

**SUHER CAROLINA YABROUDI BAYRAM**

**REMOÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA E NITROGÊNIO DE  
LIXIVIADOS DE ATERRO SANITÁRIO. TRATAMENTO POR  
NITRITAÇÃO/DESNITRITAÇÃO BIOLÓGICA E PROCESSOS  
FÍSICO-QUÍMICOS**

São Paulo  
2012

**SUHER CAROLINA YABROUDI BAYRAM**

**REMOÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA E NITROGÊNIO DE  
LIXIVIADOS DE ATERRO SANITÁRIO. TRATAMENTO POR  
NITRITAÇÃO/DESNITRITAÇÃO BIOLÓGICA E PROCESSOS  
FÍSICO-QUÍMICOS**

Tese apresentada à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para obtenção do  
título de Doutor em Engenharia.

Área de concentração:  
Engenharia Hidráulica e Sanitária

Orientador:  
Pedro Alem Sobrinho

São Paulo  
2012

**Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.**

**São Paulo,     de março de 2013.**

**Assinatura do autor** \_\_\_\_\_

**Assinatura do orientador** \_\_\_\_\_

**Yabroudi Bayram, Suher Carolina**

**Remoção de matéria orgânica e nitrogênio de lixiviados de aterro sanitário: tratamento por nitrificação/desnitrificação biológica e processos físico-químicos / S.C. Yabroudi Bayram. -- versão corr. -- São Paulo, 2012.**

**192 p.**

**Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental.**

**1. Nitrogênio 2. Nitrificação 3. Resíduos sólidos I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental II. t.**

*À memória de meu querido pai, Jamal Yabroudi, seu exemplo de vida, valores, princípios e amor incondicional à sua família serão hoje e sempre meu maior tesouro.*

*À minha mãe Fadwa de Yabroudi, por seu apoio e palavras de carinho nos momentos mais difíceis.*

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Pedro Alem Sobrinho pela orientação, conselhos e paciência nos momentos cruciais deste trabalho. Obrigada por ter confiado na minha capacidade, embora muitas vezes não tenha atendido suas expectativas.

À Prof<sup>a</sup>. Dra. Dione Mari Morita, quem além de ter me orientado e compartilhado longas horas de trabalho, contribuindo com seus valiosos conhecimentos a esta pesquisa, me brindou com sua amizade e palavras de conforto nos momentos mais difíceis. Sem seu apoio constante, teria sido impossível concluir o trabalho.

Ao Prof. Dr. Roque Passos Piveli, pelas sugestões, apoio, carinho e amizade.

Ao Prof. Dr. Sidney Seckler Ferreira Filho, pela ajuda nos momentos precisos.

Aos funcionários do Laboratório de Saneamento Prof. Lucas Nogueira Garcez: Fábio, Campos e Laerte Carvalho, pela grande ajuda e apoio nas análises e, principalmente, pela amizade que permanece.

Aos Professores da Universidade de Zulia (Maracaibo - Venezuela), Carmen Cárdenas, Zullay Mármol, Ismenia Araujo, Luis Vargas, Antonio De Turrís, Caterina Aiello e Virginia Pacheco, pela paciência e apoio nesta etapa da minha vida.

Aos colegas de pós-graduação e amigos Alan, Luciano, Mailer, Humberto, Gilberto, Rodrigo Weverton e Márcia, pelo apoio, carinho e momentos de alegria e convivência prazerosa dentro e fora do laboratório.

À Mari Nishimura e Marli Meireles, pela amizade, conselhos, sugestões e por ter me feito sentir como outro membro das suas famílias.

Aos funcionários da estação de recepção de efluentes Piqueri da SABESP, pela ajuda na coleta das amostras de lixiviado.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da EPUSP, Ângela Mizuta; Wândrea Dantas; Odorico Borges e Ricardo Souza, pelo ajuda, orientações e carinho dispensado.

Yabroudi, S.C. **Remoção de matéria orgânica e nitrogênio de lixiviados de aterro sanitário. Tratamento por nitrificação/desnitrificação biológica e processos físico-químicos.** 192 p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012.

## RESUMO

A presente pesquisa objetivou estudar a remoção de matéria orgânica e nitrogênio de lixiviados de aterro sanitário, através do processo biológico de nitrificação/desnitrificação, operando um reator de lodos ativados em bateladas sequenciais e pós-tratamento físico químico. O trabalho foi dividido em cinco etapas. Durante a primeira, buscou-se ajustar a duração das etapas anóxica e aerada e as condições operacionais, assim como avaliar a utilização da matéria orgânica presente no lixiviado como fonte de carbono. Ao longo de 16 ciclos de tratamento, os resultados da etapa anóxica indicaram que a duração desta não deveria ser maior que uma hora. A desnitrificação ficou limitada ao baixo conteúdo de matéria orgânica de fácil biodegradação no lixiviado, o que levou a baixas taxas, entre 0,010 e 0,142 kg.N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>/ m<sup>3</sup>.dia. Na segunda etapa, foi ajustada a duração da reação anóxica em uma hora, registrando taxa de desnitrificação volumétrica média de 1,704 kg.N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>/ m<sup>3</sup>.dia, assim como remoção de 80% da DBO e 47% de COT, o que indica que a maior parte da matéria orgânica biodegradável foi empregada pelos micro-organismos heterotróficos na desnitrificação. Ao final da fase aeróbia, ao longo da primeira e segunda etapa, mantendo uma concentração de oxigênio dissolvido na massa de líquido do reator de 2,0 mg.O<sub>2</sub>/L, foi possível alcançar eficiências de remoção de N-NH<sub>3</sub> de 98% com predominância do N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, evidenciado pela relação N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>/(N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup> + N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) próximo de 1. As taxas volumétricas de nitrificação variaram na faixa de 0,095 e 0,199 kg.N-NH<sub>3</sub>/m<sup>3</sup>.dia. Como o sobrenadante do reator principal apresentava concentrações elevadas de N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup> ao final da fase aeróbia, o efluente foi aplicado em um reator de polimento adicionou-se etanol como fonte de carbono. O tratamento complementar ocorreu sem desequilíbrios, apesar do prolongado tempo de reação anóxica requerido para reduzir toda a massa de nitrito introduzida no sistema, fato que levou a registrar baixas taxas de desnitrificação, entre 0,221 e 0,052 kg N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>/kg SSV.dia. Durante a quarta etapa, foi avaliado em um segundo reator de lodo ativado em bateladas sequenciais o processo de nitrificação/desnitrificação, adicionando dentro do reator, ao início da fase anóxica, o etanol para a redução biológica de todo o nitrogênio oxidado a nitrogênio gasoso. Com concentrações de OD no conteúdo do reator de 2,0 mg.O<sub>2</sub>/L e valores de pH de 8,27±0,27, a relação N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>/(N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup> + N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) não foi superior a 70% nos 9 ciclos estudados, indicando a presença de nitrato. A hipótese que melhor explica a situação refere-se à possibilidade de que a biomassa esteja se adaptando as novas condições operacionais e a probabilidade de que a adição do etanol durante a reação anóxica possa estar criando condições que favorecem a atividade das bactérias oxidantes de nitrito, assim como os menores diâmetros de floco. A quinta etapa compreendeu a aplicação de um pós-tratamento com redução do pH, adição de sais de ferro e carvão ativado em pó (CAP). Nestes testes, foram registradas remoções de COT e cor de de 93% e 98% respectivamente, mantendo pH em 3,0 e dosagens de 300 mg.Fe<sup>+3</sup>/L e 15 g.CAP/L.

**Palavras-chaves:** Lixiviado. Nitrito, Nitrificação. Desnitrificação. Etanol.

Yabroudi, S.C. **Removal of organic matter and nitrogen from landfill leachate. Treatment by nitrification/denitrification biological and physico-chemical processes.** 192 p. Thesis. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012.

## ABSTRACT

This research aimed to study the removal of organic matter and nitrogen from landfill leachate through biological process of nitrification/denitrification, operating an activated sludge reactor in sequential batches, and physical- chemical post treatment. The work was divided into five stages. During the first stage, was tried to adjust the duration of the anoxic and aerated stages and operational conditions, and evaluate the use of organic matter present in the leachate as a carbon source. Over 16 cycles of treatment, the results of the anoxic stage indicated that this duration should not be greater than one hour. The denitrification was limited by the low organic matter rapidly biodegradable content into the leachate, which led to low rates between 0.010 and 0.142 kg.N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>/ m<sup>3</sup>.day. During the second stage, was adjusted the duration of the anoxic reaction to one hour, and showed medium volumetric denitrification rate of 1.704 kg.N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>/m<sup>3</sup>.day, as well as removal of 80% of BOD and 47% of TOC. These results indicate, most of the biodegradable organic matter was used for heterotrophic microorganisms for denitrification. At the end of aerobic phase, during the first and second stage, and maintaining a concentration of oxygen dissolved into the liquid mass of the reactor in 2.0 mg.O<sub>2</sub>/L, it was possible to achieve removal efficiencies of NH<sub>3</sub>-N to 98% with predominance of N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, that was evidenced by the ratio N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>/(N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup> + N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) close to 1. The volumetric nitrification rates varied from 0,095 to 0,199 kg.N-NH<sub>3</sub>/m<sup>3</sup>.day. The effluent from the principal reactor contained high concentrations of N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup> at the end of the aerobic phase, for that reason it was applied a polishing stage where was added ethanol as a carbon source. Complementary treatment transpired without problems, just was required a prolonged anoxic reaction to reduce the entire mass of nitrite introduced into the system, fact that lead to register low rates of denitrification, between 0.221 and 0.052 kg N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>/kg SSV.day. During the fourth stage, was evaluated in a second activated sludge sequential batch reactor; the nitrification/denitrification process added ethanol inside the reactor, at the beginning of the anoxic phase, for the biological reduction from nitrogen oxidized to nitrogen gaseous. Maintained OD concentrations into the reactor of 2,0 mg.O<sub>2</sub>/L and pH values of 8.27± 0.27, the N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>/(N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup> + N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) ratio was not higher than 70% during the 9 cycles studied, indicating the presence of nitrate. The best hypothesis which explains this situation, related to the possibility of the biomass was adapted to the new operating conditions, and the possibility to addition ethanol at the beginning of anoxic reaction, may be created adequate conditions for oxidizer nitrite bacteria, as well as the small floc diameters. The fifth stage consisted to apply a physical-chemical post-treatment with pH and addition of iron salts and powdered activated carbon (PAC). During these tests, was removal 93% and 98% of TOC and color respectively, with pH to 3,0 and doses of 300 mg.Fe<sup>+3</sup>/L and 15 g.PAC/L.

**Keywords:** Landfill leachate. Nitrite. Nitrification. Denitrification. Ethanol.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 3.1</b>	Fases de estabilização dos resíduos sólidos urbanos	13
<b>Figura 3.2</b>	Classificação dos diferentes tipos de isoterma de adsorção	30
<b>Figura 3.3</b>	Isotermas de adsorção mais comuns encontradas a partir de soluções aquosas em materiais carbonosos	31
<b>Figura 3.4</b>	Consumo de oxigênio e carbono no processo de nitrificação/desnitrificação convencional e via nitrito	63
<b>Figura 3.5</b>	Diferentes estados de oxi-redução do nitrogênio no processo de nitrificação/desnitrificação	67
<b>Figura 3.6</b>	Possível caminho metabólico para a nitrificação e desnitrificação	69
<b>Figura 3.7.</b>	Curvas das velocidades máximas específicas de crescimento em função da temperatura para <i>Nitrossomonas</i> sp e <i>Nitrobacter</i> sp	71
<b>Figura 4.1</b>	Vista geral do Aterro Sanitário São João	75
<b>Figura 4.2</b>	Vista superior do reator biológico R-1 durante a etapa aeróbia de um dos ciclos de tratamento	77
<b>Figura 4.3</b>	Componentes do reator biológico R-2 (a) reator de chapa de aço inoxidável; (b) agitador mecânico; (c) compressor de ar	78
<b>Figura 4.4</b>	Equipamento jar-test empregado no pós-tratamento físico-químico do efluente gerado nos reatores biológicos	79
<b>Figura 4.5</b>	Seqüência cronológica dos ciclos de tratamento	80
<b>Figura 4.6</b>	Esquema dos pontos, frequência de amostragem e variáveis físico-químicas monitoradas (Primeira Etapa-Fase I)	81
<b>Figura 4.7</b>	Esquema dos pontos, frequência de amostragem e variáveis físico-químicas monitoradas (Primeira Etapa-Fase II)	82
<b>Figura 4.8</b>	Esquema dos pontos, frequência de amostragem e variáveis físico-químicas monitoradas durante a Segunda Etapa da pesquisa	85
<b>Figura 4.9</b>	Pontos de amostragem e variáveis físico-químicas monitoradas durante a Terceira Etapa da pesquisa (Reator de Polimento)	88



<b>Figura 4.10</b>	Pontos de amostragem e variáveis físico-químicas monitoradas durante a Quarta Etapa da pesquisa (Reator R-2)	91
<b>Figura 5.1</b>	Box Plot: Variação das concentrações médias das formas de nitrogênio ao longo da reação anóxica (a) NKT (b) N-NH <sub>3</sub> (c) N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (Primeira Etapa-Fase I)	103
<b>Figura 5.2</b>	Box Plot: Variação das concentrações médias das formas de nitrogênio ao longo da reação anóxica (a) NKT (b) N-NH <sub>3</sub> (Primeira Etapa - Fase II)	104
<b>Figura 5.3</b>	Box Plot: Variação das concentrações médias de N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ao longo da reação anóxica (Segunda Etapa)	106
<b>Figura 5.4</b>	Variação das concentrações médias de COT ao longo da reação anóxica (Segunda Etapa)	108
<b>Figura 5.5</b>	Concentrações médias das taxas de desnitrificação (a) específicas (b) volumétricas (Segunda Etapa)	110
<b>Figura 5.6</b>	Box Plot: Variação das concentrações médias das formas de nitrogênio ao longo da reação anóxica e aerada (a) NKT (b) N-NH <sub>3</sub> (c) N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (Primeira Etapa - Fase I)	113
<b>Figura 5.7</b>	Box Plot: Variação das concentrações médias das formas de nitrogênio ao longo da reação anóxica e aerada (a) NKT (b) N-NH <sub>3</sub> (c) N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (Primeira Etapa - Fase II)	114
<b>Figura 5.8</b>	Box Plot: Variação das concentrações médias de nitrito ao longo da reação anóxica e aerada (Segunda Etapa)	117
<b>Figura 5.9</b>	Quantificação de bactérias nitrificantes ao longo da Segunda Etapa	119
<b>Figura 5.10</b>	Variação das concentrações de matéria orgânica ao longo da etapa aerada dos ciclos de tratamento da Segunda Etapa	120
<b>Figura 5.11</b>	Concentrações médias de COT ao longo da fase aerada da Segunda Etapa	121
<b>Figura 5.12</b>	Comparação da DQO (mg/L) ao final das fases anóxica e aerada dos ciclos de tratamento durante a Primeira Etapa da pesquisa	122
<b>Figura 5.13</b>	Comparação da DQO (mg/L) ao final das fases anóxica e aerada dos ciclos de tratamento durante a Segunda Etapa da pesquisa	123
<b>Figura 5.14</b>	Comparação das taxas de desnitrificação (específicas e volumétricas) e a idade de lodo ao longo da etapa anóxica dos ciclos de tratamento (Reator de Polimento)	125

<b>Figura 5.15</b>	Variação da concentração de COT ao longo da etapa anóxica e aerada dos ciclos de tratamento no Reator de Polimento (Terceira Etapa)	126
<b>Figura 5.16</b>	Box Plot: Concentrações médias de NKT durante a fase aerada da Quarta Etapa	128
<b>Figura 5.17</b>	Box Plot: Concentrações médias de N-NH <sub>3</sub> durante a fase aerada da Quarta Etapa	129
<b>Figura 5.18</b>	Box Plot: Concentrações médias de N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> durante a fase aerada e anóxica da Quarta Etapa	129
<b>Figura 5.19</b>	Comparação das concentrações das formas oxidadas de nitrogênio ao longo dos ciclos de tratamento da fase aerada (Quarta Etapa)	132
<b>Figura 5.20</b>	Quantificação de bactérias nitrificantes ao longo dos ciclos de tratamento da fase aerada (Quarta Etapa)	132
<b>Figura 5.21</b>	Box Plot: Concentração de COT durante a fase aeróbia e anóxica da Quarta Etapa	134
<b>Figura 5.22</b>	Comparação das taxas de desnitrificação específica e volumétrica ao final da reação anóxica com a idade de lodo do sistema (Quarta Etapa)	135

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 3.1</b>	Classificação dos resíduos sólidos	6
<b>Tabela 3.2</b>	Componentes discriminados na composição gravimétrica típica de resíduos de origem domiciliar e comercial	7
<b>Tabela 3.3</b>	Destino final dos resíduos sólidos, por unidades de destino dos resíduos no Brasil (1989-2008)	8
<b>Tabela 3.4</b>	Composição do lixiviado de aterros sanitários (valores em faixa)	15
<b>Tabela 3.5</b>	Concentração de nitrogênio amoniacal e matéria orgânica em lixiviados	16
<b>Tabela 3.6</b>	Concentrações dos compostos orgânicos xenobióticos encontrados com maior frequência em lixiviados de aterros sanitários	17
<b>Tabela 3.7</b>	Classificações dos lixiviados relacionados à idade do aterro	18
<b>Tabela 3.8</b>	Evolução das variáveis em função da fase de decomposição dos resíduos depositados nas células de aterros sanitários	19
<b>Tabela 3.9</b>	Tratamento de lixiviados através do processo de coagulação - floculação	22
<b>Tabela 3.10</b>	Tratamento de lixiviados de aterro sanitário aplicando precipitação química	25
<b>Tabela 3.11</b>	Tratamento de lixiviados de aterro sanitário aplicando arraste com ar	27
<b>Tabela 3.12</b>	Tratamento de lixiviados de aterro sanitário aplicando processos de adsorção	29
<b>Tabela 3.13</b>	Sistemas mais explorados para a produção de radical hidroxila	34
<b>Tabela 3.14</b>	Aplicação de processos oxidativos avançados no tratamento de lixiviados de aterro sanitário	36
<b>Tabela 3.15</b>	Tratamento de lixiviados de aterro sanitário por processos de separação por membranas	41
<b>Tabela 3.16</b>	Eficiência dos processos de tratamento físicos e físico-químicos em função da idade do lixiviados de aterro sanitário	44
<b>Tabela 3.17</b>	Recirculação do lixiviados as células do aterro sanitário	47
<b>Tabela 3.18</b>	Tratamento combinado de lixiviado de aterro sanitário e esgoto doméstico	49

<b>Tabela 3.19</b>	Lodos ativados no tratamento de lixiviados de aterro sanitário	54
<b>Tabela 3.20</b>	Lagoas aeradas no tratamento de lixiviados de aterro sanitário	56
<b>Tabela 3.21</b>	Filtros percoladores no tratamento de lixiviados de aterro sanitário	57
<b>Tabela 3.22</b>	Tratamento de lixiviados de aterro sanitário por processos anaeróbios	59
<b>Tabela 3.23</b>	Trabalhos visando à remoção de N-NH <sub>3</sub> pelo processo de nitrificação de águas residuais	63
<b>Tabela 3.24</b>	Padrões de qualidade máximos admissíveis das formas de nitrogênio para cursos de água	73
<b>Tabela 4.1</b>	Caracterização do lixiviado produzido no Aterro Sanitário São João	76
<b>Tabela 4.2</b>	Condições Operacionais - Primeira Etapa da pesquisa	83
<b>Tabela 4.3</b>	Condições Operacionais - Segunda Etapa da pesquisa	86
<b>Tabela 4.4</b>	Condições Operacionais - Terceira Etapa da pesquisa (Reator de Polimento)	89
<b>Tabela 4.5</b>	Condições Operacionais – Quarta Etapa da pesquisa (Reator R-2)	92
<b>Tabela 4.6</b>	Condições Operacionais aplicadas no pós-tratamento físico-químico do efluente do reator biológico – Variação da dosagem de sal de ferro e do pH (Fase I)	94
<b>Tabela 4.7</b>	Condições Operacionais aplicadas no pós-tratamento físico-químico do efluente do reator biológico – Adição de CAP (Fase II)	94
<b>Tabela 4.8</b>	Condições Operac. aplicadas no estudo da cinética de adsorção do CAP	95
<b>Tabela 4.9</b>	Relação das variáveis e métodos utilizados	97
<b>Tabela 5.1.</b>	Concentração de metais no lixiviado empregado na pesquisa	102
<b>Tabela 5.2.</b>	Resultados da Fase Anóxica dos ciclos de remoção – Primeira Etapa	107
<b>Tabela 5.3.</b>	Resultado da Fase Anóxica dos ciclos de remoção – Segunda Etapa	111
<b>Tabela 5.4.</b>	Resultado da Fase Aeróbia dos ciclos de remoção – Primeira Etapa	115
<b>Tabela 5.5.</b>	Resultado da Fase Aeróbia dos ciclos de remoção - Segunda Etapa	118
<b>Tabela 5.6.</b>	Concentração da DQO (mg/L) nas diferentes etapas do tratamento	122
<b>Tabela 5.7.</b>	Resultados dos ciclos de remoção no Reator de Polimento - Terceira Etapa	127

<b>Tabela 5.8.</b>	Resultado da Fase Aeróbia dos ciclos de remoção - Quarta Etapa	130
<b>Tabela 5.9.</b>	Resultado da Fase Anóxica dos ciclos de remoção - Quarta Etapa	136
<b>Tabela 5.10.</b>	Concentração de metais no sobrenadante dos Reatores R-1 e R-2 após a finalização do processo de tratamento biológico	137
<b>Tabela 5.11.</b>	Concentração de metais no lodo de alíquotas retiradas dos Reatores R-1 e R-2	138
<b>Tabela 5.12.</b>	Resultados do pós-tratamento físico-químico do efluente do reator biológico - Variação da dosagem de sal de ferro, pH e do gradiente médio de velocidade (Fase I - Quinta Etapa)	140
<b>Tabela 5.13.</b>	Resultados do pós-tratamento físico-químico do efluente do reator biológico – Adição de CAP (Fase II)	141
<b>Tabela 5.14.</b>	Resultados do estudo da cinética de adsorção do CAP	142
<b>Tabela 5.15.</b>	Resultados dos testes de toxicidade aguda	142

## INDICE

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	1
<b>2. OBJETIVOS</b>	4
2.1. Objetivo Geral	4
2.2. Objetivos Específicos	4
<b>3. REVISÃO DA LITERATURA</b>	5
3.1. Resíduos sólidos urbanos (RSU)	5
3.2. Aterro Sanitário	8
3.3. Processo de degradação de RSU e geração de lixiviados em aterros sanitários	10
3.4. Lixiviado de aterro sanitário	13
3.4.1. Composição do lixiviado formado em aterro sanitário	14
3.4.2. Classificação do lixiviado de Aterro Sanitário	18
3.5. Tratamento de lixiviado de aterro sanitário	20
3.5.1. Sistemas de tratamento fundamentados em métodos físicos e físico-químicos	20
3.5.1.1. Coagulação/Floculação/Sedimentação	21
3.5.1.2. Precipitação química	23
3.5.1.3. Arraste com ar (stripping)	25
3.5.1.4. Adsorção	28
3.5.1.5. Oxidação química	33
3.5.1.6. Tratamento Eletroquímico	38
3.5.1.7. Membranas	38
3.5.1.9. Evaporação	42
3.5.2. Sistemas de tratamento fundamentados em processos biológicos	45
3.5.2.1. Recirculação do lixiviado no aterro sanitário	45
3.5.2.2. Tratamento combinado com esgoto	47
3.5.2.3. Lagoas de estabilização	52
3.5.2.4. Processos biológicos aeróbios convencionais	52
3.5.2.4.1. Lodos ativados	53
3.5.2.4.2. Lagoas aeradas	54

3.5.2.4.3. Filtros percoladores	56
3.5.2.4.4. Biodiscos	57
3.5.2.5. Processos biológicos anaeróbios	58
3.5.2.6. Tratamento biológico de lixiviado por processo de Nitritação/Desnitritação	61
3.6. Legislação pertinente aos lixiviados	72
<b>4. MATERIAL E METODOS</b>	<b>74</b>
4.1. Descrição geral da pesquisa	74
4.1.1. Caracterização do lixiviado de aterro sanitário utilizado durante a pesquisa	75
4.1.2. Inoculo e partida do sistema	77
4.1.3. Instalações experimentais e procedimentos de rotina	77
4.2. Operação e condução da pesquisa	79
4.2.1. Primeira Etapa: Estudos Preliminares e ajuste das condições operacionais no Reator R-1	79
4.2.2. Segunda Etapa: Estudo da eficiência do processo de nitritação/desnitritação	84
4.2.3. Terceira Etapa: Reator de Polimento	87
4.2.4. Quarta Etapa: Estudo do processo de nitritação/desnitritação empregando uma fonte externa de carbono (etanol)	90
4.2.5. Quinta Etapa: Pós-tratamento físico-químico	93
4.3. Parâmetros físico-químicos e microbiológicos	96
<b>5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b>	<b>99</b>
5.1. Caracterização do lixiviado empregado na pesquisa	99
5.2. Estudo da eficiência do processo de nitritação/desnitritação no Reator R-1. Primeira e Segunda Etapa	102
5.2.1. Desnitritação biológica aplicando a matéria orgânica do lixiviado como fonte de carbono	102
5.2.2. Estudo do Processo Nitritação: Condições para o acúmulo de nitrito. Primeira e Segunda Etapa.	112
5.3. Terceira Etapa: Tratamento complementar adicionando etanol como fonte de carbono para a desnitritação – Reator de Polimento	124

5.4.	Quarta Etapa: Estudo do processo de nitrificação/desnitrificação empregando etanol como fonte externa de carbono	128
5.5.	Quinta Etapa: Pós-tratamento físico-químico	138
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	143
<b>7.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	145
<b>8.</b>	<b>APENDICE</b>	175