

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

FLÁVIA FRIEDRICH KRUGEL

ESTUDO DA CONCENTRAÇÃO DO PERCOLADO DE ATERRO INDUSTRIAL POR
EVAPORAÇÃO VISANDO À REDUÇÃO DA CARGA POLUIDORA

CURITIBA
2013

FLÁVIA FRIEDRICH KRUGEL

ESTUDO DA CONCENTRAÇÃO DO PERCOLADO DE ATERRO INDUSTRIAL POR
EVAPORAÇÃO VISANDO À REDUÇÃO DA CARGA POLUIDORA

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Meio Ambiente Urbano e Industrial do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná em parceria com o SENAI-PR e a *Universität Stuttgart*, Alemanha, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Meio Ambiente Urbano e Industrial.

Orientadora: Prof^a Dr^a. Mônica Beatriz Kolicheski

Coorientador: Prof. Dr. Haroldo de Araújo Ponte

CURITIBA
2013

-
- 94e K krugel, Flávia Friedrich.
Estudo da concentração do percolado de aterro industrial por
evaporação visando à redução da carga poluidora. – Curitiba, 2013.
117 f.: il.; 30 cm.
- Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do
Paraná, em parceria com o SENAI-PR e a Universität Stuttgart,
Alemanha, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Meio
Ambiente Urbano e Industrial, 2013.
- Orientadora: Mônica Beatriz Kolicheski. Coorientador: Haroldo
de Araújo Ponte.
-

TERMO DE APROVAÇÃO

FLÁVIA FRIEDRICH KRÜGEL

**ESTUDO DA CONCENTRAÇÃO DO PERCOLADO DE ATERRO INDUSTRIAL
POR EVAPORAÇÃO VISANDO À REDUÇÃO DA CARGA POLUIDORA**

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Mestrado Profissional em Meio Ambiente Urbano e Industrial, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná em parceria com SENAI-PR e a *Universität Stuttgart*, Alemanha, pela seguinte banca examinadora:

Orientador(a):


Prof.^a. Dr.^a. **MÔNICA BEATRIZ KOLICHESKI**
PPGMAUI/UFPR


Prof. Dr. **PEBRO RAMOS DA COSTA NETO**
UTFPR


Prof. Dr. **CARLOS ALBERTO UBIRAJARA GONTARSKI**
PPGMAUI/UFPR




Prof.^a. Dr.^a. **MARGARETE CASAGRANDE LASS ERBE**
Coordenadora do PPGMAUI-UFPR

Curitiba, 28 de outubro de 2013.

AGRADECIMENTOS

A presença onipotente de Deus, que apesar de nosso afastamento, ele nunca nos abandona em nossa caminhada.

Aos meus pais, que me deram todo apoio e forças para dar continuidade e não desistir nos momentos das dificuldades e obstáculos.

Ao companheirismo, amor e compreensão de meu marido Marlus Krügel, que me acompanhou nos momentos difíceis desta jornada.

Aos meus familiares e aos amigos, que de alguma forma contribuíram positivamente com a compreensão das minhas várias ausências em comemorações e reuniões.

A minha orientadora Mônica Beatriz Kolicheski, pela orientação, apoio e ajuda na concretização e finalização deste trabalho.

A coorientação do professor Haroldo de Araújo Ponte.

Ao professor Moacir Kaminski, que me ajudou com seus ensinamentos em análise econômica e me deu forças para não desistir diante do desconhecido, tornando o difícil em simples.

A professora Marielle Feilstrecker pela amizade e carinho durante toda caminhada junto a nossa turma de mestrado e que sem dúvida esteve presente em todos os momentos necessários.

As professoras Patrícia Charvet e Daniela Neuffer que estiveram presentes nos apoiando e organizando com muita dedicação a realização do curso na Alemanha. Foi à realização de um sonho em minha vida.

Ao DAAD pelo apoio ao mestrado e pela possibilidade de participação no curso de extensão internacional, na Alemanha.

Aos meus colegas e equipe do laboratório A, que me ajudaram na realização das coletas de percolado e análises dos ensaios deste trabalho.

A minha querida irmã Juliana Friedrich por toda ajuda e apoio incondicional e pelas contribuições que me fortaleceram para a conclusão deste trabalho.

A amizade daqueles colegas de turma que me incentivaram durante todo o mestrado e pelos momentos de convivência proporcionados.

Ao Klóvis e Bóris, que mesmo tão pequeninos me trazem tantas alegrias.

A todas as pessoas que contribuíram direta e indiretamente para a realização deste estudo.

RESUMO

A aplicação da evaporação de percolado de um aterro industrial foi avaliada como forma de tratamento primário para este tipo de efluente a fim de verificar a possibilidade de ampliação da capacidade de tratamento da estação de tratamento de efluentes (ETE) do aterro. Para esta avaliação foi utilizado o percolado oriundo dos aterros classe I e II, simulando-se as condições de entrada na ETE do aterro. Para verificar a eficiência da aplicação da evaporação para este tipo de efluente, foi realizada a caracterização do percolado antes e após o tratamento por evaporação, conforme a Resolução CONAMA 430/2011. O percolado tratado apresentou reduções de, aproximadamente, 87% para DBO₅ e 90% para DQO. Observou-se no percolado tratado um aumento de pH de 8,78 para 9,26, provavelmente devido a não remoção do nitrogênio amoniacal. Uma análise comparativa com a atual ETE do aterro e a substituição de algumas etapas pela evaporação indicou que o uso da evaporação aumentaria a capacidade de biodegradabilidade do percolado, se a concentração de nitrogênio amoniacal for reduzida com o uso de dessorção (*stripping*). Além da viabilidade técnica do tratamento do percolado por evaporação, verificou-se ainda, através de uma análise econômica simples, que se for utilizado o gás gerado pelo próprio aterro para aquecimento do sistema de evaporação, o custo de implantação e operação da unidade de evaporação estaria na ordem de US\$ 2,60/m³ de percolado a ser tratado. Contudo se este não puder ser adotado e for substituído por óleo combustível o custo é sete vezes superior. O concentrado gerado na evaporação do percolado não apresentou nenhuma restrição quanto aos contaminantes estabelecidos pela Resolução CEMA 76/2009 e apresentou um poder calorífico superior de 1901,70 cal/g e, portanto este resíduo poderia ser destinado para coprocessamento em fornos de cimento, visando seu aproveitamento energético.

Palavras-chave: resíduos classe I, resíduos classe II, aterros sanitários, chorume, evaporação, dessorção, coprocessamento.

ABSTRACT

The application of leachate evaporation on an industrial landfill was analyzed as a way of primary treatment of this effluent, aiming to verify the possibility of capacity treatment enhancement of the landfill effluent treatment plant (ETP). For this evaluation was used leachate from class I and II landfills, simulating the entrance conditions into the landfill ETP. In order to verify the application efficiency of evaporation for such effluent, a leachate characterization was done before and after its treatment by evaporation, in accordance to CONAMA Resolution 430/2011. The treated leachate showed reductions of approximately 87% for DBO_5 and 90% for DQO. It was also verified an increase in its pH from 8.78 to 9.26, probably due to the lack of ammoniacal nitrogen removal by the treated leachate. A comparative analysis with the landfill current ETP and the replacement of a few of its steps by evaporation indicated that the evaporation use would increase the leachate biodegradability capacity if the ammoniacal nitrogen concentration in the evaporated leachate was then reduced by stripping. Besides the technical feasibility of the leachate treatment by evaporation, it was also verified, through a simple economic analysis, that if the landfill's own generated gas was used as a heating source in the evaporation system, the implementation and operation cost of the evaporation unit would be around US\$ 2.60 per cubic meter of leachate to be treated. Nevertheless, if such gas could not be used and fuel oil was used on its place, the cost would be seven times greater. The concentrate generated in the evaporation of the leachate for it did not present any contaminant restriction as of those established by the CEMA Resolution 76/2009 and had a calorific power of over 1901.70 cal/g and therefore this residue could be destined in the co-processing of furnaces in cement plants, aiming its energy use.

Keywords: waste class I, class II waste, industrial landfills, landfills, leachate, evaporation, desorption, coprocessing.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DOS COMPONENTES DE UM INCINERADOR DE FORNO ROTATÓRIO.....	28
FIGURA 2.2 – FOTO AÉREA DE UM ATERRO SANITÁRIO	32
FIGURA 2.3 – DESENHO ESQUEMÁTICO DA COMPOSIÇÃO DE UMA CÉLULA PARA RESÍDUOS CLASSE II.....	33
FIGURA 2.4 – DESENHO ESQUEMÁTICO DA COMPOSIÇÃO DE UMA CÉLULA PARA RESÍDUOS CLASSE I.....	34
FIGURA 2.5 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE DECOMPOSIÇÃO ANAERÓBIA DOS RESÍDUOS EM ATERRO.....	35
FIGURA 2.6 – (A) REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO PROCESSO DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS. (B) CORRENTES ENVOLVIDAS NO PROCESSO.....	45
FIGURA 3.1 – ESQUEMA DE RECEBIMENTO E TRATAMENTO DE RESÍDUOS NO ATERRO ESTUDADO	55
FIGURA 3.2 – FOTO DA MISTURA DO PERCOLADO SENDO PREPARADA	58
FIGURA 3.3 – FOTO DO EQUIPAMENTO TE-1256 – TECNAL UTILIZADO NOS ENSAIOS DE EVAPORAÇÃO DO PERCOLADO.....	60
FIGURA 3.4 – FOTO DO APARATO SISTEMA ADOTADO INDICANDO OS PONTOS DE MEDIÇÃO DA TEMPERATURA DO VAPOR (A) E PERCOLADO (B).....	63
FIGURA 4.1 – DIAGRAMA DE BLOCOS DA APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	68
FIGURA 4.2 – RESULTADOS DA CARGA POLUIDORA DO PERCOLADO CLASSE I.....	70
FIGURA 4.3 – RESULTADOS DA CARGA POLUIDORA DO PERCOLADO CLASSE II	70
FIGURA 4.4 – DAS TEMPERATURAS DO PERCOLADO, EVAPORADO, CONCENTRADO E VOLUME DE EVAPORADO EM FUNÇÃO DO TEMPO.....	79
FIGURA 4.5 – DIAGRAMA DE BLOCOS DA ETE DO ATERRO ESTUDADO.....	89
FIGURA 1A - CONJUNTO DE TRÊS EVAPORADORES OPERANDO EM SÉRIE	108

FIGURA 2A - CORRENTES E FLUXOS DE ENERGIAS TROCADAS PELO EVAPORADOR A.....	110
FIGURA 3A – CUSTO DE AQUECEDORES DE QUEIMA DIRETA, TIPO CILÍNDRICO COM TUBOS VERTICAIS.....	118
FIGURA 4A – TROCADORES DE CASCO E TUBOS FIXOS COM DIÂMETRO DE ¾ IN, ESPAÇAMENTO QUADRADO DE 1 IN, FEIXES DE 16 A 20 FT, CASCO EM AÇO CARBONO E OPERANDO A 150 PSI.....	119

LISTA DE QUADROS

QUADRO 2.1 – PATENTES SOBRE TRATAMENTO DE PERCOLADOS ORIGINADOS DE ATERROS POR EVAPORAÇÃO	49
QUADRO 3.1 – ANÁLISES REALIZADAS, FORMA E TEMPO DE PRESERVAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	59
QUADRO 3.2 – PARÂMETROS ANALÍTICOS E METODOLOGIAS ANALÍTICAS APLICADAS	66
QUADRO 3.3 – PARÂMETROS ANALISADOS, CONFORME CEMA 076 (2009) ...	67
QUADRO 4.1 – RELAÇÃO DAS DESPESAS PARA UMA UNIDADE DE EVAPORAÇÃO DE PERCOLADO.....	94
QUADRO 4.2 – DADOS CONSIDERADOS PARA DETERMINAR A QUANTIDADE DE COMBUSTÍVEL NECESSÁRIA PARA O SISTEMA DE EVAPORAÇÃO	95

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA MÉDIA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES GERADOS NO MUNICÍPIO DE VITÓRIA – ES E PRINCIPAIS MATERIAIS DOS RESÍDUOS GERADOS E COLETADOS NO BRASIL	23
TABELA 2.2 - COMPOSIÇÃO E CONCENTRAÇÕES INDICATIVOS DOS LIXIVIADOS	38
TABELA 2.3 - ANÁLISE QUÍMICA DO PERCOLADO DO ATERRO SANITÁRIO DE BAURU.....	38
TABELA 4.1 - RELAÇÃO ENTRE DBO ₅ /DQO.....	71
TABELA 4.2 – CARACTERIZAÇÃO DO PERCOLADO, CONFORME CONAMA 430 ART. 16 (2011).....	73
TABELA 4.3 – CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO PERCOLADO: PARÂMETROS EM DESACORDO COM A LEGISLAÇÃO.....	76
TABELA 4.4 – RESULTADOS PRELIMINARES DE EVAPORAÇÃO DE PERCOLADO.....	77
TABELA 4.5 – CARACTERIZAÇÃO DO CONDENSADO, CONFORME CONAMA 430 ART. 16.	81
TABELA 4.6 – EFICIÊNCIA EVAPORAÇÃO PARA A REMOÇÃO DE METAIS DO PERCOLADO.....	83
TABELA 4.7 – CONCENTRAÇÃO DOS METAIS PRESENTES NO PERCOLADO QUE ESTAVAM EM DESACORDO COM A LEGISLAÇÃO.....	83
TABELA 4.8 – EFICIÊNCIA DO PROCESSO DE EVAPORAÇÃO EM RELAÇÃO AOS SOLVENTES PRESENTES NO PERCOLADO.....	84
TABELA 4.9 – CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO PERCOLADO EVAPORADO: PARÂMETROS EM DESACORDO COM A LEGISLAÇÃO.....	86
TABELA 4.10 – CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO CONDENSADO AERADO	87
TABELA 4.11 – CARACTERIZAÇÃO DO CONCENTRADO DO PROCESSO DE EVAPORAÇÃO DE PERCOLADO.....	90
TABELA 4.12 – PARÂMETROS RESTRITIVOS PARA COPROCESSAMENTO, CONFORME A RESOLUÇÃO CEMA 76/2009	91
TABELA 1A – PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DA ÁGUA SATURADA.....	117

TABELA 2A - REGRAS PRÁTICAS PARA USO EM ESTIMATIVAS PRELIMINARES DE CUSTOS PARA VASOS DE PRESSÃO.....	120
---	-----

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ε	-	Eficiência
π	-	Número Pi ($\pi = 3,14$)
λ_i	-	Calor latente de vaporização do vapor produzido no evaporador i
ΔT	-	Gradiente de temperatura
A	-	Área de troca térmica
ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASME	-	American Society of Mechanical Engineers
CE	-	The Chemical Engineering Plant Cost Index
CEMA	-	Conselho Estadual de Meio Ambiente
CONAMA	-	Conselho Nacional do Meio Ambiente
C_p	-	Calor específico
D	-	Diâmetro interno
d	-	Densidade
DBO ₅	-	Demanda Bioquímica de Oxigênio durante 5 dias
DQO	-	Demanda Química de Oxigênio
E	-	Eficiência de solda
EPA	-	Environmental Protection Agency
EPE	-	Elevação do Ponto de Ebulição
EPI	-	Equipamento de Proteção Individual
ETE	-	Estação de Tratamento de Efluentes
IEC	-	International Electrotechnical Commission
ISO	-	International Organization for Standardization
L	-	Altura
M	-	Massa
m_i	-	Massa de vapor produzida no evaporador i
NBR	-	Norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)
P	-	Pressão
PCI	-	Poder Calorífico Inferior
PCS	-	Poder Calorífico Superior
PEAD	-	Polietileno de Alta densidade
PET	-	Politereftalato de Etileno

Q	-	Calor
Q_p	-	Calor perdido
S	-	Tensão máxima admissível
T_s	-	Espessura mínima
U	-	Coefficiente de troca térmica
W	-	Massa de material
w_i	-	Vazão de alimentação do evaporador i

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	JUSTIFICATIVA	19
1.2	OBJETIVOS	20
1.2.1	Objetivo geral	20
1.2.2	Objetivos específicos	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	RESÍDUOS SÓLIDOS	21
2.1.1	Classificação dos resíduos	24
2.1.2	Tecnologias para o tratamento de resíduos industriais	25
2.1.2.1	Coprocessamento	26
2.1.2.2	Incineração	28
2.1.2.3	Compostagem	30
2.1.2.4	Aterros industriais	31
2.2	PERCOLADO	37
2.3	FORMAS DE TRATAMENTOS DO PERCOLADO	40
2.3.1	Métodos físico-químicos	41
2.3.1.1	Coagulação e floculação	41
2.3.1.2	Sedimentação e decantação	42
2.3.1.3	Flotação a ar dissolvido	43
2.3.2	Biodegradação	43
2.3.3	Tecnologias avançadas para o tratamento do percolado	44
2.3.3.1	Separação por membranas	44
2.3.3.2	Remoção de gases por dessorção	46
2.3.3.3	Concentração do percolado por evaporação	48
2.4	EVAPORAÇÃO	50

2.4.1	Transmissão de calor em evaporadores.....	51
2.4.2	Equipamentos.....	52
2.4.2.1	Sistemas de economia de energia.....	52
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	54
3.1	PERCOLADO	54
3.1.1	Aterro.....	55
3.1.2	Coleta do percolado.....	56
3.1.3	Mistura do percolado	57
3.1.4	Caracterização do percolado.....	58
3.2	EVAPORAÇÃO DO PERCOLADO.....	60
3.2.1	Descrição do processo de evaporação.....	60
3.2.2	Caracterização do percolado evaporado	62
3.2.3	Evaporação do percolado.....	62
3.2.4	Dessorção do percolado evaporado.....	63
3.3	TRATAMENTO DO LODO OBTIDO.....	64
3.4	ANÁLISES REALIZADAS DO PERCOLADO, PERCOLADO EVAPORADO E LODO	64
3.4.1	Análises realizadas para caracterização do percolado.....	64
3.4.2	Análises realizadas para caracterização do lodo.....	66
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
4.1	PERCOLADO DO ATERRO ESTUDADO	69
4.2	RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO PERCOLADO BRUTO	73
4.3	PROCESSO DE EVAPORAÇÃO DO PERCOLADO.....	77
4.4	CARACTERIZAÇÃO DO PERCOLADO EVAPORADO	81
4.5	REMOÇÃO DE NITROGÊNIO AMONÍACAL POR DESSORÇÃO	86
4.6	ALTERNATIVAS PARA O USO DO PERCOLADO EVAPORADO	88

4.7	AVALIAÇÃO DA POSSIBILIDADE DE AMPLIAÇÃO DA CAPACIDADE DE TRATAMENTO DA ETE DO ATERRO	88
4.8	CARACTERIZAÇÃO DO LODO	90
4.9	ANÁLISE ECONÔMICA SIMPLES DA CONCENTRAÇÃO DE PERCOLADO POR EVAPORAÇÃO	92
5	CONCLUSÃO.....	98
	REFERÊNCIAS.....	100
	APÊNDICES.....	107
	ANEXOS	116

1 INTRODUÇÃO

A geração de resíduos está diretamente ligada ao consumo crescente de produtos industrializados e o aumento do poder de consumo da população. A tecnologia de disposição final em aterros sanitários e industriais são os destinos mais comuns dos resíduos gerados pela população, comércio e indústrias.

A seleção para a destinação em aterros industriais é realizada através da classificação de resíduos, podendo ser classe I – perigoso ou classe II – não perigoso. Aterros classe I são mais restritivos quanto à impermeabilização do que aterros classe II, isto devido à presença de substâncias tóxicas e do caráter poluente que caracterizam estes tipos de resíduos.

A disposição de resíduos em aterros trás como produto de degradação o percolato, também conhecido como chorume. Ocorre também a geração de gases, os quase são constituídos principalmente por metano. Os resíduos do processo de aterramento, quando não controlados e tratados adequadamente, causam a poluição e a contaminação do solo, de águas superficiais e subterrâneas e também contaminações atmosféricas. Em virtude do potencial poluidor do percolato, a implementação de sistemas de coleta e tratamento para este efluente é essencial.

Para atendimento à legislação brasileira, o percolato deve ser tratado antes do descarte no meio ambiente, devendo atender os limites estabelecidos pela legislação que visam à minimização do impacto ambiental.

Quanto maior a quantidade de resíduos aterrados, maior é o volume de percolato gerado. O teor de umidade elevado devido a presença de líquidos nos resíduos aterrados, bem como a incidência de chuvas, refletem diretamente no aumento do volume de percolato. Por este motivo é importante a cobertura da área das células dos aterros para a minimização da geração de percolato.

O percolato gerado nos aterros tem como característica altas concentrações de poluentes de difícil biodegradabilidade e tratamento, tais como: demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO₅) e nitrogênio amoniacal. Estes são parâmetros de referência para a escolha do tipo de tratamento adequado para o percolato, sendo também utilizados para o dimensionamento da ETE do aterro.

Devido à característica poluidora do percolado, a estação de tratamento de efluentes (ETE) de um aterro deve ser dimensionada adequadamente para prever o aumento de volume de percolado com base na capacidade de recebimento de resíduos para aterramento, a fim de tratar eficientemente o efluente gerado pelo aterro.

A composição variável do percolado facilita a compreensão da dificuldade de tratamento de forma adequada. Diversas técnicas podem ser empregadas para o tratamento do percolado em um aterro sanitário ou industrial, dentre as quais as que mais são aplicadas são os tratamentos convencionais físico-químicos e biológicos (BACELAR, 2010).

Desta forma para o projeto da ETE de um aterro é necessário o uso de diferentes tecnologias para o tratamento de efluentes de forma que estas atuem concomitantemente e garantam a eficiência necessária para o lançamento do efluente tratado dentro dos limites exigidos pela legislação ambiental. Dentre estas tecnologias existe a possibilidade de concentração do percolado por evaporação.

Estudos realizados por Bacelar (2010) sobre a concentração do percolado através da evaporação apresentaram uma redução de 70% do volume inicial de percolado e com uma redução significativa de DQO, DBO₅ e cloretos, porém com uma alta concentração de nitrogênio amoniacal, indicando que o uso da evaporação do percolado possibilitaria reduzir o volume de efluente a ser tratado pela ETE do aterro.

Desta forma no presente trabalho foi estudada a concentração do percolado de aterro industrial e redução da sua carga poluidora através da aplicação da evaporação do percolado, sendo avaliada a redução dos principais poluentes.

A concentração do percolado por evaporação produz um resíduo concentrado, a este deve-se dar um destino ambientalmente correto, de forma a evitar seu retorno para o próprio aterro. Para tal foi avaliada a destinação do resíduo por coprocessamento, objetivando o aproveitamento energético.

Este estudo indicou que o resíduo apresenta poder calorífico suficiente para ser destinado por coprocessamento, pois atendeu a legislação do Paraná para este tipo de tecnologia.

1.1 JUSTIFICATIVA

O tratamento do percolado gerado é dispendioso e necessita de várias tecnologias em conjunto para que o efluente tratado atinja os parâmetros exigidos pela legislação ambiental.

A grande variabilidade na composição do percolado e o difícil tratamento deste tipo de efluente em ETEs justifica o estudo da evaporação do percolado, objeto deste trabalho, como a aplicação de uma tecnologia adicional ou primária de tratamento do efluente gerado em aterros industriais.

O tratamento físico-químico, fundamentado em sistemas de precipitação-coagulação, é comumente utilizado como pré-tratamento antes do sistema biológico. Este visa à redução da carga poluidora, toxicidade e materiais recalcitrantes do percolado. Dependendo da concentração dos poluentes do percolado é necessário o uso de grandes quantidades de insumos, para a obtenção de um efluente adequado para o tratamento biológico.

Uma operação que pode ser utilizada para reduzir a toxicidade do percolado a ser enviado a ETE do aterro é a evaporação. Desta forma a evaporação do percolado pode ser uma alternativa para a minimização do uso dos recursos naturais e insumos que são utilizados nos tratamentos físico-químicos.

A inclusão da evaporação na ETE pode possibilitar o tratamento de uma quantidade maior de percolado na etapa de pré-tratamento ou até mesmo que esta etapa seja eliminada, dependendo da eficiência do processo de evaporação.

Contudo, o sistema de evaporação requer muita energia para aquecimento do sistema, sendo interessante o uso dos gases gerados pela degradação dos resíduos aterrados, já que comumente esta matéria é descartada, sem qualquer reaproveitamento.

De acordo com Bahé (2008), os gases gerados no aterro podem ser utilizados como fonte combustível para o sistema de aquecimento da operação de evaporação do percolado. O uso do gás do aterro permite, além do aproveitamento deste o seu tratamento, uma vez que é comum o lançamento do gás para o meio ambiente, sem o prévio tratamento.

No aterro estudado o gás gerado atualmente é queimado sem realizar o aproveitamento energético, e, portanto o estudo da eficiência da evaporação do

percolado e o uso dos gases gerados pelo próprio aterro no sistema de evaporação como fonte energética é importante.

A aplicação da evaporação produz um lodo residual, o concentrado, e não é interessante o seu retorno ao aterro, e conseqüente retorno ao ciclo de geração de percolado. Este concentrado, se obtido com baixa umidade e atendendo a todos os requisitos e limites da legislação pertinente, pode ser destinado para coprocessamento,

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho teve como objetivo o estudo do uso da evaporação para concentrar o percolado, proveniente de um aterro industrial de resíduos classe I e II, como um tratamento adicional ou primário visando à obtenção de um percolado com menor carga poluidora.

1.2.2 Objetivos específicos

Foram propostos para este trabalho, os seguintes objetivos específicos:

- a) Caracterizar o percolado do aterro industrial de classe I e classe II com base na resolução CONAMA nº 430/2011, antes e após a concentração do mesmo.
- b) Determinar a eficiência do uso da concentração do percolado por evaporação.
- c) Avaliar a possibilidade de destinação do lodo gerado no processo de evaporação para coprocessamento, de acordo com a Resolução CEMA 076/2009.
- d) Avaliar a viabilidade técnica do uso da evaporação para permitir a ampliação da capacidade de tratamento de percolado da ETE do aterro.
- e) Realizar uma análise econômica preliminar para comparar o uso do gás gerado pelo aterro e óleo combustível, para o sistema de aquecimento necessário para a evaporação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS

O resíduo sólido, nome técnico para o lixo, pode ser considerado como qualquer material que não possui mais o seu valor agregado. Como estes resíduos são resultantes da atividade humana, seja esta doméstica ou industrial, é inesgotável, sendo diretamente proporcional à intensidade industrial e ao aumento populacional.

A definição para resíduos sólidos é muito ampla, pois são inúmeras as atividades geradoras destes descartes. Dentre estas se destaca a definição da norma ABNT NBR 10004, na qual os resíduos sólidos são:

“Resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT, 2004).”

As características qualitativas e quantitativas destes resíduos podem variar em função de vários aspectos, como sociais, econômicos, culturais, geográficos e climáticos, sendo estes os mesmos fatores que também diferenciam as comunidades entre si (ZANTA e FERREIRA, 2003).

O crescimento desordenado da população e o aparecimento de grandes indústrias têm aumentado a quantidade de resíduos sólidos gerados, que em sua maioria, possuem manejo e destino inadequados, provocando assim, efeitos indesejáveis ao meio ambiente em todos os níveis: ar, água e solo.

De acordo com Katsifarakis (1993) os resíduos sólidos oriundos das atividades domésticas e industriais constituem um dos principais problemas ambientais, econômicos e sociais em todo o mundo, sendo que atualmente a maior parte é depositada em aterros. Neckel *et al.* (2013), afirma que os resíduos sólidos são uma das grandes preocupações da sociedade atual. Ou seja, vinte anos se

passaram e os problemas causados pelos resíduos sólidos permanecem e se agravam à medida que soluções viáveis para este problema não são colocadas em prática.

Os tratamentos de resíduos são foco de estudo e preocupação comum a todos os países, sendo as formas de tratamento bem diversificadas, pois são muitas variáveis a serem consideradas, dentre elas os recursos financeiros, sociais, culturais e ambientais. E como os aterros são uma forma de tratamento de baixo custo estes continuam sendo a principal tecnologia adotada para o tratamento de resíduos sólidos.

Os aterros devem ser devidamente projetados, construídos e utilizados, a fim de evitar a poluição do meio ambiente. Nos aterros, durante a degradação biológica, os resíduos orgânicos podem ser metabolizados por vários micro-organismos decompositores, como fungos e bactérias, aeróbios e anaeróbios, cujo desenvolvimento dependerá das condições ambientais existentes (ZANTA e FERREIRA, 2003; KATSIFARAKIS, 1993).

Os resíduos sólidos contaminados com dejetos humanos e de animais domésticos, os resíduos de serviços de saúde e os lodos de estação de tratamento de esgoto podem ser fontes de micro-organismos patogênicos, além dos micro-organismos decompositores e quando dispostos inadequadamente, provocam doenças e também são fonte da proliferação de pragas. No entanto, ainda são escassos os estudos que avaliam a ocorrência desses micro-organismos em aterros (ZANTA e FERREIRA, 2003).

Estudos realizados em aterros sanitários de Vitória (ES) por Braga *et al.* (2000) e levantamentos dos principais materiais dos resíduos sólidos de origem doméstica coletados e gerados no Brasil realizados por Abrelpe (2012), apresentados na Tabela 2.1, mostram que em um período de 12 anos (2000 a 2012), a diferença da composição média dos resíduos gerados e coletados de mesma fonte em períodos diferentes é pequena.

A diferença das características dos resíduos sólidos industriais e domésticos está nas características físicas, químicas e microbiológicas. O processo industrial gera estes resíduos na forma sólida e líquida, sendo compostos por lodos de estações de tratamentos de efluentes, varrição de fábrica, escórias, borras, sobras do processo, embalagens contaminadas, insumos vencidos e todos os materiais que

de alguma forma entraram em contato ou fizeram parte do processo de produção (BRASIL, 2013).

TABELA 2.1 - COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA MÉDIA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES GERADOS NO MUNICÍPIO DE VITÓRIA – ES E PRINCIPAIS MATERIAIS DOS RESÍDUOS GERADOS E COLETADOS NO BRASIL

COMPONENTE DO RESÍDUO URBANO	PORCENTAGEM (%) NO ANO DE 2000 (ES)	PORCENTAGEM (%) NO ANO DE 2012 (BRASIL)
Matéria orgânica	53,10	51,40
Papel/papelão	19,12	13,10
Plástico	11,77	13,50
Metais	3,25	2,90
Vidros	2,62	2,40
Madeira/ couro/ borracha	2,52	-
Trapos	2,10	-
Diversos	5,45	-

FONTE: ADAPTADO BRAGA (2000) E ABRELPE (2012)

Nas indústrias o processo produtivo, na grande maioria das vezes, tem como consequência a geração de resíduos que necessitam de um tratamento e destino adequados, uma vez que diversas substâncias bastante comuns nos resíduos industriais são tóxicas e algumas têm a capacidade de bioacumulação nos seres vivos, podendo entrar na cadeia alimentar e chegar até o homem (SISINNO, 2003).

O destino, além de ser adequado, deve ser aprovado pelos órgãos competentes, sendo igualmente adequados e controlados no acondicionamento, armazenamento, transporte e tratamento antes do destino final (BRASIL, 2013).

Para reduzir os custos desnecessários com destinação de resíduos, os grandes geradores estão cada vez mais investindo em programas de educação ambiental que visam à separação dos resíduos para possibilitar a reciclagem e o reaproveitamento de materiais.

Com a aplicação de práticas de minimização de resíduos, como a implantação de medidas internas gerais e a otimização do processo, ocorre a redução de desperdícios e o reaproveitamento dos materiais no sistema produtivo. Com investimentos em produção mais limpa, a geração e a necessidade de tratamento de resíduos será cada vez menor, sendo refletido diretamente na

redução dos custos com destinação de resíduos e também menores serão os impactos ambientais.

2.1.1 Classificação dos resíduos

Conforme a norma brasileira NBR 10.004 (ABNT, 2004), os resíduos são classificados como resíduos classe I – perigosos e resíduos classe II – não perigosos. Dentre os resíduos classe II, ainda poderão ser inertes (II A) ou não inertes (II B).

Os resíduos perigosos, classe I apresentam alguma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade e patogenicidade, sendo estas definidas e caracterizadas pela NBR 10.004.

Os resíduos não perigosos, classe II A ou B são todos aqueles que não apresentam as características de periculosidade e nenhum constituinte constantes nos anexos da norma em questão.

O processo de classificação de resíduos considera a origem e processo de geração e também pode ser realizada através dos resultados analíticos dos parâmetros constantes em um laudo de classificação, o qual apresenta os parâmetros descritos na norma. A segregação dos resíduos na fonte geradora e a identificação da sua origem são partes integrantes dos laudos de classificação, onde a descrição de matérias-primas, de insumos e do processo no qual o resíduo foi gerado devem ser explicitados (ABNT, 2004).

Dentre os critérios que são avaliados para caracterizar um resíduo como perigoso – classe I, um deles é a comparação dos resultados das concentrações obtidas no ensaio de lixiviação de resíduos com os limites estabelecidos na NBR 10.004, em que constam os limites máximos de concentração para determinados poluentes (BIDONE *et al.*, 2011).

Os resíduos classe I não são somente gerados na indústria. Diante do termo “perigoso”, associamos a ele algo que não temos em nossas tarefas mais simples, porém em nosso cotidiano é muito comum à geração de resíduos perigosos. Existem vários exemplos de resíduos perigosos, tais como pilhas e baterias, solventes e produtos para limpeza, óleos combustíveis, tintas, lâmpadas

fluorescentes e uma infinidade de outros produtos que quando não são mais úteis, são descartados no lixo comum, sem a preocupação com seu destino.

Através da classificação de resíduos, a destinação destes é realizada de forma adequada no que se refere aos cuidados que são necessários para um tratamento mais seguro.

Os resíduos classe I são os que necessitam de maiores cuidados quanto as possíveis reações, no que se refere à disposição, quando comparando-se aos resíduos classe II e isto é refletido diretamente no custo da destinação dos resíduos.

Os aterros industriais são projetados para o recebimento dos resíduos, conforme a classificação dos mesmos. O investimento e os critérios tecnológicos são mais rigorosos nas células classe I do que para células de resíduos classe II, sendo estas diferenças vão desde as camadas impermeabilizantes, que devem ser mais resistentes, até o incremento de coberturas da área deste aterro, para que não ocorram a infiltração de água de chuva.

O conhecimento sobre a classificação de resíduos sólidos é um importante subsídio para o prognóstico de estratégias de gerenciamento de resíduos. Este conhecimento e a aplicação de um gerenciamento adequado dos resíduos são ferramentas que minimizam os impactos e prejuízos à saúde pública em decorrência da poluição e emissões que estes causam (ZANTA *et al.*, 2006).

2.1.2 Tecnologias para o tratamento de resíduos industriais

Quando não existe a possibilidade da não geração de resíduos estes devem ser gerenciados adequadamente. Na gestão de resíduos, o tratamento e a destinação final são constituídos por vários procedimentos físicos e biológicos que tem por objetivo diminuir a carga poluidora e o impacto ao meio ambiente.

A avaliação da necessidade de tratamento dos resíduos antes da destinação final é fundamental, pois visa à segurança para esta prática e garante o menor impacto ambiental.

Existem diversas formas de tratamentos para os diferentes resíduos, sendo os principais: coprocessamento, incineração, compostagem e aterros industriais,

devido a sua grande aplicação. Na sequencias estas tecnologias de tratamento serão apresentadas brevemente.

2.1.2.1 Coprocessamento

O coprocessamento é uma destinação final, ambientalmente adequada, de resíduos em fornos de cimento, possibilitando o aproveitamento da energia contida nestes materiais ou a substituição das matérias-primas pelo uso do conteúdo mineral dos materiais alternativos (ROCHA *et al.*, 2011; KARSTENSEN, 2006).

Combustíveis fósseis como carvão ou petróleo são substituídos por materiais combustíveis, que caso não fossem aproveitados nos fornos, teriam que ser, em muitos casos, depositados em aterros ou incinerados em instalações especializadas (KARSTENSEN, 2006).

Entre 1960 e 1970, as indústrias cimenteiras eram dependentes dos combustíveis petrolíferos e gastavam altos custos para obtenção de energia, tendo como problema o aspecto econômico. A partir de 1990, foi introduzido o uso de resíduos industriais no processo de produção de cimento. A utilização de resíduos como combustível permitiu a complementação da energia necessária para o processo, e proporcionou a viabilidade econômica, pois em vez de gastos com combustíveis, tem-se rentabilidade com o recebimento de resíduos para coprocessamento (ROCHA *et al.*, 2011).

O uso de resíduos no processo de queima na indústria do cimento torna-se viável, pois este processo é caracterizado pelo consumo de elevada energia térmica, devido às altas temperaturas necessárias, aproximadamente 1450°C, para a produção do clínquer, principal componente do cimento. O uso de resíduos na indústria cimenteira indústria tem outra vantagem importante, a mineralização de alguns resíduos (RENÓ *et al.*, 2013; ROCHA *et al.*, 2011).

As atuais exigências de órgãos ambientais e regulamentação de tecnologias para o tratamento de resíduos vêm impulsionando a prática de coprocessamento. Esta tecnologia, se bem controlada, proporciona benefícios tanto para a obtenção de energia e quanto a aspectos positivos para a eliminação de resíduos de difícil degradação provenientes de diversos processos industriais (SELLITTO *et al.*, 2013;

ROCHA *et al.*, 2011).

A tecnologia de coprocessamento também permite a incorporação de resíduos na massa de clínquer, não gerando cinzas no processo da queima. Porém, quando a operação não é controlada emite poluentes gasosos, provocando impacto ambiental através da poluição atmosférica.

Alguns resíduos não são passíveis de coprocessamento, devido à presença de metais pesados, compostos organoclorados, dentre outros. Desta forma esta tecnologia necessita ser rigorosamente controlada, fiscalizada e licenciada por órgãos ambientais competentes.

No estado do Paraná, o coprocessamento é muito aplicado para o tratamento de resíduos industriais. Geralmente os resíduos são misturados, processo que se denomina blendagem, e encaminhados para a indústria cimenteira.

Segundo Moraes *et al.* (2006) a blendagem consiste na mistura, em proporções definidas, de substâncias de características diferentes, com o objetivo de se obter uma massa com características específicas. A outra forma é envio direto do resíduo, sem que ocorra a blendagem, sendo este substituto direto da matéria prima.

Para a aprovação e aplicação desta tecnologia para tratamento de resíduos é necessário cumprir os requisitos da resolução CEMA 076/2009, que estabelece a exigência e os critérios na solicitação e emissão de autorizações ambientais para coprocessamento de resíduos em fornos de cimento, com fins de substituição de matéria prima ou aproveitamento energético (PARANÁ, 2009).

O coprocessamento é viável para resíduos perigosos que não são passíveis de destinação em aterros industriais, degradação química ou biológica, devido às características de baixo ponto de fulgor e potencial de inflamabilidade.

O uso do coprocessamento, como alternativa de destruição de resíduos, permite a valorização de resíduos que apresentam capacidade de queima, ou seja, os que possuem alto poder calorífico tais como: borras de tinta, solventes, sólidos contaminados como plásticos e equipamentos de proteção individual (EPI) usados, borrachas, pneus, resíduos da agroindústria, resíduos da siderurgia, óleos e borras oleosas entre outros (PARANÁ, 2009). A aplicação desta tecnologia apresenta benefícios ambientais e econômicos para o setor industrial.

Porém, no estado do Paraná, para os resíduos com características de explosividade, pesticidas, resíduos de atividades galvânicas, lodos de esgoto doméstico, resíduos hospitalares e resíduos alimentares não se permite o

coprocessamento (PARANÁ, 2009).

2.1.2.2 Incineração

A incineração é o uso da oxidação dos materiais por combustão controlada que destrói os resíduos até restarem cinzas mineralizadas e gases como dióxido de carbono e água. O principal objetivo da incineração é a redução dos resíduos e a destruição de seus constituintes, eliminando assim os constituintes tóxicos e patogênicos dos materiais (BAIRD, 2002).

Esta tecnologia apresenta-se como uma possível solução para os problemas gerados pelos resíduos sólidos, por ser um processo que reduz em peso (até 70%) e o volume (até 90%) dos resíduos por meio da combustão controlada, em temperaturas entre 800 °C a 1200 °C. Reduzindo o espaço que os resíduos dispõem e ainda resolve o problema relacionado com a destinação de resíduos perigosos (DIAS, 2006).

A incineração é uma tecnologia que está bem desenvolvida para a obtenção de energia a partir de resíduos sólidos urbanos. Tem como alternativa a queima como tratamento de vários tipos de resíduos perigosos e o aproveitamento do calor gerado pelo processo da queima para a geração de energia. Porém, no Brasil esta não é uma prática realizada, mas em países europeus é muito bem aproveitada (BROGAARD *et al.*, 2013).

O processo de incineração consiste basicamente em dois estágios, como apresentado esquematicamente a Figura 2.1.

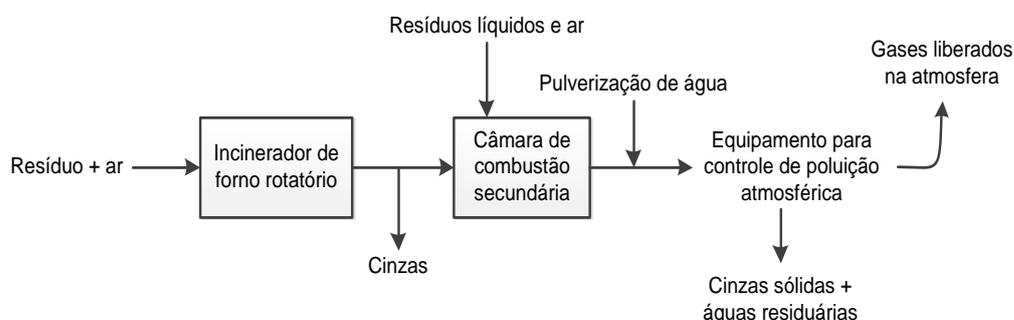


FIGURA 2.1 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DOS COMPONENTES DE UM INCINERADOR DE FORNO ROTATÓRIO.
 FONTE: ADAPTADO BAIRD (2002)

Na câmara primária o resíduo é queimado a temperatura superior a 800 °C, gerando escória e gás de combustão; o gás de combustão segue para a câmara secundária, onde ocorre nova queima a temperatura em torno de 1200 °C com tempo de residência de 2 segundos, para que ocorra a combustão completa. Após a combustão, os gases são encaminhados ao sistema de limpeza, sendo necessária a redução brusca de sua temperatura de forma a prevenir a formação de dioxinas e furanos. As cinzas coletadas nos equipamentos de limpeza e a escória gerada na câmara primária são classificadas como resíduo classe I (FEAM, 2010).

Existem diferentes tipos de incineradores, sendo aqueles mais elaborados os que queimam os resíduos industriais. Destes incineradores, os de fornos rotatórios são mais resistentes e mais difundidos, podendo ser aplicados a vários tipos de resíduos. Ainda existem os incineradores de injeção de líquido, incineradores de leito fluidizado e incineradores de plasma, sendo que cada um é adotado para diferentes aplicações (BAIRD, 2002).

A incineração de resíduos, principalmente urbanos é pouco aplicada no Brasil, pois é uma tecnologia que despende de muito de recursos financeiros e depende de mão de obra especializada. Desta forma, por questões econômicas, conforme Dias (2006) a aplicação de incineradores é viável quando não se tem espaço físico disponível para a destinação de resíduos, como por exemplo, a aplicação de aterros, o que não ocorre no Brasil. Também segundo Dias (2006), outros dois fatores que justificam a instalação de incineradores é a indisponibilidade hídrica para a geração de energia e a minimização de custos frente à quantidade de resíduos a serem tratados.

O processo de incineração gera como resíduo as cinzas, sendo parte destas compostas por alguns materiais metálicos que não foram destruídos no processo da queima. Os residuais do tratamento por incineração necessitam ser destinados em aterro industrial, sendo esta uma desvantagem, pois além do custo do próprio processo da queima tem-se o custo de destinação das cinzas em aterro industrial classe I.

Para a aplicação da tecnologia de tratamento térmico, como a incineração é necessário o atendimento a resolução CONAMA nº 316/02 que estabelece os procedimentos para este tipo de tratamento e dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos (BRASIL, 2002).

Um processo de incineração mais eficaz pode ser obtido com a aplicação de outras técnicas em conjunto, sendo uma delas a tecnologia de gaseificação acoplada à combustão (GCC). Neste processo, os resíduos são inicialmente gaseificados em um gaseificador, seguindo-se a combustão dos gases formados a temperaturas acima de 1100 °C (MOURA *et al.*, 1998).

A tecnologia de GCC tem como princípio a combustão de materiais no estado gasoso, já que a incineração de resíduos no estado líquido e sólido pode dificultar a reação com o oxigênio, durante a combustão, reduzindo a eficiência da queima, podendo resultar na combustão incompleta. Sendo assim, os resíduos sólidos e líquidos são gaseificados antes de serem incinerados, reduzindo significativamente ou até evitando os interferentes da combustão incompleta (MOURA *et al.*, 1998).

2.1.2.3 Compostagem

A compostagem, de acordo com a NBR 13591 é um processo de decomposição biológica da fração orgânica biodegradável dos resíduos, efetuado por uma população diversificada de organismos, em condições controladas de aerobiose e demais parâmetros, desenvolvido em duas etapas distintas: uma de degradação ativa e outra de maturação (ABNT, 1996).

O produto do processo de compostagem é denominado de composto, o qual é utilizado como fertilizante e nutriente para a agricultura. São poucos os resíduos que podem ser tratados com esta tecnologia, pois a degradação só ocorre para resíduos com alto teor orgânico. Desta forma, a compostagem é uma alternativa para indústrias alimentícias, para o tratamento de resíduos de cozinhas industriais e de origem doméstica.

Como o processo é biológico, os fatores mais importantes, que influenciam na degradação da matéria orgânica são a aeração, os nutrientes e a umidade. A temperatura é outro fator importante, principalmente no que diz respeito à rapidez do processo de biodegradação e a eliminação de patógenos, sendo um dos resultados da atividade biológica. Os nutrientes, principalmente carbono e nitrogênio, são fundamentais ao crescimento bacteriano, sendo que estão disponíveis no material a

ser decomposto. O carbono é a principal fonte de energia e o nitrogênio é necessário para a síntese celular. Os elementos fósforo e enxofre são importantes, mas não tanto quanto o carbono e o nitrogênio (FERNANDES e SILVA, 1999).

O processo de compostagem necessita de um intenso acompanhamento e controle dos principais parâmetros, como umidade e temperatura, para que complete todas as etapas da geração de um composto apropriado. Este controle torna-se difícil e trabalhoso em ambientes com variações da temperatura, o que pode inviabilizar o uso desta tecnologia.

2.1.2.4 Aterros industriais

Os aterros industriais, de acordo com a NBR 8419, são técnicas de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais. Método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área e reduzi-los ao menor volume possível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário (ABNT, 1992).

A Figura 2.2 apresenta uma vista aérea da área ocupada por um aterro sanitário. Nesta é possível observar as células ao topo de recebimento para aterramento de resíduos e abaixo e nas laterais as células já fechadas (aterradas). Também podem ser observadas as lagoas de percolado na parte inferior do aterro e uma estação de tratamento para este efluente.

O método de aterramento para a disposição final de resíduos sólidos tanto domésticos como industriais continua a ser amplamente aceito e utilizado devido as suas vantagens econômicas em diversos países.

No Brasil a forma de tratamento de resíduos sólidos, tanto urbanos como industriais, mais comum e mais utilizada é a disposição em aterros sanitários controlados e aterros industriais de classe I ou classe II. Contudo, ainda persiste, até o presente, a disposição de resíduos sólidos em valas e aterros não controlados, os quais geram poluição e impacto ao meio ambiente.



FIGURA 2.2 – FOTO AÉREA DE UM ATERRO SANITÁRIO
FONTE: PREFEITURA MUNICIPAL DE FLORIANÓPOLIS/SC (2011)

Faz parte do plano da Política Nacional de Resíduos Sólidos, o PNRS, a eliminação da prática da disposição de resíduos de maneira descontrolada e irregular, também conhecidos como lixões, até o ano de 2014. Portanto, os lixões deverão ser totalmente substituídos pelos aterros sanitários e controlados até a referida data (BRASIL, 2010).

Como parte da PNRS, os aterros poderão receber somente resíduos não recicláveis, sendo que os municípios deverão apresentar as práticas do tratamento dos resíduos, o planejamento para a implantação da logística reversa e reciclagem dos materiais reaproveitáveis (BRASIL, 2010).

Os aterros que recebem resíduos classe I – perigoso apresentam estrutura diferente dos aterros que recebem resíduos classe II – não perigoso.

Por receber resíduos não perigosos um aterro sanitário classe II é de operação mais simples. Na Figura 2.3 é possível observar, de maneira esquemática, a estrutura de um aterro sanitário classe II. Nesta é possível observar os principais componentes operacionais: drenos de gás, espinha de peixe para coleta de percolado, camadas impermeabilizantes de argila e manta de polietileno de alta densidade (PEAD).

Durante a operação do aterro classe II não é obrigatório o uso de cobertura externa.

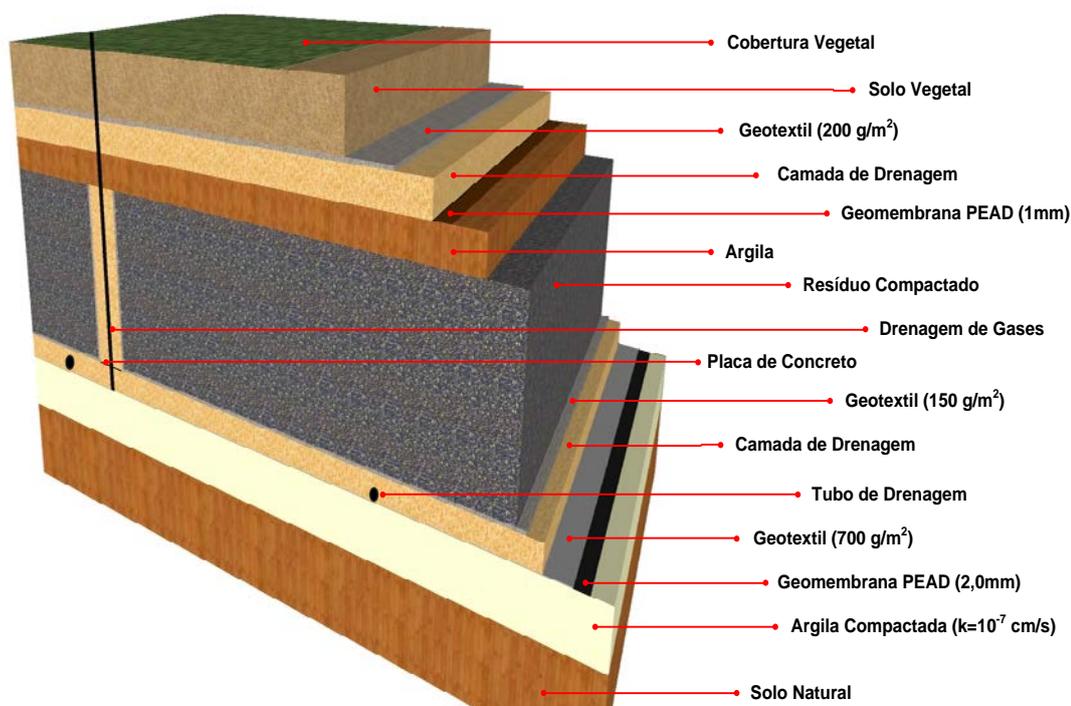


FIGURA 2.3 – DESENHO ESQUEMÁTICO DA COMPOSIÇÃO DE UMA CÉLULA PARA RESÍDUOS CLASSE II

A Figura 2.4, mostra os principais componentes operacionais da estrutura de um aterro classe I, indicando que a impermeabilização adotada é mais rigorosa.

Observando a Figura 2.4 é possível verificar algumas diferenças da estrutura das camadas impermeáveis das células de aterro classe I em relação às células do aterro classe II. Estas diferenças são no número de camadas de proteção e a presença da camada de controle no aterro classe I, além da camada de geomembrana PEAD, acima da camada de argila compactada com maior espessura.

Também não há a drenagem de gases nos aterros classe I, pois os resíduos dispostos neste tipo de aterro e as técnicas de inertização adotadas (encapsulamentos e solidificações) fazem com que a geração de gases seja desprezível, os quais também não afetam a operacionalização do processo.

Outro fator que é indispensável é a cobertura externa do aterro classe I, enquanto operado, para a disposição de resíduos perigosos. Em alguns estados

brasileiros, o uso da cobertura externa, é obrigatório para a obtenção do licenciamento pelo órgão de controle ambiental local e para a operação deste tipo de aterro.

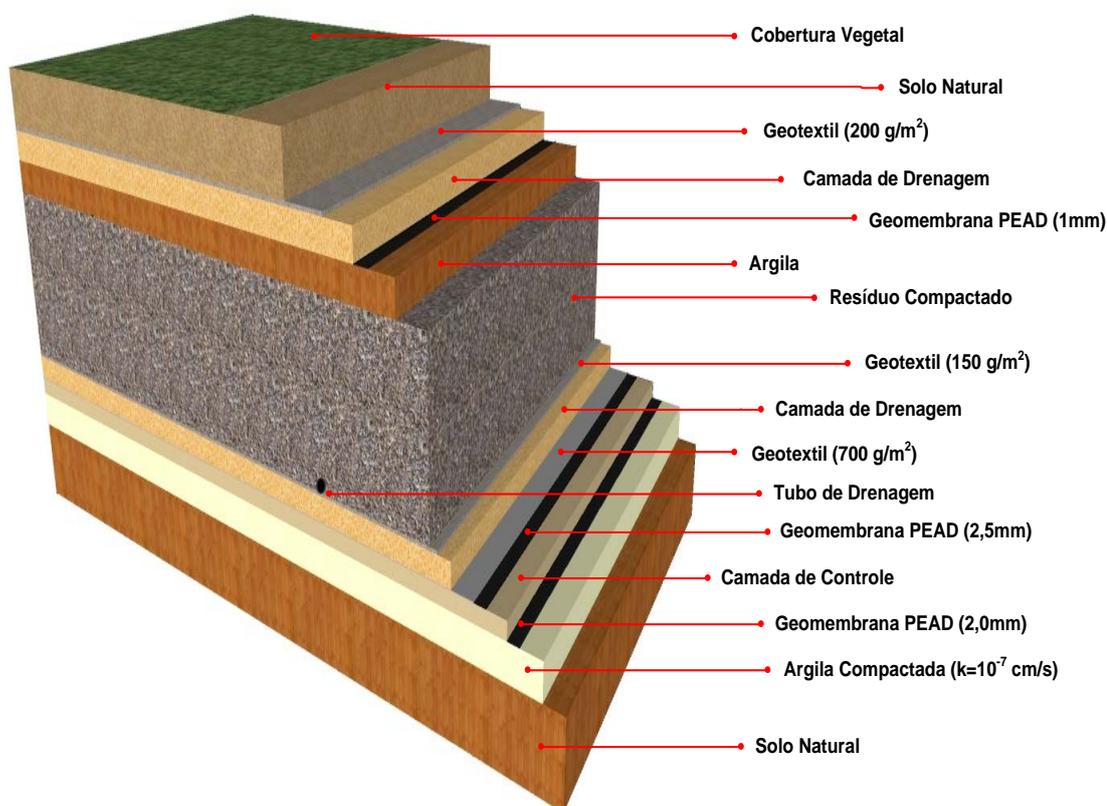


FIGURA 2.4 – DESENHO ESQUEMÁTICO DA COMPOSIÇÃO DE UMA CÉLULA PARA RESÍDUOS CLASSE I

Nas últimas décadas, em muitos países, o aterro tem sido o principal método de eliminação dos resíduos sólidos urbanos e industriais, (BELLA *et al.*, 2012 e RENOUE *et al.*, 2008). E, apesar deste tipo de tecnologia ser amplamente adotado, alguns tipos de resíduos não podem ser destinados em aterros, devido às características de inflamabilidade, reatividade, corrosividade e outras que tornam o resíduo perigoso. Quando ocorre esta situação é necessário o tratamento ou eliminação do resíduo por coprocessamento e/ou incineração. Nestes casos também pode ser realizado o reaproveitamento parcial ou total de substâncias presentes por reciclagem.

Os aterros podem ser considerados um grande reator biológico em que os resíduos sofrem digestões aeróbia e anaeróbia, pelas bactérias presentes.

Os processos que ocorrem no aterramento e mostrados na Figura 2.5,

podem ser divididos nas seguintes etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.

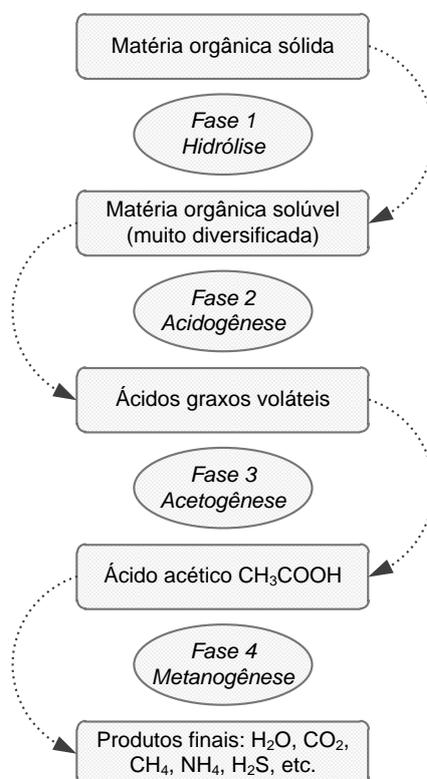


FIGURA 2.5 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE DECOMPOSIÇÃO ANAERÓBIA DOS RESÍDUOS EM ATERRO
 FONTE: CASTILHOS *et al.* (2003)

Estas etapas são as responsáveis pela quebra de compostos complexos em compostos mais simples e pela formação de outras substâncias. A porção biodegradável dos compostos orgânicos é hidrolisada, acidificada e posteriormente metanizada, assim o aterro produz gás que é composto de metano, dióxido de carbono e outros. O percolato gerado no aterro é devido a degradação biológica e à permeação de águas das chuvas. O excesso de percolato é geralmente coletado por meio de um sistema de drenagem no fundo do aterro e posteriormente tratado em ETEs (BELLA *et al.*, 2012 e CASTILHOS, 2006).

Um modelo de decomposição dos resíduos foi definido por Pohland e Harper (1985) *apud* Castilhos *et al.*, 2003. Neste modelo são propostas as cinco fases, apresentadas esquematicamente na Figura 2.5, para avaliar a estabilização dos resíduos em função do tempo. Estas fases estão descritas na sequencia.

Fase I: ajustamento inicial. Fase de curta duração, devido à disposição

recente de resíduo e início do acúmulo de umidade no aterro. Início da decomposição microbiana em condições aeróbias.

Fase II: transição entre ambiente aeróbio e anaeróbio. A condição redutora é estabelecida, com a substituição do oxigênio pelo dióxido de carbono.

Fase III: formação de ácidos. Continuidade da hidrólise dos resíduos e pela conversão microbiológica dos compostos orgânicos biodegradáveis, resulta na produção de ácidos graxos voláteis. O pH diminui e há possíveis complexações dos elementos metálicos. Ocorre o consumo de nitrogênio e fósforo pelo crescimento de micro-organismos.

Fase IV: fermentação metanogênica. Os ácidos intermediários são consumidos pelos micro-organismos e convertidos em metano e dióxido de carbono. O pH é elevado, mas controlado por efeito tampão. Há um importante consumo de nutrientes e ocorre a formação de nitrogênio amoniacal.

Fase V: maturação final. As concentrações de substratos e nutrientes tornam-se limitante e a atividade microbiológica entra em estado relativo de dormência. Ocorre a queda de produção de gás. Reaparecem o oxigênio e espécies oxidativas e as matérias orgânicas resistentes à biodegradação são lentamente convertidas em moléculas e ácidos graxos.

Simultaneamente as alterações bioquímicas, ocorrem os processos físico-químicos, incluindo dissolução, precipitação, adsorção, diluição, volatilização e outros, que influenciam a qualidade do percolado produzido no aterro.

A caracterização do percolado é complexa, pois a sua composição pode variar em função da idade do aterro e ser altamente variável e heterogênea. Geralmente, percolados produzidos em aterros jovens são caracterizados pela presença de altas quantidades de ácidos voláteis, resultantes da fase de ácida da fermentação. Em aterros que são operados há muitos anos, os chamados aterros velhos ou estabilizados, a grande parte dos produtos orgânicos em percolados são as frações húmicas e fúlvicas. A composição complexa do percolado gerado dificulta o tratamento deste para eliminação dos compostos poluentes (KULIKOWSKA e KLIMIUK, 2008).

As desvantagens da disposição de resíduos em aterros são as grandes áreas necessárias para operacionalização, os produtos da degradação gerados e o alto custo para o tratamento do percolado e dos gases gerados. Este problema reflete a preocupação e desenvolvimento do gerenciamento de resíduos, com o

intuito de reduzir a quantidade de resíduos a serem dispostos em aterros e consequente redução na geração de percolado e gases.

Este trabalho preocupou-se com a redução de volume de percolado gerado em aterros por meio da concentração deste por evaporação antes do envio para a ETE do aterro, desta forma o percolado será melhor detalhado na sequência.

2.2 PERCOLADO

O percolado, também chamado comumente de chorume, é um efluente líquido gerado nos aterros sanitários e industriais e geralmente apresenta um forte mau cheiro, coloração intensa sendo também muito tóxico. Pode conter altas concentrações de compostos orgânicos, metais tóxicos, nitrogênio amoniacal, cloretos e muitos outros compostos solúveis (BRITO *et al.*, 2007).

É gerado em consequência da percolação de águas pluviais através dos resíduos, pelos processos bioquímicos que ocorrem na degradação destes resíduos e do conteúdo de água inerente dos próprios resíduos aterrados (RENOU *et al.*, 2008).

Sua composição físico-química é extremamente variável dependendo de diversos fatores como: condições pluviométricas, tempo de disposição, idade do aterro, condições ambientais e características do próprio despejo (BRITO *et al.*, 2007).

O percolado pode conter grandes quantidades de matéria orgânica (biodegradável, mas também não biodegradáveis). Esta pode conter compostos húmicos, os quais são macromoléculas heterogêneas, que consistem em um grupo importante pela presença de anel benzênico, bem como nitrogênio amoniacal, metais pesados, compostos orgânicos clorados e sais inorgânicos. Ensaios de toxicidade com organismos testes como *Vibrio fisheri*; *Daphnia Similes* e *Artemia salina* confirmaram o potencial de toxicidade do percolado, sendo muito importante a necessidade de tratá-lo de forma a atender os padrões de descarte em águas receptoras (RENOU *et al.*, 2008).

O processo de geração do percolado pode ser influenciado por fatores climáticos (precipitação pluviométrica, evapotranspiração e temperatura),

hidrogeológicos (escoamento superficial, infiltração, topografia, geologia e recirculação do lixiviado), pelas características da camada de cobertura (umidade, vegetação, declividade), características dos resíduos (composição gravimétrica, compactação, permeabilidade, granulometria, peso específico) e pelo método de impermeabilização do local (LANGE e AMARAL, 2009).

A composição do percolado varia muito, contudo alguns valores indicativos estão apresentados na Tabela 2.2 (KATSIFARAKIS, 1993).

TABELA 2.2 - COMPOSIÇÃO E CONCENTRAÇÕES INDICATIVOS DOS LIXIVIADOS

CONSTITUINTES	CONCENTRAÇÕES (mg.L ⁻¹)	CONSTITUINTES	CONCENTRAÇÕES (mg.L ⁻¹)
DBO ₅	10000	Potássio	300
DQO	18000	Sódio	500
Dureza total em CaCO ₃	3500	Cloretos	500
Nitrogênio orgânico	200	Sulfato	300

FONTE: ADAPTADO KATSIFARAKIS, (1993)

Na cidade de Bauru/SP foram determinadas as concentrações de alguns contaminantes no aterro sanitário municipal, como mostra a Tabela 2.3. Os resultados apresentados foram obtidos pela média de oito meses entre os anos de 1999 e 2000 (SEGATO e SILVA, 2000).

TABELA 2.3 - ANÁLISE QUÍMICA DO PERCOLADO DO ATERRO SANITÁRIO DE BAURU

CONSTITUINTES	CONCENTRAÇÕES (mg.L ⁻¹)	CONSTITUINTES	CONCENTRAÇÕES (mg.L ⁻¹)
pH	7,46	Cloretos	5331,25
Alcalinidade	11500,00	Cobre	215,62
DQO	78250,00	Ferro	216,25
Nitrogênio amoniacal	1335,62	Manganês	425,00
Nitrato	1057,50	Sulfato	4312,50
Nitrito	13,25	Fósforo total	460,00
Zinco	208,12		

FONTE: ADAPTADO SEGATO E SILVA, (2000)

A falta de controle e tratamento adequado do percolado pode provocar a contaminação do solo, do ar e das águas superficiais e subterrâneas. Uma das principais preocupações em aterros sanitários e industriais é a proteção das águas superficiais e subterrâneas, de forma a evitar a contaminação com o percolado gerado no aterro (KATSIFARAKIS, 1993).

Os percolados têm como característica a difícil tratabilidade devido à sua composição variável ao longo do tempo, aos altos valores de DBO_5 e DQO, além de componentes perigosos de difícil controle oriundos dos inúmeros resíduos dispostos, de origem doméstica e industrial, de forma aleatória e pouco controlada. Sendo assim, as soluções tecnológicas indicadas para o seu tratamento devem ser avaliadas caso a caso (BACELAR *et al.*, 2010).

Fernández-Viña (2000) afirma que é possível estimar a taxa de biodegradabilidade do percolado gerado e a idade do aterro pela relação das concentrações de DBO_5/DQO . Os aterros jovens apresentam uma condição de média biodegradabilidade do percolado com os resultados desta razão próximos à faixa de 0,5 e 0,6. Aterros mais velhos e estabilizados apresentam uma baixa biodegradabilidade, próximos à estabilização e apresentam esta razão de DBO_5/DQO a aproximadamente 0,1. Há percolados com características intermediárias com relação a estes valores indicativos de biodegradabilidade.

As técnicas de tratamento do percolado são as comumente empregadas no tratamento de efluentes industriais e de esgotos e são baseadas em processos físico-químicos e biológicos, incluindo os tradicionais processos aeróbios e anaeróbios. No entanto, as características dos percolados limitam o desempenho de processos biológicos e conseqüentemente, dificultam o atendimento dos padrões ambientais para efluentes líquidos definidos pelos órgãos responsáveis e desta forma, o percolado tem sido descartado apresentando ainda forte coloração e alta toxicidade, constituindo um grave problema para os corpos receptores (BACELAR *et al.*, 2010; BRITO *et al.*, 2010).

Atualmente tem sido necessário o emprego de várias tecnologias em conjunto, na busca do atendimento dos parâmetros previstos na legislação para descarte do percolado no meio ambiente, o qual que precisa ser acompanhado e constantemente adaptado, em virtude da carga poluidora variável, que é devido pela idade do aterro e das condições ambientais.

Em um aterro industrial controlado deve-se também considerar o volume de

resíduos a serem destinados, pois quanto maior a quantidade depositada maior será a geração de percolado. O tipo de resíduo em um aterro é muito importante para a estimativa de geração de percolado e seus possíveis constituintes, pois resíduos industriais, como lodos de ETE de vários processos e segmentos industriais, geram uma quantidade e carga poluidora diferente de resíduos urbanos e resíduos orgânicos.

2.3 FORMAS DE TRATAMENTOS DO PERCOLADO

No projeto de construção de um aterro controlado é imprescindível estimar a quantidade de percolado que será gerado, para o planejamento adequado de todo o sistema de captação e tratamento deste efluente, que possui alto potencial poluidor. Caso a prospecção de recebimento e aterramento de resíduos seja progressiva, deve-se projetar a adequação do sistema de tratamento e planejar o investimento necessário.

De acordo com Renou *et al.* (2008) o tratamento de percolado dos aterros convencionais podem ser classificados em três grandes grupos:

I – Transferência de percolado: reciclagem ou recirculação no próprio aterro e tratamento combinado com esgoto doméstico.

II – Biodegradação: processos aeróbios e anaeróbios.

III – Métodos físicos e químicos: oxidação química, adsorção, precipitação química, coagulação; floculação; sedimentação; decantação e flotação.

Estes métodos são os mais aplicados e estudados para tratamento de percolado, podendo um tipo de tratamento ser associado a outro para a obtenção da eficiência exigida (RENOU *et al.*, 2008).

Na sequência, serão apresentados, brevemente, os métodos adotados no segundo e terceiro grupo, bem como outras tecnologias para o tratamento de efluentes como separação por membranas, destilação, absorção e evaporação.

2.3.1 Métodos físico-químicos

Para a obtenção de uma boa eficiência no tratamento do percolado é importante equalizar o efluente, antes do tratamento. As principais etapas do tratamento físico-químico envolvem: coagulação; floculação; sedimentação; decantação e flotação. Existem outros processos que podem ser subsequentes, como por exemplo, a filtração e a desinfecção.

O tratamento químico remove sólidos em suspensão, materiais coloidais, nutrientes e metais pesados. Também é possível modificar, por reação, a estrutura de compostos orgânicos persistentes, tornando estes acessíveis à degradação biológica e eliminando poluentes recalcitrantes, como compostos farmacêuticos ativos, bem como removendo metais pesados (CAVALCANTI, 2009).

2.3.1.1 Coagulação e floculação

A coagulação e floculação são empregadas para remover do percolado compostos orgânicos não biodegradáveis e metais pesados. O processo de coagulação desestabiliza as partículas coloidais pela adição de um coagulante, que quando adicionado ao efluente, provocam a coagulação e floculação devido à formação de íons positivos. Os coagulantes usuais incluem sais de alumínio ou de ferro, sendo o sulfato de alumínio o mais utilizado. (CAVALCANTI, 2009; RICHTER, 2009).

A coagulação é seguida de um processo físico denominado floculação, onde as partículas formadas na coagulação se chocam, produzindo flocos de maior densidade e volume. Os flocos formados são removidos do meio aquoso através da sedimentação em decantadores (MÁXIMO, 2007).

Em aplicações específicas, como auxiliares de coagulação, é comum a adição de polímeros, sílica ativada e bentonita. A abordagem geral para esta técnica inclui ajuste de pH e envolve a adição de sais férricos ou de alumínio como agentes

coagulantes para quebrar as forças de repulsão entre as partículas (RICHTER, 2009).

Aos coagulantes, contendo sais de alumínio ou de ferro, podem ser adicionados álcalis como cal ou barrilha, com a finalidade de produzir compostos ou complexos que atuam na formação de flocos de tamanho adequado e, desta forma, permitem a adsorção de sólidos dissolvidos, coloidais e em suspensão (CAVALCANTI, 2009).

2.3.1.2 Sedimentação e decantação

A coagulação, floculação e sedimentação podem ser utilizadas no pré-tratamento de percolado jovem, além do uso como pós-tratamento de percolado estabilizado (TATSI *et al.*, 2003).

A sedimentação é um processo físico natural de separação de partículas sólidas em suspensão da água. Trata-se de um método muito comum no tratamento de águas e de efluentes, sendo utilizado na separação de areia, sólidos sedimentáveis, lodos biológicos e químicos (CAVALCANTI, 2009).

Consiste na utilização das forças gravitacionais para separar partículas de densidade superior à do líquido, depositando-as em uma superfície ou zona de armazenamento. Líquidos que contém materiais finamente divididos, no estado coloidal ou em solução, e que não podem ser removidos por sedimentação simples, necessitam da adição de coagulante para formar aglomerados ou flocos que sedimentam com maior facilidade (RICHTER, 2009).

A sedimentação de partículas envolve os seguintes processos (CAVALCANTI, 2009):

- Sedimentação discreta: ocorre em suspensões diluídas de baixo teor de sólidos.
- Sedimentação floculenta: ocorre também em soluções diluídas, mas com aglomeração de partículas, gerando aumento da velocidade de sedimentação.

- Sedimentação por zona: as partículas precipitam como uma massa única e ocorre principalmente quando a concentração de sólidos é alta, como na precipitação de lodos biológicos.
- Sedimentação por compressão: ocorre quando a concentração de sólidos é muito elevada, sendo que a sedimentação ocorre pela compressão do lodo.

Industrialmente, são utilizados decantadores para a separação de sólidos, sendo que os mais comuns são os de fluxo horizontal ou vertical, com ou sem remoção mecanizada (raspadores) de lodo, e os decantadores lamelares.

2.3.1.3 Flotação a ar dissolvido

A flotação é o processo no qual a fase sólida, com densidade menor que a do líquido de suspensão, é separada do líquido, permitindo-a flutuar para a superfície. No efluente é introduzido ar a uma pressão de operação, usualmente de 3 a 5 kg.cm⁻², para que ocorra a separação das fases. Ao despressurizar, na mistura líquida saturada, são liberadas minúsculas bolhas de ar, que permitem a flotação dos sólidos em suspensão até a superfície (CAVALCANTI, 2009, RICHTER, 2009).

Na superfície as partículas formam flocos e acumulam-se na parte superior do flotador, formando um lodo que cresce continuamente. O lodo formado na superfície do flotador é removido mecanicamente e o clarificado (efluente) é removido pelo fundo do equipamento (CAVALCANTI, 2009).

No tratamento de águas residuais, a flotação a ar dissolvido é utilizada normalmente com a finalidade de remover óleos e graxas, sólidos de baixa densidade e também para adensamento de lodos biológicos e químicos (CAVALCANTI, 2009).

2.3.2 Biodegradação

A biodegradação ou tratamento biológico tem por finalidade a remoção da

matéria orgânica carbonácea, sendo mensurada principalmente como DQO e DBO₅; nitrogênio e fósforo que são degradáveis biologicamente.

O processo de tratamento biológico deve ser constantemente monitorado, pois pode se desenvolver de várias formas, todas derivadas de processos que ocorrem na natureza. Estes são acelerados no processo artificial graças ao controle da ação de micro-organismos sobre o substrato. O tratamento biológico de efluentes é composto por processos aeróbios; anóxicos e anaeróbios (CAVALCANTI, 2009).

Estes processos podem ser combinados em etapas, visando uma melhor eficiência do tratamento, porém algumas substâncias, como por exemplo os metais pesados, são tóxicas para os organismos biológicos e devem ser evitadas nos tratamentos biológicos, pois podem prejudicar a eficiência do processo.

2.3.3 Tecnologias avançadas para o tratamento do percolado

O tratamento de percolado pode adotar operações unitárias que envolvem transferência de massa como separação por membranas, absorção, dessorção e evaporação. Na sequência serão apresentadas estas tecnologias que visam à redução de poluentes do percolado e que permitem um aumento da vida útil da ETE de aterros controlados.

2.3.3.1 Separação por membranas

A filtração ou separação por membranas é um processo físico-químico e também pode ser biológico (filtros lentos) para a separação de impurezas em suspensão, mediante a passagem do líquido por um meio poroso (RICHTER, 2009).

As tecnologias para a separação por membranas, utilizadas comercialmente, permitem remover substâncias que variam desde sólidos em suspensão até elementos iônicos, incluindo micro-organismos como bactérias e vírus. Baseiam-se na aplicação de uma força motriz, a pressão hidráulica, para promover a separação

de fases (CAVALCANTI, 2009).

Os principais tipos de processos que envolvem a separação por membranas são: microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa. O que diferencia cada um destes processos é a pressão aplicada e requerida e o tamanho dos poros das membranas.

De acordo com Ferreira, 2010, no processo de separação, Figura 2.6 (A), a corrente fluida de alimentação passa pela membrana e então é dividida em duas correntes: de concentrado e de permeado, sendo uma delas o resultado da separação (produto). As partículas e solutos retidos na superfície da membrana são continuamente removidos no concentrado e a solução clarificada (efluente) flui através da membrana como permeado, como mostra a Figura 2.6 (B).

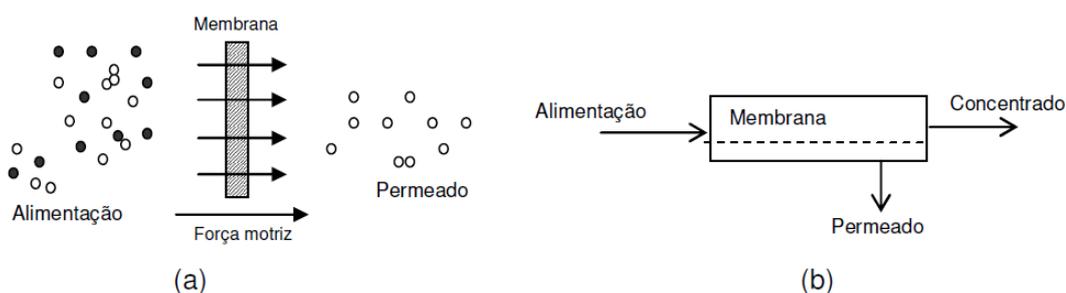


FIGURA 2.6 – (A) REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO PROCESSO DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS. (B) CORRENTES ENVOLVIDAS NO PROCESSO
 FONTE: ADAPTADO RIBAU TEIXEIRA E ROSA, (2004)

O uso da nanofiltração vem crescendo, sendo cada vez mais utilizada na purificação de água para consumo humano, em processos de tratamento de águas residuais e em processos industriais.

Sua capacidade de purificação está entre a ultrafiltração e a osmose reversa, sendo que a membrana para a nanofiltração é constituída por poros menores que 2 nm, portanto retêm moléculas orgânicas de baixo peso molecular (maiores que 200 g/mol) (RIBAU TEIXEIRA e ROSA, 2004).

Os sistemas de nanofiltração se apresentam como unidades simples, compactas e automatizadas. Produzem água tratada de qualidade elevada para consumo humano e em geral, não é necessária a utilização de produtos químicos no tratamento (FERREIRA, 2010).

No entanto, existem fatores que diminuem a eficiência da membrana, sendo os principais a temperatura, que quanto mais elevada maior será o fluxo permeado, e a polarização da concentração, que significa o aumento da concentração de solutos rejeitados pela membrana (FERREIRA, 2010).

A qualidade do líquido bruto também é um fator a ser considerado, já que a adsorção de compostos presentes e o depósito de solutos na superfície da membrana podem dar origem à colmatação da mesma. A colmatação pode causar diminuição do fluxo permeado, alterações na qualidade da corrente efluente e, principalmente, a diminuição do tempo de vida da membrana. Sendo assim, um pré-tratamento pode melhorar o desempenho das membranas e protegê-las (FERREIRA, 2010; NOBREGA *et al.*, 2005).

A nanofiltração pode ser usada como uma das etapas do tratamento do percolado e permite a recirculação total deste, uma parte para o início do tratamento e outra para o aterro, permitindo o completo tratamento no próprio aterro sanitário. Este processo de tratamento é baseado nos métodos convencionais, composto por etapas anaeróbias e aeróbias, etapas físico-químicas e com o diferencial da recirculação de líquido. O líquido retido na nanofiltração (rejeito) é recirculado para o início do processo, após tratamento por oxidação química seguida de floculação e decantação do rejeito (FRANCISCO, 2011).

2.3.3.2 Remoção de gases por dessorção

A operação chamada de dessorção ou *stripping* tem como objetivo a remoção ou transferência de fase de um meio líquido para um meio gasoso. Esse processo é aplicado de forma generalizada na indústria de diversos segmentos e em equipamentos de controle de poluição, dentre estes a remoção de nitrogênio amoniacal (LEITE, 2009).

O processo de *stripping* para a remoção de nitrogênio amoniacal foi idealizado de uma modificação do processo de aeração utilizado para eliminação dos gases dissolvidos em águas residuárias. Neste processo, a transferência ocorre, quando a amônia na forma iônica (NH_4^+), pela elevação do pH ou pelo

deslocamento do equilíbrio químico provocado pelo contato do gás de arraste com o líquido, é convertido a forma gasosa (NH_3) (FERRAZ, 2010; LEITE, 2009).

Apesar da eficiência da aplicação do processo de *stripping* para a remoção de nitrogênio amoniacal de percolado, ocorre a poluição atmosférica, sendo este um dos limitantes deste processo (RENOU *et. al*, 2008).

O processo inverso a dessorção é a absorção, que conforme Perry e Green (1997) os componentes solúveis de uma mistura gasosa, quando submetidos a uma corrente de líquido, são dissolvidos.

Zambon *et al.* (2010) propôs a remoção de nitrogênio amoniacal de efluentes e percolado aliando a dessorção com a absorção. O efluente é aquecido pela queima de combustível. O percolado aquecido é enviado a uma torre de *stripping* reativa para a remoção do nitrogênio amoniacal, o percolado tratado apresenta baixa concentração de nitrogênio amoniacal e é enviado para tratamento ou descarte. Nesta etapa ocorre também a liberação de gás contendo amônia, o qual é enviado a uma absorvedora, esta usa como solvente água ou efluente tratado, e, portanto produz uma corrente de gás limpo e outra de água acidificada com CO_2 derivado da queima de combustível. A água ácida segue para uma segunda torre de absorção, na qual é alimentada a corrente proveniente da torre de *stripping*. A corrente gasosa que deixa a segunda torre de absorção é composta de gás limpo e a líquida de água ácida contendo amônia solubilizada, a qual é enviada para o tratamento ou descarte (ZAMBON *et al.*, 2010).

Casella (2012) também adotou o processo de absorção para o tratamento de percolado com o objetivo de reduzir os gases tóxicos, como H_2S , que são gerados em aterros. Neste processo o percolado é utilizado para a absorção dos gases tóxicos, gerando um resíduo biodegradável, não perigoso, que pode ser enviado para a ETE e/ou reintroduzido no aterro. Este tratamento inclui as seguintes etapas: recepção do percolado, tratamento deste para ajuste das propriedades químicas, absorção do gás gerado no aterro pelo percolado tratado, reciclagem de uma primeira porção do percolado usado, recirculação de uma segunda porção de percolado e por fim a queima do gás tratado.

2.3.3.3 Concentração do percolado por evaporação

A evaporação não é um processo comumente utilizado como sistema de tratamento de efluentes. Para este processo é necessário o emprego de energia em forma de calor para que o sistema opere adequadamente. Como alternativa, o gás metano que é liberado do sistema de aterros, pode ser utilizado como fonte de energia para que a evaporação ocorra.

A evaporação do percolado permite elevada redução de seu volume e pode ser natural ou forçada. Na evaporação natural, o sistema utiliza a energia solar como fonte de calor para o processo, mas esta utilização é somente para pequenas escalas. A evaporação forçada utiliza a queima de combustível como fonte de calor e pode ser adotada em maior escala. No caso de aterros pode-se utilizar como fonte de energia o gás do próprio e aterro (GOMES, 2009).

Basicamente, os evaporadores naturais consistem de uma cobertura transparente que fecha o espaço situado sobre um tanque de baixa profundidade. Essa cobertura se inclina em direção às bordas de forma que a água condensada na superfície da cobertura se direciona, por gravidade, até calhas externas ao tanque (GOMES, 2009).

Nos estudos realizados por Bacelar (2010) no aterro metropolitano de Jardim Gramacho/RJ, o percolado foi tratado por evaporação forçada. Após a evaporação observou-se uma redução significativa de DQO, fósforo, turbidez e cloretos no percolado, mas ocorreu o aumento do pH.

Para Bahé (2008) o percolado tratado por evaporação apresentou uma redução significativa da DQO, DBO₅, cloretos e de outros contaminantes, exceto para nitrogênio amoniacal. Para obter-se a redução do nitrogênio amoniacal, foi realizada a evaporação do percolado acidificado, e neste caso a redução de nitrogênio amoniacal foi de aproximadamente 99%.

O Quadro 2.1 apresenta algumas patentes depositadas dos Estados Unidos e do Brasil sobre a concentração de percolado por evaporação visando à redução de volume e redução da carga poluidora.

Como observado no Quadro 2.1 o principal problema do processo de evaporação de percolado é o residual de nitrogênio amoniacal, sendo necessário o estudo para tratamento e eliminação deste tipo de contaminante.

Autor	Resumo da patente
Alves (2009)	Foi proposta uma unidade contínua de evaporação de percolado. O equipamento que foi proposto é constituído de um sistema de caldeira tubular que promove a evaporação do percolado a partir da queima de gás produzido pelo aterro. O percolado sofre aquecimento dentro de uma câmara através de uma tubulação de aço inoxidável. O líquido da evaporação (percolado tratado) é armazenado em um tanque.
Cifali (2005)	Um evaporador de percolado foi proposto, utilizando como combustível o gás gerado no aterro. O líquido da evaporação (percolado tratado) na forma de vapor é liberado na atmosfera, concentrando a matéria sólida no fundo do sistema. O aquecedor do evaporador utiliza para a combustão a troca térmica por radiação.
Soler (2011)	Neste processo o percolado recebe um pré-tratamento físico-químico para remoção de sólidos suspensos e aproveita o gás do aterro ou utiliza gás combustível, bem como indução térmica por energia elétrica para a concentração. Desta forma, o percolado pode ser aquecido de duas maneiras, com temperatura amena que promove a evaporação do percolado o qual é então resfriado e gera um condensado contendo amônia anidra dissolvida (NH_4). Outra alternativa, é o aquecimento a altas temperaturas, promovendo a pirólise, onde o resíduo, após passar por destilação fracionada gera o gás amônia (NH_3) e água de reuso. Esta é então resfriada e tratada por ozonização para a redução das concentrações de DQO e DBO_5 .
Baocheng (2013)	Este processo de tratamento de percolado consiste de um tanque de reação de cal, um tanque de sedimentação para separação do agente de floculação, um evaporador para a concentração do percolado e um tanque de reação de desnitrificação. Os evaporadores estão ligados em série. O lodo do processo encaminhado para um incinerador.
Diesel e Bernard (1994)	O evaporador recebe gases de combustão através de um tubo. O percolado antes de entrar no evaporador é aquecido pela corrente de vapor gerado neste e pelo calor da combustão do queimador. O equipamento possui fundo cônico, que constitui uma zona de sedimentação, a partir da qual o lodo concentrado é removido. Após a mudança de fase, o percolado tratado é coletado e purificado para o descarte, enquanto o concentrado é destinado a outro processo ou retorno para o aterro.

QUADRO 2.1 – PATENTES SOBRE TRATAMENTO DE PERCOLADOS ORIGINADOS DE ATERROS POR EVAPORAÇÃO

Uma possível aplicação é a recuperação como fonte de nitrogênio para fertilizantes, assim este composto pode ser reaproveitado para outras finalidades, antes de ser descartado. De acordo com Khai e Trang (2012) o percolado contém uma grande quantidade de nutrientes, como nitrogênio, fósforo e potássio, os quais

podem ser utilizados na agricultura como fonte de fertilizantes.

Dados sobre a eficiência do processo de evaporação de percolado são escassos e, desta forma, este trabalho avaliou a eficiência desta operação através da quantificação dos poluentes tanto do percolado bruto, tratado e do concentrado (lodo). Para melhor entendimento desta tecnologia na sequencia será tratada, brevemente, a operação de evaporação.

2.4 EVAPORAÇÃO

O que caracteriza a evaporação é que o solvente não é separado totalmente e a solução remanescente é um líquido concentrado, geralmente viscoso. Se o líquido contém sólidos dissolvidos, a solução concentrada resultante pode tornar-se saturada, com depósito dos cristais. Em geral o produto desejado é a solução concentrada, mas ocasionalmente o solvente pode ser o produto de interesse, como, por exemplo, na evaporação da água do mar para a obtenção de água potável e diminuição da carga poluidora do percolado (BACELAR, 2010; BAHÉ, 2008; SINNOTT, 2005; FOUST *et al.*, 1982).

Como a evaporação implica na separação do solvente mediante a ebulição da solução, o qual está em contato com o vapor, esta operação ocorre em um recipiente adequado, o evaporador. O processo é controlado pelas taxas de troca térmica no interior do sistema, visto que não há resistência à transmissão de calor pela interface (BLACKADDER e NEDDERMAN, 2004).

No evaporador há uma superfície separando o meio aquecedor, normalmente vapor condensado, da solução em ebulição, porém que permite a troca térmica. O vaso separador do evaporador, que fica a solução, normalmente é construído para se obter uma boa mistura no interior do equipamento. Desta forma, a composição e temperatura no interior do evaporador devem ser as mesmas da corrente de saída da solução concentrada, pois se supõe que está em equilíbrio com o evaporado (BLACKADDER e NEDDERMAN, 2004; FOUST *et al.*, 1982).

De forma geral, a operação de evaporação é adotada para: redução do volume e do peso dos produtos; facilitar e baratear os custos de transporte, armazenamento e distribuição; aumentar a concentração de sólidos solúveis

facilitando o uso e diversificando a oferta de produtos; a concentração de soluções antes da aplicação de outras operações como secagem, congelamento, esterilização, pois facilita o processamento e proporciona considerável economia de energia e na obtenção de água potável de fluídos impuros (BARBOSA-CÁNOVAS *et al.*, 1997).

2.4.1 Transmissão de calor em evaporadores

O processo de transferência de calor em um evaporador, em geral, requer a passagem de calor de um fluído de aquecimento para a solução que está sendo concentrada, através de uma parede divisória (FOUST *et al.*, 1982). Isto se deve ao fato de que a força motriz que permite a transmissão de calor em um evaporador ser a diferença de temperatura entre o meio de aquecimento e o líquido que se deseja aquecer.

A temperatura do líquido, em um evaporador é regida por vários fatores entre os quais incluem: pressão externa, coeficiente de transmissão de calor, elevação do ponto de ebulição (EPE).

Em todo processo em que se realiza a concentração de soluções, a pressão constante, observa-se uma acentuada variação do ponto de ebulição da solução, este fenômeno é conhecido como elevação do ponto de ebulição (EPE), ou seja, à medida que a evaporação avança, as temperaturas de ebulição aumentam, pois os líquidos se tornam cada vez mais concentrados. A EPE é dependente da natureza do material que se deseja evaporar e das trocas de concentração produzidos no evaporador. Outros fatores que afetam a transferência de calor em um evaporador são: viscosidade, presença de incrustações, formação de espuma estável, pressão externa e hidrostática e obviamente a concentração da solução a ser evaporada (BLACKADDER e NEDDERMAN, 2004; FOUST *et al.*, 1982).

2.4.2 Equipamentos

O evaporador é constituído basicamente por um trocador de calor, um vaso separador e um condensador.

O trocador de calor permite a transmissão de calor entre o fluído de aquecimento e a solução a ser concentrada. No vaso separador o vapor é separado da fase líquida concentrada, estes vasos são espaços que possibilitam o vapor secundário de se separar do líquido concentrado (SINNOTT, 2005).

No condensador o vapor usado no processo, como fonte de energia, é removido na forma de condensado. Em sistemas que operam à pressão atmosférica, esse elemento pode ser omitido. Além dos elementos básicos, o evaporador também apresenta bombas de vácuo ou ejetores, que são necessários nos sistemas que operam com pressão reduzida, coletores de condensado e purgadores os quais são denominados de elementos auxiliares (SINNOTT, 2005).

2.4.2.1 Sistemas de economia de energia

Segundo Foust *et al.* (1982) a necessidade de economia na geração de vapor de água impõe uma integração cuidadosa do evaporador na economia geral da unidade, pois a eliminação da água da solução por evaporação requer quantidade considerável de energia. Os métodos para a conservação da energia nos sistemas de evaporação baseiam-se no aproveitamento de calor contido no vapor extraído da solução e este aproveitamento pode ocorrer de formas diferentes: pré-aquecimento, múltiplos efeitos e/ou ciclos de recompressão de vapor.

No pré-aquecimento a conservação da energia consiste em utilizar o vapor secundário do evaporador para pré-aquecer a solução antes de iniciar a concentração. Permite incrementar entre 5% e 10% a capacidade do evaporador seguinte (BLACKADDER e NEDDERMAN, 2004).

Já quando se adota múltiplos efeitos, ou seja, quando diversos evaporadores (efeitos) são conectados entre si, existe economia de energia, pois o vapor secundário produzido em um efeito é utilizado como vapor primário em outro,

e assim sucessivamente. Como na evaporação se supõe mistura perfeita, as correntes que saem de um efeito terão as mesmas propriedades das que entram no efeito subsequente (BLACKADDER e NEDDERMAN, 2004).

Para os ciclos de recompressão de vapor, o vapor produzido apresenta temperatura de saturação elevada e este se torna adequado para ser usado como meio aquecedor no mesmo evaporador ou em outro efeito. Mas, em geral, os ciclos de recompressão de vapor exigem, além do fornecimento de energia térmica, energia mecânica (BLACKADDER e NEDDERMAN, 2004; FOUST *et al.*, 1982).

3 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia deste trabalho foi estruturada em duas etapas gerais, as quais estão descritas a seguir:

A primeira etapa se trata de uma breve descrição do aterro industrial estudado e do processo de recebimento de resíduos para aterramento em classe I e classe II. Também a descrição da geração de percolato destes tipos de aterros e forma de amostragem/coleta e preservação do percolato para caracterização através dos parâmetros apresentados na Resolução CONAMA 430/2011 artigo 16, que dispõe sobre as condições e padrões para o lançamento de efluentes.

Na segunda etapa, apresenta-se a realização do processo da evaporação do percolato em bateladas e controle das variáveis, em função do tempo, da temperatura do percolato durante a evaporação; da temperatura do evaporado antes e após a condensação (percolato tratado). Também foram realizados alguns testes de aeração do percolato tratado. A solução concentrada (lodo) obtida sofreu reevaporação para a obtenção de uma porcentagem menor de umidade.

Os ensaios de evaporação e as análises de caracterização do percolato antes e após a evaporação foram realizados no laboratório da empresa A, situada em Curitiba (PR). Este laboratório realiza análises de classificações de resíduos; monitoramentos de águas e efluentes e possui certificação de acordo com a NBR ISO/IEC 17025:2005 da ABNT.

3.1 PERCOLADO

O percolato utilizado neste estudo foi obtido de uma central de tratamento de resíduos, situada na cidade de Curitiba (PR) e que possui uma área de 225.000 m² e que recebe para aterramento, resíduos de classe I e classe II.

Esta unidade está ativa e operando há aproximadamente 16 anos. Os resíduos de classe II foram aterrados em maior volume do que resíduos classe I.

Foi realizada uma análise evolutiva de alguns parâmetros do percolado gerado no aterramento de resíduos classe I e classe II deste aterro, nos últimos 6 anos. As características deste aterro estão descritas na sequência.

3.1.1 Aterro

A Figura 3.1 apresenta o esquema de recebimento e tratamento de resíduos na central de tratamentos e destinação deste aterro. Os resíduos são triados e verificados, durante a pesagem dos resíduos em balanças rodoviárias, conforme a documentação enviada pelos clientes. Nesta verificação para conformidade, os resíduos são inspecionados visualmente nas cargas e através de análises de pH, reatividade, ponto de fulgor e percentagem de líquidos livres.

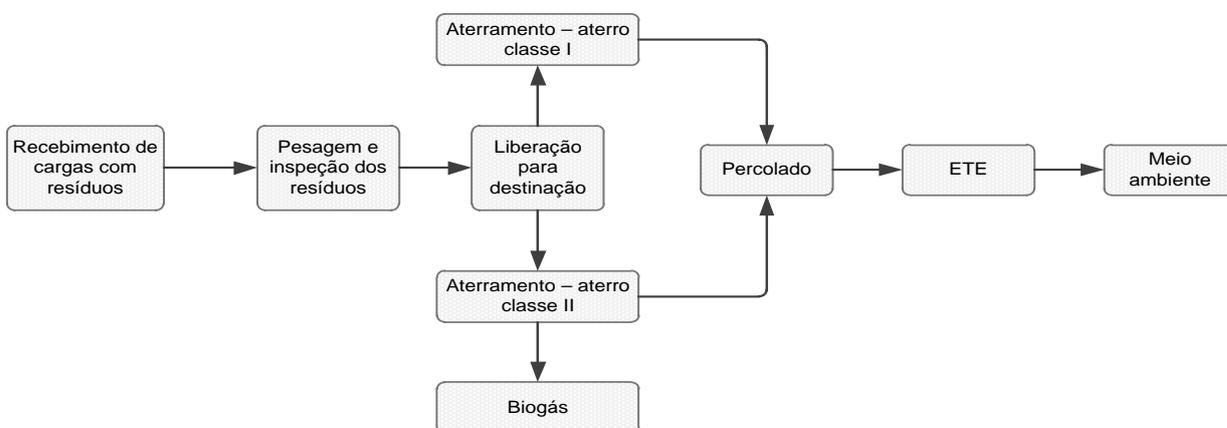


FIGURA 3.1 – ESQUEMA DE RECEBIMENTO E TRATAMENTO DE RESÍDUOS NO ATERRO ESTUDADO

Todos os resíduos, com exceção dos sólidos orgânicos, possuem cadastros os quais são comparados e registrados para a garantia do recebimento correto e seguro, conforme classificação prévia.

Após as conferências e inspeções rotineiras, os caminhões e suas cargas são encaminhados para a finalização do processo que é a destinação e aterramento adequado destes materiais.

O aterro classe I possui cobertura móvel, para a proteção das chuvas, para receber e aterrar este tipo de resíduo. Após o fechamento das células do aterro, o mesmo é coberto e fechado com camadas de argila e lonas de polietileno de alta densidade (PEAD), o que evita a infiltração de água da chuva e, possível percolação desta nas camadas de resíduo aterrado.

Devido a cobertura do aterro e tratamento aplicado nos resíduos classe I, como encapsulamento e solidificação, antes do aterramento, a geração de gases não é significativa e por este motivo não ocorre a canalização do gás, pois não há necessidade. O percolato gerado é enviado a ETE da unidade e tratado.

O aterro classe II não possui este tipo de cobertura móvel, porém a cada jornada de trabalho o resíduo é coberto com argila para evitar a presença de animais, como por exemplo, alguns tipos de aves. O fechamento das células do aterro classe II também é realizado com lonas de PEAD, após a conclusão e fechamento destas, para evitar infiltração da água de chuva.

Os materiais orgânicos e resíduos classe II, praticamente não recebem tratamento para aterramento nas células deste tipo de aterro, por este motivo e por não possuir cobertura durante a operação, a geração de percolato e gases é mais significativa do que para aterro classe II. Os gases gerados são canalizados e queimados e o percolato enviado para tratamento.

3.1.2 Coleta do percolato

O percolato gerado nos aterros é captado por um sistema tipo de espinha de peixe que encaminha este para estocagem em tanques, para o controle do volume da geração do efluente. Periodicamente, os tanques contendo o percolato são esgotados, por bombas submersas, e o percolato encaminhado para o tratamento na ETE do próprio do aterro. Quando a geração de percolato é elevada, estes são transferidos automaticamente para tanques de equalização e posterior tratamento na ETE.

O percolato utilizado neste estudo foi obtido de coleta pontual em 26/03/2013, diretamente dos tanques de percolato classe I e classe II, antes do envio para qualquer tipo de tratamento na ETE. Todas as análises de caracterização

e ensaios de evaporação foram realizadas com o percolado obtido nesta amostragem.

A coleta foi realizada com auxílio de recipientes de aço inoxidável, de forma a evitar interferências na caracterização do percolado. O uso de equipamentos de proteção individual, como luvas de procedimento, guarda-pó, bota de segurança, máscara semifacial foram utilizados.

Após a coleta, as amostras foram armazenadas em bombonas plásticas com capacidade para 5 L e 25 L, encaminhadas ao laboratório e armazenadas em geladeira a 6 °C (± 2 °C).

3.1.3 Mistura do percolado

No aterro adotado como base para este estudo são gerados, em média, 95% a mais de percolado de resíduos classe II em relação ao percolado de resíduos classe I. Para a representação da realidade da ETE do aterro, a composição do percolado usado neste estudo foi obtida pela mistura de percolado de resíduos classe I e II, e fundamentada no volume das gerações mensais do aterro.

Desta forma, para este estudo, foi simulado um percolado através da mistura de percolado de aterros classe I e II, sendo composto, volumetricamente, por 5% de percolado obtido no tanque do aterro classe I e 95% de percolado obtido do tanque do aterro classe II. Portanto, todos os ensaios realizados foram com a mistura de percolado de resíduos de classe I e II do aterro, porém e será denominado somente de percolado.

O preparado do percolado foi realizado com o auxílio de proveta graduada de 2 L e recipiente plástico com capacidade para 10 L. As amostras de percolado de aterro classe I e II foram equalizadas e homogeneizadas.

O percolado obtido foi distribuído em diferentes tipos de frascos e os mesmos foram preservados em função das análises físico-químicas que foram realizadas para sua caracterização e ensaios de evaporação. A Figura 3.2 mostra a preparação e mistura do percolado para a distribuição em frascarias para análises.



FIGURA 3.2 – FOTO DA MISTURA DO PERCOLADO SENDO PREPARADA

3.1.4 Caracterização do percolado

O percolado foi caracterizado de acordo com os parâmetros constantes na Resolução CONAMA 430 art. 16 (2011).

Todas as análises foram realizadas em triplicata e desta forma foram necessários aproximadamente 18 L de percolado. As amostras foram preservadas, de acordo com o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 21th - 1060B*. O Quadro 3.1 apresenta a quantidade de percolado que foi necessário, o método e o tempo de preservação da amostra para cada análise realizada visando atender todos os parâmetros contemplados na legislação.

PARÂMETRO	QUANTIDADE DE AMOSTRA EM VOLUME	MÉTODO DE PRESERVAÇÃO	TEMPO MÁXIMO ENTRE COLETA E ANÁLISE
Cianeto	Frasco tipo PET de 500 mL	Adicionar NaOH até pH > 12 e manter refrigerado longe da luz.	24 horas
Cromo hexavalente	Frasco de vidro de 100 mL	Refrigeração ou NaOH pH 9	24 horas / para análises não realizadas em 24 h preservar com NaOH
Fluoreto	Frasco de 3000 mL	Não é necessário	28 dias
Boro		Não é necessário	28 dias
pH		Analisar imediatamente	15 min
Metais Dissolvidos		Para metais dissolvidos, filtrar imediatamente na coleta e adicionar HNO ₃ até pH < 2	180 dias da amostra digerida
DBO		Refrigeração	6 horas
DQO	Frasco de vidro de 1.000 mL.	Analisar o mais breve possível ou adicionar H ₂ SO ₄ até pH < 2 e manter refrigerado a (1)	7 dias
Fenóis		Refrigeração adicionar H ₂ SO ₄ até pH < 4	28 dias
Nitrogênio Amoniacal		Analisar o mais breve possível ou adicionar H ₂ SO ₄ até pH < 2 e manter refrigerado. Sem adição de ácido pode-se manter a amostra em 20 °C	28 dias
Metais	Frasco tipo PET de 500 ml.	Adicionar HNO ₃ até pH < 2.	180 dias da amostra digerida
Óleos e Graxas	Frasco de 500 ml de vidro.	Adicionar HCl ou H ₂ SO ₄ até pH < 2 e manter refrigerado.	28 dias
Sulfeto	Frasco de vidro 100 ml	Manter refrigerado; adicionar 4 gotas de acetato de zinco 2N/100 mL manter o pH > 9 com NaOH	28 dias
Orgânicos	Frasco tipo vials de 40ml	Adicionar HCl e manter refrigerado.	14 dias

QUADRO 3.1 – ANÁLISES REALIZADAS, FORMA E TEMPO DE PRESERVAÇÃO DAS AMOSTRAS

Além das análises apresentadas no Quadro 3.1 foi obtida a massa específica do percolado através da determinação da massa e volume de uma amostra de 500 mL de percolado e sua pesagem em balança semianalítica (Gehaka; modelo BK 3000; resolução 0,01 g).

3.2 EVAPORAÇÃO DO PERCOLADO

3.2.1 Descrição do processo de evaporação

As evaporações foram realizadas no equipamento ilustrado na Figura 3.3, da Tecnal - TE-1256. Este equipamento é utilizado para destilação simples e descontínua de efluentes e águas para determinação da análise de fenol. O equipamento possui capacidade para acomodar seis balões de destilação de 1 litro e o aquecimento das amostras é realizada por chapas cerâmicas. Para a condensação do vapor gerado são acoplados seis condensadores tipo serpentina, em vidro borossilicato, e ligados em série para a passagem de água de resfriamento, a temperatura ambiente.



FIGURA 3.3 – FOTO DO EQUIPAMENTO TE-1256 – TECNAL UTILIZADO NOS ENSAIOS DE EVAPORAÇÃO DO PERCOLADO

A evaporação do percolado foi realizada colocando-se, em cada balão, 500 mL de percolado. A coleta do condensado, percolado evaporado, foi realizada em erlenmeyers de 500 mL, sendo o final da evaporação controlado pelo volume.

O controle do término da evaporação foi realizado pelo volume de percolado tratado obtido, ao serem obtidos 450 mL o processo era finalizado. Desta forma era possível obter uma viscosidade adequada do concentrado (lodo) e também manter a segurança do processo, evitando o superaquecimento do sistema de destilação e conseqüentemente a alta turbulência do lodo, de forma a proteger as vidrarias e placas de cerâmicas.

Ao final da concentração do percolado, quando o condensado atingia um volume de 450 mL, o lodo foi concentrado, sob muito cuidado, até obtenção de um volume final de condensado de 490 mL.

Para que a evaporação ocorresse de forma satisfatória foi adicionada uma pequena quantidade de pérolas de vidro, evitando assim rachaduras e quebra dos balões durante o processo.

Também foi adicionado 0,5 g de antiespumante (Antifoam Y-30 Emulsion; Sigma-Aldrich A5758). Este antiespumante é uma emulsão aquosa que contém 30% de silício ativo e emulsionantes não-iônicos e foi adotado para evitar o arraste de percolado para o topo (condensador) e, conseqüentemente, a contaminação do percolado evaporado e também para diminuir a turbulência durante a evaporação.

Para realizar a caracterização do percolado evaporado foi necessária a obtenção de, no mínimo, 19,80 L, sendo esta a quantidade necessária para a realização das análises em triplicata.

Para obter este volume, a evaporação foi realizada em várias etapas consecutivas, com duração de, aproximadamente, 8 horas. Entre cada ensaio foi necessário o resfriamento os balões para adicionar uma nova quantidade de percolado e dar continuidade a evaporação. Entre a conclusão de uma etapa de evaporação e outra, adotou-se um intervalo de aproximadamente 1 hora.

O percolado evaporado obtido, após a condensação, foi transferido para bombonas plásticas de 5 L, para homogeneização da amostra final e armazenamento sob refrigeração a 4 °C (± 2 °C).

Também foi necessário o uso de cronômetro, termômetros e vidrarias de laboratório para controle das variáveis do processo de evaporação e preparação de amostras, respectivamente.

3.2.2 Caracterização do percolado evaporado

Finalizada as evaporações, o efluente obtido foi homogeneizado e armazenado em frascos para análise de acordo com a Resolução CONAMA 430 art. 16 (2011).

Como o percolado evaporado possuía uma concentração menor de poluentes, foi necessária uma quantidade maior de amostra para realizar as análises. Todas as análises foram realizadas em triplicata.

O percolado tratado foi preservado e preservado conforme a descrição apresentada no item 3.1.4 e Quadro 3.1.

3.2.3 Evaporação do percolado

Para acompanhar o processo de evaporação foram realizados ensaios com a finalidade de obter as temperaturas do sistema em função do tempo, bem como as vazões volumétricas e mássicas de percolado evaporado, após a condensação.

As temperaturas determinadas durante a evaporação foram as do percolado, do percolado evaporado e do percolado após a condensação. Foram utilizados três termômetros de vidro (Inconterm) de escala interna, com enchimento de mercúrio de faixa de leitura de 0 °C a 250 °C ($\pm 0,5$ °C).

Para determinar a temperatura do percolado o termômetro foi inserido no corpo do percolado a ser evaporado. A temperatura do vapor foi obtida posicionando o termômetro no topo do balão (Figura 3.4) e a temperatura do percolado evaporado foi obtida fazendo a medição na saída do condensador.



FIGURA 3.4 – FOTO DO APARATO SISTEMA ADOTADO INDICANDO OS PONTOS DE MEDIÇÃO DA TEMPERATURA DO VAPOR (A) E PERCOLADO (B)

A vazão volumétrica do percolado evaporado, após a condensação, foi determinada com o auxílio de uma proveta graduada, através de medições do volume pelo tempo do processo. A massa específica, em $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, foi determinada medindo o volume em uma proveta de 500 mL e a massa em balança semianalítica (Gehaka; modelo BK 3000; resolução 0,01 g), sendo a mesma metodologia adotada para a determinação da massa específica do percolado.

O uso de um cronômetro digital (Cronobio; SW201; resolução 0,01 s) foi necessário para o controle do tempo durante o processo da evaporação.

3.2.4 Dessorção do percolado evaporado

Um teste simplificado, para avaliar a possibilidade de remoção do nitrogênio amoniacal do percolado evaporado por dessorção (“*stripping*”), foi realizado. Neste teste 2 litros de percolado tratado foram aerados por 24 horas com um aerador

comum, de aquário, o ar foi introduzido no fundo de uma bombona plástica de 5 L, contendo a solução, com o auxílio de uma mangueira de silicone.

3.3 TRATAMENTO DO LODO OBTIDO

Ao final de cada etapa de evaporação, após o resfriamento, o lodo (concentrado) foi mantido nos balões. A umidade do lodo foi medida em analisador de umidade por infravermelho (Gehaka; IV2000; resolução de 0,001 g). A faixa de temperatura do analisador é de 50 °C a 200 °C e resolução de 1 °C.

O lodo obtido em cada batelada foi homogeneizado e reevaporado, com o objetivo de obter o menor teor de umidade possível e alta viscosidade. O controle da reevaporação do lodo foi realizado por análise visual, ou seja, quando o lodo em evaporação apresentou alta turbulência e instabilidade, cessou-se o processo, devido à insegurança do controle de mesmo.

Finalizada a reevaporação do lodo, este foi retirado, ainda quente a uma temperatura em torno de 100 °C e acondicionado em três frascos plásticos de capacidade de 250 g com tampa. Foi determinada a umidade do lodo reevaporado com auxílio do analisador de umidade por infravermelho.

O lodo obtido no processo de reevaporação foi homogeneizado e submetido análises de caracterização de acordo com a Resolução CEMA 076 (2009). As análises realizadas estão descritas no item 3.4.2 e foram realizadas em triplicata.

3.4 ANÁLISES REALIZADAS DO PERCOLADO, PERCOLADO EVAPORADO E LODO

3.4.1 Análises realizadas para caracterização do percolado

Os ensaios realizados para a caracterização do percolado e do produto da evaporação, bem como a metodologia estão descritos no Quadro 3.2. A metodologia

analítica adotada foi de acordo com o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 21th* e *Environmental Protection Agency (EPA)*.

PARÂMETRO	METODOLOGIAS APLICADAS E REFERENCIA
Arsênio	(ICP-OES) SMWW 3120 B, USEPA 6010 C
Bário	(ICP-OES) SMWW 3120 B, USEPA 6010 C
Boro	SMWW 4500 B-B:2005 - UV/VIS
Cádmio	US EPA 7000 B:2007 – Absorção atômica
Chumbo	US EPA 7000 B:2007 – Absorção atômica
Cianeto	SMWW 4500-CN C,D,E,I:2005 - UV/VIS
Cianeto Livre	SMWW 4500-CN C,D,E,I:2005 - UV/VIS
Cobre Dissolvido	US EPA 7000 B:2007 – Absorção atômica
Cromo Total	US EPA 7000 B:2007 – Absorção atômica
Cromo Hexavalente	SMWW 3500 Cr-B:2005 - UV/VIS
Cromo Trivalente	Subtração cromo total - Cromo+6
DBO	SMWW 5210:2005 / ASTM D888-09 C - Incubação/eletrométrico
DQO	SMWW 5220 D:2005 - Fotômetro
Estanho	US EPA 7000 B:2007 – Absorção atômica
Fenol	US EPA 9065:1986 - UV/VIS
Fluoreto	US EPA 9214:1996 - Íon Sel
Ferro Dissolvido	US EPA 7000 B:2007 – Absorção atômica
Manganês Dissolvido	US EPA 7000 B:2007 – Absorção atômica
Material Flutuante	Análise Visual
Mercúrio	US EPA 7470A:1994 - GH/AA
Nitrogênio Amoniacal	SMWW 4500 NH3 B e C:2005 - Titulometria
Níquel	US EPA 7000 B:2007 – Absorção atômica
Óleos e Graxas Totais	SMWW 5520 D:2005 – Soxhlet gravimetria
Óleos e Graxas Minerais	SMWW 5520 D:2005 – Soxhlet gravimetria
Óleos e Graxas Vegetais	SMWW 5520 D:2005 – Soxhlet gravimetria
pH	SMWW 4500 H+:2005 - Potenciometria
Prata	US EPA 7000 B:2007 – Absorção atômica

Continua

Conclusão

Selênio	US EPA 7742:1994 - GH / AA
Sólido Sedimentável	SMWW 2540-F:2005 - Cone Inh
Sulfeto	SMWW 4500 S-2-F:2005 - Titulometria
Temperatura	SMWW 2550 B:2005
Zinco	US EPA 7000 B:2007 – Absorção atômica
Clorofórmio	USEPA - SW 846 8260C, 5021A
Dicloroetano	USEPA - SW 846 8260C, 5021A
Tetracloroeto Carbono	USEPA - SW 846 8260C, 5021A
Tricloroetileno	USEPA - SW 846 8260C, 5021A
Estireno	USEPA - SW 846 8260C, 5021A
Benzeno	USEPA - SW 846 8260C, 5021A
Tolueno	USEPA - SW 846 8260C, 5021A
Etilbenzeno	USEPA - SW 846 8260C, 5021A
Xileno	USEPA - SW 846 8260C, 5021A

QUADRO 3.2 – PARÂMETROS ANALÍTICOS E METODOLOGIAS ANALÍTICAS APLICADAS

Para a realização das análises, foram respeitadas as quantidades necessárias para cada parâmetro e todas as análises foram realizadas em triplicata.

Devido às altas concentrações do poluente no percolado, para os ensaios de alguns parâmetros, as amostras sofreram diluições para a obtenção de leituras confiáveis.

3.4.2 Análises realizadas para caracterização do lodo

A caracterização do lodo foi realizada com base na Resolução CEMA 076 (2009) do estado do Paraná. Esta norma estabelece os critérios para a destinação de resíduos para coprocessamento em fornos de cimento, com a finalidade de substituição de matéria prima ou aproveitamento energético. O Quadro 3.3 apresenta os ensaios realizados e as metodologias adotadas.

PARÂMETROS	METODOLOGIAS
Alumínio	US EPA 7000 B:2007 – Absorção Atômica
Antimônio	US EPA 7000 B:2007 – Absorção Atômica
Arsênio	SMWW 3120 B:2005, US EPA 6010:2007 - ICP
Bário	US EPA 7000 B:2007 – Absorção Atômica
Cádmio	US EPA 7000 B:2007 – Absorção Atômica
Cálcio	US EPA 7000 B:2007 – Absorção Atômica
Chumbo	US EPA 7000 B:2007 – Absorção Atômica
Cloro	USEPA 5050 e 300.1
Cobalto	US EPA 7000 B:2007 – Absorção Atômica
Cromo Total	US EPA 7000 B:2007 – Absorção Atômica
Enxofre	SMWW 3120 B:2005, US EPA 6010:2007 - ICP
Estanho	US EPA 7000 B:2007 – Absorção Atômica
Ferro Total	US EPA 7000 B:2007 – Absorção Atômica
Fluor	USEPA 5050 e 300.1
Fluoreto	US EPA 300.1, 9056
Fósforo	SMWW 4500 P B e D:2005 – UV/VIS
Mercúrio	US EPA 7470A:1994 - GH/AA
Níquel	US EPA 7000 B:2007 – Absorção Atômica
Potássio	US EPA 7000 B:2007 – Absorção Atômica
Selênio	US EPA 7470A:1994 - GH/AA
Silício	US EPA 7000 B:2007 – Absorção Atômica
Tálio	US EPA 7000 B:2007 – Absorção Atômica
Vanádio	US EPA 7000 B:2007 – Absorção Atômica
Zinco	US EPA 7000 B:2007 – Absorção Atômica
Telúrio	US EPA 7000 B:2007 – Absorção Atômica
PCS	NBR 11956:1990 - Bomba Calorimétrica

QUADRO 3.3 – PARÂMETROS ANALISADOS, CONFORME CEMA 076 (2009)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos através do presente estudo, que teve como objetivo a redução da carga poluidora do efluente, são pontuais, representativos e válidos somente para a amostra obtida através da mistura dos percolados do aterro classe I e classe II.

Esta pontualidade ocorreu devido a grande variabilidade da concentração do percolado. Esta variabilidade é devido a fatores ambientais bem como aos resíduos depositados nas células dos aterros.

Os resultados deste trabalho estão apresentados, conforme indica o diagrama representado na Figura 4.1.

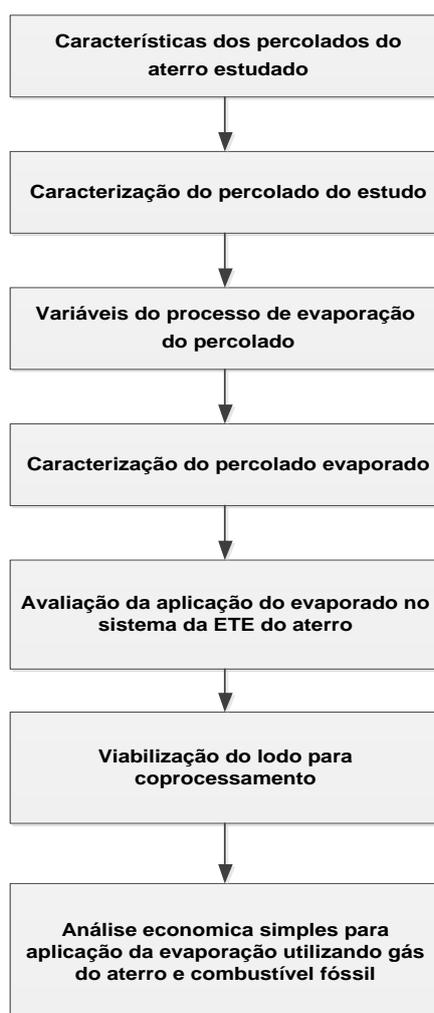


FIGURA 4.1 – DIAGRAMA DE BLOCOS DA APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1 PERCOLADO DO ATERRO ESTUDADO

O percolado gerado na unidade de aterro industrial avaliado por este estudo foi originado de células de classe I e II, os quais são bombeados de oito poços para o sistema de tratamento de efluentes. No aterro estudado, em média, são gerados 5.000 m³ de percolado por mês.

A geração deste percolado está associada à degradação de resíduos de 16 anos da operação, ou seja, resíduos antigos e também por resíduos recentes, líquidos dos materiais depositados e água de chuva.

O volume de percolado gerado varia, pois em dias chuvosos, apesar das coberturas dos aterros com lonas, ocorre maior geração deste efluente. Vale ressaltar que as células em atividade são as que mais geram percolado, em comparação com aquelas que já estão concluídas, ou seja, que não estão recebendo resíduos.

Os percolados deste aterro são analisados, para acompanhamento mensal, em relação a vários parâmetros, sendo os principais DQO, DBO₅, pH e temperatura. Este acompanhamento tem por objetivo o controle da tratabilidade e eficiência da ETE do aterro. Também são analisados, trimestralmente, todos os parâmetros exigidos pela Resolução CONAMA 430 art.16, para verificar se o efluente tratado está adequado para o descarte no meio ambiente.

As Figuras 4.2 e 4.3 apresentam alguns resultados obtidos, de 2007 a 2012, para o percolado dos aterros classe I e classe II, respectivamente. Os dados apresentados são as concentrações obtidas anualmente para DBO₅, DQO e nitrogênio amoniacal.

Através das Figuras 4.2 e 4.3 foi possível observar um aumento das concentrações de DQO, DBO₅ e nitrogênio amoniacal a partir do ano de 2009. Este fato ocorreu em virtude do aumento na quantidade de resíduos recebidos para aterramento nos dois tipos de aterro.

Em 2009, ocorreu o recebimento de maiores quantidades de resíduos de origem orgânica, com características domésticas, para aterro classe II, advindas de grandes geradores, tais como “shoppings centers” e supermercados.

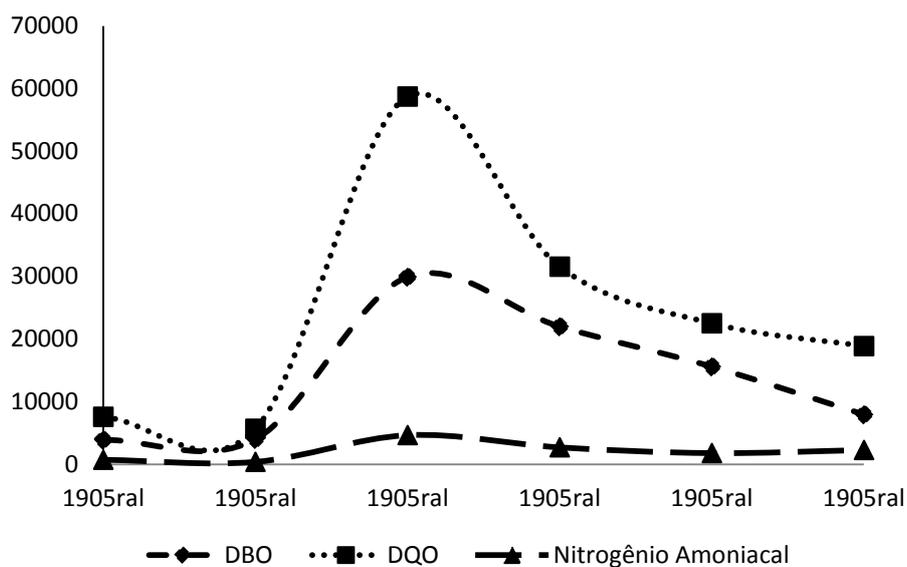


FIGURA 4.2 – RESULTADOS DA CARGA POLUIDORA DO PERCOLADO CLASSE I

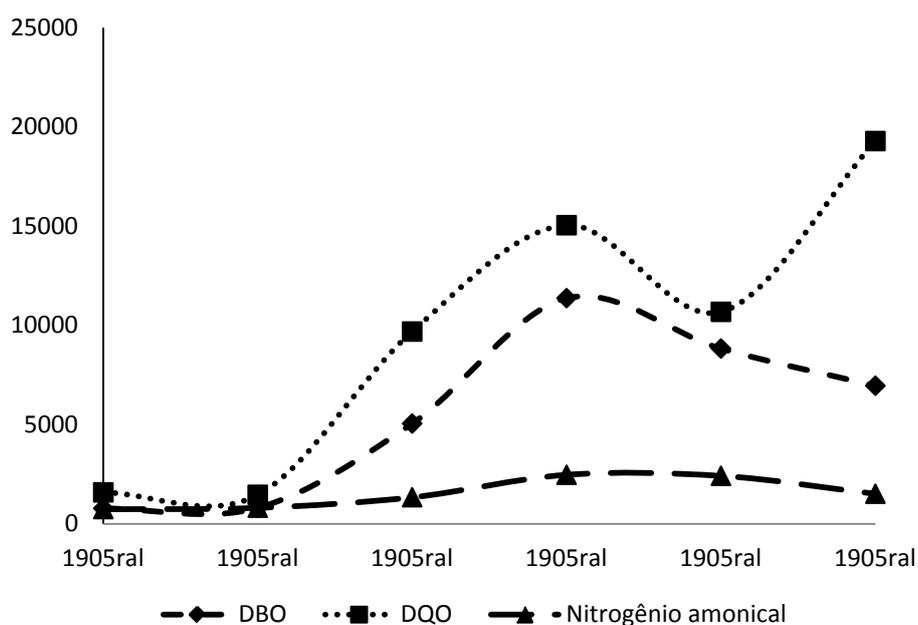


FIGURA 4.3 – RESULTADOS DA CARGA POLUIDORA DO PERCOLADO CLASSE II

De acordo com Herrera (2000) as características do tipo de resíduo aterrado é um dos fatores que influenciam e determinam a composição do percolado. Assim, provavelmente, o aumento nos resíduos de origem orgânica, foi um dos fatores que contribuiu para a diferença na composição dos percolados e conseqüentemente o aumento da carga poluidora de 2006 a 2012 no aterro estudado.

O aumento da carga poluidora afetou diretamente a eficiência da estação de tratamento de percolado do aterro, sendo que tal impacto gerou a necessidade de um redimensionamento e a implantação de tecnologias adicionais para o tratamento do percolado.

Com base nas Figuras 4.2 e 4.3 foi possível determinar as relações de DBO_5/DQO dos percolados dos aterros classe I e II, os resultados obtidos estão expressos na Tabela 4.1.

TABELA 4.1 - RELAÇÃO ENTRE DBO_5/DQO

	2007	2008	2009	2010	2011	2012
DBO_5/DQO - Classe I	0,52	0,71	0,51	0,70	0,69	0,42
DBO_5/DQO - Classe II	0,49	0,56	0,52	0,76	0,83	0,36

Observa-se nas Figuras 4.1 e 4.2 e Tabela 4.1 que após o recebimento de grandes quantidades resíduo orgânico, a partir de 2009, o percolado apresentou característica de percolado jovem, devido ao aumento da carga orgânica e consequente aumento nos valores da DQO, os quais foram significativos.

A média, dos últimos 6 anos, da relação DBO_5/DQO foi de 0,59, para ambos os aterros. Isto indica que este aterro é de média biodegradabilidade, segundo Fernández-Viña (2000). Porém, esta informação não condiz com a idade do aterro, 16 anos, contudo a forma de operação das células, por ser contínua, pode explicar o resultado obtido.

Como a relação de DBO_5/DQO é um indicativo da condição de biodegradabilidade do percolado, nota-se que no ano de 2012 a tratabilidade deste efluente tornou-se mais difícil, com valores de 0,42 e 0,36 para aterro classe I e classe II, respectivamente. Provavelmente, este fato é o reflexo da condição da idade do aterro, condizendo com os 16 anos de operação do mesmo.

As Figuras 4.2 e 4.3 também demonstram uma grande variabilidade das concentrações de DBO_5 , DQO e nitrogênio amoniacal. Estas variações são originadas pela mistura de percolados em diferentes fases de decomposição, visto que este aterro opera de forma contínua. Neste caso, conforme Farquhar (1988) ocorre a mistura de percolado jovem (resíduos recém-dispostos), cuja decomposição

se encontra nas primeiras fases, com o percolado já estabilizado, o qual está sendo gerado nas etapas finais do processo de degradação.

Esta mistura de percolados jovens e velhos ocorre devido à forma do aterro, que caracteriza-se por várias células dispostas umas sobre as outras, assemelhando-se a uma pirâmide. As células mais velhas e estabilizadas estão na base; as células em operação e as mais jovens ficam no topo, explicando o fato deste aterro apresentar uma taxa de biodegradabilidade característica de aterro jovem e ter 16 anos de idade.

Analisando a Figura 4.3 foi possível observar que em 2012 a concentração de DQO aumentou, porém a concentração de DBO_5 apresentou uma leve queda. Conforme Ferreira (2006), a DQO é um indicativo indireto do teor de matéria orgânica no percolado. Já a concentração de DBO_5 é um indicador indireto de carbono orgânico biodegradável. A concentração de DBO_5 se distanciou da concentração de DQO, sendo um possível indicativo, segundo Fernández-Viña (2000), de uma baixa biodegradabilidade, o que condiz com a relação de DBO_5/DQO para este ano (0,36).

A quantidade de resíduos destinados no aterro classe I é significativamente menor que a do aterro classe II, e como a geração de percolado é proporcional à quantidade de resíduos dispostos a geração de percolado do aterro classe II será maior. A proporção do percolado enviada a ETE do aterro foi estimada em 5% (v/v) de percolado do aterro classe I e o restante do aterro classe II.

Para obter esta amostra (percolado bruto), foram necessários aproximadamente 50 L de percolado gerado do aterro classe II e 10 L do aterro classe I. A simulação deste percolado e os ensaios de evaporação visando a redução da carga poluidora foram realizados no laboratório da empresa A.

Os resultados obtidos, antes e após a concentração deste percolado por evaporação, bem como a caracterização do concentrado (lodo) obtido na evaporação estão apresentados neste capítulo.

Uma análise do uso da evaporação, como tratamento primário, para efluentes com alta carga poluidora também será apresentada.

4.2 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO PERCOLADO BRUTO

A caracterização do percolado bruto, utilizado neste estudo, foi realizada conforme a metodologia descrita no capítulo 3. O percolado bruto a partir deste ponto será chamado somente de percolado.

Os parâmetros analisados foram definidos com base na Resolução CONAMA 430 art. 16 (BRASIL, 2011), que define sobre as condições e padrões para o lançamento de efluentes.

O percolado apresentava coloração escura e odor forte, o qual é característico deste tipo de efluente. Segundo Pelegrine *et al.* (2007), a coloração é devida a presença de matéria orgânica decomposta, em sua maioria substâncias húmicas, as quais são constituídas de macromoléculas como ácidos amorfos, predominantemente aromáticos e hidrofílicos.

A Tabela 4.2 mostra os resultados das análises realizadas visando a caracterização físico-química do percolado. As análises apresentadas na Tabela 4.2 foram realizadas em triplicata.

TABELA 4.2 – CARACTERIZAÇÃO DO PERCOLADO, CONFORME CONAMA 430 ART. 16 (2011)

PARÂMETROS	RESULTADOS OBTIDOS			MÉDIA (mg.L ⁻¹)	CONAMA 430 (mg.L ⁻¹)
	(mg.L ⁻¹)				
Arsênio	0,52	0,62	0,63	0,59 ± 0,06	0,50
Bário	0,65	0,78	0,48	0,64 ± 0,15	5,00
Benzeno	0,002	0,002	0,002	0,002 ± 0,00	1,20
Boro	12,88	11,28	8,44	10,87 ± 2,25	5,00
Cádmio	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,20
Chumbo	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	0,50
Cianeto	0,02	0,09	0,08	0,06 ± 0,04	1,00
Cianeto Livre	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,20
Clorofórmio	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	1,00
Cobre Dissolvido	0,02	0,04	0,02	0,03 ± 0,01	1,00
Cromo Total	0,38	0,39	0,38	0,38 ± 0,01	-
Cromo Hexavalente	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	0,10

Continua

					Conclusão
DBO	12.463,83	14.010,87	14.998,08	13.824,26 ± 1.277,39	-
DQO	25.453,00	29.656,00	25.310,00	26.806,33 ± 2.468,92	-
Dicloroetano	0,01	0,01	0,01	0,01 ± 0,00	1,00
Estanho	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	4,00
Estireno	0,002	0,002	0,003	0,002 ± 0,001	0,07
Etilbenzeno	0,01	0,01	0,02	0,01 ± 0,006	0,84
Fenol	5,61	5,78	6,68	6,02 ± 0,58	0,50
Fluoreto	0,51	0,53	0,37	0,47 ± 0,09	10,00
Ferro Dissolvido	17,73	51,8	1,078	23,54 ± 25,85	15,00
Manganês Dissolvido	3,26	5,25	2,43	3,65 ± 1,45	1,00
Material Flutuante	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Mercúrio	0,001	0,002	0,002	0,002 ± 0,001	0,01
Nitrogênio Amoniacal	1.754,37	1.819,35	1.786,86	1.786,86 ± 32,49	20,00
Níquel	2,41	2,39	2,39	2,40 ± 0,01	2,00
Óleos e Graxas Totais	23,50	22,25	24,25	23,33 ± 1,01	-
Óleos e Graxas Minerais	14,50	14,50	15,00	14,67 ± 0,29	20,00
Óleos e Graxas Vegetais	<9,68	<9,68	<9,68	<9,68	50,00
pH (°C)	8,78	8,78	8,78	8,78 ± 0,00	5 a 9
Prata	<0,06	<0,06	<0,06	<0,06	0,10
Selênio	<0,003	<0,003	<0,003	0,003 ± 0,00	0,30
Sólidos Sedimentáveis (mL.L ⁻¹)	3,00	3,00	3,00	3,00 ± 0,00	1,00
Sulfeto	40,28	44,3	44,3	42,96 ± 2,32	1,00
Temperatura	21,00	21,00	21,00	21 ± 0,00	40,00
Tetracloroeto Carbono	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	1,00
Tolueno	0,07	0,06	0,07	0,07 ± 0,006	1,20
Tricloroetileno	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	1,00
Xileno	0,02	0,02	0,03	0,02 ± 0,006	1,60
Zinco	0,77	0,90	1,04	0,90 ± 0,14	5,00

Os resultados obtidos são pontuais, e, portanto representam somente a amostra analisada. Como o objeto do estudo era a evaporação do percolado enviado para a ETE do aterro uma avaliação temporal do percolado não foi realizada.

Como a homogeneização da amostra foi realizada de forma manual, a mesma pode ter sido incompleta, o que explicaria a variação superior a 10% obtida na análise de vários parâmetros (Tabela 4.2). Contudo, exceto para a análise de ferro dissolvido, esta variação não influenciou na comparação com os limites permitidos pela legislação.

Para o ferro dissolvido, além da não homogeneização das amostras, provavelmente a filtração em membrana de éster e celulose de porosidade de 0,45 μm não foi eficaz para a quantificação deste parâmetro.

Analisando a Tabela 4.2 verificou-se a presença de vários metais no percolado: arsênio, bário, boro, cádmio, chumbo, cobre, cromo, estanho, manganês, mercúrio, níquel, prata, selênio e zinco. Destes, somente, arsênio, boro, ferro dissolvido, manganês dissolvido e níquel se encontraram acima dos limites exigidos pela legislação. Os demais apresentam concentrações que variam de 0,002 mg.L^{-1} a 0,900 mg.L^{-1} .

A presença de metais no percolado, possivelmente, foi devida a decomposição dos resíduos depositados, principalmente no aterro classe I. Segundo Lange e Amaral (2009), as embalagens de origem metálica são as principais fontes de metais em percolados. A concentração de metais como Fe, Mn, Zn, Cu, Pb e Cd pode ser maior em aterros jovens devido a estes se encontrarem na fase III da degradação de resíduos, que é a etapa de formação de ácidos e onde ocorre a complexação dos metais, permitindo a solubilização dos íons metálicos. Nas próximas etapas de degradação dos resíduos, o pH tende a aumentar e as concentrações de metais tendem a diminuir.

Em aterros classe I são destinados resíduos como pilhas e baterias, materiais contaminados com óleos e graxas, areias de fundição com fenol, lodos contaminados com metais, sais diversos e outros tipos de resíduos industriais contaminados. Desta forma estes materiais também podem ter contribuído para a presença de metais, óleos e graxas e fenol no percolado utilizado neste estudo.

Como indica a Tabela 4.2, a concentração de óleos e graxas estava de acordo com a legislação, porém a concentração de fenol era 12,04 vezes acima da permitida (0,50 mg.L^{-1}). Além destes parâmetros a concentração de nitrogênio amoniacal, sulfetos e sólidos sedimentáveis também apresentaram concentrações acima dos limites estabelecidos pela legislação CONAMA 430 Art. 16, como pode ser observado na Tabela 4.3.

TABELA 4.3 – CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO PERCOLADO: PARÂMETROS EM DESACORDO COM A LEGISLAÇÃO

PARÂMETROS	MÉDIA DOS RESULTADOS (mg.L ⁻¹)	LIMITES ESTABELECIDOS PELO CONAMA 430 Art. 16 (mg.L ⁻¹)
Arsênio	0,59 ± 0,06	0,50
Boro	10,87 ± 2,25	5,00
DBO	13824,26 ± 1277,39	-
DQO	26806,33 ± 2468,92	-
Fenol	6,02 ± 0,58	0,50
Ferro Dissolvido	23,54 ± 25,85	15,00
Manganês Dissolvido	3,65 ± 1,45	1,00
Sólidos Sedimentáveis	3,00 ± 0,00 (mL.L ⁻¹)	1,00 (mL.L ⁻¹)
Nitrogênio Amoniacal	1786,86 ± 32,49	20,00
Níquel	2,40 ± 0,01	2,00
Sulfeto	42,96 ± 2,32	1,00

De acordo com Ferreira (2006), a concentração de sulfetos (44,30 mg.L⁻¹) é advinda de uma grande concentração de sulfatos (SO₄), que são indicativos de percolados de aterros jovens. Esta concentração de sulfatos diminui gradativamente, devido à redução a sulfetos, em condições anaeróbias, durante a degradação dos resíduos. Ainda conforme Ferreira (2006), o aumento da concentração de sulfetos pode influenciar na precipitação de vários metais pesados contidos no percolado.

A concentração volumétrica de sólidos sedimentáveis apresentou um valor 3 vezes acima do permitido pela legislação. Os sólidos sedimentáveis são constituídos por de frações de matéria orgânica e materiais inertes não dissolvidos que são carregadas pelo percolado. De acordo com Ferreira (2006), as concentrações mais elevadas de sólidos sedimentáveis são observadas em períodos de baixa pluviosidade.

A alta concentração de nitrogênio amoniacal (1.786,86 mg.L⁻¹) é resultante da degradação dos resíduos do aterro. Segundo Ferreira (2006), a amônia é derivada da proteína e da matéria orgânica. O teor elevado de nitrogênio amoniacal e o pH levemente alcalino, são indicativos que o percolado encontra-se envelhecido, em virtude deste aterro já estar operando por 16 anos.

O nitrogênio amoniacal é um dos principais componentes de difícil degradação e tratabilidade do percolado na ETE do aterro, podendo ser tóxico ao sistema biológico de tratamento.

Também foi determinada a massa específica do percolado, o valor encontrado foi de $1,02 \text{ g.cm}^{-3}$, ou seja, bem próximo da massa específica da água.

Após a caracterização o percolado foi submetido ao processo de evaporação com o intuito concentrar o mesmo e conseqüentemente reduzir a carga poluidora. Com a evaporação foram obtidos dois tipos de efluentes: o percolado evaporado e o concentrado (lodo).

4.3 PROCESSO DE EVAPORAÇÃO DO PERCOLADO

Testes preliminares de evaporação do percolado, em condições não controladas, foram realizados em janeiro de 2012. Análises foram realizadas para verificar a viabilidade do uso da evaporação do percolado, e como os resultados foram favoráveis à redução da carga poluidora do efluente, foi dada a continuidade ao estudo.

A amostra para a realização do teste preliminar foi coletada de um tanque da estação de tratamento de efluentes da empresa A, com uma mistura não estimada, de percolado classe I e II. Os resultados obtidos estão dispostos na Tabela 4.4. As unidades de medida são em mg.L^{-1} , exceto para o pH (adimensional).

TABELA 4.4 – RESULTADOS PRELIMINARES DE EVAPORAÇÃO DE PERCOLADO

PARÂMETROS	PERCOLADO BRUTO (mg.L^{-1})	CONDENSADO (mg.L^{-1})	REDUÇÃO (%)
DBO	6.084,39	351,04	94,23
DQO	8.373,20	768,33	90,82
Nitrogênio amoniacal	3.542,00	2.089,50	41,01
Óleos e graxas totais	56,00	10,40	81,43
pH	7,72	9,43	-(22,15)

Como a evaporação do percolado foi realizada em condições não controladas podem ter ocorrido perdas para o meio ambiente e assim os valores de concentração obtidos para os parâmetros avaliados tiveram uma redução superestimada, principalmente em relação ao nitrogênio amoniacal.

Os valores de DBO_5 , DQO, nitrogênio amoniacal, óleos e graxas totais tiveram uma redução que variou de 41,01% a 94,23% indicando que o uso da evaporação permite reduzir o teor poluente do percolado, antes de ser enviado para o tratamento biológico, permitindo o aumento da capacidade de tratamento da ETE do aterro estudado.

O ensaio preliminar também indicou a necessidade do uso de antiespumante e pérolas de vidro durante a evaporação. Sem o uso de antiespumante verificou-se que ocorria a formação de muita espuma que contaminava o percolado evaporado. A formação de espuma ocorria em função da alta quantidade de matéria orgânica presente no percolado.

Após o estudo preliminar, o processo de evaporação foi realizado em condições controladas.

Não foi possível determinar a temperatura exata da chapa de cerâmica do sistema de aquecimento do equipamento utilizado para os ensaios de evaporação. As medições foram realizadas com um termômetro infravermelho e os valores oscilaram entre 420 °C a 460 °C, mas estes não são valores confiáveis, pois a temperatura limite do termômetro usado era de 450 °C. Contudo, a falta desta informação não influenciou os demais resultados obtidos.

O acompanhamento do processo de evaporação para a concentração do percolado foi realizado com a determinação da temperatura, em diferentes pontos do sistema (percolado, evaporado e concentrado), e do volume de evaporado em função do tempo. Os resultados obtidos estão mostrados na Figura 4.4.

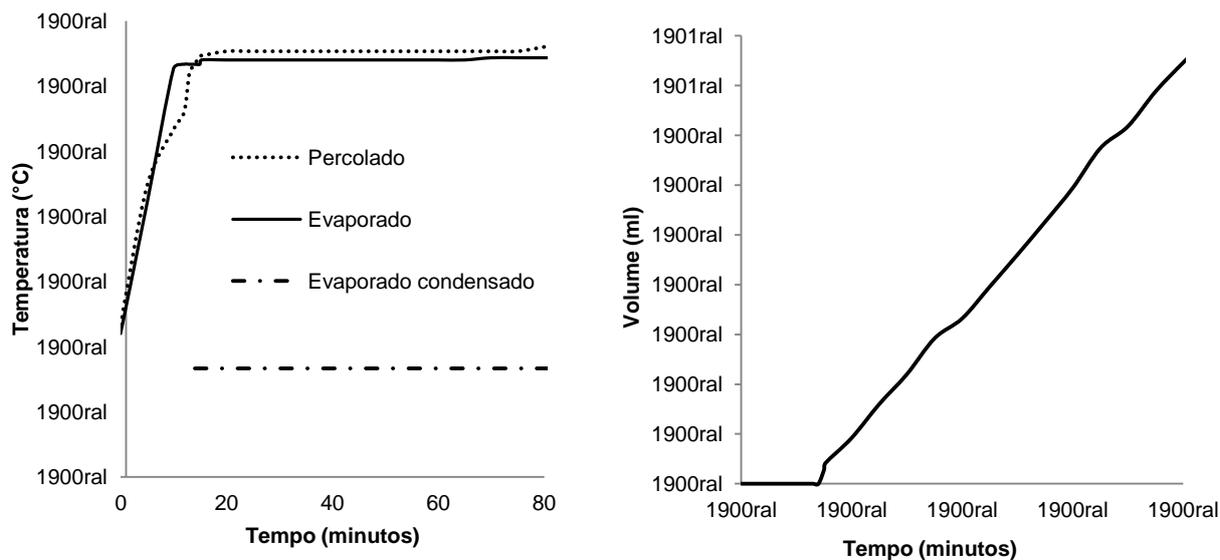


FIGURA 4.4 – DAS TEMPERATURAS DO PERCOLADO, EVAPORADO, CONCENTRADO E VOLUME DE EVAPORADO EM FUNÇÃO DO TEMPO.

Para o acompanhamento do processo de evaporação, a amostra de percolado foi ambientada a temperatura ambiente, a qual era de 20 °C, portanto a temperatura inicial do processo foi de 20 °C.

A Figura 4.4 indica que o processo de evaporação levou, aproximadamente, 20 minutos para atingir o regime estacionário. Para o percolado, durante o período transiente, do início do processo até a temperatura de 60 °C a evaporação foi sutil, aumentando de intensidade em 84 °C e atingindo a evaporação completa em 96 °C.

Durante 55 minutos a evaporação se manteve em condição estacionária, porém com a redução de solvente no sistema, começou a se perceber a elevação do ponto de ebulição (EPE), devido ao aumento da concentração de sólidos no percolado. A temperatura atingiu 98 °C após 75 minutos e 103,5 °C ao final do processo. Desta forma a EPE foi de 5,5 °C.

Para o evaporado o estado estacionário foi atingido em 15 minutos, ou seja, após este período a temperatura do percolado evaporado se manteve em 96 °C durante 60 minutos, quando iniciou-se a EPE a temperatura do evaporado teve um acréscimo de 0,5 °C e manteve esta temperatura de 96,5 °C até o final do processo.

O condensado, obtido pela condensação do percolado evaporado, começou a ser produzido após 15 minutos, quando o sistema estava em estado estacionário e a temperatura manteve-se constante em 25 °C durante todo o processo, devido à alta eficiência do sistema de condensação, o qual permitiu não apenas a condensação, mas também o resfriamento do evaporado.

O processo de evaporação de cada batelada durou 95 minutos, porém o sistema de aquecimento foi desligado 10 minutos antes, ou seja, após 85 minutos de evaporação. O tempo de 85 minutos foi estabelecido em função da segurança do processo em escala de bancada.

O volume de percolado evaporado obtido, após a condensação (Figura 4.4) foi avaliado a cada 5 minutos e em média foram obtidos $6 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ de condensado. O volume obtido em cada batelada foi, em média, de 480 mL de percolado tratado.

Foram realizados vários ensaios de evaporação, pois para a caracterização do percolado tratado por evaporação usando como base a Resolução CONAMA 430 art. 16 (BRASIL, 2011) foram necessários 19,80 L de amostra. Os mesmos parâmetros adotados para analisar o percolado foram adotados para a quantificação de poluentes no percolado evaporado, de forma a determinar a eficiência da concentração do percolado por evaporação como uma etapa de tratamento primário.

O processo de evaporação permitiu a remoção da cor, que passou de coloração escura a transparente levemente turva. Com relação ao odor também foi observada a redução, porém com a presença clara de nitrogênio amoniacal.

Tanto o percolado evaporado, após a condensação, como o concentrado (lodo), foram removidos do sistema após o resfriamento completo. Porém, como o lodo, quando resfriado apresentava alta viscosidade e difícil remoção, foi necessário um leve reaquecimento para transferência para o balão de armazenamento.

Finalizado o processo de evaporação foi determinada a massa específica do percolado evaporado ($0,99 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) e a umidade média do lodo ($52,45\% \pm 8,84$).

Com base nestas informações e nas massas específicas do percolado, antes e após a evaporação, e realizando um balanço de cada batelada, observou-se que foram produzidos, aproximadamente, 4,88% de lodo com 52,45% de umidade. Como a umidade do lodo era muito elevada para descarte por coprocessamento, e como o que limitou o processo de evaporação foi o fator segurança, foi realizada a reevaporação do lodo total obtido nas várias bateladas, em torno de 1.006 g, a fim de obter-se um lodo com uma menor porcentagem de umidade.

Após a reevaporação o lodo apresentou coloração preta, aspecto pastoso e consistente semelhante fisicamente ao piche, com umidade de $10,90 \pm 0,58\%$. Este foi armazenado adequadamente e caracterizado conforme a Resolução CEMA nº 076/2009 (PARANÁ, 2009).

Para a evaporação do lodo foi necessário o acréscimo de 0,5 g de antiespumante, devido à alta concentração de sólidos. A reevaporação do lodo ocorreu de forma muito instável e turbulenta, e não é aconselhada. Para se obter uma umidade baixa do lodo a operação contínua seria a mais adequada bem como a construção do equipamento que suporte as condições do processo, desta forma além de se obter um lodo com umidade em torno de 10% o consumo de energia seria menor.

4.4 CARACTERIZAÇÃO DO PERCOLADO EVAPORADO

O percolado evaporado obtido foi caracterizado da mesma forma que o percolado como o objetivo de verificar se a evaporação permite a redução do teor de poluentes presentes. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 4.5.

TABELA 4.5 – CARACTERIZAÇÃO DO CONDENSADO, CONFORME CONAMA 430 ART. 16.

PARÂMETROS	RESULTADOS OBTIDOS			MÉDIA	CONAMA 430
	(mg.L ⁻¹)			(mg.L ⁻¹)	(mg.L ⁻¹)
Arsênio	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,50
Bário	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	5,00
Benzeno	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	1,20
Boro	0,23	0,22	0,20	0,22 ± 0,02	5,00
Cádmio	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,20
Chumbo	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	0,50
Cianeto	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	1,00
Cianeto Livre	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,20
Clorofórmio	0,004	0,004	0,005	0,004 ± 0,001	1,00
Cobre Dissolvido	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	1,00
Cromo Total	<0,06	<0,06	<0,06	<0,06	-
Cromo Hexavalente	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	0,10
DBO	1.720,38	1.873,53	1.915,20	1.836,38 ± 102,60	-
DQO	2.749,72	2.827,60	2.546,10	2.707,81 ± 145,34	-
Dicloroetano	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	1,00
Estanho	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	4,00
Estireno	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,07

Continua

					Conclusão
Etilbenzeno	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,84
Fenol	5,42	5,35	5,14	5,3 ± 0,15	0,50
Fluoreto	0,04	0,03	0,03	0,03 ± 0,006	10,00
Ferro Dissolvido	<0,04	0,05	<0,04	0,05	15,00
Manganês Dissolvido	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	1,00
Material Flutuante	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Mercúrio	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,01
Nitrogênio Amoniacal	1.793,36	1.806,36	1.773,9	1.791,2 ± 16,35	20,00
Níquel	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	2,00
Óleos e Graxas Totais	<9,68	<9,68	<9,68	<9,68	-
Óleos e Graxas Minerais	<9,68	<9,68	<9,68	<9,68	20,00
Óleos e Graxas Vegetais	<9,68	<9,68	<9,68	<9,68	50,00
pH (°C)	9,22	9,31	9,25	9,26 ± 0,05	5 a 9
Prata	<0,06	<0,06	<0,06	<0,06	0,10
Selênio	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0,30
Sólido Sedimentável (ml.L ⁻¹)	<0,17	<0,17	<0,17	<0,17	1,00
Sulfeto	33,37	32,77	31,16	32,43 ± 1,14	1,00
Temperatura	20,10	20,30	20,30	20,23 ± 0,12	40,00
Tetracloroeto Carbono	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	1,00
Tolueno	0,004	0,003	0,003	0,003 ± 0,0006	1,20
Tricloroetileno	<0,001	0,001	<0,001	0,001	1,00
Xileno	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	1,60
Zinco	0,03	0,01	0,01	0,02 ± 0,01	5,00

Além das características qualitativas de cor e odor que foram favoráveis, o condensado obtido não apresentou vários poluentes que haviam sido detectados no percolado. A eficiência de remoção variou de 11,96% a 99,79% para o fenol e ferro dissolvido, respectivamente.

A cor foi removida, pois no processo de evaporação as substâncias que são responsáveis por esta característica não evaporam devido a presença de cadeias longas.

Alguns parâmetros como cádmio, chumbo, cianeto livre, cromo hexavalente, estanho, óleos e graxas vegetais, prata, tetracloroeto de carbono e tricloroetileno não foram detectados no percolado evaporado, o que era esperado, pois estas substâncias não estavam presentes no percolado.

Com relação aos metais, a redução foi significativa, que variou de 33,33% a 99,79%, como mostra a Tabela 4.6. Foram considerados como possíveis resultados, os limites de quantificação de cada parâmetro, ou seja, para aqueles resultados que são menores que os valores numéricos, conforme descritos na Tabela 4.5, foram adotados os como valores obtidos, os limites do Laboratório A.

TABELA 4.6 – EFICIÊNCIA EVAPORAÇÃO PARA A REMOÇÃO DE METAIS DO PERCOLADO

PARÂMETROS	EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO (%)
Arsênio	98,31
Bário	68,75
Boro	97,98
Cobre Dissolvido	33,33
Cromo Total	84,21
Cromo Trivalente	84,62
Ferro Dissolvido	99,79
Manganês Dissolvido	99,73
Merúrio	50,00
Níquel	98,33
Selênio	33,33
Zinco	97,78

Dos metais removidos, arsênio, boro, ferro, manganês e níquel se encontravam em desacordo com a legislação. A redução destes metais pela concentração do percolado foi superior a 97,98%. Esta eficiência na redução é devida aos metais ficaram retidos no lodo. A Tabela 4.7 mostra a concentração dos metais no percolado, antes e após a evaporação.

TABELA 4.7 – CONCENTRAÇÃO DOS METAIS PRESENTES NO PERCOLADO QUE ESTAVAM EM DESACORDO COM A LEGISLAÇÃO

PARÂMETROS	PERCOLADO (mg.L ⁻¹)	PERCOLADO EVAPORADO (mg.L ⁻¹)	CONAMA 430 Art. 16 (mg.L ⁻¹)
Arsênio	0,59	<0,01	0,5
Boro	10,87	0,22	5,0
Ferro Dissolvido	23,54	0,05	15,0
Manganês Dissolvido	3,65	<0,01	1,0
Níquel	2,4	<0,04	2,0

Após a evaporação, a concentração dos metais, os quais estavam em desacordo com a legislação, apresentaram valores baixos e de acordo com os limites estabelecidos pela legislação. Desta forma, o percolado se encontra adequado para o lançamento em corpos hídricos ou reaproveitamento em outros processos.

Para os compostos orgânicos, a eficiência da redução com o uso da concentração do percolado por evaporação, está apresentada na Tabela 4.8, bem como a temperatura de ebulição destas substâncias.

TABELA 4.8 – EFICIÊNCIA DO PROCESSO DE EVAPORAÇÃO EM RELAÇÃO AOS SOLVENTES PRESENTES NO PERCOLADO

PARÂMETROS	EFICIÊNCIA DA EVAPORAÇÃO (%)	TEMPERATURA DE EBULIÇÃO (°C)
Fenol	11,96	181,7
Dicloroetano	70,00	32,0
Estireno	50,00	145,0
Benzeno	50,00	80,1
Tolueno	95,71	110,6
Etilbenzeno	90,00	136,0
Xileno	85,00	138,4

O dicloroetano e o benzeno apresentaram eficiência de remoção de 70% e 50%, respectivamente, contudo esperava-se que estes se encontrassem somente no percolado evaporado, ou seja, com eficiência de remoção nula. Porém, como o equipamento adotado não era totalmente vedado pode ter ocorrido emissões fugitivas durante a evaporação e os mesmos foram perdidos para o meio ambiente.

Para as substâncias que apresentam temperatura de ebulição superior a adotada na evaporação (103,5 °C), esperava-se que todas permanecessem no lodo, porém a eficiência de remoção foi elevada para os compostos orgânicos com menor ponto de ebulição, ou seja, tolueno (95,71%), etilbenzeno (90,00%) e xileno (85,0%) e baixa para o estireno (50,00%) e fenol (11,96%). Diante destes dados é provável que todos os compostos orgânicos evaporaram, em função da alta temperatura da placa de aquecimento (acima de 450 °C) e a não detecção dos mesmos no percolado evaporado se deve a emissões fugitivas. Como o estireno e o fenol apresentam maior ponto de ebulição e devido a presença do sistema de

condensação, acoplado ao evaporador, a perda destes para o meio ambiente foi menor.

Outra possibilidade seria a decomposição e/ou polimerização destes compostos no percolado devido a alta temperatura da chapa de aquecimento e contato direto com a base dos balões e com isso novos produtos poderiam ter sido obtidos, porém esta hipótese não foi verificada.

Para o clorofórmio, que apresentou um valor médio de $0,004 \text{ mg.L}^{-1}$ no percolado evaporado, e inicialmente apresentava $0,001 \text{ mg.L}^{-1}$, o aumento pode ser explicado por interferência analítica, pois este elemento possui uma temperatura de ebulição de $61,2^\circ\text{C}$ e deveria se encontrar no percolado evaporado, pois o aumento da concentração não é coerente.

Desta forma a remoção dos poluentes orgânicos por evaporação provavelmente não ocorreu e, portanto os valores de eficiência de redução podem estar mascarados por outros processos físico-químicos e devem ser avaliados com mais cuidado em trabalhos futuros. Destes, somente o fenol estava em desacordo com a legislação, porém a eficiência da evaporação foi baixa (11,96%) e não inviabilizou este estudo.

O nitrogênio amoniacal apresentou um leve aumento na concentração passando de $1.786,86 \text{ mg.L}^{-1}$ para $1.791,20 \text{ mg.L}^{-1}$, a diferença de valores provavelmente está associada com a não homogeneidade da amostra de percolado e a erros analíticos, e pode-se considerar que a concentração amônia não foi alterada com o processo de evaporação. Contudo a alta concentração deste poluente no percolado evaporado, pode ser responsável pelo leve aumento no pH que passou de 8,78 para 9,26.

Como era esperado, o resultado da remoção de sólidos sedimentáveis foi eficaz (94,33%), o que permitiu adequar este parâmetro a legislação. Com relação a óleos e graxas, bem como em relação aos sais, o percolado já se encontrava em acordo com a legislação, exceto para sulfetos. Contudo, a remoção de sulfetos foi baixa (24,51%) e o valor de sulfetos no percolado evaporado se manteve acima dos limites exigidos pela legislação.

Desta forma, o percolado após a evaporação apresentou quatro poluentes acima dos limites estabelecidos pela legislação CONAMA 430 Art. 16, a saber: fenol, nitrogênio amoniacal, sulfetos e pH. Estes parâmetros estão em destaque na Tabela 4.9.

TABELA 4.9 – CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO PERCOLADO EVAPORADO: PARÂMETROS EM DESACORDO COM A LEGISLAÇÃO

PARÂMETROS	MÉDIA DOS RESULTADOS (mg.L ⁻¹)	LIMITES ESTABELECIDOS PELO CONAMA 430 Art. 16 (mg.L ⁻¹)
DBO	1.836,38 ± 102,60	-
DQO	2.707,81 ± 145,34	-
Fenol	5,30 ± 0,15	0,50
Nitrogênio Amoniacal	1.791,20 ± 16,35	20,00
pH	9,26 ± 0,05	5 a 9
Sulfeto	32,43 ± 1,14	1,00

Com relação a DBO₅ e DQO a eficiência da remoção foi de 86,72% e 89,90%, respectivamente. Esta redução foi significativa, visto que estes dois parâmetros são muito importantes para a avaliação de tratabilidade de efluentes na ETE do aterro.

Os compostos como nitrogênio, sulfetos e fenol são degradados em tratamentos biológicos. Porém, a concentração de nitrogênio amoniacal no percolado evaporado se apresentou muito alta para o tratamento biológico e nestas concentrações pode ser tóxica para esta etapa do processo. Desta forma, recomenda-se a redução do nitrogênio amoniacal para o envio do percolado evaporado para a ETE do aterro.

4.5 REMOÇÃO DE NITROGÊNIO AMONIAICAL POR DESSORÇÃO

Uma alternativa para a remoção do nitrogênio amoniacal é a remoção deste por dessorção (“*stripping*”). O processo de “*stripping*”, quando aplicado para a redução de concentração de nitrogênio amoniacal, requer um pH alcalino, acima de 8,5 (Queiroz *et al.*, 2011). Assim, seria possível o uso do “*stripping*”, para remoção do nitrogênio amoniacal do percolado evaporado, pois este apresenta pH 9,26, e, portanto seria desnecessário a adição de insumos alcalinos, tornando-o mais atrativo economicamente.

Logo, foi realizado um ensaio simples para verificar se a operação de “*stripping*” era eficiente para o percolado evaporado. Após o “*stripping*”, que foi realizado com a alimentação de ar ao sistema durante 24 horas, o efluente tornou-se mais límpido, translúcido e com odor menor de nitrogênio amoniacal. O mesmo foi analisado e foram determinadas as concentrações de nitrogênio amoniacal, sulfetos, fenol e pH. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.10. Os parâmetros estão expressos em mg.L^{-1} , exceto para pH.

TABELA 4.10 – CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO CONDENSADO AERADO

PARÂMETROS	PERCOLADO (mg.L^{-1})		REDUÇÃO (%)
	EVAPORADO	EVAPORADO E AERADO	
Fenol	5,30	4,94	6,79
Nitrogênio Amoniacal	1791,20	922,16	48,52
pH	9,26	8,95	3,35
Sulfeto	32,43	13,06	59,73

Através dos resultados apresentados na Tabela 4.10, pode-se verificar que o uso da evaporação seguida do “*stripping*” gerou bons resultados para o tratamento de nitrogênio amoniacal e sulfetos com redução de 48,52% e 59,73%, respectivamente.

Para o fenol o “*stripping*” também permitiu a redução deste poluente, porém os limites exigidos pela legislação, não foram atingidos.

Com a redução do nitrogênio amoniacal o pH diminuiu para 8,95, valor próximo do percolado bruto (8,78), porém bem próximo ao limite máximo da legislação (9,00). Conforme Silva (2009), o pH elevado do percolado após a evaporação melhora a eficiência do “*stripping*”, porém uma das desvantagens é a poluição ambiental devido a liberação na atmosfera de amônia gasosa e odor.

Esta liberação dos poluentes para atmosfera, de acordo com Silva (2009), ocorre porque o processo permite o arraste do poluente com ar transferindo estes do meio líquido para a fase gasosa, ou seja, a transferência de massa da fase líquida para gasosa e não é considerado uma eliminação ou tratamento.

Ao realizar a evaporação seguida do “*stripping*”, os limites exigidos pela legislação não foram atingidos, e para o uso desta tecnologia, se faz necessário a combinação com os tratamentos já adotados na ETE do aterro.

A implantação desta tecnologia apresenta a vantagem de permitir o aumento da capacidade de tratamento da ETE do aterro, mas o uso do “*stripping*” precisa ser melhor avaliado.

4.6 ALTERNATIVAS PARA O USO DO PERCOLADO EVAPORADO

O nitrogênio amoniacal é o principal problema para o tratamento do percolado, uma possibilidade seria a remoção deste por “*stripping*”, porém esta possibilidade pode gerar poluição atmosférica. Alternativamente, o percolado evaporado, contendo alta concentração de nitrogênio amoniacal, poderia ser utilizado na agricultura, como fonte de nitrogênio.

De acordo com Khai e Trang (2012) e Maçãs (2008) o percolado apresenta um alto potencial poluidor devido a presença de como de compostos orgânicos, nitrogênio amoniacal e metais pesados, em contrapartida é uma fonte de nutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio, os quais podem ser utilizados na agricultura como fonte de fertilizantes.

O percolado evaporado apresentou uma alta concentração de nitrogênio amoniacal e não apresentou metais e poderia ser utilizado como fonte de nitrogênio na agricultura se for possível a eliminação do fenol presente, que para este estudo ficou com uma concentração de $5,30 \text{ mg.L}^{-1}$.

Outra alternativa, proposta por Khai e Trang (2012), é a precipitação de nitrogênio (N) e potássio (P) na forma de estruvita ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), que é uma técnica para a remoção de grande quantidade de nitrogênio e fósforo no percolado.

4.7 AVALIAÇÃO DA POSSIBILIDADE DE AMPLIAÇÃO DA CAPACIDADE DE TRATAMENTO DA ETE DO ATERRO

No aterro estudado, a vazão de percolado que alimenta a ETE está condicionada a capacidade do sistema de tratamento de efluentes em transformar

amônia em nitritos, que é realizada através de bactérias no tratamento biológico por lodo ativado. A ETE desta unidade está apresentada na Figura 4.5.

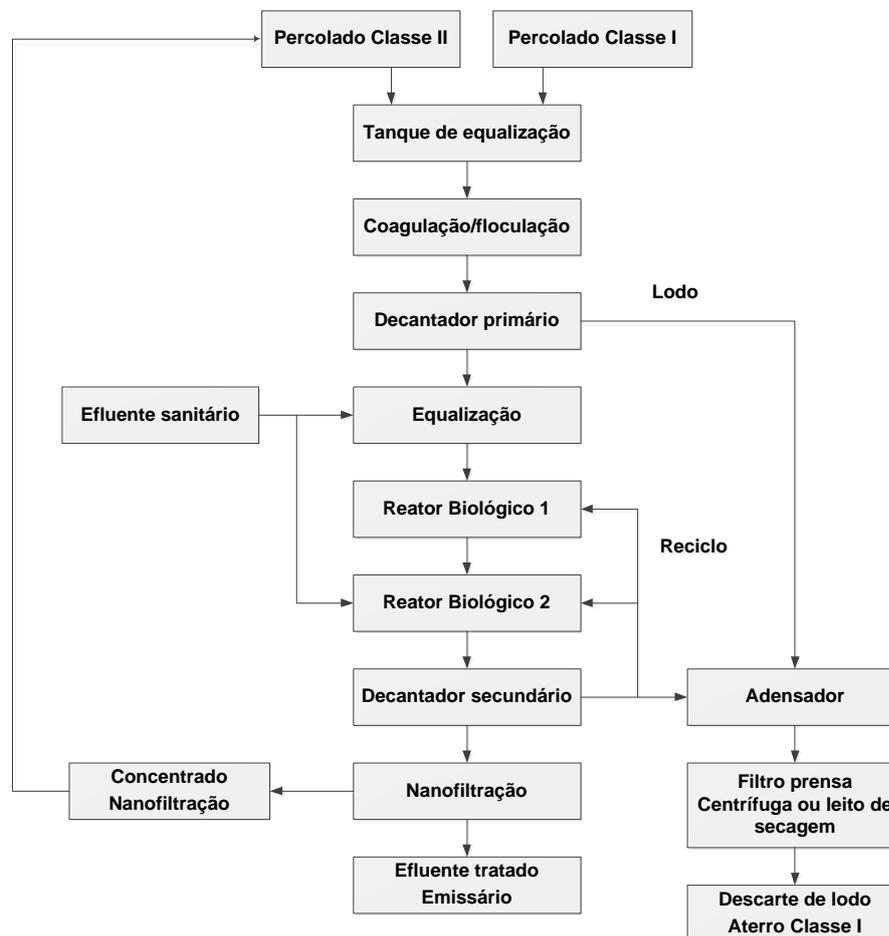


FIGURA 4.5 – DIAGRAMA DE BLOCOS DA ETE DO ATERRO ESTUDADO

O percolado tratado por evaporação e aeração pode viabilizar um aumento da vazão a ser tratada pelo atual sistema da ETE do aterro. Pois neste caso, ocorreu uma redução de 48,70% de nitrogênio amoniacal (de 1.791,2 mg.L⁻¹ para 919,16 mg.L⁻¹).

Sem a aplicação da aeração, que simulou a operação de “stripping”, o tempo de retenção no tanque de lodo biológico da ETE não seria alterado. Contudo, mesmo sem a aeração para a eliminação do nitrogênio amoniacal, já seriam percebidos alguns benefícios, pois o efluente obtido após a evaporação, não necessitaria de tratamento primário, pois a evaporação reduziu muitos poluentes e aumentou a biodegradabilidade do percolado.

A relação DBO₅/DQO aumentou de 0,52 (percolado) para 0,68 (percolado evaporado). Assim, provavelmente seria possível o lançamento do efluente diretamente no sistema de tratamento biológico. O único impedimento seria a quantidade de nitrogênio amoniacal presente no percolado evaporado, que nesta condição pode apresentar toxicidade ao sistema biológico.

Portanto, o mais adequado seria o tratamento do percolado por evaporação seguida de “stripping” para o posterior tratamento biológico, de modo a diminuir a concentração de nitrogênio amoniacal. Estas operações deveriam ser implantadas antes dos sistemas biológicos 1 e 2, apresentados na Figura 4.5.

4.8 CARACTERIZAÇÃO DO LODO

O lodo obtido no processo de evaporação do percolado foi caracterizado para verificar a possibilidade de envio deste resíduo para coprocessamento em fornos de cimento, podendo ser usado como substituto da matéria prima ou aproveitamento energético. Para tal, foi caracterizado, conforme a Resolução CEMA 76/2009 do estado do Paraná.

Os resultados obtidos estão mostrados na Tabela 4.11, e são apresentados em base seca, com exceção ao PCS e umidade.

TABELA 4.11 – CARACTERIZAÇÃO DO CONCENTRADO DO PROCESSO DE EVAPORAÇÃO DE PERCOLADO

PARÂMETROS	RESULTADOS OBTIDOS (mg.kg ⁻¹)			MÉDIA (mg.kg ⁻¹)
Umidade	10,95 (%)	10,30 (%)	11,45 (%)	10,90 ± 0,58 (%)
Alumínio	<71,40	<71,40	72,19	72,19 ± 0,00
Antimônio	<58,90	<58,90	<58,90	<58,90
Arsênio	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50
Bário	<50,00	<50,00	<50,00	<50,00
Cádmio	<2,10	<2,10	<2,10	<2,10
Cálcio	20.860,00	21.070,00	22.780,00	21.570,00 ± 1.053,14
Chumbo	<24,40	<24,40	<24,40	<24,40
Cloro	2.565,00	13.356,00	15.426,00	10.449,00 ± 6.905,75
Cobalto	<20,30	<20,30	<20,30	<20,30

Continua

	Conclusão			
Cobre Total	<6,60	<6,60	<6,60	<6,60
Cromo Total	<27,20	<27,20	<27,20	<27,20
Enxofre	2.693,00	2.872,00	1.659,00	2.408,00 ± 654,80
Estanho	<95,00	<95,00	<95,00	<95,00
Ferro	3.874,00	3.885,00	3.945,00	3.901,33 ± 38,21
Flúor	257,00	172,00	166,00	198,33 ± 50,90
Fluoreto	11,00	8,20	5,40	8,20 ± 2,80
Fósforo	252,06	268,18	244,7	254,98 ± 12,01
Magnésio	19.880,00	20.310,00	19.260,00	19.816,67 ± 527,86
Mercúrio	0,17	0,10	0,07	0,11 ± 0,05
Níquel	<15,40	<15,40	<15,40	<15,40
PCS	1.892,00 (cal.g ⁻¹)	1.763,70 (cal.g ⁻¹)	2.049,40 (cal.g ⁻¹)	1.901,7 ± 143,10 (cal.g ⁻¹)
Potássio	36.950,00	36.740,00	36.550,00	36.746,67 ± 200,08
Selênio	0,15	0,18	0,19	0,17 ± 0,02
Silício	386,70	386,70	358,70	377,37 ± 16,17
Sódio	110.000,00	110.500,00	107.400,00	109.300,00 ± 1664,33
Tálio	<58,10	<58,10	<58,10	<58,10
Vanádio	721,00	724,60	736,10	727,23 ± 7,89
Zinco	<30,20	<30,20	<30,20	<30,20
Telúrio	<2,50	<2,50	<2,50	<2,50

Avaliando-se os resultados apresentados na Tabela 4.11 e comparando com a Resolução CEMA 76/2009, pode-se verificar que os parâmetros atendem as especificações desta legislação, pois o lodo do processo de evaporação do percolado não apresenta as concentrações superiores dos elementos (Tabela 4.12) que são restritivos para destinar este resíduo por coprocessamento.

TABELA 4.12 – PARÂMETROS RESTRITIVOS PARA COPROCESSAMENTO, CONFORME A RESOLUÇÃO CEMA 76/2009

PARÂMETROS	SOMA DOS RESULTADOS RESPECTIVOS	LIMITES ESTABELECIDOS PELA RESOLUÇÃO CEMA 76/2009
Arsênio	<0,50	A soma dos resultados destes elementos não deve ser maior que 5000 mg.kg ⁻¹ sendo selênio até 100 mg.kg ⁻¹
Cobalto	<20,30	
Níquel	<15,40	
Selênio	0,17	
Telúrio	<2,50	

Continua

		Conclusão
Cádmio	<2,10	A soma dos resultados destes elementos não deve ser maior que 200 mg.kg ⁻¹ , sendo mercúrio até 10 mg.kg ⁻¹
Mercúrio	0,11	
Tálio	<58,10	
Chumbo	<24,40	Os resultados individuais destes elementos não deve ser maior que 5000 mg.kg ⁻¹
Cromo Total	<27,20	

Com base nos resultados apresentados na Tabela 4.12 verificou-se que o lodo não apresentou restrições com relação a soma dos metais estabelecidos pela CEMA 76/2009. Desta forma o lodo poderia ser destinado para coprocessamento.

Para que o resíduo possa ser blendado ou misturado, para posterior destino para coprocessamento, este deve ter um valor mínimo de 1.000 cal.g⁻¹ para o PCS. O lodo obtido após a evaporação do percolado se enquadra nesta restrição, porém como sofreu reevaporação e apresentou baixa umidade (10,90%) o poder calorífico médio obtido foi bom, ou seja, $1.901,7 \pm 143,10$ cal.g⁻¹, no mínimo 75,86% acima do valor exigido pela legislação.

Este destino, além de adequado seria interessante, pois desta forma o lodo não retorna ao aterro, pois ao voltar ao aterro retornaria ao ciclo de geração de percolado.

Porém, de acordo com a Resolução CEMA 76/2009, não permite a destinação para coprocessamento de resíduos gerados em atividades de tratamento e destinação final de resíduos, que é o caso deste estudo.

4.9 ANÁLISE ECONÔMICA SIMPLES DA CONCENTRAÇÃO DE PERCOLADO POR EVAPORAÇÃO

Como apresentado, a aplicação da evaporação é tecnicamente viável, tanto para o lodo como para o percolado evaporado, mesmo sem a aplicação da operação de “stripping”. Contudo, o gasto energético pode ser um impedimento para a implementação do sistema de evaporação como tratamento complementar da ETE de aterros. Desta forma realizou-se uma análise econômica simples para verificar a

viabilidade de implantação de um sistema de evaporação. Os cálculos desta avaliação estão apresentados no apêndice deste trabalho.

Para realizar esta análise foi adotado como volume de 55.000 m³ de percolado por ano, a ser tratado por evaporação e que será a referencia para os cálculos deste capítulo. Este volume foi obtido através dos cálculos de balanços de massa e energético dos evaporadores A, B e C, o qual se obteve um valor total de massa total de 7.110,00 kg.h⁻¹ de percolado a ser evaporado, sendo os cálculos apresentados a seguir:

$$(7.110,00 \text{ kg.h}^{-1}) / (1000 \text{ kg.m}^{-3}) = 7,11 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$$

$$\text{Portanto: } 7,11 \text{ m}^3.\text{h}^{-1} \times 24\text{h.dia}^{-1} \times 330 \text{ dias.ano}^{-1} = 56.311,2 \text{ m}^3.\text{ano}^{-1}$$

Considerou-se 330 dias por ano ao invés de 365 dias, devido a eventuais paradas para manutenção. Para efeitos de arredondamento de números, adotou-se 55.000 m³.ano⁻¹ de percolado a ser evaporado. E para possibilitar os balanços de massa e energético, considerou-se que para cada 1 m³ de percolado evaporado seriam produzidos, no mínimo, 800 kg de percolado evaporado, adotando que este era composto apenas por água. Em termos de massa o erro gerado nesta consideração foi pequeno, pois a massa específica do percolado evaporado foi de 0,99 g.cm⁻³.

Como a energia necessária para vaporizar água, assim como para qualquer outra substância é muito elevada procurou-se a configuração mais econômica para o processo de evaporação de forma a aproveitar a energia residual do sistema. Segundo Rubin *et al.* (1984), em situações que necessitam de maior praticidade e que visam o aproveitamento energético, como para este caso, recomenda-se o uso de evaporadores sequenciados. Este tipo de arranjo é denominado de “evaporação em múltiplo efeito”.

Além do uso de evaporadores de múltiplo efeito foi considerado que o aquecimento seria através de um aquecedor de chama direta. Assumiu-se um conjunto com três vasos evaporadores em série, quatro trocadores de calor de condensação e quatro bombas, como está esquematizado na Figura 1A do apêndice deste trabalho.

Os evaporadores adotados são constituídos por vasos cilíndricos com as seguintes dimensões: diâmetro 2,5 m e altura 4,0 m. Desta forma cada evaporador

apresenta um volume total de 20 m³, sendo que o volume ocupado pelo líquido no seu interior, volume útil, não ultrapassa 15 m³. Esta diferença no volume é importante, pois permite um espaço para separação dos vapores da fase líquida em ebulição na câmara de evaporação do evaporador. Adotou-se ainda uma vazão mássica de evaporação de 2.000 kg.h⁻¹ para o primeiro evaporador e de acordo com o esquema adotado a massa total de percolado que alimenta o sistema de múltiplos efeitos era de 6.946 kg.h⁻¹.

No cálculo das despesas considerou-se um tempo de depreciação de 10 anos, como sugerido por Peters e Timmerhaus (1991). A relação de despesas esta descrita no Quadro 4.1. Para a obtenção destes valores foi considerado o sistema operando 24 h.dia⁻¹ e 330 dias por ano, para fins de eventuais paradas para manutenção.

Retorno de investimento (depreciação do capital fixo)	US\$ 620.650,00/10 anos	US\$ 62.065,00/ano
Manutenção da planta	2,5% do custo dos equipamentos ao ano	US\$ 15.516,25/ano
Operadores: 01 operador por turno (3 turnos/dia). Necessário 04 operadores	Salário: US\$ 7.830,00/ano. Considerando-se encargos sociais de 87%	US\$ 58.568,40/ano
Energia elétrica: cada bomba com 1,5 kW de potência. Potência total de 6,0 kW (4 bombas)	Custo de US\$ 0,14/kWh, para 330 dias de operação/ano	US\$ 6.652,00/ano

QUADRO 4.1 – RELAÇÃO DAS DESPESAS PARA UMA UNIDADE DE EVAPORAÇÃO DE PERCOLADO

Para a estimativa de consumo de combustível, para aquecimento do sistema, foram consideradas duas possibilidades. A primeira seria o uso do gás gerado no próprio aterro e neste caso, por ser uma análise simples, não há custos com este tipo de combustível, pois todo o gás necessário para a queima seria gerado pelo aterro. A segunda possibilidade seria o uso de óleo combustível.

Como a análise econômica foi realizada de maneira simplificada, não foram estimados e considerados os custos de tratamento para purificação do gás gerado

pelo aterro. Nestas avaliações foram considerados os dados apresentados no Quadro 4.2.

Poder calorífico inferior (PCI) do gás	5180,00 kcal.m ⁻³ (FIESINGER, 2007)
Poder calorífico inferior (PCI) do óleo combustível	9.800 kcal.kg ⁻¹ (AALBORG, 2013)
Eficiência na combustão para o gás e óleo combustível (ε)	85%
Energia necessária para o aquecimento do primeiro evaporador (Q_a)	1.179.685,00 kcal/h

QUADRO 4.2 – DADOS CONSIDERADOS PARA DETERMINAR A QUANTIDADE DE COMBUSTÍVEL NECESSÁRIA PARA O SISTEMA DE EVAPORAÇÃO

Sabendo que o volume (V) de gás necessário para queima de gás gerado pelo aterro é dado por:

$$V = \frac{Q_a}{\varepsilon(PCI)} \quad (4.1)$$

Onde:

Q_a = Energia total gasta para o aquecimento do Evaporador A

ε = Eficiência da combustão

PCI = Poder Calorífico inferior do gás (FIESINGER, 2007)

E a massa (M) de óleo combustível necessária, na falta de gás do aterro, é dado por:

$$M = \frac{Q_a}{\varepsilon(PCI)} \quad (4.2)$$

Onde:

Q_a = Energia total gasta para o aquecimento do Evaporador A

ε = Eficiência da combustão

PCI = Poder Calorífico inferior do óleo combustível (AALBORG)

Assim o volume de gás do aterro, necessário para o aquecimento do sistema de evaporação de múltiplos efeitos, seria de $267,92 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ e massa de óleo combustível de $142,00 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$.

O óleo combustível poderia ser adquirido comercialmente com o custo estimado de US\$ 0,70 por kg (considerando o barril de petróleo a US\$ 103,00) e, portanto teria um custo total de US\$ 786.902,00 por ano.

Após as determinações de custos com equipamentos, mão de obra, energia elétrica e combustível, para a operacionalização do sistema de evaporação de percolado proposto, foram obtidos os seguintes custos finais para o processamento do volume determinado anteriormente de 55.000 m^3 de percolado a ser evaporado por ano:

- i. Gás gerado pelo aterro como combustível para aquecimento do evaporador: US\$ 142.801,65 por ano e custo unitário de US\$ 2,60 por m^3 de percolado evaporado.
- ii. Óleo combustível como combustível para aquecimento do evaporador: US\$ 929.703,65 por ano e custo unitário de US\$ 16,90 por m^3 de percolado evaporado.

Diante dos resultados apresentados, pode-se observar que é mais econômica e vantajosa a utilização do gás gerado no aterro para geração de energia necessária ao sistema de evaporação do percolado, sendo este aproximadamente, sete vezes mais baixo que o custo da utilização de óleo combustível.

Mas para que o gás gerado em aterros possa ser utilizado é necessário quantificar a vazão deste, bem como o seu PCI. Para este estudo seriam necessários $267,92 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ de gás para que o sistema proposto opere adequadamente. Porém não foi avaliada a geração de gás do aterro estudado.

Contudo, para a implantação do sistema de evaporação existe um custo de US\$ 2,60 por m^3 de percolado, e este deverá também ser avaliado em relação à redução de insumos na ETE do aterro, bem como em relação à possibilidade de ampliação da capacidade de tratamento desta.

Nesta análise não foi considerado o custo com a canalização do gás do aterro até a unidade de evaporação, foi somente considerada a tubulação

necessária ao sistema de evaporação. Também não foi considerada a inclusão de uma torre de *“stripping”*, a qual traria grandes benefícios ao sistema proposto, pois permitiria a remoção de nitrogênio amoniacal e sulfetos, mas acarretaria em valores mais elevados no investimento, manutenção e energia da planta.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou concentração de percolado por evaporação como tratamento primário, visando a ampliação da capacidade da estação de tratamento de efluentes do aterro.

O percolado utilizado neste estudo foi obtido de aterro classe I e II e foi caracterizado, conforme a Resolução CONAMA nº 430/2011. O percolado apresentou concentrações de arsênio, boro, ferro e manganês dissolvido, níquel, fenol, sólidos sedimentáveis, nitrogênio amoniacal e sulfetos acima dos limites estabelecidos pela legislação. As concentrações de DBO₅ e DQO também se apresentaram altas, indicando uma média biodegradabilidade o que compromete o tratamento do percolado na ETE deste aterro. Os poluentes encontrados no percolado condizem com os resíduos que são dispostos no aterro classe I e II.

A concentração do percolado por evaporação proporcionou a redução da carga poluidora, além permitir a mudança na coloração que passou de escuro a transparente.

Dentre os poluentes que foram removidos por meio da evaporação do percolado ocorreu uma significativa redução e até ausência de metais e sólidos sedimentáveis no percolado evaporado. Para a DBO₅ e a DQO a redução também foi significativa, sendo de 87% e 89,9%, respectivamente. Como estes dois parâmetros são muito importantes para avaliar a tratabilidade de efluentes a redução facilita o tratamento dos mesmos na ETE.

Contudo o processo de evaporação não removeu o nitrogênio amoniacal presente no percolado e a eficiência de remoção para fenol e sulfetos foram baixas, 25% e 12%, respectivamente. Com isso o percolado evaporado apresentou concentrações acima dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 430/2011 para nitrogênio amoniacal, fenol, sulfetos e pH, sendo que este último aumentou. O aumento no valor do pH de 8,78 para 9,26 foi devido, provavelmente, a alta concentração de nitrogênio amoniacal.

O uso da evaporação do percolado poderia eliminar o tratamento físico-químico da ETE do aterro estudado e também aumentaria a biodegradabilidade no tratamento biológico já implantado. O nitrogênio amoniacal, sulfetos e fenol que permaneceram no percolado evaporado são degradados através de tratamento

biológico, porém a concentração de nitrogênio amoniacal, após a evaporação, se manteve elevada ($1.791,2 \text{ mg.L}^{-1}$), não sendo possível ser enviado diretamente para o tratamento biológico, podendo ser tóxico para o sistema.

Desta forma foi avaliada a redução do nitrogênio amoniacal por dessorção ("*stripping*") com ar. Esta operação apresentou redução de 49% para o nitrogênio amoniacal e de 60% para sulfetos e permitiria que o percolado fosse enviado diretamente para o sistema de tratamento biológico.

A concentração do percolado por evaporação produz também lodo, este apresentou umidade média de 52,45%. A reevaporação do lodo reduziu a umidade para 11% e este foi caracterizado conforme a Resolução CEMA 76/2009. Nestas condições o lodo apresenta poder calorífico superior médio de $1.901,70 \text{ cal.g}^{-1}$, o qual está acima do mínimo estabelecido pela CEMA 76/2009 ($1.000,00 \text{ cal.g}^{-1}$). Desta forma o lodo poderia ser destinado para coprocessamento, permitindo o aproveitamento do seu conteúdo energético em fornos de cimento, e, evitando o retorno do lodo para o aterro.

Uma análise econômica simples mostrou que a evaporação do percolado, quando utilizado o gás gerado no próprio aterro, tem um custo de implantação e operação de US\$ 2,60 por m^3 de percolado. Porém, se o gás gerado no aterro não puder ser adotado o custo não é tão atrativo. Usando óleo combustível para o aquecimento do evaporador o custo foi de US\$ 16,90 por m^3 de percolado.

Assim a evaporação do percolado, como forma de tratamento primário, pode ser interessante, pois permitiu a redução de vários indicadores de poluição como DBO_5 e DQO, e poderia suprir a etapa de tratamento físico químico, com a vantagem da remoção de cor do efluente e aumentar a capacidade da ETE do aterro.

Porém, a evaporação do percolado não reduziu as concentrações de nitrogênio amoniacal, o que é limitante para a ETE, o que indica a necessidade de estudos futuros para melhor avaliar a remoção do nitrogênio amoniacal por "*stripping*" do percolado evaporado ou o uso deste para outras finalidades, por exemplo, na agricultura como fertilizante.

REFERÊNCIAS

AALBORG, Poder Calorífico Inferior. Disponível em: <www.aalborg-industries.com.br>. Acesso em: 19/10/2013.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8419 - Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**. São Paulo, 1992.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13591 - Compostagem**. São Paulo, 1996.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004 - Resíduos Sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

ABRELPE. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos Sólidos no Brasil – 2012**. Disponível em: <http://a3p.ibrij.gov.br/pdf/ABRELPE%20%20Panorama2012.pdf>. Acesso em: 24/12/2013.

ALVES, L. V. **Sistema e unidade evaporadora de percolado**. PI 0703266-8 A2. 25 de fevereiro, 2009. Disponível em: <<https://gru.inpi.gov.br>>. Acesso em: 16/09/2013.

ASME - American Society of Mechanical Engineers, **Rules for Construction of Pressure Vessels**, c. 21, s. VIII, d. 1, p. 27-127, 2009.

BACELAR, H.A.M. **Tratamento de Lixiviados Produzidos em Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos por meio de Evaporação Forçada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

BAHÉ, J. M. **Estudo da Evaporação de Lixiviados de Aterros Sanitários como Alternativa Tecnológica de Tratamento: Testes em Bancada**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

BAIRD, C. **Química ambiental**, 2ª Ed., Porto Alegre: Bookman, 2002.

BAOCHENG, L. **Landfill leachate evaporation treatment device**. CN202898170 (U), 24 de junho, 2013. Disponível em: <<http://worldwide.espacenet.com/>>. Acesso em: 29/08/2013.

BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; MA, L.; BARLETTA, B. **Manual de Laboratório de Ingeniería de Alimentos**. Zaragoza: Acribia, 1997.

BELLA, D. G.; TRAPANI, D. D.; MANNINA, G.; VIVIANI, G. Modeling of perched leachate zone formation in municipal solid waste landfills. **Waste Management**, v. 32, p. 456-462, Março 2012. Disponível em: <[10.1016/j.wasman.2011.10.025](http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2011.10.025)>. Acesso em: 02/06/2013.

BIDONE, F.; SILVA, A. P.; MARQUES, D. M. Lodos produzidos nas estações de tratamento de água (ETAs): desidratação em leitos de secagem e codisposição em aterros sanitários. In: ANDREOLI, C. V. **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro: RiMa, ABES (PROSAB), 2001. p. 215-244.

BLACKADDER, D. A.; NEDDERMAN, R. M. **Manual de Operações Unitárias**. São Paulo: Hemus, 2004.

BRAGA, F. S.; NOBREGA, C. C.; HENRIQUES, V. M. Estudo da composição dos resíduos sólidos domiciliares em Vitória – ES. **Revista Limpeza Pública**. São Paulo, Ed. 55, p. 11-24, abril, 2000.

BRASIL, Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução 430**, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Diário Oficial da União, Brasília, nº 92, p. 89, 16 de maio de 2011.

BRASIL, **Norma regulamentadora nº 25**. Resíduos industriais. Ministério do Trabalho e Emprego, 6 de julho de 1978. Disponível em: <<http://portal.mte.gov.br/legislacao/normas-regulamentadoras-1.htm>>. Acesso em 27/06/2013.

BRASIL, Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 316**, de 29 de outubro de 2002. Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos. Diário Oficial da União, Brasília, n. 224, s. 1, p. 92-95, 20 de nov. de 2002.

BRASIL. **Decreto-lei n. 12.305**, de 02 de agosto de 2010. Diário Oficial [da] da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, n. 147, s. 1, p. 3-7, 03 ago. de 2010.

BRITO, N. N.; BROTA, G. A.; SANTOS, E. M., SILVA, N. B.; PELEGRINI, R.T.; Paterniani, J.E.S. Ensaio toxicológicos com sementes para avaliação de tratamento do chorume por Filtração lenta e fotocatalise. **LOS Environment**, v.10 n.2, p. 139, 2010.

BRITO, N.N.; PELEGRINI, R.T.; PATERNIANI, J.E.S. **Filtração lenta no tratamento de percolado de aterro sanitário**. **Revista Minerva**, v. 4, n.l, p. 85-93, 2007.

BROGAARD, L. K. RIBER, C.; CHRISTENSEN, T.H. Quantifying capital goods for waste incineration. **Waste Management**, v. 33, Issue 6, p. 1390-1396, Jun. 2013.

CASTILHOS, A. B. J. **Tratamento, recuperação e disposição integrados de resíduos urbanos, com ênfase na proteção de corpos d'água**. Rio de Janeiro: ABES (PROSAB), 2006.

CASTILHOS, A. B. J.; MEDEIROS, P. A.; FIRTA, L. N.; LUPARTINI, G.; SILVA, J. D. Principais processos de degradação de resíduos sólidos urbanos. In: CASTILHOS,

A. B. J. **Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte**. Rio de Janeiro: ABES, 2003. p. 17-63.

CAVALCANTI, J. E. W. de A. **Manual de tratamento de efluentes Industriais**. São Paulo: Engenho, 2009.

CASELLA, D. R. **Systems and methods for treating landfill gas using landfill leachate**. US8287625, 16 de outubro, 2012. Disponível em: <patft.uspto.gov/>. Acesso em: 03/09/2013.

CIFALI, E. **Processo e respectivo equipamento evaporador de percolado**. PI 0402818-0 A. 12 de abril, 2005. Disponível em: <<https://gru.inpi.gov.br>>. Acesso em: 16/09/2013.

DIAS, F. P. **A incineração de resíduos sólidos: análise custo benefício do incinerador de resíduos sólidos do P-Sul – DF**. 81 f. Dissertação (Mestrado em Economia) - Departamento de Economia, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

DUESEL, J. E BERNARD F. **Leachate evaporation system**. US5342482, 30 agosto, 1994. Disponível em: <patft.uspto.gov/>. Acesso em: 02/09/2013.

FARQUHAR, G. J. **Leachate: Production and Characterization**. Department of Civil Engineering, University of Waterloo, Waterloo, 1988. Disponível em: <<http://www.cepis.org.pe/muwww/fulltext/repind49/lesson10/leachate.html>> Acesso em: 22/09/2013.

FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Análise técnica e ambiental da utilização de resíduos sólidos urbanos na produção de cimento (coprocessamento)**. Fundação Estadual do Meio Ambiente. Belo Horizonte: Feam, 2010.

FERRAZ, F. M. **Recuperação da amônia liberada no processo de "air stripping" aplicado ao tratamento do lixiviado de aterros sanitários**. 128 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. **Manual Prático para a Compostagem de Biossólidos**. Programa de Saneamento Básico. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

FERNANDEZ-VIÑA, M. B. D. Vertedores Controlados de Resíduos Sólidos Urbanos: uma Perspectiva Internacional, 2000. In: Lins E. A. M. **A utilização da capacidade de campo na estimativa do percolado gerado no aterro de Muribeca**. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

FERREIRA, M. A. da S. **Aplicação de modelos de avaliação qualitativa e quantitativa dos percolados gerados em um aterro sanitário**. 212 p. Dissertação (Mestrado Engenharia em Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

FERREIRA, M. A. S. **Nanofiltração à escala laboratorial na remoção de cianotoxinas**. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade do Algarve, Faro, 2010.

FIESINGER, T., **Biogas Processing**. The New York State Energy Research and Development Authority. New York, 2007.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. **Princípios das Operações Unitárias**. 2ªed. Rio de Janeiro: LTC, 1982.

FRANCISCO J. R. **Processo de tratamento de percolado e outros efluentes industriais**. PI 0904644-5 A2. 05 de julho, 2011. Disponível em: <<https://gru.inpi.gov.br>>. Acesso em: 16/09/2013.

GOMES, L. P. **Estudos de Caracterização e Tratabilidade de Lixiviados de Aterros Sanitários para as Condições Brasileiras**. Rio de Janeiro: PROSAB – tema III, edital V., 2009.

GUTHRIE, K.M. Data and techniques for preliminary Capital Cost Estimating. **Chemical Engineering**. New York, v. 76, p. 114-142, 1969.

HERRERA, R. G., CÁRDENAS, L. K. & CASTILLO, R. R. Basureros Activos. Simulación de la lixiviación – el caso de Mérida, México, 2000. In: Lins E. A. M. **A utilização da capacidade de campo na estimativa do percolado gerado no aterro de Muribeca**. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

HOLMAN, J. P., **Transferência de Calor**, São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1983.

JORDÃO, E. P. & PESSÔA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 3ª ed. Rio de Janeiro: ABES, 1995.

KARSTENSEN, K. H. **Formação e emissão de POPs pela indústria de cimento**. SINTEF – Fundação para Pesquisa Científica e Industrial da Noruega. São Paulo, 2006.

KATSIFARAKIS, K.L. Solar Distillation Treatment of Landfill Leachate: A Case Study in Greece. Desalination, **Elsevier Science Publishers B.V.**, Amsterdam, v. 94, p. 213-221, 1993.

KHAI, N. M.; TRANG, H. T. Q. Chemical Precipitation of Ammonia and Phosphate from Nam Son Landfill Leachate, Hanoi. **Iranica Journal of Energy & Environment** **3**: 32-36, 2012.

KULIKOWSKA, D.; KLIMIUK, E. The effect of landfill age on municipal leachate composition. **Bioresource Technology**, v. 99, p. 5981-5985, Set. 2008. Disponível em: <10.1016/j.biortech.2007.10.015>. Acesso em: 02/06/2013.

LANGE, L.C.; AMARAL, M.C.S. **Geração e características do lixiviado**. In: GOMES, L.P. Estudos de caracterização e tratabilidade de lixiviados de aterros sanitários para as condições brasileiras. Rio de Janeiro: ABES, 2009, v. 1, p. 26-59.

LEITE, V. D.; FERNANDES, F.; JUCÁ, J. F. T.; GOMES, L. P.; LOPES, W. S.; SOUSA, J. T.; SILVA, F. M. S.; CAETANO, M. O. Estudo do processo de stripping de amônia de lixiviado de aterro sanitário In: GOMES, L.P. **Estudos de caracterização e tratabilidade de lixiviados de aterros sanitários para as condições brasileiras**. Rio de Janeiro: ABES, 2009, v. 1, p. 26-59.

MAÇÃS, J. E. S. **Nitrogênio nítrico e amoniacal no desenvolvimento da parte aérea de milho cultivado em argissolo**. Dissertação de Mestrado, Ciências do Solo, UFRG, 2008, 72 p.

MÁXIMO, V. A. **Tratamento por coagulação-floculação dos lixiviados gerados no aterro da região metropolitana de Florianópolis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

MORAES, E. F.; ALVES, J. M. C. B.; SOUZA, M. J. F.; CABRAL, I. E.; MARTINS, A. X. Um modelo de programação matemática para otimizar a composição de lotes de minério de ferro da mina Cauê da CVRD. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 59, n.3, p. 299-306, Jul/Set. 2006.

MOURA, J. C.; D'ÁVILA, S.G; ROCHA, N., T. **Processo de gaseificação e combustão combinadas (GCC) para disposição final de resíduos industriais**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 12. Porto Alegre, RS, 1998. Anais. Porto Alegre: COBEQ, 1998.

NECKEL, A.; GOELLNER, E.; SOSSMEIER, S. G. **Os recursos hídricos e a educação ambiental**. Passo Fundo: Goellner, 2013.

NOBREGA, R., BORGES, C.P., HABERT, A.C. **Processos de separação por membranas**. In: JUNIOR, A.P., KILIKIAN, B.V. Purificação de produtos biotecnológicos. São Paulo: Manole, 2005. p. 37-88.

PARANÁ, Conselho Estadual do Meio Ambiente. **RESOLUÇÃO 076/2009 – CEMA**, 30 de novembro de 2009. Diário oficial: 8126 de 24 de dezembro de 2009, Curitiba.

PELEGRINI, N. N. B.; PELEGRINI, R. T.; PATERNIANI, J. E. S. Filtração lenta no tratamento de percolado de aterro sanitário. **Revista Minerva**, v. 4, n.1, p. 85-93, 2007.

PETERS, M. S.; TIMMERHAUS, K. D. **Plant Design and Economics for Chemical Engineers**. 4^a ed. New York: McGraw-Hill, 1991.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. 7^a ed., New York: McGraw-Hill, 1997.

PORTAL DE LABORATÓRIOS VIRTUAIS DE PROCESSOS QUÍMICOS, **Absorção: Fundamentos**. Disponível em: <labvirtual.eq.uc.pt/>. Acesso em: 20/10/2013.

PREFEITURA MUNICIPAL DE FLORIANÓPOLIS. **Os aterros sanitários possuem licenciamento ambiental específico**. FLORAM - Meio Ambiente. 09/03/2011. Disponível em: <<http://www.pmf.sc.gov.br/noticias>> Acesso em 15/09/2013.

QUEIROZ, L. M.; AMARAL, M. S.; MORITA, D. M.; YABROUDI, S. C.; SOBRINHO, P. A. Aplicação de processos físico-químicos como alternativa de pré e pós-tratamento de lixiviados de aterros sanitários. **Revista Eng. Sanitária Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 16, n. 4., Out./Dec. 2011.

RENÓ, M. L. G.; TORRES, F. M.; SILVA, R. J.; SANTOS, J. J. C. S.; MELO, M. L. N. M. Exergy analyses in cement production applying waste fuel and mineralizer. **Energy Conversion and Management**, v. 75, p. 98-104, May 2013.

RENOU, S.; GIVAUDAN, J.G.; POULAIN, S.; DIRASSOUYAN, F.; MOULIN, P. Landfill leachate treatment: Review and opportunity. **Journal of Hazardous Materials**, v. 150, p. 468-493, Feb. 2008.

ROCHA, S.D.F.; LINS, V.F.C.; ESPIRITO SANTO, B.C. Aspectos do coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 16, n.1, p. 1-10, jan./mar. 2011.

RIBAU TEIXEIRA, M.; ROSA, M. J. **Flotação e nanofiltração na remoção de cianobactérias e cianotoxinas de águas para consumo humano**. Trabalho apresentado em 11º Encontro Nacional de Saneamento Básico (ENaSB). In Actas do 11º Encontro Nacional de Saneamento Básico (ENaSB), Faro, 2004.

RICHTER, C. A. **Água: métodos e tecnologia de tratamento**. São Paulo. Blucher, 2009.

RUBIN, F. L.; MOOK, H. A.; HOLT, A. D.; STANDIFORD, F. C. **Perry's Chemical Engineer's Handbook**. 6ª Ed. New York: McGraw-Hill, 1984. p. 11-35.

SEGATO, L. M.; SILVA, C. L. Caracterização do Chorume do aterro sanitário de Bauru. In: Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 27, 2000, Porto Alegre. ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, p.1-9, 2000.

SELLITTO, M. A.; KADEL, N. J.; BORCHARDT, M.; PEREIRA, G. M.; DOMINGUES, F. Coprocessamento de cascas de arroz e pneus inservíveis e logística reversa na fabricação de cimento. **Ambiente & Sociedade**, São Paulo, v.16, n.1, p. 141-162, jan./mar. 2013.

SILVA, D. D. da; **Remoção Biológica de Nitrogênio pela Via Curta de Lixiviado de Aterro Sanitário Operando um Reator em Bateladas Sequenciais (SBR)**. 164

p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

SINNOTT, R. K. **Chemical Engineering Design**. Coulson & Richardson's Chemical Engineering, 4th Ed., v. 6, 2005, p. 11, 25-27.

SOLER, A. D. **Processo de tratamento de percolado/percolado de aterro sanitário por pirólise de destilação fracionada, utilizando indução térmica e indução por biogás (gás metano CH_4) do próprio aterro, extraíndo lodo que retorna ao aterro, água de reuso, amônia anidra dissolvida (NH_4) e gás amônio (NH_3).** PI 0904410-8 A2. 01 de março, 2011. Disponível em: <<https://gru.inpi.gov.br>>. Acesso em: 16/09/2013.

TATSI, A.A; ZOUBOULIS, A.I; MATIS, K.A; SAMARAS, P. Coagulation – flocculation pretreatment of sanitary landfill leachates. **Chemosphere**, v. 53, p. 737–744, 2003.

ZAMBON, A. L.; BARROS FILHO, F. V. M.; NASCIMBENI, J. E. F.; BARTOLOMEI, R. **Processo para remoção de nitrogênio amoniacal de águas amoniacais e de percolado.** PI 0805158-5 A2. 31 de agosto, 2010. Disponível em: <<https://gru.inpi.gov.br>>. Acesso em: 16/09/2013.

ZANTA, V. M.; FERREIRA, C. F. A. Gerenciamento Integrado de resíduos sólidos urbanos. In: CASTILHOS, A. B. J. **Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte.** Rio de Janeiro: ABES, 2003. p. 1-16.

ZANTA, V. M.; MARINHO, M. J. M. R.; LANGE, L. C.; PESSIN, N. Resíduos sólidos, saúde e Meio Ambiente: impactos associados aos lixiviados de aterro sanitário. In: CASTILHOS, A. B.J. **Tratamento, recuperação e disposição integrados de resíduos urbanos, com ênfase na proteção de corpos d'água.** Rio de Janeiro: RiMa, ABES (PROSAB), 2006. p. 1-15.

APÊNDICES

APÊNDICE 1 – ANÁLISE ECONÔMICA SIMPLES DO SISTEMA DE EVAPORAÇÃO.....	108
--	-----

APÊNDICE 1 - ANÁLISE ECONÔMICA SIMPLES DO SISTEMA DE EVAPORAÇÃO

A descrição da operação para a concentração do percolado por evaporação está detalhada a seguir.

O Evaporador A, no arranjo adotado, (Figura 1A) recebe uma fonte de energia externa. No caso em estudo, recomenda-se aquecimento com a chama direta, sendo alimentado preferencialmente com gás gerado pelo aterro industrial estudado.

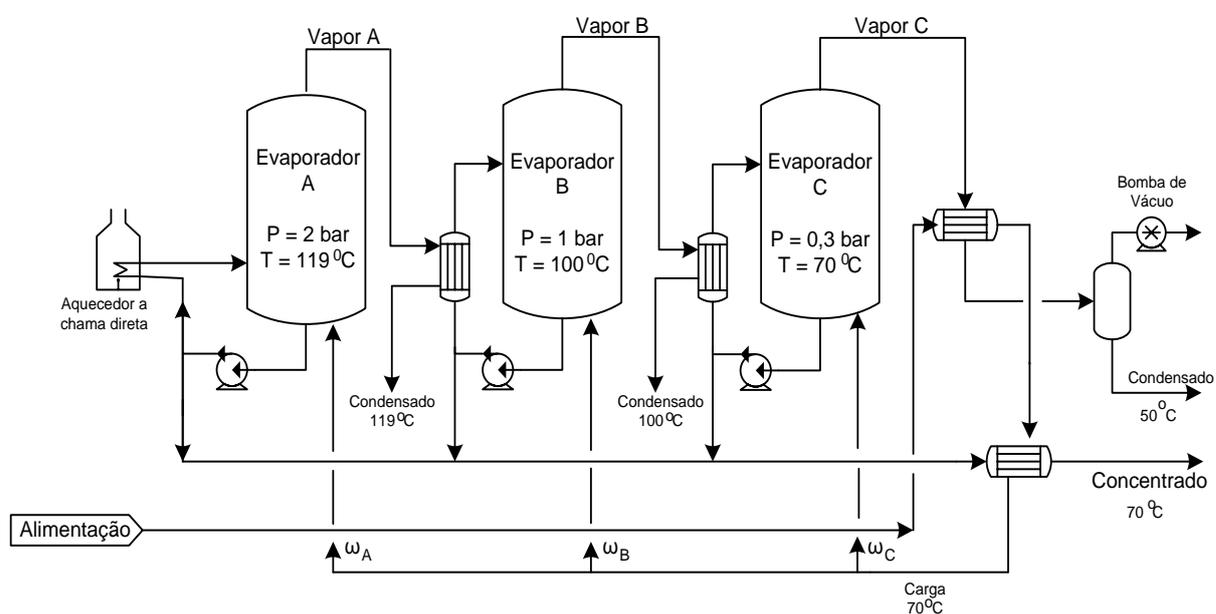


FIGURA 1A - CONJUNTO DE TRÊS EVAPORADORES OPERANDO EM SÉRIE

Optou-se para a operação deste primeiro evaporador a uma pressão de 2,00 bar absoluta, pressão esta que não modifica o projeto mecânico do evaporador, como será mostrado. Nesta pressão, a água satura a 119 °C. Para a presente avaliação, a EPE foi desprezada, porém o valor obtido experimentalmente foi de 5,5 °C e numa avaliação completa não poderá ser desprezada.

Os vapores gerados deixam o evaporador pelo topo e em lugar de se empregar água de torre de resfriamento para fazer a condensação destes vapores, os mesmos são usados para aquecer o segundo evaporador (Evaporador B). Portanto, o percolado contido no Evaporador B é responsável pelo resfriamento do condensador e condensa os vapores gerados no Evaporador A, aproveitando o calor latente de condensação para seu próprio aquecimento.

No presente estudo, optou-se por manter o Evaporador B à pressão de 1,00 bar absoluta, de modo que a saturação da água seja a 100 °C. A diferença de temperatura de 119 °C para 100 °C se faz necessária para que a troca de calor no condensador seja possível.

Do mesmo modo, os vapores gerados no Evaporador B são condensados pelo líquido contido no Evaporador C, que aproveita o calor latente na condensação.

No entanto, para viabilizar a troca de calor no segundo condensador, a temperatura de ebulição do Evaporador C deve ser inferior a 100 °C. Isso somente é possível operando-se o Evaporador C sob vácuo (Figura 1A).

Observa-se que a carga de material novo é feita no Evaporador A, sendo antes pré-aquecido no condensador que aproveita a energia do vapor que deixa o Evaporador C. Desse modo, todos os fluidos que deixam a unidade de processamento o fazem no estado líquido, com aproveitamento integral dos respectivos calores latentes de vaporização.

Adotou-se evaporadores constituídos por vasos cilíndricos, de diâmetro 2,50 m e altura 4,00 m, com volume total de 20,00 m³. O volume ocupado pelo líquido no seu interior não deverá ultrapassar 15,00 m³, deixando um espaço para separação dos vapores da fase líquida em ebulição. Adotou-se ainda uma taxa de evaporação de 2.000,00 kg.h⁻¹ no evaporador A.

BALANÇOS ENERGÉTICOS E PRODUÇÃO

Como adotado acima, o Evaporador A produz 2.000,00 kg.h⁻¹ de vapor saturado (m_A), a 119 °C. Isolando-se o Evaporador A, pode-se fazer o balanço energético nesse componente do sistema, considerando as correntes e energia trocada, como mostra a Figura 2A.

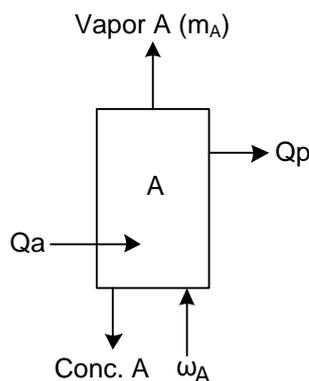


FIGURA 2A - CORRENTES E FLUXOS DE ENERGIAS TROCADAS PELO EVAPORADOR A.

Balanço energético no Evaporador A: A energia consumida para produzir a massa de vapor A em uma temperatura de 119 °C, ou seja, o calor latente de vaporização (λ) é 525,90 kcal. kg⁻¹ (Tabela 1 do ANEXO 1). Considerando o calor específico (C_p) da carga ω_A como 1,00 kcal.kg⁻¹.°C⁻¹, a energia consumida no aquecimento Q_a da carga de 70 °C a 119 °C será:

$$Q_a = m_A \cdot \lambda + \omega_A \cdot C_p \cdot \Delta T + Q_p \quad (1)$$

Considerando que 80% da massa alimentada vaporiza:

$$2.000,00 \text{ kg.h}^{-1} = 0,80 \cdot \omega_A$$

$$\text{Portanto: } \omega_A = 2.500,00 \text{ kg.h}^{-1}.$$

O calor perdido para o ambiente pelo vaso do evaporador (Q_p) pode ser estimado considerando-se um coeficiente de troca térmica entre a superfície do tanque e o ar (U) de 8,00 kcal.h⁻¹.°C⁻¹, como sugerido por Holman (1983). Considerando o ar ambiente a 20 °C e uma área do tanque (A) de 34,00 m²:

$$Q_p = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (2)$$

$$Q_p = 8,00 \text{ kcal.m}^{-2}.\text{h}^{-1}.\text{°C}^{-1} \times 34 \text{ m}^2 \times (119 \text{ °C} - 20 \text{ °C}) = 26.928,00 \text{ kcal.h}^{-1}$$

Este valor obtido de energia refere-se as perdas de calor para o ambiente, caso o vaso não tenha isolamento. Isolando-se o tanque as perdas podem ser reduzidas a apenas 20% das perdas sem isolamento (HOLMAN, 1983):

$$Q_p = 0,20 \times 27.200,00 = 5386,00 \text{ kcal.h}^{-1}.$$

Esse valor será considerado para todos os evaporadores. Com estes dados, determina-se a energia total gasta para o aquecimento do Evaporador A:

$$Q_a = 2.000,00 \text{ kg.h}^{-1} \times 525,90 \text{ kcal.kg}^{-1} + 2.500,00 \text{ kg.h}^{-1} \times 1,00 \text{ kcal.kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \times (119 \text{ °C} - 70 \text{ °C}) + 5386,00 \text{ kcal.h}^{-1}$$

$$Q_a = 1.179.686,00 \text{ kcal.h}^{-1}$$

Balanço energético no evaporador B: O mesmo princípio de cálculo pode ser empregado para o Evaporador B, considerando-se que a energia de aquecimento é o calor latente da condensação dos 2.000,00 kg.h⁻¹ de vapor, oriundos do Evaporador A. O calor latente para vaporização da água (λ_B), agora a 100 °C, será de 539,30 kcal.kg⁻¹ (Tabela 1 do ANEXO 1). Para uma massa de vapor gerada (m_B), tem-se a equação 3:

$$Q_a = m_B \cdot \lambda_B + \omega_B \cdot C_p \cdot \Delta T + Q_p \quad (3)$$

Como m_B corresponde a 80% da alimentação ω_B :

$$RR_B = 1,25 \cdot M_B \quad (4)$$

Pela equação 3 tem-se:

$$2.000,00 \text{ kg.h}^{-1} \times 525,90 \text{ kcal.kg}^{-1} = m_B \times 539,30 \text{ kcal.kg}^{-1} + \omega_B \cdot (100 \text{ °C} - 70 \text{ °C}) + 5.440,00 \text{ kcal.h}^{-1}$$

Substituindo-se a equação 4 na equação 3, obtém-se:

$$2.000,00 \text{ kg.h}^{-1} \times 525,90 \text{ kcal.kg}^{-1} = m_B \times 539,30 \text{ kcal.kg}^{-1} + 1,25 \times m_B \times (100 \text{ }^\circ\text{C} - 70 \text{ }^\circ\text{C}) + 5.440,00 \text{ kcal.h}^{-1}$$

$$\text{Assim, } m_B = 1.814,00 \text{ kg.h}^{-1} \text{ e } \omega_B = 2.267,00 \text{ kg.h}^{-1}.$$

Balanço energético no evaporador C: Por procedimento idêntico ao aplicado ao Evaporador B, considerando que o calor latente de vaporização da água (λ_c) a 70 °C é de 558 kcal.kg⁻¹.

$$Q_a = m_c \cdot \lambda_c + \omega_c \cdot C_p \cdot \Delta T + Q_p \quad (5)$$

$$\omega_B = 1,25 \cdot M_C \quad (6)$$

$$2.000,00 \text{ kg.h}^{-1} \times 525,9,00 \text{ kcal.kg}^{-1} = m_c \times 558,00 \text{ kcal.kg}^{-1} + 1,25 \times m_c \times (70 \text{ }^\circ\text{C}) + 5.440,00 \text{ kcal.h}^{-1}$$

Obtêm-se uma massa de vapor $m_c = 1.875,00 \text{ kg.h}^{-1}$ e carga $\omega_c = 2.343,00 \text{ kg.h}^{-1}$.

A massa total assim tratada será de 7.110,00 kg.h⁻¹ de percolado a ser evaporado.

CÁLCULO DO CAPITAL FIXO

O capital fixo corresponde ao total de investimento que deverá ser alocado para a construção da unidade. Os custos de aquisição dos equipamentos e sua instalação foram obtidos aplicando-se os métodos, tabelas e diagramas de custos propostos por Peters e Timmerhaus (1991). Convém salientar que os valores propostos pelos autores para a instalação dos equipamentos já considera tubulações, bombas e a instrumentação do conjunto, segundo os fatores de instalação propostos por Guthrie (1969).

- Aquecedor a chama direta: para a energia desenvolvida pelo aquecedor:

$$Q_a = 1.182.340,00 \text{ kcal.h}^{-1}$$

Conforme Peters e Timmerhaus (1991), este aquecedor tem um custo de US\$ 177.000,00 já instalado.

- Trocadores de calor de condensação: adotou-se um calor trocado de 980.000,00 kcal.h⁻¹ para cada trocador de calor, que corresponde aproximadamente ao condensador do Evaporador B.

Calor de condensação:

$$Q = m_B \cdot \lambda_B \tag{7}$$

$$Q = 1.814,00 \text{ kg.h}^{-1} \times 539,30 \text{ kcal.kg}^{-1}$$

$$\text{Portanto: } Q = 980.000,00 \text{ kcal.h}^{-1}$$

Conforme Peters e Timmerhaus (1991), o custo para um trocador de calor é de US\$ 49.060,00 já instalado. Para quatro trocadores de calor o custo total será de US\$ 196.240,00.

- Tanques dos evaporadores: segundo o método proposto por Peters e Timmerhaus (1991): Cálculo da espessura mínima da chapa metálica para paredes de tanques cilíndricos verticais: a norma ASME, Seção VIII, D1 propõe a relação abaixo para o cálculo da espessura (T_s) de metal para suportar a pressão interna ao vaso P, com o diâmetro D de tanque:

$$T_s = (P \cdot D) / (2SE - 1,2P) \tag{8}$$

P é a pressão de operação do evaporador, em Pa.

D é o diâmetro interno do evaporador, em m.

S é a máxima tensão admissível do material. Que é igual a $915,00 \cdot 10^5$ Pa, para aço carbono (ASME, Seção VIII).

E é a eficiência de solda para as chapas que compõe o vaso. E = 0,85 por recomendação da ASME.

Considerando-se que o vaso (Evaporador A) irá operar a uma pressão de 2,00 bar (P = 200.000,00 Pa) e o diâmetro interno é de D = 2,50 m, da relação acima, obtém-se uma espessura mínima de 3,20 mm de metal.

Como a ASME estabelece uma sobre espessura mínima 3,00 mm, devido à corrosão do material, obtém-se uma espessura de 6,35 mm para um tanque com as dimensões escolhidas, essa será a espessura para todos os evaporadores.

A massa de material (W) das paredes dos vasos dos evaporadores é calculada como:

$$W = \pi \cdot (D - T_s)(L + 0,8D) \cdot T_s \cdot D \quad (9)$$

Considerou-se densidade (d) do aço de 7850,00 kg.m⁻³ e vasos com altura (L) de 4,00 m. Para a espessura de chapa, resulta um vaso de massa de metal de 2.332,00 kg.

Conforme Peters e Timmerhaus (1991), o custo do vaso do evaporador é de US\$ 25.388,00, com estruturas de suporte, escadas e instalação.

Este valor refere-se ao custo no ano de 1990, desta forma, a atualização para o ano de 2013 foi feita através da relação:

$$\text{Custo atual} = \text{Custo ano } i \cdot \frac{CE \text{ ano atual}}{CE \text{ ano } i} \quad (10)$$

Em que CE, corresponde ao índice *The Chemical Engineering Plant Cost Index*, publicado mensalmente pela revista *Chemical Engineering*, na seção de índices econômicos. Os valores de CE correspondentes aos anos de 1990 e março/2013 são 358 e 568, respectivamente. Desta forma, para três vasos: US\$ 120.842,00.

Somando-se os custos calculados acima (aquecedor, trocadores de calor e vasos evaporadores), tem-se um custo total, capital fixo total, de US\$ 494.082,00.

MATERIAL TOTAL PROCESSADO

Através dos balanços de massa e energético dos evaporadores A, B e C tem-se um valor total de massa total de 7.110,00 kg.h⁻¹ de percolado a ser evaporado, sendo os cálculos apresentados a seguir:

$$(7.110,00 \text{ kg.h}^{-1}) / (1000 \text{ kg.m}^{-3}) = 7,11 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$$

$$\text{Portanto: } 7,11 \text{ m}^3.\text{h}^{-1} \times 24\text{h.dia}^{-1} \times 330 \text{ dias.ano}^{-1} = 56.311,2 \text{ m}^3.\text{ano}^{-1}$$

Considerou-se 330 dias por ano ao invés de 365 dias, devido a eventuais paradas para manutenção. Para efeitos de arredondamento de números, adotou-se 55.000 m³.ano⁻¹ de percolado a ser evaporado.

ANEXOS

ANEXO 1 – PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DA ÁGUA	117
ANEXO 2 – DETERMINAÇÃO DOS CUSTOS DOS EQUIPAMENTOS	118

ANEXO 1 – PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DA ÁGUA

TABELA 1A – PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DA ÁGUA SATURADA.

Temp. °C <i>T</i>	Pressão kPa <i>p</i>	Volume específico m ³ /kg		Energia interna kJ/kg			Entalpia kJ/kg			Entropia kJ/kg K		
		Líquido sat. <i>v_l</i>	Vapor sat. <i>v_v</i>	Líquido sat. <i>u_l</i>	Evap. <i>u_{lv}</i>	Vapor sat. <i>u_v</i>	Líquido sat. <i>h_l</i>	Evap. <i>h_{lv}</i>	Vapor sat. <i>h_v</i>	Líquido sat. <i>s_l</i>	Evap. <i>s_{lv}</i>	Vapor sat. <i>s_v</i>
0,01	0,6113	0,001000	206,132	0,00	2375,3	2375,3	0,00	2501,3	2501,3	0,0000	9,1562	9,1562
5	0,8721	0,001000	147,118	20,97	2361,3	2382,2	20,98	2489,6	2510,5	0,0761	8,9496	9,0257
10	1,2276	0,001000	106,377	41,99	2347,2	2389,2	41,99	2477,7	2519,7	0,1510	8,7498	8,9007
15	1,7051	0,001001	77,925	62,98	2333,1	2396,0	62,98	2465,9	2528,9	0,2245	9,5569	8,7813
20	2,3385	0,001002	57,790	83,94	2319,0	2402,9	83,94	2454,1	2538,1	0,2966	8,3706	8,6671
25	3,1691	0,001003	43,359	104,86	2304,9	2409,8	104,87	2442,3	2547,2	0,3673	8,1905	8,5579
30	4,2461	0,001004	32,893	125,77	2290,8	2416,6	125,77	2430,5	2556,2	0,4369	8,0164	8,4533
35	5,6280	0,001006	25,216	146,65	2276,7	2423,4	146,66	2418,6	2565,3	0,5052	7,8478	8,3530
40	7,3837	0,001008	19,523	167,53	2262,6	2430,1	167,54	2406,7	2574,3	0,5724	7,6845	8,2569
45	9,5934	0,001010	15,258	188,41	2248,4	2436,8	188,42	2394,8	2583,2	0,6386	7,5261	8,1647
50	12,350	0,001012	12,032	209,30	2234,2	2443,5	209,31	2382,7	2592,1	0,7037	7,3725	8,0762
55	15,758	0,001015	9,568	230,19	2219,9	2450,1	230,20	2370,7	2600,9	0,7679	7,2234	7,9912
60	19,941	0,001017	7,671	251,09	2205,5	2456,6	251,11	2358,5	2609,6	0,8311	7,0784	7,9095
65	25,033	0,001020	6,197	272,00	2191,1	2463,1	272,03	2346,2	2618,2	0,8934	6,9375	7,8309
70	31,188	0,001023	5,042	292,93	2176,6	2469,5	292,96	2333,8	2626,8	0,9548	6,8004	7,7552
75	38,578	0,001026	4,131	313,87	2162,0	2475,9	313,91	2321,4	2635,3	1,0154	6,6670	7,6824
80	47,390	0,001029	3,407	334,84	2147,4	2482,2	334,88	2308,8	2643,7	1,0752	6,5369	7,6121
85	57,834	0,001032	2,828	355,82	2132,6	2488,4	355,88	2296,0	2651,9	1,1342	6,4102	7,5444
90	70,139	0,001036	2,361	376,82	2117,7	2494,5	376,90	2283,2	2660,1	1,1924	6,2866	7,4790
95	84,554	0,001040	1,982	397,86	2102,7	2500,6	397,94	2270,2	2668,1	1,2500	6,1659	7,4158
MPa												
100	0,10135	0,001044	1,6729	418,91	2087,6	2506,5	419,02	2257,0	2676,0	1,3068	6,0480	7,3548
105	0,12082	0,001047	1,4194	440,00	2072,3	2512,3	440,13	2243,7	2683,8	1,3629	5,9328	7,2958
110	0,14328	0,001052	1,2102	461,12	2057,0	2518,1	461,27	2230,2	2691,5	1,4184	5,8202	7,2386
115	0,16906	0,001056	1,0366	482,28	2041,4	2523,7	482,46	2216,5	2699,0	1,4733	5,7100	7,1832
120	0,19853	0,001060	0,8919	503,48	2025,8	2529,2	503,69	2202,6	2706,3	1,5275	5,6020	7,1295
125	0,2321	0,001065	0,77059	524,72	2009,9	2534,6	524,96	2188,5	2713,5	1,5812	5,4962	7,0774
130	0,2701	0,001070	0,66850	546,00	1993,9	2539,9	546,29	2174,2	2720,5	1,6343	5,3925	7,0269
135	0,3130	0,001075	0,58217	567,34	1977,7	2545,0	567,67	2159,6	2727,3	1,6869	5,2907	6,9777
140	0,3613	0,001080	0,50885	588,72	1961,3	2550,0	589,11	2144,8	2733,9	1,7390	5,1908	6,9298
145	0,4154	0,001085	0,44632	610,16	1944,7	2554,9	610,61	2129,6	2740,3	1,7906	5,0926	6,8832
150	0,4759	0,001090	0,39278	631,66	1927,9	2559,5	632,18	2114,3	2746,4	1,8417	4,9960	6,8378
155	0,5431	0,001096	0,34676	653,23	1910,8	2564,0	653,82	2098,6	2752,4	1,8924	4,9010	6,7934

Fonte: SONNTAG, Richard E.; BORGNAKKE, Claus; VAN WYLEN, Gordon J. **Fundamentos da Termodinâmica**. 6. Ed. São Paulo: Blucher, 2003, p. 535.

ANEXO 2 – DETERMINAÇÃO DOS CUSTOS DOS EQUIPAMENTOS

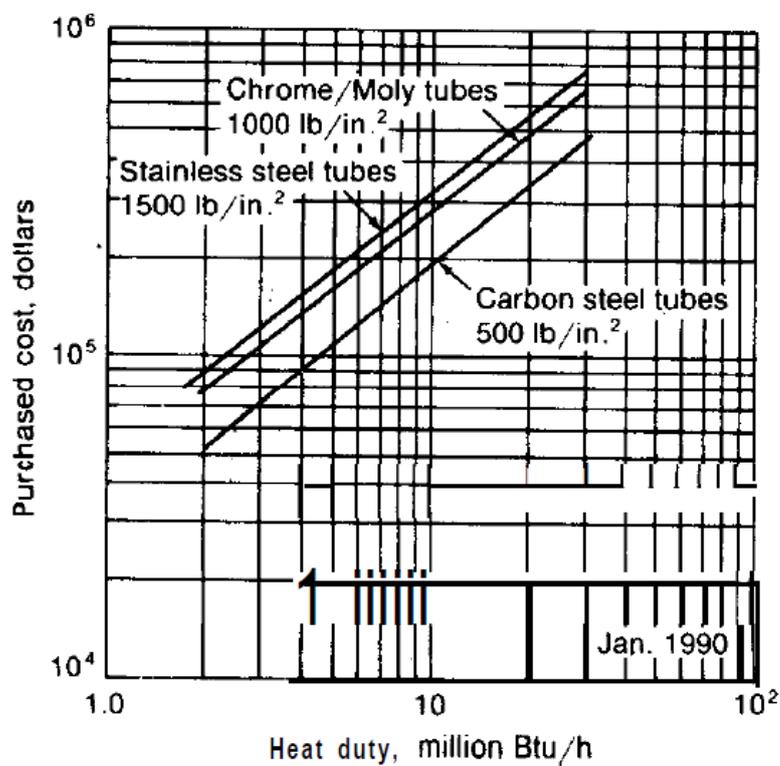


FIGURA 3A – CUSTO DE AQUECEDORES DE QUEIMA DIRETA, TIPO CILÍNDRICO COM TUBOS VERTICAIS.

FONTE: PETERS, M. S., TIMMERHAUS, K. D., **Plant Design and Economics for Chemical Engineers**, McGraw-Hill, 4^a ed., New York, 1991, p. 625 (Figura 15-31).

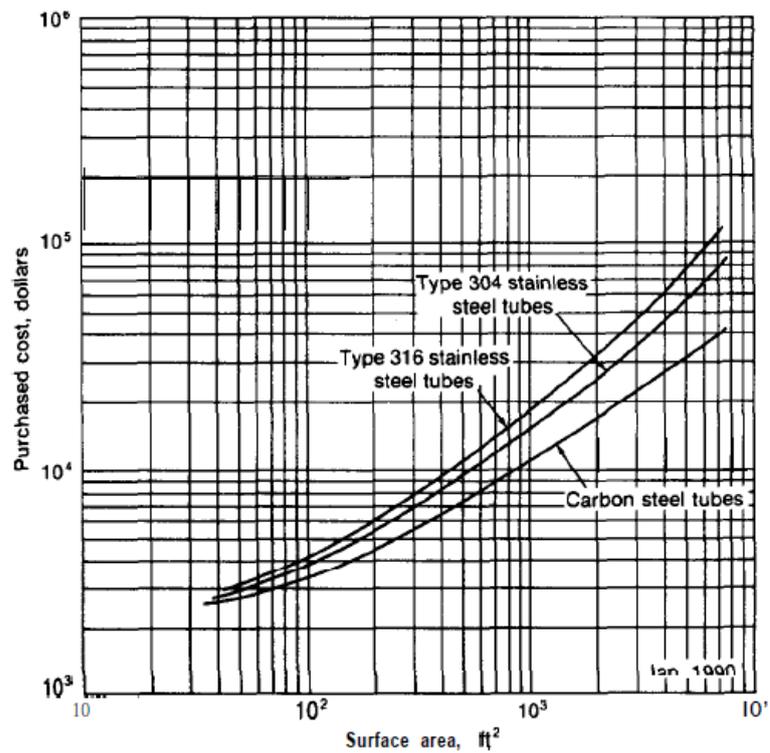


FIGURA 4A – TROCADORES DE CASCO E TUBOS FIXOS COM DIÂMETRO DE $\frac{3}{4}$ IN, ESPAÇAMENTO QUADRADO DE 1 IN, FEIXES DE 16 A 20 FT, CASCO EM AÇO CARBONO E OPERANDO A 150 PSI.

FONTE: PETERS, M. S., TIMMERHAUS, K. D., **Plant Design and Economics for Chemical Engineers**, McGraw-Hill, 4^a ed., New York, 1991, p. 617 (Figura 15-15).

TABELA 2A - REGRAS PRÁTICAS PARA USO EM ESTIMATIVAS PRELIMINARES DE CUSTOS PARA VASOS DE PRESSÃO.

Costs for vessel (January, 1990—Including nozzles, manholes, and saddle or skirt but no special internals such as trays or agitators) as dollars per pound of weight of fabricated unit f.o.b. with carbon steel as the cost basis = $80(W_v)^{-0.34}$ where W_v is the total weight in pounds (applicable in W_v range of 800 lb to 100,000 lb).

To account for the extra weight due to nozzles, manholes, and skirts or saddles, increase the weight calculated for the smooth vessel including top and bottom by 1.5% for vessels to be installed in a horizontal position and by 20% for vessels to be installed in a vertical position.

Steel density can be taken as 489 lb/ft³ or 0.283 lb/in³.

Cost factors to convert from carbon steel as the material of construction for the fabricated unit follow:

Shell-material cost factors		(basis)
Stainless steel 304		1.0 to 3.5
Stainless steel 316		2.3 to 4.3
Monel		4.5 to 9.8
Titanium		4.9 to 10.6

Cost factors to convert from an internal pressure of up to 50 psig for carbon steel at temperatures below 800°F†

Pressure	Pressure factor	Pressure	Pressure factor
up to 50 psig	1.0 (basis)	800 psig	3.8
100	1.3	900	4.0
200	1.6	1000	4.2
300	2.0	1500	5.4
400	2.4	2000	6.5
500	2.8	3000	8.8
600	3.0	4000	11.3
700	3.3	5000	13.8

In general, the minimum wall thickness, not including allowances for corrosion, for any plate subject to pressure should not be less than $\frac{3}{32}$ in. for welded or brazed construction and not be less than $\frac{3}{16}$ in. for riveted construction except that the thickness of walls for unfired steam boilers should not be less than $\frac{1}{4}$ in.

A corrosion allowance of 0.010 to 0.015 in./yr, or about $\frac{1}{8}$ in. for a 10-year life is a reasonable value.

For high-pressure vessels, hemispherical heads are usually the most economical.

Lang factors to convert from the base cost of the delivered vessel (costed as if it were of carbon-steel material of construction so that weight becomes the primary measure of installation cost) to the cost of the vessel installed with all necessary auxiliaries except special internals such as trays or agitators are 3.0 for vessels installed in a horizontal position and 4.0 for vessels installed in a vertical position.

†If the data are available, it is much better to use the design equations presented in Table 4 of this chapter to obtain necessary wall thickness based on the stress value at the operating temperature in place of using the given pressure factors since there is a critical interrelationship among material of construction, operating pressure, and operating temperature in establishing the design and cost of pressure vessels.

FONTE: PETERS, M. S., TIMMERHAUS, K. D., **Plant Design and Economics for Chemical Engineers**, McGraw-Hill, 4^a ed., New York, 1991, p. 542 (Tabela 6).