

III-126 - AVALIAÇÃO DOS GASES (METANO, DIÓXIDO DE CARBONO E GÁS SULFÍDRICO) GERADOS PELA DECOMPOSIÇÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM FLORIANÓPOLIS-SC

Carla Canton Sandrin⁽¹⁾

Engenheira Sanitarista e Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Especialista em Engenharia Ambiental e Saneamento Básico pela Universidade do Oeste de Santa Catarina (UNOESC). Engenheira Sanitarista e Ambiental da Agência Reguladora Intermunicipal de Saneamento - ARIS.

Endereço⁽¹⁾: Rua Santos Saraiva, 1546 - Estreito - Florianópolis- SC- CEP: 88070-101- Brasil - Tel: (48) 39549100. E-mail: carla@aris.sc.gov.br

RESUMO

As consequências ambientais decorrentes do inadequado tratamento dos resíduos sólidos urbanos são observadas diretamente na qualidade do ar e das águas superficiais e subterrâneas, através da contaminação pelos gases e lixiviados gerados na decomposição desses resíduos. A digestão anaeróbia é o processo de tratamento biológico de resíduos mais antigo e mais largamente usado. É o mais popular método usado para bioestabilizar lodo primário originado do tratamento de esgoto, convertendo sólidos voláteis para biogás e produtos finais. Com o objetivo de avaliar o biogás gerado pela decomposição anaeróbia de resíduos sólidos urbanos em reatores com diferentes porcentagens na composição do seu preenchimento, o presente trabalho implicou na determinação das porcentagens dos principais gases presentes no biogás e na concentração de matéria orgânica do lixiviado por meio de análises de DBO₅ e DQO. O primeiro reator (R1) foi preenchido apenas com matéria orgânica (restos de alimentos), R2 foi preenchido com RSU de gravimetria correspondentes à cidade de Florianópolis realizada no ano de 2007. Já para R3 também foi utilizada a gravimetria da cidade de Florianópolis, porém do ano de 2009. Comparando-se os resultados das análises da composição do biogás entre os reatores R1, R2 e R3 pode-se identificar uma maior produção de CH₄ no R3, preenchido com RSU da cidade de Florianópolis do ano de 2009. Essa gravimetria do R3 corresponde a da usina de triagem da Comcap (Companhia Melhoramentos da Capital - Florianópolis /SC). As diferenças na geração do CH₄ entre R1 (0,1% a 0,3%) e R2 (0,5% a 0,7%) foram pequenas. Com relação ao CO₂, há uma diferença considerável entre os três, sendo que o maior produtor foi R2 (42,2% a 71,6 %). A temperatura interna dos três reatores foi bastante semelhante, situando-se basicamente na faixa mesófila (25°C e 34°C com uma temperatura média de 34 °C no período da primavera e verão e 30°C no outono e início de inverno). Com relação à análise da concentração da DQO e DBO₅ do lixiviado, foram analisadas quatro amostras. A média dos resultados das amostras de DBO e DQO para R1 foi respectivamente, 12.217 mg/L e 94.252 mg/L; para R2, 12.062 mg/L e 95.426 mg/L. R1 e R2 obtiveram uma média de valores elevados e mesmo sendo as porcentagens dos preenchimentos diferentes, os valores desses parâmetros mostraram-se muito parecidos. Já R3 teve concentrações de DBO (7.130 mg/L) e DQO (58.423 mg/L) bem menores. As altas concentrações de DBO e DQO do lixiviado identificam teores elevados de matéria orgânica presente nos reatores. As concentrações de CH₄ e CO₂ encontradas no R3 são as que mais se aproximaram da composição típica do biogás de aterros sanitários.

PALAVRAS-CHAVE: Biogás, Digestão Anaeróbia, Aterro Sanitário, Resíduos Sólidos Urbanos.

INTRODUÇÃO

Um dos grandes problemas ambientais enfrentados pelos grandes centros urbanos, na atualidade, é a produção, a coleta e principalmente a disposição final dos resíduos sólidos urbanos (RSU). O ser humano, ao longo de sua existência, esteve e ainda continua diretamente associado aos resíduos por ele produzidos, podendo o resultado desta interação ser responsável por diversificadas escalas de agressões ambientais.

Com o crescimento populacional e o consequente aumento do consumo de bens descartáveis, a tendência é esse panorama agravar-se. De maneira geral, a produção e a composição dos resíduos sólidos é função das

atividades humanas domésticas, hospitalares, comerciais, agrícolas e industriais, dentro de qualquer contextualização social.

No Brasil 150 mil toneladas de resíduos domésticos são coletadas diariamente. Dessas 150 mil, 83 mil toneladas (54,9%) vão para aterros sanitários, enquanto 67 mil (45,1%) seguem com destinação inadequada e vão para aterros com problemas e lixões a céu aberto. Em média 20 mil toneladas de lixo doméstico são produzidas diariamente e não são coletadas, logo tem como destino cabeceiras de rios, valas, terrenos baldios ou são simplesmente queimadas, expondo um problema grave, que envolve saúde pública e saneamento (ABRELPE, 2009).

Além da problemática da coleta deficiente, outra questão preocupante é o destino final dado a esses resíduos, que na maior parte das vezes é inadequado, como é o caso da utilização de lixões. Ao contrário desses, os aterros sanitários constituem uma forma de destinação final dada aos RSU amplamente utilizada recentemente, em virtude de sua simplicidade de execução, seu baixo custo e capacidade de absorção diária de grandes quantidades de resíduos, quando comparados as demais formas de tratamento.

Nos aterros, após os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) terem sido depositados, inicia-se a degradação, tendo como subprodutos do processo a geração de gases (biogás) e lixiviado. O intuito do presente trabalho foi avaliar (por meio da construção de três reatores anaeróbicos com diferentes constituições de resíduos sólidos urbanos no seu interior) e determinar as características dos subprodutos (gases e lixiviado) produzidos pela decomposição anaeróbia desses resíduos dentro dos reatores (pilotos).

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A composição dos resíduos sólidos, tanto qualitativa quanto quantitativa é bastante variável e irregular, sendo que mudam de local para local e até mesmo entre os diversos bairros de uma mesma cidade. Tal variação é função dos diferentes hábitos e costumes da população, da atividade econômica predominante, dos padrões de vida, das condições climáticas da região, das estações do ano e outras condições locais variáveis ao decorrer dos anos. Cassini et al., (2003), afirmam que o poder aquisitivo da população, por exemplo, pode ser um dos fatores que influencia a composição gravimétrica dos RSU, bem como sua produção per capita.

A digestão anaeróbia, na visão de Chernicharo (2007), pode ser considerada como um ecossistema onde diversos grupos de microorganismos trabalham interativamente na conversão da matéria orgânica complexa em metano, gás carbônico, água, gás sulfídrico e amônia além de novas células bacterianas. Nesse sentido, o processo de digestão anaeróbia é influenciado por diversos fatores, entre outros: (i) temperatura; (ii) a carga orgânica aplicada e (iii) a presença de materiais de natureza tóxica. Em temperaturas altas, as reações biológicas ocorrem com maior velocidade, resultando possivelmente em uma maior eficiência do processo. De forma geral, o processo anaeróbio poderá ser desenvolvido em temperaturas a nível mesófilo (30 a 45^oC), ou a nível termófilo (45 a 60^oC) (BARLAZ et al, 1987).

Castilhos Jr. (2003) aponta a conversão biológica da matéria orgânica em aterros sanitários como a principal responsável pela degradação dos resíduos, resultando na geração de gás (biogás) e no carregamento de moléculas diversas pela água da chuva (lixiviado). Biogás é a denominação dada à mistura de gases produzida durante o processo de digestão anaeróbia. Tal mistura é formada essencialmente por metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) e pequenas concentrações de nitrogênio (N₂), oxigênio (O₂) e gás sulfídrico (H₂S), além de traços de hidrocarbonetos voláteis. (ANDREOLI et al, 2001).

O biogás é originado como resultado de processos físicos, químicos e microbiológicos que ocorrem dentro do material rejeitado. Os processos microbiológicos regem o processo de geração do gás, dada a natureza orgânica da maior parte dos resíduos (CHRISTENSEN et al, 2001). Barlaz et al (1987), afirmam que a qualidade do biogás depende do sistema microbiológico, do substrato, do resíduo em decomposição e das variáveis específicas do aterro, como acesso a oxigênio para o aterro e o teor de umidade. O biogás é tipicamente descrito como consistindo de aproximadamente 50 % de CH₄ e 50 % de CO₂ com menos de 1 % de outros componentes gasosos, inclusive sulfeto de hidrogênio e mercaptanas.

O lixiviado é um líquido cuja formação é resultado da remoção de compostos solúveis através da percolação não uniforme e intermitente da água pela massa de resíduos. Estes compostos solúveis são encontrados nos resíduos dispostos, ou formados por processos químicos e biológicos de degradação, conforme explicam El-Fadel et al.,(1997). O processo de lixiviação em aterros sanitários é a quantidade de água que excede a capacidade de retenção da umidade do material alterado representado pelos resíduos sólidos. Fatores como a precipitação, escoamento superficial, infiltração, evapotranspiração e temperatura, afetam diretamente a capacidade de quantificar os lixiviados (CASTILHOS JR, 1991).

A poluição advinda da disposição de resíduos sólidos urbanos em aterros é crescente, e uma das contribuições mais significativas é devido aos lixiviados. Dessa forma, o tratamento destes líquidos assume uma grande importância ambiental para o meio (SILVA e SEGATO, 2002).

Inúmeros são os fatores que afetam a geração de gases em aterros de resíduos sólidos. A capacidade de um aterro gerar gás é influenciada, por exemplo, pela composição do resíduo, umidade, pH, entre outros. Os fatores que afetam a geração de biogás são apresentados a seguir (ENSINAS, 2003): Composição do resíduo; Umidade; Idade do lixo; Temperatura do aterro; pH do aterro; Tamanho das partículas e Recirculação de efluente. Além desses, outros fatores que podem influenciar a taxa de geração de gás são os nutrientes, bactérias, compactação de resíduos, dimensões do aterro (área e profundidade), operação do aterro e processamento de resíduos variáveis.

El-Fadel et al (1997), também afirmam que os fatores mais comuns estão relacionados com a composição, umidade, temperatura e pH da massa de resíduo, além da disponibilidade de bactérias e nutrientes e presença de agentes inibidores na célula. Além dos condicionantes citados anteriormente, outros aspectos relacionados com a geometria e operação do aterro e com o ambiente externo à célula também são fatores determinantes na geração de gases.

Na tabela 1 são mostrados os principais parâmetros e a composição do lixiviado em aterros sanitários Catarinenses.

Tabela 1: Composição do lixiviado de aterros sanitários em Santa Catarina.

Parâmetro	Aterro Sanitário Canhanduba Itajaí/SC [1]	Aterro Sanitário de Biguaçu/SC [2]
pH	7,9	8,6
DQO (mg/L)	3.690	2.879
Cl⁻ (mg/L)	4.033	2.476
N-NH₃ (mg/L)	2.146	1.450
ST (mg/L)	10.943	10.300

Fonte: [1] Haddad (2009) ; [2] Strelau (2006)

Nas tabelas 2 e 3 estão dispostas as variações das concentrações dos lixiviados com a idade do aterro e as faixas de concentrações de parâmetros de caracterização dos lixiviados segundo as fases de estabilização biológica.

Tabela 2: Variações das concentrações dos lixiviados de acordo com a idade do aterro.

Parâmetro (mg/L)	0 a 5 anos	5 a 10 anos	10 a 15 anos	>15 anos
pH	3 – 6	06/jul	7 - 7,5	7,5
DBO	10.000 - 25.000	1.000 - 4.000	50 - 1.000	< 50
DQO	15.000 - 40.000	10.000 - 20.000	1.000 - 5.000	< 1.000
N (total)	1.000 - 3.000	400 - 600	75 - 300	< 50
N(amoniaco)	500 - 1.500	300 - 500	50 - 200	< 30
SDT	10.000 - 25.000	5.000 - 10.000	2.000 - 5.000	< 1.000

Fonte: Adaptado de Castilhos, 2003.

Tabela 3: Faixas de concentrações de parâmetros de caracterização dos lixiviados durante as fases de estabilização biológica.

Parâmetros (mg/L)	Fase II: Fase de Transição	Fase III: Fase Ácida	Fase IV: Fase de Fermentação	Fase V: Fase de Maturação
pH	6,7	4,7 a 7,7	6,3 a 8,8	7,1 a 8,8
ST	2.050 a 2.450	4.120 a 55.300	2.090 a 6.410	1.460 a 4.640
DBO	100 a 10.900	1.000 a 57.700	600 a 3.400	4 a 120
DQO	480 a 18.000	1.500 a 71.100	580 a 9.760	31 a 900

Fonte: Adaptado de Pohland & Harper (1986)

MATERIAIS E MÉTODOS

Local de Estudo

O estudo foi desenvolvido em três reatores anaeróbios instalados no Laboratório de Hidráulica, pertencente ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Os três reatores foram constituídos por tubos de PVC com diâmetro de 200 mm, 2m de altura e duas janelas de acrílico de 78 x 13 cm. O preenchimento dos mesmos foi realizado com resíduos sólidos urbanos, sendo que cada um deles possui uma diferente porcentagem na composição do “recheio”. Tal preenchimento foi feito no mês de dezembro de 2009. A densidade de compactação desses resíduos foi de 0,4 t/m³ (similar à densidade de aterros).

Todos os três reatores possuíam a mesma massa de resíduos sólidos no seu interior (25,23 Kg). Na sequência, a descrição da constituição dos reatores:

- I. O primeiro reator, R1, foi empregado como referência padrão, sendo que seu interior tem como preenchimento apenas matéria orgânica (restos de alimentos);
- II. R2 foi preenchido com resíduos sólidos urbanos de gravimetria correspondentes à cidade de Florianópolis realizada no ano de 2007.
- III. No reator R3 também foi utilizada a gravimetria da cidade de Florianópolis, porém do ano de 2009. Outra diferença entre eles é que a gravimetria de R2 foi preparada em laboratório (sem a presença de matéria orgânica *in natura*), já a gravimetria do R3 corresponde a da usina de triagem da Comcap (com presença de matéria orgânica) (RESTREPO, 2010).

Com a finalidade de ativar o processo de decomposição anaeróbia, foram injetados 100 ml de lodo em cada um dos reatores. A montagem das gravimetrias foi efetuada de acordo com ABNT NBR 10007(1987) e o método de quarteamento proposto por STECH (1982). Na tabela 4 estão apresentadas as gravimetrias dos reatores.

Tabela 4: Gravimetrias dos reatores

PERCENTUAL EM PESO (%)			
Material	Reator 1 (2009)	Reator 2 (2007)	Reator 3 (2009)
Orgânico	100	51,76	48,07
Plástico	-	16,02	14,31
Papel/Papelão	-	10,56	14,38
Vidro	-	3,52	0,2
Multicamada	-	3,76	1,59
Tecido	-	10,68	1,62
Contaminado	-	2,18	6,00
Metal	-	0,91	0,52
Outros	-	0,61	13,32

Fonte: Restrepo (2010)

Como se pretendia simular as condições reais de funcionamento de um aterro sanitário, semanalmente era injetada água ultrapura nos reatores por meio do sistema simulador de chuva, simulando as chuvas que caem sobre o aterro. O sistema era composto por bombas (três, uma para cada reator) e *timer*, que era programado para a liberação da água nos reatores.

Assim, a bomba automática foi programada para funcionar durante 4 minutos semanalmente, no entanto com vazões diferentes, de acordo com a média de precipitação mensal, dos últimos 30 anos. O controle da temperatura foi realizado através de um aquecedor a óleo com termostato para manter a temperatura adequada do sistema, uma vez que a mesma é um fator importante no processo de degradação da matéria orgânica. O ideal era que a temperatura interna dos reatores fosse mantida entre 25°C e 34°C, (com uma temperatura média de 34 °C no período primavera verão e 30°C no outono e início de inverno) para o melhor trabalho das bactérias mesófilas.

Medição da Composição, Coleta e Caracterização do biogás gerado

Semanalmente, a partir do mês de abril de 2010, foram efetuadas medições da composição do biogás com o uso do aparelho GEM 2000, da LandTec , que determina as concentrações dos gases CH₄, CO₂, O₂ (em %) e H₂S (em ppm) presentes no biogás. No total foram realizadas seis medições em cada um dos reatores durante o período experimental.

Coleta e análise das Amostras do lixiviado

As amostras para análise do lixiviado foram coletadas a partir do mês de abril de 2010 e finalizaram no mês de maio de 2010. Para a caracterização do lixiviado utilizou-se os parâmetros de demanda bioquímica de

oxigênio, em 5 dias a 20°C (DBO₅) e a demanda química de oxigênio total (DQO_{total}), sendo que a coleta e as análises eram realizadas no mesmo dia.

As mesmas foram analisadas semanalmente no Laboratório Integrado de Meio Ambiente (LIMA), totalizando quatro análises. Para as análises químicas do lixiviado foi necessário fazer diluições devido à alta concentração de matéria orgânica, para assim tornar possível a leitura das amostras. Foram realizados testes com diferentes diluições (10, 20, 50 e 100 vezes) e suas respectivas correções até se chegar a mais adequada para cada parâmetro. Logo, para o parâmetro DBO₅ o lixiviado passou a ser diluído 10 vezes e para o parâmetro DQO a diluição foi de 100 vezes.

RESULTADOS OBTIDOS

O resultado da “caracterização” do biogás proveniente dos reatores anaeróbios (R1, R2 e R3) feita com o aparelho GEM 2000, está compilado na tabela 5. Eram feitas duas leituras em cada reator e posteriormente uma média dessas leituras era efetuada.

Para as amostras de lixiviado, os resultados das análises obtidos estão codificados na tabela 6. Para tal análise, os valores são referentes aos parâmetros pH, DBO₅ e DQO(total). Na tabela 7, é apresentada a razão DBO₅/DQO dos reatores nas diferentes datas de análise das amostras do lixiviado. No total, para os parâmetros DBO₅ e DQO(total) foram analisadas quatro amostras.

A tabela 8 apresenta as médias das porcentagens dos principais gases nos aterros Catarinenses de Içara e Tijuquinhas, obtidos na revisão bibliográfica, e nos reatores desse estudo. Essa tabela é utilizada na comparação dos resultados.

Na figura 1, o resultado de duas amostras, dos meses de abril e maio de 2010.

Tabela 5: Avaliação do Biogás durante o período experimental.

Gases	Valor Mínimo			Valor Máximo			Média das Amostragens		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
CH ₄ (%)	0,1	0,3	36,4	0,3	0,7	51,4	0,15	0,47	47,2
CO ₂ (%)	34,0	42,2	39,2	47,5	71,6	48,1	43,7	63,3	45,3
O ₂ (%)	0,6	0,3	0,4	1,0	0,7	4,2	1,03	0,48	1,55
H ₂ S (ppm)	25,0	1702	750	125	4312	1097	25,0	2903	754

Tabela 6: Parâmetros do lixiviado analisados durante o período experimental

Parâmetro	Valor Mínimo			Valor Máximo			Média das Amostragens		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
pH	3,38	3,92	5,42	4,55	4,62	5,88	3,78	4,19	5,64
DBO ₅ (mg/L)	12.050	11.090	5.380	12.450	12.500	8.150	12.218	12.063	7.130
DQO total (mg/L)	90.239	93.427	51.824	98.146	98.427	69.814	94.252	95.426	58.424

Tabela 7: Razão DBO₅/DQO nos reatores durante período experimental

Data	19/04/10	28/04/10	03/05/10	18/05/10
R1	0,13	0,12	0,13	0,14
R2	0,13	0,11	0,13	0,13
R3	0,13	0,12	0,13	0,14

Tabela 8: Concentração média dos principais gases nos aterros Catarinenses de Içara e Tijuquinhas

Gases	Içara	Tijuquinhas	R1	R2	R3
CH ₄ (%)	46,9	53,8	0,15	0,47	47,2
CO ₂ (%)	37,8	41,9	43,7	63,3	45,3
O ₂ (%)	4,1	1,0	1,03	0,48	1,55
H ₂ S (ppm)	12	21,9	25,0	2903	754

Fonte: Dias (2009)

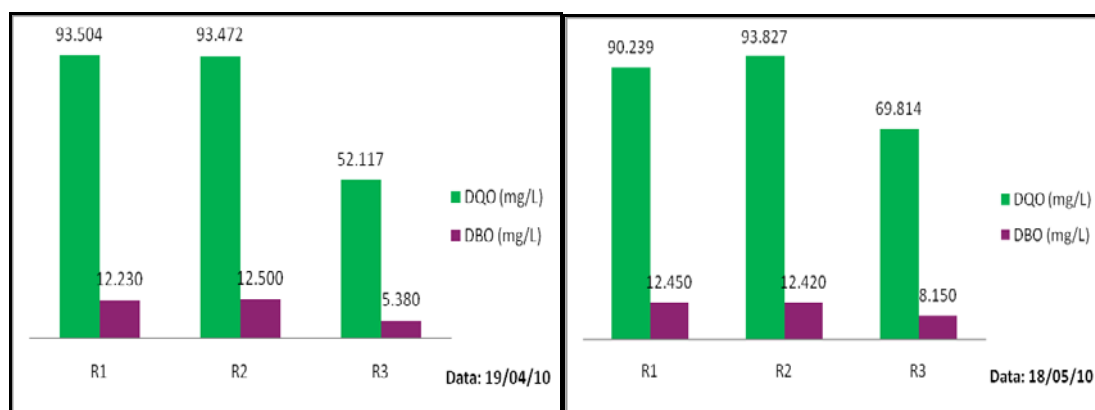


Figura 1: Resultado de análises de DQO e DBO do lixiviado

Reator – R1

Conforme mencionado anteriormente, R1 foi preenchido apenas com matéria orgânica, basicamente restos de alimentos. A temperatura interna de R1 esteve numa média de 30°C ±1, logo dentro da faixa (25°C - 34°C) para o melhor trabalho das bactérias mesófilas.

Para este reator, os valores de CH₄ variaram pouco no período do estudo, sendo a média dos valores das amostragens foi de 0,15% da composição do biogás. Com relação ao CO₂, os valores aumentaram com o passar do tempo, sendo que início do experimento era de 34% e no final já estava com uma porcentagem de 47,1 %. O oxigênio (O₂) teve baixa porcentagem em concentração e pequena variação média (1,55%), o que já era esperado por se tratar de um reator anaeróbio. A média dos valores de H₂S foi de 25 ppm.

Com esses resultados e estabelecendo-se uma comparação com relatos de Tchobanoglous et al.,(1993) no que diz respeito à análise qualitativa típica da geração dos principais gases ao longo das fases de degradação em um aterro sanitário, pode-se enquadrar R1 como estando na transição da Fase II para a Fase III da degradação dos resíduos em um aterro sanitário. Logo, sendo uma fase instável, fica difícil classificar exatamente em que ponto da degradação R1 se encontrava. Com isso pode-se explicar as baixas concentrações de O₂ encontradas no reator, o aumento do CO₂, as pequenas concentrações de CH₄ e o comportamento do pH. A média do pH do lixiviado de R1 foi de 3,78, um pH ácido.

De acordo com Tchobanoglous et al.,(1993), na Fase III (Ácida), as reações iniciadas na Fase II (transição) são aceleradas com a produção de quantidades significativas de ácidos orgânicos e quantidades menores de gás

hidrogênio. A presença de gás sulfídrico (ou sulfeto de hidrogênio) no reator é admissível que o mesmo esteja na fase III, uma vez que o sulfeto de hidrogênio começa a aparecer nesta fase, mais precisamente no início da etapa da Acidogênese.

Comparando os valores das concentrações dos gases de R1 com as concentrações médias dos gases do aterro de Içara/SC e Tijuquinhas (tabela 8) as concentrações de CO₂ foram semelhantes (Içara 37,8%; Tijuquinhas 41,9% e R1 43,7%) e de gás sulfídrico R1, com 25 ppm ficou com um valor próximo do encontrado no aterro de Tijuquinhas (21,9 ppm). Já quando comparando com as fases típicas de produção do biogás em um aterro sanitário (tabela 3), segundo Esmap (2004) e de acordo com o período típico de funcionamento (3 meses a 3 anos) no qual se enquadraria R1, este também estaria na Fase III de degradação, identificando uma fase anaeróbia, metanogênica e com condições instáveis.

A concentração média das amostras de DQO(total) para R1 foi de 94.252 mg/L, valor relativamente elevado. Esse valor pode ser comparado com a DQO (total) de aterros novos. Já os valores de DBO tiveram pequena variação durante o estudo, estando entre 12.050 e 12.450 mg/L. Esses valores elevados de DBO e DQO, indicam o alto teor de matéria orgânica presente no reator.

As variações das concentrações dos lixiviados segundo a idade do aterro para um aterro de 0 a 5 anos (tabela 2), possui valores de DBO entre 10.000 - 25.000 mg/L. Logo os valores de DBO de R1 estão dentro dessa faixa. Já quando comparado com faixas de concentrações de parâmetros de caracterização dos lixiviados, durante as fases de estabilização biológica (tabela 3), R1 pode ser classificado como estando na fase III de degradação, caracterizada por ser uma fase ácida. Os valores de DQO de R1, comparados com os da tabela 3, são maiores, no entanto os de pH e DBO estão dentro dos dispostos na mesma. Ainda com relação aos parâmetros de DBO e DQO, o R1 pode ser classificado como estando na fase Acidogênica de degradação.

Reator – R2

O preenchimento do R2 foi realizado com RSU de gravimetria correspondentes à cidade de Florianópolis realizada no ano de 2007. Tal gravimetria foi preparada em laboratório (sem a presença de matéria orgânica *in natura*). A porcentagem de material orgânico foi de 51,76% (13,06Kg). A temperatura interna de R2 foi em média de 30°C ±1, permanecendo assim como R1, dentro da faixa para o melhor trabalho das bactérias mesófilas (25°C e 34°C).

O valor médio das concentrações de CH₄ para R2 estava em 0,47% da composição do biogás, mostrando uma baixa concentração do gás, o qual teve pequena variação ao longo do período de estudo, assim como em R1. Com relação ao gás CO₂, os valores também aumentaram com o passar do tempo, sendo que na primeira amostragem era de 42,2% e na última já atingiu uma porcentagem de 71,6 %.

O oxigênio Observando esses resultados e estabelecendo-se uma comparação com a análise qualitativa típica da geração dos principais gases ao longo das fases de degradação em um aterro sanitário, pode-se classificar R2 como estando na Fase III da degradação. Pode-se chegar a essa conclusão devido às baixas concentrações de O₂, CH₄, o crescente aumento das porcentagens de CO₂ e o valor de pH baixo, conforme Tchobanoglous et al.,(1993).

A média do valor de pH do lixiviado do R2 foi de 4,19, mostrando um pH ácido, assim como o pH de R1. O aparecimento do gás sulfídrico no reator confirma mais uma vez o enquadramento do R2 na Fase III de degradação.

Quando comparado com as concentrações médias dos gases do aterro de Içara/SC e Tijuquinhas (tabela 5), os valores das concentrações dos gases de R2 não se assemelham. As concentrações de O₂ e CH₄ estiveram muito abaixo e já às concentrações de CO₂ acima dos valores obtidos naqueles aterros. Já comparando com dados da tabela 3, e de acordo com o período típico de funcionamento ao qual pertenceria R2 (3 meses a 3 anos), este também estaria na Fase III de degradação. (O₂) teve pequenas variações (0,3% - 0,8%).

A média das concentrações de DQO(total) situou-se em 95.426 mg/L, valor relativamente elevado. Assim como no R1, os valores desse parâmetro para R2 podem ser comparados com a DQO(total) de aterros novos e identificam uma alta carga de matéria orgânica presente no reator.

Os valores de DBO tiveram pequena modificação durante o estudo, estando entre 11.090 e 12.500 mg/L, com um valor médio de 12.063 mg/L.

Segundo dados da tabela 2 (variações das concentrações dos lixiviados segundo a idade do aterro) para um aterro com idade de 0 a 5 anos, as concentrações de DBO estão entre 10.000 - 25.000 mg/L. Os valores de DBO do R2 estavam dentro dessa faixa. Já quando comparado com faixas de concentrações de parâmetros de caracterização dos lixiviados durante as fases de estabilização biológica (tabela 3), R2 do mesmo modo que R1 pode ser classificado como estando na fase III de degradação. Assim como R1, com relação aos parâmetros de DBO, DQO e pH o R2 pode ser classificado como estando na fase Acidogênica de degradação.

Reator - R3

Para o preenchimento do R3 foi utilizada a gravimetria da cidade de Florianópolis, porém do ano de 2009. A temperatura interna do R3 ficou na média de $30^{\circ}\text{C} \pm 1$, estando assim como R1 e R2 dentro da faixa para o melhor trabalho das bactérias mesófilas (25°C e 34°C).

No R3, as concentrações de CH_4 foram relativamente mais altas, quando comparadas com R1 e R2, atingindo valores de 36,4% na primeira amostragem e evoluindo para um valor máximo de 51,4% na penúltima medição do período de estudo. O gás CO_2 teve valores de 39,2% no início e aumentou, atingindo um valor máximo de 48,3%. O oxigênio (O_2) teve maiores variações (0,4% - 4,2%), sendo que no início do experimento as concentrações foram maiores. Dessa forma pode-se classificar R3 como estando na Fase IV da degradação. Pode-se assim classificar devido às baixas concentrações de O_2 , e altas porcentagens de CH_4 , e CO_2 .

Nesta fase, denominada Fase Metanogênica, predominam os microrganismos estritamente anaeróbios, denominados metanogênicos, que convertem o ácido acético e o gás hidrogênio em CH_4 e CO_2 . A formação do metano e dos ácidos prossegue simultaneamente, embora a taxa de formação dos ácidos seja reduzida consideravelmente.

Frequentemente a Fase IV de produção de gás contém, aproximadamente, em volume, 45% a 60% de metano, 40% a 60% de dióxido de carbono, e 2% a 9% de outros gases, tal como os gases sulfídricos. O pH do lixiviado nesta fase tende a ser mais básico, na faixa de 6,8 a 8,0 conforme dispõe Tchobanoglous, Theisen e Vinil (1993). A média dos valores de CH_4 (47,2%) e CO_2 (45,3 %) presentes no biogás do R3, podem confirmar que o reator se encontrava nessa fase de degradação.

O pH do lixiviado do R3 situou-se entre 5,42 e 5,88, bastante próximo de 6,0 e mais elevado que nos reatores R1 e R2. Quando comparado com as concentrações médias dos gases do aterro de Içara/SC e Tijuquinhas (tabela 5), os valores das concentrações dos gases de R3 estavam muito próximos. Pode-se explicar essa proximidade dos valores pelo fato de que o aterro de Tijuquinhas, em Biguaçu/SC, recebe os resíduos sólidos da cidade de Florianópolis, logo a gravimetria desses RSU se assemelha com a gravimetria de R3. As concentrações de O_2 eram menores em R3, porém CH_4 e CO_2 possuíam concentrações dentro da faixa dos valores desse aterro.

A média das concentrações de DQO (total) foi de 58.424mg/L, valor bem menor que os obtidos no R1 e R2 que foram elevados. Assim como no R1 e R2 os valores desse parâmetro para R3 podem ser comparados com a DQO (total) de aterros novos.

O valor médio de DBO foi de 7.130 mg/L. Segundo dados da tabela 2 (variações das concentrações dos lixiviados segundo a idade do aterro) para um aterro com idade de 0 a 5 anos, as concentrações de DBO estão entre 10.000 - 25.000 mg/L. Logo os valores de DBO do R3 estavam dentro dessa faixa.

Comparando-se os resultados das análises da composição do biogás entre R1, R2 e R3 pode-se identificar uma maior produção de CH_4 no R3. Isso se deve ao fato do R3 ter sido preenchido com RSU coletados diretamente no caminhão da estação de triagem da Comcap. Esses resíduos já estavam misturados e compactados, além de já apresentarem textura úmida, líquido e um odor forte, o que indicava que já haviam iniciado o processo de degradação. Tais resíduos eram provenientes do bairro de Canasvieiras e continham grande quantidade de matéria orgânica vegetal (podas de árvores e capim) e também, por ser uma área com grande concentração de restaurantes, havia grande quantidade de restos de alimentos de origem marinha.

Já o preenchimento de R2 (gravimetria de 2007) foi feito em laboratório, com resíduos vindos diretamente de casa, logo eram “mais limpos”, não misturados, sem compactação e sem material orgânico vegetal como capim, por exemplo.

As diferenças na geração do CH_4 entre R1 e R2 foram pequenas. Com relação ao CO_2 , houve uma diferença considerável entre os três, sendo que o maior produtor foi R2 (fase III de degradação).

Os maiores valores de H_2S no R2 podem ser justificados pelo fato desse reator apresentar uma maior porcentagem de tecido na composição do seu preenchimento. Os tecidos sintéticos contêm petróleo na sua composição, sendo o mesmo uma fonte natural de H_2S . Também a tinta do tecido apresenta H_2S na composição.

A temperatura interna dos três reatores foi bastante semelhante, situando-se basicamente na faixa mesófila. Com relação à análise da concentração da DQO e DBO_5 do lixiviado, R1 e R2 obtiveram valores elevados e mesmo sendo as porcentagens dos preenchimentos diferentes, os valores desses parâmetros mostraram-se parecidos. Já R3 teve concentrações de DQO e DBO_5 bem menores, o que pode ser explicado pelo fato desse reator estar numa fase mais avançada de degradação (fase IV- metanogênica) que R1 (transição entre fase II e III e R2(fase III - ácida).

As altas concentrações de DQO identificam o alto teor de matéria orgânica presente nos reatores. Isso pode ser explicado pelo fato do lixiviado ter sido coletado durante a fase ácida, e que os reatores ainda não atingiram a fase estável de fermentação anaeróbia.

Na figura 2 apresentam-se as diferentes fases de degradação dos resíduos sólidos e a formação do biogás em aterros sanitários.

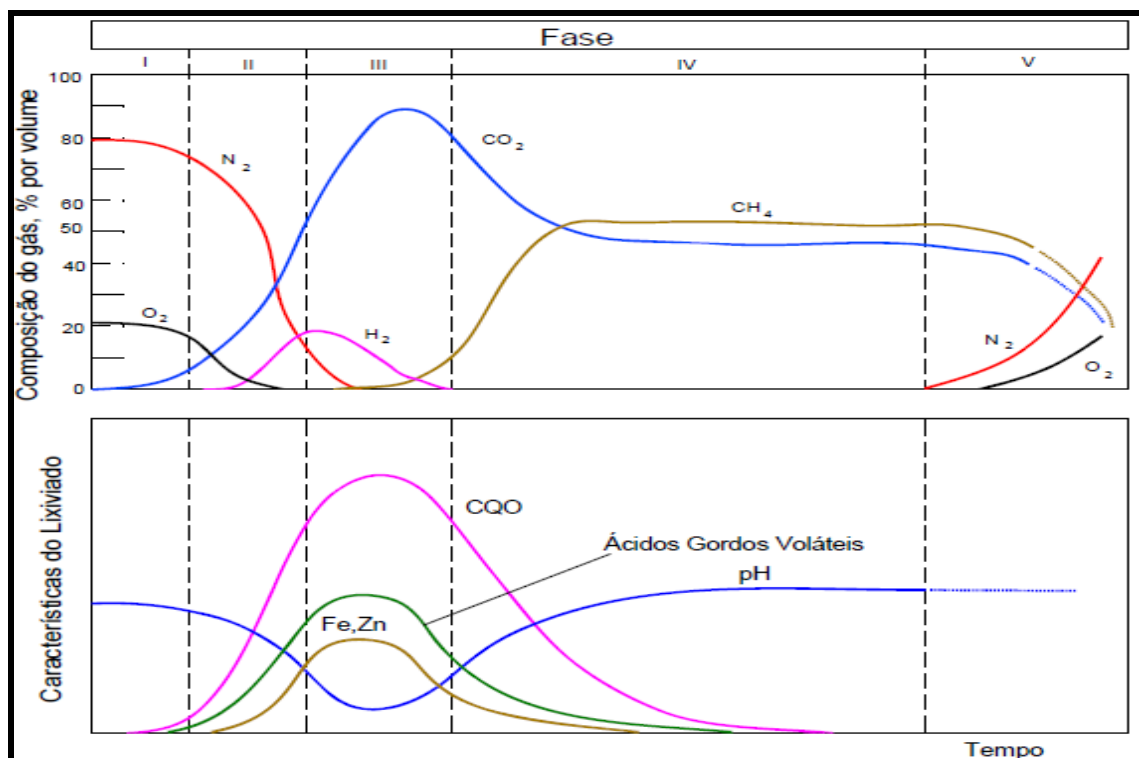


Figura 2: Fases de formação do biogás de aterro
Fonte: Adaptado de Tchobanoglous, Theisen & Vinil (1993).

Assim, de acordo com as características de cada fase de degradação, procurou-se enquadrar cada um dos reatores, segundo o gráfico da figura 2.

De posse dos resultados das medições do biogás enquadrou-se da seguinte forma: R1 como pertencente a uma fase de transição entre a Fase II (de transição) e a Fase III (ácida). O R2 já se encontra na Fase III, no entanto, como esta se divide em outras 3 etapas, não se pode determinar exatamente em qual das etapas se encontra. O reator R3, pelos resultados das concentrações dos principais gases presentes no biogás medidos, se encaixa na Fase IV de degradação, é fase metanogênica, onde se tem produção de metano e gás carbônico, conforme identificado em R3.

CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho foi atingido, uma vez que por meio da metodologia proposta foram obtidas as porcentagens dos principais gases presentes no biogás dos três reatores e identificado o reator que obteve a maior produção de gás metano.

Com relação à caracterização do biogás, pode-se concluir que:

- I. Através dos resultados obtidos das medições das concentrações dos gases presente no biogás dos três reatores, identificou-se que o reator R3 foi o que apresentou maior rendimento na produção de CH_4 . A concentração média do biogás para este reator foi de 47,2% de CH_4 , 45,3% de CO_2 e 1,5% de O_2 . Esses valores se assemelham com as concentrações médias dos gases do aterro de Içara/SC e Tijuquinhas. Conclui-se assim que tal proximidade dos valores é pelo fato de que o aterro de Tijuquinhas, em Biguaçu/SC, recebe os resíduos sólidos da cidade de Florianópolis, logo a gravimetria desses RSU se assemelha com a gravimetria de R3.
- II. A temperatura interna e externa dos reatores manteve-se na faixa mesófila (25°C e 34°C), com pouca variação. Logo, a temperatura pode não ter sido um fator de influência na diferença na composição do biogás entre os reatores.
- III. A qualidade do biogás foi dependente dos preenchimentos de cada um dos reatores (composição), com diferentes proporções de resíduos.

Quanto ao líquido gerado, pode-se finalizar que:

- I. A média dos resultados das amostras de DBO e DQO para R1 foi respectivamente, 12.217 mg/L e 94.252 mg/L; para R2, 12.062 mg/L e 95.426 mg/L. R1 e R2 obtiveram uma média de valores elevados e mesmo sendo as porcentagens dos preenchimentos diferentes, os valores desses parâmetros mostraram-se parecidos. Já R3 teve concentrações de DBO (7.130 mg/L) e DQO (58.423 mg/L) bem menores. As altas concentrações de DBO e DQO do líquido identificam teores elevados de matéria orgânica presente nos reatores.
- II. O líquido, como um composto químico, leva consigo os constituintes da massa de resíduos sólidos enquanto flui. Portanto não há um líquido típico, e cada massa de resíduo específico precisa ser considerada quanto a este respeito.

Assim, como cada reator possui um preenchimento com diferentes porcentagens de composição de resíduos sólidos urbanos, tanto o biogás quanto o líquido gerado é uma característica particular de cada um deles. Pode-se dizer que a qualidade do biogás e do líquido gerado está diretamente relacionada a composição dos RSU utilizados como preenchimento.

Embora a divisão do processo de digestão anaeróbia em fases facilite o entendimento dos fenômenos de estabilização biológica dos resíduos sólidos urbanos e seus impactos sobre as emissões gasosas, na prática, durante a vida de um aterro, essas fases não são bem definidas, não sendo difícil encontrar as três fases ocorrendo simultaneamente em um único aterro. Isto pode explicar, por conseguinte, a dificuldade em se definir e classificar a fase de degradação pela qual os reatores estão atravessando.

Como recomendação, pode-se destacar que, como o período de desenvolvimento do trabalho foi relativamente curto, seria interessante dar continuidade ao monitoramento dos reatores, para assim se poder acompanhar a

evolução do processo de degradação dos RSU e também melhor se identificar a qualidade do biogás e do lixiviado que está sendo gerado. Assim, para analisar a concentração de matéria orgânica produzida, os testes de DBO e DQO do lixiviado deveriam ser mantidos, assim como a caracterização do biogás.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 10.007 - Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 1987.
2. ANDREOLI, C.V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES F. Princípios do Tratamento Biológico de Águas residuárias: Lodo de Esgoto- tratamento e disposição final. DESA-UFMG, v.6, 2001. 483p.
3. BARLAZ M. A.; MILKE M. W.; HAM R. K. Gas production parameters in sanitary landfill simulators. Waste Management & Research, v. 5, n. 1, p. 27-39, 1987.
4. CASSINI, S. T.; VAZOLLER, R. F.; PINTO, M. T. In: Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás. CASSINI, S. T. (Coordenador). Rio de Janeiro:ABES, RIMA, 2003. p.1-9.
5. CASTILHOS JR, A.B. Resíduos Sólidos Urbanos: Aterro Sustentável para Municípios de Pequeno Porte, Rio de Janeiro, ABES, RIMA Editora, 2003. 294 p.
6. CHERNICHARO, C.A.L. Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias: Reatores Anaeróbios, 2. ed. Belo Horizonte, UFMG/ Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, v.5, 2007. 380p.
7. CHRISTENSEN T. H.; KJELDSSEN P.; BJERG P. L.; JENSEN D. L.; CHRISTENSEN J. B.; BAUN A.; ALBRECHTSEN H.; HERON G. Biogeochemistry of landfill leachate plumes. Applied Geochemistry, v. 16, n 7/8, jun. 2001.
8. DIAS, Vanessa C. Estudo das emissões de biogás nos aterros sanitários de Içara e Tijuquinhas /SC . Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, 2009. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2009. 115p.
9. EL-FADEL, M.; FINDIKAKIS, A. N.; LECKIE, J. O. Environmental impacts of solid waste landfilling. Journal of Environmental Management, v. 50, n. 1, 1997, p. 1-25.
10. ENSINAS, A. V. Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas - SP.2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003. 129p.
11. ESMAP – Energy Sector Management Assistance Programme. The World Bank Handbook for the Preparation of Landfill Gas to Energy Projects in Latin America and the Caribbean. Ontário, 2004.
12. HADDAD, H. S. Avaliação da qualidade do efluente resultante da evaporação/destilação do lixiviado do Aterro Sanitário Canhanduba, Itajaí/SC. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009. 66p.
13. POHLAND, F.G.; S.R HARPER. Critical Review and Summary of Leachate and Gas Production From Landfills. EPA/600/2-86/073, US Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH , 1986.
14. RESTREPO J.J.B. Determinação da taxa de transferência de elementos traços dos resíduos sólidos urbanos para o lixiviado. Tese de doutorado em andamento. Engenharia Sanitária e Ambiental - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2010.
15. SEGATO, L. M.; SILVA, C. L. Caracterização do Chorume do Aterro Sanitário de Bauru. In: 27º Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental – AIDIS, Porto Alegre, 2000.
16. SILVA, C. L.; SEGATO, L. M. Tratamento de Líquidos Percolados por Evaporação Através do Aproveitamento de Gás de Aterros Sanitários. In: 28º Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária y Ambiental, Cancun, 2002.
17. STECH, P.J. Resíduos sólidos: caracterização. In: Curso básico para gerenciamento de sistemas de resíduos sólidos. São Paulo: CETESB; 1982.
18. STRELAU, João. R. M. Estudo comparativo de métodos de extração para determinação de compostos orgânicos em lixiviados de aterros sanitários por cromatografia gasosa a espectrômetro de massa. 2006. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006. 137p.
19. TCHOBANOGLOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. A. Integrated solid wastemanagement: engineering principles and management issues. McGraw-Hill, Hightstown, NJ, 1993. 978p.