

## Congresso ABRISCO 2017

### **Modelagem de Biodigestão Anaeróbia: Fatores que Cooperam para Riscos Ambientais no Sistema – Uma Revisão de Literatura**

Júlia Carolina Braz de Freitas Bijos<sup>1</sup>, Robson Wilson Silva Pessoa<sup>1</sup>,

Karla Patrícia Santos Oliveira Rodrigues Esquerre<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal da Bahia

## **INTRODUÇÃO**

Sistemas de biodigestão anaeróbia são vantajosos ao passo que aliam ao tratamento de efluentes a geração de energia, considerada renovável. Segundo Gupta e Singh [1], águas residuais de plantas de tratamento podem ser uma fonte de CH<sub>4</sub> se dispostas anaerobicamente. Todavia, uma série de fatores deve ser avaliada a fim de garantir máxima segurança na operação das estações de tratamento, pois o processo está atrelado a riscos, devendo ser operado e monitorado rigorosamente.

A emissão de partículas, proliferação de vetores, possibilidade de contaminação do solo e cursos hídricos e, principalmente, a emissão de gases poluentes e odorantes são os problemas ambientais do processo, ao passo que o metano (CH<sub>4</sub>) possui potencial poluidor muito maior do que o do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). A ampliação das avaliações referentes aos impactos gerados pelos efluentes e às oportunidades contidas no seu tratamento está distante dos objetivos da criação de sistemas para cumprimento de apenas a qualidade no limite normativo. As melhorias em plantas de tratamento de efluentes tem focado em aspectos econômicos relacionados a redução de consumo de energia, minimização de lodo e maximização da qualidade do biogás gerado. Ou seja, não é necessário apenas considerar os custos operacionais, mas também pensar em termos de impacto ambiental, a fim de reduzir as emissões diretas e indiretas de Gases de Efeito Estufa, GEE [2]. Além disso, devem-se considerar os riscos de falhas operacionais e humanas, que acabam interferindo no processo e necessitam ser mitigados.

Entende-se por riscos a integração de um perigo (conceito natural que ameaça as pessoas e bens materiais) com uma pessoa ou um objeto que esteja exposto a ele, de modo que possam ser atingidas pelas consequências [3]. Não obstante, é fundamental a avaliação da formação das normas que delineiam os processos de gestão ambiental devido a sua pouca especificidade e parâmetros excessivos devido ao demasiado uso do princípio da precaução. Este tipo de análise deve contemplar os recursos e estratégias utilizadas para que o impacto global seja favorável.

Neste sentido, para evitar que os riscos se tornem falhas e acabem gerando impactos negativos (seja pela imprecisão dos modos de falha e suas barreiras ou pelo risco potencial excessivamente atribuído), é necessário avaliá-los para decidir as melhores técnicas de evitá-los e mitigá-los. Para tal, sinaliza-se a importância de controlar rigorosamente o processo. Este controle depende dos aspectos de projeto, manutenção e operação da planta, que estão inter-relacionados, considerando métodos e ferramentas que auxiliam a obter resultados satisfatórios e seguros.

Diversos modelos estão disponíveis para aplicação em sistemas de tratamento anaeróbio e produção de biogás, porém, é necessário avaliar os métodos de utilização para fazer a opção que melhor atenderá a gestão. Os modelos de biodigestão anaeróbia apresentam alta complexidade, pelo fato de incluírem um grande número de parâmetros e variáveis. Isto os torna difíceis de serem aplicados em plantas reais, pois não se consegue chegar a medições precisas das variáveis devido a dificuldade de precisão dos equipamentos e técnicas de medição, além de dificultar seu uso por parte dos operadores. A falta de normas de projeto que possam garantir a construção de sistemas anaeróbios tem sido uma das principais críticas de quem trabalha na elaboração de projetos.

Os modelos que representam o processo, bem como aqueles que consideram os riscos atrelados a operação, consideram temperatura, vazão afluente, concentração de substrato, presença de toxicidade, pH, taxa de degradação de substrato, crescimento bacteriano, remoção de DQO com consequente taxa de produção de metano são algumas variáveis que necessitam ser modeladas para melhor controle do sistema. Elas precisam estar em faixas ideais, caso contrário será causada inibição no sistema, interferindo no crescimento bacteriano, reduzindo a produção de metano e remoção de DQO.

A grande dificuldade encontrada é a obtenção de métodos de análise destas variáveis e instrumentação adequada, que garanta maior precisão. Isso pode ser considerado o principal fator de incertezas para o

processo [4].

Este trabalho tem por objetivo fazer um estudo de materiais bibliográficos relacionados aos riscos existentes em plantas de tratamento anaeróbio, para identificar possibilidades de trabalhar a modelagem matemática frente às questões relatadas previamente pelos autores. Visa também, propor a utilização de uma ferramenta de modelagem para fins de obter maior segurança e eficiência no processo.

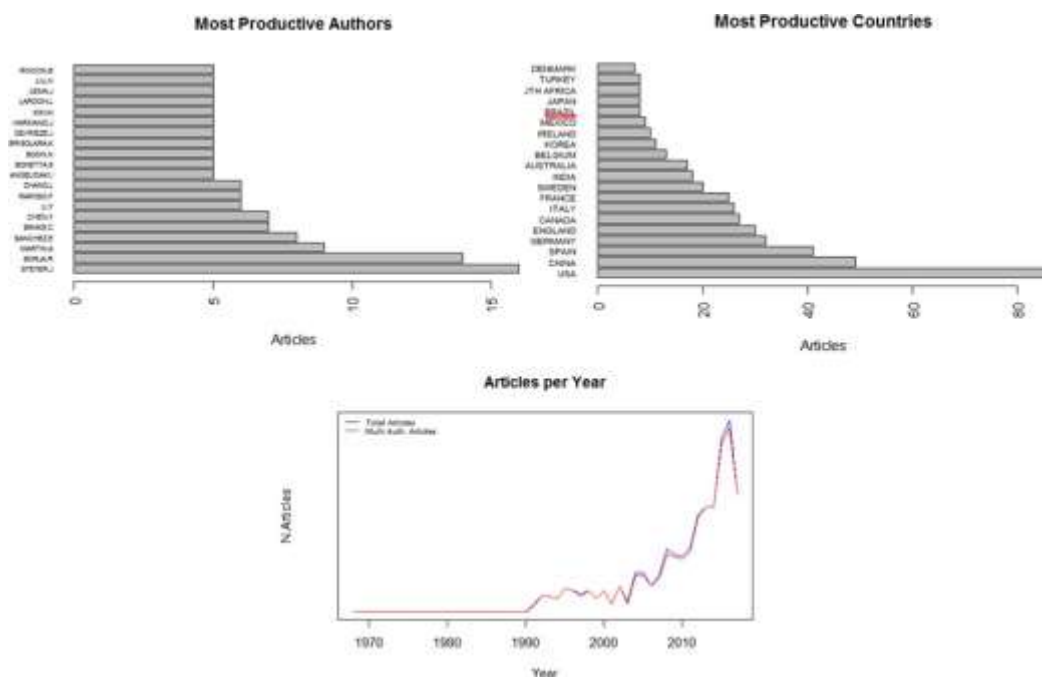
## LEVANTAMENTO DE DADOS

O levantamento dos dados utilizados para este trabalho foi realizado por meio de pesquisa booleana realizada no sítio da Web of Science e, as avaliações foram realizadas com o *package* Bibliometrix, disponível para a linguagem R. Esta ferramenta disponibiliza configurações para pesquisa bibliométrica, de modo que faz uma análise quantitativa e estatística, para as publicações encontradas. Isto permite avaliar o crescimento, autores que mais publicam, gráficos e mapas sobre co-citação, co-autoria, entre outros.

Neste sentido, entre os trabalhos analisados pela ferramenta, os resultados indicaram as revistas que mais publicaram, os países que lideram os estudos, o crescimento dos estudos na área. Foi utilizado para a pesquisa a combinação “*Anaerobic Digestion x Risk Assessment or Risk Analysis or Fault tree Analysis or Failure Mode Effect Analysis or FMEA or PRA or Hazard and Operability Study or HAZOP or Enviromental Accident Index or probability Consequence Analysis or Quantitative Risk Assessment or Enviromental Harm Index or Failure or failure Analysis or Fault or Failure Risk Analysis x FRA or Safety*”.

Foram encontrados 557 trabalhos na base de dados. Na figura 1, são mostrados os gráficos que indicam o aumento nas publicações da área ao longo dos anos, bem como os países e autores mais relevantes.

Figura 1- Produções na área pesquisada



Os dados foram obtidos para as primeiras vinte posições mais ativas no tema. A partir dos anos 90, década que se têm dados de que o processo anaeróbio começou a se popularizar como forma de tratamento, observa-se que há um crescimento nas publicações [5]. Além disso, segundo os dados fornecidos, as revistas que mais abordaram o tema foram as relacionadas à pesquisa ambiental, tecnologias ambientais, manutenção de resíduos, bioprodutos, microbiologia, bioenergia e produção limpa. Dentre estas revistas que lideram as publicações na área, não foram encontradas revistas de análise de riscos.

O Brasil está em 15º lugar entre os países mais produtivos, o que indica que movimenta estudos de biodigestão anaeróbia, já que é uma técnica que permite tratamento de resíduos, efluentes, esgoto com baixo custo e o clima do país é favorável. Mas, de modo geral, não se pode dizer que os estudos estão diretamente ligados à área de análise de riscos nas plantas de tratamento anaeróbio. Para saber a relação existente entre os trabalhos publicados e o tema proposto, serão comentadas algumas incidências das palavras-chaves consideradas mais importantes para o diagnóstico. Na tabela 1, é indicada a lista das primeiras vinte palavras

– chaves com maior recorrência dentre os trabalhos.

Tabela 1- Palavras-chave mais relevantes (por autor)

1	Anaerobic Digestion	202
2	Biogas	59
3	Methane	25
4	Sewage Sludge	21
5	Anaerobic Digestion	20
6	Food waste	20
7	Biosolids	19
8	Co-Digestion	16
9	Inhibition	16
10	Digestion	14
11	Methanogenesis	14
12	Anaerobic Co-Digestion	13
13	Risk Assessment	13
14	Sludge	13
15	Wastewater	13
16	Composting	12
17	Manure	12
18	Microbial Community	11
19	Ammonia	10
20	Organic Loading Rate	10

Fonte: Autores, dados da ferramenta de pesquisa.

A palavra chave “Risk Assessment” apareceu 13º lugar na lista. Está relacionada a trabalhos muito específicos, como os riscos ambientais da presença de compostos farmacêuticos em efluentes, riscos que patogênicos presentes em efluentes causam a seres humanos e, riscos de metais pesados em efluentes. Já “Anaerobic Digestion” apareceu em primeiro, seguida por “Biogas” e “Methane”, porém, os trabalhos não relacionam diretamente avaliação de riscos ambientais e operacionais ao processo. A maioria, é remetido aos riscos de inibição às bactérias, ou outros fatores que ocorrem nos próprios mecanismos reacionais do processo.

Para encontrar maior quantidade de palavras voltadas para o estudo de riscos, ampliou-se a lista para 200 posições. Ao se fazer isto, foi possível encontrar as variações “Risk Analysis” e “Risk”, em 34º e 42º lugar. Estas palavras se relacionam diretamente ao processo, sendo possível encontrar trabalhos que abrangem modelos de biodigestão, que monitoram os riscos que causam desequilíbrio à cinética e microbiologia do processo. Também foi possível indentificar um trabalho contendo um estudo de caso a uma planta de produção de biogás por tratamento anaeróbio, com uma avaliação dos riscos ambientais possíveis de ocorrer ao se ter vazamento de material líquido do reator para o corpo hídrico mais próximo. Outras variações como “Failure” só puderam ser encontradas após a 100ª colocação na listagem, ainda assim, está relacionada às falhas devido à mudanças na carga orgânica, degradação de metabólitos específicos, acidificação e inibição por amônia.

Investigou-se também “Toxicidade”, e os resultados indicaram que esta palavra está relacionada a compostos muito específicos que são tóxicos ao meio, sem estar relacionada diretamente a estudos de análise de risco de toxicidade. É importante notar, que quando se refere à toxidade do meio ela pode trazer outro termo com ela. Pode-se considerar os poluentes que estão presentes em quantidades superiores às quais se indica. Fazendo esta consideração, “pollutants” pode passar a ser considerado como uma definição de produção mais limpa, no sentido de se almejar a redução destes compostos [6].

“Construct Sustainability” já se relaciona com ciclo de vida, em relação ao desempenho de certas substâncias na agricultura e, se relaciona também, com sistemas de geração de energia a partir de resíduos. Para “Exposure”, houve um registro sobre a avaliação de riscos potenciais à saúde, de compostos do biogás, associado ao seu uso para cozinhar. Para obter dados a respeito de modelos aplicados ao processo, optou-se

por pesquisar “ADM 1”, e foram encontrados trabalhos que relacionam a performance do processo relacionando às características da água residual, em relação a presença de compostos considerados inibidores ao processo. Foi encontrado um trabalho que relaciona aplicação do modelo em escala de laboratório para detecção de distúrbios e intervenção, obtendo diagnóstico dos parâmetros reacionais que interferem na produção de biogás. Quanto às demais palavras pesquisadas voltadas ao estudo de riscos, não foi possível identificá-las entre as 200 primeiras. Esta dificuldade em encontrar trabalhos que estejam diretamente relacionando as duas áreas, pode ser remetida a especificidade do processo em questão.

Pelo que se pode observar nos dados do grupo de trabalhos aqui pesquisado, a grande maioria dentre os que consideram riscos, se direcionam à situações específicas de operação como presença de toxicidade aos microrganismos, presença de determinados poluentes, compostos farmacêuticos em efluentes, entre outros fatores, mas não há uma relação direta que abrange os riscos globais presentes na estação de tratamento, bem como ferramentas que podem ser utilizadas para mitigá-los. Desta mesma forma, não se indicam modelos ou métodos que possam facilitar aos operadores a visualização e compreensão das diversas situações de risco que podem ocorrer no processo.

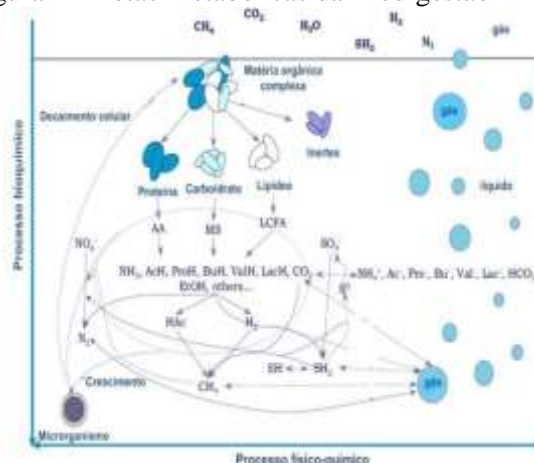
Apesar da limitação encontrada, esta pesquisa se baseou em alguns trabalhos que permitem uma avaliação mais próxima do estudo de risco ao processo de biodigestão anaeróbia, além de considerar aplicações de modelos matemáticos no processo. Em relação aos modelos do processo, os trabalhos possibilitam avaliá-los enquanto ferramenta de controle do sistema, evitando que riscos se tornem em falhas. É apresentada também, a possibilidade de interação de modelos de biodigestão com métodos/modelos de detecção de falhas.

## MODELOS DE BIODIGESTÃO ANAERÓBIA

Se a modelagem matemática permite controlar melhor os processos a qual é aplicada, por outro lado demanda conhecimento acerca da utilização do modelo por parte dos operadores. Neste caso, modelos com alta complexidade acabam sendo restritos em sua utilização, devido ao grande número de parâmetros e variáveis que apresentam. Isso torna difícil coletar devidamente todas as informações necessárias. Diante disto, serão mostrados alguns modelos aplicados no tratamento anaeróbio e as eventuais considerações à sua aplicação.

Sabendo-se da importância do processo de digestão anaeróbia no tratamento de efluentes com alta taxa orgânica e sua ação promissora na geração de energia renovável, em 2002 foi publicado pela International Water Association (IWA) o primeiro modelo genérico de digestão anaeróbia, a partir de modelos desenvolvidos anteriormente. O modelo foi criado com o objetivo de aumentar a aplicação das ferramentas de modelagem para projeto, operação e otimização de plantas, promover desenvolvimento na otimização e controle, almejando a implementação direta em larga de escala, além de permitir a criação de uma base comum para desenvolvimento de modelo e estudos de validação, tornando os resultados obtidos mais comparáveis e auxiliar na transferência de tecnologia da pesquisa para a indústria [7]. Ainda segundo Batstone et. al. [6] é válido pontuar que antes da criação do ADM1 já tinham sido desenvolvidos diversos modelos para o processo, que eram utilizados por engenheiros, provedores de tecnologia de processo e operadores. Porém, era uma utilização muito limitada principalmente pela variedade de modelos disponível e com isso sua grande especificidade. Na figura 2, abaixo, é mostrada a sequência de processos considerada pelo ADM1.

Figura 2 - Rotas Metabólicas da Biodigestão Anaeróbia



Fonte: Silva, 2016 (adaptado de Baststone *et. al*, 2002).

O modelo considera a etapa de desintegração da matéria orgânica e posterior hidrólise, que torna a matéria complexa em monômeros, de mais fácil assimilação. Estes monômeros (proteínas, lipídeos e ácidos graxos de cadeia longa) conseguem atravessar as paredes celulares das bactérias fermentativas, para que o processo continue. As proteínas são degradadas em aminoácidos, lipídeos em ácidos graxos de cadeia longa e os carboidratos em açúcares solúveis. As bactérias acidogênicas absorvem estes produtos e excretam os ácidos butírico, valérico, propiônico, acético, lático, etanol e substâncias orgânicas como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ . Na acetogênese, são formados o acetato,  $\text{H}_2$  e  $\text{CO}_2$ . Enfim, o acetato e o  $\text{CO}_2$  são convertidos em metano pela ação das bactérias metanogênicas. Os fenômenos englobados pelo modelo são de natureza físico-química, química, bioquímica e biológica, incluindo 19 processos bioquímicos de taxa de transferência da fase gasosa para a líquida, com 105 parâmetros cinéticos e estequiométricos e 6 processos cinéticos de equilíbrio ácido-base, quando considerado como conjunto de equações diferenciais ordinárias. Nos processos bioquímicos são incluídas etapas de desintegração de particulados homogêneos a carboidratos, proteínas e lipídeos, além da hidrólise destes componentes em açúcares, aminoácidos, e ácidos graxos de cadeia longa (LCFA) e hidrogênio, acidogênese de açúcares e aminoácidos a ácidos voláteis; acetogênese de LCFA e ácidos voláteis a acetato e metanogênese a partir de acetato e hidrogênio, formando metano e dióxido de carbono [8].

O ADM 1 foi utilizado para simular diferentes efluentes industriais, apresentando sucesso, além de extensões e modificações em processos específicos que foram implementadas ao decorrer do tempo. Produção de biohidrogênio, modelagem de P, S e Fe, parcela considerando o composto tóxico cinida, compostos fenólicos, diversidade microbiana, redução de sulfato, remoção simultânea de Carbono e Nitrogênio, são algumas das extensões propostas (Penumathsa *et. al*. 2008, Alsina *et. al*. 2016, Zaher *et. al*. 2006, Fezzani & Cheikh, 2009, Ramirez *et. al*. 2009, Fedorovich 2003, Lu *et. al*. 2016, Silva *et. al*., 2016) [9].

Outro modelo utilizado no processo é o de lógica Fuzzy, por apresentar maior simplicidade apesar de conferir menos precisão. São utilizados visando o diagnóstico operacional de plantas, além da manutenção do sistema. Borges [4] utilizou a lógica Fuzzy para um sistema de detecção de falhas da planta de tratamento anaeróbico da ETE-UFES, além de modelos para predição da produção de biogás. Para a predição de biogás, o erro na fase de validação foi de 11% em alguns pontos. A autora atribuiu estes erros devido à incerteza das medições. Para o sistema de falhas, foi desenvolvido um Sistema de Diagnóstico baseado em modelos (SDM), baseado em 3 módulos. O primeiro módulo corresponde a etapa de estimação da concentração de DQO afluente a partir de valores de turbidez afluente e precipitação pluviométrica, O segundo módulo corresponde a estimativa da produção de biogás no reator, baseando-se na temperatura ambiente, na carga orgânica volumétrica afluente e na produção de biogás do dia anterior e o terceiro módulo é responsável por fornecer o diagnóstico do estado do processo, a partir de informações da planta obtidas on-line e daquelas obtidas através dos módulos 1 e 2. O modelo deu diagnósticos de elevação de matéria orgânica, sobrecarga hidráulica, subcarga orgânica ou hidráulica e/ou baixa atividade metanogênica. Algumas variáveis não puderam ser modeladas (toxicidade por cloreto, presença de gordura no topo do reator, ou erro humano ou mecânico durante as medições). Apesar disso, o sistema indicou a presença de perturbações não modeladas indicando os desvios da normalidade, norteando a tomada de decisões por parte dos operadores.

Sarabia, Mirques [10] apresentaram uma lei de controle baseada em lógica Fuzzy, validada por simulações no ADM1 para tratamento de águas residuais de vinícolas, considerando como variável manipulada a matéria orgânica afluente e a controlada a produção de metano. Os resultados foram satisfatórios, indicando bom desempenho em termos de amplitude e velocidade de estabilização no set point. Uma vantagem que os autores relatam quanto à este tipo de controlador, é que não é necessário vasto conhecimento acerca de técnicas de controle, o que possibilita a utilização por parte dos operadores.

Hess, Bernard [11] analisaram e caracterizaram a dinâmica de um sistema instável para melhor avaliação do risco de acidificação levando em consideração a taxa de diluição, concentração de substrato afluente, fração de biomassa no líquido, vazão molar de metano, crescimento bacteriano, degradação de substrato e rendimento de produção de metano. A partir das zonas de risco de desestabilização identificadas, foi proposto um ranking dos índices de zonas de risco, facilitando ao operador a visualização.

Trávníček *et. al*. [12] analisaram os riscos ambientais de um reator anaeróbico, considerando o perigo de contaminação dos sistemas aquáticos. Levaram em consideração dois cenários: o primeiro, composto por dano ao reator ou na válvula com vazamento parcial do efluente e o segundo, dano total do reator, com vazamento de todo o efluente. Para tal, utilizou a metodologia HAZOP para identificação dos riscos gerais, EAI para selecionar as fontes de risco, o sistema PROTEUS para análise quantitativa dos riscos, EHI para determinação da aceitabilidade destes riscos e por fim, a abordagem ALARP para estabelecer se os níveis de



risco são toleráveis. Para a execução destes métodos, considerou-se a toxicidade, viscosidade, densidade e solubilidade em água dos compostos (sólidos voláteis, carbono, nitrogênio, oxigênio, enxofre, fósforo, fibras, potássio, alumínio, cálcio, ferro, magnésio, proteínas, gorduras e fibras). Os resultados mostraram que os riscos foram aceitáveis para os casos modelados, e que o grau de contaminação do sistema aquático irá depender de fatores como a distância do reator do corpo hídrico, seu volume, terreno em volta, entre outros.

Desta forma, é possível notar como a modelagem se torna uma ferramenta para a gestão/ análise e mitigação de riscos em uma planta de tratamento anaeróbio, já que pelos diagnósticos das diversas variáveis do processo, permite um melhor controle da operação. Neste sentido, estando atento às respostas do modelo, é possível identificar potenciais falhas.

## RISCOS EM SISTEMAS DE BIODIGESTÃO ANAERÓBIA

Apesar das vantagens da utilização do biogás, o processo de biodigestão anaeróbia configura riscos de impactos ambientais e à saúde humana. O primeiro problema que pode se apontar aqui são as emissões atmosféricas, de ruídos, vibrações, e possíveis contaminações de água/solo. As principais fontes que emitem ruídos são a movimentação de veículos pesados e a operação de equipamentos. Sobre os veículos pesados, a intensidade depende da rotina do estabelecimento, já a nível operacional os compressores, bombas, equipamentos para queima de biogás são os causadores do ruído. É recomendado protetores auriculares além de ser necessária uma avaliação do local de instalação dos equipamentos, para que os que emitem mais ruídos fiquem distantes dos locais onde os operadores passam mais tempo [13].

As emissões atmosféricas são as mais preocupantes ao passo que estão presentes em quase todas as etapas do processo anaeróbio, já que os produtos da biodigestão são  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$ , afirmando o potencial poluidor do processo. Também é possível considerar falhas no monitoramento e, os perigos da produção e manuseio do produto. O recebimento de substrato, conversão da matéria orgânica a  $\text{CH}_4$  e a geração de eletricidade são as principais fontes de emissões [14]. Segundo Van Haandel & Lettinga (1994) *apud* Lobato [15], existem quatro rotas para conversão da matéria orgânica a ser tratada no processo de digestão anaeróbia: conversão em lodo, conversão em metano, conversão por oxidação e permanência na fase líquida. Durante o processo, é inevitável a formação de co-produtos gasosos, especialmente gás metano e sulfetos, que causam mal odor e prejudicam o sistema [16].

## EMISSÕES DE GASES

Em relação ao  $\text{CH}_4$ , o estudo de Daelman et. al (2012) *apud* Campos et. al. [2] relata que da quantidade de matéria orgânica afluyente que chega às plantas de tratamento já foi emitida 1% como  $\text{CH}_4$ . Segundo os autores, as principais fontes de metano detectadas foram as unidades de linha de lodo onde o processo ocorre. O espessante de lodo primário, a centrífuga, o gás de exaustão para a cogeração da planta, o tanque do lodo digerido, o tanque de armazenamento para o lodo ressecado em conjunto, contribuem com cerca de 71% das emissões de metano da WWTP (Wastewater Treatment Plant), enquanto as emissões restantes vem do  $\text{CH}_4$  dissolvido no efluente, que não foi totalmente removido no tratamento biológico [2].

De acordo com Glória et. al. [16], perdas de gás metano representam risco ao meio ambiente, além de indicar perda de potencial energético do sistema já que este gás apresenta GWP 25 vezes maior que o  $\text{CO}_2$ , o que significa que em 100 anos, 1t de  $\text{CH}_4$  terá o efeito de aquecimento equivalente a 25t de  $\text{CO}_2$  [1]. Além disso, o gás apresenta limite de inflamabilidade de 5,0 – 15,0% (Fispq Industrial Air Liquid, 2012). Ou seja, maiores concentrações de metano dissolvido na fase líquida levam a uma menor eficiência de recuperação. Souza [17] afirma a importância de estudos sobre a parcela devida ao metano dissolvido no efluente do reator, pois pouco se sabia sobre isso e menos ainda se faz neste ramo da biodigestão anaeróbia, particularmente reatores UASB.

Algumas características do  $\text{CH}_4$  um gás incolor, inodoro, é pouco solúvel em água, não apresenta toxicidade, é menos denso que o ar e é altamente inflamável. Não oferece efeitos nocivos ao entrar em contato com os olhos e a pele, mas quando inalado, pode causar dores de cabeça, vertigem, sonolência, inconsciência e ainda, pode levar até à morte por falta de oxigênio [18].

Quanto ao  $\text{CO}_2$ , sua emissão é atribuída tanto ao consumo energético quanto à oxidação da matéria orgânica [2]. Sobre o consumo energético Cakir e Stenstrom [19], levam à consideração que as altas concentrações afluentes, o processo anaeróbio produz  $\text{CO}_2$  “negativo”, devido à combustão do biogás que supre a demanda de energia que seria requerida de combustíveis fósseis.

O  $\text{CO}_2$  se caracteriza como um gás inodoro, incolor, não sendo inflamável e, ainda, apresenta maior

densidade do que o ar. Afeta a circulação e respiração, apresentando potencial de asfixia ao ser inalado. Em menores concentrações pode provocar dor de cabeça, sonolência, ardência no nariz e garganta, aumento de frequência cardíaca, excesso de salivação, vômitos e inconsciência, podendo levar até à morte [14, 20].

O  $\text{CO}_2$ , juntamente com outros gases, especialmente  $\text{H}_2\text{S}$  devem ser separados do  $\text{CH}_4$  pelo processo de purificação, já que reduzem o potencial calorífico do gás e ainda, contribuem para danos nos equipamentos. Além de danos em equipamentos, o  $\text{H}_2\text{S}$  é o principal gás que gera mal odor nas estações de tratamento.

Este gás é tóxico (a partir de 20 ppm já pode causar lesão na córnea devido à exposição prolongada), é inflamável e representa perigo para o meio ambiente e para a saúde humana. A depender da sua concentração pode causar lesão na córnea por exposição prolongada, salivação, tosse, fraqueza, tontura, desmaios, ou ainda ser letal. Além disso, ataca os motores utilizados no processamento do biogás, bem como as tubulações e outros equipamentos, causando corrosão, incrustação e, com isso reduz a eficiência do processo [14]. Em solução aquosa, este gás apresenta propriedades corrosivas e, em misturas gasosas, mesmo estando em baixas concentrações pode apresentar toxicidade. Quando em altas concentrações no ar, causa prejuízos nas glândulas olfativas, o que gera perda do olfato. É importante lembrar que há outros compostos voláteis em menor escala, que também se formam durante a decomposição anaeróbia e podem gerar maus odores [17].

Considera-se que os problemas mais comuns em relação a odor são causados por misturas de baixas concentrações de compostos com alta volatilidade que apresentam baixo limite de detecção no ar. Desta forma, e emissão de gases odorantes se tornam um problema aos sistemas de tratamento, ao passo que podem se tornar indesejáveis à vizinhança. Pode-se relacionar o surgimento de gases odorantes com as características do afluente do sistema, desempenho dos reatores e a descarga turbulenta. A concentração destes gases pode variar consideravelmente de acordo com estes fatores [21].

## FALHAS DE MONITORAMENTO

Como já se sabe, o biogás é composto por diferentes gases, que possuem potencial de risco para o ambiente e seres humanos. Portanto, a manipulação e a operação do sistema que o gera, deve ser feita de forma altamente segura para que sejam prevenidas falhas ou acidentes. Diante disto, é necessário entender as possíveis consequências dos acidentes, para que sejam estabelecidos níveis toleráveis de risco. Esta abordagem permite avaliar qual o risco associado à um determinado equipamento/ etapa em função da chance de ocorrer algum problema [22].

O biogás sozinho não possui propriedades explosivas, apesar de ser inflamável. No caso, a mistura explosiva ocorre quando o metano é misturado ao ar em proporções dentro do limite de explosividade, os valores fora dessa faixa não representam risco. Há risco de explosão devido ao vazamento de gases inflamáveis, causando queimaduras ou ferimentos por estilhaços. Podem ser gerados incêndios pela queima não controlada de gases, o que além de difundir os gases nocivos, causa degradação das estruturas do local. E, por fim, há o risco de contaminação pelo próprio esgoto manipulado, água de processo e os agentes biológicos. Portanto, sugere-se sempre o uso de EPI's e cumprimento das normas de higiene e operação [14, 13].

As instalações e equipamentos são passíveis de falhas mecânicas, seja pela corrosão, falta de manutenção, má qualidade ou as alterações que ocorrem nos parâmetros do processo por não serem devidamente controladas pelos sistemas de controle. Isto ocorre quando estes não identificam variações nos parâmetros do processo, permitindo distúrbios por falta de controle/ajustes adequados [13, 14].

Os tanques, tubulações, máquinas em geral, devem estar conservados, já que são passíveis de ocorrências de falhas mecânicas, representando potencial risco de poluição/contaminação de solos e corpos hídricos. Para que isso seja prevenido, devem ser adotadas práticas de manejo do substrato, do biogás, do lodo e do efluente remanescente. Devem ser considerados também os riscos devido à desatenção e falta de capacitação dos colaboradores, o não atendimento das normas, configurando os perigos pessoais, que são causados por falhas humanas. Considera-se também, os perigos ambientais causados pelo armazenamento incorreto de produtos inflamáveis e distâncias próximas entre equipamentos e áreas operacionais [13].

Em conjunto, todos estes fatores de potenciais falhas de monitoramento e operação, cooperam para um quadro de risco ambiental, que engloba toda a dimensão aqui relatada.

O monitoramento garante um processo mais seguro, com menores instabilidades, permitindo prever possíveis falhas e, evita-las, já que mesmo pequenas variações nas condições ideais podem ser verificadas. No caso de plantas de tratamento, especialmente quando se faz a recuperação energética do biogás, há motivos que levam ao estabelecimento de um monitoramento contínuo e automatizado. Por ser um processo extremamente sensível, a otimização do sistema permite controlar continuamente de maneira eficaz a grande

variedade de parâmetros que influenciam no processo anaeróbio. Este sistema de monitoramento deve operar para todas as unidades técnicas que necessitem como bombas, agitadores, válvulas, indicadores/controladores de nível, vazão, e parâmetros para o gás e substrato [14].

## MITIGAÇÃO DA EMISSÃO DE GASES, SEGURANÇA E MONITORAMENTO

Segundo Noyola et. al. [21], em muitos casos de pequenas plantas de tratamento anaeróbio municipal, o biogás é apenas “ventilado”, transferindo a poluição da água residual para a atmosfera, contribuindo para o inventário de gases de efeito estufa.

Pauss et. al [23], afirma que o  $\text{CH}_4$ , além de pouco solúvel necessita de altos coeficientes de transferência de massa. Já  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$  apresentam alta solubilidade em meio aquoso, se desprendendo mais facilmente. Nos processos anaeróbios, onde as espécies gasosas são formadas na fase líquida e tendem a escapar para a fase gasosa, essas limitações de transferência implicam a permanência de gases dissolvidos em concentrações maiores do que o valor de equilíbrio, o que compromete o sistema.

Diversos autores retrataram o problema do  $\text{CH}_4$  dissolvido em efluentes anaeróbios, demonstrando por meio de experimentos que a concentração dele pode estar muito acima dos valores previstos pela Lei de Henry, que rege o comportamento dos gases, o que significa dizer que o gás se encontra supersaturado. No trabalho de Crone et. al. [24], cita diversos estudos em que são relatados valores de perda metano no efluente, Giménez et. al. (2012) retratou um valor de 43%, Smith et. al. (2013), 40 – 50% e Cookney et. al (2016), que relatou 88%, entre outros autores que se dedicaram a questão. Em todos estes trabalhos o grau de saturação esteve acima do proposto pela lei de Henry (1), englobando valores de 1,009 – 1,67 vezes a constante de Henry. No estudo de Souza et. al. [25], foi retratado uma média de 36 – 41% de perda de metano no efluente.

Diversas técnicas foram propostas para a remoção ou recuperação de metano dissolvido em efluentes anaeróbios: oxidação biológica, aeração, membranas, *Air stripping*, reator de esponja (DHS), entre outras. É necessário antes de tudo avaliar o gasto econômico e energético para aplicação destas técnicas.

Crone et. al. [24] em seu estudo, utilizou valores reportados na literatura para recuperação de metano dissolvido e consumo de energia em AnMBR tratando água residual doméstica e comprovou que o sistema é capaz de produzir toda a energia requerida para operar, mesmo em temperaturas reduzidas (9-15°C). O autor [24] ainda cita que Cookney et. al. (2012), provou que usando uma corrente de arraste de fase gasosa para líquida foi possível recuperar 98% do metano dissolvido com uma concentração de 53% no gás recuperado, utilizada para geração de eletricidade.

Gloria et. al. [16], testou *Air stripping* e dissipação para remoção tanto de  $\text{CH}_4$  quanto  $\text{H}_2\text{S}$  dissolvidos, concluindo que para o caso de *Air stripping*, apenas eficiências médias de remoção foram atingidas (30%  $\text{CH}_4$ , 40-60%  $\text{H}_2\text{S}$ ), atribuindo seus dados à taxa de injeção de ar aplicada. Já para a dissipação, cerca de 60% de remoção foi observada para os dois gases. Outras alternativas foram propostas também para o controle de gases odorantes, a depender das condições do sistema. Para baixa concentração de gases, utiliza-se a combustão direta, adsorção e métodos bioquímicos [21]. Porém, para seleção em sistemas compostos por reatores anaeróbios, devem-se considerar as características locais, biodegradabilidade dos gases, origem das emissões, aspectos da captação e condução dos gases, relação  $\text{H}_2\text{S}/\text{CH}_4$ , planos de recuperação de energia e os objetivos do tratamento. Métodos físicos (absorção, adsorção, separação por membrana, condensação), químicos (lavador químico, oxidação catalítica, oxidação térmica, combustão direta, inibição química) e físico-químicos (biofiltros, biolavador, biorreator de membrana, sistemas aeróbios de fase líquida). A grande questão é optar por um método que seja eficiente para atingir o objetivo esperado e que tenha viabilidade econômica [26].

Para garantir segurança na operação da planta, uma série de fatores deve ser levada em consideração e devem ser seguidos procedimentos que permitam controlar a operação de forma eficaz. Inicialmente, é necessário reconhecer os riscos relativos à operação para poder pensar nas formas de evita-los e mitiga-los. Em relação aos incêndios os procedimentos de proteção são classificados em proteção estrutural, técnica e organizacional, sendo que cada um deles apresenta as instruções para a aplicação. Além disso, deve-se elaborar um plano para bombeiros indicando as áreas de risco e contendo as informações gerais da planta, plano geral, acesso seguro a local de veículos, informações sobre vizinhança, pontos de água, áreas de acesso restrito ou proibido, bem como informações sobre as substâncias perigosas, explosivas, tóxicas e inflamáveis [14].

Quanto ao risco de explosões, ações de prevenção são classificadas em três tipos: evitar a formação da atmosfera explosiva; supervisionar a operação; garantir uma operação segura. Deve - se também fazer um levantamento das fontes de ignição do local contendo ações de prevenção. Também é importante fazer o



zoneamento das zonas de riscos de explosão. Por fim, os funcionários devem ser capacitados para exercerem suas funções e, utilizarem os EPI's nas áreas indicadas.

Para avaliação dos riscos, um dos métodos que podem ser utilizados é o FMEA, uma ferramenta de Análise do Tipo e Efeito de Falha (*Failure Mode and Effect Analysis*). Seu objetivo inicial é evitar, por meio da análise das falhas potenciais e possíveis ações de melhoria, o acontecimento de falhas no projeto do produto ou do processo analisado. No caso de plantas de tratamento, atua aumentando a confiabilidade, de modo a diminuir a probabilidade de potenciais falhas ou aumentar a confiabilidade do processo/ produto por meio de falhas que já ocorreram anteriormente. [27]. Engloba etapas de planejamento, análise de falhas em potencial, avaliação de riscos, melhoria e continuidade.

Há também as técnicas FTA (*Fault Tree Analysis* – Diagrama de árvore de falhas) e ETA (*Event Tree Analysis* - Diagrama de árvore de eventos). São usadas quando se tem as consequências de falhas conhecidas, porém não há informações sobre suas causas. Por este método, é possível calcular a probabilidade de ocorrência da falha a partir de eventos iniciais, desde que cada um dos componentes que podem causar o evento final tenha sua probabilidade de ocorrência conhecida. Os passos para execução do método levam em consideração a definição do sistema, o acidente potencial e a definição dos limites, a construção da árvore de falhas, estabelecer as sequências de acidentes resultantes, e identificar as principais falhas a serem controladas [28]. Há mais métodos de análise de riscos, que devem ser selecionados de acordo com o objetivo do processo, características do meio e todos os outros parâmetros que já foram citados neste trabalho, que operam para aumentar confiabilidade e segurança na sua execução de uma operação, mitigando os riscos e as potenciais falhas que podem ocorrer.

## RESULTADOS

A partir do estudo realizado, é possível explicitar os métodos relatados por meio da Tabela 2, permitindo melhor representação das ocorrências. Nesta tabela são expostos os trabalhos citados que abordaram de modo mais exato o uso das ferramentas de modelagem e análise de risco ou detecção de falhas, de modo que possibilitam ponderar sobre um avanço nessas ferramentas a fim de unir os objetivos de ambas simultaneamente.

Tabela 2 – Ferramentas aplicadas nos estudos relatados.

Modelo/ Ferramenta	Autor	Aplicação
ADM 1	Batstone et. al. (2002)	Predição de produção de biogás, com vasta consideração de parâmetros
Lógica Fuzzy	Borges (2005)	Predição da produção de biogás
Lógica Fuzzy	Sarabia, Mirques (2012)	Sistema de detecção de falhas em planta de tratamento anaeróbio
Análise de Risco	Hess, Bernard (2007)	Controlador de processo
Análise de Risco	Trávníček et. al. (2016)	Identificação de zonas de risco de acidificação
		Riscos ambientais de reator anaeróbio para a contaminação de sistemas aquáticos

Fonte: Autores.

## COMENTÁRIOS FINAIS

O artigo empregou a revisão da literatura com foco nos riscos presentes em sistemas de tratamento anaeróbio com potencial recuperação do biogás. Foi possível fazer uma análise das diversas situações, possibilitando apresentar ferramentas de análise de risco e, também, ferramentas de modelagem para predição de biogás que podem ser utilizadas para auxiliar a controlar os riscos no processo. Estas ferramentas, também podem auxiliar os operadores nas tomadas de decisão. Ficou evidente que para uma melhor operação das plantas, todos os fatores devem estar operando em harmonia, pois são interdependentes. Considera-se também que o sucesso da operação está em sua grande parte nas mãos daqueles que o operam, por isso é tão importante que tenham preparo e conhecimento para compreender os modelos do processo. Portanto, é necessário seguir as indicações das normas que regem a segurança do processo, assim como executarem as funções de modo preciso. Pesquisas envolvendo biodigestão anaeróbia são de extrema

importância, ao passo que permitem melhorar sistemas para tratar efluentes e ao mesmo tempo produzir energia. Neste caso, através do levantamento de dados, verificou-se também que há uma dificuldade em encontrar estudos que relacionem diretamente de análise de risco e sistemas de biodigestão anaeróbia. A maioria dos estudos encontrados se remete a situações de risco muito específicas, como já foi citado, havendo necessidade de mais trabalhos que considerem o uso de ferramentas de modelagem de biodigestão anaeróbia associado à prevenção de riscos, detecção de falhas, e outros fatores que interferem no processo. Neste sentido, poderia ser utilizada uma ferramenta de modelagem que unisse a avaliação físico-química, biológica e cinética do sistema, e ao mesmo tempo avaliando os riscos da operação, indicando-os aos operadores. Isto, em prol de se permitir uma visão ampliada do processo, interagindo as várias ferramentas que estão disponíveis para garantir segurança e eficiência na operação.

## REFERÊNCIAS

- [1] DIKSHA GUPTA, SANTOSH KUMAR SINGH, “Greenhouse Gas Emissions from Wastewater Treatment Plants: A Case Study of Noida”, *Journal of Water Sustainability*, v. 2, n. 2, 131, (2012).
- [2] J. L. CAMPOS, D. VALENZUELA-HEREDIA, A. PEDROUSO, A. VAL DEL RÍO, M. BELMONTE, A. MOSQUERA-CORRAL, “Greenhouse Gases Emissions from Wastewater Treatment Plants: Minimization, Treatment, and Prevention”, *Hindawi Publishing Corporation*, v. 2016, 1, (2016).
- [3] PROBIOGAS, “Capacitação e QSMS na operação de ETE’s com aproveitamento energético do biogás. Capítulo 2: Riscos e perigos no tratamento de esgotos e aproveitamento do biogás”, Ministério das Cidades, (2015).
- [4] R. M. BORGES, “Desenvolvimento E Aplicação De Um Sistema De Diagnóstico Fuzzy Baseado Em Modelos Para Reatores Uasb Tratando Esgoto Sanitário”, 2005, 141f, Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Espírito Santo, (2005).
- [5] PEDRO LUZ BRANCOLI, “Avaliação experimental da co-digestão anaeróbia de resíduos orgânicos e lodo de esgoto em digestores têxteis”, 2014, 97f, Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade federal do Rio de Janeiro, (2014).
- [6] R. L. R. B. COBRA, M. GUARDIA, G. A. QUEIROZ, J. A. OLIVEIRA, A. R. OMETTO, and K. F. ESPOSTO, “Waste” as the Common “Gene” Connecting Cleaner Production and Lean Manufacturing: A Proposition of a Hybrid Definition”, *Environmental Quality Management*, (2015).
- [7] D.J. BATSTONE, J. KELLER, I. ANGELIDAKI, S.V. KALYUZHNYI, S.G. PAVLOSTATHIS, A. ROZZI, W.T.M. SANDERS, H. SIEGRIST AND V.A. VAVILIN, “The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1)”, *Water Science and Technology*, v. 45, n. 10, p. 65, (2002).
- [8] CARLOS EDUARDO PEREIRA MENDES DA SILVA, “Modelagem matemática e simulação da remoção simultânea de carbono e nitrogênio em reator anaeróbio-anóxico: uma aplicação do ADM1”, Tese (Mestrado em Engenharia Industrial) – Universidade federal da Bahia, Salvador, (2016).
- [9] DAMIEN J. BATSTONE, DANIEL PUYOL, XAVIER FLORES-ALSINA, JORGE RODRÍGUEZ, “Mathematical modelling of anaerobic digestion processes: applications and future needs”, *Rev Environ Sci Biotechnol.*, v. 14, p. 595, (2015).
- [10] MAURICIO HERNÁNDEZ SARABIA, LILIANA R. DELGADILLO MIRQUEZ, “Control del flujo de metano en el tratamiento de aguas residuales industriales usando lógica fuzzy”, *El Hombre y la Máquina*, n. 38, p. 22, (2012).
- [11] JONATHAN HESS, OLIVIER BERNARD, “Advanced Dynamical Risk Analysis For Monitoring Anaerobic Digestion Process”, *10th International IFAC Symposium on Computer Applications in Biotechnology Preprints*, Cancún, Mexico, June 4-6, 2007, v.1, p.381, June 4-6, (2007).
- [12] Petr Trávníček, Luboš Kotek, Petr Junga, “Environmental Risk Assessment of a Biogas Station”, *Process Safety Progress*, v.35, n.4, p. 360, (2016).
- [13] FUNDACAO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE – FEAM, FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE MINAS GERAIS, FIEMG, COOPERAÇÃO ALEMÃ PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, GIZ, “Guia técnico ambiental de biogás na agroindústria”, Belo Horizonte, (2015).
- [14] PROBIOGAS, “Capacitação e QSMS na operação de ETE’s com aproveitamento energético do biogás”, Capítulo 1: Legislação e Normas pertinentes à qualidade, segurança, meio ambiente e saúde em ETE’s, p. 1, (2015).
- [15] LÍVIA CRISTINA DA SILVA LOBATO, “Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores uasb tratando esgoto doméstico”, 2011, 184f, Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, (2011).
- [16] R. M. GLÓRIA, T. M. MOTTA, P. V. O. SILVA, P. DA COSTA, E. M. F. BRANDT, SOUZA, C. A. L. CHERNICHARO, “Stripping and dissipation techniques for the removal of dissolved gases from anaerobic

effluents". *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 33, n. 04, p. 713, (2011).

[17] CLAUDIO LEITE DE SOUZA, "Estudo das rotas de formação, transporte e consumo dos gases metano e sulfeto de hidrogênio resultantes do tratamento de esgoto doméstico em reatores UASB", Tese (Doutorado em Saneamento) – Universidade Federal de Minas Gerais, (2010).

[18] Ficha de Informações de Produtos Químicos Linde – Metano

[19] F.Y. CAKIR, M.K. STENSTROM, "Greenhouse gas production: A comparison between aerobic and anaerobic wastewater treatment technology", *Water Research*, v. 39, p. 4197, (2005).

[20] Ficha de Informações de Produtos Químicos White Martins – Dióxido de Carbono, comprimido

[21] ADALBERTO NOYOLA, JUAN MANUEL MORGAN-SAGASTUME, JORGE E. LÓPEZ-HERNÁNDEZ, "Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odor control and energy/resource recovery", *Environmental Science and Bio/Technology*, v.5, p.93, (2006).

[22] FILYPI SUAZO DE LIMA, TIAGO AZEVEDO DE ARAÚJO, EDUARDO AUGUSTOS BRITO ARÊAS, JOICE VEIRA DE SOUZA LIMA, LUIZ CÉSAR PAULILLO, "Análise de risco associados ao duto de biogás gerado no sistema de tratamento de efluente – UASB". *Diálogos & Ciência – Revista da Faculdade de Tecnologia e Ciências – Rede de Ensino FTC.*, v. 9, n. 27, (2011).

[23] ANDRE PAUSS, GERALD ANDRE, MICHEL PERRIER, AND SERGE R. GUIOT, "Liquid-to-gas mass transfer in anaerobic processes: Inevitable transfer limitations of methane and hydrogen in the biomethanation process". *Appl Environ Microbiol*, v.56, n.6, p.1636, (1990).

[24] BRIAN C. CRONE, JAY L. GARLAND, GEORGE A. SORIAL, LELAND M. VANE, "Corrigendum to "Significance of dissolved methane in effluents of anaerobically treated low strength wastewater and potential for recovery as an energy product: A review"", *Water Research*, v. 104, p. 520, (2016).

[25] C. L. SOUZA, C. A L. CHERNICHARO, S. F AQUINO, "Quantification of dissolved methane in UASB reactors treating domestic wastewater under different operating conditions", *Water Science & Technology*, v. 64, n.11, p. 2259, (2011).

[26] C. A. L. CHERNICHARO, R. M. STUETZ, C. L. SOUZA, G. C. B. MELO, "Alternatives for the control of odorous emissions in anaerobic reactors treating domestic wastewater. Nota Técnica." *Eng Sanit Ambient.*, v.15, n.3, p. 229, (2010).

[27] JOSÉ CARLOS DE TOLEDO, DANIEL CAPALDO AMARAL, "FMEA - Análise do Tipo e Efeito de Falha GEPEQ" – Grupo de Estudos e Pesquisa em Qualidade DEP – UFSCar.

[28] ERICK MIGUEL PORTUGAL HIDALGO, "Modelo para diagnose de falhas em regulador de velocidade de turbinas hidráulicas", 2010, 177f, Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.