

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
ESPECIALIZAÇÃO EM TECNOLOGIAS DA CADEIA PRODUTIVA DO BIOGÁS**

EDUARDO CLAVISO DO AMARAL

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM FILTRO PARA
REMOÇÃO DE UMIDADE DO BIOGÁS**

MEDIANEIRA

2018

EDUARDO CLAVISO DO AMARAL

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM FILTRO PARA
REMOÇÃO DE UMIDADE DO BIOGÁS**

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Especialista do Curso de Especialização em Tecnologias da Cadeia Produtiva do Biogás da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Medianeira.

Prof. Dr. Laercio Mantovani Frare

MEDIANEIRA

2019



TERMO DE APROVAÇÃO

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM FILTRO PARA REMOÇÃO DE UMIDADE DO BIOGÁS

por

EDUARDO CLAVISO DO AMARAL

Esta Monografia foi apresentada em 03 de Maio de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Tecnologias da Cadeia Produtiva do Biogás. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Laercio Mantovani Frare
Prof. Orientador

Rafael Arioli
Membro titular

Eduardo Eyng
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso –

RESUMO

AMARAL, EDUARDO CLAVISO. Desenvolvimento e Avaliação de um Filtro para Remoção de Umidade de Biogás. 2019. 32 f. Monografia (Especialização em Tecnologias da Cadeia Produtiva de Biogás). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2019.

Sendo o biogás um composto gasoso que além de seus principais componentes, os gases metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), também estão presentes em menor quantidade, gases contaminantes, como por exemplo, o sulfeto de hidrogênio (H_2S) e o vapor de água (H_2O), que, quando combinados formam um vapor sulfuroso, o qual é danoso às instalações metálicas circundantes ao biodigestor, tubulações e gasodutos, partes metálicas de motogeradores e turbinas, além de, diminuir o poder colorífico do biogás. Tendo em vista a remoção de um desses contaminantes, neste trabalho propõem-se a construção de um filtro – de baixo custo e montagem pouco complexa – para a remoção da umidade contida em uma corrente de biogás. Na sua montagem foram utilizados materiais de fácil aquisição, entre eles estão: tubo de policloreto de vinila (PVC) medindo 75 mm de diâmetro e 1000 mm de comprimento e três mm de espessura, dez anéis, também de PVC, recobertos com quatro camadas de telas sintéticas filtrantes – de nylon e flanela perfex. No entanto, após a montagem e a realização de alguns testes com o filtro, até o momento não foi possível obter resultados conclusivos sobre o desempenho na remoção de umidade, visto que, pela falta de biogás disponível para os testes, foi utilizado ar comprimido umidificado, sem controle de vazão e outros parâmetros físicos, assim como, não foram esgotadas todas as possibilidades de operação em relação à posição do filtro.

Palavras-chave: Purificação, desumidificador, tratamento de biogás.

ABSTRACT

AMARAL, EDUARDO CLAVISO. Development and Evaluation of a Biogas Moisture Removal Filter. 2019. 32 f. Monografia (Especialização em Tecnologias da Cadeia Produtiva de Biogás). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2019.

Biogas is a gaseous compound that, in addition to its main components, methane (CH_4) and carbon dioxide (CO_2) gases, are also present in lesser amounts of contaminating gases, such as hydrogen sulfide (H_2S) and water vapor (H_2O), which, when combined, form a sulphurous vapor, which is damaging to the metallic installations surrounding the biodigester, pipelines and pipelines, metal parts of motor generators and turbines, as well as reducing the calorific power of biogas. Considering the removal of one of these contaminants, this work proposes the construction of a filter - low cost and not very complex assembly - for the removal of moisture contained in a biogas stream. In its assembly were used materials of easy acquisition, among them are: polyvinyl chloride (PVC) tube measuring 75 mm in diameter and 1000 mm in length and 3 mm in thickness, ten rings, also PVC, covered with four layers of Synthetic filter cloths - nylon and perfix flannel. However, after assembling and conducting some tests with the filter, it has not been possible to obtain conclusive results on the moisture removal performance since, due to the lack of biogas available for the tests, humidified compressed air, without flow control and other physical parameters, as well as not having exhausted all possibilities of operation in relation to the position of the filter.

Keywords: Purification, Moisture removal, Biogas treatment.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Etapas da Digestão anaeróbica	11
Figura 2 - Tratamento do biogás conforme aplicação	14
Figura 3 - Secador de Biogás por Resfriamento	19
Figura 4 - Captura do Orvalho pela Salsola Crassa	21
Figura 5 - Besouro Stenocara Gracilipes	22
Figura 6 - Teia da aranha Uloborus Walckenaerius	22
Figura 7 - Coleta do Orvalho com Telas de Malha Raschel	23
Figura 8 - Mecanismo de Coleta do orvalho com Malha Raschel	24
Figura 9 - Fluxograma do processo de remoção de umidade	26
Figura 10 - Filtro removedor de umidade	27
Figura 11 - Redes de condensação	28
Figura 12 - Redes de condensação	29
Figura 13 - Formação da coalescência	29
Figura 14 - Montagem do filtro no sistema de ensaio	30
Tabela 1 - Composição média do Biogás	12
Tabela 2 - Propriedades dos Substratos	13

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	10
2.1 BREVE HISTÓRICO DO BIOGÁS	10
2.2 PRODUÇÃO E COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS.....	11
2.3 SUBSTRATOS PARA PRODUÇÃO DO BIOGÁS.....	12
2.4 CONTAMINANTES DO BIOGÁS	15
2.5 MÉTODOS DE SECAGEM DO BIOGÁS	16
2.5.1 Secagem por condensação	16
2.5.2 Secagem por adsorção	19
2.5.3 Secagem por absorção	20
2.6 PRECIPITAÇÃO DO ORVALHO NA NATUREZA.....	20
2.7 METODO ARTIFICIAL DE COLETA DO ORVALHO	23
3 MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.3.1 Recheio do filtro	28
3.3 MONTAGEM DO SISTEMA DE CONDENSAÇÃO	29
3.4 RESULTADOS E DSCUSSÃO	31
3.1 SIMULAÇÃO COM AR COMPRIMIDO	31
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	32

1 INTRODUÇÃO

Promover a gestão adequada dos resíduos e efluentes gerados nos processos produtivos industriais, na agroindústria e no meio urbano, é um dos grandes desafios da sociedade contemporânea. Dentre os diversos tipos de resíduos e efluentes, os de origem orgânica destacam-se como significativa fonte de contaminação ambiental, pois, quando destinados de forma inadequada, tornam-se uma relevante fonte de contaminação do solo e corpos hídricos, contribuem para a proliferação de vetores e doenças, geração de maus odores e emissão de gases causadores do efeito estufa, como por exemplo, o metano (CH_4) e o dióxido de carbono (CO_2) (FEAM, 2015).

Por outro lado, quando esses resíduos e efluentes são encaminhados para produção do biogás, passam de um passivo ambiental, para um coproduto para geração de energia de expressivo valor agregado.

Segundo estudos do Balanço Nacional de Energia (BEM, 2016), correspondente ao ano de 2015, no Brasil, o setor industrial demanda aproximadamente 32,5% de toda fonte energética consumida, sendo que, o consumo de energia elétrica corresponde a 37,6% do total consumido em território nacional. Portanto, fica evidente que, empresas que investem em projetos de eficiência energética, como a geração e utilização do biogás, por exemplo, economizam seus recursos financeiros, antes destinados para aquisição de energia elétrica.

O biogás é um composto gasoso constituído majoritariamente pelos gases CH_4 e CO_2 , além de conter alguns outros componentes considerados contaminantes, como por exemplo, o sulfeto de hidrogênio (H_2S) e o vapor de água (H_2O). Esses dois últimos componentes combinados formam um vapor sulfuroso corrosivo, danoso para as instalações internas e circundantes ao biodigestor e as partes metálicas externas como, por exemplo: tubulações, peças do moto-gerador, além de diminuir o poder calorífico do biogás.

Portanto, para que o biogás seja utilizado sem prejudicar os equipamentos utilizados no seu processamento, como por exemplo, partes metálicas de motores geradores e turbinas, assim como, tubulações metálicas e, até mesmo, as instalações circundantes ao biodigestor que lhe deu origem, se faz necessário que o

biogás seja submetido a uma etapa de purificação para que ao menos seja removido o máximo possível dos seus principais contaminantes, H_2O e o H_2S , antes de ser utilizado.

Além disso, para que um projeto de geração, purificação e utilização do biogás seja economicamente viável, ou seja, retorne o valor dos investimentos no menor tempo possível, é necessário que os métodos de purificação utilizados sejam eficientes e, ao mesmo tempo, acessíveis, de fácil manutenção e com baixa complexidade operacional.

Sendo assim, nesse trabalho propõem-se a construção de um filtro compacto construído em tubo de PVC para a remoção da umidade contida no biogás gás, sendo que, o princípio de funcionamento do filtro é similar ao processo de condensação do orvalho, utilizado por moradores de lugares áridos e montanhosos, onde o clima local dispõe de densos nevoeiros matinais e noturnos, ou seja, ar saturado com moléculas de água.

Nesses locais, utiliza-se grandes telas feitas de malha Raschel, um material sintético trançado que apresenta grande área superficial, que facilita a condensação do orvalho, ou seja, o ar satura com moléculas de água que condensa sobre as superfícies frias dos objetos do ambiente e da ampla tela feita com a malha Raschel.

O processo natural da condensação do orvalho é aproveitado por plantas e insetos que, utilizam as gotas condensadas sobre suas superfícies para suprirem suas necessidades biológicas por água. Tal fenômeno também é observado nas teias tecidas por algumas espécies de aranhas que, devido às propriedades hidrofílicas e a geometria particular dos filamentos da teia, facilita a condensação do orvalho sobre elas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo dará uma introdução sobre o processo de produção e histórico do biogás, suas propriedades físicas e químicas, os diversos gases que o compõem, assim como, os métodos de purificação do biogás e as possíveis formas de utilização do biogás como combustível.

2.1 BREVE HISTÓRICO DO BIOGÁS

Em 1882 a 1884, Louis Pasteur e Ulysse Gayon fermentaram estrume de cavalo em temperaturas e misturas variadas. Quando o estrume foi misturado com água, na temperatura de 35 °C, eles obtiveram 0,1 m³ de CH₄ (metano) com a quantidade de 1 m³ da mistura (CHASNYK et al.,2015).

Na Índia, o aproveitamento do metano gerado em um biodigestor aconteceu em 1859, onde o biogás gerado foi utilizado para o aquecimento de uma colônia de leprosos em Bombaim.

Em 1895, trinta e seis anos depois, registra-se a primeira experiência na Europa, onde o biogás produzido em biodigestores foi utilizado para geração de eletricidade, a qual foi utilizada na iluminação de algumas ruas da cidade de Exter, na Inglaterra (AMARAL, 2016).

Na década de 1990, a geração e utilização do biogás foi muito estimulada na Alemanha, onde incentivos governamentais fizeram com que o número de usinas de biogás triplicasse nos anos seguintes, passando de 850 usinas conectadas à rede de eletricidade em 1999, para 2700, até 2006 (DEUBLEIN & STEINHAUSER, 2008).

No Brasil, também na década de 1990, as questões de preservação ambiental ganharam grande impulso com a realização da Conferência Rio-92. Este evento fez com que o biogás ganhasse atenção. Neste evento foi exposto que o gás CH₄ é 21 vezes mais nocivo que o gás CO₂ como causador do efeito estufa. Dado à maior complexidade do uso do biogás para a geração de energia, estabeleceu-se que a simples queima do biogás em um *flare* (queimador) seria o suficiente. (BLEY-JUNIOR, 2015).

O protagonismo da hidrelétrica Itaipu Binacional com seu programa em energias renováveis tornou-se reconhecido em todo o setor energético brasileiro. Segundo Bley Junior (2015), com planejamento estratégico, a Assessoria de Energias Renováveis submeteu à diretoria geral brasileira um programa que se convencionou chamar de Plataforma Itaipu de Energias Renováveis, que promovia inovações para o desenvolvimento energético sustentável no país (AMARAL, 2016).

2.2 PRODUÇÃO E COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS

O biogás é um gás incolor e insolúvel em água, produto da digestão anaeróbica (DA). Está presente na natureza, podendo ser observado nos processos de decomposição natural, ou ainda, ser produzido em reatores conhecidos como biodigestores (BLEY-JUNIOR, 2015).

A DA é um processo complexo, composto por várias etapas. Consiste geralmente de quatro fases principais, são elas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Nesse processo estão envolvidos diversos microorganismos específicos a cada uma dessas fases (AMARAL, 2016). O fluxograma mostrado na Figura 01 mostra as fases da DA.

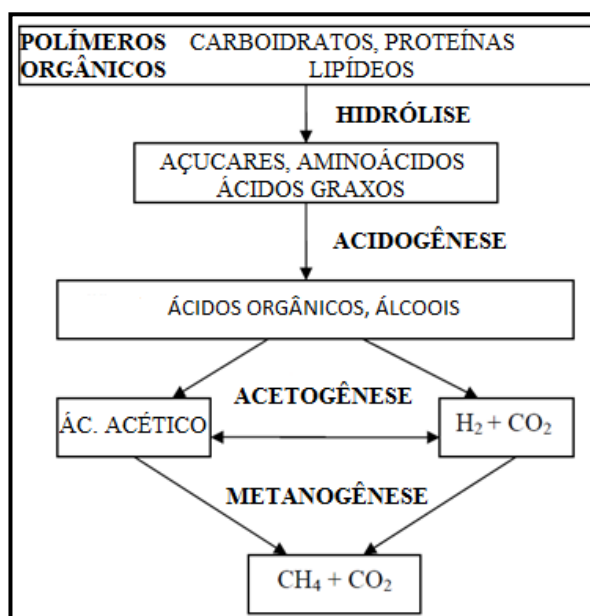


Figura 1 - Etapas da Digestão anaeróbica

Fonte: Amaral (2016).

A composição do biogás depende tanto da composição da biomassa que é introduzida no biodigestor, quanto de parâmetros operacionais, como temperatura, pressão e o potencial hidrogeniônico (pH) do meio aquoso, durante o processo da biodigestão.

A composição e o percentual médio dos gases que compõem o biogás são apresentados na Tabela 01.

Tabela 1 - Composição média do Biogás

Componente	Concentração
Metano (CH ₄)	50% - 75% em vol.
Dióxido de carbono (CO ₂)	25% - 45% em vol.
Água (H ₂ O)	2% - 7% em vol. (20 - 40 °C)
Sulfeto de hidrogênio (H ₂ S)	20 - 20.000 ppm
Nitrogênio (N ₂)	< 2% em vol.
Oxigênio (O ₂)	< 2% em vol.
Hidrogênio (H ₂)	< 1% em vol.

Fonte: Amaral (2016).

O poder calorífico do CH₄ é de 37,78 MJ m⁻³, portanto, quanto maior a porcentagem de metano, maior será o poder calorífico do biogás (MAMUN et al., 2016).

A utilização do biogás traz inúmeros benefícios para o meio ambiente e para quem o produz, entre eles, pode-se citar: transforma passivos ambientais, como a biomassa residual da agroindústria, resíduos sólidos urbanos e dejetos animais da agropecuária em ativos energéticos e reduzir o efeito estufa pela diminuição de metano emitido para a atmosfera.

2.3 SUBSTRATOS PARA PRODUÇÃO DO BIOGÁS

Há uma ampla variedade de substratos ricos em material orgânico com alto potencial de geração de biogás. Dentre eles encontram-se: os resíduos agrícolas, resíduos agroindustriais, resíduos da indústria e comércio, resíduos domésticos e culturas energéticas vegetais. A escolha do tipo de substrato depende principalmente da disponibilidade diária, custos com a logística e com a aquisição

desse substrato ao longo do tempo de operação do biodigestor (GUIA PRÁTICO DO BIOGÁS, 2010).

Na caracterização dos substratos, são analisados parâmetros como o teor de matéria seca (MS) e matéria orgânica seca (MOS). Desse modo é possível estimar a produção de biogás e o rendimento em metano esperado, como mostra a Tabela 02 (AMARAL, 2016).

Tabela 2 - Propriedades dos Substratos

Substrato	MS [%]	MOS [% MS]	Produção de Biogás [Nm ³ /t MF]	Produção de CH ₄ [Nm ³ /t MF]	Rendimento de CH ₄ [Nm ³ /t de MOS]
Aducos orgânicos					
Esterco líquido bovino	10	80	25	14	210
Esterco líquido suíno	6	80	28	17	250
Esterco bovino	25	80	80	44	250
Esterco de aves	40	75	140	90	280
Substratos da indústria de transformação					
Bagaço do malte	23	75	118	70	313
Grãos destilados de cereais	6	94	39	22	385
Torta prensada de canola	92	87	660	317	396
Polpa de batata	13	90	80	47	336
Bagaço de maçã	35	88	148	100	453
Bagaço de uva	45	85	260	176	448

Fonte: Adaptado de Guia prático do biogás (2010).

Os valores de produção de biogás e metano são apresentados em normal metro cúbico (Nm³) por tonelada (t) de matéria orgânica fresca (MF). Visto que, os volumes dos gases são dependentes da temperatura e da pressão em que estão submetidos.

A normalização do volume do biogás refere-se ao seu volume medido a 0 °C e pressão de 1.013 mbar (GUIA PRÁTICO DO BIOGÁS, 2010).

2.3 FORMAS DE UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS

O biogás é um uma fonte versátil de energia, pode ser utilizado em substituição aos combustíveis de origem fóssil para diversos fins, tais como: em caldeiras, fornos e estufas; na geração de eletricidade para uso local ou venda para concessionárias; na co-geração de eletricidade e calor; e até mesmo, como

combustível alternativo na linha de gás natural e para o uso veicular (JENDE et al., 2015).

Na Alemanha, um dos países que mais se consome biogás, a sua principal utilização se caracteriza pela conversão descentralizada em eletricidade no local de origem, principalmente através de geradores acionados por motores a combustão interna dos ciclos Diesel (ignição por compressão) ou ciclo Otto (ignição por centelha) (GUIA PRÁTICO DO BIOGÁS, 2010).

No entanto, para cada forma de utilização do biogás se faz necessário que suas propriedades físicas e químicas estejam de acordo com as exigências da tecnologia adotada para sua conversão e aproveitamento energético. Sendo assim, se faz necessário selecionar o tipo de tratamento mais adequado antes da sua utilização, conforme apresentado na Figura 02.

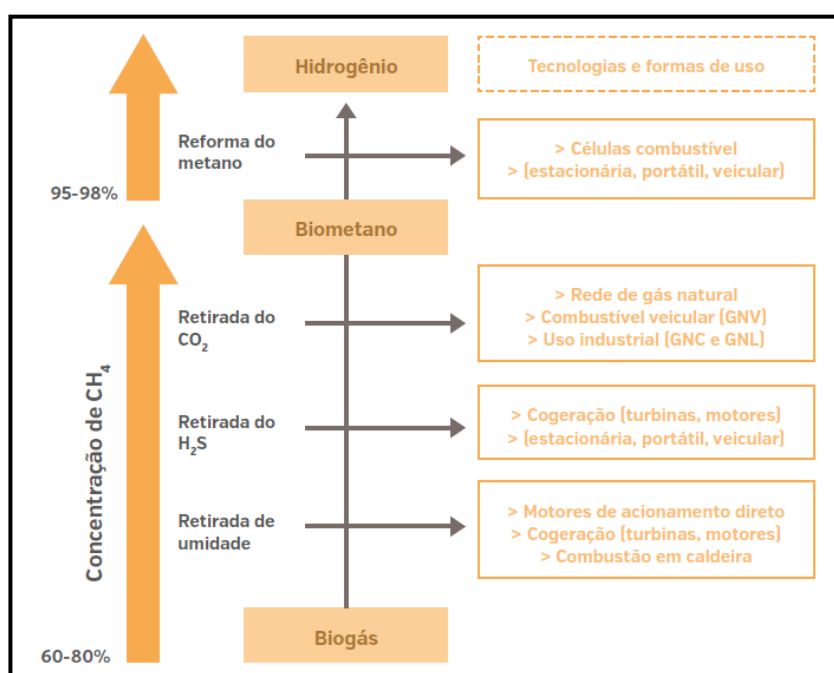


Figura 2 - Tratamento do biogás conforme aplicação

Fonte: Jende et al. (2015).

A partir de uma visão generalizada e simplista do processo de purificação do biogás, nota-se que, dependendo da tecnologia adotada para o seu aproveitamento energético, maior será o grau de tratamento que o gás terá que passar. Sendo que, muitas vezes necessita-se a combinação entre os métodos para alcançar a purificação desejada.

Ainda, segundo Jende et al. (2015), as principais opções de aproveitamento energético consideradas tecnicamente amadurecidas e comprovadas na prática são:

- Motores a gás estacionários (CHP) para gerar energia elétrica e térmica;
- Caldeiras a gás para gerar energia térmica;
- Injeção na rede de gás natural através da purificação do biogás a biometano, ou seja, 90% a 98% de CH_4 dependendo das regulações locais. Possibilitando o posterior aproveitamento como energia elétrica, térmica e energia veicular.

2.4 CONTAMINANTES DO BIOGÁS

Em sua composição bruta, o biogás encontra-se saturado de vapor de água. Além dos gases metano (CH_4) e do dióxido de carbono (CO_2), o biogás contém quantidades consideráveis de sulfeto de hidrogênio (H_2S). Outros gases traços também são encontrados, subentende-se: amônia (NH_3), os siloxanos e o BTX (benzeno, tolueno e xileno), principalmente.

Geralmente, o biogás na forma bruta, não é utilizado para geração descentralizada de energia elétrica, por exemplo, em virtude do poder contaminante e corrosivo que, o vapor de água em conjunto do H_2S , são capazes de ocasionar.

O sulfeto de hidrogênio é tóxico para os seres humanos e animais, exala um odor desagradável, similar ao de ovo podre, quando em baixas concentrações.

O motivo que faz com que o biogás bruto seja corrosivo dá-se pelo fato que: o vapor contido no biogás combina-se com o H_2S , produzindo ácido sulfúrico. Conseqüentemente, as partes metálicas internas dos motores utilizados na combustão do biogás, sofrem oxidação e incrustação, bem como, os componentes e estruturas metálicas ferrosas externas e próximas aos biodigestores que, são atacadas quimicamente pelos vapores ácidos.

Sendo assim, o biogás é submetido aos mais variados processos de purificação e secagem, antes de sua utilização

2.5 MÉTODOS DE SECAGEM DO BIOGÁS

Como visto no item 2.4, o vapor de água representa uma parcela que varia de 2 a 7% em volume do biogás. Por tanto, essa umidade deve ser removido da corrente gasosa, quando em uso, evitando a formação dos vapores ácidos que oxidam os componentes metálicos, que entram em contato com o biogás, além de aumentar o poder calorífico do biogás.

A quantidade de vapor d'água que o biogás pode absorver depende da sua temperatura. No biodigestor, a umidade relativa do biogás é de 100%, ou seja, completamente saturado. Para a remoção dessa umidade são adotados diferentes métodos de secagem, por exemplo: secagem por condensação, secagem por adsorção (gel de sílica, carvão ativado, zeolitas) e secagem por absorção (desidratação por glicol e alguns sais). Esses métodos são apresentados resumidamente a seguir (GUIA PRÁTICO DO BIOGÁS, 2010).

2.5.1 Secagem por condensação

De acordo com Pereira, Angelocci e Sentelhas (2007), o fenômeno natural da condensação ocorre, devido ao resfriamento do ar ao anoitecer - fenômeno também conhecido como orvalho.

Exemplos comuns desse fenômeno são: a condensação da água sobre o para brisas do carro e o orvalho que se forma nas folhas das plantas de madrugada.

Em ambos os casos citados, a água se condensada sobre uma superfície, quando a temperatura atinge o ponto de condensação ou, ponto de orvalho.

Para entender melhor o mecanismo da condensação, é necessário definir alguns conceitos, são eles: pressão de vapor, ar saturado, umidade absoluta e ponto de orvalho.

- Pressão de vapor, cujo símbolo é (e_a), é a pressão que o vapor de água exerce em um determinado volume de ar ou gás, quando esse vapor está em equilíbrio termodinâmico com o líquido que lhe deu origem.

- Define-se ar saturado, uma mistura de ar seco e vapor de água saturado. A quantidade de vapor de água na mistura gasosa aumenta gradualmente com o aumento da temperatura, até atingir a pressão de vapor saturado (e_s), expresso pela Equação (1), conhecida como equação de Tetens;

$$e_s = A \cdot \exp \frac{17,3 \cdot t}{237,3 + t} \quad (1)$$

Onde:

e_s : vapor saturado em (Pa);

A : constante e equivale a 610,8 (Pa);

t : temperatura do vapor em ($^{\circ}\text{C}$).

- Umidade absoluta (UA) é a relação entre a massa de vapor d'água e o volume ocupado pelo gás. A partir da pressão de vapor atual, ela pode ser calculada utilizando-se a equação universal dos gases, conforme a Equação (2);

$$UA = \frac{e_a}{RT} M_{H_2O} \quad (2)$$

Onde:

UA : umidade absoluta do ar ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ou $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$);

e_a : pressão de vapor atual em (Pa);

R : constante dos gases ideais ($\text{m}^3 \cdot \text{Pa} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$);

M_{H_2O} : peso molecular da água ($18 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$).

- O ponto de orvalho, acontece quando a pressão de vapor da mistura gasosa torna-se igual à pressão de vapor saturado, devido ao seu resfriamento. A temperatura do ponto de orvalho (t_o) pode ser definida pela Equação (3), a qual indica quando o vapor d'água contido na mistura gasosa começará a condensar.

$$t_o = \frac{237,3 \cdot \ln \frac{e_a}{A}}{17,3 - \ln \frac{e_a}{A}} \quad (3)$$

Em outras palavras, a condensação ocorre quando a pressão de vapor do gás torna-se igual ou superior à pressão de vapor saturado, que é influenciado diretamente pela temperatura, conforme mostra a Equação (2). Ou seja, se ocorrer o resfriamento do ar saturado até o ponto de orvalho, ocorrerá a condensação.

Ao mesmo tempo, quanto maior a temperatura do líquido, maior será a pressão de vapor saturado e, conseqüentemente, maior o número de moléculas de água estará presente no volume do gás.

Com esses conceitos definidos, em seguida será apresentado duas técnicas convencionais de secagem do biogás pelo método da condensação.

A remoção da umidade da corrente gasosa, pode acontecer no percurso que o biogás faz, saindo do biodigestor até chegar em algum outro ponto qualquer. Para que a técnica funcione, é necessário que a tubulação de gás seja suficientemente longa para que ocorra a condensação. Neste caso, a tubulação deve ter certa inclinação para facilitar o escoamento e a remoção do condensado, assim como, purgadores nas partes baixas, para que o vapor condensado seja drenado.

Esta técnica pode ser melhorada enterrando a tubulação de biogás no solo, pois diminuirá ainda mais o ponto de orvalho do vapor de água (GUIA PRÁTICO DO BIOGÁS, 2010).

Outra técnica de remoção de umidade, ainda pelo método da condensação, pode ser feita a jusante da tubulação. Neste caso, o biogás é direcionando para trocadores de calor, onde ocorrerá a troca térmica entre o fluido de refrigeração e o biogás, fazendo com que a condensação ocorra, sendo que, o frio necessário para a condensação da umidade, é fornecido por um sistema de refrigeração, em alguns casos, similar ao de uma geladeira (GUIA PRÁTICO DO BIOGÁS, 2010). A Figura 03 mostra um exemplo de um secador de biogás utilizando o sistema de trocadores de calor.



Figura 3 - Secador de Biogás por Resfriamento

Fonte: Biokhuler, (2018)

Utilizando sistemas de condensação similares a este, é possível obter pontos de orvalho entre 3 e 5 °C, com redução aproximada do vapor d'água de 3,1% para 0,15% em volume. Além da secagem, também são eliminadas algumas substâncias solúveis em água e aerossóis.

Atualmente, o método de condensação por refrigeração representa o estado da técnica para a remoção de umidade, sendo necessária para que o biogás possa ser utilizado como combustível em motores de combustão interna e posteriores purificações (GUIA PRÁTICO DO BIOGÁS, 2010).

2.5.2 Secagem por adsorção

Este método de remoção de umidade é geralmente conduzido em colunas de adsorção sob pressões entre 6 a 10 bar, visto que, à pressão ambiente, apenas uma pequena quantidade de umidade pode ser removida.

Materiais como sílica, carvão ativado, substâncias químicas como, óxido de alumínio ou óxido de magnésio, são alguns dos adsorventes mais empregados como adsorventes. Isso porque, essas substâncias são hidrofílicas, ou seja, apresentam afinidade, química ou física, com as moléculas de H₂O.

No processo de secagem, o biogás é pressurizado e conduzido através de colunas de adsorção, onde se encontram os materiais adsorventes, chamados de recheio. Com esta técnica, é possível alcançar pontos de orvalho de -10 a -20 °C, em pressão atmosférica.

Normalmente, duas colunas são usadas em paralelo, pois, enquanto uma coluna remove a umidade do biogás, a outra é regenerada.

A regeneração acontece pela descompressão da coluna e o aquecimento do adsorvente, fazendo com que a umidade seja evaporada (RYCKEBOSCH; DROUILLON; VERVAEREN, 2011).

2.5.3 Secagem por absorção

Do mesmo modo que a remoção de umidade pelo método da adsorção, o processo de absorção também utiliza os mecanismos de atração física molecular, entre o absorvente e a molécula de H₂O.

Nele, o biogás flui em uma coluna absorvedora, em contracorrente a uma solução de glicol ou trietilenoglicol que, absorve a umidade da corrente gasosa. Segundo Ryckebosch, Drouillon e Vervaeren (2011) é possível atingir um ponto de orvalho de -100 °C sob altas pressões, enquanto que sob pressão atmosférica, os pontos de orvalho variam entre - 5 a -15 °C.

Nessa técnica de secagem, além do vapor de água são removidos, também, os hidrocarbonetos superiores. A regeneração da solução de glicol se dá pelo aquecimento da solução de lavagem a uma temperatura de 200 °C, suficiente para evaporar a umidade e os demais contaminantes absorvidos.

Em termos econômicos, essa técnica é considerada de alto investimento, indicada para fluxos mais elevados de até (500 m³/h).

2.6 PRECIPITAÇÃO DO ORVALHO NA NATUREZA

A precipitação do orvalho ocorre por um processo natural resultante do resfriamento noturno do ar atmosférico que, torna-se saturado e condensa, ao atingir a temperatura de orvalho. Ou ainda, a precipitação acontece devido ao escoamento da corrente de ar adjacente as superfícies dos objetos frios, condensando sobre elas (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002).

No entanto, certos materiais orgânicos encontrados na natureza, dotadas de geometrias variadas, são capazes de condensar a umidade do ar mesmo que sua temperatura superficial não esteja abaixo do ponto de orvalho, ou ainda, sem dispor

de uma ampla superfície de contato em relação ao fluxo de ar ambiente. É o caso de uma grande quantidade de plantas, insetos, e até mesmo, as teias de aranha que possuem a capacidade de precipitar o orvalho através das suas características estruturais, geométricas e químicas (PARK et al., 2013).

A planta (*Salsola crassa*) encontrada em climas áridos da Ásia central, por exemplo, pertencem à espécie das Xero-halófitas. Essas plantas apresentam a capacidade de captar o orvalho do ambiente através do emaranhado de seus pequenos e finos pelos que revestem o seu tecido externo, como mostra a Figura 04.



Figura 4 - Captura do Orvalho pela Salsola Crassa

Fonte: Gürsoy et al.,(2017)

As gotículas de água que se formam ao redor da planta ganham massa, ficam maiores, até que, começam a rolar ao longo da curvatura das folhas e, simultaneamente, gotejam no solo, devido à ação da gravidade (GÜRSOY et al., 2017).

O besouro encontrado no deserto árido da Namíbia (*Stenocara gracilipes*), na Figura 05, é outro exemplo. Esta espécie de besouro, entre outras, supri suas necessidades de água coletando o orvalho matinal durante o voo contra a neblina. Com a ajuda das asas dianteiras, também conhecidas como élitros, de estrutura leve e de alta resistência, além de coletar o orvalho, os élitros também servem como proteção das partes que ficam sob eles. Enquanto que asas traseiras são as responsáveis pelo voo do besouro (SUN; BHUSHAN, 2012).



Figura 5 - Besouro *Stenocara Gracilipes*

Fonte: Sun e Bhushan, (2012)

Os élitros possuem uma estrutura engenhosa com características tanto hidrofílicas quanto hidrofóbicas. As gotículas formam-se na parte superior hidrofóbica do élitro, encontrada no topo de suas saliências, enquanto as depressões no restante da superfície possuem características hidrofóbicas. Assim que as gotículas atingem um tamanho crítico, rolam pela superfície hidrofóbica até a boca do besouro (NØRGAARD; DACKE, 2010).

É possível observar que as gotas do orvalho também se formam em algumas teias de aranhas. Por exemplo, a espécie de aranha *Uloborus walckenaerius*, apresentada na Figura 06, é uma aranha cribelada, que usa o cribelo - dispositivo parecido com um pente - para separar as fibras da seda retiradas de suas fiandeiras em muitas nanofibras, extremamente finas e altamente hidrofílicas (ZHENG et al., 2010).



Figura 6 - Teia da aranha *Uloborus Walckenaerius*

Fonte: Afp, (2010)

Ainda, segundo Zheng et al., (2010), quando as nanofibras são expostas ao ar saturado, o orvalho começa a condensar sobre elas, formando gotas que se movem em sentido unidirecional para o centro da teia. Além desses exemplos, muitas outras superfícies biológicas no reino animal e vegetal possuem características estruturais incomuns na escala, micro e manométrica, com boa interação com a umidade do ar, as quais podem ser imitadas pelo homem, com o intuito de obter os mesmos resultados.

2.7 METODO ARTIFICIAL DE COLETA DO ORVALHO

Baseado em observações de ocorrência natural da condensação do orvalho, fenômeno que acontece em uma numerosa quantidade de plantas, insetos, ou ainda, de materiais de origem orgânica, tal como as teias de aranha, percebeu-se que o orvalho poderia representar uma importante fonte de água potável, passível de ser captada e utilizada na irrigação de cultivos, bebida para o gado e, até mesmo, para o consumo humano (PARK et al., 2013).

Segundo Rajaram et al. (2016), a escassez de água tem sido um grande problema enfrentado pela civilização moderna, tanto em localidades de clima árido como úmido, muitas áreas rurais de países africanos, asiáticos e latino-americanos não possuem acesso a fontes de água potável. Por esse motivo, alguns mecanismos para coletar o orvalho, tomando como base os mecanismos de coleta observados na natureza, a captura do orvalho com malhas Raschel é uma das técnicas mais difundida, conforme a Figura 07.



Figura 7 - Coleta do Orvalho com Telas de Malha Raschel

Fonte: Moore, (2017)

Trata-se de uma tela de material sintético, normalmente em polietileno, que apresenta a capacidade de coletar o orvalho do nevoeiro em maior volume, imitando o mecanismo de coleta observado em teias de aranha. As telas Raschel, então são esticadas em localidades montanhosas com incidência de neblina, ou ainda, nevoeiro persistente, comum em áreas áridas e semi-áridas próximas ao oceano, onde as nuvens formam-se sobre o mar e depois são direcionadas pelos ventos em direção ao continente (RIVERA; LOPEZ-GARCIA, 2013).

O nevoeiro é composto de minúsculas gotas de água com diâmetros na faixa de 1 a 40 μm , sendo que, a condensação na malha Raschel acontece em dois estágios. No primeiro estágio, as minúsculas gotas que são transportadas pelo nevoeiro colidem e se acumulam nos filamentos da malha. No segundo estágio, as gotas aumentam de tamanho devido à coalescência, até o ponto que a ação da gravidade atua sobre elas, fazendo com que rolem para baixo através dos filamentos até a parte inferior da malha, onde são drenadas e conduzidas por uma calha, como mostra a Figura 08.

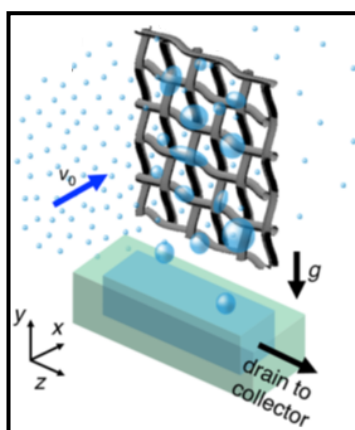


Figura 8 - Mecanismo de Coleta do orvalho com Malha Raschel

Fonte: PARK et al, (2013).

A malha Raschel é o tipo de coletor de água pelo nevoeiro mais utilizado em diversos países, assim como no Chile. A malha possui poros com geometria padronizada em forma de trapézio, com a base maior medindo 5 mm e a base menor 1,8 mm. Os filamentos possuem aproximadamente 20 μm de espessura quando medido separadamente, e 200-400 μm quando medido juntas. A taxa de

coleta pela malha Raschel é de 1 a 10 L m⁻² dia⁻¹. Além disso, a presença de chuva leve com neblina, pode aumentar essa taxa para até 300 L m⁻² dia⁻¹, para uma velocidade de vento de 10 m s⁻¹ (RAJARAM et al., 2016).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo apresenta-se o mecanismo de funcionamento do filtro para remoção de umidade do biogás, assim como, um detalhamento da sua montagem, o qual foi desenvolvido tomando como base a técnica utilizada em algumas localidades áridas e montanhosas, que utilizam a malha Raschel para coletar água dos nevoeiros. Em outras palavras, o filtro tem em seu conceito de funcionamento, o método que retira a umidade do ar saturado pelo princípio natural da condensação e precipitação do orvalho.

O fluxograma apresentado na Figura 09 mostra as etapas envolvidas no processo de remoção de umidade com o filtro proposto.

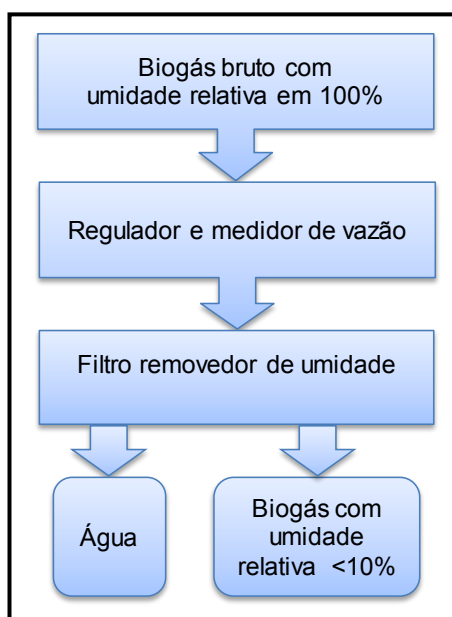


Figura 9 - Fluxograma do processo de remoção de umidade

Fonte: O Autor, (2018)

Além dos detalhes de funcionamento e montagem do filtro, também será apresentado os equipamentos e métodos utilizados no ensaio de verificação da eficiência de remoção de umidade alcançado pelo filtro.

3.1 MONTAGEM DO FILTRO

Com base nas observações do método utilizado para coletar água do ar saturado ou, nevoeiros, utilizando as telas de malha Raschel - as quais assemelham-se tanto em *design* quanto no modo que o orvalho condensa nas teias de algumas espécies de aranha – foram adotadas como referência para desenvolver a parte interna do filtro removedor de umidade para biogás.

Por se tratar de um protótipo experimental, a montagem do filtro não se referenciou em outro modelo de condensador de umidade para biogás, foi construído em escala laboratorial, sendo que, para sua montagem priorizou-se o uso de materiais de baixo custo.

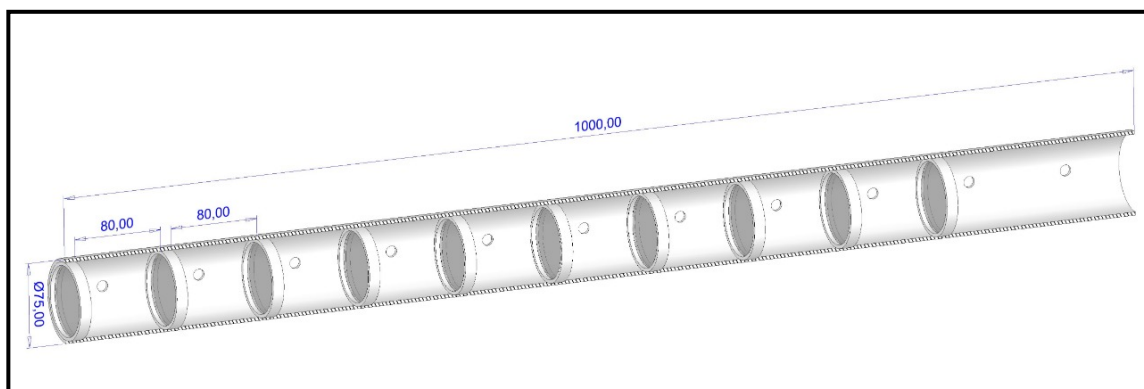


Figura 10 - Filtro removedor de umidade

Fonte: O Autor, (2018)

O filtro, apresentado na figura acima, foi construído em tubo de PVC (policloreto de vinila) branco, medindo 75 mm de diâmetro e 1000 mm de comprimento. Para fechar as extremidades do tubo foi utilizado tampas (cap's) também em PVC branco, os quais foram furados para possibilitar a instalação das mangueiras de entrada e saída da corrente de biogás.

Na parte interna do filtro encontra-se o recheio, parte responsável pela condensação da umidade da corrente de biogás que escoará de uma extremidade a outra. O recheio, composto por 10 (dez) anéis condensadores, estão distribuídos ao longo do filtro por um espaçamento de 80 mm, aproximadamente.

3.3.1 Recheio do filtro

As dez unidades de anéis condensadores foram confeccionados em anéis de tubo de PVC com 75 mm de diâmetro e aproximadamente 10 (dez) mm de espessura. No entanto, foi necessário diminuir o diâmetro dos anéis para que pudessem entrar com folga no tubo externo do filtro, como mostra a Figura 11.

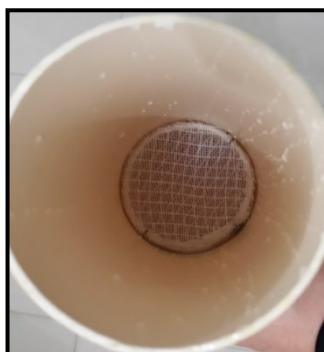


Figura 11 - Redes de condensação

Fonte: O Autor, (2018)

Cada anel foi recoberto com quatro camadas de telas, sendo que, em uma das faces do anel, foram fixadas duas camadas de tela nylon, também conhecidas como (tela mosquiteiro), utilizadas em portas e janelas para impedir a entrada de insetos.

Na outra face, foi fixado uma tela nylon combinada com uma flanela (não-tecido), também conhecida como pano (perfex), o qual possui alto poder absorvente e, por isso, foi usado com o intuito de obter melhores resultados na retenção de umidade do biogás, conforme mostra a Figura 12.

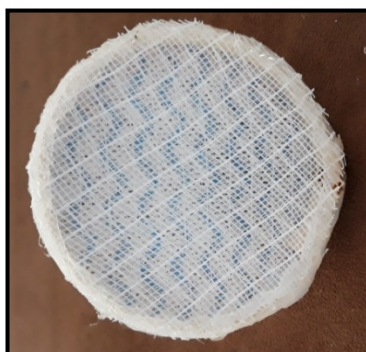


Figura 12 - Redes de condensação

Fonte: Do Autor, (2018)

O processo de condensação inicia-se no momento que corrente de biogás saturado com umidade, começa a escoar e colidir com a tela de nylon e a camada de perfex. Inicialmente, gotas minúsculas vão se formando principalmente nas superfícies que estão diretamente expostas ao fluxo de biogás, logo após, as minúsculas gotas fundem-se em gotas pouco maiores devido ao processo de coalescência, movem-se em direção as junções inferiores dos filamentos de nylon até atingirem a extremidade do filtro, conforme a Figura 13.

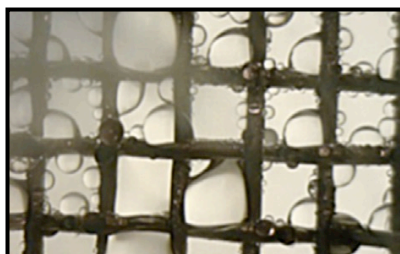


Figura 13 - Formação da coalescência

Fonte: Do Autor, (2018)

Durante este processo de condensação e escoamento vertical descendente, algumas gotas podem se desprender dos filamentos e dos nós da tela de nylon, sendo arrastadas horizontalmente, na mesma direção do fluxo do biogás. Neste caso, essas gotas são absorvidas pela camada da flanela perfex.

3.3 MONTAGEM DO SISTEMA DE CONDENSAÇÃO

O filtro foi testado experimentalmente em bancada, no laboratório de análise de biogás localizado nas instalações da (UTFPR). Para tanto, foi utilizado um compressor de ar e um lavador de gases.

O filtro condensador foi montado de acordo com a Figura 14, com isso foi possível avaliar previamente o desempenho do filtro.

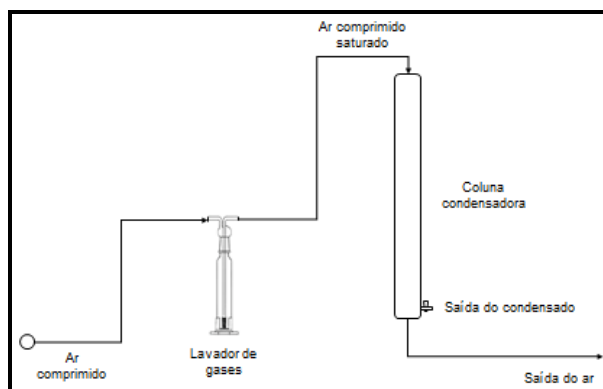


Figura 14 - Montagem do filtro no sistema de ensaio

Fonte: Do Autor, (2018)

Nesse ensaio verificou-se a capacidade de condensação do filtro utilizando ar comprimido em substituição ao biogás devido à dificuldade da sua obtenção.

Dessa forma, primeiramente foi necessário que o ar comprimido passasse por um lavador de gases contendo água, com o intuito de aumentar a sua umidade relativa a níveis equivalentes ao do biogás, antes que o ar entrasse na coluna condensadora.

O ensaio teve duração de três horas, nesse período observou-se a diminuição do nível de água contida no lavador de gases, o qual serviu como um indicativo que a vazão de ar, estava de fato, absorvendo a umidade antes de entrar na coluna condensadora.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão discutidos os resultados obtidos com o filtro condensador.

4.1 SIMULAÇÃO COM AR COMPRIMIDO

Após três horas de ensaio utilizando ar comprimido umidificado, observou-se que não houve acúmulo de gotículas de água condensada nas redes condensadoras instaladas no interior do filtro em quantidade suficiente para escoar por entre as telas e, se acumularem na parte inferior do filtro, onde se encontrava o registro para saída do vapor condensado.

No entanto, durante a realização do ensaio o único indicativo de que o ar comprimido entrava umidificado no filtro, foi a quantidade de água que deixava o lavador de gases, assim como, essa mesma quantidade de água, também foi o único indicativo verificado após o término do ensaio, pois esperava-se retirar como condensado, a mesma quantidade de água - ou próximo dessa quantidade - na parte inferior do filtro como condensado.

A falta de equipamentos de medição como: termohigrômetro para verificar a umidade relativa e a temperatura do ar que entrava e saía do filtro condensador, assim como um medidor de vazão, para auxiliar na determinação do fluxo de ar ideal para as dimensões do filtro, fizeram com que os resultados obtidos no ensaio ficassem limitados e pouco conclusivos.

A utilização de ar comprimido como substituto ao biogás foi outro limitante para avaliar o bom funcionamento do filtro, vez que, o biogás quando sai do biodigestor, apresenta, muitas vezes, temperaturas acima dos 30°C, enquanto que o ar comprimido utilizado para o ensaio, encontrava-se a temperatura ambiente, ou seja, 25°C em média.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido a indisponibilidade de biogás e de alguns equipamentos de monitoramento e controle para realização dos testes com o filtro condensador de umidade, os resultados obtidos até o momento não foram positivos.

O objetivo de retirar a umidade de uma corrente gasosa, em específico do biogás, não foi atendido, porém, novos ensaios deveram acontecer para que se possa descartar de fato a possibilidade de utilizar o conceito de filtro exposto nesse trabalho para fazer a remoção de umidade do biogás.

REFERÊNCIAS

AMARAL, Eduardo Claviso do. **GERAÇÃO DE BIOGÁS PROVENIENTE DA BIODIGESTÃO DO BAGAÇO DO MALTE J.**2016. 71 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Unisociesc, Joinville, 2016.

AFP. Here's looking at dew: spiders snare water from the air. 2010. Disponível em: <<https://phys.org/news/2010-02-dew-spiders-snare-air.html>>. Acesso em: 21 nov. 2018.

ALMEIDA, Hermes A. de; MACHADO, Regina C. R.. Estimativa da duração do período de molhamento por orvalho em um ecossistema cacau. *Agriambi: Revista Brasileira de Engenharia Agricultura e Ambiental*, Campina Grande, v. 13, n. 6, p.724-728, 25 mar. 2009. Disponível em: <<http://go-galegroup.ez48.periodicos.capes.gov.br/ps/i.do?&id=GALE|A212105331&v=2.1&u=capes&it=r&p=AONE&sw=w>>. Acesso em: 27 out. 2018.

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS DA CADEIA PRODUTIVA DO BIOGÁS: Purificação de Biogás. Foz do Iguaçu: Cibogás e Utfpr, 2018.

GÜRSOY, M. et al. Bioinspired fog capture and channel mechanism based on the arid climate plant *Salsola crassa*. *Colloids And Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Ankara, v. 529, p.195-202, set. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.05.071>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927775717305265>>. Acesso em: 04 nov. 2018.

JENDE, Oliver et al. **Biogás: TECNOLOGIAS DE DIGESTÃO ANAERÓBIA COM RELEVÂNCIA PARA O BRASIL SUBSTRATOS, DIGESTORES E USO DE BIOGÁS.** 2015. ProBiogás. Disponível em: <<https://www.giz.de/en/downloads/probiogas-tecnologias-biogas.pdf>>. Acesso em: 03 dez. 2018.

MOORE, Sara S.. Head in the Clouds: The Dream of Harvesting Water from Fog. 2017. Disponível em: <<http://www.climateprep.org/stories/2017/6/8/head-in-the-clouds-the-dream-of-harvesting-water-from-fog>>. Acesso em: 21 nov. 2018.

PARK, Kyoo-chul et al. Optimal Design of Permeable Fiber Network Structures for Fog Harvesting. *Langmuir*, Cambridge, v. 29, n. 43, p.13269-13277, 15 ago. 2013. American Chemical Society (ACS). Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/la402409f>>. Acesso em: 03 nov. 2018.

NØRGAARD, Thomas; DACKÉ, Marie. Fog-basking behaviour and water collection efficiency in Namib Desert Darkling beetles. *Frontiers In Zoology*, [s.l.], v. 7, n. 1,

p.1-8, 2010. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1186/1742-9994-7-23>. Disponível em: <<https://frontiersinzoology.biomedcentral.com/articles/10.1186/1742-9994-7-23>>. Acesso em: 10 nov. 2018.

PEREIRA, Antonio Roberto; ANGELOCCI, Luiz Roberto; SENTELHAS, Paulo Cesar. **Agrometeorologia: Fundamentos e aplicações práticas**. 2002. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/285651687_Agrometeorologia_Fundamentos_e_aplicacoes_praticas>. Acesso em: 02 nov. 2018.

RAJARAM, Mithun et al. Enhancement of fog-collection efficiency of a Raschel mesh using surface coatings and local geometric changes. *Colloids And Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, [s.l.], v. 508, p.218-229, 2 jun. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfa.2016.08.034>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927775716306720?via%3Dihub>>. Acesso em: 14 nov. 2018.

RIVERA, Juan de Dios; LOPEZ-GARCIA, Diego. Mechanical characteristics of Raschel mesh and their application to the design of large fog collectors. *Atmospheric Research*, [s.l.], v. 151, p.250-258, 1 nov. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.06.011>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.ez48.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0169809514002567>>. Acesso em: 13 nov. 2018.

RYCKEBOSCH, E.; DROUILLON, M.; VERVAEREN, H.. Techniques for transformation of biogas to biomethane. *Biomass And Bioenergy*, [s.l.], v. 35, n. 5, p.1633-1645, maio 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.02.033>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953411001085>>. Acesso em: 27 out. 2018.

SUN, Jiyu; BHUSHAN, Bharat. Structure and mechanical properties of beetle wings. *Rsc Advances*, [s.l.], v. 2, n. 33, p.12606-12623, 2012. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/c2ra21276e>. Disponível em: <<https://pubs.rsc.org/en/Content/ArticleLanding/2012/RA/c2ra21276e#!divAbstract>>. Acesso em: 09 nov. 2018.

ZHENG, Yongmei et al. Directional water collection on wetted spider silk. *Nature*, [s.l.], v. 463, n. 7281, p.640-643, fev. 2010. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1038/nature08729>. Disponível em: <<http://www-nature.ez48.periodicos.capes.gov.br/articles/nature08729>>. Acesso em: 11 nov. 2018.