AVALIAÇÃO DO DESTILADO DO PERCOLADO DE ATERRO EM FUNÇÃO DOS SEUS QUATRO GRUPOS CONTAMINANTES

Marco Antonio Zelic (1)
Engenheiro Mecânico e de Produção formado pela Faculdade de Engenharia Industrial - FEI
Mestrando em Engenharia Química pela Escola Politécnica da USP

Antonio Carlos S. C. Teixeira
Prof. Dr., Escola Politécnica da USP - Departamento de Engenharia Química.
Doutor em Engenharia Química pela Escola Politécnica da USP

José Luís de Paiva
Prof. Dr., Escola Politécnica da USP - Departamento de Engenharia Química.
Doutor em Engenharia Química pela Escola Politécnica da USP

(1) E-mail para contato: marco.antonio.zelic@gmail.com

RESUMO

A destilação do percolado gerado em aterros sanitários se apresenta como importante processo de tratamento, devido à disponibilidade da grande quantidade de calor gerado pela combustão do biogás, descartado na atmosfera independente de seu uso, durante o período ativo do aterro. Avaliaram-se, em laboratório, os ***destilados*** obtidos a partir de percolados, provenientes de dois aterros classe IIA, um jovem (I) e outro estabilizado (II). Os grupos contaminantes: 1) *Matéria Orgânica Dissolvida*, composto por Sólidos Totais (ST) e a Demanda Química de Oxigênio (DQO), apresentaram como menores valores, reduções de 99,7% e 90%, respectivamente, produzindo um destilado com Cor igual a 0 uH e Turbidez de 1,5 UNT. A análise do Carbono Orgânico Total (COT) revelou 98% de redução nos compostos orgânicos. 2) *Macrocomponentes Inorgânicos* se apresentaram com alto teor de amônia, isentos de fósforo e ânions dentro dos parâmetros estabelecidos pela RESOLUÇÂO CONAMA 430. 3) Os *Metais* também se apresentaram em conformidade aos parâmetros estabelecidos pela mesma Resolução; 4) *Componentes Xenobióticos* revelados em ensaio de Cromatografia Gasosa, revelaram quantidades residuais de compostos orgânicos. O concentrado resultante da destilação, objeto de estudo complementar de degradação, composto por água, sólidos totais e compostos orgânicos retidos, reduziu-se a aproximadamente 1% do volume original.

PALAVRAS CHAVE: destilação, percolado, tratamento.

INTRODUÇÃO

A política ambiental aplicada internamente em países de economia desenvolvida proporcionou nos últimos 40 anos uma notável aceleração na prática da reciclagem, redução drástica da área de aterros e na pesquisa de novas tecnologias para o tratamento do percolado.

Este conjunto de ações mudou o paradigma descrito por Povinelli *et al.* (2009) segundo o qual "devido à tradição de décadas no tratamento de esgoto, aliada a sua *aparente semelhança* com o percolado, os engenheiros sanitaristas, não só no Brasil, mas no mundo inteiro, optaram pelo uso das mesmas técnicas e parâmetros de projeto para tratar um e outro".

Entre o grande número de tratamentos desenvolvidos e disponíveis atualmente, encontra-se a destilação do percolado, muito pouco estudada e aplicada, promissora, pois conta com a disponibilidade energética do calor gerado pelo biogás do próprio aterro (Hamada, 1999), desperdiçado em todo o mundo.

De fato, a vaporização do percolado em ciclo aberto, com descarga na atmosfera e alguns processos em ciclo fechado, foram experimentalmente utilizados na Europa na década de 1980 e após o ano 2000 no Brasil. Porém, são raríssimos os trabalhos acadêmicos publicados que utilizaram a *destilação* como fim ou etapa de tratamento.

Este trabalho procura analisar a eficiência do processo de destilação na remoção dos quatro principais grupos contaminantes do percolado (Christensen *et al.*, 2001):

Matéria orgânica dissolvida: inclui os índices de DQO, COT, devido à matéria produzida biologicamente, incluindo CH_4, ácidos graxos voláteis (em particular na fase ácida da estabilização do lixo) e outros compostos refratários como os compostos fúlvicos e húmicos.

Macrocomponentes inorgânicos (ex. Ca, Mg, Na, K, NH_4^+, Fe, Mn, Cl, SO_4^{2-} e HCO_3^-);

Metais (Cd, Cr, Cu, Pb, Ni e Zn);
Componentes xenobióticos, originados por fontes não biológicas, indústrias e lares, presentes em concentrações relativamente baixas no percolado (*normalmente* menos que 1 mg L^{-1} por composto). Incluem, entre outros, uma variedade de hidrocarbonetos aromáticos, fenóis e compostos alifáticos clorados.

Os processos em ciclo fechado têm a grande vantagem de não descarregar contaminantes diretamente no ambiente, além de proporcionar um melhor controle das frações gasosas e líquidas resultantes da vaporização do percolado. Estudos de sistemas de tratamento com destilação como o realizado por Birchler *et al.* (1994) ou aplicações como pré-tratamento em processos de filtração com uso de membranas, tem sido raramente realizados (Tchobanoglous *et al.*, 2003).

Sá, (2008), utilizando como fonte de energia a luz solar, construiu no aterro de Muribeca em Pernambuco um evaporador cujo vapor condensava-se ao encontrar a baixa temperatura do tampo de vidro inclinado e as gotas formadas escorriam para a canaleta coletora, obtendo um destilado com os seguintes valores de remoção apresentados na Tabela 1:

Tabela 1 - Remoções do destilado de Muribeca (Sá, 2008)

Parâmetro	Unidades	Bruto	Destilado	% remoção
Cor	Hazen	16875	25,2	99,8
Turbidez	UNT	105,5	4,44	95,7
Condutividade	uS cm^{-1}	15150	4,81	99,96
Sólidos Totais	mg L^{-1}	17080	0,0053	99,9
Cromo	mg L^{-1}	0,3	0,29	95,0 *
Ferro	mg L^{-1}	4,0	0,05	98,6
Manganês	mg L^{-1}	1,6	0,13	91,8
DBO	mg L^{-1}	8851	35	99,6
DQO	mg L^{-1}	9214	188	97,9
Colif. Termot.	NMP.100 ml^{-1}	3,0×105	2	99,9
Colif. Totais	NMP.100 ml^{-1}	5,0×105	2	99,9

(*) estimado, pois um dos resultados que compuseram a média foi invalidado.

Se eficiente e eficaz, o destilado poderá ser descarregado em corpos d'água ou ser ofertado como fonte de matéria prima, assim como outros de seus compostos removidos, como a amônia, passando a ser reintroduzido no ciclo econômico, transformando-se em um processo ambientalmente correto e contribuindo para a eliminação ou significativa atenuação de seu rótulo de grande problema de saúde pública e ambiental.

JUSTIFICATIVA

As técnicas atuais empregadas no tratamento do percolado são reconhecidamente ineficientes, ineficazes e de custo elevado. Também são raros os casos de tratamentos locais.

Um dos grandes argumentos para a manutenção de tais processos é o custo energético e os investimentos em equipamentos que seriam empregados em novos processos, porém a grande quantidade de calor gerada na combustão do biogás imediatamente transferido à atmosfera, apresenta a destilação como uma alternativa importante ao tratamento do percolado formado.

Observa-se também que o percolado, contendo mais de 99% de água e menos de 1% de contaminantes, em massa, tem como destaque a diferença entre as temperaturas de ebulição da água e da maioria dos contaminantes, colocando a destilação entre os processos de separação mais eficientes e eficazes para seu tratamento (Seader *et al.*, 2006).

Também não se prevê a inclusão de produtos químicos para acerto de pH, coagulantes e consequente formação extra de lodo.

É importante comentar que grande parte dos microrganismos patogênicos será eliminada pela alta temperatura e o concentrado resultante poderá atingir 1% do volume original (Eisner *et al.*, 1996), viabilizando tratamentos biológicos e químicos locais em pequenos tanques de espécies com alta concentração.

Há potencial de reuso, pois haverá volatilização completa da amônia, presente em alta concentração no percolado, podendo ser quase ou totalmente recuperada e aproveitada em outros processos, além de destilado com baixo índice de contaminantes e características que poderão reinseri-lo no ciclo industrial gerando receita.

A redução da *poluição térmica* é outra vantagem previsível. Os gases de exaustão gerados pelos motores de usinas termoelétricas utilizando metano extraído do biogás alcançam temperaturas superiores a 450 ºC, temperatura também observada em *flares* e demais drenos de gás presentes em aterros.

A destilação é um tratamento local, eliminando o transporte do percolado e etapas posteriores de tratamento externo.

OBJETIVO

Avaliar a eficiência e eficácia do processo de destilação do percolado bruto de aterro, mensurando a remoção dos grupos contaminantes em seu destilado.

ANÁLISES

Os cinco grupos de experimentos descritos a seguir foram planejados para se conhecer qualitativa e quantitativamente a capacidade da destilação em remover os quatro principais grupos de contaminantes:

1. Análise de Sólidos, caracterizando suas frações nos percolados brutos e destilados;

2. Determinação dos parâmetros cor, turbidez, pH, presença de amônia, DQO e ânions, comparando-os aos parâmetros da RC 430;

3. Avaliação da remoção de compostos orgânicos através da comparação do Carbono Orgânico Total (COT) dos percolados brutos com os respectivos destilados;

4. Avaliação da remoção de metais e comparação com os parâmetros da RC 430 no destilado;

5. Determinação dos compostos orgânicos presentes nos destilados I e II.

A seguir, os experimentos são detalhados com a descrição dos materiais, métodos e resultados obtidos.

1. ANÁLISE DE SÓLIDOS

Os *materiais* utilizados para a destilação dos percolados brutos I e II formaram o *conjunto destilador* (figura 1), instalado em capela, composto por *coluna de destilação* de vidro borossilicato contendo cinco estágios (pratos), conectado na extremidade inferior a um *balão para destilação* de 2000 mL, suportado e aquecido por *manta elétrica* (200 W) com potenciômetro e na parte superior a um condensador, também em vidro borossilicato, contendo válvula para controle de refluxo do condensado e conexão em sua extremidade superior para *termômetro analógico.*

Figura 1 Conjunto da coluna de destilação



O equipamento foi refrigerado através de mangueiras conectadas em sua parte inferior (entrada de água fria a 10 ºC) e superior (saída de água quente, aproximadamente 40 ºC) a um banho termostático.

Armazenaram-se 2 litros de cada destilado obtido, em frascos previamente higienizados de vidro âmbar com rolha de vedação plástica e tampa plástica rosqueável, em geladeira a 4 ºC.

Utilizaram-se para a análise completa de sólidos, duas cápsulas de porcelana com capacidade V_0 = 100 mL, lavadas em água destilada e imediatamente calcinadas em forno mufla Brasimet em temperaturas entre 550-600 ºC durante 1 hora, armazenadas em dessecador com sílica gel antes da pesagem em balança analítica.

Apesar das muitas restrições para a coleta de amostras, utilizou-se a norma de coleta, armazenamento e utilização CETESB 6420. Para a análise de sólidos utilizaram-se padrões SMWW, 22ª Edição, 2012 - Métodos 2540 A (explanação geral sobre os sólidos), B (obtenção sólidos totais em temperatura de secagem de 103-105 ºC), D (obtenção de sólidos suspensos totais em temperatura de secagem de 103-105 ºC), E (obtenção de sólidos fixos e voláteis à temperatura de 550 ºC).

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos em mg L^{-1} , sendo: (1) Bruto I (média); (2) destilado I ; (%RI) = % redução de sólidos I ; (3) Bruto II (média); (4) destilado II; (% RII) = % redução Sólidos II e T °C, temperatura na qual a fração foi obtida.

Tabela 2 - Resultados da análise de sólidos e % de remoção.

PARÂMETRO	**Unidade**	1	2	%RI	3	4	% RII	T (^oC)
Sólidos Totais (ST)	mg L^{-1}	8350	20	99,76	9610	30	99,69	103
Sólidos Suspensos Totais (SST)	mg L^{-1}	53	5,00	90,57	1635	15	99,08	550
Sólidos Suspensos Voláteis (SSV)	mg L^{-1}	34	4,00	88,24	1035	13	98,74	550
Sólidos Suspensos Fixos (SSF)	mg L^{-1}	19	1,00	94,74	600	2	99,67	
Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)	mg L^{-1}	8297	15	99,82	7975	15	99,81	
Sólidos Dissolvidos Voláteis (SDV)	mg L^{-1}	1556	6	99,61	1205	7	99,42	
Sólidos Dissolvidos Fixos (SDF)	mg L^{-1}	6741	9	99,87	6770	8	99,88	
Sólidos Voláteis Totais (SVT)	mg L^{-1}	1590	10,00	99,37	2240	20	99,11	550
Sólidos Fixos Totais (SFT)	mg L^{-1}	6760	10,00	99,85	7370	10	99,86	550

2. DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS COR, TURBIDEZ, pH, AMÔNIA, DQO E ÂNIONS.

Coletaram-se amostras do destilado obtido no experimento nº 1 para realização do conjunto de testes para determinação de cor, turbidez, pH, presença de amônia, sulfetos e outros ânions.

COR

Para a avaliação de ***cor*** do destilado, aplicou-se o método comparativo denominado platina-cobalto, cuja escala de cores presente no disco comparador de cor do aparelho é resultado de diferentes concentrações de cloroplatinato de potássio (K_2PtCl_6) em cloreto de cobalto ($CoCl_2$). A Tabela 3 apresenta os resultados em unidades Hazen (uH):

Tabela 3 Resultados de cor dos destilados

Parâmetro	Unidade	Destilado I	Destilado II
Cor	uH	0	0

A cor igual a 0 uH significa ausência de cor, portanto foram obtidos destilados praticamente isentos de colóides e partículas menores.

TURBIDEZ

A turbidez foi avaliada através do método nefelométrico, muito preciso, cujo princípio mede a dispersão da luz incidente devido aos sólidos suspensos na solução, sendo o resultado expresso em UNT, Unidades Nefelométricas Totais. Utilizou-se um turbidímetro de bancada Hach 2100. A Tabela 4 apresenta os resultados:

Tabela 4 Resultados da turbidez

Parâmetro	Unidade	Destilado I	Destilado II
Turbidez	UNT	1,0	0,7

Os valores resultantes revelaram que a concentração de sólidos suspensos remanescentes no destilado foi muito baixa.

pH

O teste de pH foi realizado através de pH-metro Tecnal, modelo TEC-5., utilizando-se o método SMWW, 22ª Edição, 2012 - Método 4500H+ B, denominado método eletrométrico. Efetuou-se o ensaio obtendo-se as seguintes medições de pH nos destilados, apresentados na Tabela 5:

Tabela 5 pH dos destilados

Parâmetro	Unidade	Destilado I	Destilado II
pH	---	9,0	8,2

A remoção de diversas substâncias ácidas presentes no percolado bruto elevou o pH do destilado. Terminado o ensaio da medição de pH, iniciaram-se os experimentos qualitativos. Notou-se que o destilado obtido apresentava forte odor de enxofre e amônia, fatos que foram confirmados através dos resultados experimentais realizados.

AMÔNIA

Para a análise qualitativa da amônia utilizou-se o método descrito em (Vogel, 1979) Vogel's Qualitative Inorganic Analyses pg. 293 III.38 item 1, através do gotejamento por hidróxido de sódio (NaOH), resultando em consequente aumento do pH. O aumento da concentração de hidróxidos na solução deslocou o equilíbrio da reação reversível para a direita $NH_4^+ + OH^- \leftrightarrow NH_3 + H_2O$, liberando gás amônia, gerando leve borbulhamento e acentuado odor de amônia, previamente presente. Os resultados estão registrados na Tabela 6:

Tabela 6 Presença de amônia- ensaio qualitativo.

Parâmetro	Unidade	Destilado I	Destilado II
Presença de Amônia	---	Sim	Sim

A análise quantitativa foi realizada através do Standard Methods 4500 A, nitrogênio orgânico e B: Macro Kjeldahl Method - NTK, soma do nitrogênio orgânico e do nitrogênio amoniacal para as amostras de ambos os aterros, brutas e destiladas, cujos resultados foram tabulados na Tabela 7:

Tabela 7 - Resultados obtidos para o Nitrogênio total, amoniacal e orgânico.

Tipo	Unid	Bruto I	Dest. I	Bruto II	Dest. II
NTK	mgN L^{-1}	1860	653 (*)	1515	408 (*)
N-NH_3	mgN-NH_3 L^{-1}	1540	634 (*)	1374	280 (*)
N org	mgNorg L^{-1}	320	19 (*)	141	128 (*)

(*) Houve grande perda de amônia por evaporação durante a coleta do destilado, porém as experiências realizadas não visaram sua recuperação.

DQO

O teste da *Demanda Química de Oxigênio* (DQO) é utilizado para medir o oxigênio do material orgânico em efluentes que pode ser oxidado *quimicamente.* Ensaiaram-se destilados I e II contendo altas concentrações de amônia, sulfeto de hidrogênio, baixa concentração de compostos orgânicos e traços de metais, conforme SMWW, 22ª Edição, 2012 - Método 5220 D, resultando conforme a Tabela 8 em:

Tabela 8 DQO bruto e destilado

Tipo	Unid	Bruto I	Destilado I	% Red. I	Bruto II	Destilado II	% Red. II
DQO	mg L^{-1}	8690	560	94	9488	1020	90

ÂNIONS

A quantificação de ânions foi realizada pela técnica de cromatografia de íons através de cromatógrafo iônico Metrohm (Laboratório Larex – USP). Os *resultados* obtidos pela cromatografia iônica compõe a Tabela 9:

Tabela 9 - Resultado da cromatografia iônica no destilado.

Parâmetro	Unidade	Destilado I	Destilado II	CONAMA 430
Sulfato	mg L^{-1}	0,286	0,192	NE
Sulfeto	mg L^{-1}	*	*	1
Fluoreto	mg L^{-1}	<LQ	-0,012	10
Brometo	mg L^{-1}	0,319	*	NE
Cloreto	mg L^{-1}	*	*	250
Nitrato	mg L^{-1}	8,67	0,274	10

(*) não detectado; NE = não especificado ; < LQ menor que o limite de quantificação, definido como a menor concentração de analito que possa ser medida com nível aceitável de incerteza (ou com exatidão e precisão aceitáveis).

3. AVALIAÇÃO DA REMOÇÃO DE COMPOSTOS ORGÂNICOS ATRAVÉS DA COMPARAÇÃO DO COT DOS PERCOLADOS BRUTOS I E II COM OS RESPECTIVOS DESTILADOS.

Utilizaram-se amostras de percolado destilado obtidos no experimento nº 1 em um Equipamento TOC/TN marca Shimadzu.

Utilizou-se o EPA Standard Methods 5310 TOTAL ORGANIC CARBON (TOC).

A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos do Carbono Orgânico Total (COT) em $mg.L^{-1}$ para os percolados brutos e destilados I e II, além do cálculo de redução devido à destilação.

Tabela 10 - COT percolado bruto e destilado

Amostra	Unid	COT bruto(a)	COT destilado(b)	Redução (a-b)	% Redução
II	$mg\ L^{-1}$	1703,5	17,6	1685,9	98,9
I	$mg\ L^{-1}$	792,5	16,8	775,5	97,9

A seguir a idade do aterro foi indicada na Tabela 11 através da relação entre COT e a DQO conforme classificação geotécnica.

Tabela 11 - Relação COT/DQO (Yao, 2013).

Aterro	Unid.	COT	DQO	COT/DQO	Aterro
II	$mg\ L^{-1}$	1703,5	9488	0,18	estabilizado
I	$mg\ L^{-1}$	792,5	8690	0,09	jovem

4. DETERMINAÇÃO DE COMPOSTOS ORGÂNICOS PRESENTES NOS DESTILADOS I E II

As amostras dos destilados I e II foram analisadas através das técnicas de cromatografia gasosa e espectrofotometria realizada em Cromatógrafo Shimadzu modelo 17A , acoplado ao Espectrofotômetro de Massas marca Shimadzu modelo QP 5050A.

Um total de 73 compostos foi encontrado nos destilados I e II . A Tabela 12 abaixo mostra alguns exemplos, porém a análise individual dos compostos revelou mais de 90% tinham temperaturas de ebulição acima de 100ºC, o que evidenciou que foram transferidos ao destilado por arraste.

Tabela 12 Parcela de compostos revelados na análise de GC-MS

Composto	T ebulição ºC
Morpholine, 4-octadecyl-	129
Squalene	285
1-Pentadecanamine, N,N-dimethyl-	300
n-Hexadecanoic acid	215
Hexadecanoic acid, methyl ester	185
Trisiloxane, 1,1,1,5,5,5-hexamethyl-3,3-bis[(trimethylsilyl)oxy]-	100
Tetradecanal	302
Dec-2-en-1-ol	231
Diethyltoluamide	288
Dodecanoic acid, methyl ester	262
Tris(trimethylsilyl)borate	184
9-Octadecenoic acid, methyl ester, (	218
Ergosta-7,22-dien-3-ol, (3.beta.,22E)	487,5
Phenol, 2,6-bis(1,1-dimethylethyl)-	253
Tetradecanoic acid	250,5

5. REMOÇÃO DE METAIS

Coletaram-se amostras do destilado obtido no experimento nº 1 para realização dos testes e avaliou-se a remoção de metais através da técnica denominada ICP-ES, *Inductively Coupled Plasma Emission Spectroscopy*, através do equipamento Varian 720-ES.

Para garantir amostras isentas de compostos orgânicos utilizou-se o Método EPA 3015 "Microwave Assisted Acid Digestion of Aqueous Samples and Extracts".

A Tabela 13 a seguir, apresenta os resultados obtidos através da legenda:
RC 430 = Resolução Conama 430, BI = BRUTO I, DI = DESTILADO I, % RI = % REMOÇÃO I, BI= BRUTO I I, DII=DESTILADO II, % RII=5 REDUÇÃO II; u.v = under value – valores abaixo do limite de quantificação.

Tabela 13 - Resultado Remoção de metais realizada em ICP-ES.

Parâmetro	Unid.	RC 430	BI	DI	%RI	BII	DII	%RII
Alumínio	mg L^{-1}	NE		0,0512			0,0241	
Arsênio	mg L^{-1}	0,5	<LQ	0,0177		0,071	0,0186	73,7
Bário	mg L^{-1}	5	0,065	-0,1755 uv			-0,1776 uv	
Berílio	mg L^{-1}							
Boro	mg L^{-1}	5		0,0011			-0,01770 uv	
Cádmio	mg L^{-1}	0,2	<LQ	-0,0034 uv		0,0017	-0,0037 uv	
Chumbo	mg L^{-1}	0,5	0,0055	-0,0206 uv		0,0020	-0,0205 uv	
Cobalto	mg L^{-1}			-0,0320 uv			-0,0336 uv	
Cobre dissolvido	mg L^{-1}	1		-0,0577 uv		0,0930	-0,0616 uv	
Cromo hexavalente	mg L^{-1}	0,1		*		0,0500	*	
Cromo trivalente	mg L^{-1}	1		*			*	
Cromo Total*	mg L^{-1}		0,1805	0,0185	89,8	0,1300	0,0185	85,8
Estanho	mg L^{-1}	4	<LQ	0,0047 uv		0,0940	0,0352	62,3
Ferro dissolvido (Fe^{2+})	mg L^{-1}	15		0,0028		11,600	-0,0026 uv	
Magnésio	mg L^{-1}			-0,4012 uv			-0,4211 uv	
Manganês dissolvido (Mn^{2+})	mg L^{-1}	1		-0,0183 uv			-0,0186 uv	
Molibdênio	mg L^{-1}			-0,0649 uv			-0,0644 uv	
Níquel	mg L^{-1}	2		-0,0034 uv		0,9040	-0,00015 uv	
Prata	mg L^{-1}	0,1		-0,0020 uv		0,009	-0,0022 uv	
Selênio	mg L^{-1}	0,3	<LQ	0,0165 uv		0,015	-0,0030 uv	
Sódio	mg L^{-1}			-5,3215 uv			-5,51311 uv	
Vanádio	mg L^{-1}							
Zinco total	mg L^{-1}	5	0,664	0,1811	72,7	0,442	0,0103 uv	
Bismuto	mg L^{-1}			-0,0101 uv			-0,0198 uv	
Estrôncio	mg L^{-1}			-0,1388 uv			-0,1390 uv	

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos na caracterização dos destilados I e II forneceram dados iniciais que possibilitaram avaliar parâmetros referentes aos quatro principais grupos contaminantes, inclusive alguns importantes parâmetros referentes à RESOLUÇÃO CONAMA 430.

Percolados Brutos

Os percolados brutos I e II revelaram as respectivas idades dos aterros formadores em função da razão COT/DQO com valores de 0,18 e 0,09, respectivamente jovem e estabilizado.

Sendo assim, analisou-se a biodegradabilidade do percolado, importante para se determinar antecipadamente quais os processos mais aptos ao tratamento, expressa pela relação DBO/DQO (média). Resultaram para os percolados brutos I e II, valores de 0,69 e 0,02, respectivamente, indicando ao percolado bruto I, boa biodegradabilidade (admite-se valores superiores a 0,4) e possibilitando também, tratamento através de processos biológicos. Já esta possibilidade foi totalmente descartada no caso do percolado bruto II, pois a fração biodegradável resultou muito pequena e um processo biológico se tornaria ineficiente e ineficaz.

A análise do ICP-ES (experimento nº5) também revelou a baixa concentração de metais no percolado bruto, mostrando que a massa de resíduos aterrada tem origem não industrial, indicando para ambos os aterros, certo controle por parte de operadores e do poder público.

Destilado

Figura 2 percolado bruto I e destilado I



A destilação do percolado produziu uma solução com baixíssima turbidez e isenção de cor, resultado da excelente remoção de sólidos proporcionado pelo processo, cujas causas podem ser justificadas através dos experimentos realizados.

A ***Matéria Orgânica Dissolvida*** apresentou alta remoção, comprovada através das análises da DQO, Sólidos Totais e COT, com valores mínimos de 90%, 99,7% e 98% respectivamente.

A remoção mínima de 99,7% do total de sólidos é explicada através da Tabela 14:

Tabela 14 Porcentagem de Sólidos Fixos e Voláteis em relação aos Sólidos Totais

Parâmetro	Unid.	I	II	Removido	T. ebulição (°C)
SFT/ST	%	81	77	> 99,9 (ambos)	>550
SVT/ST	%	19	23	> 99,0 (ambos)	> 200 (exp. 4)

A análise dos sólidos presentes nos destilados I e II revelou que 81 e 77% respectivamente dos Sólidos Totais (ST) são Sólidos Fixos (SFT), com temperaturas de ebulição maiores que 550°C, portanto durante a destilação, permaneceram no concentrado, contribuindo decisivamente para o índice de remoção mínimo de 99,7% dos ST.

A fração dos Sólidos Voláteis Totais, que nos destilados I e II representaram 19 e 23% do total de sólidos e apresentaram uma redução de 98% de compostos orgânicos revelada pela análise do COT, justificando assim o alto índice de remoção.

Da mesma forma os *maiores valores* de cor, turbidez e pH resultaram em 0 uH, 1,5 UNT e 9,0 respectivamente. Comparativamente foram melhores que os indicadores máximos para a água potável, 5 uH, 15 UNT e pH 9,0, conforme a portaria 2914 do Ministério da Saúde (2011).

As remoções de *cor e turbidez* justificam-se através da análise da Tabela 15:

Tabela 15 Porcentagem de Sólidos Dissolvidos e Suspensos em relação aos ST.

Parâmetro	I	II	Remoção	Temp eb. (ºC)
% SDT/ST	99,37	75	Cor (colóides)	
% SDF/ST	82	85		>550°C
% SDV/ST	18	15		> 200 °C (*)
% SST/ST	0,63	25	Turbidez (SST)	
% SSF/ST	36	36		>550°C
%SSV/ST	64	64		> 200 (*)

A ***cor e a turbidez*** são consequências diretas da presença de sólidos dissolvidos e suspensos respectivamente, presentes nas soluções, bruta e destilada.

No percolado bruto as porcentagens de sólidos dissolvidos em relação aos sólidos totais, responsáveis pela cor nos percolados brutos I e II resultaram 99,37% e 75% respectivamente e dos sólidos suspensos, responsáveis pela turbidez, resultaram em 0,63% e 25% respectivamente.

A cor dos destilados com valor próximo a zero unidades Hazen, resultantes das medições realizadas no experimento nº 2, são justificadas pela presença de 82% (Bruto I) e 85% (Bruto II) de sólidos dissolvidos fixos entre os sólidos dissolvidos totais. Sua temperatura de ebulição acima de 550 ºC comprovou a retenção dos coloides e partículas menores no concentrado.

Já os baixos valores da turbidez nos destilados I e II de 1,0 UNT e 0,7 UNT respectivamente, foram obtidos devido à presença de 36% de sólidos suspensos fixos em ambas as amostras, com temperatura de ebulição característica acima de 550 ºC e 64% de sólidos suspensos voláteis com diversos compostos retidos no concentrado, com temperaturas de ebulição bem maiores que 100 ºC, conforme discutido anteriormente. Enquadram-se nesta categoria de sólidos a matéria orgânica dissolvida e os compostos xenobióticos.

O leve aumento do pH, I de 8,5 para 9,0 e II de 7,4 para 9,0 foi consequência da retenção no concentrado de compostos como ácidos húmicos e fúlvicos, originados de decomposição vegetal, muito comum na massa de RSU.

A análise dos ***Macrocomponentes Inorgânicos*** revelou que a amônia se transferiu em alta quantidade para o destilado, resultando em leve aumento do pH dos destilados I e II para 8,2 e 9,0 respectivamente. É importante notar que para o menor pH=8,2 e temperaturas próximas a 75°C, 65% da amônia no destilado encontra-se não ionizada.

A *análise de ânions* não revelou a presença de fosfato no destilado, que permaneceu no concentrado e concentrações de sulfatos, fluoretos e brometos, resultaram em valores não significativos. Porém o destilado revelou odor de enxofre, proveniente de mercaptanas e do sulfeto de hidrogênio remanescente. Mesmo dentro de padrões legais, o problema do odor se apresenta, pois o chamado de limiar de reconhecimento, concentração na qual 50% dos seres humanos podem detectar o odor característico, do sulfeto de hidrogênio por exemplo é de 0,00047 ppm (Powers, et al., 2004).

Conforme exposto, os ***Metais*** estiveram dentro dos parâmetros estipulados pela RESOLUÇÂO CONAMA 430 desde o percolado bruto, porém a pequena concentração original também foi reduzida no destilado, conforme comprovou a análise do ICP-ES.

Os ***Compostos Xenobióticos*** acompanharam as tendências apresentadas na matéria orgânica dissolvida, com 98% retida no concentrado. A experiência nº4, revelou traços de compostos orgânicos no destilado, possivelmente presentes por arraste, que ao serem pesquisados, revelaram altas temperaturas de ebulição.

Destacaram-se também na destilação, o pequeno tempo de processamento e *a alta eficiência e eficácia do processo*, com especial atenção à isenção na geração de lodos adicionais e adição de compostos.

De modo geral conclui-se que o processo de destilação do percolado bruto de aterro sanitário produziu um destilado com muitos parâmetros formadores de seus quatro grupos principais de contaminantes dentro dos valores máximos permitidos (VMP) pela RESOLUÇÂO CONAMA 430, o que sinaliza benefícios nas áreas de saúde pública, ambiental e econômica.

RECOMENDAÇÕES

Apesar dos resultados se mostrarem altamente positivos, necessita-se analisar de forma *mais detalhada* parâmetros relativos principalmente aos *Compostos Xenobióticos*, como por exemplo, a possível presença de Poluentes Orgânicos Persistentes (POP) residuais no destilado, pois de forma geral estes têm temperaturas de ebulição bem acima de 100ºC, permanecendo no concentrado. Cloretos, mercúrio e trihalometanos, também devem ser investigados.

É prudente também certificar-se do comportamento da amônia em relação à possibilidade de formação de compostos como aminas. A remoção de odores é fundamental para a aceitação do produto destilado final.

Uma análise bem planejada aumentará a possibilidade do processo de destilação associar-se de forma bem sucedida a uma cadeia simples de processos auxiliares, produzindo um efluente que inclusive, em destino menos nobre, poderia ser descarregado em corpos d'água baseado na RC430.

Os resultados obtidos encorajam a pesquisa do reuso do destilado como fertilizante, substrato para processos bioenergéticos e aplicações diversas na indústria. Ressalta-se também, que o estudo complementar da degradação do concentrado deve ser realizado, assim como a viabilidade quantitativa, qualitativa e econômica do biogás presente no aterro.

AGRADECIMENTOS

Ao grande apoio pessoal e técnico recebido dos Professores Doutores Jorge Alberto Soares Tenório, do Departamento de Engenharia Química que disponibilizou os equipamentos do LAREX e do CEPEMA e Roque Passos Piveli do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental que disponibilizou o Laboratório de Saneamento. Um especial agradecimento às competentes equipes técnicas operacionais de ambos e dos Laboratórios do Semi- Industrial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. BIRCHLER, DEBORAH R. [et al.] Landfill leachate treatment by evaporation [article] // Journal of Environmental Engineering. - 1994. - 120. - pp. 1109-1131..

2. CHRISTENSEN, THOMAS H [et al.] Biogeochemistry of landfill leachate plumes [journal] // applied geochemistry. - 2001. - vols. 16, issues 7–8. - pp. 659–718.

3. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE RESOLUÇÃO NO 430, DE 13 DE MAIO DE 2011 [REPORT] / CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE ; MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. - 2011. - P. 9. - http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646.

4. EISNER, PETER; LEONHARD, KONRAD e WILDERER, PETER A. Closure to “landfill leachate treatment by evaporation" [article] // journal of environmental engineering / ed. American Society of Civil Engineers. - february 01, 1996. - pp. 163–163. - issn (online): 1943-7870.

5. HAMADA, JORGE Estimativas de geração e caracterização do chorume em aterros sanitários [conference] // ABES -Associação Brasileira de Engenharia Sanitária. - 1999. - p. 10.

6. MINISTÉRIO DA SAÚDE PORTARIA Nº 2.914, DE 12 DE DEZEMBRO DE 2011. http://site.sabesp.com.br/uploads/file/asabesp_doctos/kit_arsesp_portaria2914.pdf.

7. POVINELLI, JURANDYR E SOBRINHO, PEDRO ALEM Introdução prosab 5 tema3 [book section] // Estudos de caracterização e tratabilidade de lixiviados de aterros / book auth. (coordenadora) LUCIANA PAULO GOMES. - 2009. - ISBN: 978-85-7022-163-6.

8. POWERS, WENDY E CORZANEGO, MARIZA The Science of Smell Part 1[book section] // 2004.Iowa State University .

9. SEADER J. D. AND HENLEY ERNEST J. Separation Process Principles [book]. - 2006. - p. 791. - Distillation of Binary Mixtures. - isbn- 13 978- 0-47 1-46480-8.

10. SÁ, LIDIANE FREIRE DE Evaporação natural do lixiviado do aterro de muribeca através de um destilador solar [report] / Universidade Federal de Pernambuco. - recife : [s.n.], 2008. - p. 133. - dissertação de mestrado.

11. TCHOBANOGLOUS, GEORGE; BURTON, FRANKLIN L. e STENSEL, H. DAVID Wastewater Engineering Treatment and Reuse [livro]. - [s.l.] : Metcalf & Eddy inc., 2003. - 4.

12. VOGEL, ARTHUR I Textbook of Macro and Semimicro Qualitative Inorganic Analysis [book]. - [s.l.] : Longman Group Limited, 1979. - 5ª.

13. YAO, PENG Perspectives on technology for landfill leachate treatment [article] // Arabian Journal of Chemistry. - 2013. - p. 8.