Internet através de um sorvedouro [76].

Os quatro requisitos essenciais para o desenvolvimento de sistemas de monitoramento são [76]: (i) **autonomia**: a bateria dos nodos sensores deve ter carga suficiente para todo o período de operação; (ii) **confiabilidade**: devem ser previstas, avaliadas e monitoradas situações que possam gerar falhas de hardware/software; (iii) **robustez**: o sistema deve atuar sobre situações que tenham gerado falhas inesperadas de hardware/software; i.e., a rede deve possuir requisitos de tolerância a falhas de hardware ou software, e garantir estar em um estado seguro em caso de uma falha geral ou crítica; e (iv) **flexibilidade**: a rede deve absorver mudanças na configuração e disposição dos nodos sensores e estações de coleta sem afetar seu funcionamento. Eventualmente, esta pode manter registro das alterações ocorridas ao longo do seu funcionamento.

O desenvolvimento da tecnologia de RSSFs ainda não está completamente consolidado e alguns argumentos apresentados abaixo e descritos por [3] prevalecem, limitando as operações dessas redes. Citam-se:

- Estruturas de comunicação existentes são predominantemente com fio e não foram projetadas para trafegar dados pervasivos, requerendo revisão significativa. A complexidade e o alto custo para a cobertura de grandes instalações evitam a sua adoção rápida;
- Alimentação por bateria é uma grande preocupação para sistemas sem fio;
- Sistemas sem fio são considerados arriscados para o controle de processos sendo referenciados como de baixa confiabilidade.

2.3.2 MONITORAMENTO E CONTROLE EM SISTEMAS DE DIGESTÃO ANAERÓBICA

Um sistema de monitoramento e controle ideal deve ser capaz de detectar uma instabilidade e estabelecer contramedidas para compensá-la. Um sistema de monitoramento eficiente deve ser *online*, automatizado e robusto, detectando os primeiros indícios de instabilidade no processo [51].

A importância do monitoramento do processo de DA é citada em [46] que descreve os modelos que auxiliam na compreensão do que cada uma das fases e etapas representa em proporções na composição dos elementos.

Alguns indicadores que tradicionalmente têm sido utilizados para o monitoramento são a taxa de produção de gás, composição gasosa, temperatura, alcalinidade e concentrações de ácidos. Parâmetros de fase líquida, tais como temperatura, pH, alcalinidade e ácidos graxos voláteis, em inglês *Volatile Fatty Acids* (VFA), refletem o ambiente de microrganismos e podem dar resposta mais rápida do que parâmetros de fase gasosa (i.e., composição de gás e taxa de produção).

O pH é utilizado como indicador do processo, mas a eficácia da utilização deste, como parâmetro de controle, está fortemente dependente da alcalinidade, ou seja, a capacidade de tamponamento no processo de biodigestão [6].

A modelagem de uma infraestrutura para monitoramento e controle de processos anaeróbicos está diretamente relacionada ao estudo da vida microbológica dentro do digestor, local onde ocorre a transformação de matéria orgânica em bioenergia. As bactérias responsáveis por essa tarefa necessitam de um ambiente estável para produzir um volume considerável de CH₄ [32].

O biodigestor é um elemento que pode estar presente tanto em regiões urbanas quanto rurais. Nesse trabalho destacamos o biodigestor no ambiente agrícola e tradicionalmente, esses ambientes têm sido unicamente dependentes do trabalho humano com aplicação limitada de equipamentos mecânicos e máquinas. As aplicações da tecnologia avançada, tais como computação embarcada, robótica, tecnologia sem fio, GPS/GIS (*Geographical Positioning System/Geographical Information System*) e software de SGBD (Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados) são vistos como desenvolvimentos recentes [90]. Processos agrícolas como irrigação, monitoramento,

mapeamento da produtividade, cultivo, armazenamento, processamento de alimentos, entrega ao consumo, são exemplos de aplicação da tecnologia e avançam rapidamente para os demais espaços do cenário agropecuário. O domínio agrícola coloca vários requisitos para a utilização de RSSF como a coleta de dados climáticos, do solo e das culturas plantadas, monitoramento das exigências de fertilizantes e água [80] [105].

Modelos de monitoramento e controle de ambientes críticos que seguem estes requisitos provaram ser válidos em trabalhos como: (i) para armazenagem de frutas em ambientes refrigerados [52]; (ii) para ambientes agrícolas em geral [107]; e (iii) em um digestor híbrido para produção de biogás [97] [17].

Algumas usinas de biogás agrícola, por exemplo, utilizam um sistema de supervisão, aquisição e controle de dados nos procedimentos básicos de operação. Isso normalmente inclui monitoramento de temperatura, de taxa de fluxo do biogás e do pH do substrato no digestor [44].

Recentes avanços em tecnologias de processos analíticos, permitem que processos de bioconversão complexos sejam monitorados e decifrados usando, por exemplo, espectroscópicos e princípios de medição eletroquímicos [24]. Estas tecnologias de monitoramento geram grande quantidade de dados que precisam ser analisados. Isto pode ser resolvido com o uso da análise multivariada de dados. Assim, essas modalidades de controle dos processos têm o potencial de trazer o monitoramento e controle de sistema de DA para um novo nível de confiabilidade e eficácia [68].

A instrumentação dos sistemas de biodigestão pode ser feita com diversos tipos de tecnologias de hardware, como sensores e atuadores. No projeto de [20] foram utilizados dispositivos reconfiguráveis do tipo FPGA (*Field Programmable Gate Arrays*) ao invés de microprocessadores e processadores digitais de sinais, em inglês *Digital Signal Processors* (DSPs), para uso em medidores de fluxo de gás. A vantagem é que uma FPGA tem complexidade lógica semelhante aos demais dispositivos, mas com arquitetura flexível que permite explorar diversas funcionalidades no mesmo circuito integrado.

Além da necessidade de hardware, também é necessário um software para coletar, processar e enviar as informações para uma interface com o usuário. Gueguim et al. [39] desenvolveram um software com interface WEB para monitoramento *online* de sistemas de biodigestão, recebendo continuamente medidas de hidrogênio, CH₄ e frações de CO₂,

temperatura do substrato, entre outras. As medidas foram efetuadas em intervalos de tempo de 1 minuto, 12 minutos e 24 horas. Este sistema conta com a ação de atuadores (misturadores) acionados conforme as regras definidas em uma análise multivariada dos dados de sensoriamento recebidos. A Tabela 4 apresenta um resumo de outros métodos que podem ser utilizados para monitorar os sistemas de DA com a utilização de instrumentação, conforme o tipo de variáveis e fase de interesse.

Tabela 4 - Técnicas de monitoramento em sistema de DA.

Autor	Técnica	Variável monitorada	Fase
[72]	Espectroscopia e fluorescência	VFA e oxigenação	Líquida
[78]	Espectroscopia infravermelha	VFA, demanda química por oxigênio, quantidade de carbono orgânico e alcalinidade	Líquida
[44]	Espectroscopia infravermelha próxima	VFA como etanol, acetato, propionato e butirato, soma de ácidos de cadeia curta	Gasosa
[79]	Ultravioleta e espectroscopia visual	Sulfuretos	Líquida e gasosa
[23]	Línguas e narizes eletrônicos	VFA e demanda química por oxigênio e pH	Gasosa
[4]	Cromatografia em fase gasosa	VFA, soma de ácidos voláteis de cadeia curta	Gasosa
[32]	Titulação	Soma de ácidos voláteis de cadeia curta e VFA	Gasosa
[93]	Microondas e quimiometria acústica	Quantificação da matéria seca	Líquida

Em [42], [51] e [87], os principais parâmetros dos processos que devem ser controlados são apresentados na Tabela 5. A periodicidade desse controle depende do tipo de biodigestor adotado, substrato e condições de fermentação.

Tabela 5 - Parâmetros de monitoramento em sistemas de biodigestor.

Parâmetros	Descrição
Quantidade de biomassa na entrada	É o volume de biomassa inseridos no tanque de fermentação
Quantidade de biofertilizante na saída	É o volume de líquido resultante do processo de fermentação
Temperatura da biomassa	Temperatura da biomassa quando no tanque de fermentação
Quantidade de gás gerado	Volume de gás medido no reservatório (balão)
Pressão do gás	Volume de gás retido no digestor. Aciona válvula de alívio
Composição do biogás	Proporção de CH ₄ e CO ₂
Composição dos resíduos de fermentação	Proporção de ácidos, açúcar, e nutrientes para serem consumidas pelas bactérias
pH	Regulador de acidez da biomassa
Concentração de NH ₃	Volume de NH ₃ na fase líquida e gasosa
Nitrogênio total	Proporção encontrada no biofertilizante resultante
Carga orgânica	Composição da biomassa
Tempo de permanência	Tempo de cada fase e suas etapas
Produtos intermediários (ácidos orgânicos)	Quantidade de ácidos produzidos na fase gasosa
Oxigênio	Proporção de oxigênio presente no sistema

Os trabalhos em [5] e [66] destacam a importância do uso de RSSFs em pesquisas que investigam o comportamento de eco ambiente como forma de gerenciar e facilitar a tomada de decisões sobre os mesmos.

Considerando que o sistema de DA funciona através de uma sequência de reações químicas, diversos autores (e.g., [7] [15] [23]) concordam que é inegável que os sistemas de análises químicas baseados em RSSFs permitem a substituição de um ponto de amostragem simples (geralmente realizado *offline* e com alto custo) por um grande número de pontos de amostragem, o que resulta em medições de alta resolução e campos mais amplos de aplicação. As amostragens *offline* são realizadas em laboratório, e são menos eficientes quando comparadas com análises *online* local. O uso da RSSF para monitorar e controlar sistemas de compostagem (i.e., resíduos orgânicos para biofertilizantes ou alimentação animal) utilizando sensores de temperatura e umidade para controlar as reações químicas são apresentados em [51] e [61].

2.4 ANÁLISE MULTIVARIADA

Em paralelo com a evolução do processo e novas pesquisas experimentais, um esforço considerável tem sido posto em modelagem matemática de DA para melhorar a compreensão da dinâmica do processo, de forma a revelar oportunidades de otimização, sendo um pré-requisito geral para a melhoria da eficiência do biodigestor [61]. Existem diversos modelos matemáticos de análise univariada e multivariada que podem ser aplicados. Todavia, os autores pesquisados (e.g., [15][45][60]) recomendam utilizar análise multivariada porque ela consegue explicar melhor o comportamento do sistema de biodigestão. Nesta Tese a proposta é um modelo de análise multivariada.

Existem duas classes de análise multivariada [94]: (i) modelo dinâmico ou não dinâmico, e (ii) caixa-branca, caixa-cinza e caixa-preta. O primeiro critério de classificação é referente ao calendário das previsões do modelo. Modelos dinâmicos são capazes de fazer previsões contínuas ou, pelo menos, em intervalos regulares discretos, enquanto os modelos não dinâmicos preveem unicamente variáveis independentes do tempo. Modelos dinâmicos consistem de várias funções diferenciais ordinárias, com base em considerações

de massa de equilíbrio e é a abordagem utilizada nesse trabalho, uma vez que os sistemas de DA necessitam de um acompanhamento contínuo.

O segundo critério de classificação é baseado na quantidade de informações incluídas *a priori* [95]. Modelos de caixa branca são dedutivos, e usam informações para descrever as reações bioquímicas que ocorrem durante a digestão. Em contraste, os modelos de caixa-preta, ou modelos orientados por dados indutivamente vinculam diretamente a entrada com a saída, sem incluir qualquer conhecimento prévio das reações físicas e químicas que ocorrem. Por fim, nos modelos de caixa-cinza, ou modelos mecanicamente inspirados, os parâmetros têm uma interpretação física, mas são ajustáveis, por exemplo, através de um procedimento de estimativa de parâmetros. Este é muitas vezes o resultado de uma aproximação ou de simplificação do processo descrito. Como os processos de DA são de grande complexidade, modelos dinâmicos são normalmente do tipo caixa-cinza, cuja abordagem também é utilizada nesta Tese.

2.4.1 CORRELAÇÃO E REGRESSÃO

No estudo de uma única variável, o interesse está nas medidas de tendência central, dispersão e assimetria. Com duas ou mais variáveis além destas medidas também interessa saber se as variáveis têm algum relacionamento entre si; isto é, se a alteração do valor de uma variável implica na alteração do valor da outra variável. A análise multivariada pode ser desenvolvida com o uso de métodos de Correlação e Regressão. A decisão por um ou outro depende do tipo de experimento que está sendo desenvolvido.

Podemos fazer a associação entre duas variáveis de forma correlacional e/ou experimental. Em uma relação experimental os valores de uma das variáveis são controlados pela atribuição ao acaso do objeto sendo estudado e observando o que acontece com os valores da outra variável. Por exemplo, pode-se atribuir níveis de fertilizante ao acaso e observar as diferenças na produção de uma determinada cultura [96].

Se o estudo tratar apenas de duas variáveis tem-se a correlação e a regressão simples, se envolver mais do que duas variáveis, tem-se a correlação e a regressão múltiplas. A regressão e a correlação tratam apenas do relacionamento do tipo linear entre duas variáveis [96].

A análise de correlação fornece um número que resume o grau de relacionamento linear entre as duas variáveis. Já a análise de regressão fornece uma função que descreve o comportamento de uma das variáveis em relação a outra variável. Seguindo essa definição, o método de regressão é o recomendado para os sistemas de DA.

Segundo [8], a escolha do método de análise multivariada depende de objetivos da análise e da natureza dos dados, que podem ser identificadas pelas perguntas:

- As variáveis podem ser classificadas em independentes e dependentes de acordo com algum critério? Se sim, quantas são tratadas como dependentes em uma única análise?
- Qual a escala de medida utilizada para avaliar as variáveis?

Uma técnica dependente pode ser definida como aquela em que uma variável ou um conjunto de variáveis são identificados como variáveis dependentes para serem previstas ou explicadas por outra variável ou outro conjunto de variáveis conhecidas como independentes. Um exemplo desta técnica é a análise múltipla de regressão.

Já uma técnica independente é aquela em que uma única variável ou um grupo de variáveis são definidos como sendo independentes cujos procedimentos envolvem a análise de todas as variáveis no conjunto simultaneamente.

A Tabela 6 apresenta um resumo de algumas técnicas consagradas de análise multivariadas disponíveis [102]. A divisão dos tipos de relação e tipos de técnicas define qual o tipo de análise o pesquisador deve utilizar. Essa tabela não esgota todos os tipos de análise multivariada disponíveis.

Tabela 6 – Classificação de métodos de análise multivariada pelo tipo de relação.

Método	Relação	Análise
Regressão	Dependência	Regressão múltipla Análise discriminante Análise de variância multivariada Correlação canônica Modelos lineares de probabilidade Análise conjunta Modelagem por equações estruturais
Correlação	Independência	Análise de fatores/componentes principais Análise de conglomerados Escalonamento multidimensional Análise de correspondência

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Este capítulo discute trabalhos relacionados às principais contribuições da Tese. A Seção 3.1 expõe trabalhos relacionados ao monitoramento, controle e atuação em sistemas de DA, subdividida em *offline* e *online*. A Seção 3.2 apresenta recursos de otimização dos sistemas de DA, focando no estado da arte dos elementos e seus principais atributos.

3.1 MONITORAMENTO, CONTROLE E ATUAÇÃO EM SISTEMAS DE DA

Existe uma gama de recursos que possibilitam fazer o monitoramento, controle e atuação em sistemas de DA. Esses recursos podem ser utilizados de forma *online* ou *offline*, ser elementos de hardware ou software, testados em ambientes reais (plantas), laboratoriais ou simuladores [73].

3.1.1 MONITORAMENTO, CONTROLE E ATUAÇÃO OFFLINE

Para monitoramento, controle e atuação *offline* se destacam os dispositivos de cromatografia e espectrometria eletroquímica que são utilizados em análises laboratoriais. Eles servem para analisar os gases resultantes do processo de DA durante o tempo de retenção hidráulica do sistema [73]. Também em escala laboratorial ou plantas, podem ser utilizados recursos de espectrometria por faixa de Infravermelho ou Infravermelho próximo [58][59][92].

A cromatografia gasosa [70][101] pode ser utilizada para monitorar a qualidade do gás, umidade, temperatura e o desenvolvimento da vida microbológica dentro de reatores de DA. O monitoramento local da DA é feito em culturas energéticas e matéria orgânica de animais, medindo a proporção de sólidos voláteis, NH₃, carbono inorgânico total e ácidos graxos voláteis presentes na matéria orgânica. Alternativamente pode se fazer a detecção de vazamento de gás [38] com o uso de espectrômetros a laser, evitando a poluição do meio ambiente e aumentando a rentabilidade financeira do sistema.

3.1.2 MONITORAMENTO, CONTROLE E ATUAÇÃO ONLINE

Os sistemas de DA descritos usam sensores para o seu monitoramento. O uso de sensores com fio [43][45][60] e de “nariz eletrônico” [1], [77] permitem a coleta de dados e informações sobre os atributos físicos e ambientais do meio monitorado. Isso possibilita que atuadores sejam utilizados para reagir as mudanças desses atributos e manter o controle desse meio. Todas as informações coletadas (temperatura, pH, qualidade do gás, NH₃, S e ácidos) permitem definir o contexto observado e contribuem para a modelagem de domínios com atributos variantes no tempo que exigem soluções proativas (e.g., pré-aquecimento do sistema) em vez de soluções reativas (e.g., fazer a correção do pH) baseadas num sistema de supervisão.

O sistema de supervisão pode ser usado para executar tarefas de detecção de falhas, medição *online*, o que é essencial para a modelagem em software de um sistema de DA, pois extrai a informação da cinética química (as reações químicas que ocorrem no sistema) do processo de degradação (como e em quanto tempo as reações estão ocorrendo) e de controle automático.

Os recursos de software podem ser utilizados em simuladores, sistemas laboratoriais e plantas. Redes neurais podem ser utilizadas para comparar as previsões de comportamento do sistema de DA através da geração de modelos com comportamento preditivo durante a fase de formação [50]. Estas redes são capazes de reproduzir a dinâmica do sistema, modelando adequadamente a dimensão do reator e, prevendo os valores de taxa de produção e concentração de biogás.

Um sistema completo de DA também pode ser simulado considerando todas as variáveis mais relevantes com modelos lineares para representação de estados do sistema de DA baseado em dados históricos de um sistema real. Dessa forma, o modelo criado pode ser utilizado para prever o seu comportamento, tendo uma característica adaptativa [13][85][71].

Tabela 7 – Resumo dos trabalhos relacionados sobre monitoramento, controle e atuação em DA.

Autor	Recurso	Propósito	Escala	Tempo	Método	Ferramenta de análise	Medições	°C	Online Offline
[50]	Redes neurais	Monitoramento e controle	Laboratorial	111 d	Regressão	MatLab	CH ₄ e CO ₂	35-40	online
[43]	Sensores	Monitoramento e controle	Laboratorial	15 d	Regressão por decomposição de valor único	Labview e MatLab	CH ₄ , pH, CO ₂ e fluxo de gás, temperatura	32-38	online
[58]	Infravermelho próximo	Monitoramento	Laboratorial	90 d	Regressão (análise dos principais componentes)	Unscrambler	SV, NH ₃ , C, AG	35-42	offline
[59]	Infravermelho próximo	Monitoramento	Laboratorial	240 d	Regressão (análise dos principais componentes)	N/D	ST, SV, NH ₃ , N e AGV	31-47	offline
[45]	Sensores	Monitoramento	Laboratorial	65 d	Regressão Múltipla	SPSS	pH, SV, AG, BioHidrogênio	37	online
[92]	Infravermelho próximo por espectrometria reflexiva	Monitoramento	Plantas	330 d	Regressão	MatLab	ST, SV, NH ₃ , N e AGV	N/D	offline
[38]	Espectrômetro laser	Monitoramento	Plantas	2h 15 m	Regressão Lagrangian estocástico	WindTrax	Vazamento de gás	N/D	offline
[70]	Cromatografia gasosa	Monitoramento	Laboratorial	27 d	Regressão	N/D	CH ₄	35	offline
[101]	Cromatografia gasosa	Monitoramento	Plantas	540 d	Regressão	N/D	Microbiologia, CH ₄ , pH, CO ₂ , fluxo de gás, temperatura	38	offline
[85]	ADM1	Monitoramento e controle	Laboratorial e simulação	5 a 20 d	Regressão (coeficiente de Pearson)	Matlab	Microbiologia, CH ₄ , pH, CO ₂ , fluxo de gás, temperatura	35	online
[13]	Dinâmica computacional dos fluídos	Monitoramento e controle	Simulação	4 d	Regressão	N/D	CH ₄ , pH, CO ₂ e fluxo de gás, temperatura	37	online
[1]	Nariz eletrônico	Monitoramento e controle	Laboratorial e planta	114 d	Regressão (análise dos componentes principais)	Excel, Scilab, Statistica	CH ₄ , pH, CO ₂ , NH ₃ , N, H, AGV, pH	37	online
[71]	Protocolos de controle	Monitoramento e controle	Laboratorial	310 d	Regressão	Statistica	CH ₄ e CO ₂	30	online
[60]	Sensores	Monitoramento, controle e atuação	Laboratorial	25-51 h	Regressão	Virtual Expert	pH, O ₂ , temperatura, turbidez	10-25	online

Todos os recursos utilizados nos trabalhos relacionados e apresentados na Tabela 7 têm como propósito o monitoramento e controle dos sistemas de DA, independentemente de serem testados em escala laboratorial ou Plantas. Os tempos de retenção hidráulico utilizados variaram de horas [85] a quatro dias [13] até quinhentos e quarenta dias [101]. Em relação a forma como os dados foram matematicamente analisados, todos seguem um método de Regressão e fizeram uso de alguma ferramenta computacional para interpretar os resultados.

O objetivo das medições efetuadas segue uma ampla gama de valores, com destaque para o CH₄ e CO₂, mas também com foco em outros elementos rastreáveis como o Hidrogênio (H) e Carbono (C), fluxo de gás, desenvolvimento microbiológico e pH, além de Ácido Graxos Voláteis (AGV), Ácidos Graxos (AG), temperatura, amônia (NH₃) e sólidos voláteis ou totais (SV e ST). Os tipos de monitoramento adotados foram *offline* ou *online* com um controle de temperaturas variando entre 10 °C e 48 °C.

Esta Tese fez uso de sensores de temperatura para o monitoramento de um biodigestor em planta de forma *offline*. Os dados de temperatura foram coletados num período de tempo de 17 dias e após analisados. Em relação as amostras de dejetos, elas foram submetidas a uma análise microbiológica com rastreamento de DNA. Os valores de metano e gás carbônico (CH₄ e CO₂), foram analisados pelo método de cromatografia gasosa. A faixa de temperaturas internas ao sistema de DA foi controlada em uma média a 21°C e a temperatura externa variou entre 12°C e 26°C.

3.2 OTIMIZAÇÃO DO MODELO DE DIGESTÃO ANAERÓBICA

A DA é um sistema que tem sua natureza complexa, sendo desejável a otimização de processos baseada no desenvolvimento de soluções apoiadas em modelos matemáticos, tanto para fins de simulação quanto controle. O primeiro modelo matemático foi proposto por Andrews e Pearson [9]. Mais recentemente, o ADM1 proposto por Batstone et.al no ano de 2002 [61], é considerado o simulador mais completo para obter dados sobre as reações de um sistema de DA.

A otimização de modelos de DA se torna necessária como uma forma de reduzir custos operacionais e garantir eficiência. Uma forma de otimizar o sistema de DA [34] é o controle de dejetos no biodigestor fazendo uso de algoritmos baseado em um modelo não linear de controle preditivo para controlar a alimentação de substrato em plantas de biogás de grande porte.

A abordagem de Chadwick et al. [22] usa métodos rápidos para caracterizar a composição da biomassa para produção de energia, permitindo a seleção adequada e uma utilização ótima das biomassas associadas as técnicas de conversão de energia. Isso é possível com o uso de técnicas espectroscópicas rápidas tanto para a biomassa quanto para o biogás. Técnicas de quimiometria também podem ser utilizadas para prever o valor do poder calorífico da biomassa e biocombustíveis, podendo ser usadas para melhorar os programas de crescimento de culturas de energia.

O trabalho de Bavutti et al. [14] explora a otimização do processo de DA avaliando a exposição dos biodigestores a luz solar e o consequente aquecimento excessivo dos mesmos. A solução se baseia na implementação de uma cúpula de resfriamento do biodigestor com a reflexão solar adequadamente escolhida, cuja eficácia foi avaliada através do uso de um código de cálculo especificamente construído e validado por comparação com os dados experimentais.

No aspecto microbiológico, Jabłoński e Łukaszewicz [49] aplicam modelos matemáticos para avaliar o desenvolvimento da comunidade de microrganismos, que são úteis no desenvolvimento de procedimentos confiáveis durante o processo de período de *startup*. Contudo, a precisão de previsão depende da qualidade de parâmetros de entrada e neste estudo e os testes específicos da atividade anaeróbica foram aplicados para estimar a estrutura da comunidade microbiana. Os dados obtidos foram aplicados como condições de entrada para o modelo matemático de DA. Os valores iniciais de variáveis que descrevem a quantidade de acetato e propionato de microrganismos utilizado poderiam ser calculados. A modelagem com base nessas variáveis, utilizada com sucesso, poderia reproduzir o comportamento de um sistema real de DA.

A pesquisa de Strömberg, Nistor e Liu [89] propõe um sistema que prevê o potencial de gás final avaliando uma fase anterior no processo de DA. Foram avaliados 61 algoritmos diferentes quanto à sua capacidade para essa previsão final e o tempo de degradação exigido com base em dados a partir de 138 testes com vários tipos de substratos. Ao combinar os melhores algoritmos, foi possível prever, com uma raiz relativa do erro médio quadrático um índice inferior a 10%, seis dias após o início da experiência. Os resultados deste estudo indicam que existe uma possibilidade de encurtar o tempo dos testes através da combinação de teste de laboratório e algoritmos de previsão inteligentes.

A pesquisa de Godin et al. [37] analisa a confiabilidade de diferentes modelos para prever o potencial de gás utilizando várias biomassas vegetais. A base do estudo foi desenvolvida comparando um conjunto de dados de múltiplas espécies. O modelo de previsão mais confiável é baseado no espectro de infravermelho próximo. Sendo um modelo de regressão não linear, foi capaz de estimar quantitativamente, de forma rápida, barata e fácil. O estudo constatou que as previsões de modelos não lineares são mais confiáveis que as previsões de modelos lineares.

García-Gen, Rodríguez e Lema [36] propõem um método de otimização baseado em programação linear com o objetivo de maximizar a conversão de biomassa em CH₄ e, ao mesmo tempo, manter o funcionamento do sistema de DA de forma eficiente. O método proposto utilizou múltiplos substratos cujo potencial para aumentar a produtividade de biogás faz uso das características complementares entre eles. Este, incorpora informação experimental e heurística para definir a função objetivo e as restrições lineares. As inibições do sistema de DA são continuamente adaptadas através do relaxamento dos limites de restrição, de tal modo que essa otimização melhora os resultados na produção de biogás. A estratégia de controle para melhorar o desempenho da DA é feita em termos de produtividade de CH₄, qualidade do substrato que é digerido e estabilidade do processo, sendo feita em forma de um circuito fechado avaliado continuamente.

O controle da temperatura do DA, a concentração inicial de substrato e a relação N:C são descritas por Yan et al. em [103]. Este estudo investigou a possibilidade de melhorar a biogaseificação de biomassa em estado sólido fazendo um controle da temperatura, e medindo a relação N:C. Os resultados apresentaram relação direta dessas variáveis com a produção de biogás, uma vez que a palha apresenta uma alta concentração desses dois elementos e um desequilíbrio dessa relação pode inibir a produção de biogás. Também foi feita a análise da vida microbiana com o uso de sequenciamento de alto desempenho, o que indicou que as comunidades microbianas consistiram principalmente de *Methanobacteria*, *Bacteroidia*, *Clostridia*, *Betaproteobacteria*, e *Gammaproteobacteria*, destacando a importância do controle de temperatura durante a DA.

Markowski et al. [69] apresentam um estudo da influência dos parâmetros geométricos do biodigestor no desempenho da produção de biogás de baixa temperatura. A produção total de biogás proveniente do reator teoricamente otimizado no modelo de

cálculo foi 1,6 vezes maior do que o derivado para o biodigestor experimental. A quantidade de CH₄ no biogás aumentou de 64,5% para 71,2% após a otimização, enquanto que a fração de CO₂ no biogás diminuiu de 34,5% para 27,8%.

Tabela 8 – Resumo dos trabalhos relacionados sobre otimização em DA

Autor	Objetivo da otimização	Método	Tempo
[34]	Alimentação de dejetos no DA	Algoritmos não lineares de controle preditivos	210 d
[36]	Alimentação de dejetos no DA	Programação linear	32-40 d
[22]	Qualidade do dejetos	Espectrometria e quimiometria	n/d
[14]	Análise de materiais de revestimento termico	Regressão	360 d
[49]	Vida microbiana	Regressão	15 d
[89]	Produção de CH ₄	Algoritmos de predição	25 d
[37]	Produção de CH ₄	Regressão	n/d
[103]	Produção de biogas	Regressão	n/d
[69]	Análise de reator com diferença de temperatura	Regressão e MONOD	60 d

Em relação a otimização dos sistemas de DA da Tabela 8, esta Tese teve como um dos seus objetivos a análise da vida microbiana e outro que foi a produção de biogás através do controle de temperatura. A análise microbiana apresentou a evolução da vida bacteriana dentro do digestor. O controle de temperaturas foi utilizado para prever o resultado da produção de CH₄ e CO₂, aplicados ao modelo matemático proposto.

4 EXPERIMENTAÇÃO PRÁTICA

Para propor o modelo de análise multivariada, foi conduzido um experimento com o uso de um sistema de biodigestão real de pequeno porte. O experimento teve duração de 18 dias, com o sistema recebendo uma carga inicial de 8000 litros de dejetos bovino com uma proporção de matéria seca de 6%, sem reposição de dejetos durante o experimento.

Com o sistema abastecido, foi feita a coleta de amostras do 1º ao 18º dia, com 3 amostras diárias, coletadas em profundidades diferentes do digestor. Estas amostras foram congeladas a uma temperatura de -192°C em tanque de nitrogênio líquido. O cronograma de coletas está descrito na Tabela 9, destacando o dia da semana, a data e a identificação de referência (dia 1, D1, por exemplo) a cada amostra diária.

Tabela 9 – Cronograma de coletas.

D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	D15	D16	D17
seg	ter	qua	qui	sex	sáb	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sáb	dom	seg	ter	qua
15/6	16/6	17/6	18/6	19/6	20/6	21/6	22/6	23/6	24/6	25/6	26/6	27/6	28/6	29/6	30/6	1/7

Juntamente com a coleta das amostras dos dejetos, foi monitorada a temperatura interna do biodigestor em 3 profundidades, além da temperatura externa. Além das temperaturas, também foram coletados o valor do pH e 4 amostras de gases para avaliação da proporção de CH₄ e CO₂.

4.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do experimento foi utilizado um biodigestor do modelo BioKöler com revestimento térmico. Esse biodigestor é revestido com lã de rocha com 2 cm de espessura cobertos com fibra de vidro de 3 mm. Ele foi monitorado por um conjunto de sensores de temperatura¹ distribuídos em 3 profundidades (i.e., 40 cm, 170 cm e 250 cm), conforme Figura 12.

¹ Os sensores utilizados são do tipo Fullgaug 33 ri

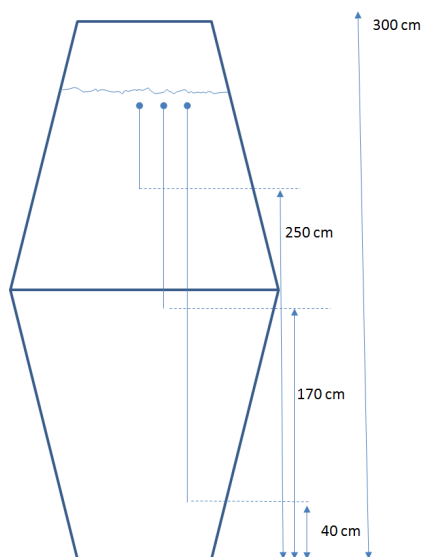


Figura 12 - Posição de sensores para coleta de temperatura.

Para fazer a coleta das amostras de dejetos foram utilizadas 3 das 4 saídas ilustradas na Figura 13, com espessura de 20 mm, posicionadas em três profundidades (i.e., 40 cm, 120 cm e 180 cm acima da base do tanque).

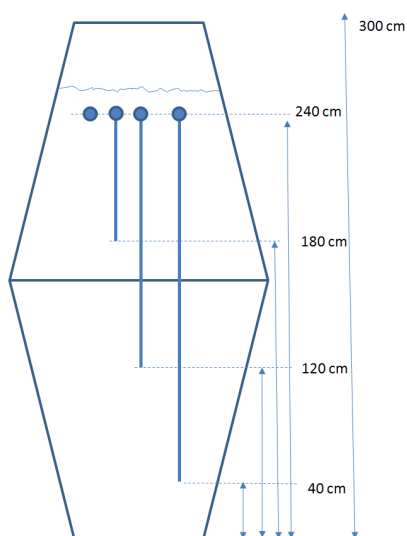


Figura 13 - Posição dos pontos de coleta das amostras.

A Tabela 10 ilustra os sensores de temperatura utilizados. Salienta-se que estes foram posicionados em 3 profundidades pois o biodigestor não possui um sistema de agitação. Sem agitação poderia indicar uma temperatura diferente em virtude da sedimentação de sólidos no fundo.

Tabela 10 – Especificações técnicas dos sensores de temperatura.

Especificações técnicas	Descrição
Alimentação	115 ou 230 Vac $\pm 10\%$ (50/60 Hz)
Temperatura de controle	-50 a 105.0°C - -58 a 221°F
Resolução	0.1°C entre -10 e 100°C e 1°C no restante da faixa - 1°F entre -58 e 221°F
Dimensões	71 x 28 x 71 mm
Sensor	Termistor NTC
Temperatura de operação	0 a 50°C / 32 a 122°F
Umidade de operação	10 a 90% UR (sem condensação)

4.1.1 ANÁLISE DE PH E GASES

A análise do pH foi realizada com um sistema de fita, sendo a imersão desta numa quantidade de dejetos coletados do biodigestor. As análises de CH₄, CO₂, S e NH₃, foram realizadas com coleta de gás na válvula de alívio do digestor. Utilizou-se um Kit, descrito na Tabela 11, que permite analisar de forma simples e rápida a composição do biogás.

Tabela 11 – Parâmetros do kit de análise de biogás.

Parâmetro	Método	Informação
NH ₃	Azul de Indofenol	Cartela de 15 a 1310 ppmV em 2 faixas: - Faixa 1 entre 0,0-15-45-85-175-350-525 ppmV NH ₃ - Faixa 2 entre 0,0-45-110-220-435-875-1310 ppmV NH ₃
Gás sulfídrico	Azul de Metileno	Cartela de 20 a 1020 ppmV em 2 faixas: - Faixa 1 entre 20-40-75-152-230-305-460-610 ppmV H ₂ S - Faixa 2 entre 30-65-130-255-380-510-765-1020 ppmV H ₂ S
CO ₂	Orsat	0 – 100% resolução 2,5%
CH ₄	Orsat	0 – 100% resolução 2,5%

Para a análise de NH₃ e gás sulfídrico, a técnica consiste em borbulhar o biogás em uma solução, analisando colorimetricamente (uso de contraste) em seguida. Para análise de CH₄ e CO₂, o biogás também é borbulhado em uma solução, porém a concentração é dada pela diferença entre o volume de gás inicial e final.

Para fazer uma validação das amostras de gás em um sistema mais robusto, as análises de proporção de gases que confirmou os valores da primeira análise. A prova foi conduzida em um Cromatografia gasoso acoplado com um metanador. A análise de CO e CO₂, por Detector de Ionização por Chama (FID), ocorre a partir da conversão dos mesmos à CH₄, através da reação de metanação utilizando um excesso de hidrogênio.

O Cromatógrafo Gasoso (CG) está equipado com uma coluna capilar *carboxen* 1006 (30 m de comprimento, 0,53 mm de Diâmetro Interno), duas colunas *Hayesep Q* (2 m

comprimento, 3 mm de diâmetro) e uma peneira molecular 5°A (3 m de comprimento, 3 mm de Diâmetro Interno. A corrida cromatográfica para o FID utiliza 100 uL de volume injetado e a rampa de aquecimento parte de 35°C por 5 minutos, seguido de aquecimento (5 °C/min) até 65°C, mantidos por 5 minutos, e rampa de aquecimento (10 °C/min) até 100°C, mantidos por 5,55 min - totalizando 25 minutos de corrida. O detector FID foi mantido a temperatura de 250°C e utiliza hélio como gás de arraste (30 mL/min).

4.1.2 COLETA DE DEJETOS

A coleta de dejetos, bem como a medição das temperaturas internas e externa e pH, foram realizadas diariamente. Foram coletadas 3 amostras para cada uma das 3 profundidades do biodigestor. Cada uma delas seguia uma identificação composta por letras e números, como por exemplo, D1P1. D é a representação do dia seguido de um número que variou de 1 até 18 e P representa o ponto de coleta, que pode ser 1, 2 ou 3. P1, P2 e P3 são os pontos de coleta a 240cm, 120cm e 40cm do fundo do biodigestor, respectivamente.

4.1.3 ANÁLISE MICROBIOLÓGICA PARA EXTRAÇÃO DE DNA

O DNA (*DeoxyriboNucleic Acid*) total das amostras foi extraído com oligonucleotídeos (fragmento do DNA) específicos seguindo o protocolo descrito por [106], modificando apenas o volume inicial de 5 g para 1,5 g de sedimento e o volume de eluição (fracionamento) do DNA de 500 microlitros para 150 microlitros de H₂O.

Para otimizar a ruptura da membrana plasmática celular, foi realizada uma pré etapa com três passos de congelamento em nitrogênio líquido e descongelamento em banho-maria à 65 °C. O DNA extraído foi purificado com *QIAquick PCR Purification kit* (Qiagen). A reação de PCR (*Polymerase Chain Reaction* – Reação em Cadeia da Polimerase) foi realizada utilizando oligonucleotídeos iniciadores universais para procariotos [16].

O volume final das reações de PCR foi de 25 microlitros. As condições de ciclos de PCR foram: desnaturação inicial de 94°C por 4 min; 30 ciclos com desnaturação de 94°C

por 45 s, anelamento de 50°C por 30 s, extensão de 72°C por 1 min e extensão final de 72°C por 7 min.

Os fragmentos dos genes ribossomais 16S (ribossomos procarióticos) gerados foram sequenciados. Para análise metagenômica das comunidades presentes nas amostras, os fragmentos dos genes 16S gerados por PCR foram submetidos ao sequenciamento de alto desempenho com um sequenciador *Ion Personal Genome Machine (PGM) System (Life Technologies)*.

A construção das bibliotecas foi realizada com o kit *Ion Plus Fragment Library* para *amplicons* (fragmentos de DNA amplificados) curtos, a partir de uma quantidade inicial de 100 nanogramas de produto de amplificação. A cada amostra foi incorporado um código de barra do kit *Ion Xpress Barcode 1-16*, para que as amostras pudessem ser sequenciadas em uma mesma corrida, diminuindo os custos do processo.

Todos os procedimentos para a construção das bibliotecas foram realizados como recomendado pelo fabricante. As bibliotecas foram quantificadas e equalizadas com o kit *Ion Library Equalizer*. A PCR em emulsão e os passos de enriquecimento foram realizados conforme descrição do kit *Ion PGM Template OT2 200*, utilizando o equipamento *Ion OneTouch 2 System*. O sequenciamento foi realizado em um chip *Ion 316* com o kit *Ion PGM Sequencing 200 v2*.

4.1.4 ANÁLISE COMPUTACIONAL APLICADA

As leituras do rRNA 16S (subunidade dos ribossomos) geradas usando o sequenciamento de alto desempenho foram submetidas a um controle de qualidade que separa sequências com tamanho mínimo de 100 bp (*basis point*) auxiliado para remover bases de baixa qualidade para um escore mínimo de Phred (medida de qualidade para identificação de nucleobases) de 30, usando PRINSEQ [84].

O restante das amostras foram dereplicadas e ordenados por ordem decrescente de leitura e, em seguida, filtrada para excluir elementos isolados usando USEARCH v7.0.1090 [30]. Os clusters foram montados usando uma identidade mínima de 99% usando banco de dados de referência RDP [25].

A atribuição taxonômico foi obtido utilizando QIIME v1.7 (software para análise microbiana) [21]. A unidade taxonômica operacional, em inglês *Operational Taxonomic Unit* (OTU), foi selecionada com base em 97% de semelhança de sequências, e dados taxonômicos foram obtidos através do algoritmo de classificação usando a versão 13.8 do GreenGenes [28].

4.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Essa sessão apresenta os resultados dos experimentos desenvolvidos em um sistema de DA instalado junto a um estábulo leiteiro em uma instituição de ensino num município na região Noroeste do estado do Rio Grande do Sul. Nesse local é desenvolvida a criação semiconfinada de gado leiteiro. O sistema de DA está em funcionamento desde o ano de 2011 e o experimento foi desenvolvido no inverno do ano de 2015 (Figura 14). As orientações de como fazer a coleta e manipular as amostras coletadas foram apoiadas por biólogas do Instituto do Petróleo e Energias Renováveis da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.



Figura 14 – Sistema de DA onde foram conduzidos os experimentos práticos.

4.2.1 CONTROLE DE TEMPERATURA

As temperaturas internas e externa foram monitoradas no período da tarde. A Tabela 12 apresenta a variação de temperaturas, interna e externa, durante o experimento prático com o sistema de DA. As temperaturas internas foram identificadas como T1, T2 e T3 para medições a 250 cm, 170 cm e 40 cm do fundo do biodigestor, respectivamente. A Temperatura Externa (TE) foi coletada através da estação meteorológica posicionada próximo ao local do experimento.

Tabela 12 – Relação de temperaturas internas e externas para as amostras coletadas no experimento prático de DA.

Data	Amostra	TE (°C)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)
15/06/2015	D1P1, D1P2, D1P3	12	21,5	20,7	21,2
16/06/2015	D2P1, D2P2, D2P3	14	21,3	20,5	21
17/06/2015	D3P1, D3P2, D3P3	16	21,2	20,4	20,9
18/06/2015	D4P1, D4P2, D4P3	13	20,2	20,3	20,5
19/06/2015	D5P1, D5P2, D5P3	13	20,8	20	20,5
20/06/2015	D6P1, D6P2, D6P3	22	20,6	19,8	20,4
21/06/2015	D7P1, D7P2, D7P3	25	20,7	19,7	20,3
22/06/2015	D8P1, D8P2, D8P3	24	20,7	19,7	20,4
23/06/2015	D9P1, D9P2, D9P3	16	20,8	19,7	20,4
24/06/2015	D10P1, D10P2, D10P3	15	20,5	19,6	20,2
25/06/2015	D11P1, D11P2, D11P3	18	20,6	19,5	20,2
26/06/2015	D12P1, D12P2, D12P3	19	20,5	19,4	20,1
27/06/2015	D13P1, D13P2, D13P3	26	20,3	19,5	20,2
28/06/2015	D14P1, D14P2, D14P3	23	20,8	19,6	20,3
29/06/2015	D15P1, D15P2, D15P3	19	20,7	19,6	20,3
30/06/2015	D16P1, D16P2, D16P3	15	20,5	19,6	20,2
01/07/2015	D17P1, D17P2, D17P3	12	20,5	19,5	20,1

O gráfico da Figura 15 demonstra que o revestimento térmico do biodigestor garantiu temperaturas internas (T1, T2 e T3) estáveis durante todo o período do experimento. A TE oscilou entre 12°C e 26°C. Os valores de temperatura interna e externa foram observados no momento da coleta da amostra de dejetos. Por ser período de inverno, a temperatura externa durante a noite e madrugada pode ter sido mais baixa, mas isso não interferiu no desempenho do sistema.

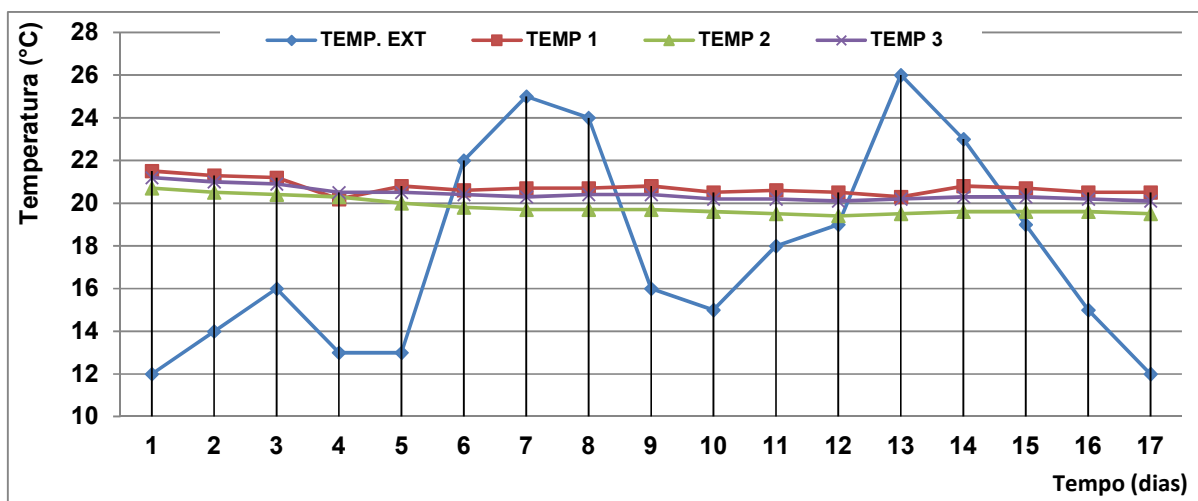


Figura 15 – Variação das temperaturas internas e externas para experimento prático de DA.

4.2.2 ANÁLISE GASOSA

Os valores de pH, CH₄, CO₂, S e NH₃ são apresentados na Tabela 13. Em relação aos valores de pH, ele se manteve estável durante todo o período de coletas. Já a composição do biogás é uma variável fundamental para verificar o desempenho do sistema. A primeira análise de gás aconteceu no oitavo dia do experimento. A proporção de CH₄ estava em 57,5% e a de CO₂ em 42,5%, indicando que o sistema não havia cumprido o tempo de retenção hidráulica necessário a produção de biogás, que no experimento foi abastecido com dejetos bovinos, que é de aproximadamente 15 dias.

A segunda coleta de gás aconteceu no décimo quinto dia do experimento, onde se verificou que a proporção de CH₄ aumentou para 74,5% e a proporção de CO₂ reduziu para 25,5%, indicando que o sistema já havia cumprido o tempo de retenção hidráulica para produção de biogás com qualidade. Uma terceira análise de gás foi realizada no décimo sétimo dia, sendo que a proporção de CH₄ ficou em 79,9% e a proporção de CO₂ em 20,1%. Adicionalmente, as proporções de NH₃ e S ficaram em percentuais inferiores a 1%. Na Tabela 13 a sigla N/R significa que o *status* da análise dos gases é “Não Realizada”.

Tabela 13 – Medidas de concentração de gases observadas em cada coleta de amostra

Data	Amostra	pH	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	NH ₃ (%)	S (%)
15/06/2015	D1P1, D1P2, D1P3	7,1	N/R	N/R	N/R	N/R
16/06/2015	D2P1, D2P2, D2P3	7,2	N/R	N/R	N/R	N/R
17/06/2015	D3P1, D3P2, D3P3	7,2	N/R	N/R	N/R	N/R
18/06/2015	D4P1, D4P2, D4P3	7,2	N/R	N/R	N/R	N/R
19/06/2015	D5P1, D5P2, D5P3	7,2	N/R	N/R	N/R	N/R
20/06/2015	D6P1, D6P2, D6P3	7,2	N/R	N/R	N/R	N/R
21/06/2015	D7P1, D7P2, D7P3	7,2	N/R	N/R	N/R	N/R
22/06/2015	D8P1, D8P2, D8P3	7,2	57,5	42,5	0,962	0,0177
23/06/2015	D9P1, D9P2, D9P3	7,2	N/R	N/R	N/R	N/R
24/06/2015	D10P1, D10P2, D10P3	7,2	N/R	N/R	N/R	N/R
25/06/2015	D11P1, D11P2, D11P3	7,2	N/R	N/R	N/R	N/R
26/06/2015	D12P1, D12P2, D12P3	7,2	N/R	N/R	N/R	N/R
27/06/2015	D13P1, D13P2, D13P3	7,2	N/R	N/R	N/R	N/R
28/06/2015	D14P1, D14P2, D14P3	7,2	N/R	N/R	N/R	N/R
29/06/2015	D15P1, D15P2, D15P3	7,2	74,5	25,5	0,03161	0,0754
30/06/2015	D16P1, D16P2, D16P3	7,2	N/R	N/R	N/R	N/R
01/07/2015	D17P1, D17P2, D17P3	7,2	79,9	20,1	0,03897	0,0476

Para complementar os dados apurados na análise microbiológica, foi conduzido um segundo experimento com o objetivo de avaliar a evolução da produção de biogás. A metodologia utilizada foi similar ao primeiro experimento, onde foi realizada a coleta de

biogás em 6 momentos num intervalo de 18 dias. A Tabela 14 exhibe os valores das variáveis apuradas, temperatura interna do digestor, proporção de CH₄, CO₂, NH₃ e enxofre (S).

Tabela 14 – Análises da proporção de gases observadas nas amostras.

Amostra	Temperatura (°C)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	NH ₃ (%)	S(%)
D1 (1º Dia)	27,7	23,2	66,8	1,230	0,013
D2 (4º Dia)	28,2	42,7	57,3	1,010	0,026
D3 (7º Dia)	27,9	49,2	51,8	0,987	0,035
D4 (10º Dia)	28,1	63,4	36,6	0,901	0,061
D5 (14º Dia)	28,3	73,3	26,7	0,732	0,078
D6 (18º Dia)	27,8	78,1	21,9	0,458	0,053

No primeiro experimento foram coletadas 3 amostras de gás (ver Tabela 13). As análises apresentaram uma significativa alteração no teor de CH₄ e CO₂ no biogás coletado. Com o passar dos dias, não havendo perturbações do sistema (variação excessiva de temperatura ou contaminação, dentre outros), a tendência é que a mistura de biogás contenha maior proporção de metano (acima de 75%).

Em [33] recomenda como satisfatório e economicamente viável a proporção média de 65% de metano e 35% de CO₂ no biogás. Na segunda análise, a melhor concentração chegou a 78,1% de metano e 21,9% de CO₂. O que pode justificar essa diferença entre os valores apurados é que os valores de referência são avaliados em países onde o tipo de alimento fornecido aos animais, o clima e outras variáveis podem interferir nas condições de desenvolvimento da vida bacteriana. Além disso, muitos experimentos são conduzidos com a produção de biogás através de resíduos orgânicos vegetais, ao contrário dos desenvolvidos nesta Tese que faz referência e uso de dejetos bovinos.

4.2.3 ANÁLISE MICROBIOLÓGICA DAS AMOSTRAS

Devido ao custo financeiro para processar uma amostra, para a análise microbiológica foram analisadas apenas 18 das 54 amostras coletadas (a meta eram 54 amostras). O critério escolhido para selecionar as amostras foi o intervalo de 3 dias com espaçamento uniforme, considerando as três amostras diárias. As identificações das 18 amostras selecionadas para a análise microbiológica estão destacadas na Tabela 15. Infelizmente, a amostra D17P1 (Dia 17 e ponto de amostragem 1) foi descartada pois não

foi possível apurar o percentual de sequências de DNA válidas e então não fez parte das interpretações e análises finais.

Tabela 15 – Relação de amostras analisadas.

Data	Amostra
15/06/2015	D1P1, D1P2, D1P3
18/06/2015	D4P1, D4P2, D4P3
22/06/2015	D8P1, D8P2, D8P3
25/06/2015	D11P1, D11P2, D11P3
28/06/2015	D14P1, D14P2, D14P3
01/07/2015	D17P1, D17P2, D17P3

Após a coleta, as amostras foram encaminhadas aos laboratórios do IPR – Instituto do Petróleo e Energias Renováveis da PUCRS para fazer a separação e sequenciamento do DNA microbiológico. Essa etapa revelou o percentual de sequências de DNA em boas condições de interpretação que estão apresentadas na Tabela 16. No total, foram detectados 41 filós de bactérias, divididos em 94 classes, 159 ordens, 260 famílias e 388 gêneros, presentes nas quatro fases do sistema de DA. Uma quantidade de filós presente em cada amostra é matéria diversa e não foi considerada.

Tabela 16 – Percentual de sequências de DNA em boas condições de interpretação para cada uma das 18 amostras coletadas no biodigestor.

D1P1	D1P2	D1P3	D4P1	D4P2	D4P3	D8P1	D8P2	D8P3	D11P1	D11P2	D11P3	D14P1	D14P2	D14P3	D17P1	D17P2	D17P3
91,2%	91,5%	94,2%	91,9%	94,1%	89,8%	90,6%	90,2%	91,0%	91,4%	91,6%	87,8%	91,5%	91,5%	88,6%	nd	92,3%	89,0%

Após a contagem final de gêneros de bactérias (388), eles foram agrupados por fase da DA. Após a identificação, as bactérias pertencentes a fase de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese foram agrupadas para apurar a proporção de cada uma delas dentre o total. Essa organização está apresentada na Tabela 17.

Tabela 17 – Percentual de filamentos analisados por fase da DA.

Bactérias (em %)	D1P1	D1P2	D1P3	D4P1	D4P2	D4P3	D8P1	D8P2	D8P3	D11P1	D11P2	D11P3	D14P1	D14P2	D14P3	D17P2	D17P3
Hidrólise	44,1	43,7	46,1	43,6	44,4	43,9	44,0	41,3	43,9	45,1	40,9	43,6	43,9	40,0	42,9	42,5	43,1
Acidogênese	2,1	1,9	2,3	1,9	1,5	2,0	1,9	1,8	2,5	2,0	1,5	2,2	1,8	1,7	2,7	2,4	2,1
Acetogênese	4,2	3,0	3,3	3,9	3,4	4,9	4,1	4,4	5,8	5,4	4,1	5,2	4,9	4,6	5,0	5,0	5,0
Metanogênese	2,6	3,4	3,9	2,7	3,6	2,2	2,6	2,9	2,5	2,6	3,5	2,5	2,7	3,4	2,4	3,0	2,7
Total	52,9	51,9	55,5	52,1	52,9	53,0	52,6	50,4	54,8	55,1	50,1	53,5	53,3	49,9	52,9	52,8	52,8
Outros	24,2	24,4	22,5	24,8	24,7	23,0	24,8	24,9	21,8	23,1	24,6	22,3	24,0	25,0	22,0	22,9	22,9
Total de conhecidas	77,1	76,4	78,1	77,0	77,6	76,0	77,5	75,3	76,6	78,2	74,7	75,8	77,3	74,8	75,0	75,8	75,8
Total desconhecidas	4,3	4,3	3,7	4,4	4,1	4,6	4,7	4,8	4,3	4,5	4,8	4,7	4,4	5,0	4,9	4,6	4,5
Total avaliadas	81,5	80,7	81,8	81,3	81,7	80,6	82,1	80,0	80,8	82,6	79,5	80,6	81,7	79,8	79,9	80,4	80,4

Analisando os dados gerados pela análise microbiológica (Figura 16), observa-se que a maioria das bactérias está agrupada na fase da hidrólise. A distribuição das bactérias nas demais fases mostra que as de acidogênese estão em menor proporção que as de acetogênese. As que apresentam menor quantidade são as da fase da metanogênese. Nesse gráfico não estão contempladas a proporção de bactérias desconhecidas.

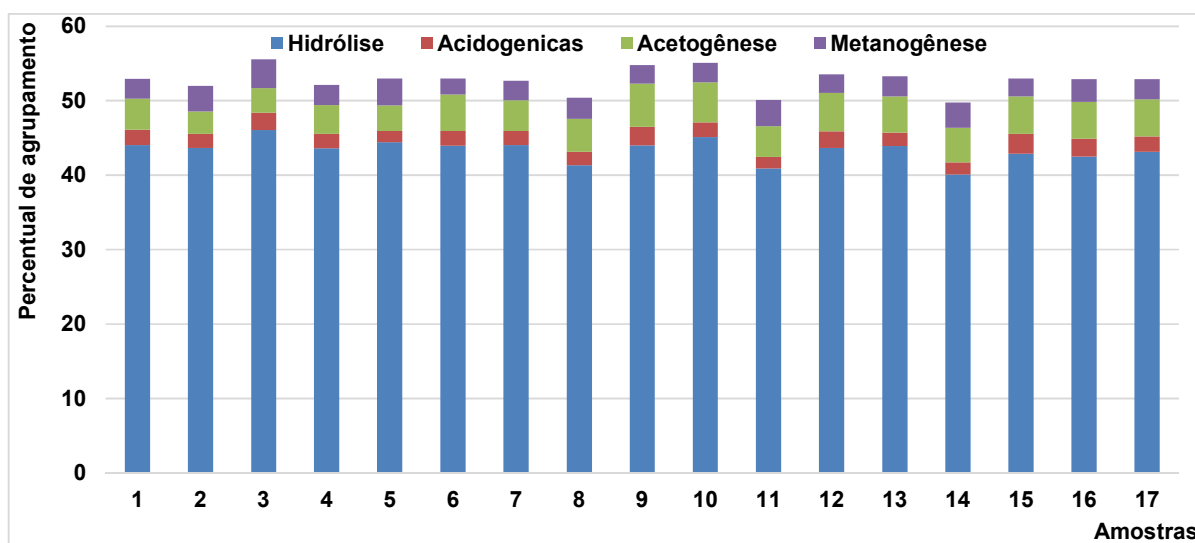


Figura 16 – Distribuição de bactérias por fases da DA.

4.2.3.1 Análise das Proporções de Bactérias por Ponto de Amostragem

A análise da proporção de bactérias por cada uma das fases do sistema de DA foi essencial para compreender a dinâmica desse sistema. Os gráficos mostram as proporções de bactérias encontradas em cada uma das profundidades do tanque de fermentação, que

não possui sistema de agitação e manteve a temperatura constante. O P1 é o ponto mais superficial do tanque, o ponto P2 é intermediário e o P3 é o mais profundo (ver Figura 13).

A Figura 17 mostra que na hidrólise ocorre a diminuição da proporção de bactérias com o passar do tempo nos pontos P1 e P2. Também apresenta uma tendência de aumento na quinta e sexta coletas nos pontos P2 e P3. Podemos concluir que com a diminuição de macro nutrientes (i.e., proteínas, lipídios e carboidratos) na superfície do tanque, as bactérias tendem a se agrupar nas alturas intermediária e profunda, onde a concentração dos dejetos proporciona uma maior disponibilidade de nutrientes para as bactérias.

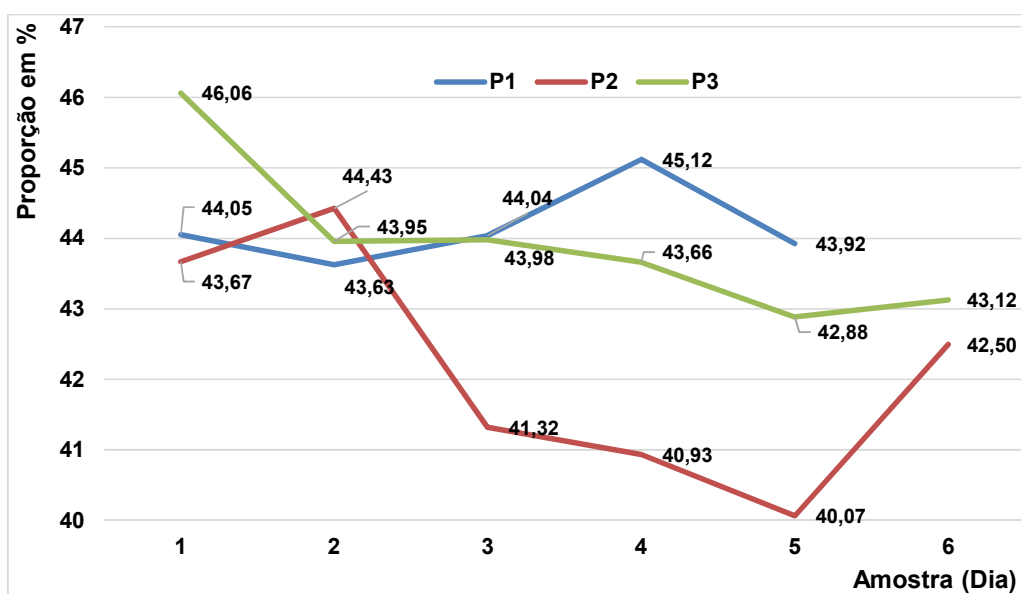


Figura 17 – Evolução do percentual total de gêneros de bactérias na hidrólise.

Na fase da acidogênese, ilustrada na Figura 18, a evolução das bactérias apresentou um comportamento com ciclos de aumento e diminuição da proporção no ponto P3 e de diminuição no ponto P1. Os valores do ponto P3 também apresentaram comportamento similar até a quarta coleta, mas com aumento significativo na quinta e sextas coleta. Assim como a hidrólise, a maior atividade se concentrou na altura intermediária do tanque.

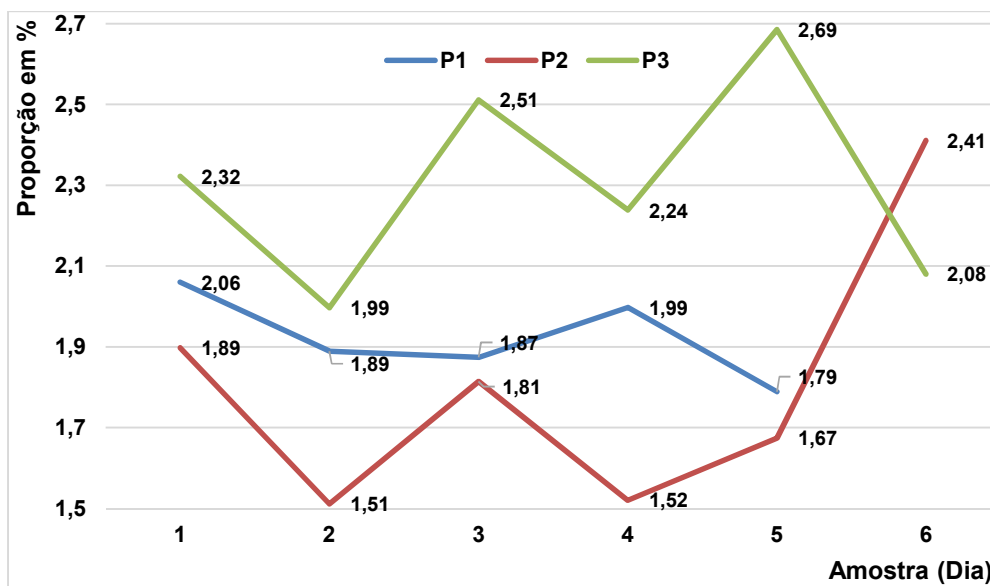


Figura 18 - Evolução do percentual total de gêneros de bactérias na acidogênese.

A Figura 19 ilustra a fase da acetogênese que apresentou uma tendência de evolução na proporção das bactérias nos 3 pontos de amostragem, mas também apresentou a mesma tendência de queda das fases de hidrólise e acidogênese. Houve uma convergência de valores na coleta final entre os pontos P3 e P2.

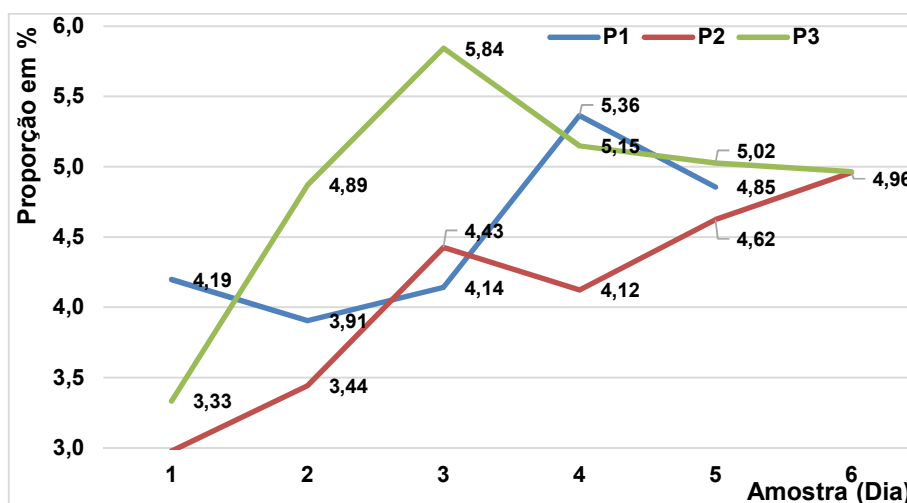


Figura 19 - Evolução do percentual total de gêneros de bactérias na acetogênese.

Na fase da metanogênese, ilustrada na Figura 20, houve inicialmente uma queda na proporção das cepas metanogênicas no ponto P3, sendo constante no ponto P1.

Enquanto P2 teve uma tendência de queda. Como as cepas já estão presentes dentro do rúmen bovino, é natural o comportamento de queda e depois de estabilização apresentado.

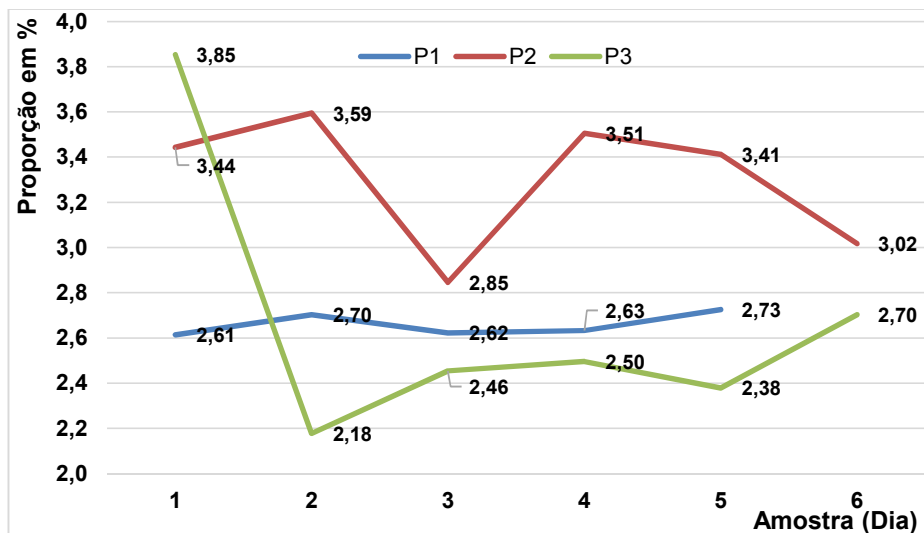


Figura 20 - Evolução do percentual total de gêneros de cepas metanogênicas.

Dentre os gêneros de bactérias desconhecidas ou não mapeadas pela literatura, o comportamento apresentado também segue os dos demais gêneros das fases nos pontos de coleta. O ponto P2 é o que aponta uma tendência de maior atividade microbiológica.

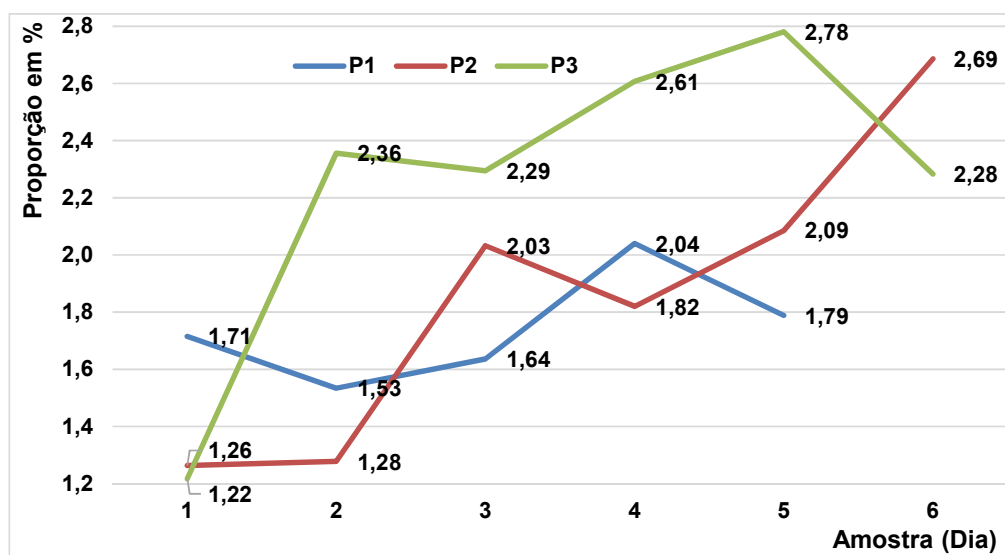


Figura 21 - Evolução do percentual total de gêneros de bactérias desconhecidas

Interpretando o comportamento dos gêneros de bactérias classificados por fases do sistema de DA, é possível concluir preliminarmente que as sedimentações dos dejetos

no fundo do tanque podem concentrar, além de nutrientes, uma quantidade grande de elementos não consumíveis ou de difícil consumo. Esses elementos podem ser pelos de animais, areia, palha e terra, dentre outros, que podem se misturar aos dejetos bovinos durante o processo de carregamento do tanque de fermentação. Isso explicaria a tendência de redução da proporção de bactérias no ponto P3. Todavia, em P1 acontece um processo inverso, onde o dejetos tende a se concentrar no fundo, diminuindo a quantidade de nutrientes com o passar do tempo e, por não haver agitação do sistema, não há uma possibilidade de novos nutrientes subirem. Essa é uma das prováveis explicações que justificam a diminuição da concentração de bactérias nesse ponto.

O ponto intermediário (P2) é o que concentrou a maior atividade bacteriana durante o experimento, com exceção da metanogênese que apresentou uma queda durante o experimento. Uma das explicações para essa diminuição pode ser a temperatura, que ficou na faixa dos 28°C e segundo [33], a maior atividade bacteriana ocorre entre os 37°C e 45°C.

Esse experimento foi essencial para desenvolver o modelo matemático pois permite entender o comportamento temporal do sistema de DA. Também demonstrou o quanto é importante manter uma temperatura estável, pois do contrário não seria possível observar a real evolução da vida bacteriana no sistema de DA. A temperatura é uma das principais variáveis de entrada do modelo matemático e tem impacto significativo na produção dos elementos de cada uma das fases da DA.

5 MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO

Um dos objetivos desse trabalho foi a proposição de um modelo matemático de análise de um sistema de DA. Após conduzir os experimentos práticos que avaliaram o comportamento de um sistema real de DA, o passo seguinte foi estabelecer os parâmetros para a construção do modelo matemático.

O modelo matemático é composto por um conjunto de funções que descrevem cada uma das fases da DA. Adicionalmente, é necessário calcular as proporções de proteínas, lipídios e carboidratos que o tipo de dejetos possui; além das funções de controle, que determinam a quantidade de biogás que pode produzir um determinado tipo de macronutriente. Para descrever as fórmulas do modelo, foi definido um conjunto de variáveis com as respectivas unidades de medida, apresentados na Tabela 18. A nomenclatura das variáveis é a mesma utilizada na aplicação JAVA, construída a posterior para validar o modelo.

Tabela 18 – Variáveis do modelo matemático desenvolvido

Variável	Descrição	Unidade
proporcaoProteinas	Quantidade de proteína que contém uma dada amostra	%
proporcaoLipidios	Quantidade de lipídios que contém uma dada amostra	%
proporcaoCarboidratos	Quantidade de carboidratos que contém uma dada amostra	%
kDejetos	Quantidade de dejetos inseridos	g/kg
KProteinas	Quantidade de proteína presente no total de dejetos inseridos	g/kg
Klipidios	Quantidade de lipídios presente no total de dejetos inseridos	g/kg
Kcarboidratos	Quantidade de carboidratos presente no total de dejetos inseridos	g/kg
ProdBioGasTotProt	Total de biogás produzido pelas proteínas	l/kg
ProdBioGasTotLip	Total de biogás produzido pelos lipídios	l/kg
ProdBioGastotCarbo	Total de biogás produzido pelos carboidratos	%
PropMetano	Proporção de CH ₄ presente no total de biogás calculado	%
ProdBioGasTotal	Produção de biogás total	Litros
ProdCOtotal	Proporção de CO ₂ total	Litros
Pertemdigs	Percentual de digestibilidade	%
Perdigestprot	Digestibilidade das proteínas	g
Perdigestlip	Digestibilidade dos lipídios	g
Perdigestcar	Digestibilidade dos carboidratos	g
Acidgh	Proporção de ácidos graxos	g
Lipacidg	Proporção de lipídios	g
Acuch	Proporção de açúcar na hidrólise	g
Lipacuc	Proporção de açúcar	%
Aminh	Aminoácidos da hidrólise	g
Aceta	Acetato total	litros
Propaceto	Proporção de acetato	%
Prophidro	Proporção de hidrogênio	%
Hidro	Hidrogênio total	litros

Variável	Descrição	Unidade
Inter	Proporção de elementos intermediários	g
lipacidg	Proporção de lipídios convertidos em ácidos graxos	%
lipacuc	Proporção de lipídios convertidos em açúcares	%
propaminoac	Proporção de aminoácidos produzidos	%
propinterac	Proporção de intermediários da acidogênese	%
propaminohi	Proporção de aminoácidos da hidrólise	%
propinterhi	Proporção de intermediários da hidrólise	%
propacidgxi	Proporção de ácidos graxos da hidrólise	%
propacidgxac	Proporção de ácidos graxos na acetogênese	%

O modelo matemático está dividido em funções de cálculo de proporção de macronutrientes, cálculos de controle de produção de Biogás e CH₄, cálculos das fases da Hidrólise, Acidogênese, Acetogênese e Metanogênese.

5.1.1 CÁLCULO DE PROPORÇÕES DE MACRONUTRIENTES*

As funções propostas pelo modelo foram agrupadas pelas fases do processo de DA. O primeiro grupo de funções faz o cálculo de proporções de proteínas (proporcaoProteinas), carboidratos (proporcaoCarboidratos) e lipídios (proporcaoLipidios), que são os macronutrientes básicos da matéria orgânica que é adicionada ao sistema de DA. No modelo proposto não estão sendo consideradas as proporções de água ou de materiais não digeríveis pelas bactérias.

A Função 1 descreve a proporção de KProteinas que é o resultado da relação entre a quantidade total de dejetos adicionados (KDejetos) pela proporção de proteínas. A proporção de proteínas também depende do tipo de dejetos utilizados. As funções 2 e 3 mostram uma regra análoga à Função 1 para cálculo de KLipidios e KCarboidratos.

$$KProteinas = KDejetos \times proporcaoProteinas \quad (1)$$

$$KLipidios = KDejetos \times proporcaoLipidios \quad (2)$$

$$KCarboidratos = KDejetos \times proporcaoCarboidratos \quad (3)$$

5.1.2 CÁLCULOS DE CONTROLE DAS PROPORÇÕES DE GÁS PRODUZIDO

Este conjunto de funções está dividido em dois subgrupos: a proporção de biogás produzido em relação a proporção dos macronutrientes presentes nos dejetos e o grupo de funções que calcula a produção total de biogás, CH₄ e CO₂.

A Função 4 mostra o cálculo da produção de biogás total pela quantidade de proteínas. A Função 5 descreve o cálculo da produção de biogás total frente a quantidade de lipídios. A Função 6 mostra a quantidade de biogás total pelos carboidratos. Por fim, a Função 7 mostra que a produção total de biogás pelo somatório das três parcelas anteriores.

$$\text{prodBioGasTotProt} = \sum (\text{KProteinas} \times \text{ProdBioGasProt}) \quad (4)$$

$$\text{prodBioGasTotLip} = \sum (\text{KLipidios} \times \text{ProdBioGasLip}) \quad (5)$$

$$\text{prodBioGasTotCarbo} = \sum (\text{KCarboidratos} \times \text{ProdBioGasCarbo}) \quad (6)$$

$$\text{prodBioGasTotal} = \text{prodBioGasTotProt} + \text{prodBiogasTotLip} + \text{prodBiogasTotCarbo} \quad (7)$$

A Função 8 mostra o cálculo da produção total de CH₄, enquanto que a Função 9 descreve o cálculo da produção total de CO₂. A produção de CH₄ é calculado pela produção de biogás multiplicado pelo percentual de CH₄ esperado (por exemplo, 65%).

$$\text{prodMetanoTotal} = \sum (\text{prodBiogasTotal} \times \text{propmetano}) \quad (8)$$

$$\text{prodCOtotal} = \text{prodBiogasTotal} - \text{prodMetanoTotal} \quad (9)$$

A Tabela 19 apresenta os valores de referência para a produção de biogás e CH₄ no que é recomendado como economicamente viável [33] em relação a cada macronutriente. Assim é possível calcular os valores de controle e verificar se a produção de biogás do sistema está adequada ou dentro dos padrões estabelecidos.

Tabela 19 – Valores de produção de gases [33] por Kg de macronutrientes inserido no DA.

Macronutrientes	Produção de biogás	Teor de CH ₄ (%)
Proteínas	700 litros de biogás por Kg	71
Lipídios	1250 litros de biogás por Kg	68
Carboidatos	790 litros de biogás por kg	50

Em suma, como parâmetro de referência, para cada Kg de proteínas inserida num sistema de DA, pode-se produzir 700 litros de biogás e uma média de 71% de CH₄. Já para cada 1 Kg de lipídios, produz-se em média 1250 litros de biogás e uma média de 68% de 3CH₄. Em relação aos carboidratos, para cada Kg pode-se produzir 790 litros de biogás contendo uma proporção de 50% de CH₄.

5.1.3 CÁLCULOS DA HIDRÓLISE

Na hidrólise ocorre a primeira transformação dos macronutrientes em elementos que serão digeridos pela vida microbiana na etapa seguinte (acidogênese). Para efetuar os cálculos dessa fase, foi necessário atribuir um percentual de digestibilidade do dejetos baseado na temperatura medida pelos sensores.

A temperatura foi o valor sensoriado nas simulações e segundo [57], conforme for o intervalo de temperatura medido, aplica-se um percentual de digestibilidade (pertempdigs) tanto para a proporção de proteínas (Função 10), de lipídios (Função 11) e carboidratos (Função 12). A digestibilidade é a proporção total do quanto de cada macronutriente será efetivamente convertido em Biogás e está relacionado com o desenvolvimento da vida microbiana dentro no sistema de DA.

$$\text{perdigestprot} = k_{\text{prot}} \times \text{pertempdigs} \quad (10)$$

$$\text{perdigestlip} = k_{\text{lip}} \times \text{pertempdigs} \quad (11)$$

$$\text{perdigestcar} = k_{\text{car}} \times \text{pertempdigs} \quad (12)$$

A Função 13 calcula o total de ácidos gordos produzidos como resultado do percentual de digestibilidade dos lipídios (perdigestlip) multiplicado por uma proporção de lipídios totais (lipacidg) inseridos no sistema de DA.

$$\text{acidgh} = \text{perdigestlip} \times \text{lipacidg} \quad (13)$$

A Função 14 demonstra o cálculo do total de açúcares produzido. Esse valor resulta do somatório entre o percentual de digestibilidade dos carboidratos (perdigestcar) e o percentual de digestibilidade dos lipídios (perdigestlip) multiplicado por um percentual de lipídios totais (lipacuc).

$$\text{acuch} = \text{perdigestcar} + (\text{perdigestlip} \times \text{lipacuc}) \quad (14)$$

A Função 15 mostra que a quantidade de aminoácidos (aminh) produzidos equivale a resultante do percentual de digestibilidade das proteínas (perdigestprot).

$$\text{aminh} = \text{perdigestprot} \quad (15)$$

5.1.4 CÁLCULOS DA ACIDOGÊNESE

Na função da acidogênese, a relação de cálculo de elementos intermediários é direta, pois o total de açúcar produzido na etapa da hidrólise é o correspondente a produção de ácidos intermediários. Assim, foi considerado o cálculo da produção de elementos intermediários equivalentes a proporção de açúcares, não possuindo uma função que a represente.

5.1.5 CÁLCULOS DA ACETOGÊNESE

Na acetogênese é necessário calcular a quantidade de acetato e hidrogênio produzidas. Para tanto, a Função 16 que descreve a produção de acetato é a resultante da soma entre uma proporção de hidrogênio (prophidro), a proporção de aminoácidos (propaminoac) multiplicados pela quantidade de aminoácidos produzido, o total de elementos intermediários (inter) multiplicado pela proporção de intermediários da fase da acidogênese (propinteraci) e o total de ácidos graxos (acidgh) multiplicado pela proporção de ácidos graxos (propacidgxac).

$$\text{aceta} = \text{prophidro} + (\text{propaminoac} \times \text{aminh}) + (\text{inter} \times \text{propinteraci}) + (\text{acidgh} \times \text{propacidgxac}) \quad (16)$$

A Função 17 calcula o total de hidrogênio (hidrog) produzido que é resultante da soma entre uma proporção de acetato (propaceto), da proporção de aminoácidos (propaminohi) multiplicado pelo total de aminoácidos (aminh), proporção de intermediários (propinterhi) multiplicado pelo total de intermediários (inter) e a proporção de ácidos gordos (propacidgxhi) multiplicado pelo total de ácidos gordos produzido (acidgh).

$$\text{hidrog} = \text{propaceto} + (\text{propaminohi} \times \text{aminh}) + (\text{propinterhi} \times \text{inter}) + (\text{propacidgxhi} \times \text{acidgh}) \quad (17)$$

5.1.6 CÁLCULOS DA METANOGÊNESE

A Função 18 apresenta o cálculo de CH₄ que é resultante da soma entre 70% do acetato total (aceta) e 30% do hidrogênio (hidro) produzidos na etapa da acetogênese. Esse é o último cálculo estabelecido pelo modelo proposto.

$$\text{metano} = (\text{aceta} \times 0.7) + (\text{hidro} \times 0.3) \quad (18)$$

5.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS FUNÇÕES DE CÁLCULO DAS FASES DO SISTEMA DE DA

No total o modelo engloba dezoito funções que representam as quatro fases de um sistema de DA. Elas não representam todas as reações químicas que acontecem no sistema de DA, mas são suficientes para modelar o seu funcionamento.

É possível estabelecer novas funções que utilizem outras variáveis do sistema de DA. Na fase da Acidogênese, que nessa proposta não tem funções que a representem, poderiam ser desenvolvidas funções referentes à proporção de ácidos intermediários.

6 MODELO DE MONITORAMENTO, ANÁLISE E ATUAÇÃO APOIADO POR RSSF

Para garantir o desempenho do sistema de DA é necessário fazer o monitoramento, análise e atuação no sistema. O monitoramento proposto é feito por uma RSSF. As análises microbiológicas do sistema e as leituras resultantes dos gases expressam a parte de análise do desempenho geral do sistema de DA. O modelo matemático proposto, onde as variáveis monitoradas são calculadas e retornam os valores de resultantes, indicam a necessidade ou não de atuação.

Entretanto, sugere-se que essas três etapas devam seguir uma hierarquia de níveis de prioridade, pois dentre os diversos elementos que fazem parte do sistema de DA, alguns são mais sensíveis ou críticos (temperatura interna do tanque de digestão) do que outros (volume do reservatório de biofertilizantes). Desta forma, implementou-se um modelo de níveis de prioridade para dar robustez ao sistema.

Entendemos que cada grupo de sensores e os respectivos valores a serem coletados estão correlacionados com os níveis posteriores ou anteriores. A estrutura em níveis cria um modelo de causa-efeito onde cada um dos sensores dentro do seu nível pode ter maior ou menor representatividade. A Figura 22 representa o modelo de níveis de prioridade de monitoramento e controle para o sistema de DA que pode ser dividido em fase líquida e gasosa.

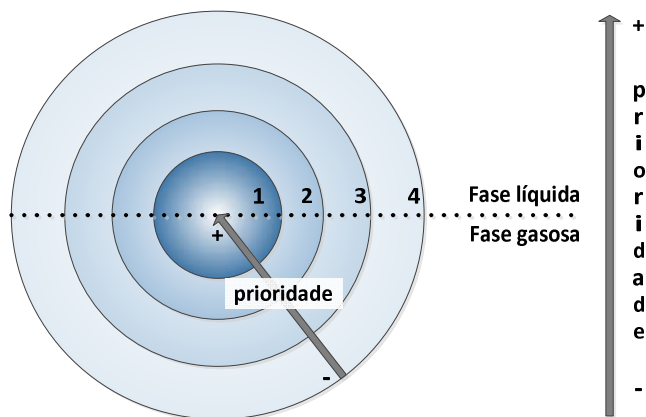


Figura 22 - Níveis de prioridade para o monitoramento/controlado da RSSF.

A escala vai do nível de menor até o nível de maior prioridade, sendo que além da prioridade entre níveis, existe uma prioridade entre as fases, sendo a líquida de maior prioridade. Essa diferença de representação pode ser avaliada no contexto do tempo e das fases, pois o desempenho da fase gasosa está diretamente associado ao desempenho da fase líquida. Considerando essa regra, as variáveis da fase líquida têm grau de importância maior para o monitoramento e atuação antes de impactar na fase gasosa. Assim, pode se desenvolver um fluxo com as etapas desde a organização da RSSF, ao monitoramento e atuação.

Cada nível agrupa um conjunto de sensores responsáveis por monitorar um conjunto de variáveis de mesmo nível de prioridade, conforme apresentado na Tabela 20. Esta prioridade está relacionada ao processo de DA, conforme descrito na Seção 2.1.

Tabela 20 - Exemplo de valores coletados por nível de monitoramento.

Nível	Variáveis monitoradas
1	Temperatura dos dejetos dentro do digestor anaeróbico, pH, proporção de gases e ácidos
2	Fluxo de entrada de dejetos e fluxo de saída de biofertilizante, válvula de alívio, temperatura da água no sistema de arrefecimento do digestor anaeróbico
3	Temperatura do aquecedor de dejetos, volume de biofertilizante produzido, temperatura da água nos aquecedores e volume de gás consumido
4	Temperatura externa, temperatura e volume dos reservatórios de água, status da bomba de injeção e do misturador, volume de gás distribuído e quantidade de gás armazenado no balão

6.1.1 DESENHO DO MODELO DE MONITORAMENTO, ANÁLISE E ATUAÇÃO

Uma vez descrito os níveis de prioridade do sensoriamento e controle, fazemos a estruturação dos fluxos de funcionamento do sistema proposto. Os nodos coletores são posicionados e se comunicam diretamente com um nodo sorvedouro transmitindo seu estado (i.e., informações de sensoriamento e informações sobre a bateria e condições de operação). A Figura 23 apresenta este fluxo em blocos de operação, contemplando organização da rede, monitoramento, análise e atuação do/no sistema de DA.

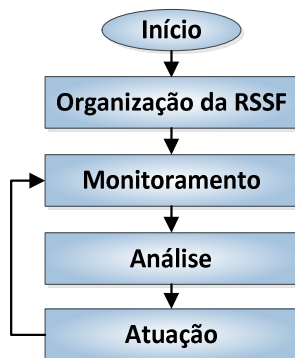


Figura 23 - Fluxo de funcionamento do modelo de RSSF proposto.

6.1.2 ETAPA DE ORGANIZAÇÃO DOS NODOS SENSORES E ESTRUTURAÇÃO DA RSSF

A classificação das RSSFs está vinculada a seus objetivos e a sua aplicação. Assim, estas características terão influência direta na relação da aplicação com modelos de comunicação e mecanismos de roteamento. Conforme [82], uma RSSF pode ser classificada segundo sua configuração, coleta de dados, comunicação e processamento.

A Tabela 21 apresenta os tipos de configuração que podem ser adotados por uma RSSF na sua fase de organização. Cada uma delas têm características orientadas para a finalidade pela qual serão utilizadas, como por exemplo, a densidade de nós por área. É fundamental aos projetos de RSSFs definir sua configuração, pois a composição, organização, mobilidade, densidade e distribuição, individual ou coletivamente não podem ser ignoradas ou relegadas a uma análise posterior.

Tabela 21 - Classificação quanto à configuração de uma RSSF.

Configuração		Características
Composição	Homogênea	Rede possui todos os nodos com mesmas características computacionais
	Heterogênea	Rede possui nodos de diferentes características computacionais
Organização	Hierárquica	Nodos organizados em grupos (clusters) e subgrupos
	Plana	Nodos não estão organizados em grupos
Mobilidade	Estática	Nodos não podem mudar de posição
	Móvel	Nodos podem mudar de posição
Densidade	Densa	Apresenta alta concentração de nodos por unidade de área
	Esparça	Apresenta baixa concentração de nodos por unidade de área
Distribuição	Irregular	Nodos são distribuídos de forma não uniforme
	Regular	Nodos são distribuídos de forma uniforme

Neste estudo, a composição da RSSF proposta para monitorar um sistema de DA é homogênea, com uma organização hierárquica, estática, com densidade esparsa e distribuição não regular.

A classificação em relação à comunicação nas RSSF (Tabela 22) depende do uso da mesma e todas elas precisam ter definida uma estratégia de disseminação dos dados, o tipo de transmissão que será adotada, a alocação de canais de comunicação e como será o fluxo das informações, pois terão impacto no consumo de energia e tempo de vida da RSSF.

Tabela 22 - Classificação quanto ao tipo de comunicação dos nodos em uma RSSF.

Comunicação		Características
Disseminação	Programada	Nodos disseminam dados em intervalos regulares
	Contínua	Nodos disseminam dados continuamente
	Sob demanda	Nodos disseminam dados em resposta à consulta da aplicação ou na ocorrência de um evento
Transmissão	Simplex	Nodos apenas transmitem os dados
	Half-duplex	Nodos podem transmitir ou receber dados, mas não simultaneamente
	Full-duplex	Nodos podem transmitir e receber dados simultaneamente
Alocação de canal	Estática	Largura de banda dividida de forma equitativa entre todos os nodos
	Dinâmica	Não existe atribuição fixa de largura de banda; os nodos disputam o canal
Fluxo de informações	Broadcast / Flooding	Dados são transmitidos utilizando o conceito de broadcast, ou seja, um nodo sensor transmite para todos os seus vizinhos, que por sua vez transmite para todos os seus vizinhos, seguindo esse padrão até o dado alcançar o seu destino
	Multicast	Dados são transmitidos a todos os nodos que fazem parte de um grupo
	Unicast	Nodo transmite seus dados a apenas um outro nodo
	Gossiping	Nodos sensores selecionam os nodos para os quais transmitem seus dados
	Bargaining	Nodos transmitem dados somente se o nodo destino manifestar interesse, isto é, existe uma negociação

A classificação da RSSF a ser utilizada é de disseminação programada, com transmissão *Half-Duplex* e alocação de canal estática e um fluxo de informações *Unicast* ou *Gossiping*.

A etapa de organização dos nodos e a estruturação da RSSF ocorre conforme a classificação ilustrada na Figura 24. Os sensores ficam dispostos no sistema de DA conforme dimensão do digestor e funcionalidade, e cada um deles após acionado, informa o seu *status* de funcionamento ao nodo sorvedouro. Este status compreende não apenas as informações de sensoriamento, mas também informações que permitem estimar à rede ter maior tempo de operação com qualidade. Dentre estas informações estão a qualidade do sinal de comunicação recebido de outros nodos, e o nível de carga da bateria.

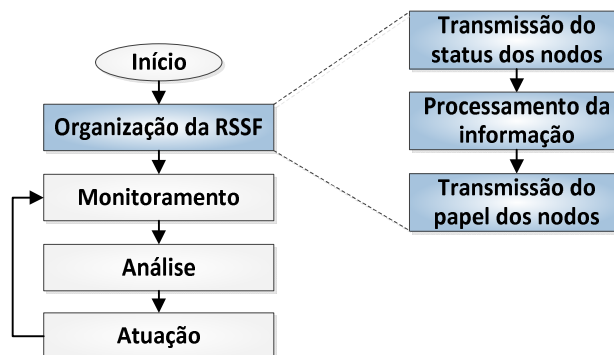


Figura 24 – Etapa de organização da RSSF.

Propõe-se que nesta etapa a comunicação de todos os nodos seja de forma direta (i.e., protocolo do tipo *direct communication*) com o nodo sorvedouro, visto que não se prevê que os nodos iniciem com informação suficiente para determinar que a rede se autoconfigure. Uma vez que o nodo sorvedouro capture o *status* de todos os nodos da RSSF, segue uma etapa de processamento destas informações. O objetivo é o nodo sorvedouro definir o protocolo que a rede irá operar e o papel de cada nodo dentro deste contexto. A identificação do nível, fase e prioridade, frequência de operação também são transmitidas para cada nodo, de forma que o mesmo possa tomar algumas decisões locais (i.e., sem requerer a decisões do nodo sorvedouro).

A etapa de Organização da RSSF finaliza com os nodos iniciando a sua operação de monitoramento definida, tendo a comunicação com o resto da rede através do protocolo especificado pelo nodo sorvedouro (e.g., LEACH [67]).

6.1.3 ETAPA DE MONITORAMENTO

De forma semelhante, [82] classifica a forma de coleta da informação em relação ao tempo, conforme a característica do meio a ser sensoriado. Os sistemas de DA podem ser monitorados e ter a coleta de dados definida conforme apresentado na Tabela 23.

Tabela 23 - Classificação quanto à coleta de informações em RSSF.

Coleta	Características
Periódica	Nodos coletam dados em intervalos regulares pré-definidos
Contínua	Nodos coletam dados continuamente
Reativa	Nodos coletam dados quando ocorre evento pré-definido, ou quando solicitado pela aplicação

Após a organização da RSSF, o digestor entra em regime de operação que é definida pela operação cíclica de monitoramento, análise e atuação. A etapa de Monitoramento (Figura 25) inicia com a coleta de dados (*status*) e segue com a transmissão destes valores. Sendo que a coleta de dados pode ocorrer de duas formas: (i) em função de uma base de tempo que depende das características do elemento a ser sensoriado, ou (ii) com um comando proveniente do nodo controlador.

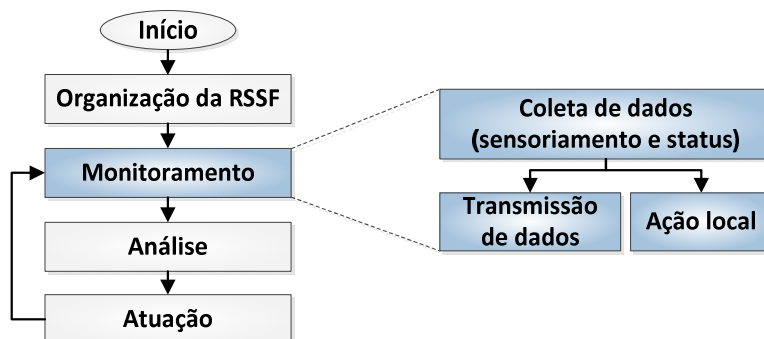


Figura 25 - Descrição das principais etapas da fase de Monitoramento.

O valor coletado pode disparar uma ação local de alta prioridade que não pode esperar por uma análise global do sistema de DA, como por exemplo, abrir uma válvula para dar vazão à uma quantidade de gás que poderia danificar o aparelho. De outra forma, o valor coletado pode ser analisado conjuntamente com outros valores de outros sensores na etapa de Análise. A Figura 26 representa uma ação local do sistema de DA, onde uma variável sensorizada é comparada com o valor de referência implicando a geração de um comando para um mecanismo de atuação (i.e., Atuador).

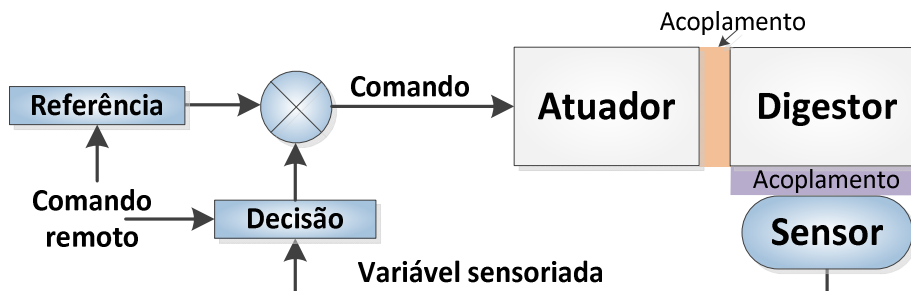


Figura 26 – Ilustração do esquema de sensoriamento com atuação local/remota. A figura mostra duas regiões de acoplamento que dependem de como o atuador age no ambiente,

bem como de como o nodo sensor capta o valor sensoriado. Por exemplo, o atuador pode ser um aquecedor que é acoplado ao digestor através de um meio líquido.

O modelo aqui descrito prevê que tanto o valor de referência, quanto a decisão pode ser alterada via comando recebido pelo nodo de controle (i.e., nodo sorvedouro), sendo que a decisão pode ser um conjunto de parâmetros definindo uma função auto ajustável. Este formato de decisão permite que o nodo possa tomar decisões mais elaboradas frente a mais de uma variável.

A Tabela 24 apresenta um conjunto de elementos e seus valores de referência que podem ser monitoradas por um nodo sensor no processo de DA e a faixa de valores ideais para um bom desempenho do sistema.

Tabela 24 - Exemplo de elementos monitorados em um sistema de DA.

Elemento	Fase	Faixa de valores recomendada
Temperatura interna do digestor	Líquida	Faixa de valores entre 30°C a 60°C
Temperatura ambiente	Ambas	Conforme região geográfica (-10°C até 60°C)
Nível do gás	Gasosa	m ³ (o valor recomendado é a capacidade máxima do reservatório de gás)
Fluxo de gás	Gasosa	m ³ por intervalo de tempo (depende da capacidade do reservatório de gás)
pH	Líquida	6,5 – 8 (7 – 7,5 ideal)
Proporções de gases CO ₂ , H ₂ e H ₂ S	Gasosa	CO ₂ – 25% – 50% (o ideal é proporções menores) H ₂ – Pressão variável H ₂ S – inferior a 20.000 ppm

6.1.4 ETAPA DE ANÁLISE

A etapa de Análise de dados, esquematizada na Figura 27, é responsável por interpretar o conjunto de valores coletados através dos agrupamentos por fase, e por calcular a correlação entre eles para tomar decisão sobre atuações e possível reorganização da rede e do papel dos nodos.

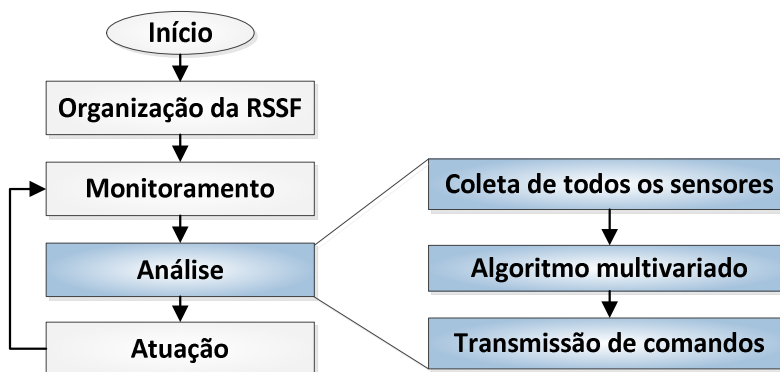


Figura 27 – Análise de dados em sistema de DA.

A Tabela 25 descreve o consumo de energia na fase de processamento da informação, que também deve ser mensurado para que a RSSF não tenha problemas em alguns nodos ou então “morra” de forma prematura. Definir a estratégia de processamento da informação na rede é uma tarefa que deve ser analisada e aplicada conforme o ambiente monitorado.

Tabela 25 - Classificação quanto ao tipo de processamento da informação.

Processamento	Características
Na rede	Nodo executa mecanismos relacionados à infraestrutura da rede, tais como: controle de acesso, roteamento, criptografia e eleição de líderes
Local	Nodo executa processamento independente, por exemplo: condicionamento de dados coletados a partir da calibração do sensor
De correlação	Nodo executa procedimentos relacionados aos dados trafegados na rede, por exemplo, fusão, compressão e agregação

A atividade de Análise foi planejada para ser realizada de forma centralizada pelo nodo sorvedouro. Esta etapa inicia com a coleta do *status* dos nodos sensores, que é dependente do protocolo adotado e da frequência de operação dos nodos. Uma vez recebido informações do sistema de DA, inicia o algoritmo de análise de multivariável que é o núcleo desta etapa. É neste algoritmo que as principais decisões para melhorar a qualidade do processo de DA e aumentar o tempo de vida da rede são tomadas. São nas técnicas e modelos desta etapa que reside uma das principais contribuições desta proposta.

A etapa de Análise finda com a transmissão de comandos para os nodos sensores. Dentre os principais comandos estão: (i) reorganização do papel dos nodos; (ii) alteração do protocolo de comunicação; (iii) alteração da prioridade do nodo e sua frequência de

operação; (iv) comandos remotos contendo informações de valor de referência e decisão que implicam em atuação remota.

6.1.5 ETAPA DE ATUAÇÃO

A Figura 28 ilustra a etapa de Atuação que fecha o ciclo de operação de monitoramento e controle do digestor.

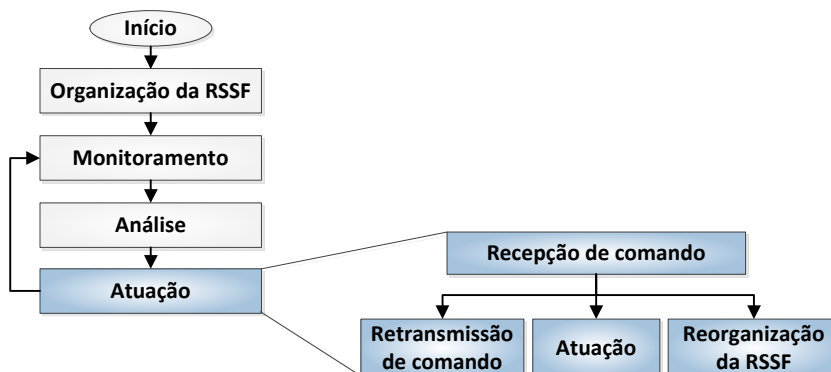


Figura 28 – Atuação em um sistema de DA.

O ponto principal desta fase é o acionamento dos atuadores (e.g., válvulas, termostatos e misturador), que vão atuar no sistema de DA, quando necessário, para garantir que o mesmo trabalhe dentro dos parâmetros pré-estabelecidos. A fase compreende (i) recepção de comandos e eventual retransmissão (quando o nodo sensor recebe pacotes que devem ser redirecionados para outros nodos); (ii) atuação, como descrita na Figura 28, tendo como diferença o fato da atuação ser controlada remotamente e não localmente; e (iii) eventual reorganização da RSSF, no caso de a análise concluir que o protocolo da rede e/ou o papel do nodo devam ser alterados. A reorganização segue um procedimento similar da Figura 24. Considera-se que o protocolo de operação da rede é do tipo *direct communication*, enquanto que aqui, a rede pode ter outro tipo de operação.

6.2 EXEMPLO DE MODELO DE NÍVEIS DE MONITORAMENTO

Considerando o modelo de monitoramento, análise e atuação, a representação de níveis de monitoramento indica que alguns sensores podem ter relevância maior que outros. Esta relevância pode ser destacada, por exemplo, comparando o sensor de pressão

da válvula de alívio do digestor com a temperatura da água no sistema de aquecimento externo.

Nesse comparativo, a temperatura da água é menos relevante que a válvula, pois o excesso de gás precisa ser expelido com maior urgência. Dessa forma, podemos propor um sistema de gerenciamento dinâmico de monitoramento pela RSSF através da ponderação dos sensores utilizados para monitorar um sistema de DA.

Os valores de ponderação podem ser fixos e cada peso atribuído pelo operador através de critérios como localização geográfica (regiões mais quentes ou frias do planeta) ou então o tipo de dejetos utilizado. A Tabela 26 exemplifica essa ponderação considerando as fases e a frequência com que os dados devem ser coletados pela RSSF.

Tabela 26 - Exemplo de ponderação das variáveis em um sistema de DA.

Variáveis	Fases	Frequência	Ponderação (%)
Temperatura interna do digestor	Líquida	Constante	0,25
Temperatura ambiente	Líquida e gasosa	Esporádica	0,2
Nível de gás	Gasosa	Constante	0,2
Fluxo de gás	Gasosa	Constante	0,1
pH	Líquida	Esporádico	0,2
Proporções CO ₂ , H ₂ e H ₂ S	Gasosa	Constante	0,05

O monitoramento deve ocorrer de forma periódica ou contínua para garantir que todos os valores estão sendo coletados pelos sensores de forma adequada. Aplicando a ponderação da Tabela 26 é possível calcular um determinado fator de impacto de uma falha no nível que ele se localiza e também no sistema como um todo.

A Figura 29 exemplifica um cenário de digestor que destaca alguns elementos monitorados e a dependência que existe entre eles, gerando uma relação de causa-efeito para atuação após análise dos valores coletados. O exemplo representa uma situação onde o sensor de temperatura externa tem correlação com as diversas temperaturas monitoradas no sistema de DA.

O passo inicial é ler o valor da temperatura externa e verificar em que faixa de valores ela se apresenta e se isto pode afetar o rendimento do sistema de DA. O sensor transmite esse valor para o nó de controle. Supondo que este valor seja inadequado (acima ou abaixo da faixa ideal de funcionamento do sistema de DA), a etapa de análise solicita o valor atual de todas as temperaturas que dependem da temperatura externa:

água, dejetos, sistema de arrefecimento de água, e parte interna do digestor. O conhecimento destas temperaturas permite que o sistema de análise tome decisões para uma atuação eficiente.

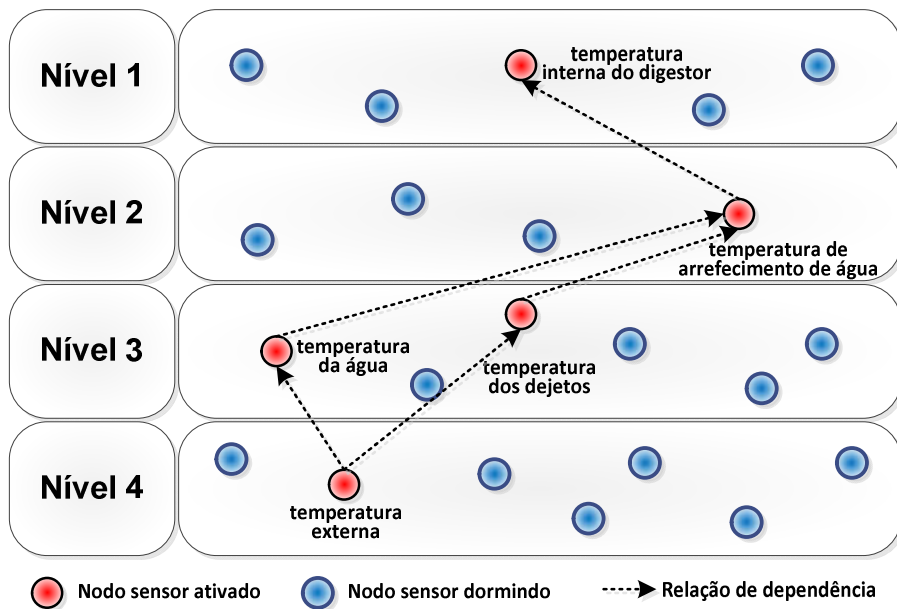


Figura 29 - Exemplo de cenário de digestor, salientando sensores de temperatura.

7 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Após a execução das análises microbiológicas e de gases e o desenvolvimento do modelo matemático, além dos modelos de monitoramento, controle e atuação apoiados por um modelo de níveis, foi implementada uma aplicação baseada no modelo matemático proposto. O objetivo da aplicação é simular as reações químicas e apresentar como resultado as proporções de CH₄ e biogás.

Para avaliar o modelo matemático, foi definido um grupo de dados de entrada para a simulação. Os dados de entrada continham uma quantidade de dejetos inseridos no sistema de DA com uma proporção de proteínas, lipídios e carboidratos (Apêndice A).

Além dessas proporções, foram definidos valores de temperatura interna do sistema de DA para fazer o cálculo de digestibilidade dos macros nutrientes. O tempo da simulação, também chamado de tempo de retenção hidráulico, seguiu o modelo de batelada (sem reposição de dejetos) com 86 leituras, 6 por dia, num total de 15 dias.

As simulações usaram as temperaturas do sistema de DA como principal fator de interferência no funcionamento do sistema de DA, monitorados por uma RSSF. Esses valores são então processados no módulo de controle e calculam a quantidade de biogás e metano esperadas naquela condição. Se houver uma alteração inesperada nos parâmetros de temperatura, considera-se atuar sobre o sistema de DA.

7.1 FERRAMENTA PARA SIMULAÇÃO

Conforme a Figura 30, o sistema é iniciado com uma carga de parâmetros para as variáveis de entrada e ao final gera-se um arquivo de saída com as resultantes de proporções. Esses valores de saída podem então ser confrontados com os resultados das funções de controle que também são implementadas na aplicação para medir a precisão dos resultados.

O arquivo de entrada de dados simula a leitura dos sensores e é composto pelos valores tempo, quantidade de dejetos, percentual de macro nutriente consumido, temperatura ideal e temperatura medida. A quantidade de dejetos inserido no sistema de

DA pode ser definida pelo usuário. O tempo pode ter uma granularidade variando entre segundos, horas ou dias.

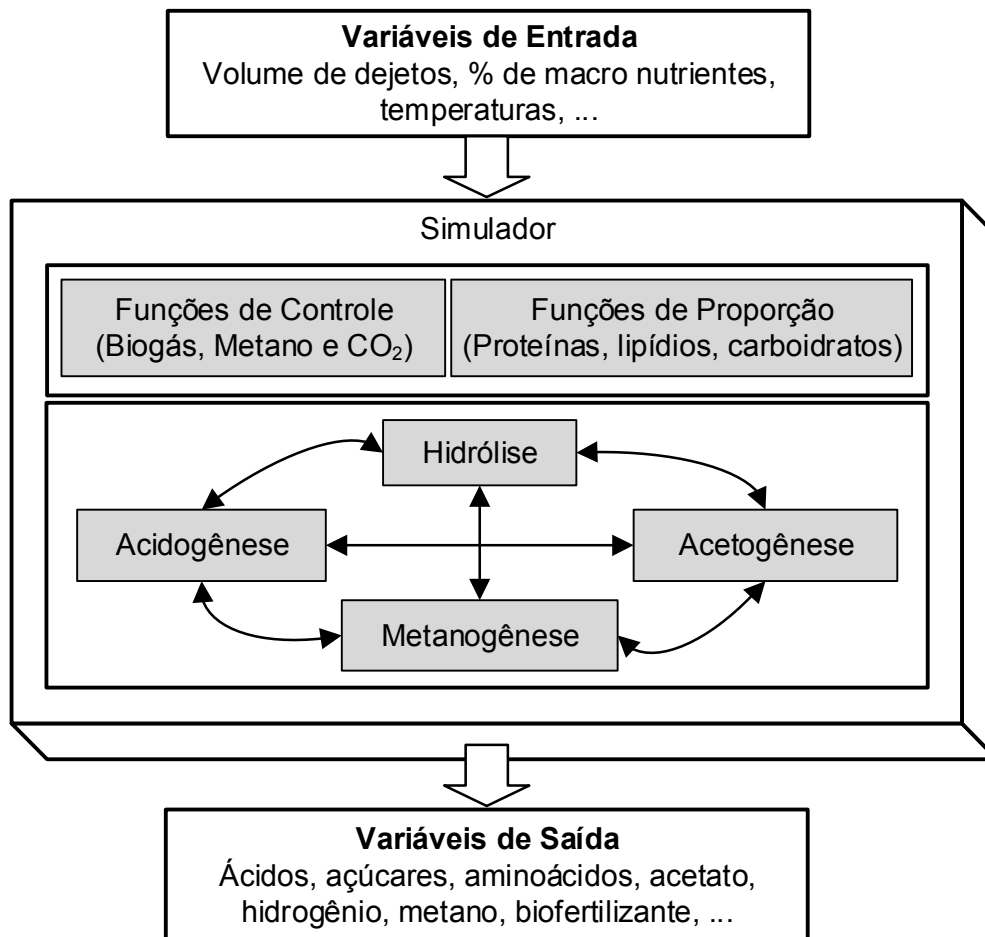


Figura 30 - Estrutura básica do simulador

A separação de cada macronutriente na entrada de dados (proteína, lipídio e carboidrato) segue a lógica de que cada um deles tem a capacidade de produzir uma quantidade máxima de biogás e CH₄, com uma proporção variável conforme o tipo de dejetos inseridos no sistema de DA. A saída de valores é composta pelos principais elementos produzidos pelas reações químicas que acontecem dentro do sistema de DA, com o passar do tempo, numa determinada condição de temperatura.

Cada fase produz um grupo de elementos cujas proporções são utilizadas para calcular a proporção de elementos das fases seguintes. Ao final, o processo permite estimar a produção de ácidos totais, açúcares, aminoácidos, elementos Intermediários, acetato, hidrogênio e CH₄ total.

7.2 CONFIGURAÇÃO DE EXPERIMENTO

Foram definidas cinco rodadas com 86 leituras no experimento prático para avaliar a qualidade das estimativas obtidas pelo simulador, confrontando as quantidades esperadas e calculadas de biogás e CH₄. Cada rodada tem proporções iguais de dejetos (1 Kg) com uma variação de temperatura interna de fermentação, o que interfere no percentual de digestibilidade conforme [57]. O intervalo de temperaturas segue uma faixa de valores estabelecidos com passos de 5°C, iniciando em 25°C e chegando até 50°C

Tabela 27 – Faixas de temperatura, fator de digestibilidade utilizada e proporção de macronutrientes utilizadas nos experimentos.

Experimento	Faixa de temperatura	Fator de digestibilidade	Proporção de macronutrientes (por Kg)		
			Proteína	Lipídio	Carboidrato
1	25 °C a 30 °C	0,80	21%	39%	40%
2	30 °C a 35 °C	1,00	21%	39%	40%
3	35 °C a 40 °C	1,18	21%	39%	40%
4	40 °C e 45 °C	1,25	21%	39%	40%
5	45 °C e 50 °C	0,50	21%	39%	40%

Para atestar os resultados dos experimentos, especificamente sobre a produção de biogás total e CH₄, os valores de controle utilizados foram os de silagem de gramíneas [33], que apresentam um rendimento conforme Tabela 28 em litros de gás por quilograma de macronutriente consumido.

Tabela 28 – Valores de referência [33] para produção de biogás e metano em ensilagem de gramíneas.

Macronutriente	Biogás (litros/kg)	CH ₄ (litros/kg)	Proporção utilizada no experimento	Biogás esperado no experimento Litros	CH ₄ esperado no experimento Litros
Proteína	48,60	34,50	21%	10,21	7,25
Lipídios	31,90	21,70	39%	12,44	8,46
Carboidratos	436,60	218,30	40%	174,64	87,32
Total	517,10	274,50	100%	197,29	103,03

Outros valores importantes que foram escalonados nas proporções são os elementos resultantes de cada fase da DA. Eles foram parametrizados com percentuais que são calculados na composição de novos elementos nas fases seguintes, partindo da hidrólise [42]. A Tabela 29 apresenta os parâmetros utilizados nos experimentos com valores constantes.

Tabela 29 – Proporções de elementos em percentual em cada fase do sistema de DA [42].

Fase	Elemento	Proporção utilizada
Hidrólise	Proporção de lipídios convertidos em ácidos graxos	87%
Hidrólise	Proporção de lipídios convertidos em açúcares	13%
Acidogênese	Proporção de ácidos produzidos na hidrólise	100%
Acetogênese	Proporção de aminoácidos	78%
Acetogênese	Proporção de elementos intermediários	60%
Acetogênese	Proporção de aminoácidos da hidrólise	22%
Acetogênese	Proporção de intermediários da hidrólise	40%
Acetogênese	Proporção de ácidos graxos da hidrólise	32%
Acetogênese	Proporção de ácidos graxos da acidogênese	68%
Acetogênese	Proporção de hidrogênio da acidogênese	100%
Acetogênese	Proporção de acetato da acidogênese	100%
Metanogênese	Proporção de acetato na composição do metano	70%
Metanogênese	Proporção de hidrogênio na composição do metano	30%

7.3 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DO MODELO MATEMÁTICO

Considerando como referência o valor de 103,03 litros de CH₄ produzidos com o sistema operando em faixa de temperatura ideal com 100% de digestibilidade (Tabela 28), foram estabelecidos os demais percentuais de digestibilidade em que o sistema deveria operar nas faixas de temperatura utilizados. Os percentuais de digestibilidade para a faixa de valores entre 25°C a 30°C foi de 80% e entre 30°C e 35°C foi de 100%. Como referência para os valores ótimos, (acima de 100%) tomou-se os valores alcançados por [57], que apontou um desempenho 18% superior na faixa de temperatura entre 35°C e 40°C e de 25% na faixa entre 40°C e 45°C. A Tabela 30 apresenta os valores calculados e o detalhamento dos resultados de cada rodada da simulação do experimento estão no Apêndice B.

Tabela 30 – Volume de biogás e CH₄ calculado e esperado, em litros, em 1 kg de dejetos.

Faixa de temperatura	Temperatura avaliada	Esperado em CH ₄	Calculado de CH ₄	Biogás esperado	Biogás calculado
25 °C a 30 °C	28°C	99,89	103,37	156,97	164,08
30 °C a 35 °C	32°C	103,03	106,61	163,97	169,22
35 °C a 40 °C	37°C	105,68	109,35	167,75	173,57
40 °C e 45 °C	43°C	106,99	110,70	169,68	175,71
45 °C e 50 °C	48°C	95,13	98,43	151,00	156,24

Na primeira rodada de experimentos, as reações químicas foram avaliadas sob uma temperatura de 28 °C e percentual de digestibilidade de 80%, enquadrando-o na faixa

de valores entre 25 °C e 30 °C. A quantidade de CH₄ esperada era de 99,89 litros e o calculado ficou em 103,4 litros.

Com o sistema regulado em uma temperatura de 32°C e percentual de digestibilidade de 100%, a segunda rodada de experimentos mostrou um aumento na proporção de CH₄ para 106,61 litros enquanto o esperado era de 103,03 litros.

A terceira rodada de experimento configurou-se o sistema para operar com uma temperatura de 37 °C e uma taxa de digestibilidade de 18% acima de 100%. Os resultados foram de 109,35 litros e o esperado era de 105,68 litros.

Na quarta rodada do experimento, com uma temperatura de 43°C e digestibilidade com taxa de 25% acima da segunda rodada de experimentos, o CH₄ esperado era de 106,99 litros e o calculado foi de 110,70 litros.

Na quinta e última rodada, com o sistema regulado para operar em 48 °C e 50% de digestibilidade, CH₄ esperado era de 95,13 litros e o calculado foi de 98,43 litros.

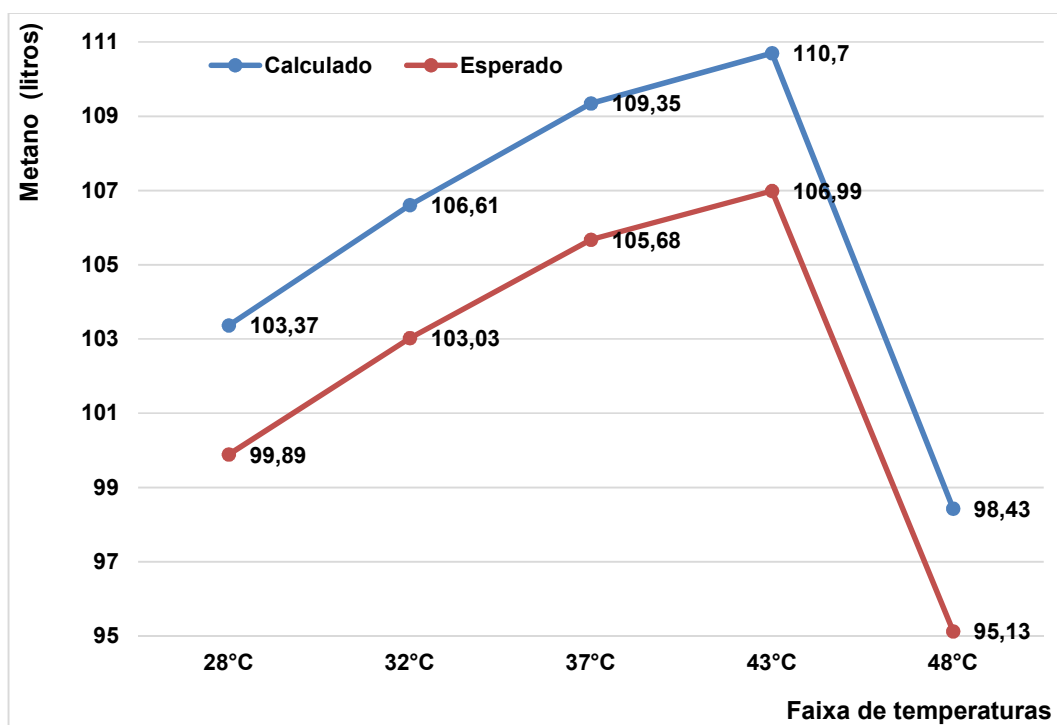


Figura 31 - Volume de CH₄ esperado e calculado.

A variação da produção de CH₄ apresentado na Figura 31 e de Biogás total apresentados na Figura 32 fazem um comparativo entre o que era esperado e o que foi calculado pelo modelo matemático.

Analisando esses resultados, observamos que em relação ao CH₄ houve uma diferença média de 3,4% entre a quantidade esperada e a calculada em todas as faixas de temperatura. Já em relação a produção total de Biogás houve uma variação na diferença entre o esperado e o calculado de 4,3% na temperatura de 28 °C 3,6% em 32 °C, 3,3 % em 37 °C e de 3,4% nas temperaturas de 43°C e 48 °C.

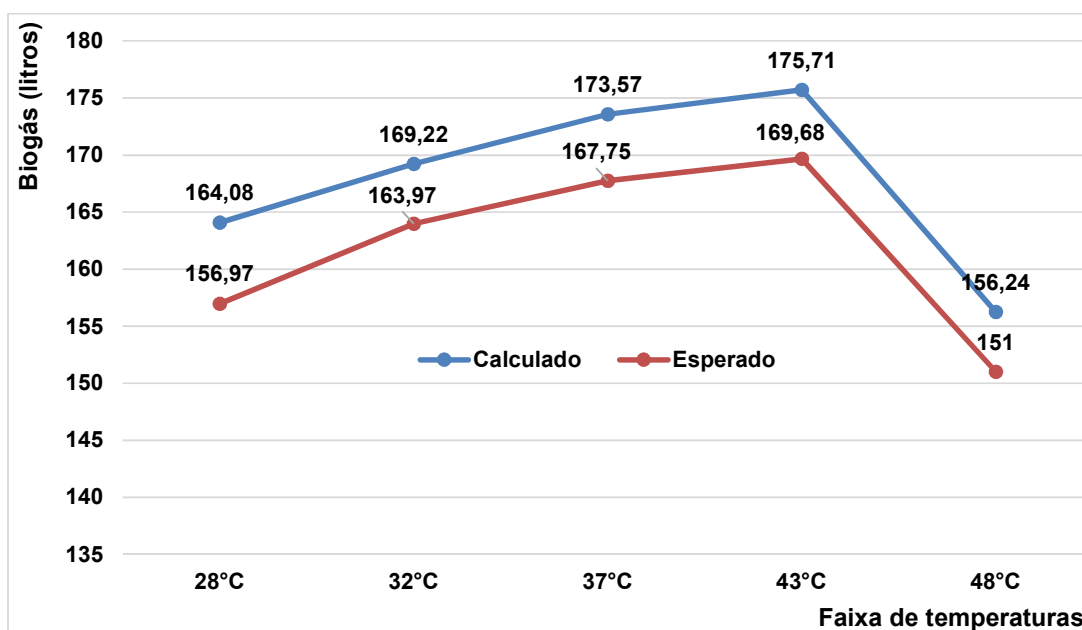


Figura 32 – Volume de biogás total esperado e calculado.

A proporção de CH₄ apresentada na Tabela 31 produzido por cada um dos macronutrientes também deve ser observado pois representa o quanto cada um significa para o desempenho geral do sistema de DA. Esse é um indicador da atividade microbológica presente no sistema de DA que tem uma relação direta com a temperatura de operação do sistema e destaca a importância do correto monitoramento e controle de temperaturas.

Tabela 31 – Proporção de CH₄ produzido por macronutrientes em relação à temperatura do sistema de DA.

Macronutriente	CH ₄ produzido em litros				
	28°C	32°C	37°C	43°C	48°C
Proteína	12,99	13,40	13,74	13,91	12,37
Lipídios	6,38	8,43	8,64	8,75	7,78
Carboidratos	84,34	84,78	86,96	88,04	78,28
Total	103,71	106,61	109,35	110,70	98,43

É importante demonstrar o comportamento de cada uma das fases do sistema de DA pois os macronutrientes são consumidos na fase da hidrólise e uma proporção de cada um deles é utilizado na composição de novos elementos das fases seguintes (acidogênese, acetogênese e metanogênese). A Figura 33 apresenta os resultados na produção de CH₄ por cada um dos macronutrientes nas diferentes temperaturas.

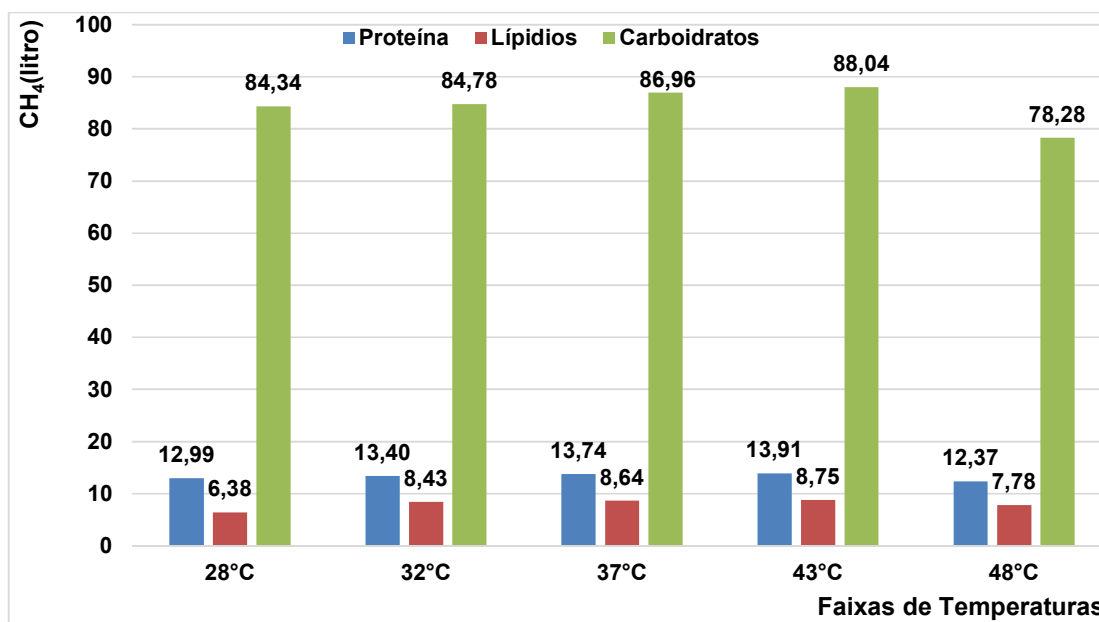


Figura 33 - Proporção de CH₄ produzido por macronutriente em relação a temperatura.

O desempenho na produção de biogás conforme a variação da temperatura se mostrou igualmente significativa para todos os macronutrientes. É importante ressaltar que a produção de CH₄ é variável para cada um dos macronutrientes, na proporção com o total de biogás produzido [33]. Do total de biogás produzido pelas proteínas, espera-se que 71% sejam convertidos em CH₄. Do total de biogás produzido pelos lipídios, 68% são convertidos em CH₄ e dos carboidratos, apenas 50% do biogás produzido converte-se em CH₄.

7.3.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O modelo matemático proposto apresentou um desempenho significativo se confrontarmos os resultados apurados com os valores usados como referência. É importante destacar que o modelo funciona apenas com as proporções de macronutrientes e desconsidera variáveis como a proporção de água presente nos dejetos. Além da água também não é feita nenhuma estimativa da massa seca e o volume de sólidos totais que são elementos presentes nos dejetos animais e vegetais. Para a simulação foram coletadas as temperaturas internas do Digestor e também a temperatura externa.

Outro fator relevante é a proporção de elementos estimados para cada fase da DA representados na Tabela 29 que podem ser alterados em novas simulações. Estes percentuais sofrem as interferências do meio quando existe uma variação brusca de temperatura afetando o sistema. Nas simulações desenvolvidas a temperatura se manteve constante.

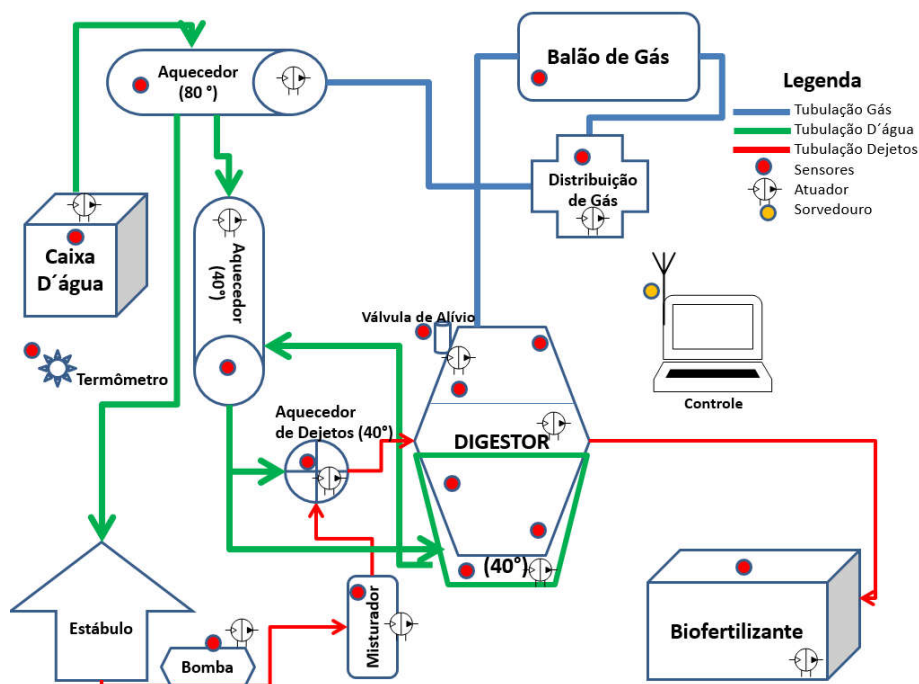


Figura 34 - Sistema de DA monitorado por uma RSSF, e sistemas de controle e atuação

O modelo matemático pode ser ampliado para uma estrutura mais complexa como a apresentada na Figura 34. Uma estrutura completa de um sistema de DA pode contemplar bombas de sucção de dejetos orgânicos, misturadores, aquecedores, caixa d'água,

digestor, balão de armazenamento de gás, válvulas e tubulação, queimador de gás, sensores e atuadores e uma central de monitoramento e controle com a aplicação do modelo matemático proposto.

Todas essas partes podem ser monitoradas através de sensores de uma RSSF para garantir a eficácia e eficiência dos processos da DA. Os dados coletados pelos sensores são então transmitidos, para um ponto de coleta de dados onde acontece o processo de análise e controle. A análise e controle comandam os atuadores quando o sistema detectar uma anomalia, acionando um ou mais periféricos que compõem o sistema.

8 CONCLUSÕES

Esta Tese agregou, de forma interdisciplinar, quatro elementos que podem ser usados de forma combinada: um sistema de DA, uma RSSF, um modelo de monitoramento, atuação e controle e um modelo matemático. As variáveis produzidas por um sistema de DA podem ser monitoradas com o uso de uma RSSF. Após a coleta, os dados são submetidos a um método de análise multivariado de dados que possibilita avaliar o estado de funcionamento e propor estratégias de controle e atuação.

Apesar da simplicidade na sua construção, um sistema de DA apresenta uma complexidade muito grande no processo de fermentação. Cada fase precisa ser monitorada e controlada para que se mantenha o equilíbrio entre as fases e um bom desempenho na produção de Biogás.

Considerando a complexidade do sistema de DA e a quantidade de variáveis envolvidas, fazer uso de uma RSSF para coletar os dados das variáveis é viável e justificável. Viável porque já foram relatados casos de aplicação de RSSFs em monitoramento de ambientes rurais. Justificável porque pode agilizar a coleta dos dados, dispensando análises *offline* (e.g., laboratoriais), praticidade no acompanhamento do comportamento dos sistemas de DA e agilidade no processo de tomada de decisão e atuação. .

Em relação aos objetivos propostos para esta Tese, foi possível compreender o funcionamento de um sistema de DA, especialmente na quantidade de periféricos que compõem todo o sistema e que podem ser monitorados por uma RSSF. Também foi possível compreender a forma como uma RSSF pode auxiliar no trabalho de monitorar, controlar e atuar sobre um sistema de DA apoiado por uma aplicação específica para esse ambiente.

Com as análises laboratoriais desenvolvidas, apesar da limitação orçamentária, foi possível ter uma melhor interpretação do digestor e o comportamento da vida microbológica. Esse comportamento deixou claro o quanto ele é sensível às variáveis do meio sob condições reais de funcionamento e a importância destas variáveis serem monitoradas. Entender e interpretar as variáveis envolvidas permitiu modelar o sistema de monitoramento, controle e atuação para sistemas de DA.

Além do sistema de monitoramento, controle e atuação, foi possível desenvolver um modelo matemático para avaliar o desempenho de um sistema de DA e o seu funcionamento, possibilitando simular a produção de Biogás de maneira satisfatória.

A primeira hipótese desta Tese “um modelo matemático proposto tem a capacidade de gerar resultados que expressem de forma satisfatória o comportamento de um sistema de DA” foi confirmada, pois os resultados obtidos após os experimentos realizados com o modelo matemático proposto apresentaram uma diferença média de 4% acima do esperado em produção de Biogás, se comparados com os valores de referência. Apesar de não ser um valor significativamente maior, ele é representativo para expressar o comportamento de um sistema complexo como o de DA.

A segunda hipótese “um modelo de análise multivariada fornece informações suficientes para capturar detalhadamente o desempenho do sistema de DA e conseqüentemente estimar o comportamento futuro deste sistema” foi parcialmente confirmada. Os resultados das amostras microbiológicas analisadas apresentaram uma diversidade de 388 gêneros de bactérias. Alguns desses gêneros não foram identificados pela Biologia, o que limita a ação do modelo. Essa limitação faz referência a que tipos de macro ou micronutrientes são consumidos, que faixas de valores de temperaturas elas podem ser expostas, qual o pH suportado ou o tipo de dejetos que será inserido no sistema. O modelo consegue calcular o comportamento atual do sistema, mas a quantidade de variáveis envolvidas e a sensibilidade do sistema de DA tornam a sua previsibilidade de funcionamento limitada.

A terceira hipótese “os valores gerados pela análise multivariada podem dar suporte a um modelo de monitoramento, controle e atuação” é corroborada pelos resultados do modelo matemático. Ele recebe uma quantidade de valores sensorizados, permitindo afirmar que a alteração das variáveis monitoradas, como a variação de temperatura do sistema de DA, por exemplo, afeta a produção de Biogás. A temperatura é uma variável que deve ser controlada e quando necessário, ter uma atuação efetiva para mantê-la na faixa de valores ideais. Tanto no experimento real quanto nas simulações, a temperatura foi constante.

Entretanto o modelo matemático proposto tem limitações. Um dos pontos fracos do modelo é agrupar as proporções dos elementos intermediários em uma única variável. O ideal seria o desmembramento contemplando todos os elementos (butirato e propionato)

pois cada elemento tem uma função dentro do sistema de DA. Outra limitação é a relação Carbono-Nitrogênio que não está definida como entrada e é uma variável importante para classificar o tipo de dejetos que está sendo inserido no sistema de DA. Para implementar esse refinamento seriam necessárias análises microbiológicas adicionais a um custo financeiro elevado.

Somado às limitações do modelo matemático está a dificuldade para definir os valores ideais para variáveis e constantes de entrada e cálculo de proporções porque grande parte das referências bibliográficas apresentam valores de pesquisas conduzidas em países da Europa e Ásia. Esses países não têm um clima similar a região sul do Brasil ou bovinos sendo alimentados pelos mesmos alimentos, o que pode produzir um tipo de dejetos animal diferente. Os trabalhos desenvolvidos no Brasil em relação aos sistemas de DA são recentes e possuem resultados muito restritos, com foco em dejetos suínos e esgoto sanitário.

Também existem limitações no modelo de monitoramento, controle e atuação baseado em níveis hierárquicos, pois não houve tempo hábil para testar essa hierarquia nas simulações. Essa parte pode dar origem a trabalhos futuros onde a hierarquia da rede fica definida pelo grau de importância do sensor na parte do sistema de DA monitorado (por exemplo, sensor de temperatura do digestor é mais relevante que o volume de água no aquecedor). Diversos protocolos hierárquicos usam estratégias para organizar o funcionamento dos nodos de uma RSSF, mas em geral a consideração ao consumo de energia e não pelas partes monitoradas no meio tem prevalecido.

Apesar das limitações, os resultados desta Tese também deixam espaço para que novos estudos sejam desenvolvidos em sistemas de DA, pois atendem a uma parte significativa no grupo produtor e gerador de energias limpas e renováveis. Eles também tratam o problema crônico da poluição no meio ambiente rural e urbano, podendo ainda auxiliar na gradativa substituição de adubos químicos por adubos orgânicos, gerados como resíduos do processo de biodigestão.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Adam, G. et al. **Upscaling of an electronic nose for completely stirred tank reactor stability monitoring from pilot-scale to real-scale agricultural co-digestion biogas plant**, *Bioresource Technology*, vol. 178, n. 3, pp. 285-296, Feb. 2015.
- [2] Akyildiz, I. et al. **Wireless sensor networks: A survey**, *Computer Networks Journal*, vol. 38, n. 4, pp. 393-422, Mar. 2002.
- [3] Akyildiz, I.; Wang, X. **A Survey on Wireless MESH Networks**, *IEEE Communications Magazine*, vol. 43, n. 9, pp. 523-530, Sep. 2005.
- [4] Alastair, J. et al. **Real time monitoring of a biogas digester with gas chromatography near-infrared spectroscopy, and membrane-inlet mass spectrometry**, *Bioresource Technology*, vol. 102, n. 5, pp. 4098-4103, Mar. 2011.
- [5] Álvarez, J.; Otero, L.; Lema, J. **A methodology for optimizing feed composition for anaerobic co-digestion of agro-industrial wastes**, *Bioresource Technology*, vol. 101, n. 4, pp. 1153-1158, Feb. 2010.
- [6] Ahring, B.; Sandberg, M.; Angelidaki, I. **Volatile fatty acids as indicators of process imbalance in anaerobic digesters**, *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 43, n. 3, pp. 559–565, Jul. 1995.
- [7] Alastair, J. et al. **Evaluation of near infrared spectroscopy and software sensor methods for determination of total alkalinity in anaerobic digesters**, *Bioresource Technology*, vol. 102, n. 5, pp. 4083-4090, Mar. 2011.
- [8] Andrade, M.; Pinto, L. **Classificação de Folhas por Tamanho e Forma Através de Descritores Geométricos e Análise dos Componentes Principais**, In: Workshop em Tratamento de Imagens, pp. 54-61, 2003.
- [9] Andrews, J; Pearson, E. **Kinetics and characteristics of volatile fatty acid production in anaerobic fermentation processes**, *International Journal of Air Water Pollut*, pp 439-461, 1965.
- [10] Apha. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, *American Public Health Association*, 21st ed., pp. 541, Oct. 2005.
- [11] Archer, D.; Harris, J. **Methanogenic bacteria and methane production in various habitats**, *Society for Applied Bacteriology*, Symposium series, vol. 13, pp. 185-223, 1986.

- [12] Arthi, K.; Vijayalakshmi, A.; Vanaja, P. **Critical Event based Multichannel Process Control Monitoring Using WSN for Industrial Applications**. In: *Procedia Engineering – special issue of International Conference on Design and Manufacturing (IConDM)*, vol. 64, pp. 142-148, Nov. 2013.
- [13] Barnert, T.; Piesik, E.; Śliwiński, M. **Real-time simulator of agricultural biogas plant**, *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 108, pp. 1-11, Oct. 2014.
- [14] Bavutti, M. et al. **Thermal Stabilization of Digesters of Biogas Plants by Means of Optimization of the Surface Radiative Properties of the Gasometer Domes**, *Energy Procedia*, vol. 45, pp. 1344-1353, 2014.
- [15] Barros, N.; Scarminio, I.; Bruns, R. **Planejamento e otimização de experimentos**. *Editores da UNICAMP*, 2001, 330 p.
- [16] Bates, S. et al. **Examining the global distribution of dominant archaeal populations in soil**. *The ISME Journal*, vol. 5, pp. 908-917, May 2010.
- [17] Bonastre, A. et al. **In-line monitoring of chemical-analysis processes using Wireless Sensor Networks**, *Trends in Analytical Chemistry (TrAC)*, vol. 34, pp. 111-125, Apr. 2012.
- [18] Braun, P.; Huber, J. **Ammonia toxicity in liquid piggery manure digestion**. *Biotechnology Letters*, vol. 3, n. 4, pp. 159-164, Apr. 1981.
- [19] Brittes, M.; Wille, E. **LEACH-M: Uma estratégia determinística para escolha de líderes de cluster em Redes de Sensores Sem Fio**, In: *Workshop de Redes Dinâmicas e Sistemas P2P*, pp. 43-54, 2009.
- [20] Cadena, R.; Rivera, E.; Herrera, G. **Automatic volumetric gas flow meter for monitoring biogas production from laboratory-scale anaerobic digester**, *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 147, n. 1, pp. 10-14, May 2010.
- [21] Caporaso, J. et al. **QIIME allows analysis of high-throughput community sequencing data**. *Nature Methods*, vol. 7, pp. 335-336, 2010.
- [22] Chadwick, D. et al. **Evaluation of infrared techniques for the assessment of biomass and biofuel quality parameters and conversion technology processes: A review**, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 30, pp. 672-681, Feb. 2014.
- [23] Cheli, F. et al. **Testing feed quality: the artificial senses**, *Feed International*, vol. 18, n. 5, pp. 24-26, 2007.

- [24] Christian, L. et al. **The potential for online monitoring of short-term process dynamics in anaerobic digestion using near-infrared spectroscopy**, *Biomass and Bioenergy*, vol. 48, pp. 224-230, Jan. 2013.
- [25] Cole, J. et al. **Ribosomal Database Project: data and tools for high-throughput rRNA analysis**. *Nucleic Acids Res*, vol. 42, pp. 633-642, 2014.
- [26] Cordeiro, C.; Agrawal, D. **Mobile Ad hoc Networking**, In: *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)*, pp. 125-186, 2002.
- [27] Cuetos, M. et al. **Anaerobic digestion of solid slaughterhouse waste (SHW) at laboratory scale: Influence of co-digestion with the organic fraction of municipal solid waste**, *Biochemical Engineering Journal*, vol. 40, n. 1, pp. 99-106, May. 2008.
- [28] De Santis, T. **GreenGenes, a Chimera-Checked 16S rRNA Gene Database and Workbench Compatible with ARB**. *Appl Environ Microbiol*, vol. 72, pp. 5069-5072, 2006.
- [29] Dotto, B.; Wolf, D. **Biodigestão e produção de biogás utilizando dejetos bovinos** *Disciplinarum Scientia*, vol. 13, n. 1, pp. 13-26, Nov. 2012.
- [30] Edgar, R. **UPARSE: Highly accurate OTU sequences from microbial amplicons reads**. *Nature Methods*, vol. 10, pp. 996-998, 2013.
- [31] Einax, J.; Zwanziger, H.; Geiß, S. **Chemometrics in Environmental Analysis**, Wiley-VCH, 1st ed., pp. 404, Apr. 1997.
- [32] Feitkenhauer, H.; Sachs, J.; Meyer, U. **On-line titration of volatile fatty acids for the process control of anaerobic digestion plants**, *Water Research*, vol. 36, n. 1, pp. 212-218, Jan. 2002.
- [33] Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha (BMELV). **Guia prático do Biogás: Geração e Utilização**, *Fachagentur Nachwachsende Rohstoff e. V. (FNR)*, 5^a ed. pp 236, 2010.
- [34] Gaida, D. et al. **Nonlinear model predictive substrate feed control of biogas plants**, In: *Mediterranean Conference on Control & Automation (MED)*, pp. 652-657, 2012.
- [35] Gajjar, S.; Pradhan, S.; Dasgupta, K. **Wireless Sensor Network: Application led research perspective**, In: *IEEE Recent Advances in Intelligent Computational Systems (RAICS)*, pp. 25-30, 2011.

- [36] García-Gen, S.; Rodríguez, J.; Lema, J. **Optimisation of substrate blends in anaerobic co-digestion using adaptive linear programming**, *Bioresource Technology*, vol. 173, pp. 159-167, Dec. 2014.
- [37] Godin, B. et al. **Biochemical methane potential prediction of plant biomasses: Comparing chemical composition versus near infrared methods and linear versus non-linear models**, *Bioresource Technology*, vol. 175, pp. 382-390, Feb. 2015.
- [38] Groth, A. **Determination of methane emission rates on a biogas plant using data from laser absorption spectrometry**, *Bioresource Technology*, vol. 178, pp. 359-361, 2015.
- [39] Gueguim, K.; Schmidt, S.; Azanack, H. **A web-enabled software for real-time biogas fermentation monitoring – Assessment of dark fermentations for correlations between medium conductivity and biohydrogen evolution**, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, n. 25, pp. 10235-10244, Aug. 2013.
- [40] Heinzelman, W.; Chandrakasan, A.; Balakrishnan, H. **Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks**. In: *Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, pp. 1-10, 2000.
- [41] Heinzelman, W.; Chandrakasan, A.; Balakrishnan, H. **An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks**, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 1, n. 4, pp. 660-670, Jan. 2002.
- [42] Haandel, V., Lettinga, A. **Tratamento Anaeróbio de Esgotos: Um Manual para Regiões de Clima Quente**, *Epgraf*, pp. 240-245, 1994.
- [43] Hernandez, J.; Medina, R.; Hernandez, M. **Instrumentation and design of a supervisory system for an Anaerobic Biodigester**, In: *IEEE International Symposium on Alternative Energies and Energy Quality (SIFAE)*, pp. 1-6, 2012.
- [44] Holm-Nielsen, J. et al. **Transflexive embedded near infrared monitoring for key process intermediates in anaerobic digestion/biogas production**, *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, vol. 15, n. 2, pp. 123-135, Jan. 2007.
- [45] Huang, S.; Chang, A. **Multivariate statistics to evaluate factors affecting hydrogen production in a pilot-scale operation system**, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, Issue 35, pp. 15843-15848, Nov. 2013.
- [46] Husain, A. **Mathematical Models of the Kinetics of Anaerobic Digestion - A Selected Review**, *Biomass and Bioenergy*, vol. 14, pp. 561-571, May-Jun. 1998.

- [47] Insam, H.; Gómez-Brandón, M.; Ascher, J., **Manure-based biogas fermentation residues – Friend or foe of soil fertility?** *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 84, pp. 1-14, Mai. 2015.
- [48] Iyengar, S.; Sastry, S.; Balakrishnan, N. **Wireless Sensor Networks Enabling Ecoinformatics**, *Earth Systems and Environmental Sciences - Encyclopedia of Ecology*, pp. 3812-3820, Aug. 2008.
- [49] Jabłoński, S.; Łukaszewicz, M. **Mathematical modelling of methanogenic reactor start-up: Importance of volatile fatty acids degrading population**, *Bioresource Technology*, vol. 174, pp. 74-80, Dec. 2014.
- [50] Jain, V. et al. **Predictive modeling of an industrial UASB reactor using NARX neural network**, In: *International Renewable Energy Congress (IREC)*, pp. 1-6, 2015.
- [51] Jantsch, T.; Mattiasson, B. **An automated spectrophotometric system for monitoring buffer capacity in anaerobic digestion processes**, *Water Research*, vol. 38, n. 17, pp. 3645-3650, Oct. 2004.
- [52] Junxiang, G.; Jingtao, X. **Fruit Cold Storage Environment Monitoring System Based on Wireless Sensor Network**, *Procedia Engineering*, vol. 15, pp. 3466-3470, Dec. 2011.
- [53] Kanokwan, B. et al. **State indicators for monitoring the anaerobic digestion process**, *Water Research*, vol. 44, n. 20, pp. 5973-5980, Dec. 2010.
- [54] Karagiannidis, A.; Perkoulidis, A. **A multi-criteria ranking of different technologies for the anaerobic digestion for energy recovery of the organic fraction of municipal solid wastes**, *Bioresource Technology*, vol. 100, pp. 2355-2360, Abr. 2009.
- [55] Kerkhoff, S.; et al. **Potencial teórico de produção de biogás e energia elétrica a partir da biomassa residual da suinocultura da região oeste do Paraná**, In: *10º Congresso sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural (Agrener GD)*, pp. 1-10, 2015.
- [56] Kiely, G.; et al. **Physical and mathematical modelling of anaerobic digestion of organic wastes**, *Water Research*, vol. 31, n. 3, pp. 534-540, Mar. 1997.
- [57] Kim, J.; Lee C., **Response of a continuous anaerobic digester to temperature transitions: A critical range for restructuring the microbial community structure and function**, *Water Research*, vol. 89, pp. 241- 251, Feb. 2016.
- [58] Krapf, L. et al. **Transfer of a near infrared spectroscopy laboratory application to an online process analyzer for in situ monitoring of anaerobic digestion**, *Bioresource Technology*, vol. 129, pp. 39-50, Feb. 2013.

- [59] Krapf, L. et al. **The potential for online monitoring of short-term process dynamics in anaerobic digestion using near-infrared spectroscopy**, *Biomass and Bioenergy*, vol. 48, pp. 224-230, Jan. 2013.
- [60] Krause, D.; Hussein, M.; Becker, T. **Online monitoring of bioprocesses via multivariate sensor prediction within swarm intelligence decision making**, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, vol. 145, pp. 48-59, Jul. 2015.
- [61] Lauwers, J. et al. **Mathematical modelling of anaerobic digestion of biomass and waste: Power and limitations**. *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 39, Issue 4, pp. 383-402, Aug. 2013.
- [62] Lebuhn, M; Munk, B.; Effenberger, M. **Agricultural Biogas production in Germany – from practice to microbiology basics**, *Energy Sustainability and Society*, vol. 4, May 2015.
- [63] Naik, L. et al. **Factors determining the stability and productivity of small-scale anaerobic digesters**, *Biomass and Bioenergy*, vol. 70, pp. 51-57, Nov. 2014.
- [64] Lauwers, J. **Mathematical modelling of anaerobic digestion of biomass and waste: Power and limitations**, *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 39, pp. 383-402, 2013.
- [65] Liu, D. et al. **Hydrogen and methane production from household solid waste in the two-stage fermentation process**, *Water Research*, vol. 40, n. 11, pp. 2230-2236, Jun 2006.
- [66] López, M. et al. **Intelligent composting assisted by a wireless sensing network**. *Waste Management*, vol. 34, n. 4, pp. 738-746, Apr. 2014.
- [67] Loscrì, V.; Morabito, G.; Marano, S. **A Two-Level Hierarchy for Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (TL-LEACH)**, In: *Vehicular Technology Conference (VTC)*, pp. 1809-1813, 2005.
- [68] Madsen, M.; Holm-Nielsen, J.; Esbensen, K. **Monitoring of anaerobic digestion processes: A review perspective**, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, n. 6, pp. 3141-3155, Aug. 2011.
- [69] Markowski, M. et al. **Optimizing low-temperature biogas production from biomass by anaerobic digestion**, *Renewable Energy*, vol. 69, pp. 219-225, 2014.
- [70] Massanet-Nicolau, J. et al. **Use of real time gas production data for more accurate comparison of continuous single-stage and two-stage fermentation**, *Bioresource Technology*, vol. 129, pp. 561-567, 2013.

- [71] Micolucci, F. et al. **Automatic process control for stable bio-hythane production in two-phase thermophilic anaerobic digestion of food waste**, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, pp. 17563-17572, 2014.
- [72] Morel, E. et al. **Application of multi-wavelength fluorometry for on-line monitoring of an anaerobic digestion process**, *Water Research*, vol. 38, n. 14-15, pp. 3287-3296, Aug-Sep. 2004.
- [73] Nguyen, D. et al. **Automatic process control in anaerobic digestion technology: A critical review**, *Bioresource Technology*, vol. 193, pp. 513-522, 2015.
- [74] Ning, W.; Naiqian, Z.; Maohua, W. **Wireless sensors in agriculture and food industry recent development and future perspective**, *Computers and Electronics Agriculture*, vol. 50, n. 1, pp. 1-14, Jan. 2006.
- [75] Norris, J.; Ribbons, D. **A roll tube method for cultivation of strict anaerobes Methods in microbiology**, *Academic Press New York*, pp. 117-132, 1967.
- [76] Othman, M.; Shazali, K. **Wireless Sensor Network Applications: A Study in Environment Monitoring System**, *Procedia Engineering – Special issue of International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors (IRIS)*, vol. 41, pp. 1204-1210, Aug. 2012.
- [77] Peris, M.; Escuder-Gilabert, L. **On-line monitoring of food fermentation processes using electronic noses and electronic tongues: A review**, *Analytica Chimica Acta*, vol. 804, pp. 29-36, 2013.
- [78] Pind, P. et al. **Monitoring and control of anaerobic reactors**, *Springer Biomethanation II - Advances in biochemical engineering/biotechnology*, vol. 82, pp. 135-182, 2003.
- [79] Redondo, R. et al. **A web-enabled software for real-time biogas fermentation monitoring - Assessment of dark fermentations for correlations between medium conductivity and biohydrogen evolution**, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, n. 25, pp. 10235-10244, Aug. 2013.
- [80] Rehman, A. et al. **A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture**, *Computer Standards & Interfaces*, vol. 36, n. 2, pp. 263-270, Feb. 2014.
- [81] Sakthidharan, G.; Chitra, S. **A survey on wireless sensor network: An application perspective**, In: *International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI)*, pp. 1-5, 2012.
- [82] Sausen, P. **Gerenciamento integrado de energia e controle de topologia de redes de sensores sem fio**, *Tese de Doutorado em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica*.

- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Campina Grande*, pp. 111, 2008.
- [83] Scheaffer, R et al. **Elementary Survey Sampling**, *Cengage Learning*, 7th ed., pp. 448, 2001.
- [84] Schmieder, R., Edwards, R. **Quality control and preprocessing of metagenomic datasets**. *Bioinformatics* vol. 27, pp. 863-864, 2011.
- [85] Sendjaja, A. et al. **Regression based state space adaptive model of two-phase anaerobic reactor**, *Chemosphere*, vol. 140, pp. 159-166, 2015.
- [86] Silva, J. **Utilização de uma fossa séptica biodigestora para melhoria do Saneamento Rural e desenvolvimento da Agricultura Orgânica**, *Revista Papo Cabeça, Saúde na Roça*, 2^a ed., EMBRAPA, São Carlos, 2007.
- [87] Souza, K. **Modelo de simulação para análise da viabilidade de geração de energia a partir da utilização de biodigestores**, *Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica*, UFMS, 2010.
- [88] Steyer, J. et al. **On-line measurements of COD, TOC, VFA, total and partial alkalinity in anaerobic digestion processes using infrared spectrometry**, *Water Science and Technology*, vol. 45, n. 10, pp. 133-138, 2002.
- [89] Strömberg, S.; Nistor, M.; Liu, J., **Early prediction of Biochemical Methane Potential through statistical and kinetic modelling of initial gas production**, *Bioresource Technology*, vol. 176, pp. 233-241, 2015.
- [90] Suprem, A.; Mahalik, N.; Kim, K. **A review on application of technology systems, standards and interfaces for agriculture and food sector**, *Computer Standards & Interfaces*, vol. 35, n. 4, pp. 355-364, Jun. 2013.
- [91] The University of Adelaide, **A brief history of biogas**, <http://www.adelaide.edu.au/biogas/history>. Acessado em julho de 2015.
- [92] Triolo, J. et Al. **Near Infrared Reflectance Spectroscopy (NIRS) for rapid determination of biochemical methane potential of plant biomass**, *Applied Energy*, vol. 116, pp. 52-57, 2014.
- [93] Varmuza, K., Filzmoser, P. **Introduction to multivariate statistical analysis in chemometrics**, *CRC Press/Taylor & Francis Group*, 2009, 348 pp.
- [94] Viali, L., **Estatística Multivariada**, *Material Didático*, Faculdade de Matemática PUCRS, Porto Alegre, 2004.

- [95] Viali, L., **Estatística Descritiva**, *Material Didático*, Faculdade de Matemática PUCRS, Porto Alegre, 2004.
- [96] Fritz, M.; Berger, P. **Improving the User Experience through Practical Data Analytics: Can you relate? Correlation and simple linear regression**, *Morgan Kaufmann, Chapter 9*, pp. 205-237, 2015.
- [97] Waewsak, C.; Nopharatana, A.; Chaiprasert, P. **Neural-fuzzy control system application for monitoring process response and control of anaerobic hybrid reactor in wastewater treatment and biogas production**, *Journal of Environmental Sciences*, vol. 22, n. 12, pp. 1883-1890, Dec. 2010.
- [98] Ward, A. et al. **Optimization of the anaerobic digestion of agricultural resources**, *Bioresource Technology*, vol. 99, Issue 17, pp. 7928-7940, Nov. 2008.
- [99] Webb, A.; Copsey, K. **Statistical Pattern Recognition**. *John Wiley & Sons*, 3rd ed., 2011, 642p.
- [100] Weir, A. **History of biogas technology**, http://www.cd3wd.com/cd3wd_40/BIOGSHTML/EN/BASICS/HISTORY.HTML. Acessado em julho de 2015.
- [101] Williams, J. et al. **Monitoring methanogenic population dynamics in a full-scale anaerobic digester to facilitate operational management**, *Bioresource Technology*, vol. 140, pp. 234-242, Apr. 2013.
- [102] Wuda, R., Hart, P., Stork, D. **Pattern classification**, *John Wiley & Sons*, 2nd ed., 2001, 680p.
- [103] Yan, Z. et al. **The effects of initial substrate concentration, C/N ratio, and temperature on solid-state anaerobic digestion from composting rice straw**, *Bioresource Technology*, vol. 177, pp. 266-273, Feb. 2015.
- [104] Ye, M. et al. **EECS: An Energy Efficient Clustering Scheme in Wireless Sensor Networks**, In: *IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference (IPCCC)*, pp. 535-540, 2005.
- [105] Zhang, M. et al. **Temporal and spatial variability of soil moisture based on WSN**, *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 58, n. 3-4, pp. 826-833, Aug. 2013.
- [106] Zhou, J; Bruns, M.; Tiedje, J. **DNA recovery from soils of diverse composition**. *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 62, pp. 316-322, 1996.

- [107] Zhu, Y.; Song, J.; Dong, F. **Applications of wireless sensor network in the agriculture environment monitoring**, *Procedia Engineering – Special Issue of International Workshop on Automobile, Power and Energy Engineering (APEE)*, vol. 16, pp. 608-614, Nov. 2011.

10 APÊNDICE A - TABELA COM AS VARIÁVEIS DE ENTRADA DO MODELO MATEMÁTICO

A Tabela 32 apresenta os valores de entrada no modelo matemático proposto no Capítulo 5 e resultados apresentados no Capítulo 7. Cada coluna representa uma linha de valores num total de 86 leituras. A coluna de temperatura interna é a única variável que apresenta mudança de valor, podendo ser 28 °C, 32 °C, 37 °C, 43 °C e 48 °C. A temperatura externa é variável, mas não afeta os resultados de simulação.

Tabela 32 - Valores das variáveis de entrada do modelo matemático.

Leitura	Proteína	Lipídio	Carboidrato	Temperatura interna	Temperatura externa
1	0,210	0,390	0,400	28	20
2	0,208	0,386	0,396	28	21
3	0,205	0,381	0,391	28	23
4	0,203	0,377	0,387	28	22
5	0,200	0,372	0,382	28	25
6	0,198	0,368	0,378	28	22
7	0,195	0,363	0,373	28	19
8	0,193	0,359	0,369	28	17
9	0,190	0,354	0,364	28	18
10	0,188	0,350	0,360	28	16
11	0,185	0,345	0,355	28	19
12	0,183	0,341	0,351	28	22
13	0,180	0,336	0,346	28	23
14	0,178	0,332	0,342	28	26
15	0,175	0,327	0,337	28	28
16	0,173	0,323	0,333	28	30
17	0,170	0,318	0,328	28	29
18	0,168	0,314	0,324	28	28
19	0,165	0,309	0,319	28	27
20	0,163	0,305	0,315	28	27
21	0,160	0,300	0,310	28	26
22	0,158	0,296	0,306	28	28
23	0,155	0,291	0,301	28	25
24	0,153	0,287	0,297	28	28
25	0,150	0,282	0,292	28	29
26	0,148	0,278	0,288	28	30
27	0,145	0,273	0,283	28	32
28	0,143	0,269	0,279	28	31
29	0,140	0,264	0,274	28	31
30	0,138	0,260	0,270	28	32
31	0,135	0,255	0,265	28	32
32	0,133	0,251	0,261	28	33
33	0,130	0,246	0,256	28	35
34	0,128	0,242	0,252	28	34
35	0,125	0,237	0,247	28	35
36	0,123	0,233	0,243	28	36
37	0,120	0,228	0,238	28	34
38	0,118	0,224	0,234	28	33

39	0,115	0,219	0,229	28	32
40	0,113	0,215	0,225	28	33
41	0,110	0,210	0,220	28	32
42	0,108	0,206	0,216	28	34
43	0,105	0,201	0,211	28	37
44	0,103	0,197	0,207	28	36
45	0,100	0,192	0,202	28	34
46	0,098	0,188	0,198	28	32
47	0,095	0,183	0,193	28	19
48	0,093	0,179	0,189	28	22
49	0,090	0,174	0,184	28	23
50	0,088	0,170	0,180	28	26
51	0,085	0,165	0,175	28	28
52	0,083	0,161	0,171	28	30
53	0,080	0,156	0,166	28	29
54	0,078	0,152	0,162	28	28
55	0,075	0,147	0,157	28	27
56	0,073	0,143	0,153	28	27
57	0,070	0,138	0,148	28	26
58	0,068	0,134	0,144	28	28
59	0,065	0,129	0,139	28	25
60	0,063	0,125	0,135	28	28
61	0,060	0,120	0,130	28	29
62	0,058	0,116	0,126	28	27
63	0,055	0,111	0,121	28	26
64	0,053	0,107	0,117	28	23
65	0,050	0,102	0,112	28	20
66	0,048	0,098	0,108	28	21
67	0,045	0,093	0,103	28	23
68	0,043	0,089	0,099	28	22
69	0,040	0,084	0,094	28	25
70	0,038	0,080	0,090	28	22
71	0,035	0,075	0,085	28	19
72	0,033	0,071	0,081	28	17
73	0,030	0,066	0,076	28	18
74	0,028	0,062	0,072	28	16
75	0,025	0,057	0,067	28	19
76	0,023	0,053	0,063	28	22
77	0,020	0,048	0,058	28	23
78	0,018	0,044	0,054	28	26
79	0,015	0,039	0,049	28	28
80	0,013	0,035	0,045	28	30
81	0,010	0,030	0,040	28	29
82	0,008	0,026	0,036	28	28
83	0,005	0,021	0,031	28	30
84	0,003	0,017	0,027	28	30
85	0,001	0,012	0,022	28	30
86	0,012	0,022	0,001	28	30

11 APÊNDICE B – TABELAS DE RESULTADOS DAS REAÇÕES QUÍMICAS POR FAIXA DE VALORES DE TEMPERATURA

Esse apêndice apresenta os cálculos intermediários de cada um dos elementos das fases de Hidrólise, Acidogênese, Acetogênese e Metanogênese. Estes complementam os resultados da Sessão 7.2. As tabelas subsequentes (Tabela 34 à Tabela 38) apresentam os resultados com temperaturas de 28°C, 32°C, 37°C, 43°C e 48°C. O cabeçalho das tabelas segue a identificação de legenda conforme a Tabela 33.

Tabela 33 – Legenda utilizada nas tabelas de resultados.

Coluna	Descrição
Leitura	Momento da leitura dos dados
AcidoTot	Ácidos totais
AcidoAc	Total de ácido totais acumulado
AcucarEs	Açúcar
AcucarAc	Açúcar acumulado
Amino	Aminoácidos
AminoT	Aminoácidos acumulados
InterT	Intermediários totais
AcetatoT	Acetato
AcetatoAc	Acetato acumulado
Hidrogênio	Hidrogênio
HidrogAc	Hidrogênio acumulado
MetanoTo	Metano
MetanoAc	Metano acumulado

Tabela 34 - Resultados da simulação com o sistema ajustado para 28 °C.

Leitura	AcidoTot	AcidoAc	AcucarEs	AcucarAc	Amino	AminoT	Interm	InterT	Acetatot	AcetatoAc	Hidrogenio	HidrogAc	MetanoTo	MetanoAc
1	0,271	0,271	0,361	0,361	0,168	0,168	0,210	0,210	1,480	1,480	1,238	1,238	1,408	1,408
2	0,268	0,540	0,356	0,717	0,166	0,334	0,208	0,418	1,474	2,955	1,236	2,474	1,403	2,810
3	0,265	0,805	0,352	1,069	0,164	0,498	0,205	0,623	1,469	4,423	1,233	3,707	1,398	4,208
4	0,262	1,067	0,348	1,418	0,162	0,660	0,203	0,825	1,463	5,886	1,230	4,936	1,393	5,601
5	0,259	1,326	0,344	1,762	0,160	0,820	0,200	1,025	1,457	7,344	1,227	6,163	1,388	6,990
6	0,256	1,582	0,340	2,102	0,158	0,978	0,198	1,223	1,452	8,796	1,224	7,387	1,383	8,373
7	0,253	1,834	0,336	2,438	0,156	1,134	0,195	1,418	1,446	10,242	1,221	8,608	1,379	9,752
8	0,250	2,084	0,332	2,771	0,154	1,288	0,193	1,610	1,440	11,682	1,218	9,827	1,374	11,125
9	0,246	2,330	0,328	3,099	0,152	1,440	0,190	1,800	1,435	13,116	1,215	11,042	1,369	12,494
10	0,243	2,573	0,324	3,423	0,150	1,590	0,188	1,988	1,429	14,545	1,213	12,255	1,364	13,858
11	0,240	2,814	0,320	3,742	0,148	1,738	0,185	2,173	1,423	15,968	1,210	13,465	1,359	15,217
12	0,237	3,051	0,316	4,058	0,146	1,884	0,183	2,355	1,417	17,386	1,207	14,671	1,354	16,572
13	0,234	3,284	0,312	4,370	0,144	2,028	0,180	2,535	1,412	18,798	1,204	15,875	1,349	17,921
14	0,231	3,515	0,308	4,678	0,142	2,170	0,178	2,713	1,406	20,204	1,201	17,076	1,345	19,266
15	0,228	3,743	0,304	4,981	0,140	2,310	0,175	2,888	1,400	21,604	1,198	18,275	1,340	20,605
16	0,224	3,967	0,300	5,281	0,138	2,448	0,173	3,060	1,395	22,999	1,195	19,470	1,335	21,940
17	0,221	4,189	0,295	5,576	0,136	2,584	0,170	3,230	1,389	24,388	1,193	20,663	1,330	23,270
18	0,218	4,407	0,291	5,868	0,134	2,718	0,168	3,398	1,383	25,771	1,190	21,852	1,325	24,595
19	0,215	4,622	0,287	6,155	0,132	2,850	0,165	3,563	1,378	27,149	1,187	23,039	1,320	25,916
20	0,212	4,834	0,283	6,438	0,130	2,980	0,163	3,725	1,372	28,520	1,184	24,223	1,315	27,231
21	0,209	5,043	0,279	6,717	0,128	3,108	0,160	3,885	1,366	29,887	1,181	25,404	1,311	28,542
22	0,206	5,248	0,275	6,993	0,126	3,234	0,158	4,043	1,360	31,247	1,178	26,582	1,306	29,848
23	0,203	5,451	0,271	7,264	0,124	3,358	0,155	4,198	1,355	32,602	1,175	27,757	1,301	31,148
24	0,199	5,650	0,267	7,531	0,122	3,480	0,153	4,350	1,349	33,951	1,172	28,930	1,296	32,445
25	0,196	5,846	0,263	7,794	0,120	3,600	0,150	4,500	1,343	35,294	1,170	30,099	1,291	33,736
26	0,193	6,040	0,259	8,052	0,118	3,718	0,148	4,648	1,338	36,632	1,167	31,266	1,286	35,022
27	0,190	6,230	0,255	8,307	0,116	3,834	0,145	4,793	1,332	37,964	1,164	32,430	1,282	36,304
28	0,187	6,416	0,251	8,558	0,114	3,948	0,143	4,935	1,326	39,290	1,161	33,591	1,277	37,580
29	0,184	6,600	0,247	8,805	0,112	4,060	0,140	5,075	1,321	40,611	1,158	34,749	1,272	38,852
30	0,181	6,781	0,243	9,047	0,110	4,170	0,138	5,213	1,315	41,925	1,155	35,904	1,267	40,119
31	0,177	6,958	0,239	9,286	0,108	4,278	0,135	5,348	1,309	43,235	1,152	37,057	1,262	41,381
32	0,174	7,133	0,234	9,520	0,106	4,384	0,133	5,480	1,303	44,538	1,150	38,206	1,257	42,638

33	0,171	7,304	0,230	9,751	0,104	4,488	0,130	5,610	1,298	45,836	1,147	39,353	1,252	43,891
34	0,168	7,472	0,226	9,977	0,102	4,590	0,128	5,738	1,292	47,128	1,144	40,497	1,248	45,138
35	0,165	7,637	0,222	10,199	0,100	4,690	0,125	5,863	1,286	48,414	1,141	41,637	1,243	46,381
36	0,162	7,799	0,218	10,417	0,098	4,788	0,123	5,985	1,281	49,695	1,138	42,775	1,238	47,619
37	0,159	7,957	0,214	10,631	0,096	4,884	0,120	6,105	1,275	50,970	1,135	43,911	1,233	48,852
38	0,156	8,113	0,210	10,841	0,094	4,978	0,118	6,223	1,269	52,239	1,132	45,043	1,228	50,080
39	0,152	8,265	0,206	11,047	0,092	5,070	0,115	6,338	1,264	53,503	1,129	46,172	1,223	51,304
40	0,149	8,415	0,202	11,249	0,090	5,160	0,113	6,450	1,258	54,760	1,127	47,299	1,218	52,522
41	0,146	8,561	0,198	11,447	0,088	5,248	0,110	6,560	1,252	56,013	1,124	48,423	1,214	53,736
42	0,143	8,704	0,194	11,641	0,086	5,334	0,108	6,668	1,246	57,259	1,121	49,543	1,209	54,944
43	0,140	8,844	0,190	11,831	0,084	5,418	0,105	6,773	1,241	58,500	1,118	50,661	1,204	56,148
44	0,137	8,980	0,186	12,016	0,082	5,500	0,103	6,875	1,235	59,735	1,115	51,777	1,199	57,347
45	0,134	9,114	0,182	12,198	0,080	5,580	0,100	6,975	1,229	60,964	1,112	52,889	1,194	58,542
46	0,131	9,245	0,178	12,375	0,078	5,658	0,098	7,073	1,224	62,188	1,109	53,998	1,189	59,731
47	0,127	9,372	0,173	12,549	0,076	5,734	0,095	7,168	1,218	63,406	1,106	55,105	1,185	60,915
48	0,124	9,496	0,169	12,718	0,074	5,808	0,093	7,260	1,212	64,618	1,104	56,208	1,180	62,095
49	0,121	9,617	0,165	12,883	0,072	5,880	0,090	7,350	1,207	65,824	1,101	57,309	1,175	63,270
50	0,118	9,735	0,161	13,045	0,070	5,950	0,088	7,438	1,201	67,025	1,098	58,407	1,170	64,440
51	0,115	9,850	0,157	13,202	0,068	6,018	0,085	7,523	1,195	68,220	1,095	59,502	1,165	65,605
52	0,112	9,962	0,153	13,355	0,066	6,084	0,083	7,605	1,189	69,410	1,092	60,594	1,160	66,765
53	0,109	10,070	0,149	13,504	0,064	6,148	0,080	7,685	1,184	70,594	1,089	61,683	1,155	67,921
54	0,105	10,176	0,145	13,649	0,062	6,210	0,078	7,763	1,178	71,772	1,086	62,770	1,151	69,071
55	0,102	10,278	0,141	13,790	0,060	6,270	0,075	7,838	1,172	72,944	1,084	63,853	1,146	70,217
56	0,099	10,377	0,137	13,927	0,058	6,328	0,073	7,910	1,167	74,111	1,081	64,934	1,141	71,358
57	0,096	10,473	0,133	14,059	0,056	6,384	0,070	7,980	1,161	75,272	1,078	66,012	1,136	72,494
58	0,093	10,566	0,129	14,188	0,054	6,438	0,068	8,048	1,155	76,427	1,075	67,087	1,131	73,625
59	0,090	10,656	0,125	14,313	0,052	6,490	0,065	8,113	1,150	77,576	1,072	68,159	1,126	74,751
60	0,087	10,743	0,121	14,433	0,050	6,540	0,063	8,175	1,144	78,720	1,069	69,228	1,121	75,873
61	0,084	10,826	0,116	14,550	0,048	6,588	0,060	8,235	1,138	79,858	1,066	70,294	1,117	76,989
62	0,080	10,907	0,112	14,662	0,046	6,634	0,058	8,293	1,132	80,991	1,063	71,358	1,112	78,101
63	0,077	10,984	0,108	14,770	0,044	6,678	0,055	8,348	1,127	82,117	1,061	72,419	1,107	79,208
64	0,074	11,058	0,104	14,875	0,042	6,720	0,053	8,400	1,121	83,238	1,058	73,476	1,102	80,310
65	0,071	11,129	0,100	14,975	0,040	6,760	0,050	8,450	1,115	84,354	1,055	74,531	1,097	81,407
66	0,068	11,197	0,096	15,071	0,038	6,798	0,048	8,498	1,110	85,463	1,052	75,583	1,092	82,499
67	0,065	11,262	0,092	15,163	0,036	6,834	0,045	8,543	1,104	86,567	1,049	76,632	1,087	83,587

68	0,062	11,323	0,088	15,251	0,034	6,868	0,043	8,585	1,098	87,666	1,046	77,679	1,083	84,669
69	0,058	11,382	0,084	15,335	0,032	6,900	0,040	8,625	1,093	88,758	1,043	78,722	1,078	85,747
70	0,055	11,437	0,080	15,415	0,030	6,930	0,038	8,663	1,087	89,845	1,041	79,763	1,073	86,820
71	0,052	11,489	0,076	15,491	0,028	6,958	0,035	8,698	1,081	90,926	1,038	80,800	1,068	87,888
72	0,049	11,538	0,072	15,563	0,026	6,984	0,033	8,730	1,075	92,001	1,035	81,835	1,063	88,952
73	0,046	11,584	0,068	15,630	0,024	7,008	0,030	8,760	1,070	93,071	1,032	82,867	1,058	90,010
74	0,043	11,627	0,064	15,694	0,022	7,030	0,028	8,788	1,064	94,135	1,029	83,896	1,054	91,063
75	0,040	11,667	0,060	15,753	0,020	7,050	0,025	8,813	1,058	95,193	1,026	84,922	1,049	92,112
76	0,037	11,703	0,055	15,809	0,018	7,068	0,023	8,835	1,053	96,246	1,023	85,946	1,044	93,156
77	0,033	11,737	0,051	15,860	0,016	7,084	0,020	8,855	1,047	97,293	1,020	86,966	1,039	94,195
78	0,030	11,767	0,047	15,907	0,014	7,098	0,018	8,873	1,041	98,334	1,018	87,984	1,034	95,229
79	0,027	11,794	0,043	15,951	0,012	7,110	0,015	8,888	1,036	99,370	1,015	88,998	1,029	96,258
80	0,024	11,818	0,039	15,990	0,010	7,120	0,013	8,900	1,030	100,400	1,012	90,010	1,024	97,283
81	0,021	11,839	0,035	16,025	0,008	7,128	0,010	8,910	1,024	101,424	1,009	91,019	1,020	98,302
82	0,018	11,857	0,031	16,056	0,006	7,134	0,008	8,918	1,018	102,442	1,006	92,026	1,015	99,317
83	0,015	11,871	0,027	16,083	0,004	7,138	0,005	8,923	1,013	103,455	1,003	93,029	1,010	100,327
84	0,011	11,883	0,023	16,106	0,002	7,140	0,003	8,925	1,007	104,462	1,000	94,029	1,005	101,332
85	0,008	11,891	0,019	16,125	0,001	7,141	0,001	8,926	1,003	105,464	0,998	95,027	1,001	102,333
86	0,015	11,906	0,003	16,128	0,010	7,150	0,012	8,938	1,008	106,472	0,997	96,024	1,004	103,338

Tabela 35 - Resultados da simulação com o sistema ajustado para 32 °C.

Leitura	AcidoTot	AcidoAc	AcucarEs.	AcucarAc.	Amino.	AminoT.	Interm.	InterT.	Acetatot	AcetatoAc	Hidrogenio	HidrogAc	MetanoTo	MetanoAc
1	0,339	0,339	0,451	0,451	0,210	0,210	0,210	0,210	1,567	1,567	1,284	1,284	1,482	1,480
2	0,335	0,675	0,446	0,896	0,208	0,418	0,208	0,418	1,560	3,127	1,280	2,564	1,476	2,960
3	0,332	1,006	0,441	1,337	0,205	0,623	0,205	0,623	1,554	4,681	1,277	3,841	1,471	4,430
4	0,328	1,334	0,435	1,772	0,203	0,825	0,203	0,825	1,547	6,228	1,274	5,114	1,465	5,890
5	0,324	1,657	0,430	2,203	0,200	1,025	0,200	1,025	1,540	7,768	1,270	6,385	1,459	7,350
6	0,320	1,977	0,425	2,628	0,198	1,223	0,198	1,223	1,534	9,302	1,267	7,651	1,454	8,810
7	0,316	2,293	0,420	3,048	0,195	1,418	0,195	1,418	1,527	10,828	1,263	8,915	1,448	10,250
8	0,312	2,605	0,415	3,463	0,193	1,610	0,193	1,610	1,520	12,349	1,260	10,175	1,442	11,700
9	0,308	2,913	0,410	3,873	0,190	1,800	0,190	1,800	1,513	13,862	1,257	11,431	1,436	13,130
10	0,304	3,217	0,405	4,278	0,188	1,988	0,188	1,988	1,507	15,369	1,253	12,685	1,431	14,560
11	0,300	3,517	0,400	4,678	0,185	2,173	0,185	2,173	1,500	16,869	1,250	13,934	1,425	15,990
12	0,296	3,813	0,395	5,073	0,183	2,355	0,183	2,355	1,493	18,362	1,247	15,181	1,419	17,410
13	0,292	4,106	0,390	5,463	0,180	2,535	0,180	2,535	1,487	19,849	1,243	16,424	1,414	18,820
14	0,288	4,394	0,385	5,847	0,178	2,713	0,178	2,713	1,480	21,329	1,240	17,664	1,408	20,230
15	0,285	4,678	0,380	6,227	0,175	2,888	0,175	2,888	1,473	22,802	1,236	18,900	1,402	21,630
16	0,281	4,959	0,374	6,601	0,173	3,060	0,173	3,060	1,467	24,268	1,233	20,133	1,396	23,030
17	0,277	5,236	0,369	6,970	0,170	3,230	0,170	3,230	1,460	25,728	1,230	21,362	1,391	24,420
18	0,273	5,508	0,364	7,335	0,168	3,398	0,168	3,398	1,453	27,181	1,226	22,589	1,385	25,800
19	0,269	5,777	0,359	7,694	0,165	3,563	0,165	3,563	1,446	28,628	1,223	23,811	1,379	27,180
20	0,265	6,042	0,354	8,048	0,163	3,725	0,163	3,725	1,440	30,067	1,219	25,031	1,374	28,560
21	0,261	6,303	0,349	8,397	0,160	3,885	0,160	3,885	1,433	31,500	1,216	26,247	1,368	29,920
22	0,257	6,560	0,344	8,741	0,158	4,043	0,158	4,043	1,426	32,927	1,213	27,459	1,362	31,290
23	0,253	6,813	0,339	9,080	0,155	4,198	0,155	4,198	1,420	34,346	1,209	28,669	1,357	32,640
24	0,249	7,063	0,334	9,413	0,153	4,350	0,153	4,350	1,413	35,759	1,206	29,874	1,351	33,990
25	0,245	7,308	0,329	9,742	0,150	4,500	0,150	4,500	1,406	37,165	1,203	31,077	1,345	35,340
26	0,241	7,549	0,324	10,066	0,148	4,648	0,148	4,648	1,400	38,565	1,199	32,276	1,339	36,680
27	0,238	7,787	0,319	10,384	0,145	4,793	0,145	4,793	1,393	39,958	1,196	33,472	1,334	38,010
28	0,234	8,021	0,313	10,698	0,143	4,935	0,143	4,935	1,386	41,344	1,192	34,664	1,328	39,340
29	0,230	8,250	0,308	11,006	0,140	5,075	0,140	5,075	1,379	42,723	1,189	35,853	1,322	40,660
30	0,226	8,476	0,303	11,309	0,138	5,213	0,138	5,213	1,373	44,096	1,186	37,038	1,317	41,980
31	0,222	8,698	0,298	11,607	0,135	5,348	0,135	5,348	1,366	45,462	1,182	38,221	1,311	43,290

32	0,218	8,916	0,293	11,900	0,133	5,480	0,133	5,480	1,359	46,821	1,179	39,399	1,305	44,590
33	0,214	9,130	0,288	12,188	0,130	5,610	0,130	5,610	1,353	48,174	1,175	40,575	1,299	45,890
34	0,210	9,340	0,283	12,471	0,128	5,738	0,128	5,738	1,346	49,519	1,172	41,747	1,294	47,190
35	0,206	9,546	0,278	12,749	0,125	5,863	0,125	5,863	1,339	50,859	1,169	42,915	1,288	48,480
36	0,202	9,748	0,273	13,022	0,123	5,985	0,123	5,985	1,333	52,191	1,165	44,081	1,282	49,760
37	0,198	9,947	0,268	13,289	0,120	6,105	0,120	6,105	1,326	53,517	1,162	45,242	1,277	51,030
38	0,194	10,141	0,263	13,552	0,118	6,223	0,118	6,223	1,319	54,836	1,159	46,401	1,271	52,310
39	0,191	10,332	0,258	13,809	0,115	6,338	0,115	6,338	1,312	56,148	1,155	47,556	1,265	53,570
40	0,187	10,518	0,252	14,062	0,113	6,450	0,113	6,450	1,306	57,454	1,152	48,708	1,260	54,830
41	0,183	10,701	0,247	14,309	0,110	6,560	0,110	6,560	1,299	58,753	1,148	49,856	1,254	56,080
42	0,179	10,880	0,242	14,551	0,108	6,668	0,108	6,668	1,292	60,045	1,145	51,001	1,248	57,330
43	0,175	11,055	0,237	14,788	0,105	6,773	0,105	6,773	1,286	61,331	1,142	52,143	1,242	58,570
44	0,171	11,226	0,232	15,020	0,103	6,875	0,103	6,875	1,279	62,610	1,138	53,281	1,237	59,810
45	0,167	11,393	0,227	15,247	0,100	6,975	0,100	6,975	1,272	63,882	1,135	54,415	1,231	61,040
46	0,163	11,556	0,222	15,469	0,098	7,073	0,098	7,073	1,266	65,147	1,131	55,547	1,225	62,270
47	0,159	11,715	0,217	15,686	0,095	7,168	0,095	7,168	1,259	66,406	1,128	56,675	1,220	63,490
48	0,155	11,870	0,212	15,898	0,093	7,260	0,093	7,260	1,252	67,658	1,125	57,800	1,214	64,700
49	0,151	12,022	0,207	16,104	0,090	7,350	0,090	7,350	1,245	68,904	1,121	58,921	1,208	65,910
50	0,148	12,169	0,202	16,306	0,088	7,438	0,088	7,438	1,239	70,142	1,118	60,039	1,202	67,110
51	0,144	12,313	0,197	16,502	0,085	7,523	0,085	7,523	1,232	71,374	1,115	61,153	1,197	68,310
52	0,140	12,452	0,191	16,694	0,083	7,605	0,083	7,605	1,225	72,600	1,111	62,264	1,191	69,500
53	0,136	12,588	0,186	16,880	0,080	7,685	0,080	7,685	1,219	73,818	1,108	63,372	1,185	70,680
54	0,132	12,720	0,181	17,061	0,078	7,763	0,078	7,763	1,212	75,030	1,104	64,476	1,180	71,860
55	0,128	12,848	0,176	17,237	0,075	7,838	0,075	7,838	1,205	76,235	1,101	65,577	1,174	73,040
56	0,124	12,972	0,171	17,408	0,073	7,910	0,073	7,910	1,199	77,434	1,098	66,675	1,168	74,210
57	0,120	13,092	0,166	17,574	0,070	7,980	0,070	7,980	1,192	78,625	1,094	67,769	1,163	75,370
58	0,116	13,208	0,161	17,735	0,068	8,048	0,068	8,048	1,185	79,810	1,091	68,860	1,157	76,530
59	0,112	13,320	0,156	17,891	0,065	8,113	0,065	8,113	1,178	80,989	1,087	69,947	1,151	77,680
60	0,108	13,429	0,151	18,042	0,063	8,175	0,063	8,175	1,172	82,160	1,084	71,031	1,145	78,820
61	0,104	13,533	0,146	18,187	0,060	8,235	0,060	8,235	1,165	83,325	1,081	72,112	1,140	79,960
62	0,101	13,633	0,141	18,328	0,058	8,293	0,058	8,293	1,158	84,484	1,077	73,189	1,134	81,100
63	0,097	13,730	0,135	18,463	0,055	8,348	0,055	8,348	1,152	85,635	1,074	74,263	1,128	82,220
64	0,093	13,823	0,130	18,593	0,053	8,400	0,053	8,400	1,145	86,780	1,071	75,333	1,123	83,350

65	0,089	13,911	0,125	18,719	0,050	8,450	0,050	8,450	1,138	87,918	1,067	76,401	1,117	84,460
66	0,085	13,996	0,120	18,839	0,048	8,498	0,048	8,498	1,132	89,050	1,064	77,464	1,111	85,570
67	0,081	14,077	0,115	18,954	0,045	8,543	0,045	8,543	1,125	90,174	1,060	78,525	1,105	86,680
68	0,077	14,154	0,110	19,064	0,043	8,585	0,043	8,585	1,118	91,293	1,057	79,582	1,100	87,780
69	0,073	14,227	0,105	19,169	0,040	8,625	0,040	8,625	1,111	92,404	1,054	80,635	1,094	88,870
70	0,069	14,296	0,100	19,269	0,038	8,663	0,038	8,663	1,105	93,509	1,050	81,685	1,088	89,960
71	0,065	14,362	0,095	19,364	0,035	8,698	0,035	8,698	1,098	94,606	1,047	82,732	1,083	91,040
72	0,061	14,423	0,090	19,453	0,033	8,730	0,033	8,730	1,091	95,698	1,043	83,776	1,077	92,120
73	0,057	14,480	0,085	19,538	0,030	8,760	0,030	8,760	1,085	96,782	1,040	84,816	1,071	93,190
74	0,054	14,534	0,080	19,617	0,028	8,788	0,028	8,788	1,078	97,860	1,037	85,852	1,066	94,260
75	0,050	14,583	0,074	19,692	0,025	8,813	0,025	8,813	1,071	98,931	1,033	86,885	1,060	95,320
76	0,046	14,629	0,069	19,761	0,023	8,835	0,023	8,835	1,064	99,996	1,030	87,915	1,054	96,370
77	0,042	14,671	0,064	19,825	0,020	8,855	0,020	8,855	1,058	101,053	1,027	88,942	1,048	97,420
78	0,038	14,709	0,059	19,884	0,018	8,873	0,018	8,873	1,051	102,105	1,023	89,965	1,043	98,460
79	0,034	14,743	0,054	19,938	0,015	8,888	0,015	8,888	1,044	103,149	1,020	90,985	1,037	99,500
80	0,030	14,773	0,049	19,987	0,013	8,900	0,013	8,900	1,038	104,187	1,016	92,001	1,031	100,530
81	0,026	14,799	0,044	20,031	0,010	8,910	0,010	8,910	1,031	105,217	1,013	93,014	1,026	101,560
82	0,022	14,821	0,039	20,070	0,008	8,918	0,008	8,918	1,024	106,242	1,010	94,024	1,020	102,580
83	0,018	14,839	0,034	20,104	0,005	8,923	0,005	8,923	1,018	107,259	1,006	95,030	1,014	103,590
84	0,014	14,854	0,029	20,133	0,003	8,925	0,003	8,925	1,011	108,270	1,003	96,033	1,008	104,600
85	0,010	14,864	0,024	20,156	0,001	8,926	0,001	8,926	1,006	109,276	1,000	97,033	1,004	105,600
86	0,019	14,883	0,004	20,160	0,012	8,938	0,012	8,938	1,010	110,285	0,998	98,031	1,006	106,610

Tabela 36 - Resultados da simulação com o sistema ajustado para 37 °C.

Leitura	AcidoTot	AcidoAc	AcucarEs	AcucarAc	Amino	AminoT	Interm	InterT	Acetatot	AcetatoAc	Hidrogenio	HidrogAc	MetanoTo	MetanoAc
1	0,400	0,400	0,532	0,532	0,248	0,248	0,210	0,210	1,645	1,645	1,324	1,324	1,549	1,550
2	0,396	0,796	0,526	1,058	0,245	0,493	0,208	0,418	1,638	3,283	1,321	2,645	1,543	3,090
3	0,391	1,187	0,520	1,578	0,242	0,735	0,205	0,623	1,630	4,913	1,317	3,962	1,536	4,630
4	0,387	1,574	0,514	2,091	0,239	0,974	0,203	0,825	1,622	6,535	1,313	5,275	1,530	6,160
5	0,382	1,956	0,508	2,599	0,236	1,210	0,200	1,025	1,615	8,150	1,309	6,584	1,523	7,680
6	0,377	2,333	0,502	3,101	0,233	1,443	0,198	1,223	1,607	9,757	1,305	7,889	1,517	9,200
7	0,373	2,706	0,496	3,597	0,230	1,673	0,195	1,418	1,600	11,357	1,301	9,190	1,510	10,710
8	0,368	3,074	0,490	4,087	0,227	1,900	0,193	1,610	1,592	12,949	1,298	10,488	1,504	12,210
9	0,363	3,437	0,484	4,570	0,224	2,124	0,190	1,800	1,584	14,533	1,294	11,781	1,497	13,710
10	0,359	3,796	0,478	5,048	0,221	2,345	0,188	1,988	1,577	16,110	1,290	13,071	1,491	15,200
11	0,354	4,150	0,472	5,520	0,218	2,564	0,185	2,173	1,569	17,679	1,286	14,357	1,484	16,680
12	0,350	4,500	0,466	5,986	0,215	2,779	0,183	2,355	1,562	19,241	1,282	15,639	1,478	18,160
13	0,345	4,845	0,460	6,446	0,212	2,991	0,180	2,535	1,554	20,794	1,278	16,918	1,471	19,630
14	0,340	5,185	0,454	6,900	0,209	3,201	0,178	2,713	1,546	22,341	1,274	18,192	1,465	21,100
15	0,336	5,521	0,448	7,347	0,207	3,407	0,175	2,888	1,539	23,880	1,271	19,463	1,458	22,550
16	0,331	5,852	0,442	7,789	0,204	3,611	0,173	3,060	1,531	25,411	1,267	20,729	1,452	24,010
17	0,327	6,178	0,436	8,225	0,201	3,811	0,170	3,230	1,524	26,934	1,263	21,992	1,445	25,450
18	0,322	6,500	0,430	8,655	0,198	4,009	0,168	3,398	1,516	28,450	1,259	23,251	1,439	26,890
19	0,317	6,817	0,424	9,079	0,195	4,204	0,165	3,563	1,508	29,959	1,255	24,506	1,432	28,320
20	0,313	7,130	0,418	9,497	0,192	4,396	0,163	3,725	1,501	31,459	1,251	25,758	1,426	29,750
21	0,308	7,438	0,412	9,908	0,189	4,584	0,160	3,885	1,493	32,953	1,248	27,005	1,419	31,170
22	0,303	7,741	0,406	10,314	0,186	4,770	0,158	4,043	1,486	34,438	1,244	28,249	1,413	32,580
23	0,299	8,040	0,400	10,714	0,183	4,953	0,155	4,198	1,478	35,916	1,240	29,488	1,407	33,990
24	0,294	8,334	0,394	11,108	0,180	5,133	0,153	4,350	1,470	37,386	1,236	30,724	1,400	35,390
25	0,290	8,623	0,388	11,496	0,177	5,310	0,150	4,500	1,463	38,849	1,232	31,956	1,394	36,780
26	0,285	8,908	0,382	11,877	0,174	5,484	0,148	4,648	1,455	40,304	1,228	33,185	1,387	38,170
27	0,280	9,189	0,376	12,253	0,171	5,655	0,145	4,793	1,448	41,752	1,224	34,409	1,381	39,550
28	0,276	9,464	0,370	12,623	0,168	5,823	0,143	4,935	1,440	43,192	1,221	35,630	1,374	40,920
29	0,271	9,735	0,364	12,987	0,165	5,989	0,140	5,075	1,432	44,624	1,217	36,846	1,368	42,290
30	0,266	10,002	0,358	13,345	0,162	6,151	0,138	5,213	1,425	46,049	1,213	38,059	1,361	43,650
31	0,262	10,263	0,352	13,697	0,159	6,310	0,135	5,348	1,417	47,466	1,209	39,268	1,355	45,010
32	0,257	10,521	0,346	14,042	0,156	6,466	0,133	5,480	1,410	48,876	1,205	40,473	1,348	46,350

33	0,253	10,773	0,340	14,382	0,153	6,620	0,130	5,610	1,402	50,278	1,201	41,674	1,342	47,700
34	0,248	11,021	0,334	14,716	0,150	6,770	0,128	5,738	1,394	51,672	1,197	42,872	1,335	49,030
35	0,243	11,264	0,328	15,044	0,148	6,918	0,125	5,863	1,387	53,059	1,194	44,065	1,329	50,360
36	0,239	11,503	0,322	15,366	0,145	7,062	0,123	5,985	1,379	54,438	1,190	45,255	1,322	51,680
37	0,234	11,737	0,316	15,681	0,142	7,204	0,120	6,105	1,372	55,809	1,186	46,441	1,316	53,000
38	0,229	11,967	0,310	15,991	0,139	7,343	0,118	6,223	1,364	57,173	1,182	47,623	1,309	54,310
39	0,225	12,191	0,304	16,295	0,136	7,478	0,115	6,338	1,356	58,530	1,178	48,801	1,303	55,610
40	0,220	12,412	0,298	16,593	0,133	7,611	0,113	6,450	1,349	59,878	1,174	49,976	1,296	56,910
41	0,216	12,627	0,292	16,885	0,130	7,741	0,110	6,560	1,341	61,219	1,171	51,146	1,290	58,200
42	0,211	12,838	0,286	17,170	0,127	7,868	0,108	6,668	1,334	62,553	1,167	52,313	1,284	59,480
43	0,206	13,045	0,280	17,450	0,124	7,992	0,105	6,773	1,326	63,879	1,163	53,476	1,277	60,760
44	0,202	13,246	0,274	17,724	0,121	8,113	0,103	6,875	1,318	65,197	1,159	54,634	1,271	62,030
45	0,197	13,443	0,268	17,992	0,118	8,231	0,100	6,975	1,311	66,508	1,155	55,790	1,264	63,290
46	0,193	13,636	0,262	18,254	0,115	8,346	0,098	7,073	1,303	67,811	1,151	56,941	1,258	64,550
47	0,188	13,824	0,256	18,510	0,112	8,458	0,095	7,168	1,296	69,107	1,147	58,088	1,251	65,800
48	0,183	14,007	0,250	18,759	0,109	8,567	0,093	7,260	1,288	70,395	1,144	59,232	1,245	67,050
49	0,179	14,186	0,244	19,003	0,106	8,673	0,090	7,350	1,280	71,675	1,140	60,371	1,238	68,280
50	0,174	14,360	0,238	19,241	0,103	8,776	0,088	7,438	1,273	72,948	1,136	61,507	1,232	69,520
51	0,169	14,529	0,232	19,473	0,100	8,877	0,085	7,523	1,265	74,213	1,132	62,639	1,225	70,740
52	0,165	14,694	0,226	19,699	0,097	8,974	0,083	7,605	1,258	75,470	1,128	63,767	1,219	71,960
53	0,160	14,854	0,220	19,918	0,094	9,068	0,080	7,685	1,250	76,720	1,124	64,892	1,212	73,170
54	0,156	15,009	0,214	20,132	0,092	9,160	0,078	7,763	1,242	77,962	1,120	66,012	1,206	74,380
55	0,151	15,160	0,208	20,340	0,089	9,248	0,075	7,838	1,235	79,197	1,117	67,129	1,199	75,580
56	0,146	15,307	0,202	20,542	0,086	9,334	0,073	7,910	1,227	80,424	1,113	68,241	1,193	76,770
57	0,142	15,448	0,196	20,738	0,083	9,416	0,070	7,980	1,220	81,644	1,109	69,350	1,186	77,960
58	0,137	15,585	0,190	20,927	0,080	9,496	0,068	8,048	1,212	82,856	1,105	70,455	1,180	79,140
59	0,132	15,718	0,184	21,111	0,077	9,573	0,065	8,113	1,204	84,060	1,101	71,557	1,173	80,310
60	0,128	15,846	0,178	21,289	0,074	9,647	0,063	8,175	1,197	85,257	1,097	72,654	1,167	81,480
61	0,123	15,969	0,172	21,461	0,071	9,717	0,060	8,235	1,189	86,446	1,094	73,747	1,160	82,640
62	0,119	16,087	0,166	21,627	0,068	9,785	0,058	8,293	1,182	87,627	1,090	74,837	1,154	83,790
63	0,114	16,201	0,160	21,787	0,065	9,850	0,055	8,348	1,174	88,801	1,086	75,923	1,148	84,940
64	0,109	16,311	0,154	21,940	0,062	9,912	0,053	8,400	1,166	89,968	1,082	77,005	1,141	86,080
65	0,105	16,415	0,148	22,088	0,059	9,971	0,050	8,450	1,159	91,126	1,078	78,083	1,135	87,210
66	0,100	16,515	0,142	22,230	0,056	10,027	0,048	8,498	1,151	92,277	1,074	79,157	1,128	88,340
67	0,096	16,611	0,136	22,366	0,053	10,080	0,045	8,543	1,144	93,421	1,070	80,228	1,122	89,460

68	0,091	16,702	0,130	22,496	0,050	10,130	0,043	8,585	1,136	94,557	1,067	81,294	1,115	90,580
69	0,086	16,788	0,124	22,619	0,047	10,178	0,040	8,625	1,128	95,685	1,063	82,357	1,109	91,690
70	0,082	16,870	0,118	22,737	0,044	10,222	0,038	8,663	1,121	96,806	1,059	83,416	1,102	92,790
71	0,077	16,947	0,112	22,849	0,041	10,263	0,035	8,698	1,113	97,919	1,055	84,471	1,096	93,880
72	0,072	17,019	0,106	22,955	0,038	10,301	0,033	8,730	1,106	99,024	1,051	85,522	1,089	94,970
73	0,068	17,087	0,100	23,055	0,035	10,337	0,030	8,760	1,098	100,122	1,047	86,569	1,083	96,060
74	0,063	17,150	0,094	23,148	0,032	10,369	0,028	8,788	1,090	101,213	1,044	87,613	1,076	97,130
75	0,059	17,208	0,088	23,236	0,030	10,399	0,025	8,813	1,083	102,295	1,040	88,652	1,070	98,200
76	0,054	17,262	0,082	23,318	0,027	10,425	0,023	8,835	1,075	103,370	1,036	89,688	1,063	99,270
77	0,049	17,312	0,076	23,394	0,024	10,449	0,020	8,855	1,068	104,438	1,032	90,720	1,057	100,320
78	0,045	17,356	0,070	23,464	0,021	10,470	0,018	8,873	1,060	105,498	1,028	91,748	1,050	101,370
79	0,040	17,396	0,064	23,527	0,018	10,487	0,015	8,888	1,052	106,550	1,024	92,772	1,044	102,420
80	0,035	17,432	0,058	23,585	0,015	10,502	0,013	8,900	1,045	107,595	1,020	93,793	1,037	103,450
81	0,031	17,463	0,052	23,637	0,012	10,514	0,010	8,910	1,037	108,632	1,017	94,809	1,031	104,480
82	0,026	17,489	0,046	23,683	0,009	10,523	0,008	8,918	1,030	109,661	1,013	95,822	1,024	105,510
83	0,022	17,510	0,040	23,723	0,006	10,529	0,005	8,923	1,022	110,683	1,009	96,831	1,018	106,530
84	0,017	17,527	0,034	23,756	0,003	10,532	0,003	8,925	1,014	111,697	1,005	97,836	1,012	107,540
85	0,012	17,540	0,028	23,784	0,001	10,533	0,001	8,926	1,008	112,706	1,002	98,837	1,006	108,550
86	0,023	17,562	0,005	23,789	0,014	10,547	0,012	8,938	1,012	113,718	0,999	99,836	1,008	109,550

Tabela 37 - Resultados da simulação com o sistema ajustado para 43 °C.

Leitura	AcidoTot	AcidoAc	AcucarEs	AcucarAc	Amino	AminoT	Interm	InterT	Acetatot	AcetatoAc	Hidrogenio	HidrogAc	MetanoTo	MetanoAc
1	0,424	0,424	0,563	0,563	0,263	0,263	0,210	0,210	1,676	1,676	1,340	1,340	1,575	1,575
2	0,419	0,843	0,557	1,120	0,259	0,522	0,208	0,418	1,668	3,343	1,336	2,677	1,568	3,143
3	0,414	1,258	0,551	1,671	0,256	0,778	0,205	0,623	1,660	5,003	1,332	4,009	1,561	4,705
4	0,409	1,667	0,544	2,215	0,253	1,031	0,203	0,825	1,652	6,655	1,328	5,337	1,555	6,259
5	0,405	2,072	0,538	2,753	0,250	1,281	0,200	1,025	1,644	8,298	1,324	6,661	1,548	7,807
6	0,400	2,471	0,532	3,285	0,247	1,528	0,198	1,223	1,636	9,934	1,320	7,981	1,541	9,348
7	0,395	2,866	0,525	3,810	0,244	1,772	0,195	1,418	1,628	11,562	1,316	9,298	1,534	10,883
8	0,390	3,256	0,519	4,329	0,241	2,013	0,193	1,610	1,620	13,182	1,312	10,610	1,528	12,410
9	0,385	3,641	0,513	4,842	0,238	2,250	0,190	1,800	1,612	14,794	1,308	11,918	1,521	13,931
10	0,380	4,021	0,506	5,348	0,234	2,484	0,188	1,988	1,604	16,398	1,304	13,222	1,514	15,445
11	0,375	4,396	0,500	5,848	0,231	2,716	0,185	2,173	1,596	17,994	1,300	14,522	1,507	16,952
12	0,370	4,767	0,494	6,341	0,228	2,944	0,183	2,355	1,588	19,582	1,296	15,818	1,500	18,453
13	0,365	5,132	0,487	6,828	0,225	3,169	0,180	2,535	1,580	21,162	1,292	17,110	1,494	19,946
14	0,361	5,492	0,481	7,309	0,222	3,391	0,178	2,713	1,572	22,735	1,288	18,398	1,487	21,433
15	0,356	5,848	0,474	7,783	0,219	3,609	0,175	2,888	1,564	24,299	1,284	19,681	1,480	22,914
16	0,351	6,199	0,468	8,251	0,216	3,825	0,173	3,060	1,556	25,855	1,280	20,961	1,473	24,387
17	0,346	6,545	0,462	8,713	0,213	4,038	0,170	3,230	1,548	27,403	1,276	22,237	1,467	25,853
18	0,341	6,886	0,455	9,168	0,209	4,247	0,168	3,398	1,540	28,944	1,272	23,509	1,460	27,313
19	0,336	7,222	0,449	9,617	0,206	4,453	0,165	3,563	1,533	30,476	1,268	24,777	1,453	28,766
20	0,331	7,553	0,443	10,060	0,203	4,656	0,163	3,725	1,525	32,001	1,264	26,040	1,446	30,213
21	0,326	7,879	0,436	10,496	0,200	4,856	0,160	3,885	1,517	33,517	1,260	27,300	1,439	31,652
22	0,321	8,200	0,430	10,926	0,197	5,053	0,158	4,043	1,509	35,026	1,256	28,556	1,433	33,085
23	0,317	8,517	0,424	11,350	0,194	5,247	0,155	4,198	1,501	36,527	1,252	29,807	1,426	34,511
24	0,312	8,828	0,417	11,767	0,191	5,438	0,153	4,350	1,493	38,019	1,248	31,055	1,419	35,930
25	0,307	9,135	0,411	12,178	0,188	5,625	0,150	4,500	1,485	39,504	1,244	32,299	1,412	37,342
26	0,302	9,437	0,405	12,582	0,184	5,809	0,148	4,648	1,477	40,981	1,240	33,538	1,406	38,748
27	0,297	9,734	0,398	12,980	0,181	5,991	0,145	4,793	1,469	42,450	1,236	34,774	1,399	40,147
28	0,292	10,026	0,392	13,372	0,178	6,169	0,143	4,935	1,461	43,911	1,232	36,005	1,392	41,539
29	0,287	10,313	0,385	13,757	0,175	6,344	0,140	5,075	1,453	45,364	1,228	37,233	1,385	42,924
30	0,282	10,595	0,379	14,136	0,172	6,516	0,138	5,213	1,445	46,809	1,223	38,456	1,379	44,303
31	0,277	10,872	0,373	14,509	0,169	6,684	0,135	5,348	1,437	48,246	1,219	39,675	1,372	45,674
32	0,272	11,145	0,366	14,875	0,166	6,850	0,133	5,480	1,429	49,675	1,215	40,891	1,365	47,039

33	0,268	11,412	0,360	15,235	0,163	7,013	0,130	5,610	1,421	51,096	1,211	42,102	1,358	48,398
34	0,263	11,675	0,354	15,589	0,159	7,172	0,128	5,738	1,413	52,509	1,207	43,309	1,351	49,749
35	0,258	11,933	0,347	15,936	0,156	7,328	0,125	5,863	1,405	53,914	1,203	44,513	1,345	51,094
36	0,253	12,185	0,341	16,277	0,153	7,481	0,123	5,985	1,397	55,311	1,199	45,712	1,338	52,432
37	0,248	12,433	0,335	16,612	0,150	7,631	0,120	6,105	1,389	56,701	1,195	46,907	1,331	53,763
38	0,243	12,676	0,328	16,940	0,147	7,778	0,118	6,223	1,381	58,082	1,191	48,098	1,324	55,087
39	0,238	12,915	0,322	17,262	0,144	7,922	0,115	6,338	1,373	59,456	1,187	49,286	1,318	56,405
40	0,233	13,148	0,316	17,577	0,141	8,063	0,113	6,450	1,366	60,821	1,183	50,469	1,311	57,715
41	0,228	13,376	0,309	17,886	0,138	8,200	0,110	6,560	1,358	62,179	1,179	51,648	1,304	59,019
42	0,224	13,600	0,303	18,189	0,134	8,334	0,108	6,668	1,350	63,528	1,175	52,823	1,297	60,317
43	0,219	13,818	0,296	18,485	0,131	8,466	0,105	6,773	1,342	64,870	1,171	53,994	1,290	61,607
44	0,214	14,032	0,290	18,776	0,128	8,594	0,103	6,875	1,334	66,203	1,167	55,161	1,284	62,891
45	0,209	14,241	0,284	19,059	0,125	8,719	0,100	6,975	1,326	67,529	1,163	56,324	1,277	64,168
46	0,204	14,445	0,277	19,337	0,122	8,841	0,098	7,073	1,318	68,847	1,159	57,483	1,270	65,438
47	0,199	14,644	0,271	19,608	0,119	8,959	0,095	7,168	1,310	70,157	1,155	58,638	1,263	66,701
48	0,194	14,838	0,265	19,872	0,116	9,075	0,093	7,260	1,302	71,459	1,151	59,789	1,257	67,958
49	0,189	15,027	0,258	20,130	0,113	9,188	0,090	7,350	1,294	72,753	1,147	60,935	1,250	69,207
50	0,184	15,211	0,252	20,382	0,109	9,297	0,088	7,438	1,286	74,039	1,143	62,078	1,243	70,450
51	0,179	15,391	0,246	20,628	0,106	9,403	0,085	7,523	1,278	75,317	1,139	63,217	1,236	71,687
52	0,175	15,565	0,239	20,867	0,103	9,506	0,083	7,605	1,270	76,587	1,135	64,352	1,229	72,916
53	0,170	15,735	0,233	21,100	0,100	9,606	0,080	7,685	1,262	77,849	1,131	65,483	1,223	74,139
54	0,165	15,900	0,227	21,327	0,097	9,703	0,078	7,763	1,254	79,103	1,127	66,609	1,216	75,355
55	0,160	16,060	0,220	21,547	0,094	9,797	0,075	7,838	1,246	80,349	1,123	67,732	1,209	76,564
56	0,155	16,215	0,214	21,760	0,091	9,888	0,073	7,910	1,238	81,587	1,119	68,851	1,202	77,766
57	0,150	16,365	0,207	21,968	0,088	9,975	0,070	7,980	1,230	82,818	1,115	69,965	1,196	78,962
58	0,145	16,510	0,201	22,169	0,084	10,059	0,068	8,048	1,222	84,040	1,111	71,076	1,189	80,151
59	0,140	16,650	0,195	22,364	0,081	10,141	0,065	8,113	1,214	85,254	1,107	72,182	1,182	81,333
60	0,135	16,786	0,188	22,552	0,078	10,219	0,063	8,175	1,207	86,461	1,103	73,285	1,175	82,508
61	0,131	16,916	0,182	22,734	0,075	10,294	0,060	8,235	1,199	87,659	1,099	74,383	1,169	83,677
62	0,126	17,042	0,176	22,910	0,072	10,366	0,058	8,293	1,191	88,850	1,095	75,478	1,162	84,838
63	0,121	17,162	0,169	23,079	0,069	10,434	0,055	8,348	1,183	90,032	1,090	76,568	1,155	85,993
64	0,116	17,278	0,163	23,242	0,066	10,500	0,053	8,400	1,175	91,207	1,086	77,655	1,148	87,141
65	0,111	17,389	0,157	23,398	0,063	10,563	0,050	8,450	1,167	92,374	1,082	78,737	1,141	88,283
66	0,106	17,495	0,150	23,549	0,059	10,622	0,048	8,498	1,159	93,533	1,078	79,815	1,135	89,417
67	0,101	17,596	0,144	23,693	0,056	10,678	0,045	8,543	1,151	94,683	1,074	80,890	1,128	90,545

68	0,096	17,693	0,138	23,830	0,053	10,731	0,043	8,585	1,143	95,826	1,070	81,960	1,121	91,666
69	0,091	17,784	0,131	23,961	0,050	10,781	0,040	8,625	1,135	96,961	1,066	83,026	1,114	92,781
70	0,087	17,870	0,125	24,086	0,047	10,828	0,038	8,663	1,127	98,088	1,062	84,089	1,108	93,888
71	0,082	17,952	0,118	24,204	0,044	10,872	0,035	8,698	1,119	99,207	1,058	85,147	1,101	94,989
72	0,077	18,029	0,112	24,316	0,041	10,913	0,033	8,730	1,111	100,318	1,054	86,201	1,094	96,083
73	0,072	18,100	0,106	24,422	0,038	10,950	0,030	8,760	1,103	101,421	1,050	87,251	1,087	97,170
74	0,067	18,167	0,099	24,522	0,034	10,984	0,028	8,788	1,095	102,516	1,046	88,297	1,080	98,251
75	0,062	18,229	0,093	24,615	0,031	11,016	0,025	8,813	1,087	103,603	1,042	89,339	1,074	99,324
76	0,057	18,286	0,087	24,701	0,028	11,044	0,023	8,835	1,079	104,683	1,038	90,377	1,067	100,391
77	0,052	18,339	0,080	24,782	0,025	11,069	0,020	8,855	1,071	105,754	1,034	91,411	1,060	101,451
78	0,047	18,386	0,074	24,855	0,022	11,091	0,018	8,873	1,063	106,817	1,030	92,441	1,053	102,504
79	0,042	18,428	0,068	24,923	0,019	11,109	0,015	8,888	1,055	107,873	1,026	93,467	1,047	103,551
80	0,038	18,466	0,061	24,984	0,016	11,125	0,013	8,900	1,047	108,920	1,022	94,489	1,040	104,591
81	0,033	18,498	0,055	25,039	0,013	11,138	0,010	8,910	1,040	109,960	1,018	95,507	1,033	105,624
82	0,028	18,526	0,049	25,088	0,009	11,147	0,008	8,918	1,032	110,991	1,014	96,521	1,026	106,650
83	0,023	18,549	0,042	25,130	0,006	11,153	0,005	8,923	1,024	112,015	1,010	97,531	1,019	107,669
84	0,018	18,567	0,036	25,166	0,003	11,156	0,003	8,925	1,016	113,030	1,006	98,537	1,013	108,682
85	0,013	18,580	0,030	25,195	0,001	11,158	0,001	8,926	1,009	114,040	1,002	99,539	1,007	109,689
86	0,023	17,562	0,005	23,789	0,014	10,547	0,012	8,938	1,012	113,718	0,999	99,836	1,008	109,550

Tabela 38 - Resultados da simulação com o sistema ajustado para 48 °C.

Leitura	AcidoTot	AcidoAc	AcucarEs	AcucarAc	Amino	AminoT	Interm	InterT	Acetatot	AcetatoAc	Hidrogenio	HidrogAc	MetanoTo	MetanoAc
1	0,170	0,170	0,225	0,225	0,105	0,105	0,210	0,210	1,350	1,350	1,170	1,170	1,296	1,300
2	0,168	0,337	0,223	0,448	0,104	0,209	0,208	0,418	1,346	2,696	1,168	2,339	1,293	2,590
3	0,166	0,503	0,220	0,668	0,103	0,311	0,205	0,623	1,342	4,037	1,166	3,505	1,289	3,880
4	0,164	0,667	0,218	0,886	0,101	0,413	0,203	0,825	1,337	5,374	1,164	4,669	1,285	5,160
5	0,162	0,829	0,215	1,101	0,100	0,513	0,200	1,025	1,333	6,708	1,162	5,831	1,282	6,440
6	0,160	0,989	0,213	1,314	0,099	0,611	0,198	1,223	1,329	8,036	1,160	6,991	1,278	7,720
7	0,158	1,146	0,210	1,524	0,098	0,709	0,195	1,418	1,325	9,361	1,158	8,149	1,275	9,000
8	0,156	1,302	0,208	1,732	0,096	0,805	0,193	1,610	1,321	10,682	1,156	9,305	1,271	10,270
9	0,154	1,456	0,205	1,937	0,095	0,900	0,190	1,800	1,316	11,998	1,154	10,459	1,268	11,540
10	0,152	1,608	0,202	2,139	0,094	0,994	0,188	1,988	1,312	13,310	1,152	11,610	1,264	12,800
11	0,150	1,758	0,200	2,339	0,093	1,086	0,185	2,173	1,308	14,618	1,150	12,760	1,260	14,060
12	0,148	1,907	0,197	2,536	0,091	1,178	0,183	2,355	1,304	15,922	1,147	13,907	1,257	15,320
13	0,146	2,053	0,195	2,731	0,090	1,268	0,180	2,535	1,300	17,221	1,145	15,053	1,253	16,570
14	0,144	2,197	0,192	2,924	0,089	1,356	0,178	2,713	1,295	18,516	1,143	16,196	1,250	17,820
15	0,142	2,339	0,190	3,113	0,088	1,444	0,175	2,888	1,291	19,808	1,141	17,337	1,246	19,070
16	0,140	2,480	0,187	3,301	0,086	1,530	0,173	3,060	1,287	21,095	1,139	18,476	1,243	20,310
17	0,138	2,618	0,185	3,485	0,085	1,615	0,170	3,230	1,283	22,377	1,137	19,613	1,239	21,550
18	0,136	2,754	0,182	3,667	0,084	1,699	0,168	3,398	1,279	23,656	1,135	20,748	1,235	22,780
19	0,134	2,889	0,180	3,847	0,083	1,781	0,165	3,563	1,274	24,930	1,133	21,881	1,232	24,020
20	0,132	3,021	0,177	4,024	0,081	1,863	0,163	3,725	1,270	26,200	1,131	23,011	1,228	25,240
21	0,131	3,152	0,175	4,198	0,080	1,943	0,160	3,885	1,266	27,466	1,129	24,140	1,225	26,470
22	0,129	3,280	0,172	4,370	0,079	2,021	0,158	4,043	1,262	28,728	1,127	25,266	1,221	27,690
23	0,127	3,407	0,169	4,540	0,078	2,099	0,155	4,198	1,257	29,985	1,124	26,391	1,218	28,910
24	0,125	3,531	0,167	4,707	0,076	2,175	0,153	4,350	1,253	31,239	1,122	27,513	1,214	30,120
25	0,123	3,654	0,164	4,871	0,075	2,250	0,150	4,500	1,249	32,488	1,120	28,633	1,210	31,330
26	0,121	3,775	0,162	5,033	0,074	2,324	0,148	4,648	1,245	33,732	1,118	29,752	1,207	32,540
27	0,119	3,893	0,159	5,192	0,073	2,396	0,145	4,793	1,241	34,973	1,116	30,868	1,203	33,740
28	0,117	4,010	0,157	5,349	0,071	2,468	0,143	4,935	1,236	36,210	1,114	31,982	1,200	34,940
29	0,115	4,125	0,154	5,503	0,070	2,538	0,140	5,075	1,232	37,442	1,112	33,093	1,196	36,140
30	0,113	4,238	0,152	5,655	0,069	2,606	0,138	5,213	1,228	38,670	1,110	34,203	1,193	37,330
31	0,111	4,349	0,149	5,804	0,068	2,674	0,135	5,348	1,224	39,894	1,108	35,311	1,189	38,520
32	0,109	4,458	0,147	5,950	0,066	2,740	0,133	5,480	1,220	41,114	1,106	36,416	1,185	39,700

33	0,107	4,565	0,144	6,094	0,065	2,805	0,130	5,610	1,215	42,329	1,103	37,520	1,182	40,890
34	0,105	4,670	0,141	6,236	0,064	2,869	0,128	5,738	1,211	43,540	1,101	38,621	1,178	42,060
35	0,103	4,773	0,139	6,374	0,063	2,931	0,125	5,863	1,207	44,748	1,099	39,721	1,175	43,240
36	0,101	4,874	0,136	6,511	0,061	2,993	0,123	5,985	1,203	45,950	1,097	40,818	1,171	44,410
37	0,099	4,973	0,134	6,645	0,060	3,053	0,120	6,105	1,199	47,149	1,095	41,913	1,168	45,580
38	0,097	5,071	0,131	6,776	0,059	3,111	0,118	6,223	1,194	48,344	1,093	43,006	1,164	46,740
39	0,095	5,166	0,129	6,905	0,058	3,169	0,115	6,338	1,190	49,534	1,091	44,097	1,160	47,900
40	0,093	5,259	0,126	7,031	0,056	3,225	0,113	6,450	1,186	50,720	1,089	45,186	1,157	49,060
41	0,091	5,351	0,124	7,155	0,055	3,280	0,110	6,560	1,182	51,902	1,087	46,273	1,153	50,210
42	0,089	5,440	0,121	7,276	0,054	3,334	0,108	6,668	1,178	53,080	1,085	47,357	1,150	51,360
43	0,087	5,527	0,119	7,394	0,053	3,386	0,105	6,773	1,173	54,253	1,083	48,440	1,146	52,510
44	0,085	5,613	0,116	7,510	0,051	3,438	0,103	6,875	1,169	55,422	1,080	49,520	1,143	53,650
45	0,084	5,696	0,113	7,624	0,050	3,488	0,100	6,975	1,165	56,587	1,078	50,599	1,139	54,790
46	0,082	5,778	0,111	7,735	0,049	3,536	0,098	7,073	1,161	57,748	1,076	51,675	1,136	55,930
47	0,080	5,857	0,108	7,843	0,048	3,584	0,095	7,168	1,157	58,905	1,074	52,749	1,132	57,060
48	0,078	5,935	0,106	7,949	0,046	3,630	0,093	7,260	1,152	60,058	1,072	53,821	1,128	58,190
49	0,076	6,011	0,103	8,052	0,045	3,675	0,090	7,350	1,148	61,206	1,070	54,891	1,125	59,310
50	0,074	6,085	0,101	8,153	0,044	3,719	0,088	7,438	1,144	62,350	1,068	55,959	1,121	60,430
51	0,072	6,156	0,098	8,251	0,043	3,761	0,085	7,523	1,140	63,490	1,066	57,025	1,118	61,550
52	0,070	6,226	0,096	8,347	0,041	3,803	0,083	7,605	1,136	64,625	1,064	58,089	1,114	62,660
53	0,068	6,294	0,093	8,440	0,040	3,843	0,080	7,685	1,131	65,757	1,062	59,151	1,111	63,780
54	0,066	6,360	0,091	8,531	0,039	3,881	0,078	7,763	1,127	66,884	1,060	60,210	1,107	64,880
55	0,064	6,424	0,088	8,619	0,038	3,919	0,075	7,838	1,123	68,007	1,057	61,268	1,103	65,990
56	0,062	6,486	0,086	8,704	0,036	3,955	0,073	7,910	1,119	69,126	1,055	62,323	1,100	67,090
57	0,060	6,546	0,083	8,787	0,035	3,990	0,070	7,980	1,115	70,241	1,053	63,376	1,096	68,180
58	0,058	6,604	0,080	8,868	0,034	4,024	0,068	8,048	1,110	71,351	1,051	64,427	1,093	69,270
59	0,056	6,660	0,078	8,945	0,033	4,056	0,065	8,113	1,106	72,458	1,049	65,477	1,089	70,360
60	0,054	6,714	0,075	9,021	0,031	4,088	0,063	8,175	1,102	73,560	1,047	66,524	1,086	71,450
61	0,052	6,766	0,073	9,094	0,030	4,118	0,060	8,235	1,098	74,658	1,045	67,568	1,082	72,530
62	0,050	6,817	0,070	9,164	0,029	4,146	0,058	8,293	1,094	75,751	1,043	68,611	1,078	73,610
63	0,048	6,865	0,068	9,232	0,028	4,174	0,055	8,348	1,089	76,841	1,041	69,652	1,075	74,680
64	0,046	6,911	0,065	9,297	0,026	4,200	0,053	8,400	1,085	77,926	1,039	70,691	1,071	75,760
65	0,044	6,956	0,063	9,359	0,025	4,225	0,050	8,450	1,081	79,007	1,037	71,727	1,068	76,820
66	0,042	6,998	0,060	9,419	0,024	4,249	0,048	8,498	1,077	80,084	1,034	72,762	1,064	77,890
67	0,040	7,039	0,058	9,477	0,023	4,271	0,045	8,543	1,073	81,157	1,032	73,794	1,061	78,950

68	0,038	7,077	0,055	9,532	0,021	4,293	0,043	8,585	1,068	82,225	1,030	74,824	1,057	80,000
69	0,037	7,114	0,052	9,584	0,020	4,313	0,040	8,625	1,064	83,289	1,028	75,853	1,053	81,060
70	0,035	7,148	0,050	9,634	0,019	4,331	0,038	8,663	1,060	84,349	1,026	76,879	1,050	82,110
71	0,033	7,181	0,047	9,682	0,018	4,349	0,035	8,698	1,056	85,405	1,024	77,903	1,046	83,150
72	0,031	7,211	0,045	9,727	0,016	4,365	0,033	8,730	1,052	86,457	1,022	78,925	1,043	84,200
73	0,029	7,240	0,042	9,769	0,015	4,380	0,030	8,760	1,047	87,505	1,020	79,944	1,039	85,240
74	0,027	7,267	0,040	9,809	0,014	4,394	0,028	8,788	1,043	88,548	1,018	80,962	1,036	86,270
75	0,025	7,292	0,037	9,846	0,013	4,406	0,025	8,813	1,039	89,587	1,016	81,978	1,032	87,300
76	0,023	7,315	0,035	9,880	0,011	4,418	0,023	8,835	1,035	90,622	1,014	82,991	1,028	88,330
77	0,021	7,335	0,032	9,913	0,010	4,428	0,020	8,855	1,031	91,652	1,011	84,003	1,025	89,360
78	0,019	7,354	0,030	9,942	0,009	4,436	0,018	8,873	1,026	92,679	1,009	85,012	1,021	90,380
79	0,017	7,371	0,027	9,969	0,008	4,444	0,015	8,888	1,022	93,701	1,007	86,019	1,018	91,400
80	0,015	7,386	0,024	9,994	0,006	4,450	0,013	8,900	1,018	94,719	1,005	87,024	1,014	92,410
81	0,013	7,399	0,022	10,016	0,005	4,455	0,010	8,910	1,014	95,733	1,003	88,028	1,011	93,420
82	0,011	7,410	0,019	10,035	0,004	4,459	0,008	8,918	1,010	96,743	1,001	89,029	1,007	94,430
83	0,009	7,420	0,017	10,052	0,003	4,461	0,005	8,923	1,005	97,748	0,999	90,027	1,003	95,430
84	0,007	7,427	0,014	10,066	0,001	4,463	0,003	8,925	1,001	98,749	0,997	91,024	1,000	96,430
85	0,005	7,432	0,012	10,078	0,000	4,463	0,001	8,926	0,998	99,748	0,995	92,019	0,997	97,430
86	0,010	7,442	0,002	10,080	0,006	4,469	0,012	8,938	1,004	100,752	0,996	93,015	1,002	98,430