



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



Um Estudo sobre Monitoramento e Controle de Biodigestores de Pequena Escala

Fauzi de M. Shubeita, Thais Webber, Ramon Fernandes,
César Marcon, Letícia B. Poehls

Technical Report N° 079

Porto Alegre, Setembro de 2014.

Um Estudo sobre Monitoramento e Controle de Biodigestores de Pequena Escala

RESUMO

Digestores anaeróbicos são equipamentos que têm a capacidade de converter resíduos orgânicos em gás metano e biofertilizantes. A simplicidade conceitual do equipamento oculta grande complexidade dos processos químicos e físicos que acontecem no processo de digestão. Um dos principais motivos desta complexidade é a quantidade expressiva de variáveis do meio que devem ser monitoradas para garantir melhor eficiência desses equipamentos. Destacam-se dentre essas variáveis os valores de temperatura, pressão, fluxo de resíduos na água e no gás, mensuração de gases resultantes, ácidos resultantes, pH e composição da biomassa. Os digestores podem ser utilizados em áreas urbanas e rurais, dependendo do tipo de resíduo que se pretende tratar. Em ambos os locais pode haver dificuldade em monitorar e controlar os digestores e por consequência comprometer a sua eficiência, o que historicamente é apontado como um elemento de fracasso nos projetos que tentaram implantar esses equipamentos em grande escala. Dessa forma, torna-se essencial desenvolver um modelo de monitoramento e controle para as variáveis internas e externas, em princípio para sistemas de digestão anaeróbica de pequeno porte, através de uma rede de sensores sem fio com flexibilidade na estruturação de topologias e protocolos, e com requisitos de confiabilidade de operação.

Palavras-chave: Biodigestores, Redes de Sensores sem Fio, Simulação, Eficiência energética.

A Study on Monitoring and Control of Small-scale Biodigesters

ABSTRACT

Anaerobic digesters are devices that have the ability to convert organic waste into methane gas and biofertilizers. The conceptual simplicity of the large equipment hides the complexity of the chemical and physical processes that occur in the digestion process. One of the main reasons for this complexity is the significant amount of environmental variables that must be monitored to ensure better efficiency of such equipment. We highlight among these variables the values of temperature, pressure, flow of waste water and gas measurement resulting gases resulting acids, pH and composition of biomass. Digesters may be used in urban and rural areas, depending on the type of waste to be treated. At both locations can be difficult to monitor and control digesters and therefore compromising their efficiency, which is historically identified as an element of failure in projects that attempted to deploy such equipment on a large scale. Thus, it becomes essential to develop a model for monitoring and control for internal and external variables normally for small anaerobic digestion systems, through a network of wireless sensors with flexibility in structuring topologies and protocols, and with requirements for reliable operation.

Keywords: Biodigesters, Wireless Sensor Networks, Simulation, Energy efficiency.

Sumário

1	Introdução	6
1.1	Objetivos de pesquisa.....	6
1.2	Organização do relatório.....	7
2	Fundamentação Teórica.....	8
2.1	Introdução a Biodigestores	8
2.1.1	Modelo de Biodigestor Indiano	8
2.1.2	Modelo de Biodigestor Chinês.....	9
2.1.3	Modelo de Biodigestor por Batelada.....	9
2.1.4	Modelo de Biodigestor Canadense.....	10
2.1.5	Modelo de Biodigestor BioKöhler	10
2.1.6	Comparativo dos Modelos de Biodigestores	11
2.2	Conceitos em Redes de Sensores sem Fio (RSSF)	12
2.2.1	Protocolos de Comunicação em RSSF	16
2.3	Simulação de Redes de Sensores sem Fio	17
2.3.1	Simulador OMNeT++.....	17
2.3.2	Framework WiNeS	18
2.3.3	Considerações sobre simulação e avaliação de RSSF	19
2.3.4	Simulação de protocolos de comunicação no framework WiNeS	20
3	Mapeamento do Problema	22
3.1	Modelos de Biodigestão.....	22
3.2	Monitoramento da Digestão Anaeróbica.....	23
3.2.1	Discussão sobre monitoramento em trabalhos relacionados	26
3.3	Estudo de Organização do Conjunto de Sensores	29
3.4	Simulação de Protocolos no Monitoramento do Biodigestor.....	31

4	Discussões e Conclusões Preliminares.....	33
5	References	35

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 (metano) e sua forma mais oxidada (dióxido de carbono) 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 (1). O que torna esse processo atraente para pesquisadores são o gás metano e o biofertilizante resultantes, aproveitados como alternativa de bioenergia e a possibilidade de converter material orgânico poluente em adubo orgânico.

A produção de bioenergia e biofertilizantes através de sistemas de DA não é um processo novo. Na Ásia, países como Índia e China iniciaram a implantação de sistemas de DA na década de 90, mas segundo Kanokwan et al. (2), esses programas fracassaram porque faltou a adoção de uma infraestrutura de monitoramento e controle desses equipamentos como pré-requisito para o controle dos processos anaeróbicos.

Porém, uma boa infraestrutura de monitoramento, por exemplo, baseada em uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) permite produzir grande quantidade de dados para análise posterior ou em tempo de operação do sistema. Esta análise é obtida com a informação de diversas grandezas, como temperatura, umidade e pressão que requer processamento dependente do modelo multivariado adotado.

1.1 Objetivos de pesquisa

O objetivo é desenvolver um modelo de monitoramento e controle das tarefas de produzir gás e biofertilizante com um sistema de DA, monitorar o processo através de uma RSSF e calcular os dados coletados pelo monitoramento através de análise multivariada. Embora não seja foco desse trabalho, 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.

1.2 Organização do relatório

Este relatório está organizado como segue. A Seção 2 apresenta uma breve fundamentação teórica necessária para uma discussão sobre monitoramento eficiente em biodigestores de pequena escala. Abordam-se, também, tópicos do processo de biodigestão, conceitos de redes de sensores sem fio (RSSF), bem como alternativas de simulação destas redes. A Seção 3 aborda requisitos e questões envolvidas no mapeamento do problema alvo para um modelo de monitoramento e controle de biodigestores, o que envolve apresentação de modelos clássicos de biodigestão, variáveis envolvidas na digestão anaeróbica que são essenciais em termos de monitoramento, conjuntos de sensores mínimos envolvidos e suas funções, preparação de simulações de cenários para avaliação do monitoramento. Na Seção 4 apresentam-se discussões e conclusões preliminares acerca deste estudo e levantamento de requisitos, e informações pertinentes ao monitoramento de biodigestores e continuidade da pesquisa.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Introdução a Biodigestores

Biodigestor é um equipamento usado para processar matéria orgânica que também pode ser chamada de biomassa. Ele é composto por um ou mais recipientes onde esse dejetos e depositado e passa por um processo de fermentação anaeróbica que resulta em biogás e biofertilizante (3).

Diversos tipos de matéria orgânica, também chamada de biomassa, 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). Os sistemas podem funcionar de forma temporal ou por demanda. Temporal quando recebe uma carga de matéria orgânica com uma base de tempo (e.g. diariamente) e tem uma descarga de biofertilizante na mesma proporção. Por demanda quando a referência de carga é a capacidade máxima de armazenamento de biomassa, mantendo-a armazenada até a completa biodigestão (4).

Existem vários modelos de biodigestores, modelos bem conhecidos são o indiano, chinês e canadense, mas também estão descritos os modelos de batelada e BioKöler.

2.1.1 Modelo de Biodigestor Indiano

O modelo de biodigestor indiano, ilustrado na Figura 1, possui quatro componentes principais: reservatório de biomassa (Figura 1-1), reservatório de biofertilizante (Figura 1-2), cúpula de gás (Figura 1-3) e tanque de fermentação (Figura 1-4). Ele possui uma cúpula para armazenar gás, sendo que a sua estrutura inferior, enterrada no solo, se movimenta conforme a quantidade de gás. Quando se enche de biogás, a cúpula sobe em volta de uma guia de metal. Essa guia é móvel e a pressão é constante. Esse 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 (5).

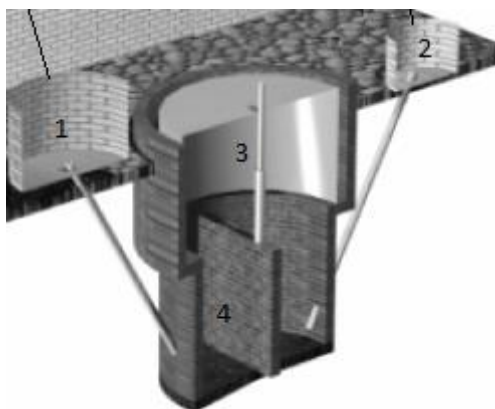


Figura 1 - Modelo de biodigestor indiano (5).

2.1.2 Modelo de Biodigestor Chinês

O modelo de biodigestor chinês é mais rústico que o indiano. A Figura 2 ilustra este modelo que é feito em alvenaria, sendo que a parte onde ocorre a fermentação é enterrada. É um modelo que trabalha sob alta pressão que pode variar conforme a quantidade de gás produzida.

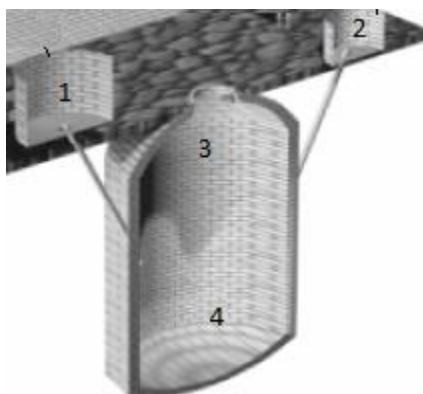


Figura 2 - Modelo de biodigestor chinês (5).

Ele também tem um reservatório de biomassa (Figura 2-1), reservatório de biofertilizantes (Figura 2-2), cúpula de gás (Figura 2-3) e fermentador (Figura 2-4). Diferente do modelo indiano, o 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 (5).

2.1.3 Modelo de Biodigestor por Batelada

O modelo de 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 (5), o que caracteriza um modelo de biodigestão que não é contínuo, como os demais.

Esse modelo é adequado a 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.

2.1.4 Modelo de Biodigestor Canadense

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

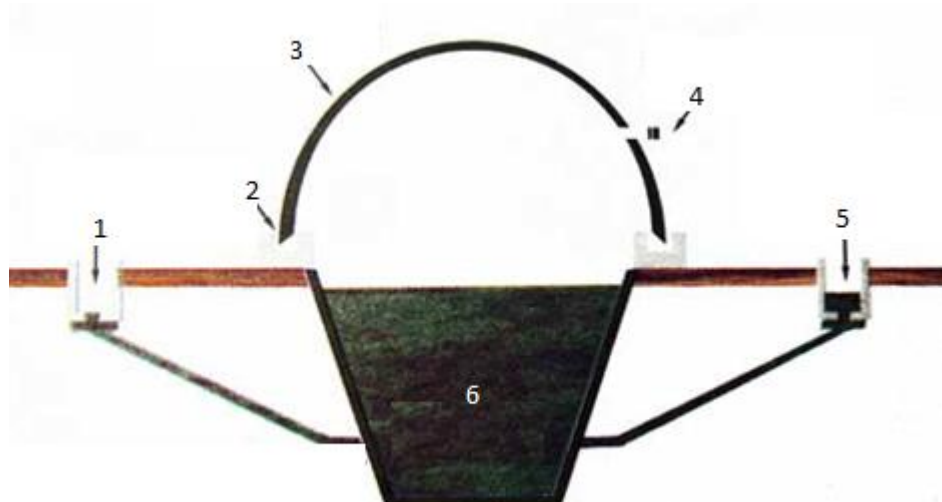


Figura 3 - Modelo de biodigestor canadense (5).

2.1.5 Modelo de Biodigestor BioKöhler

A Figura 4 ilustra o modelo de biodigestor BioKöhler (5), que é desenvolvido por uma empresa brasileira. O reservatório de fermentação é produzido em fibra de vidro. Possui uma entrada de biomassa (Figura 4-1), fermentador (Figura 4-3), funil de separação (Figura 4-4), saída de biofertilizantes (Figura 4-5) e válvula de gás (Figura 4-2). O formato é o de

barril, e uma parte do reservatório fica enterrada e a outra parte fica exposta a radiação solar para facilitar o processo de fermentação.

O funcionamento do modelo BioKöhler segue o mesmo princípio do modelo chinês e indiano, onde uma carga de biomassa é colocada dentro do fermentador em fluxo contínuo pela válvula de entrada (Figura 4-1). A reposição de carga faz com que o dejetos já tratado no fermentador (Figura 4-3) seja empurrado para a parte superior e desça pelo funil de separação (Figura 4-4), saindo então pela válvula de saída (Figura 4-5). Todavia, o gás é canalizado para fora do tanque de fermentação por um encanamento (Figura 4-2), diferentemente dos modelos chineses e indianos que deslocam a cúpula do fermentador para cima com o aumento da pressão do gás produzido. Esse modelo também conta com um tanque de biomassa e um tanque de biofertilizante junto ao biodigestor.

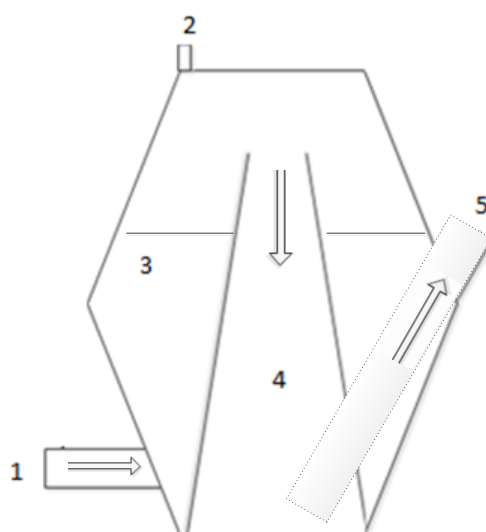


Figura 4 - Modelo de biodigestor BioKöhler (5).

2.1.6 Comparativo dos Modelos de Biodigestores

A Tabela 1 apresenta um resumo dos modelos de biodigestores apresentados nesta seção, salientando o fluxo de carregamento de biomassa e os principais elementos do modelo.

Tabela 1 – Modelos de biodigestor e seus elementos principais

Modelo	Fluxo de carregamento de biomassa	Principais elementos do biodigestor
Chinês	contínuo	Reservatório de biomassa Reservatório de biofertilizante Cúpula de gás Tanque de fermentação com divisão
Indiano	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	Reservatório de biomassa Reservatório de biofertilizante Fermentador com funil de separação Balão de gás
Batelada	não-contínuo	Fermentador Reservatório de biofertilizante

2.2 Conceitos em Redes de Sensores sem Fio (RSSF)

Uma Rede de Sensores Sem Fio (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. Akyildz et al. (6) 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 (7), (8).

Para Cordeiro e Agrawal (9), uma RSSF é caracterizada por possuir topologia dinâmica, largura de banda e capacidade energética, ambas muito limitadas. A norma IEEE 802.15.4 oferece a base para desenvolver uma modalidade de rede sem fio e é caracterizada por apresentar baixo custo de comunicação, baixa 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 Akyildz et al. (6), os nodos de uma RSSF são densamente implantados dentro de um fenômeno ou muito próximos a ele. Ademais, recentes avanços na tecnologia dos sistemas microeletromecânicos, 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 (10). 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 (11).

Cada um dos nodos sensores de uma RSSF é composto por quatro subsistemas, mostrados na Figura 5: (i) subsistema computacional, consistindo de um microcontrolador 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.

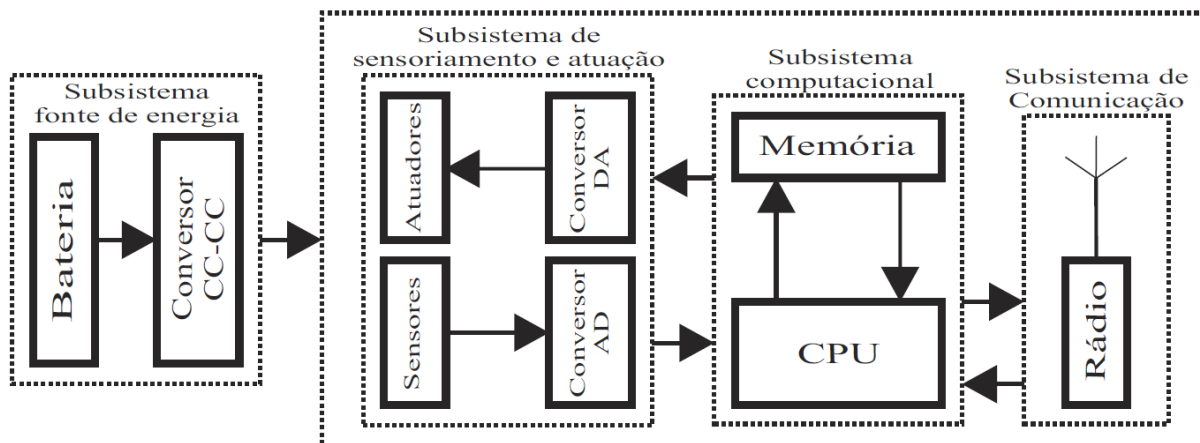


Figura 5 - Estrutura básica de um nó sensor (12).

Braun e Huber (1) descrevem o processo de funcionamento básico de um nó sensor através de uma máquina de estados (Figura 6). Esta 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*).

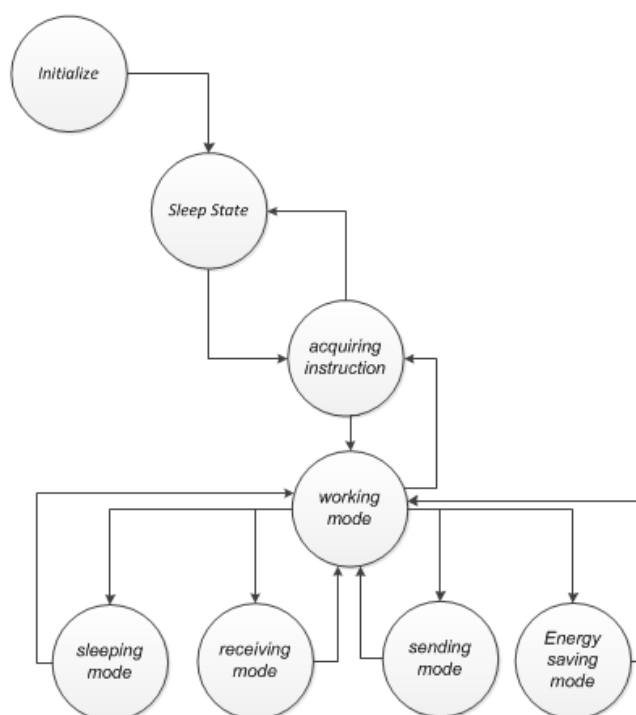


Figura 6 - Máquina de estados de uma RSSF (1).

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 (13), (14):

Capacidade computacional limitada: por causa do custo, do tamanho e de consumo de energia, são muito limitados à 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 tornados inválidos 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. 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.

2.2.1 Protocolos de Comunicação em RSSF

Inúmeros protocolos de roteamento foram propostos para mitigar os desafios impostos pelas novas características das RSSF. Al-Karaki et al. (15) classificaram os protocolos de roteamento existentes de RSSF com duas diferentes perspectivas: a estrutura da rede e o modo de operação. Sob o ponto de vista da estrutura de rede, os algoritmos de roteamento são classificados como planos (*flat-based*), hierárquicos (*hierarchical-based*) e geográficos (*location-based*).

A comunicação direta (*Direct Communication - DC*) entre sensores e uma base central (pode ser chamada de abordagem *single-path*) é uma abordagem simplista, mas em alguns casos, de menor escala espacial e dependendo dos requisitos da aplicação, esta pode já ser adequada em eficiência. Quando há maior distância entre nodos e base central é que aparecem os custos maiores de energia pelas transmissões de longa distância. Porém, o uso de comunicação indireta (*multi-caminho* ou abordagem *multipath*) torna-se mais interessante, pois no caso de redes de sensores, auxiliam a priorizar eficiência energética em diferentes topologias, escalas de RSSF e diferentes aplicações. A seguir, listam-se exemplos de abordagens de comunicação em RSSF desenvolvidos na literatura.

A abordagem conhecida por priorizar mínima transmissão de energia (*Minimum Transmission Energy - MTE*) é um exemplo de comunicação *multi-caminho*, pois os nodos enviam os dados para outros nodos localizados entre o nodo fonte e o destino. Ou seja, durante o sensoriamento, os nodos podem ter papel de roteador na disseminação dos dados, o que resulta em múltiplas transmissões curtas.

Comparativamente, na abordagem DC, os nodos estão sujeitos ao envio de dados redundantes, pois é comum, tendo dois (ou mais) nodos sensoriando a mesma informação (com mesmo valor) por estarem em posições próximas. Na abordagem MTE os nodos podem utilizar checagem de redundância antes de repassar os dados replicados. Apesar disto a energia gasta no MTE pode ser maior do que a utilizada na abordagem DC dependendo do número de saltos (*hops*) e da distância total do nodo fonte para o nodo destino. Além disto, os nodos próximos à base central podem transmitir mais pacotes do

que os que estão mais distantes dela, gastando maior energia, pois estão servindo também de retransmissores para os nodos mais distantes. A tendência é que estes nodos próximos à base central esgotem sua energia antes do que outros nodos mais distantes.

A partir destas abordagens, protocolos foram propostos na literatura. *Directed Diffusion* (16) introduziu o uso de informações da aplicação no protocolo de roteamento. Este protocolo, desenvolvido para redes dirigidas a eventos, permite que os dados requisitados pela aplicação determinem as rotas estabelecidas para atender cada requisição. A aplicação decide se um pacote será repassado, descartado ou fundido com outros pacotes recebidos, reduzindo o consumo de energia. O protocolo utiliza a comunicação ponto a ponto nos dados enviados dos nodos sensores para o ponto de acesso e adota a estratégia de inundação (*i.e. flooding*) para a propagação de dados até um ponto de acesso para a rede.

Exemplificando protocolos hierárquicos, ressaltamos os protocolos LEACH e PEGASIS, protocolos que têm sido explorados em diversas situações.

O protocolo LEACH (*Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy*) (17) é um protocolo que divide a rede periodicamente em grupos ou clusters utilizando probabilidade e que leva em conta a localização e energia residual de cada nodo em cada grupo. Os grupos possuem um líder, que repassa os dados gerados pelos membros de seu grupo para o ponto de acesso. Este repasse é feito via comunicação direta, o que limita o uso do protocolo a redes onde os nodos conseguem alcançar o ponto de acesso diretamente. O protocolo PEGASIS (*Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems*) (18) tem como objetivo estender o tempo de vida da rede permitindo que nodos apenas transmitam pacotes para nodos próximos em uma abordagem em cadeia, até que o pacote atinja um nodo líder ou base central. A construção da cadeia pode ser feita de maneira distribuída, iniciando por um nodo randômico, avaliando a potência de sinal de vizinhos; ou de maneira centralizada por uma base central que envia a estrutura da cadeia para os nodos.

2.3 Simulação de Redes de Sensores sem Fio

2.3.1 Simulador OMNeT++

OMNeT++ (19) é um framework de simulação modular escrito na linguagem C++ baseado em eventos discretos. Cada componente deste simulador é baseado em módulos que podem ser hierarquicamente encadeados para criar módulos compostos. Estes módulos interagem uns com os outros através de troca de mensagens. Esta abordagem

modular proporciona flexibilidade ao OMNeT++ para implementação de diversos cenários. Entretanto, assim como NS-2 (20) e NS-3 (21), que são simuladores conhecidos para redes de computadores, o framework demanda alto nível de entendimento em como estes módulos interagem (22) para que o usuário desenvolva novos módulos.

OMNeT++ oferece interface gráfica, o que é um diferencial, e a possibilidade de plotar o cenário de rede e as simulações. Ainda, o framework possui um kernel para criação de novos módulos, como uma biblioteca, contendo diferentes algoritmos de rede já implementados. Existem outros simuladores específicos construídos sobre o framework OMNeT++, por exemplo, o Castalia (23), específico para simulação de redes de sensores.

2.3.2 Framework WiNeS

O framework WiNeS (Simulador de Rede sem Fio) (24) é uma estrutura projetada para simular dispositivos de rede, homogêneos e heterogêneos, como também simular interconexões entre estes elementos. WiNeS foi desenvolvido para ser o mais flexível possível, para acomodar diversos requisitos de simulação. Distância máxima de comunicação para determinados dispositivos em simulações 2D/3D, eventos programados para os dispositivos baseados no relógio interno do simulador e as regras de pareamento entre nodos para definir quais os dispositivos são capazes de estabelecer comunicação entre si. Esses são exemplos de parâmetros configuráveis. As avaliações de cenários de teste demonstram que o framework WiNeS é realmente capaz de simular ambientes de rede sem fio e suporta diversas customizações de dispositivos sem fio. É um framework para instanciar nodos com interconexões cabeadas ou sem fio, de forma a implementar e validar comportamentos em rede e de aplicações. O framework não apresenta módulo pré-integrados para uso de protocolos de redes sem fio nas simulações, o que pode ser uma desvantagem em relação a outros simuladores, a citar: protocolo 802.15.4, características de protocolo ZigBee, diferenciação de camadas física, rede e aplicação, etc. Entretanto, a implementação em Java e o uso de XML na API para descrição de parâmetros é modular o suficiente para que desenvolvedores possam integrar ou implementar os próprios métodos, aproveitando de um core de simulação pré-estabelecido. Dentre as vantagens do uso do framework WiNeS, temos resumidamente: (i) foi desenvolvido na PUCRS no contexto do projeto Flexgrid (25); (ii) foi escrito em Java, então é multiplataforma; (iii) permite simular diversos cenários com possibilidade de definição heterogênea de nodos de maneira facilitada; (iv) API simples e fácil de entender; (v) permite inclusão de módulos independentes em Java; (vi) permite também simulação de nodos com interconexões

cabeadas, se necessário, apenas ignorando os parâmetros de ambiente que ativam verificação de distâncias entre nodos comunicantes.

2.3.3 Considerações sobre simulação e avaliação de RSSF

Sobre ferramentas (simuladores) de avaliação de RSSF existem diversos softwares, pacotes, módulos e desenvolvimentos disponíveis na literatura (22). Porém a grande dificuldade, dentre todas estas opções, é a curva de aprendizado para desenvolver estudos de caso em ferramentas mais robustas como o OMNeT++ (19), e também a falta de documentação, como também para ferramentas mais simplificadas e de fácil entendimento como é o caso do WiNeS (24), desenvolvido no contexto do projeto de pesquisa Flexgrid (25), que apresenta o módulo básico de simulação de nodos mas ainda tem pouco desenvolvimento de bibliotecas auxiliares para a integração de modelos mais realistas de RSSF.

Além disto, para realizar uma simulação de RSSF normalmente se assumem quantidades específicas de energia dispendida para cada atividade na rede ou no nodo sensor, a fim de possibilitar a realização de estimativas quanto ao tempo de vida para a rede e/ou duração de baterias individualmente. No modelo energético torna-se impraticável representar todos os componentes de um nodo sensor que consomem energia em cada atividade. É preciso abstrair características do hardware (muitos componentes tem um consumo de energia insignificante e por este motivo podem ser abstraídos). Muitos modelos criados também refletem as operações mais realizadas, a citar, transmissão e recepção de pacotes, assumindo que estes valores de gastos energéticos podem já representar uma grande parcela na avaliação a ser realizada – mesmo assim simulações podem prover resultados com algum erro de precisão neste requisito.

Diversos trabalhos da literatura exploraram diferentes modelos de energia para simulações (17), (26), (27), (28), (29), (30), (31), (32), em sua maioria com foco no gasto energético para realizar as atividades de transmissão e recepção de dados. Avaliações realizadas para o protocolo LEACH por Heinzelman et al. (17), por exemplo, abstraíram diversos fatores que influenciam no gasto energético de nodos, ficando apenas com a abstração de transmissão e recepção de pacotes - modelo de energia adotado para avaliações do protocolo LEACH, já que são as operações de maior consumo de energia em nodos de RSSF.

Tabela 2. Exemplo de modelo de energia.

Operação da RSSF	Consumo de energia estimado
Recepção de pacote de tamanho máximo de 500 bytes	$e_{Elec} = 25 \text{ uJ}$
Transmissão de pacote de tamanho máximo de 500 bytes	$e_{Elec} + e_{Amp}$, onde $e_{Amp} = 50 \text{ nJ} \times \text{distancia}^2$

A Tabela 2 exemplifica que para receber um pacote, o módulo de rádio do nodo apenas dissipa a chamada energia e_{Elec} , que é a energia que o rádio gasta para processar recebimento de pacotes (desempacotando, processando) e está em função do tamanho do pacote, onde cada bit de dados recebidos consome 50 nJ de energia. Logo, para um pacote de 500 bytes, e_{Elec} assume 25 uJ. A energia gasta na transmissão pode ser dada pela soma de duas energias: (i) energia gasta no módulo de rádio para empacotamento e compressão, que é a mesma energia gasta na atividade de recepção; (ii) a energia relativa ao amplificador e_{Amp} . Esta energia usa modelo “*free space channel*” para computar energia dissipada, onde cada bit consome 100 pJ multiplicados pela distância ao quadrado (entre transmissor e receptor). Logo, para um pacote de 500 bytes, e_{Amp} é dada por $50\text{nJ} \times \text{distancia}^2$.

2.3.4 Simulação de protocolos de comunicação no framework WiNeS

Protocolos podem ser descritos em diferentes níveis de abstração, considerando os aspectos relevantes à validação do modelo. Por não possuir módulos pré-definidos de comunicação para redes sensores, como é o caso em outros simuladores, é possível utilizar o kernel de simulação do WiNeS para descrever o ambiente de comunicação considerando, por exemplo, o posicionamento físico de nodos sensores e estações de recebimento, e utilizar a infraestrutura básica de comunicação entre os elementos simulados para efetuar trocas de mensagens. Como a simulação de todos os níveis de uma pilha de protocolos real não é necessária, o framework possibilita a rápida prototipação do aspecto algorítmico de protocolos de rede.

Considerando que simulações no framework WiNeS utilizam tempo real, e não intervalos discretos de tempo, algumas limitações existem para modelar características mais elaboradas em protocolos. Aspectos sensíveis ao tempo de simulação, como eventos internos de protocolos, ou a simulação de tempos de propagação de comunicação, sejam estes determinísticos ou probabilísticos, requerem controles adicionais para garantir a confiabilidade dos modelos. Em casos como o modelo de energia para o protocolo LEACH, é necessário estipular valores de consumo energético com base na duração dos diferentes estados no qual o protocolo encontra-se. Como os *quantums* de simulação podem variar

entre diferentes instâncias de simulação, a confiabilidade dos modelos utilizados para representação de eventos deve ser alta, a fim de garantir resultados confiáveis.

Entretanto, o modelo de simulação por tempo real é facilmente adaptável para um modelo reativo a eventos externos, no qual elementos de simulação podem responder a estímulos provenientes de dispositivos reais. Tal característica possibilitaria, por exemplo, a interação do ambiente de simulação com uma topologia de RSSF já existente, propiciando a geração de tráfego em maior escala do que seria factível através de dispositivos reais.

3 MAPEAMENTO DO PROBLEMA

3.1 Modelos de Biodigestão

O processo de biodigestão pode ser caracterizado por modelos matemáticos representando a dinâmica biológica do processo de fermentação que ocorre na matéria orgânica. Modelos de digestão levam em consideração os diferentes componentes da matéria orgânica ou suas quantidades em termos de elementos constituintes do produto gerador de fertilizantes e biogás, como por exemplo (33). Estes modelos são adequados para predição do comportamento do processo de decomposição considerando condições internas e externas do ambiente (biodigestor). É um processo complexo e dependente da atividade de diversos grupos de microrganismos. Além disto, a quantidade de elementos que influenciam o processo de digestão é ainda desconhecida e ainda, suas interações, podem ser bem complexas para representar e avaliar matematicamente (34).

Digestão Anaeróbica (DA) é um complexo processo de redução de diversos compostos orgânicos em metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2) (35). Este processo se desenvolve sem oxigênio e sofre ação de diferentes microrganismos combinados com elementos do ambiente. De acordo com Friehe, Weiland e Schattauer (36), a qualidade do biogás é medida de forma a verificar a proximidade do ideal, i.e. proporção de CH_4 acima de 60% e de CO_2 abaixo de 40%. Adicionalmente, as condições do ambiente, tais como temperatura e pH, ambas contribuem para a taxa de decomposição biológica. A temperatura média para bactérias transformarem matéria orgânica em gás, apropriadamente, varia entre 25 e 55 graus Celsius com uma média de 37 graus Celsius recomendada. Abaixo de 15 graus Celsius a vida bacteriológica fica inativa, assim como acima de 55 graus Celsius muitas bactérias podem morrer. Logo, a temperatura é uma variável crítica neste processo. O mesmo se observa para pH, que determina o crescimento das colônias de microrganismos, devendo variar entre 7.0 e 7.5, por exemplo (37).

A seguir, alguns estudos relacionados aos processos de biodigestão e suas modelagens formais. Batstone et al. (38) descreve o modelo chamado de *IWA Anaerobic Digestion model No.1* (ADM1) de forma estruturada, contendo os subprocessos envolvidos na digestão anaeróbica, na conversão de matéria orgânica em biogás. O modelo objetiva definir estados que descrevam o comportamento dos componentes dentro das reações químicas. Khalid et al. (37) apresentam alguns estudos sobre digestibilidade e relações na

produção de biogás, considerando diferentes conjuntos de substratos e algumas configurações do biodigestor. García-Gen, Lema and Rodríguez (39) apresentam diversos modelos de digestão com considerações sobre sua eficiência e tipos de análises de dados. Gómez et al. (40) usa como base o modelo Arrhenius que afirma que a velocidade da taxa de reação química depende basicamente da temperatura do composto, da energia de ativação e da constante universal de gás, estas em combinação com estudos de acumulação dinâmica de gás assumindo que pode ser modelada exponencialmente. Rajendran et al. (41) propõem o modelo de processo de simulação (*Process Simulation Model* - PSM) para análise de quatro diferentes estágios de produção de biogás, usando ferramentas computacionais e matemáticas para predição do potencial dos substratos para produção do biogás, dadas algumas condições de processo.

3.2 Monitoramento da Digestão Anaeróbica

Um sistema de monitoramento e controle ideal deve ser capaz de detectar uma instabilidade e estabelecer contramedidas para compensar esta instabilidade. Um sistema de monitoramento eficiente deve ser *online*, automatizado e robusto, detectando os primeiros indícios de instabilidade no processo (42).

A importância do monitoramento do processo de DA pode ser observada em (43) que descreve os modelos que auxiliam na compreensão do que cada uma das fases e etapas representa em proporções na composição dos elementos. Figura 7 apresenta as fases líquida e gasosa e as etapas contidas em cada uma delas.

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, e.g. temperatura, pH, alcalinidade e ácidos graxos voláteis, em inglês *Volatile Fatty Acids* (VFA), refletem o ambiente de micro-organismos 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 (44).

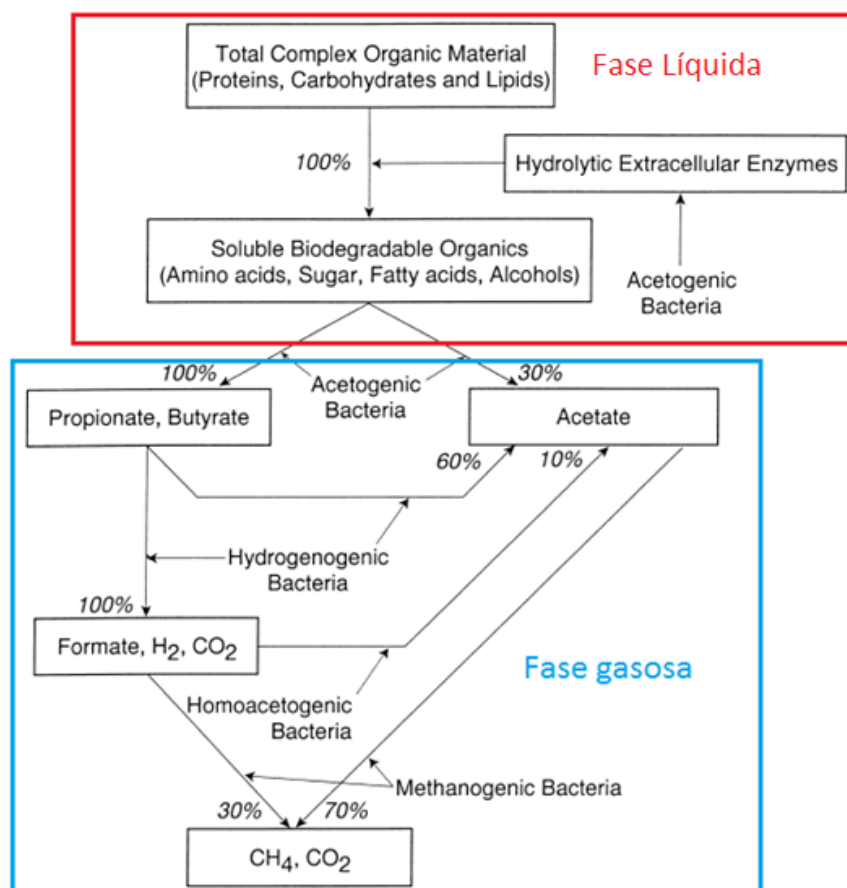


Figura 7 - Proporções de elementos através das fases da DA (43).

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 gás metano (45). 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 dos biogases e do pH do substrato no digestor (46).

Recentes avanços em tecnologias de processos analíticos, em inglês *Process Analytical Technology* (PAT), permitem que processos de bioconversão complexos sejam monitorados e decifrados usando, por exemplo, espectroscópicos e princípios de medição eletroquímicos (11). Essas tecnologias de monitoramento geram uma grande quantidade de dados que precisam ser analisados. Isso 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 (33).

A instrumentação dos sistemas de biodigestão pode ser feita com diversos tipos de tecnologias de hardware, como sensores e atuadores. No projeto de Cadena, Rivera e Herrera (47) 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 FPGAs têm complexidade lógica semelhante aos demais dispositivos, mas com arquitetura flexível que permite explorar diversas funcionalidades no mesmo circuito integrado.

A Tabela 3 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 3 - Técnicas de monitoramento de variáveis em sistema de DA.

Autor	Técnicas	Variáveis monitoradas	Fase
Morel et al. (48)	Espectroscopia fluorescência e	VFA e a oxigenação	Líquida
Pind et al. (49)	Espectroscopia infravermelha	VFA, COD (demanda química por oxigênio), TOC (carbono orgânico total) e alcalinidade	Líquida
Holm-Nielsen (46)	Espectroscopia infravermelha próxima	VFA como etanol, acetato, propianato e butirato, soma de ácidos de cadeia curta	Gasosa
Kana, Schmidt e Kenfack (50)	Ultravioleta espectroscopia visual e	Sulfuretos	Líquida e gasosa
Cheli et al. (51)	Línguas e narizes eletrônicos	VFA e demanda química por oxigênio e pH	Gasosa
Ward et al. (52)	Cromatografia em fase gasosa	VFA, soma de ácidos voláteis de cadeia curta	Gasosa
Varmuza e Filzmoser (53)	Titulação	Soma de ácidos voláteis de cadeia curta e VFA	Gasosa
Haandel e Lettinga (54)	Microondas quimiometria acústica e	Quantificação da matéria seca	Líquida

Os principais parâmetros dos processos que devem ser controlados de acordo com a literatura (37), (41), (5), são apresentados na Tabela 4. A periodicidade desse controle depende do tipo de biodigestor adotado, substrato e condições de fermentação.

Tabela 4 - Parâmetros de monitoramento em digestão anaeróbica.

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)
Composição do biogás	Proporção de gas metano e gás carbônico
Composição dos resíduos de fermentação	Proporção de ácidos, açúcar, e nutrientes para serem consumidas pelas bactérias
pH	Regulador de acidez da biomassa
Concentração de amônia	Volume de amônia 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

3.2.1 Discussão sobre monitoramento em trabalhos relacionados

O monitoramento de biodigestores traz a oportunidade de detectar (e recuperar) o rendimento do processo de biodigestão frente às esperadas e inesperadas condições ambientais. Esta atividade pode ser realizada através de atividades automatizadas como, por exemplo, realizar um registro automático de dados coletados (i.e. *data logging*) ou ainda, realizar um controle do processo mais detalhado que pode ser feito de forma manual por um operador, ou automática com auxílio de alguma tecnologia (36).

Ressalta-se que o monitoramento de variáveis do processo de biodigestão pode ser útil para estimar a carga de substrato e sua composição no intuito de prover alta eficiência do biodigestor. Dependendo das medidas observadas, isto permite que o operador inclua novos substratos (ou mude outras variáveis) para melhoria do processo de digestão, por exemplo, aumentar produção de metano no processo de digestão anaeróbica (41).

Em relação ao processo biológico, listam-se as variáveis mais comumente utilizadas como indicadores do estado de digestão (i.e. *digestion state indicators*), que interessantes alvos para monitoramento. A citar: temperatura, volumes de entrada e saída, caracterização do substrato (valor de pH, concentração de ácidos orgânicos, oligoelementos, nitrogênio, amônia, etc.), composição do gás (metano, dióxido de carbono, oxigênio, sulfeto de hidrogênio, hidrogênio), taxa de produção de gás, entre outros (36), (55).

A prática atual de automatização da operação do biodigestor visa utilizar um sistema de controle para supervisão e aquisição de dados no biodigestor (comumente chamado de SCADA). O sistema é responsável, por exemplo, pelo monitoramento de temperatura,

volume de matéria orgânica, pressão do gás, incluindo a geração de registros de monitoramento para novas ações ou controle.

Jantsch e Mattiasson (42) devido ao ambiente químico e mecânico crítico em que os nodos têm que operar, os sensores devem ser encapsulados em material isolante e resistente, capaz de suportar o ambiente severo da compostagem, o que também significa que os nodos não são cabeados para transmissão das medições. Portanto, a rede deve ser sem fio e os nodos devem estar equipados com um transceptor (e antena). A autonomia dos nodos e o fato de que todos os componentes eletrônicos estão encapsulados, sem acesso externo, também significa que os nodos devem ser alimentados por uma bateria recarregável de longa duração e por um circuito que permite a sua recarga sem contato.

Além da necessidade de hardware, também é necessário um software para coletar, processar e enviar as informações para uma interface com o usuário. Kana, Schmidt and Kenfack (50) desenvolveu um software com interface WEB para monitoramento *online* e sistemas de biodigestão, recebendo continuamente medidas de hidrogênio, metano e frações de dióxido de carbono, temperatura do substrato, entre outras. As medidas foram efetuadas em intervalos de tempo de 1 minuto, 12 minutos e 24 horas. Esse sistema contava com a ação de atuadores (misturadores) acionados manualmente conforme os dados recebidos eram interpretados através de análise multivariada.

A Tabela 5 apresenta trabalhos recentes relacionados a algum tipo de atividade de monitoramento ou simulação aplicada a biodigestores, com destaque para os indicadores de estado monitorados e as características do sistema desenvolvido (HW/SW/técnicas), bem como estão incluídos alguns comentários sobre os testes realizados e os resultados obtidos pelas pesquisas. Considerando que o sistema de DA funciona através de uma sequência de reações químicas, diversos autores como Ward et al. (52) afirmam 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 quando comparadas a análises *online* local são menos eficientes. Tanto Álvarez et al. (56), quanto López et al. (57), 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. Jantsch e Mattiasson (42) fazem 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.

Tabela 5. Trabalhos recentes de monitoramento de biodigestores.

Referências	Sistema de monitoramento desenvolvido		Observações
	Indicadores, HW aplicado	Técnicas, SW aplicado	
Gómez et al. (2010) (40)	Sensores de temperatura, pressão e pH, sistema de aquecimento de água por resistência; Aquisição de dados via "Data Logger" marca "HOBO" referência U12-006 com 4 entradas, 4-20 mA, utilizados para a aquisição dos valores de temperatura com 0.02 mA ou + 2,5% de precisão e 0.03% de resolução;	Análise em tempo real com o HOBOWare-Pro software (via data logger) a fim de propor um modelo matemático exponencial considerando uma margem de variação máxima;	Biodigestor de pequena escala (19L) instrumentação com sensores para registrar as mudanças de variáveis em diferentes temperaturas; Testes confirmaram que a produção de biogás é acelerada na medida em que o processo de biodigestão é realizado a temperaturas mais elevadas;
Ward et al. (2011) (52)	<i>Near Infrared Spectrometer</i> (NIR) para inspecionar acetato, propionato e o total de ácidos graxos voláteis; <i>Membrane Inlet Mass Spectrometry</i> (MIMS) para inspecionar CH ₄ , CO ₂ , H ₂ S, redução de compostos orgânicos de enxofre e p-cresol; A cromatografia gasosa (H ₂ , CH ₄ , H ₂ S, N ₂ e O ₂), e monitoramento de pH;	Quatro métodos on-line para monitoramento dos parâmetros do processo nas fases líquida e gasosa; Por exemplo, a análise multivariada de dados para o desenvolvimento do modelo foi aplicada aos dados NIR utilizando software Analyst TQ (<i>Thermo Scientific</i>);	O biodigestor piloto foi monitorado durante um período de dois meses, quando a carga orgânica foi aumentada; A avaliação da precisão dos dados coletados foi realizada por meio de método analítico de forma manual; MIMS é considerado não adequado para medições on-line de longo prazo porque exige limpeza frequente e medições diárias de fundo;
Kumar and Venkateswarlu (2012) (58)	Monitoramento da taxa de carga orgânica, taxa de carga hidráulica, concentração inicial do substrato e concentração de substrato fluido e massa obtida, a partir de dados experimentais de um reator anaeróbico de leito fixo, com reator de biofilme;	Rede neural artificial como um método alternativo para estimar a taxa de reação de um processo de biofilme sem o uso de uma equação do modelo; Modelo híbrido mecanicista-neural com função de taxa de rede (HMNNRFM);	Simulação da rede neural em relação ao modelo original de entrada/saída de dados experimentais de estudos de modelagem; Os resultados demonstram a eficácia de HMNNRFM para estimar a cinética do processo complexo de biofilme envolvido no tratamento de águas residuais da indústria;
Brambilla et al. (2012) (59)	Hardware para coleta de amostra de biogás específica, valores de produção de metano, parâmetros do processo (temperatura da biomassa dentro do fermentador, quantidade de dejetos, pH e FOS/TAC);	Data logger: realiza a coleta de dados diária e faz o armazenamento dos mesmos. O Log então é analisado para avaliar o desempenho do biodigestor.	Planta piloto equipada com dois pequenos reatores em tanques de aço e um gasômetro. Monitorando desde o início das fases de um digestor anaeróbico por seis semanas. O objetivo era o de melhorar o conhecimento dos parâmetros de controle para reduzir o tempo inicial do processo com posterior aumento de unidades de digestão anaeróbica.
Kana, Schmidt and Kenfack (2013) (50)	Monitoramento do Biohidrogênio, frações de gás biometano e dióxido de carbono, temperatura, oxigênio dissolvido (OD), pH, condutividade e volume de gases na fermentação para biogás.	<i>Biogas Monitoring Software</i> (Flab-biogas); Software web desenvolvido para monitoramento online contínuo;	Software desenvolvido conseguiu gerar alta vazão em informações úteis para o desenvolvimento e melhoria do processo de biohidrogenização. Realização de testes práticos;
Barnert, Piesik and Śliwiński (2014) (60)	Monitoramento do estado geral do Biodigestor e capacidade de geração de energia.	Simulação em tempo real em uma planta de biogás. Software usado para simular o trabalho da planta com uso de CFD (<i>Computational Fluid Dynamics</i>);	Cria possibilidade de minimizar situações perigosas e indesejáveis sobre uma planta real, manipulando os parâmetros de controle e observando a reação do objeto simulado;
Álvarez, Otero e Lema (56)	Desenvolvimento de metodologia para determinar as proporções mais adequadas de diferentes	Método de programação linear para configurar diferentes misturas destinadas a maximizar	Experimentos em operação contínua são recomendados para adquirir mais ampla informação

	substratos que proporcionam um potencial de biodegradação otimizada ou potencial de metano biocinética.	o potencial de biodegradação total de substrato. Tem base em determinação restrições (valores mínimo e máximo) em várias características da mistura.	sobre as taxas de produção de metano e de biodegradação das misturas determinadas pela programação linear.
López et al. (57)	Monitoramento de processo de biodigestão por RSSF (medição da temperatura e umidade em tempo real em vários pontos do material). Ferramenta de gerenciamento de compostagem por monitoramento eficiente.	Rede de sensores distribuídos com nós autônomos independentes com capacidades de temperatura e medição de umidade. Software desenvolvido com uma <i>Application Programming Interface</i> (API) que permite integração em qualquer sistema para controlar biodigestor. Monitoramento pelo sistema Compo-ball.	A estratégia de controle pode ser personalizada para combinar com as regulamentações locais e as características específicas de cada planta de biogás.
Jantsch e Mattiasson (42)	Sistema automatizado de monitoramento e controle das medidas de alcalinidade no biodigestor para melhoria de eficiência.	A alcalinidade parcial, o que indica a concentração de bicarbonato, tem sido em muitos casos, um parâmetro apropriado para monitorar e controlar a biodigestão. Logo, aplicável para a medição de uma ampla gama de concentrações de bicarbonato. O sistema mostra potencial para monitorar os biodigestores anaeróbicos com alguns requisitos de manutenção.	A estabilidade do sistema foi investigada durante um período de cinco dias. Diferentes amostras padrão foram monitoradas continuamente no sistema. A alimentação do biodigestor consistiu de uma mistura de lodo de esgoto municipal e resíduo de processamento de batata.

3.3 Estudo de Organização do Conjunto de Sensores

A Figura 8 apresenta um exemplo de sistema de DA com diversos pontos de sensoriamento identificados por esferas vermelhas. O sistema proposto de DA é baseado no modelo BioKöhler (5) e apresenta 15 pontos de sensoriamento para coleta de dados como temperatura, volume e fluxo, porém, os cálculos que seguem considerarão apenas os pontos de medida de temperatura identificados com os nomes das variáveis.

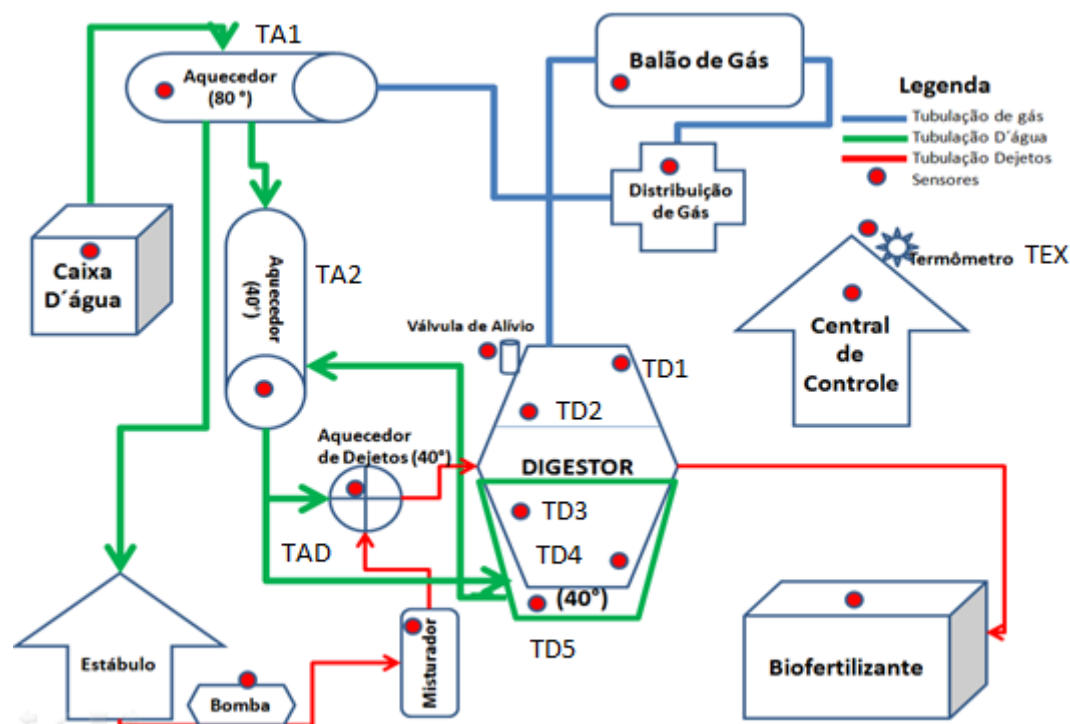


Figura 8 - Exemplo de sistema de digestão anaeróbica monitorado.

A Tabela 6 identifica as nove variáveis consideradas no sistema e que poderiam ser utilizadas numa eventual análise multivariada. O valor das amostras de cada sensor é coletado num intervalo de tempo t com 10 repetições e os valores de temperatura apresentados seguem o que é recomendado por (47).

Tabela 6 - Variáveis consideradas do sistema de digestão anaeróbica.

Legenda	ID variável	Faixa de valores
Temperatura externa	TEX	15 - 28° C
Temperatura do aquecedor 1	TA1	75 - 80° C
Temperatura do aquecedor 2	TA2	35 - 40° C
Temperatura do aquecedor de biomassa	TAD	36 - 43° C
Temperatura 1 do digestor	TD1	36 - 43° C
Temperatura 2 do digestor	TD2	36 - 43° C
Temperatura 3 do digestor	TD3	36 - 43° C
Temperatura 4 do digestor	TD4	36 - 43° C
Temperatura 5 do digestor	TD5	36 - 43° C

Os valores apresentados nas colunas da Tabela 6 respeitam uma faixa de temperatura recomendada para manutenção da vida bacteriana, segundo Haandel e Lettinga (54), nas variáveis TAD, TD1, TD2, TD3, TD4, e TD5 e a temperatura externa (TEX) com uma faixa entre 15 e 30 °C. As temperaturas dos aquecedores TA1, TA2 são dos aquecedores externos. As linhas representam os intervalos de tempo da coleta de

dados num intervalo de tempo (t). O desafio de pesquisa é identificar quais as variáveis que apresentam maior correlação dentro do conjunto de variáveis apresentado.

3.4 Simulação de Protocolos no Monitoramento do Biodigestor

O objetivo principal em se simular cenários de configurações de sensores nos biodigestores é descobrir comportamentos e avaliar novos algoritmos, no contexto de RSSF e protocolos voltados a diversas aplicações. Neste caso de biodigestores, as simulações podem ajudar a definir topologias e meios de comunicação mais eficientes (e.g. em termos energéticos e de qualidade de serviço) sem a necessidade de realizar um setup físico do biodigestor e hardware de sensoriamento. Apesar disto, algumas pesquisas foram realizadas em campo no âmbito de RSSF para este tipo de monitoramento.

Jantsch e Mattiasson (42) estabeleceram uma RSSF que coleta temperatura e índices da compostagem através de nodos sensores, considerando rede com topologia e protocolo hierárquicos. A minimização de energia também foi uma preocupação bem como a maximização da autonomia da rede. Preocuparam-se também com abordagens de escalonamento de dormência e modos de transmissão de dados entre os nodos. De acordo com um escalonamento pré-definido (e.g. uma vez por hora), todos os nodos ativam-se de forma síncrona após a dormência, realizam suas próprias medidas de temperatura e índices da compostagem, para então comunicarem os dados uns aos outros até uma base central ou hub. Uma vez que os nodos precisam se comunicar uns com os outros, eles permanecem dentro de um intervalo de comunicação onde há pelo menos algum nodo próximo, assegurando que o processo de medição não vai falhar. A distância máxima entre nodos para garantir as comunicações foi de 8 metros e limitada também pelas condições de compostagem críticas (definidas) e a necessidade de economizar energia para evitar necessidade de recarga (manutenção) durante todo um ciclo de compostagem. Se uma falha acontece com a base central ou hub, ou outros nodos, cada nodo pode armazenar uma quantidade limitada de informações enquanto espera reconexão no próximo ciclo de escalonamento e comunicação após dormência. Nesta situação, os dados não chegaram ao destino e o sistema é capaz de transmitir um alerta para o operador do biodigestor, informando que a falha ocorreu.

Apesar do monitoramento e experimentação em campo serem ideais em termos de precisão das avaliações de desempenho e comportamento, muitas vezes este setup não é possível em curto prazo ou dentro dos custos pretendidos. Para tal avaliação prévia à

implantação, pode-se recorrer ao uso de simulações ou emulações. As simulações permitem maior flexibilidade nas variáveis de controle e configurações, de forma a ampliar a gama de avaliações possíveis e previsão de comportamentos.

Neste sentido, colocam-se algumas possibilidades de simulação no contexto de biodigestores de pequena escala monitorados por RSSF. Por exemplo, independente da simulação, podemos prever que alguns nodos da RSSF irão morrer antes dos outros observando os valores/frequências que cada nodo opera, pois são heterogêneos em suas funções (e.g. temperatura, índices de substratos na compostagem, pressão, volume, etc.). Dentro deste contexto, podem-se explorar protocolos hierárquicos (multi-caminho) com foco em eficiência energética, como alguns já existentes na literatura, a citar o protocolo LEACH (17). Uma hipótese é que isto pode aumentar a sobrevivência da rede e de cada nodo individualmente pelas transmissões de menor distância ao invés de transmissões direcionadas à base central (que pode estar distante forçando maior potência de transmissão em determinados nodos). Outra questão a considerar é que os sensores são heterogêneos, e não homogêneos em termos de frequências de atividade e gasto energético. Uma alternativa é atribuir uma prioridade de atividade em relação à importância das variáveis sensoriadas no processo de biodigestão analisado.

4 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES PRELIMINARES

As tecnologias de RSSF estão em constante avanço, sendo que melhorias aplicadas na forma de configurar, coletar dados, comunicar e processar permite diversificar e ampliar o seu uso. Todavia, ainda existem fatores que limitam a sua adoção em larga escala ou em alguns ambientes classificados como críticos (6), a citar dificuldade de manutenção quando utilizando baterias, ou mesmo a eficiência energética para garantir total operação no tempo determinado pela aplicação. Mesmo considerando esses fatores limitantes, é possível ampliar do uso das RSSF em sistemas de biodigestão. Estes são sistemas críticos que demandam constante monitoramento e controle e o mau funcionamento pode acarretar prejuízos ambientais e financeiros.

Apesar da simplicidade na sua construção física, um sistema de biodigestão apresenta complexidade em diversos níveis bioquímicos, principalmente no processo de fermentação. Normalmente pode-se dividir este processo em fase líquida e fase gasosa. Em cada fase precisa ser monitorada e controlada para que ao final seja produzida uma boa quantidade de biogás e biofertilizante. Considerando a complexidade do sistema 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 da rede de sensores em monitoramento de ambientes rurais. Justificável porque pode agilizar a coleta dos dados, dispensando análises laboratoriais ou *off-line*. Entende-se que sistemas de biodigestão de grande porte justificam um maior investimento nas partes de monitoramento e controle. Porém, usar a mesma abordagem para sistemas pequenos é desejável, pois a complexidade é semelhante.

No âmbito de avaliação de RSSF para biodigestores, o uso de simulação torna-se atrativo pois é possível validar e experimentar as configurações com maior liberdade e também desenvolver soluções específicas voltadas às limitações deste tipo de realidade. Ao optar-se pelo uso do framework WiNeS, as variáveis consideradas foram a sua simplicidade de programação, configuração, por ser implementado em Java (flexibilidade) e por prover uma camada leve de aplicação para a execução dos protocolos e algoritmos de RSSF. As camadas física e MAC são abstraídas, sendo implementadas as camadas de troca de mensagens e comportamento apenas – o que é suficiente para as avaliações preliminares da implantação da RSSF neste estudo de caso.

O WiNeS por ser considerado um simulador de “tempo real” pelo core de simulação e controle do relógio global, tem alguns desafios de adaptação para a aplicação de biodigestores, por exemplo, sabe-se que os eventos dos sensores são de natureza heterogênea (suas frequências de operação são bem distintas dependendo do tipo de sensor). Este tipo de configuração acarreta atrasos do processamento do simulador e influência nos resultados da simulação em si. Uma abordagem válida ao problema do framework em relação à esta aplicação, seria modificar o core de simulação para que comporte um processamento de eventos discretos, independentes do tempo de máquina, e também alterar as suas operações computacionais básicas hoje realizadas com sockets e threads, além de otimizar as operações sobre listas de eventos em processamento.

Outros simuladores estão sendo estudados e considerados para o desenvolvimento desta pesquisa que também podem se mostrar adequados para o problema, por exemplo, pacotes do Matlab, NS-2, NS-3 e OMNeT++. Estes mostraram-se robustos apesar de haver dificuldade de entendimento de seus frameworks e posterior uso. NS-2 e NS-3 aparentam ter bastante documentação, porém apresentam curva de aprendizado alta para curto prazo. OMNeT++ tem pouca documentação formal, apesar de apresentar diversos exemplos online específicos para WSN (pelo seu módulo Castalia e Mixim), mas também com curva de aprendizado alta. Outras opções seriam pacotes de Matlab, a citar, pacote Prowler, já visto aplicado em simulação de RSSF; ou ainda, outros simuladores não comerciais.

5 REFERENCES

1. *Ammonia toxicity in liquid piggery manure digestion*. **Braun, P. and Huber, J.** 4, April 1981, *Biotechnol Letters*, Vol. 3, pp. 159-164.
2. *State indicators for monitoring the anaerobic digestion process*. **Kanokwan, B., et al.** 20, December 2010, *Water Research*, Vol. 44, pp. 5973-5980.
3. *On-line measurements of COD, TOC, VFA, total and partial alkalinity in anaerobic digestion processes using infrared spectrometry*. **Steyer, P., et al.** 10, 2002, *Water Science and Technology*, Vol. 45, pp. 133-138.
4. *Automatic volumetric gas flow meter for monitoring biogas production from laboratory-scale anaerobic digester*. **Pereda, R. O. C., Muñoz, E. M. R. and Ruiz, G. H.** 1, May 18, 2010, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 147, pp. 10-14.
5. **Souza, K. C. G.** *Modelo de simulação para análise da viabilidade de geração de energia a partir da utilização de biodigestores*. UFMS. s.l. : Programas de Pós-graduação da CAPES, 2010. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica.
6. *Wireless sensor networks: a survey*. **Akyildiz, I., et al.** 4, 2002, *Computer Networks*, Vol. 38, pp. 393–422.
7. *Two-Levels Hierarchy for Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (TL-LEACH)*. **Loscri, V., Morabito, G. and Marano, S. A.** Dallas, USA : IEEE, 2005. 2005 IEEE 62nd Vehicular Technology Conference (VTC). Vol. 3, pp. 1809-1813.
8. *A survey on wireless sensor network: An application perspective*. **Sakthidharan, G. and Chitra, S.** Coimbatore, India : IEEE, 2012. International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI). pp. 1-5.
9. *Mobile Ad hoc Networking*. **Cordeiro, C. and Agrawal, D.** Búzios, RJ, Brasil : SBC, 2002. Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC). pp. 125-186.
10. *A survey on wireless mesh networks*. **Akyildiz, I. F. and Wang, X.** 9, September 2005, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 43, pp. S23-S30.
11. *The potential for online monitoring of short-term process dynamics in anaerobic digestion using near-infrared spectroscopy*. **Christian, L., et al.** January 2013, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 48, pp. 224-230.

12. **Sausen, P.** *Gerenciamento integrado de energia e controle de topologia de redes de sensores sem fio*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, Brasil : s.n., 2008. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica.

13. *Critical Event based Multichannel Process Control Monitoring Using WSN for Industrial Applications*. **Arthi, K., Vijayalakshmi, A. and Vanaja, P.** Chennai, India : s.n., 2013. *Procedia Engineering – Special Issue of International Conference on Design and Manufacturing (IConDM)*. Vol. 64, pp. 142-148.

14. *Wireless sensors in agriculture and food industry recent development and future perspective*. **Ning, W., Naiqian, Z. and Maohua, W.** 1, s.l. : Elsevier, January 2006, *Computers and Electronics Agriculture*, Vol. 50, pp. 1-14.

15. *Routing techniques in wireless sensor networks: a survey*. **Al-Karaki, J. and Kamal, A.** 6, 2004, *IEEE Wireless Communications*, Vol. 11, pp. 6–28.

16. *Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks*. In *Proceedings of the 6th Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks*. **Intanagonwiwat, C., Govindan, R. and Estrin, D.** Boston, Massachusetts, USA : ACM, 2000. Annual International Conference on Mobile computing and networking (MobiCom '00). pp. 56-67.

17. *Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks*. **Heinzelman, W., Chandrakasan, A. and Balakrishnan, H.** Maui, Hawaii, USA : IEEE, 2000. *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*. pp. 1-10.

18. *PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information systems*. **Lindsey, S. and Raghavendra, C. S.** Big Sky, Montana, USA : IEEE, 2002. *Aerospace Conference Proceedings*. Vol. 3, pp. 1125-1130.

19. *An overview of the OMNeT++ simulation environment*. **Varga, A. and Hornig, R.** Marseille, France : s.n., 2008. *Proceedings of the 1st international conference on Simulation tools and techniques for communications, networks and systems & workshops (Simutools'08)*. Vol. 60, pp. 1-10.

20. **ns-2**. The Network Simulator ns-2: Documentation.

21. **ns-3**. ns-3 Network Simulator.

22. *A Survey of Simulation in Sensor Networks*. **Singh, C., Vyas, O. and Tiwari, M.** Vienna, Austria : IEEE, 2008. International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation (CIMCA). pp. 867-872.
23. *Performance Evaluation of Castalia Wireless Sensor Network Simulator*. **Rastegarnia, A. and Solouk, V.** Budapest, Hungary : IEEE, 2011. 34th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP). pp. 111-115.
24. *A flexible framework for modeling and simulation of multipurpose wireless networks*. **Bohrer, V., et al.** Montreal, Canada : s.n., 2013. International Symposium on Rapid System Prototyping (RSP). pp. 94-100.
25. **Poehls, L. B., Marcon, C. and Webber, T.** Flexgrid - Um Framework para o Projeto de Arquiteturas e Protocolos de Redes de Sensores Sem Fio. *Research Project*. Porto Alegre, Brasil : Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. FAPERGS/CAPES Edital Docfix nº 09/2012, 2012.
26. *Simulating the Power Consumption of Large Scale Sensor Network Applications*. **Shnayder, V., et al.** Baltimore, Maryland, USA : ACM, 2004. Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems (SenSys'04). pp. 188-200.
27. *Accurate Prediction of Power Consumption in Sensor Networks*. **Landsiedel, O., Wehrle, K. and Götz, S.** Sydney, Australia : IEEE, 2005. Second IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors (EmNetS-II). pp. 37-44.
28. *Energy Consumption Model for Power Management in Wireless Sensor Networks*. **Wang, Q. and Yang, W.** San Diego, CA, USA : IEEE, 2007. 4th Annual IEEE Communication Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON '07). pp. 142-151.
29. *Towards a Realistic Energy Model for Wireless Sensor Networks*. **Kellner, S., et al.** Garmisch-Partenkirchen, Germany : IEEE, 2008. Fifth Annual Conference on Wireless on Demand Network Systems and Services (WONS 2008). pp. 97-100.
30. *An Energy Model for Simulation Studies of Wireless Sensor Networks using OMNeT++*. **Chen, F., et al.** 2, 2009, Praxis der Informationsverarbeitung und Kommunikation (PIK), Vol. 32, pp. 133–138.

31. *An estimation of sensor energy consumption.* **Halgamuge, M. N., Zukerman, M. and Ramamohanarao, K.** 2009, Progress In Electromagnetics Research B, Vol. 12, pp. 259–295.
32. *Modeling of Node Energy Consumption for Wireless Sensor Networks.* **Zhou, H.-Y., et al.** 2011, Wireless Sensor Network, Vol. 3, pp. 18-23.
33. *Monitoring of anaerobic digestion processes: A review perspective.* **Madsen, M., Holm-Nielsen, J. B. and Esbensen, K. H.** 6, 2011, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, pp. 3141-3155.
34. *Model selection, identification and validation in anaerobic digestion: A review.* **Donoso-Bravo, A., et al.** 17, 2011, Water Research, Vol. 45, pp. 5347-5364.
35. *Fugitive methane emissions from an agricultural biodigester.* **Flesch, T. K., Desjardins, R. L. and Worth, D.** 9, 2011, Biomass and Bioenergy, Vol. 35, pp. 3927-3935.
36. **Friehe, J., Weiland, P. and Schattauer, A.** *Fundamentals of Anaerobic Digestion. Guide to Biogas From production to use.* . Federal Ministry of Food, Agriculture and Consumer Protection (BMELV). Eschborn, Germany : Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), 2010. pp. 21-30.
37. *The anaerobic digestion of solid organic waste.* **Khalid, A., et al.** 8, 2011, Waste Management, Vol. 31, pp. 1737-1744.
38. *The IWA Anaerobic Digestion Model No.1. (ADM1).* **Batstone, D.J., et al.** 10, London : IWA Publishing, 2002, Water Science and Technology, Vol. 45, pp. 65–73.
39. *Generalised modelling approach for anaerobic co-digestion of fermentable substrates.* **García-Gen, S., Lema, J. M. and Rodríguez, J.** November, 2013, Bioresource Technology, Vol. 147, pp. 525-533.
40. *Instrumentation of an animal manure biodigester to analyze its dynamic behavior.* **Gómez, C. R. B., et al.** [ed.] C. E. Velásquez and Y. A. P. Rodríguez. Bogota, Colombia : Industry Applications Society (IAS), Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010. 2010 IEEE ANDESCON. pp. 1-6.
41. *A novel process simulation model (PSM) for anaerobic digestion using Aspen Plus.* **Rajendran, K., et al.** September, 2014, Bioresource Technology, Vol. 168, pp. 7-13.

42. *An automated spectrophotometric system for monitoring buffer capacity in anaerobic digestion processes.* **Jantsch, T. and Mattiasson, B.** 17, October 2004, *Water Research*, Vol. 38, pp. 3645-3650.

43. *Mathematical Models of the Kinetics of Anaerobic Digestion - A Selected Review.* **Husain, A.** 5-6, May-Jun 1998, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 14, pp. 561-571.

44. *Volatile fatty acids as indicators of process imbalance in anaerobic digesters.* **Ahring, B., Sandberg, M. and Angelidaki, I.** 3, July 1995, *Applied Microbiology and Biotechnology*, Vol. 43, pp. 559–565.

45. *On-line titration of volatile fatty acids for the process control of anaerobic digestion plants.* **H., Feitkenhauer, J., Sachs and U., Meyer.** 1, January 2002, *Water Research*, Vol. 36, pp. 212-218.

46. *Transflexive embedded near infrared monitoring for key process intermediates in anaerobic digestion/biogas production.* **Holm-Nielsen, J., et al.** 2, 2007, *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, Vol. 15, pp. 123-135.

47. *Automatic volumetric gas flow meter for monitoring biogas production from laboratory-scale anaerobic digester.* **Cadena, R., Rivera, E. and Herrera, G.** 1, May 2010, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 147, pp. 10-14.

48. *Application of multi-wavelength fluorometry for on-line monitoring of an anaerobic digestion process.* **Morel, E., et al.** 14-15, Aug-Sep 2004, *Water Research*, Vol. 38, pp. 3287-3296.

49. *Monitoring and control of anaerobic reactors.* **Pind, P. F., et al.** 2003, *Springer Biomethanation II - Advances in biochemical engineering/biotechnology*, Vol. 82, pp. 135-182.

50. *A web-enabled software for real-time biogas fermentation monitoring – Assessment of dark fermentations for correlations between medium conductivity and biohydrogen evolution.* **Kana, E. B. G., Schmidt, S. and Kenfack, R. H. A.** 25, 2013, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38, pp. 10235-10244.

51. **Cheli, F., et al.** *Testing feed quality: the artificial senses.* January 15, 2008. *Feed International*, Vols. 18-5.

52. *Real time monitoring of a biogas digester with gas chromatography near-infrared spectroscopy, and membrane-inlet mass spectrometry.* **Ward, A. J., et al.** 5, 2011, *Bioresource Tecnologia*, Vol. 102, pp. 4098-4103.
53. **Varmuza, K., Filzmoser, P.** *Introduction to multivariate statistical analysis in chemometrics.* s.l. : CRC Press/Taylor & Francis Group, 2009. p. 348p.
54. **Haandel, V., Lettinga, A.** *Tratamento Anaeróbico de Esgotos: Um Manual para Regiões de Clima Quente.* Campina Grande : Epgraf, 1994. p. 240p.
55. *State indicators for monitoring the anaerobic digestion process.* **Boe, K., et al.** 20, 2010, *Water Research*, Vol. 44, pp. 5973-5980.
56. *A methodology for optimising feed composition for anaerobic co-digestion of agro-industrial wastes.* **Álvarez, J.A., Otero, L. and Lema, J.M.** 4, 2010, *Bioresource Technology*, Vol. 101, pp. 1153-1158.
57. *Intelligent composting assisted by a wireless sensing network.* **López, M., et al.** 4, April 2014, *Waste Management*, Vol. 34, pp. 738-746.
58. *Estimating biofilm reaction kinetics using hybrid mechanistic-neural network rate function model.* **Kumar, B. S. and Venkateswarlu, Ch.** 1, 2012, *Bioresource Technology*, Vol. 103, pp. 300-308.
59. *Monitoring of the startup phase of one continuous anaerobic digester at pilot scale level.* **Brambilla, M., et al.** 2012, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 36, pp. 439-446.
60. *Real-time simulator of agricultural biogas plant.* **Barnert, T., Piesik, E. and Śliwiński, M.** October, 2014, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 108, pp. 1-11.
61. *A Smart Recording Power Analyzer Prototype Using LabVIEW and Low-Cost Data Acquisition (DAQ) in Being a Smart Renewable Monitoring System.* **Chompoo-Inwai, C. and Mungkornassawakul, J.** Denver, CO, USA : s.n., 2013. *IEEE Green Technologies Conference*. pp. 49-56.
62. *A survey on routing protocols for wireless sensor networks.* **Akkaya, K. and Younis, M.** 3, 2005, *Ad Hoc Networks*, Vol. 3, pp. 325-349.
63. *Analyzing and enhancing energy efficient communication protocol for wireless micro-sensor networks.* **Butt, I. and Khan, S.** [ed.] W. A. Khan and F. Ahmed. Karachi, Pakistan : IBA ICICT, 2005. *First International Conference on Information and Communication Technologies (ICICT 2005)*. pp. 323–327.

64. *Instrumenting the World with wireless sensor networks*. **Estrin, D., et al.** 2001. International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. pp. 2033–2036.
65. *Environmentally superior technologies for swine waste management*. **Humenik, F. J., et al.** 5, 2004, Water Science and Technology, Vol. 49, pp. 15-21.
66. *On hierarchical routing in wireless sensor networks*. **Iwanicki, K. and van Steen, M.** San Francisco, CA, USA : IEEE, 2009. International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN 2009). pp. 133–144.
67. *Design and Implementation of Scalable Wireless Sensor Network for Structural Monitoring*. **Pakzad, S., et al.** 1, 2008, Journal of Infrastructure Systems, Vol. 14, pp. 89–101.
68. *Energy-Efficient Routing Protocols in Wireless Sensor Networks: A Survey*. **Pantazis, N., Nikolidakis, S. and Vergados, D.** 99, 2012, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. PP, pp. 1–41.
69. *A Review of Wireless Sensor Technologies and Applications in Agriculture and Food Industry: State of the Art and Current Trends*. **Ruiz-Garcia, L., et al.** 2009, Sensors, Vol. 9, pp. 4728–4750.
70. *Performance evaluation of network lifetime spatial-temporal distribution for WSN routing protocols*. **Senouci, M., et al.** 4, 2012, Journal of Network and Computer Applications, Vol. 35, pp. 1317-1328.
71. *A survey on wireless sensor network infrastructure for agriculture*. **Yu, X., et al.** 1, 2013, Computer Standards & Interfaces, Vol. 35, pp. 59-64.
72. *Energy-Efficient Routing in Linear Wireless Sensor Networks*. **Zimmerling, M., Dargie, W. and Reason, J.** Pisa, Italy : IEEE, 2007. International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems. pp. 1-3.