

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CAMPUS LONDRINA  
ENGENHARIA AMBIENTAL**

**EDGAR AUGUSTO ALIBERTI**

**TRATAMENTO DE EFLUENTE DE LATICÍNIOS EM REATOR DE  
LEITO ESTRUTURADO SUBMETIDO A DIFERENTES  
CONDIÇÕES OPERACIONAIS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**LONDRINA  
2017**

EDGAR AUGUSTO ALIBERTI

**TRATAMENTO DE EFLUENTE DE LATICÍNIOS EM REATOR DE  
LEITO ESTRUTURADO SUBMETIDO A DIFERENTES  
CONDIÇÕES OPERACIONAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentada como requisito parcial à  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Ambiental da  
Universidade Tecnológica Federal  
do Paraná, Câmpus Londrina.

Orientadora: Prof. Dra. Kátia Valéria  
Marques Cardoso Prates

Coorientadora: Prof. Msc. Camila  
Zoe Correa

**LONDRINA  
2017**



**Ministério da Educação**  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Campus Londrina  
Coordenação de Engenharia Ambiental



## TERMO DE APROVAÇÃO

### Título da Monografia

Tratamento de efluente de laticínios em reator de leito estruturado  
submetido a diferentes condições operacionais

por

Edgar Augusto Aliberti

Monografia apresentada no dia 08 de dezembro de 2017 ao Curso Superior de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho (aprovado, aprovado com restrições ou reprovado).

---

Prof. Dr. Ajadir Fazolo  
(UTFPR)

---

Prof. Dr. Janksyn Bertozzi  
(UTFPR)

---

Profa. Dra. Kátia Valéria Marques Cardoso Prates  
(UTFPR)  
Orientadora

---

Profa. Dra. Edilaine Regina Pereira  
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Ambiental

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me proporcionado forças, fé e perseverança durante todo o curso.

A minha família por todo auxílio, apoio e puxões de orelha quando necessário, para continuar me esforçando.

A professora Dr<sup>a</sup>. Kátia Prates, minha mãe científica, que me deu a oportunidade de trabalhar sob sua orientação, pela paciência e por todo ensinamento repassado a mim.

Também a minha coorientadora Msc<sup>a</sup> Camila Correa, por todas as contribuições, puxões de orelha que me fizeram amadurecer e buscar cada vez mais conhecimento.

Aos meus amigos de laboratório Eduardo Rodrigues, Jaqueline Santos, Victória Macieirinha e Bianca Zamberlan, que tive a oportunidade de trabalhar junto, por todas as conversas, e ajudas, principalmente me aturaram durante esse tempo.

E a todos que de alguma forma estiveram presentes durante a realização deste trabalho e durante a graduação.

## RESUMO

ALIBERTI, Edgar Augusto. **Tratamento de efluente de laticínios em reator de leito estruturado submetido a diferentes condições operacionais**. 2017. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2017.

O despejo de efluentes de laticínios rico em matéria orgânica e nitrogenada em corpos d'água pode resultar em impactos ambientais, portanto se faz necessário o tratamento dessas águas residuárias. Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de um reator de leito estruturado e fluxo contínuo, quanto à remoção de matéria orgânica e nitrogênio, operado sob aeração contínua e intermitente. O reator utilizado no experimento possuía volume útil de 2,125 L. Como material suporte foi utilizado espuma de poliuretano com um diâmetro de 1,5 cm e comprimento de 48 cm, sendo fixadas por hastes metálicas. O sistema foi operado durante todo o experimento com um tempo de detenção hidráulico de 16h e alimentado com efluente da indústria de laticínios, no qual foram estudadas duas fases de operação: a fase I sendo com aeração contínua e a fase II sob aeração intermitente. Na fase de aeração contínua o sistema era operado 24h com aeração, na fase de aeração intermitente foi trabalhado um ciclo com 2 horas de aeração para 1 hora sem aeração durante 24h. As análises realizadas foram de pH, alcalinidade total, temperatura, Demanda Química de Oxigênio (DQO), Nitrogênio Kjeldahl Total (NKT), N-amoniaco –  $N-NH_4^+$ , nitrito-  $N-NO_2^-$  e nitrato-  $N-NO_3^-$ . Na Fase I houve um percentual de remoção de matéria orgânica, NKT e NT de  $93\pm 0,03$   $79\pm 16\%$  e  $61\pm 9\%$ , respectivamente. Já na Fase II quando obteve-se  $87\pm 0,03\%$  de remoção matéria orgânica,  $86\pm 10\%$  de NKT e  $76\pm 15\%$  de remoção de NT. Verificou-se também que a eficiência de desnitrificação nas duas fases foi acima de 77%, sendo um indicativo que ocorreu a nitrificação e desnitrificação simultânea. Dos resultados conclui-se que em termos de remoção de nitrogênio e matéria orgânica o sistema foi eficiente, porém a operação em condições de aeração intermitente gera uma economia para remoção dessas cargas poluidoras uma vez que reduz o gasto com aeração.

Palavras-chave: aeração contínua, aeração intermitente, remoção de matéria orgânica, nitrificação e desnitrificação simultânea.

## ABSTRACT

ALIBERTI, Edgar Augusto. **Treatment of dairy effluent in a structured bed reactor subjected to different operating conditions.** 2017. 51 f. Course Completion Work (Bachelor of Environmental Engineering) - Federal Technological University of Paraná, Londrina, 2017.

The discharge of dairy effluents rich in organic and nitrogenous matter in water bodies can result in environmental impacts, therefore it is necessary to treat these wastewater. In this sense, the objective of this work was to evaluate the performance of a structured bed reactor and continuous flow, regarding the removal of organic matter and nitrogen, operated under continuous and intermittent aeration. The reactor used in the experiment had a useful volume of 2.125 L. As a support material, polyurethane foam with a diameter of 1.5 cm and a length of 48 cm was used and fixed by metal rods. The system was operated during the whole experiment with a hydraulic detention time of 16h and fed with effluent from the dairy industry, in which two phases of operation were studied: phase I being continuously aerated and phase II under intermittent aeration. In the continuous aeration phase the system was operated 24h with aeration, in the intermittent aeration phase a cycle was worked with 2 hours of aeration for 1 hour without aeration during 24h. Analyzes were made of pH, total alkalinity, temperature, Chemical Oxygen Demand (COD), Total Kjeldahl Nitrogen (NKT), N-ammoniacal-N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, nitrite- N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup> and nitrate- N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. In Phase I there was a percentage of organic matter removal, NKT and NT of  $93 \pm 0.03$   $79 \pm 16\%$  and  $61 \pm 9\%$ , respectively. In Phase II,  $87 \pm 0.03\%$  of organic matter removal was obtained,  $86 \pm 10\%$  of NKT and  $76 \pm 15\%$  of NT removal. It was also verified that the efficiency of denitrification in the two phases was above 77%, being an indicative that the nitrification and simultaneous denitrification occurred. From the results it was concluded that in terms of removal of nitrogen and organic matter the system was efficient, but the operation in intermittent aeration conditions generates an economy to remove these pollutant loads since it reduces the aeration expense.

Keywords: continuous aeration, intermittent aeration, removal of organic matter, nitrification and simultaneous denitrification.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> - Processos do ciclo convencional de transformação do nitrogênio. .	17
<b>Figura 2</b> - Representação das regiões aeróbia e anóxica de um floco de lodo ativado.....	21
<b>Figura 3</b> - Sistema de tratamento utilizado nos procedimentos experimentais.	28
<b>Figura 4</b> - Variação de pH e alcalinidade afluente e efluente. ....	32
<b>Figura 5</b> - Variação nas concentrações de NKT, $\text{NO}_2^-$ , $\text{NO}_3^-$ e eficiência de remoção de NT.....	34
<b>Figura 6</b> – Gráfico box plot da remoção de nitrogênio total nas duas fases de operação do sistema. ....	35
<b>Figura 7</b> - Variação das taxas de nitrificação e desnitrificação nas duas fases de operação do sistema. ....	36
<b>Figura 8</b> - Variação da concentração da DQO afluente e efluente, e a eficiência de sua remoção.....	38
<b>Figura 9</b> - Gráfico box plot da remoção de DQO nas duas fases operacionais. ....	39
<b>Figura 10</b> - Concentração de sólidos afluente e efluente nas fases de operação. ....	41

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Concentrações dos parâmetros físico-químicos dos efluentes de laticínios dependendo do produto. ....	12
<b>Tabela 2</b> - Padrões para lançamento de efluentes líquidos .....	14
<b>Tabela 3</b> - Fases experimentais de aeração no reator de leito estruturado. ....	29
<b>Tabela 4</b> - Médias e desvio padrão do pH e da alcalinidade afluente e efluente. ....	32
<b>Tabela 5</b> - Médias das concentrações de nitrogênio afluente e efluente em ambas as fases de operação do reator. ....	34
<b>Tabela 6</b> - Médias da DQO afluente e efluente, eficiência de remoção e desvio padrão. ....	37
<b>Tabela 7</b> - Valores médios de sólidos totais, sólidos totais fixos e sólidos totais voláteis. ....	40
<b>Tabela 8</b> - Porcentagem de remoção de sólidos totais, fixos e voláteis.....	40



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1 OBJETIVO GERAL .....</b>	<b>10</b>
<b>2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....</b>	<b>10</b>
<b>3.1 EFLUENTE DAS INDÚSTRIAS DE LATICÍNIOS .....</b>	<b>11</b>
<b>3.2 PROCESSOS BIOLÓGICOS DE REMOÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA .....</b>	<b>14</b>
<b>3.2.1 PROCESSO AERÓBIO.....</b>	<b>15</b>
<b>3.3 PROCESSOS BIOLÓGICOS DE REMOÇÃO DE NITROGÊNIO .....</b>	<b>16</b>
<b>3.3.1 PROCESSOS DE REMOÇÃO DE NITROGÊNIO .....</b>	<b>17</b>
3.3.1.1 Nitrificação .....	17
3.3.1.2 Desnitrificação.....	19
<b>3.3.2 NITRIFICAÇÃO E DESNITRIFICAÇÃO SIMULTÂNEA (NDS).....</b>	<b>20</b>
3.3.2.1 Remoção de nitrogênio com aeração intermitente.....	23
<b>3.4 REATOR DE LEITO ESTRUTURADO E FLUXO CONTINUO .....</b>	<b>24</b>
<b>4.1 EFLUENTE DE LATICÍNIOS.....</b>	<b>27</b>
<b>4.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE TRATAMENTO .....</b>	<b>27</b>
<b>4.3 INÓCULO.....</b>	<b>28</b>
<b>4.4 FASES EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>29</b>
<b>4.5 MONITORAMENTO FÍSICO-QUÍMICO.....</b>	<b>29</b>
<b>4.6 CÁLCULO DAS EFICIÊNCIAS DO REATOR.....</b>	<b>30</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>32</b>
<b>5.1 pH E ALCALINIDADE .....</b>	<b>32</b>
<b>5.2 REMOÇÃO DE DQO .....</b>	<b>37</b>
<b>5.3 REMOÇÃO DE SÓLIDOS .....</b>	<b>40</b>
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>43</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>44</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil se destaca como o sexto maior produtor de leite do mundo, e tem grande possibilidade de se tornar o maior produtor de produtos derivados de leite, em função da grande disponibilidade de terras, água, tecnologia e custos de produção competitivos. Porém, os efluentes líquidos gerados nas indústrias de laticínios podem causar impactos significativos, quando se trata de poluição hídrica, e isso ocorre devido as grandes concentrações de matéria orgânica, nutrientes (FEAM, 2015) e gorduras (MENDES et al., 2005).

Averiguando as formas para se tratar esses efluentes, observa-se na literatura que o tratamento biológico é o mais adequado, uma vez que os custos de operação são relativamente baixos quando comparados a tratamentos físico-químicos, e mostrando resultados com elevada eficiência para a remoção das grandes cargas orgânicas e de nitrogênio (AHN, 2006).

O tratamento de efluentes submetido à aeração intermitente vem se mostrando muito eficientes, devido aos processos aeróbios e anaeróbios de remoção de matéria orgânica e nitrogênio acontecerem em um mesmo reator.

Diversas configurações de reatores podem ser utilizadas para implementação do sistema de aeração intermitente, dentre estas configurações tem-se o reator de leito estruturado que promove melhor fixação da biomassa e quando associado à aeração intermitente tem apresentado resultados muito satisfatórios (CORREA, 2015; GADELHA, 2013; MOURA et al., 2012; MOURA, 2011). Portanto, devido à alta concentração de carga orgânica que contêm os efluentes de laticínios, o tratamento do mesmo em um reator de leito estruturado e fluxo contínuo sendo operado com aeração intermitente pode ser uma ótima alternativa.

Do exposto o objetivo principal deste trabalho foi avaliar a remoção de matéria orgânica e nitrogênio de efluente de laticínios, quando tratado em um reator de leito estruturado de fluxo contínuo submetido à aeração contínua e intermitente.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Avaliar o desempenho de um reator de leito estruturado utilizado no tratamento de efluentes de laticínios, quando submetido à aeração contínua e aeração intermitente.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analisar o percentual de remoção de matéria orgânica e nitrogênio no reator de leito estruturado nas duas condições operadas;
- Avaliar a melhor condição operacional no reator.

### **3 REFERENCIAL TEÓRICO**

#### **3.1 EFLUENTE DAS INDÚSTRIAS DE LATICÍNIOS**

As indústrias de laticínios podem gerar resíduos líquidos e sólidos devido à complexidade da composição do leite. Independentemente do tipo de resíduo gerado o mesmo tem que ser tratado, para se enquadrar dentro dos padrões de qualidade que estão descritos na resolução CONAMA 357/2005 (BRASIL, 2005) e em sua complementação CONAMA 430/2011 (BRASIL, 2011), antes de ser lançado em corpos d'água, sendo que os padrões de qualidade variam dependendo da classificação do manancial.

Devido ao elevado consumo de água a indústria processadora de leite produz elevadas quantidades de efluentes. De acordo com os dados da CETESB (2008) as indústrias de laticínios geram em torno de 1 a 6 litros de efluente por litro de leite processado.

O leite pode ser definido como uma mistura homogênea de várias substâncias tais como: lactose, glicerídeos, proteínas, sais, vitaminas e enzimas, onde algumas dessas se encontram em emulsão (gordura, vitaminas lipossolúveis), algumas encontradas em suspensão (caseínas ligadas a sais minerais) e as outras em dissolução (lactose, vitaminas hidrossolúveis, proteínas do soro, sais e outros) (ORDÓNEZ, 2005; TRONCO, 1997). Segundo Tonaco et al. (2014) a composição média do leite é de 87,5% de água e 12,5% de extrato seco total. Esses extratos secos totais são constituídos por lactose com teor de 4,7%, as proteínas com 3,5%, as gorduras com 3,5% e 0,8% de sais minerais. Desta forma, os efluentes gerados após o processamento do leite nas indústrias possuem em sua constituição elevadas concentrações de contaminantes como poluentes orgânicos e nutrientes (MACHADO et al., 2006).

Devido às características do efluente gerado é necessário o tratamento do mesmo, antes do seu lançamento em corpos hídricos. Na Tabela 1 são apresentadas as principais características físico-químicas dos efluentes brutos gerados na indústria de laticínios em função do produto fabricado.

**Tabela 1- Concentrações dos parâmetros físico-químicos dos efluentes brutos de laticínios dependendo do produto.**

<b>Tipos de efluentes</b>	<b>DQO (mg/L)</b>	<b>DBO (mg/L)</b>	<b>pH (uds)</b>	<b>Alcalinidade (mg CaCO<sub>3</sub>/L)</b>	<b>SS (mg/L)</b>	<b>SSV (mg/L)</b>	<b>ST (mg/L)</b>	<b>NKT (mg/L)</b>	<b>FT (mg/L)</b>
Produção de leite em pó ou manteiga	2.000-6.000	1.200-4.000	8 a 11	150-300	350-1.000	330-940	-	50-60	-
Efluente de laticínios (mistos)	1.150-9.200	-	6 a 11	320-970	340-1730	255-830	2.705-3.715	14-272	25.051
Produção de queijo	1.000-7.500	588-5.000	5,5 a 9,5	-	500-2.500	-	-	-	-
Leite fresco	4.656	-	6,92	-	-	-	-	-	-
Coalhada	61.000	-	-	-	1.780	1.560	-	980	510

**Legenda: DQO-Demanda Química de Oxigênio; DBO-Demanda Bioquímica de Oxigênio; pH-Potencial Hidrogeiônico; SS-Sólidos Suspensos; SSV-Sólidos Suspensos Voláteis; ST-Sólidos Totais; NKT-Nitrogênio Total Kjeldahl; FT-Fósforo Total; Uds- unidades.**

**Fonte: Adaptado de Demirel, Yenigul e Onay, 2005.**

Do exposto na Tabela 1 observa-se que caso estes efluentes líquidos forem lançados nos corpos d'água sem tratamento os mesmos podem resultar em alterações drásticas nas características do corpo receptor. De acordo com Silva (2011), um dos principais efluentes líquidos gerados pelas indústrias de laticínios é o soro, tendo a capacidade de poluição cem vezes maior em relação ao esgoto doméstico. O soro, o leiteiro (denominação do soro da manteiga) e o leite ácido, devido aos seus teores nutricionais e por seus valores altos de cargas orgânicas não podem ser misturados aos efluentes da indústria. Os mesmos devem ser coletados e transportados separadamente, sendo aproveitados na fabricação de outros produtos ou para alimentação de animais.

Uma indústria de laticínios produz em média 5 litros de soro por litro de leite processado, essa geração média em uma indústria de pequeno porte por dia fica na faixa de 300.000 litros de soro por dia, e essa quantidade de soro possui capacidade poluidora igual ao de uma cidade de 150.000 habitantes, caso seja descartado direta ou indiretamente em corpos d'água (CETESB, 2008).

Janczukowicz et al. (2008) descreveram os efluentes que são gerados em variados setores de uma indústria de laticínios desde o recebimento de leite, processamento de leite, produção de creme, manteiga e queijo, e também para a mistura de todos os efluentes. Eles relataram variações nas concentrações de matéria orgânica (DQO e DBO) e sólidos suspensos, isso tanto antes quanto após o tratamento desses efluentes.

A concentração de matéria orgânica presente nos efluentes de laticínios se dá principalmente devido ao seu teor de lactose, gorduras e proteínas. A quantidade desses componentes no efluente pode variar muito, assim afetando sua biodegradabilidade. A caseína é uma das principais proteínas do leite, são pouco biodegradáveis sendo necessário um conjunto de bactérias adaptadas para efetuarem essa degradação (JANCZUKOWICZ et al., 2008; ORHON et al., 1993).

Os sólidos suspensos encontrados nos efluentes lácteos são advindos dos coágulos de leite, sobras de queijo e outros aditivos. Quando se trata das gorduras, 90% do total de gorduras são de origem do próprio leite e contribuem com o teor de sólidos suspenso presentes. A presença do nitrogênio ocorre devido à alta concentração de proteínas do leite, já o fósforo advém dos processos de lavagem e limpeza, que correspondem à utilização de detergentes e ácidos fosfóricos. O pH sofre a influência especialmente pelos produtos utilizados para a limpeza, que podem ser ácidos ou básicos (DEMIREL et al., 2005).

As gorduras são de difícil biodegradação e seus subprodutos que são formados em virtude da sua degradação são o glicerol e os ácidos graxos de cadeia longa. O glicerol não atrapalha o processo de tratamento biológico dos efluentes, entretanto, os ácidos graxos de cadeia longa, tanto os saturados quanto os insaturados, causam complicações no tratamento de efluentes inibindo os microrganismos responsáveis por esse tratamento (JANCZUKOWICZ et al., 2008).

Segundo a Resolução CONAMA 430/2011 (BRASIL, 2011), devido às características do efluente gerado na indústria de laticínios, a mesma deve respeitar os padrões de lançamento de efluentes estabelecidos em norma. No Quadro 1 são apresentados os parâmetros que devem ser respeitados, bem como sua concentração máxima.

**Tabela 2- Padrões para lançamento de efluentes líquidos**

<b>PARÂMETRO</b>	<b>VALOR MÁXIMO</b>
DBO	DBO5 - remoção mínima de 60% de DBO5, sendo que este limite só poderá ser reduzido no caso de existência de estudo de autodepuração do corpo hídrico, que comprove atendimento às metas do enquadramento do corpo receptor.
Materiais sedimentáveis	1 ml/L em teste de 1 hora em cone Imhoff. Para o lançamento em lagos e lagoas, cuja velocidade de circulação seja praticamente nula, os materiais sedimentáveis deverão estar virtualmente ausentes.
Óleos e graxas	Óleos minerais: 20mg/L Óleos vegetais e gorduras animais: 50mg/L
pH	5 a 9.
Nitrogênio amoniacal Total	20 mg/L

**Fonte: RESOLUÇÃO CONAMA 430/2011.**

Do exposto na Tabela 1 - relacionado às características físico-químicas do efluente de laticínios, e na Tabela 2, constata-se que o tratamento aplicado a este tipo de efluente deve apresentar eficiências de remoção de matéria orgânica e nutrientes elevadas, de modo a atingir os valores estabelecidos na legislação para o seu lançamento sem causar danos ao meio ambiente.

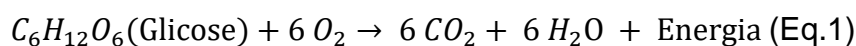
### **3.2 PROCESSOS BIOLÓGICOS DE REMOÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA**

No processo de respiração celular os microrganismos obtêm energia para seu crescimento e manutenção por meio de reações de oxirredução. Essas reações incluem um doador e um receptor de elétrons. Na maioria das vezes, o doador de elétrons mais comum para os microrganismos é a matéria orgânica. Os procariontes quimiolitotróficos, entretanto, utilizam compostos inorgânicos reduzidos, como amônia e sulfeto, como doadores de elétrons no metabolismo energético. O aceptor de elétrons comum sob condições aeróbicas é o oxigênio diatômico ou molecular (O<sub>2</sub>). No entanto, em condições anaeróbicas, alguns procariontes podem usar outros aceptores de elétrons no metabolismo energético, incluindo nitrato, sulfato e dióxido de carbono (RITTMAN e MCCARTY, 2001).

Se tratando de matéria orgânica carbonácea, as variáveis que as representam são: a DBO (demanda bioquímica de oxigênio) e a DQO (demanda química de oxigênio) (VON SPERLING, 1996), sendo essa última variável utilizada para determinar a quantidade de oxigênio que é necessária para se oxidar quimicamente a matéria orgânica, convertendo-a em gás carbônico e água. A maior parte da concentração da DQO pode ser retirada em processos aeróbios, anaeróbios e anóxicos (SANTOS, 2004).

### 3.2.1 Processo aeróbio

O sistema de decomposição aeróbia converte totalmente a matéria orgânica em água, energia e CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) conforme a Equação 1 que representa a degradação da glicose, sendo fonte de alimento para o crescimento e desenvolvimento dos microrganismos (KOZAK et al, 2012).



Os meios aeróbios possuem uma vasta diversidade de microrganismos, sendo eles: bactérias, protozoários entre outros que participam dos processos de degradação. Esses processos ocorrem pela relação de três mecanismos “chaves” os quais são a oxidação, a síntese e a auto-oxidação (endogenia) (SANTOS, 2004).

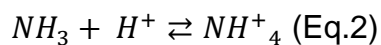
Em meios que há matéria orgânica presente, os microrganismos aeróbios farão sua degradação e a remoção, sendo parte oxidada a dióxido de carbono e água, obtendo energia para desempenhar seu metabolismo e a manutenção de suas funções vitais (oxidação). A parcela restante da matéria orgânica é utilizada para a formação de novos microrganismos, assim, obtendo um crescimento de biomassa (síntese). No instante que essa matéria se esgota, os microrganismos começam a realizar a respiração endógena, onde o material celular é oxidado, com o objetivo de fornecer a quantidade de energia que é necessária para a atividade metabólica, a partir disso não deixando com que os microrganismos venham a morrer (auto-oxidação ou endogenia) (WOSIACK, 2014).



Esses sistemas possuem um custo operacional maior, visto que consomem mais energia do que outros sistemas de tratamento biológico, pois dependem da aeração em seus processos (PEREIRA, 2007; JORDÃO, 2005).

### 3.3 PROCESSOS BIOLÓGICOS DE REMOÇÃO DE NITROGÊNIO

Nos efluentes industriais a forma do nitrogênio está relacionada diretamente com o pH. Na grande maioria dos efluentes o nitrogênio é apresentado na forma de íon amônio ( $NH_4^+$ ) que é sua forma ionizada, em pH na faixa de ácido para neutro (menores ou iguais a 7) e também presentes na forma não ionizada ( $NH_3$ ) que corresponde a uma menor parcela do nitrogênio que está presente nas águas residuárias. Quando o pH se encontra na faixa de 8 a 9, sua forma inorgânica (não ionizada) passa a corresponder a uma parcela muito maior que o íon amônio, e quando o pH encontra-se acima de 11 a forma mais abundante é a não ionizada, isso pode ser visto conforme demonstrado na Equação 3 (SANT'ANNA JUNIOR, 2010).



Nos efluentes de laticínios são pouco encontradas as formas oxidadas do nitrogênio. O nitrito ( $NO_2^-$ ) e o nitrato ( $NO_3^-$ ) quando em altas proporções podem ser tóxicos, principalmente o nitrito, que pode ser fatal a espécies aquáticas, já para os seres humanos esse excesso pode causar a oxidação do ferro na corrente sanguínea causando a metahemoglobinemia. Quando removido dos efluentes o nitrogênio é convertido em nitrogênio molecular ou gás nitrogênio ( $N_2$ ) que é um gás inerte o qual está presente na atmosfera (SANT'ANNA JUNIOR, 2010).

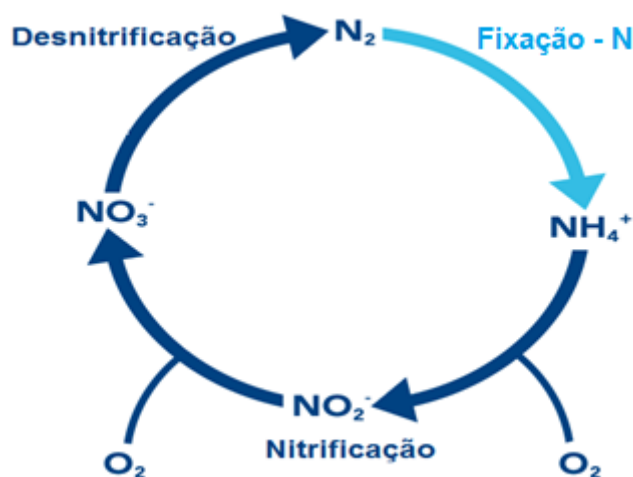
Para obter a remoção de nitrogênio convencionalmente, é necessária uma fase aeróbia, para beneficiar a nitrificação, e uma anaeróbia/anóxica para proporcionar a desnitrificação. Alguns fatores devem estar adequados a fim de se realizar a remoção completa do nitrogênio, sendo eles a temperatura, pH, alcalinidade, oxigênio dissolvido, tempo de detenção hidráulico (TDH), tempo de retenção celular (TRC) e a quantidade de matéria orgânica presente no meio (LI et al., 2012).

O nitrogênio pode ser removido de efluentes por meio de processos biológicos e físico-químicos. Os processos físico-químicos necessitam de uma maior frequência de manutenção dos equipamentos e normalmente tem um alto custo quando comparados aos processos de remoção biológicos. Inclusive, esses processos podem impactar o meio ambiente pela liberação de amônia, quando se realiza o processo de retirada por arraste com ar em torres de stripping, maior produção de lodo e o uso de produtos químicos. Segundo alguns autores, os processos biológicos podem ser mais eficientes no quesito remoção de nitrogênio (MORETTO, 2014; ZOPPAS, 2012; SEDLAK, 1991).

### 3.3.1 Processos de remoção de nitrogênio

Os sistemas convencionais de remoção biológica de nitrogênio (Figura 1) ocorrem por dois processos, a nitrificação, que ocorre em condições aeróbias, sendo separada em duas fases: nitrificação e nitratação. Já o segundo processo, a desnitrificação, ocorre em condições anóxicas/anaeróbias (MORETTO, 2014).

Figura 1 - Processos do ciclo convencional de transformação do nitrogênio.



Fonte: Adaptado de GONÇALVES, 2017.

#### 3.3.1.1 Nitrificação

A nitrificação ocorre especificamente em ambientes aeróbios, onde as bactérias quimioautótrofas consomem o dióxido de carbono como fonte de

carbono e utilizam como receptor final de elétrons o oxigênio. A energia para o desenvolvimento dessas bactérias advém da oxidação da amônia e do nitrito (RITTMANN e MCCARTY, 2001). O processo é dividido em duas etapas, a primeira é a denominada nitritação, a qual o nitrogênio amoniacal ( $\text{NH}_3$  e  $\text{NH}_4^+$ ) é reduzido a nitrito e posteriormente na segunda etapa, que é a nitratação, o produto da nitritação é oxidado a  $\text{NO}_3^-$  (NOCKO, 2008; METCALF e EDDY, 2003).

Cada uma das fases da nitrificação é desenvolvida por diferentes gêneros de bactérias. Na nitritação, por exemplo, os grupos de bactérias mais comuns são as *Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*, *Nitrosospira*, *Nitrosolobus* e as *Nitrosovibrio*, já no processo de nitratação o gênero mais abundante envolvido é *Nitrobacter*, mas outros participantes desse processo são *Nitrococcus*, *Nitrospira* e as *Nitrospina* (RITTMANN e MCCARTY, 2001).

Para o processo de nitrificação acontecer é necessário ter uma quantidade mínima de oxigênio dissolvido no meio, pois para o processo de nitritação são demandados 3,43mg de  $\text{O}_2$  para cada 1mg de  $\text{NH}_4^+$  reduzidos, e para a nitratação precisa de 1,14mg de  $\text{O}_2$  para cada mg de N- $\text{NO}_2$ , assim totalizando 4,57mg de  $\text{O}_2$  para cada miligrama de nitrogênio em forma de amônia a serem reduzidos (METCALF e EDDY, 2003; SHARMA e AHLERT, 1977). Com valores de oxigênio dissolvido no meio acima de 2  $\text{mg.L}^{-1}$  já é possível se obter o processo de nitrificação (EPA, 1993). Porém, o oxigênio do meio pode interferir para no crescimento e realização de outras vias metabólicas para oxidação de nitrogênio. De acordo com Moretto (2014) em baixas concentrações de oxigênio a remoção de nitrogênio amoniacal é reduzida, pois entre os microrganismos nitrificantes (autotróficos) e heterotróficos se tem uma disputa pelo oxigênio, que por fim acaba ficando com os heterotróficos.

Para que o processo de nitrificação ocorra com sucesso, outro parâmetro fundamental é a alcalinidade, a qual tem a capacidade de tamponar o pH próximo ao neutro (pH 7). Conforme o processo de nitrificação vai sendo realizado a alcalinidade do meio vai sendo consumida, decorrente da liberação de íons  $\text{H}^+$  no meio. Para cada 1g de amônia oxidada são necessários 7,14g de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3^-$ ) ou 8,64g de bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) (SANT'ANNA JUNIOR, 2010; METCALF e EDDY, 2003; SEDLAK, 1991).

Outros parâmetros importantes relacionados ao processo de nitrificação, com o objetivo de se melhorar a sua eficiência no sistema são: a temperatura, o pH, o tempo médio que os microrganismos que realizam o processo permanecem no sistema (TRC) e tempo médio que o efluente permanece no reator (TDH). A temperatura ótima para o sistema ser operado é na faixa de 25 a 35°C, já para o pH a faixa ótima é em torno de 7,0 à 9,0, uma vez que os valores do mesmo abaixo de 7,2 e acima de 9,5 fazem com que a eficiência da nitrificação sejam reduzidos em 50% (EPA, 1993).

Quanto ao TDH a nitrificação sofre a influência negativa quando de sua redução, pois aumenta a carga orgânica aplicada no sistema, e segundo Schmidt et al. (2003) em concentrações elevadas de carga orgânica há redução da nitrificação, tendo em vista que a aplicação de uma alta carga orgânica beneficia o crescimento de bactérias heterotróficas, competem pelo oxigênio e nutrientes com as bactérias autotróficas (nitrificantes), inibindo o crescimento e a nitrificação.

### 3.3.1.2 Desnitrificação

A desnitrificação é a etapa de remoção de nitrogênio que ocorre logo após a nitrificação, onde as bactérias heterotróficas reduzem o nitrito ou nitrato a gás nitrogênio ( $N_2$ ) ou óxido nitroso ( $N_2O$ ). Esse processo acontece em ambientes anóxicos/anaeróbios, onde os microrganismos utilizam o nitrito ou nitrato como receptor final de elétrons e a matéria orgânica presente no meio, como fonte de carbono e de energia (NETTO, 2011; EPA, 1993).

As bactérias cooperadoras para a desnitrificação, em sua grande maioria são gram-negativas, sendo elas dos gêneros *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Paracoccus* e *Thiobacillus*, as quais são das classes alfa e beta das Proteobactérias, mas também estão presentes bactérias gram-positivas como as do gênero *Bacillus* e em pequena quantidade as arqueias halofílicas (*Halobacterium*), que possuem elevada eficiência para desenvolver o processo de desnitrificação (RITTMANN e MCCARTY, 2001).

A desnitrificação é o processo inverso da nitrificação, onde ao invés de ocorrer o consumo da alcalinidade acontece a produção. Esta produção de alcalinidade equivale a 50% do valor que foi consumido pela nitrificação,

obtendo uma proporção de 1mg de  $\text{NO}_3$  que é convertido em gás nitrogênio para 3,58mg de  $\text{CaCO}_3$  de alcalinidade gerados (EPA, 1993).

A relação C/N (carbono/nitrogênio) é um fator influente no processo de desnitrificação, uma vez que o melhor valor para esta razão depende da fonte de carbono que será adicionada. Baixas relações entre carbono e nitrogênio provocam o acúmulo de nitrito no meio, desfavorecendo o processo (WOSIACK, 2014; NETTO, 2011).

O processo de desnitrificação também sofre influência da temperatura, pH e concentração de oxigênio dissolvido no meio, se desenvolvendo com eficiência nas faixas ótimas de temperatura situadas de 11 a 31°C, já o pH ótimo fica entre 6,4 e 8,1, sendo que a taxa de desnitrificação é reduzida quando o pH for menor que 6,1 e maior que 9,1 (MORETTO, 2014). Quanto ao oxigênio dissolvido em concentrações próximas a 1  $\text{mg.L}^{-1}$  a taxa de desnitrificação é zerada (VON SPERLING, 1996).

Algumas metodologias vêm estudando a remoção de nitrogênio, pelo processo de nitrificação parcial, onde a redução total do nitrogênio amoniacal parte da redução do nitrito e posteriormente a gás nitrogênio, excluindo a nitratação, na qual é o processo que reduz o nitrito a nitrato, com isso divergindo dos métodos convencionais, onde o nitrato é transformado em gás nitrogênio, isso ocorre nos métodos não convencionais pela eventual capacidade de bactérias heterotróficas anaeróbias, as *Planctomycete*, que oxidam a amônia, do mesmo modo que bactérias autotróficas proporcionam a desnitrificação (JOO et al., 2006; JOO et al., 2005).

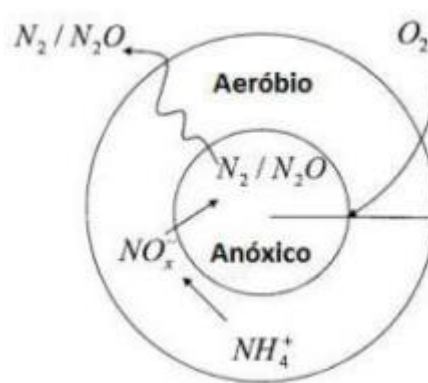
### **3.3.2 Nitrificação e desnitrificação simultânea (NDS)**

Várias pesquisas têm sido feitas para verificar a possibilidade de remover nitrogênio de efluentes em apenas um único reator, no qual o processo possui o nome de nitrificação e desnitrificação simultânea (NDS) (ZOPPAS, 2012; BUENO, 2011; HAN et al., 2010; HE, XUE e WANG, 2009; LI et al., 2007).

Os processos de nitrificação e desnitrificação acontecem em virtude de fenômenos físicos e biológicos (MORETTO, 2014). O fenômeno físico desse processo ocorre em maior abundância, uma vez que há formação de uma taxa

de variação da concentração de oxigênio dissolvido como, por exemplo, no interior do floco, o qual é consequência da redução da capacidade do oxigênio se propagar (Figura 2). Com isso, as bactérias nitrificantes se desenvolvem na superfície do floco e as desnitrificantes no núcleo, pois é a região que possui menor concentração de oxigênio dissolvido (HU et al., 2009).

**Figura 2- Representação das regiões aeróbia e anóxica de um floco de lodo ativado.**



**Fonte: ZENG et al. (2003).**

A formação dos flocos microbianos por processos biológicos estão associados à produção de um exopolímero transparente pelas bactérias e interações de predação entre os microrganismos. O tamanho e a forma desses agregados podem ser modificados não apenas pela passagem de matéria orgânica particulada, mas também pela estrutura trófica (como os microrganismos estão distribuídos), atividade microbiana, efeitos químicos e até mesmo pela turbidez do líquido (HIETANEN, 1998).

O início do processo de formação dos flocos é representado principalmente pelas bactérias em forma de bacilos as quais são as primeiras a crescerem (BIDDANDA, 1985), mas logo se inicia o aumento de outras formas de bactérias, que para se desenvolverem também se alimentam de matéria orgânica dissolvida.

Ao longo do crescimento bacteriano ocorre a produção de muco aderente levando a um acréscimo no tamanho dos flocos devido a uma maior agregação das partículas e microrganismos. Posteriormente, há uma colonização por protozoários flagelados, ciliados e formas ameboides, sendo esses os principais predadores das bactérias. Posteriormente, ocorre uma

diminuição na quantidade de bactérias pela predação exercida pelos protozoários, podendo acarretar em uma mudança na morfologia e na redução do tamanho dos flocos uma vez reduzida a produção de muco (BIDDANDA e POMEROY, 1988). Porém, as próprias bactérias podem favorecer o processo de fragmentação dos flocos por meio da produção e liberação de exoenzimas, que são utilizadas pelas bactérias para a decomposição e assimilação de matéria orgânica particulada (BIDDANDA e POMEROY, 1988; VERDUGO et al., 2004).

As vantagens de se utilizar um sistema de nitrificação e desnitrificação simultâneos quando comparados com os sistemas convencionais, é que no primeiro necessita-se de um menor investimento de montagem e operação do sistema, e também há a redução da demanda de oxigênio, pois não é necessário a divisão dos reatores em aeróbio para se fazer a nitrificação e outro anóxico para a desnitrificação, visto que os dois processos ocorrem em um mesmo reator (HU et al., 2009; DO CANTO et al., 2008).

Han et al. (2010) avaliando os fatores que influenciam nos processos de nitrificação e desnitrificação simultâneos a partir de um experimento realizado em efluentes sintéticos em um reator de bateladas sequenciais, obteve uma eficiência na remoção de nitrogênio total de 83 à 95%, mas isso ocorreu somente quando em faixas específicas dos fatores como DQO, relação C/N, OD e de nitrogênio amoniacal. Ressaltou ainda que o sistema de nitrificação e desnitrificação simultâneos não sofre influência de baixas concentrações de alcalinidade, visto que a desnitrificação ajuda a manter a concentração e não deixando o pH abaixar.

Li et al. (2007) avaliando os processos reais de nitrificação e desnitrificação simultâneos em efluentes domésticos em um reator de bateladas sequencias aeróbio com biofilme, obteve remoção de nitrogênio total na faixa de 74 à 82%, e ainda evidenciaram que a remoção foi aumentando conforme a ocorreu o crescimento da espessura do biofilme.

Quando se opera um sistema que realiza nitrificação e desnitrificação simultâneos faz com que esse processo mantenha o pH estável, não requerendo adição de ácidos e/ou bases para tal função, pois conforme o processo de nitrificação vai ocorrendo a alcalinidade do meio vai sendo consumida, e ao mesmo tempo vai sendo reestabelecida pela desnitrificação.

Assim, mantendo o pH em um equilíbrio constante e colaborando para o crescimento de diferentes tipos de bactérias no mesmo reator (VAZQUEZ et al., 2011).

### 3.3.2.1 Remoção de nitrogênio com aeração intermitente

A aeração intermitente é um processo cíclico em que se alternam etapas de aeração e não aeração do efluente em sistema de tratamento utilizando bombas de aeração, nas etapas em que não possui aeração, o reator é operado anaerobicamente, onde a concentração de OD é consumida juntamente com as de nitrito e nitrato, sendo eles utilizados para a oxidação da matéria orgânica como receptores finais de elétrons, aumentando a concentração de nitrogênio amoniacal, já quando a etapa de aeração é ativada, a amônia presente no efluente, passa a ser reduzida a nitrito e nitrato (MOURA, 2011).

Os períodos de operação aeróbia e anaeróbia, ou seja, de aeração e não aeração, respectivamente, são controlados de forma manual com um timer (temporizadores), ou conforme o potencial de oxirredução, onde a aeração se inicia quando os valores do potencial de oxirredução mostram que o nitrato foi removido do efluente e é desligado posteriormente a nitrificação (GADELHA, 2013).

Esse sistema de aeração intermitente ajuda também na redução de custos de instalação e operação, em razão de promover a remoção de nitrogênio no mesmo reator, além do mais, reatores em batelada e contínuos quando operados sob aeração intermitente possuem eficiências de remoção de nitrogênio e matéria orgânica semelhantes à operação de dois ou mais reatores num mesmo sistema. Dessa maneira, quando se aplica alimentação contínua em reatores operados com aeração intermitente, os mesmos se tornam interessantes devido à praticidade de executar (LUOSTARINEN et al., 2006, CHEN et al., 2000) e ainda possuem uma capacidade de diminuir a DQO, produzem menos lodo em comparação a sistemas convencionais e estabilizam o pH (CHEN et al., 2000).



### 3.4 REATOR DE LEITO ESTRUTURADO E FLUXO CONTINUO

Diversos estudos vêm sendo feitos sobre os reatores de leito estruturado, ou leito fixo, no qual se introduz um material suporte, como por exemplo, a espuma de poliuretano, a qual é utilizada como material suporte para adesão de biomassa no tratamento biológico de efluentes devido suas características, que permitem um melhor controle sobre a estabilização dos microrganismos dentro do reator e propiciam condições adequadas para o desenvolvimento dos mesmos (CORREA et al., 2016; WOSIACK, 2014; BARANA et al., 2013; MOURA et al., 2012).

Nos reatores de leito estruturado os microrganismos encontram-se fixados e suspensos no meio. Quando em suspensão as bactérias se encontram móveis havendo contato direto entre elas e o efluente, e quando fixadas, encontram-se aderidas, formando um biofilme em materiais inertes utilizado como suporte, sendo essa uma maneira vantajosa de se promover um ambiente para o crescimento de microrganismos, pois evita que as bactérias sejam descartadas junto com o efluente (CHEN et al., 2006).

A adaptação das bactérias no biofilme está diretamente ligada aos fatores que influenciam o crescimento das mesmas, sendo divididos em três, os fatores que interferem na bioquímica (pH e temperatura), os que interferem na distribuição de nutrientes para o biofilme (quantidade de substrato e oxigênio disponível) e os que atrapalha no crescimento e nas fontes de nutrientes (competição entre a comunidade por nutrientes essenciais) (CHEN et al., 2006).

A imobilização da biomassa para o tratamento de efluentes traz benefícios para o sistema, como a operação em reatores com menores dimensões, isso se dá devido à grande área superficial do biofilme, e também menores custos para essa operação, pois requer menos energia. Outro benefício é devido ao processo biológico de remoção de nitrogênio dentro de um único sistema, pois o biofilme formado na superfície do material suporte possui camadas aeróbias encontradas na superfície e anaeróbias que estão situadas no interior, favorecendo assim o desenvolvimento de microrganismos aeróbios no exterior do filme e os anaeróbios mais internos (O'REILLY et al., 2008).

O biofilme formado pelos microrganismos autotróficos e heterotróficos pode se situar em superfícies de diversos materiais como plásticos, metais, vidros, partículas sólidas entre outros materiais (KOKARE et al., 2009), mas essa formação pode ser facilitada ou não dependendo das características físicas do material, como a rugosidade, porosidade e o tamanho dos poros (WOLFF et al., 2010).

Silva (2016), avaliando a influência do tempo de aeração na remoção de matéria orgânica e nitrogênio de esgoto sanitário por meio de um reator de leito estruturado operado sob aeração intermitente para obtenção de microrganismos nitrificantes operou o reator durante um tempo sob aeração contínua e posteriormente avaliou os diferentes períodos de aeração e não aeração. No qual obteve a melhor remoção de NTK quando o período de aeração intermitente foi de 1h/2h, elevando a oxidação do mesmo para nitrato de 62 para 82%, isso devido à alta alcalinidade gerada pela desnitrificação, nesse período também obteve a melhor eficiência de remoção de nitrogênio total sendo ela de 29%. Já na fase de 1h/3h a falta de oxigênio interferiu no processo de oxidação do NTK obtendo uma eficiência de 42%.

Barana et al. (2013) estudaram o comportamento de um reator de leito fixo operado sob aeração intermitente para remoção de matéria orgânica e nitrogênio do efluente proveniente de um reator anaeróbio utilizado para tratar efluente de um abatedouro de aves. O reator foi alimentado com tempo de retenção hidráulico (TRH) de 24h e operado em cinco diferentes fases de aeração intermitente, com o objetivo de avaliar quais tempos de aeração e não aeração são mais eficientes na remoção de matéria orgânica e nitrogênio. Os melhores resultados na remoção de DQO e nitrogênio foram na fase em que o reator foi operado com 1 h de aeração e 2 h sem aeração, na qual a eficiência de remoção de DQO e nitrogênio foram de 95 e 62%, respectivamente.

Gadelha (2013) analisando o desempenho de um reator vertical de leito estruturado e fluxo contínuo com recirculação do efluente, submetendo o sistema a aeração intermitente, com o objetivo de remover carbono e nitrogênio do efluente de um UASB tratando esgoto doméstico. Nesse estudo foram estudadas duas fases experimentais com diferentes relações DQO/ N-Total, onde na primeira a relação foi de 2,44 e na segunda a relação foi de 4,01, chegando a percentuais de remoção de DQO de 94,8 % e 93,4% na primeira e

segunda fase respectivamente, já as remoções de nitrogênio total foram de 23,7 e 65,3%, respectivamente.

Correa (2015) que utilizou essa configuração de reator para o tratamento de esgoto sanitário tendo como objetivo principal a remoção de matéria orgânica e nitrogenada, quando operado em diferentes ciclos de aeração intermitente. Na primeira fase onde foi trabalhado o ciclo de 4 horas de aeração e 2 horas de não aeração, chegou à remoção de 76% de NKT, 70% de nitrogênio amoniacal, 67 % de nitrogênio total e 88% da DQO. Já na segunda fase com o ciclo de 2 horas de aeração e 1 hora não aerando, chegou a porcentagens de remoção de NKT, nitrogênio amoniacal, nitrogênio total e DQO de 80%, 86%, 68% e 94% respectivamente, na fase 3 (ciclo de 2 horas aerando e 2 de não aeração) as taxas de remoção diminuíram para 58%, 72%, 41% e 90% respectivamente. Mostrando assim que as taxas de remoção variam conforme os tempos de aeração e não aeração no qual é submetido o sistema.

## **4 MATERIAL E MÉTODOS**

A pesquisa e as análises dos parâmetros físico-químicos foram realizadas no Laboratório de Hidráulica da UEL e UTFPR – Campus Londrina, e os efluentes coletados foram armazenados no Laboratório de Microbiologia Ambiental da UTFPR – Câmpus Londrina.

### **4.1 EFLUENTE DE LATICÍNIOS**

Para a alimentação do reator foi utilizado efluente de laticínios advindo de uma indústria localizada na região norte do estado do Paraná. A indústria fabrica variados tipos de produtos, sendo eles: bebidas lácteas, creme de leite, iogurtes, leite em pó pasteurizado e integral, e também compostos lácteos. A coleta desse efluente foi realizada após o flotor, uma vez por semana, e ficou armazenado em geladeira para manutenção de suas características.

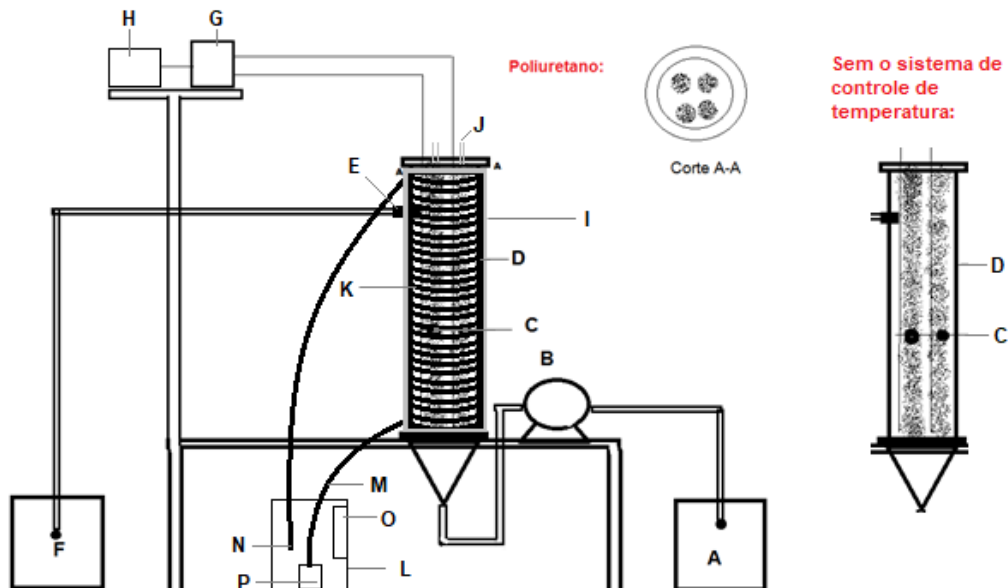
### **4.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE TRATAMENTO**

Para a realização do experimento utilizou-se um reator de leite estruturado de fluxo contínuo, em escala de bancada, sendo este construído em acrílico, com um volume total de 2,65 L, volume útil de 2,125 L, diâmetro externo de 13,5 cm, diâmetro interno de 10 cm e altura de 52 cm (Figura 3).

Como material suporte foram utilizadas estruturas cilíndricas de poliuretano com cerca de 1,5 cm de diâmetro e 48 cm de altura. Foram utilizadas 4 estruturas no reator. Para melhor fixação destas foram utilizadas hastes de ferro fixadas nos limites (superior e inferior) do reator como exposto na Figura 3.

O reator foi alimentado por meio de uma bomba (ProMinent modelo GALA) com uma vazão de  $0,13 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ . A aeração do sistema era realizada por meio de um compressor/bomba de ar com duas saídas (Panther II), com vazão total de ar de  $6 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  e potência de 3,5 W.

Figura 3- Sistema de tratamento utilizado nos procedimentos experimentais.



Legenda: A- Reservatório do efluente de laticínios de entrada; B- Bomba de alimentação; C- Material suporte; D- Reator de Leito Estruturado (RLE); E- Saída do efluente; F- Reservatório do efluente de saída; G - Bomba de aerção; H - Timmer; I - Manta; J - Hastas metálicas; K - Mangueira; L - Reservatório de água; M - Entrada de água no sistema de recirculação; N - Saída da água para o reservatório; O - Termostato; P - bomba de circulação da água.

Fonte: Autoria própria.

O tempo de detenção hidráulica (TDH) para operação do sistema foi de 16 h e a temperatura do reator foi controlada à 26°C por meio de um sistema de recirculação de água montado ao redor do reator, para manter os microrganismos em suas faixas ótimas de crescimento e desempenhar uma boa atividade quanto ao tratamento.

### 4.3 INÓCULO

Para se iniciar o sistema foi utilizado um inóculo (lodo) proveniente de um sistema de lodos ativados empregado no tratamento de efluentes de laticínios.

Inicialmente o lodo coletado foi colocado em contato como material suporte por 12 h. Após este período o material suporte foi transferido para o reator de leito estruturado com aerção contínua, sendo este alimentado com o efluente da indústria de laticínios diluído inicialmente em 1/2 e posteriormente o efluente foi colocado sem diluição no reator, apenas corrigindo o pH para próximo do neutro (7,0) antes de inserir no reservatório de alimentação, sendo esta a fase de adaptação.

Após o período de adaptação (2 meses, sendo um mês com efluente diluído e o outro mês sem diluição do efluente) foi dado início as fases experimentais estudadas neste trabalho.

#### 4.4 FASES EXPERIMENTAIS

Foram trabalhadas 2 fases experimentais no reator, sendo uma com aeração contínua e outra com aeração intermitente, como apresentado na Tabela 3.

**Tabela 3 - Fases experimentais de aeração no reator de leito estruturado.**

<b>Fase</b>	<b>TDH (h)</b>	<b>Aeração (h)</b>	<b>Tempo de operação (dias)</b>
I	16	24 AE/ 0 NA	64
II	16	2 AE/ 1 NA	41

**Legenda:** TDH- Tempo de detenção hidráulico; AE-Aeração; NA- Não aeração.

**Fonte:** Autoria própria.

O ciclo de aeração intermitente utilizado foi definido com base nos trabalhos de Moura et al. (2012) e Correa et al. (2016). Quanto ao TDH, foi definido com base no trabalho de Correa (2015).

#### 4.5 MONITORAMENTO FÍSICO-QUÍMICO

Para o monitoramento do sistema foram realizadas análises físico-químicas dos parâmetros apresentados no Quadro 1 juntamente com a frequência das análises. As análises foram feitas de acordo com Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012).

**Quadro 1 Parâmetros e frequências das análises realizadas para monitoramento do sistema.**

Parâmetro	Sigla/Unidade	Frequência semanal	Método	Número
Potencial hidroeônico	pH	3	Potenciométrico	4500-H <sup>+</sup> B
Alcalinidade	Alcalinidade (mg CaCO <sub>3</sub> .L <sup>-1</sup> )	3	Titulométrico	2320 B
Sólidos Totais	ST (mg.L <sup>-1</sup> )	2	Série de sólidos	2540 B
Sólidos Voláteis Totais	SVT (mg.L <sup>-1</sup> )	2	Série de sólidos	2540 E
Sólidos Fixos Totais	SFT (mg.L <sup>-1</sup> )	2	Série de sólidos	2540 E
Sólidos Dissolvidos Totais	SDT (mg.L <sup>-1</sup> )	2	Série de sólidos	2540 C
Sólidos Dissolvidos Voláteis	SDV (mg.L <sup>-1</sup> )	2	Série de sólidos	2540 E
Sólidos Dissolvidos Fixos	SDF (mg.L <sup>-1</sup> )	2	Série de sólidos	2540 E
Sólidos Suspensos Totais	SST (mg.L <sup>-1</sup> )	2	Série de sólidos	2540 D
Sólidos Suspensos Voláteis	SSV (mg.L <sup>-1</sup> )	2	Série de sólidos	2540 E
Sólidos Suspensos Fixos	SSF (mg.L <sup>-1</sup> )	2	Série de sólidos	2540 E
Demanda Química de Oxigênio	DQO	3	Colorimétrico	5220 D
Nitrogênio Total Kjeldahl	NTK	2	Kjeldahl	4500-N <sub>org</sub> / 4500-NH <sub>3</sub> C
Nitrogênio Amoniacal	N-NH <sub>3</sub> (mg.L <sup>-1</sup> )	2	Titulométrico	4500-NH <sub>3</sub> B/C
Nitrito	N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg.N.L <sup>-1</sup> )	3	Colorimétrico (FIA)	4500-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> B
Nitrato	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg.N.L <sup>-1</sup> )	3	Colorimétrico (FIA)	4500-NO <sub>3</sub>

Fonte: APHA, 2012.

#### 4.6 CÁLCULO DAS EFICIÊNCIAS DO REATOR

As eficiências de remoção de nitrogênio foram calculadas de acordo com Barana et al. (2013), conforme as seguintes equações:

$$NT (\%) = \frac{(NKT_{af} - NKT_{ef} - NO_2^- - NO_3^-) \times 100}{NKT_{af}} \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde, NT (%) é a porcentagem de remoção de nitrogênio total; NKT af é a concentração de NKT afluente; NKT ef é concentração de NKT efluente ao sistema;  $NO_2^-$  é a concentração de nitrito no efluente; e  $NO_3^-$  é a concentração de nitrato efluente.

$$NKT (\%) = \text{Nitrificação} (\%) = \frac{(NKT_{af} - NKT_{ef}) \times 100}{NKT_{af}} \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde, NKT (%) é a eficiência de remoção de NKT; e Nitrificação (%) é a eficiência de nitrificação.

$$\text{Desnitrificação} (\%) = \frac{(NKT_{af} - NKT_{ef} - NO_2^- - NO_3^-) \times 100}{NKT_{af} - NKT_{ef}} \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde, Desnitrificação (%) é a eficiência de desnitrificação.



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 pH E ALCALINIDADE

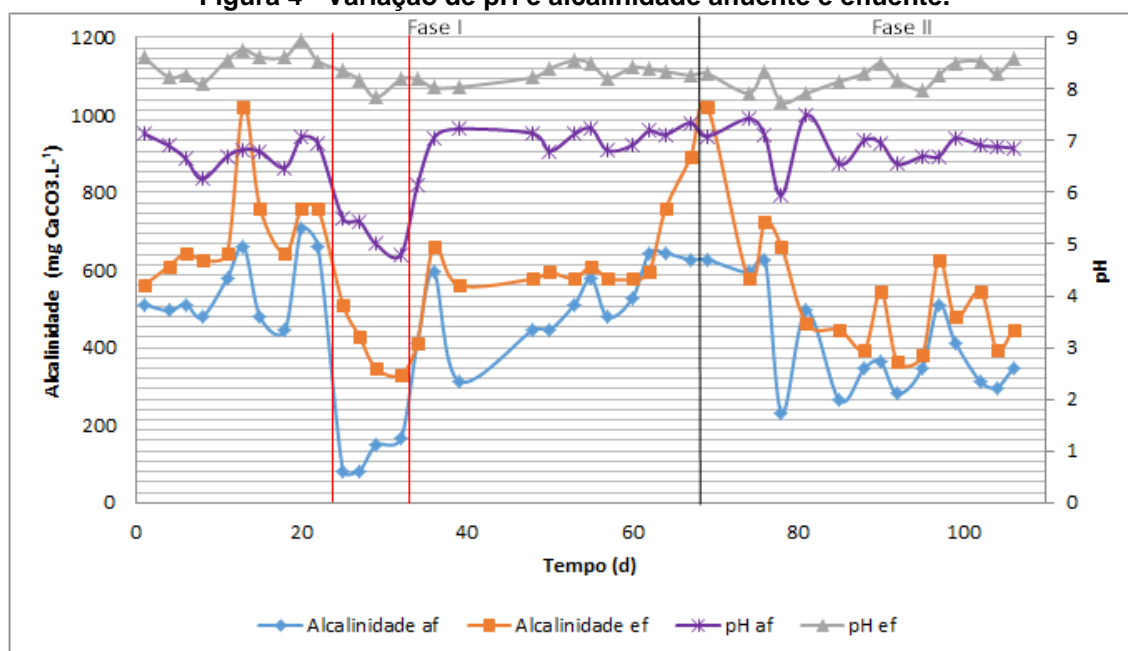
Na Tabela 4 estão expostos os valores médios de pH e alcalinidade afluente (af) e efluente (ef) ao sistema, e na Figura 4 encontram-se apresentados os resultados de pH e alcalinidade (af e ef) durante as duas fases de operação.

Tabela 4 - Médias e desvio padrão do pH e da alcalinidade afluente e efluente.

Fase	pH			Alcalinidade (mg CaCO <sub>3</sub> .L <sup>-1</sup> )	
	af sem correção	af com correção	Ef	Af	Ef
I	4,7±0,1	6,6±0,7	8,4±0,2	470,3±177,6	616,8±152,2
II	4,8±0,1	6,9±0,4	8,2±0,3	403,7±134,0	537,9±172,7

Fonte: Autoria própria.

Figura 4 - Variação de pH e alcalinidade afluente e efluente.



Legenda: a faixa entre as linhas verticais vermelhas pertencem ao experimento realizado de não introduzir uma fonte externa de alcalinidade; e a linha vertical preta representa a separação das fases I e II.

Fonte: Autoria própria.

Observa-se da Tabela 4 que os valores de pH afluente ao sistema de tratamento encontraram-se, ao longo de todo o período de operação do reator, na faixa 4,8 e 7,5. Zabel (1984) expõe que para tratar água num todo, deve-se

otimizar o pH de coagulação, para se obter melhor clarificação do efluente, no qual pode ser feito por meio de adição de um ácido ou de uma base. Portanto, o pH ácido do afluente pode ser decorrente da adição de ácido para otimizar a coagulação no tanque de flotação por ar dissolvido onde foi realizado a coleta. Sendo assim, com a finalidade de manter o pH próximo a neutralidade e não prejudicar o desempenho dos microrganismos existentes no sistema, foi adicionado ao efluente de laticínios utilizado para alimentar o reator uma solução de bicarbonato de sódio ( $0,05 \text{ mg.L}^{-1}$ ).

Nota-se da Figura 4 que os valores de pH e alcalinidade efluente, ao longo das duas fases operacionais forma superiores aos valores de afluente. Devido a isto, no período compreendido entre o 22<sup>o</sup> e 33<sup>o</sup> dia de operação (11 dias), não foi adicionado alcalinidade externa ao efluente.

Neste período a alcalinidade efluente diminui, e o pH tendeu para uma faixa ácida, portanto como será mostrado posteriormente os processos de nitrificação foi prejudicado por conta da inibição das bactérias, sendo assim voltou-se a adicionar bicarbonato de sódio ao afluente.

Segundo EPA (1993), os valores de pH considerados ótimos para que ocorra o processo de nitrificação encontraram-se entre 7,0 a 8,1, sendo que em valores acima de 8,0 ou abaixo de 7,0 ocorre inibição do crescimento das bactérias autotróficas que realizam o processo de nitrificação.

Constata-se dos resultados que durante todo o período de operação do sistema, houve um aumento de alcalinidade no efluente. Possivelmente este aumento pode ter ocorrido devido ao processo de degradação de matéria orgânica e da alta taxa respiratória dos microrganismos responsável pela estabilização da mesma, com liberação e dissolução do  $\text{CO}_2$  na água, o que contribui para o aumento da alcalinidade a carbonato (KOZAK et al., 2012; VON SPERLING, 1996).

Na Tabela 5 estão apresentadas as médias e desvio padrão das concentrações de NKT, N-amoniacal,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  e o percentual de remoção de NKT e NT, e na Figura 5 estão apresentados os resultados das concentrações de NKT efluente e afluente ao reator, e também as concentrações de  $\text{NO}_2^-$  e  $\text{NO}_3^-$  efluentes, sendo essas ao longo dos dias operacionais do sistema.

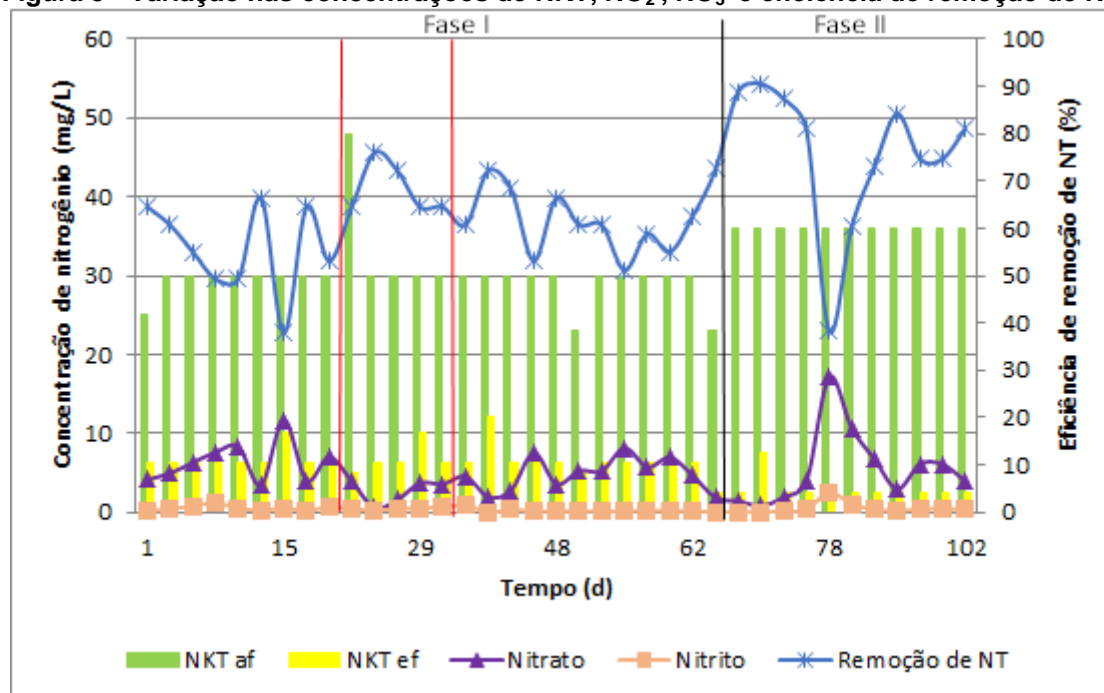
**Tabela 5 - Médias das concentrações de nitrogênio afluente e efluente em ambas as fases de operação do reator.**

Fase	NKT (mg/L)		N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)		N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	Remoção (%)	
	Af	Ef	Af	Ef	Ef	ef	NKT	NT
I	29,9±8,0	6,3±4,9	1,6±3,7	1,1±2,7	0,4±0,3	5,0±2,5	79±16	61±9
II	36,0±2,1	2,6±3,5	0,3±1,4	1,8±6,1	0,5±0,7	5,6±4,8	86±10	76±15

Fonte: Autoria própria.

Conforme apresentado na Tabela 5 houve remoção de NKT e nitrogênio total em ambas as fases, porém na fase de aeração intermitente essa remoção foi consideravelmente maior, podendo ser explicado pelo favorecimento que a aeração intermitente proporcionou as bactérias desnitrificantes.

**Figura 5 - Variação nas concentrações de NKT, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> e eficiência de remoção de NT.**



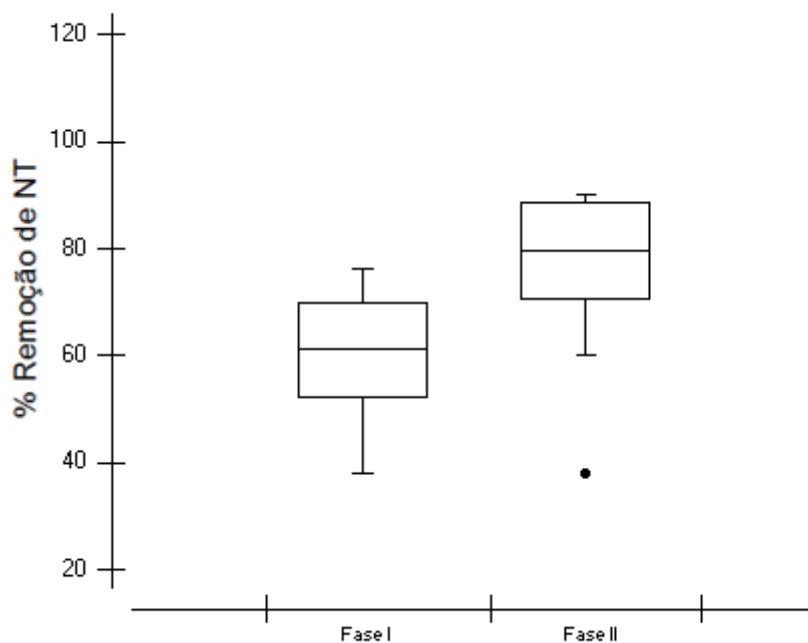
Fonte: Autoria própria.

A partir da Figura 5 observa-se que houve redução na concentração de NKT efluente, sendo este possivelmente oxidado a nitrogênio amoniacal e posteriormente levado a NO<sub>2</sub><sup>-</sup> e NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. E também nota-se que na fase II há uma queda na eficiência de remoção de NT, essa queda ocorreu devido à substituição dos compressores de ar, pois na primeira fase o sistema foi operado com dois compressores de ar com uma vazão de 3 L.min<sup>-1</sup> cada e assim foi até o dia 76 de operação, quando um dos compressores parou de

funcionar, então foram substituídos por apenas um com duas saídas, possuindo uma vazão total de ar de  $6 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ , assim deixando um acúmulo de nitrato no efluente.

A Figura 6 apresenta o gráfico Box plot da remoção de NT em porcentagem para as duas fases de operação do sistema. A remoção de NT foi calculada com base na concentração de NKT afluente e efluente.

**Figura 6 – Gráfico box plot da remoção de nitrogênio total nas duas fases de operação do sistema.**



**Fonte: Autoria própria.**

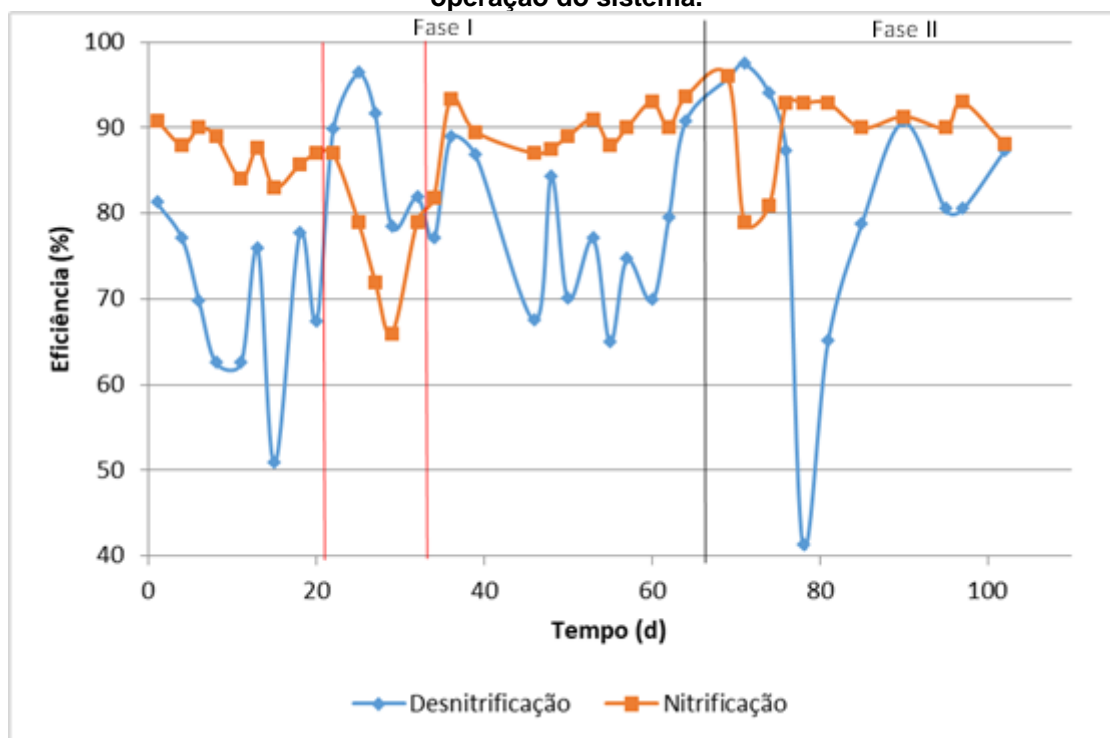
Nota-se na Figura 6 que houve uma dispersão maior ao entorno das médias na fase I, do que na fase II, podendo ser percebida pela diferença das caudas, onde na primeira essa diferença é maior. Averigua-se também um aumento no percentual de remoção de NT da fase I para a fase II. Este aumento está possivelmente ligado às condições mais adequadas no sistema, para que ocorresse o processo de nitrificação e desnitrificação simultânea.

Segundo Yamagiwa et al. (1995) reatores com biomassa imobilizada operado com condições de aeração intermitente, apresenta elevada eficiência na remoção de matéria orgânica e nitrogenada, não necessitando assim de mais de um reator para tal feito.

Já Wijffels e Tramper (1995) discorrem que uma possível explicação para a remoção de nitrogênio total em um único reator está associado à distribuição dos microrganismos responsáveis pela nitrificação e desnitrificação no interior do material suporte. Segundo Moura (2011) no interior da espuma forma-se uma zona anóxica o que proporciona o possível crescimento de microrganismos desnitrificantes, já na superfície da espuma onde tem-se altas taxas de OD crescem os microrganismos nitrificantes.

Na Figura 7 são mostradas as taxas de nitrificação e desnitrificação exercidas ao longo da operação do sistema e a diferença obtida em ambos os processos.

**Figura 7 - Variação das eficiências de nitrificação e desnitrificação em ambas as fases de operação do sistema.**



**Fonte: Autoria própria.**

Como se pode observar na Figura 7, houve uma maior variação entre os processos de nitrificação e desnitrificação na fase I, isso se deve ao fato de que nessa fase não houve condições propícias para a desnitrificação no reator como um todo, sendo esse processo realizado apenas no interior do floco e no lodo, as quais eram zonas consideradas anóxicas, bem como uma redução na taxa de desnitrificação próxima ao 15º de operação, que possivelmente ocorreu

pela limpeza das pedras de aeração. Notou-se também que quando não se fez o controle de pH como citato acima, as taxas de nitrificação decaíram, provavelmente pela inibição das bactérias autotróficas que realizam esse processo.

Na fase II quando se inicia o processo de aeração intermitente essa variação entre a nitrificação e a desnitrificação reduz, tendo em vista que as condições do sistema favoreceram uma melhoria no processo de desnitrificação, mas pouco depois ocorre uma redução na nitrificação, esse fato possivelmente ocorreu pela redução na quantidade de oxigênio no meio, tendo em vista que uma das bombas de aeração parou de funcionar, logo que se fez a substituição das bombas de aeração a nitrificação se reestabelece, porém a desnitrificação decai drasticamente, esse decaimento ao que tudo indica ocorreu pelo aumento da concentração de oxigênio no reator. No entanto, em ambas as fases experimentais ocorreram o processo de nitrificação e desnitrificação simultâneos.

Correa (2015) estudando o desempenho de um reator de leito estruturado e fluxo contínuo, com recirculação do efluente, quando o mesmo operado sob diferentes condições de aeração intermitente para tratar esgoto sanitário, obteve eficiências de desnitrificação nas fases 1 (4h AE/ 2h NA), 2 (2h AE/ 1h NA) e 3 (2h AE/ 2h NA) de respectivamente  $70\pm 20\%$ ,  $74\pm 15\%$  e  $74\pm 18\%$ . Ainda ressaltou que essa remoção nas três fases operacionais indicou que os microrganismos nitrificantes e desnitrificantes atuaram simultaneamente durante toda fase experimental.

## 5.2 REMOÇÃO DE DQO

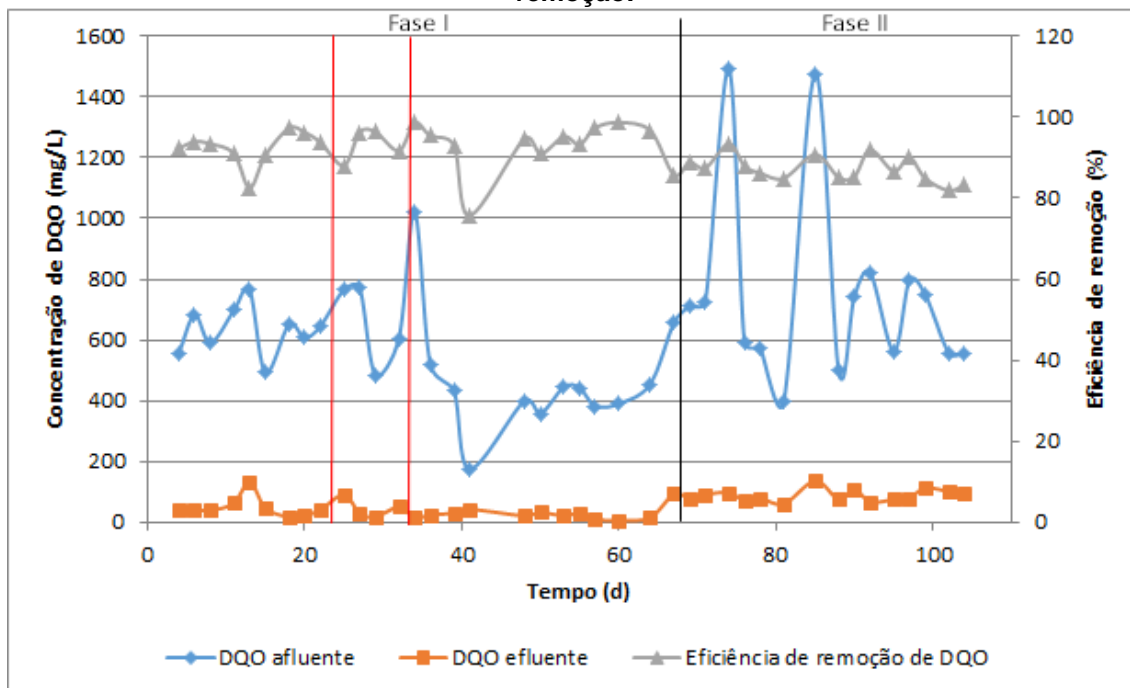
Os resultados médios de DQO afluente e efluente e o percentual de remoção deste poluente estão expostos na Tabela 6, e na Figura 8 são apresentadas as concentrações da DQO ao longo do experimento, tanto para o afluente quanto para o efluente, além da eficiência de remoção da mesma.

**Tabela 6 - Médias da DQO afluente e efluente, eficiência de remoção e desvio padrão.**

Fase	DQO afluente (mg/L)	DQO efluente (mg/L)	Eficiência de remoção (%)
I	$556\pm 5,16$	$37\pm 0,27$	$93\pm 0,04$
II	$745\pm 3,17$	$89\pm 0,47$	$87\pm 0,03$

Fonte: Autoria própria.

Figura 8 - Variação da concentração da DQO afluente e efluente, e a eficiência de sua remoção.



Fonte: Autoria própria.

A média de DQO removida nas fases I e II foi de 519 e 656 mg.L<sup>-1</sup>, respectivamente. Observando o desvio padrão obtido em ambas as fases, pode-se afirmar que o reator foi estável em termos de remoção deste constituinte.

Santos (2014) avaliando a influência da relação C/N e da fonte de carbono no processo de nitrificação e desnitrificação simultânea em um reator com a mesma configuração do utilizado no presente trabalho, operado com TDH de aproximadamente 11 horas e submetido à aeração intermitente com os períodos de 2 horas de aeração e 1 hora de não aeração, obteve um percentual médio de remoção de DQO superiores a 90% nas quatro relações C/N testadas.

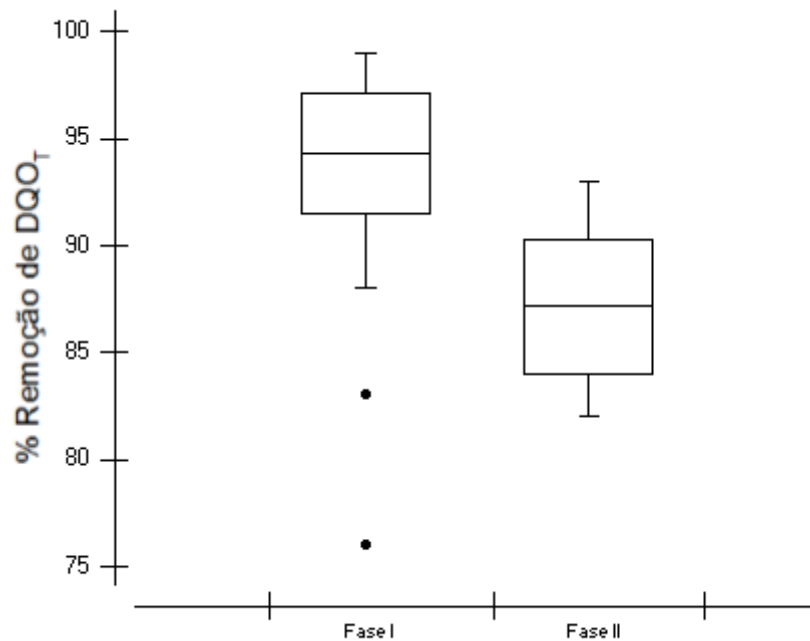
Pantoja Filho (2011) avaliando o desempenho de um reator aeróbio-anóxico de leito fixo, quanto à remoção de matéria orgânica e nitrogênio aplicado a um pós-tratamento de efluente de reator anaeróbio, atingiu resultados superiores a 93% de eficiência na remoção de DQO.

Leick et al. (2017) analisaram a remoção simultânea de DQO e nitrogênio total de esgoto sanitário em um reator de leito estruturado operado

com aeração intermitente, e obtiveram eficiências de remoção de DQO na faixa de  $89 \pm 12\%$ .

Na Figura 9 está apresentado o gráfico box plot da remoção de DQO ao longo das duas fases operacionais. Nota-se que a distribuição dos dados foi homogênea, uma vez que a dispersão é pequena no entorno da média.

**Figura 9 - Gráfico box plot da remoção de DQO nas duas fases operacionais.**



**Fonte: Autoria própria.**

Observa-se da Figura 9 que o percentual de remoção de DQO foi maior na Fase I. Isso possivelmente foi ocasionado devido o fornecimento constante de oxigênio dissolvido no reator nesta fase, diferente do que ocorreu na fase II, onde em cada ciclo de aeração intermitente, o reator ficava sem o fornecimento de OD por cerca de 60 minutos, provavelmente sendo operado nesse intervalo sob condições anóxicas.

Uma possível explicação para a maior remoção na primeira fase, é que em condições aeróbias as bactérias utilizam a matéria orgânica como receptor final de elétrons, já em condições anóxicas, essa utilização é reduzida, uma vez que as bactérias heterotróficas sob essas condições utilizam o nitrito e o nitrato como receptor de elétrons na oxidação da matéria orgânica (METCALF e EDDY, 2003).



Barana et al. (2013) avaliaram o pós-tratamento de efluente de abatedouro de aves com esta configuração de reator, no qual o sistema foi operado em diferentes condições de aeração intermitente. Os autores obtiveram uma eficiência na remoção de DQO superior a 88% durante toda operação do sistema. Ainda ressaltam que essa taxa de remoção de matéria orgânica carbonácea ocorreu devido à intensa ação de bactérias heterotróficas.

### 5.3 REMOÇÃO DE SÓLIDOS

Na Tabela 7 encontram-se os resultados médios da série de sólidos afluentes e efluentes de sólidos totais (ST), sólidos totais fixos (STF) e sólidos totais voláteis (STV).

**Tabela 7 - Valores médios de sólidos totais, sólidos totais fixos e sólidos totais voláteis.**

Fase	Sólidos (mg.L <sup>-1</sup> )					
	ST af	STF af	STV af	ST ef	STF ef	STV ef
I	1.745,2±240, 8	1.305,3±236, 9	439,9±123, 7	1.411,2±285, 1	1.252,4±220, 4	158,8±117, 6
II	1.856,7±269, 2	1.543,9±214, 2	312,8±117, 6	1.624,4±228, 5	1.497,7±195, 5	126,6±63,6

**Fonte: Autoria própria.**

Na Tabela 8 situam-se as porcentagens médias de remoção de sólidos totais, sólidos totais fixos e sólidos totais voláteis, bem como a parcela que os sólidos fixos e voláteis representam dos sólidos totais.

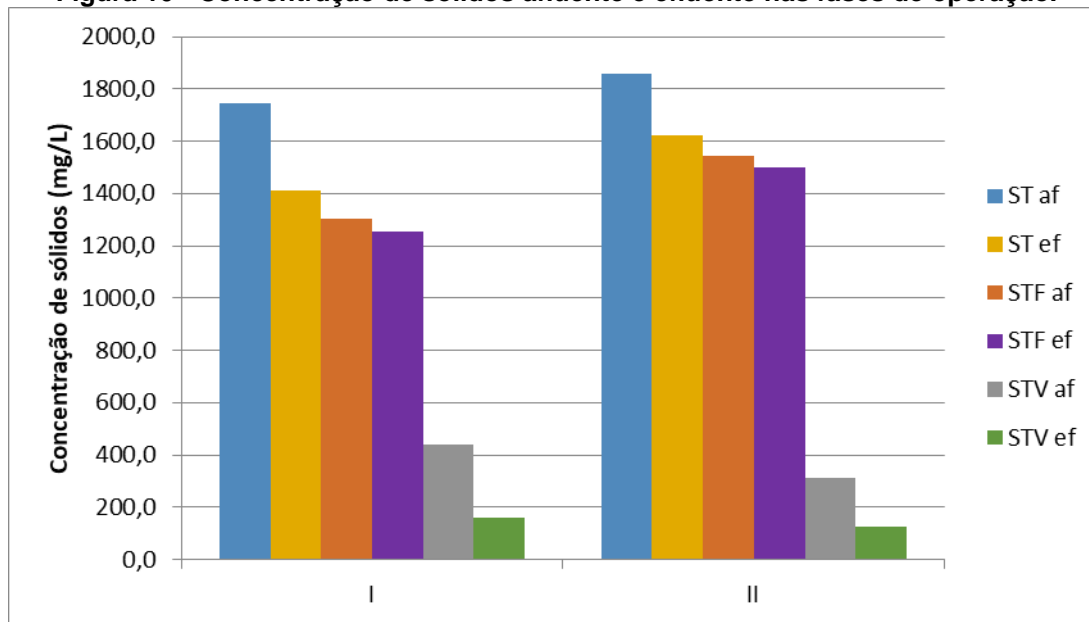
**Tabela 8 - Porcentagem de remoção de sólidos totais, fixos e voláteis.**

Fase	Remoção média de sólidos (%)			Quantidade de SF nos ST (%)	Quantidade de SV nos ST (%)
	ST	STF	STV		
I	18±17	1±25	63±25	89±7	11±7
II	12±12	2±15	59±18	92±3	8±3

**Fonte: Autoria própria.**

Na Figura 10 encontram-se concentrações médias da série de sólidos afluentes e efluentes ao sistema.

**Figura 10 - Concentração de sólidos afluente e efluente nas fases de operação.**



**Legenda:** ST af – sólidos totais afluentes; ST ef – sólidos totais efluentes; STF af – sólidos totais fixos afluentes; STF ef – sólidos totais fixos efluentes; STV af – sólidos totais voláteis afluentes; STV ef – sólidos totais voláteis efluentes.

**Fonte:** Autoria própria.

A partir da Figura 10 pode-se perceber que as concentrações de sólidos afluentes sempre são maiores que as efluentes, porém o aumento nas concentrações dos sólidos totais e fixos de uma fase para outra, ocorreu devido ao próprio efluente coletado, que possuía uma quantidade perceptível muito maior de sólidos na fase II do que durante a operação da fase I.

A quantidade de sólidos totais não sofreu grande remoção em ambas as fases, isso ocorre devido à elevada porcentagem de sólidos fixos presentes nos sólidos totais e baixo percentual de sólidos voláteis. Verifica-se também que houve uma redução na concentração de sólidos totais voláteis em ambas as fases. Segundo Moretto (2014) essa baixa concentração de sólidos voláteis indica que não houve concentração expressiva de eliminação de biomassa, o que torna esse tipo de sistema vantajoso quando comparado a sistemas que utilizam biomassa em suspensão. Assim não necessitando de um decantador para a separação da biomassa do efluente, porém é necessário realizar um descarte do lodo em excesso no fundo do reator periodicamente.

De acordo com Santos (2014) a parcela de STF não removida em ambas às fases pode ser explicada pelas elevadas concentrações de

macronutrientes (sais minerais) do próprio efluente que não foram metabolizados e a própria alcalinidade adicionada no sistema.

Os resultados do teste de correlação de Pearson citados por Wosiack (2014), mostraram que não há uma conexão entre os dados de DQO e sólidos, com isso não sendo possível avaliar o percentual de remoção de matéria orgânica com análises de sólidos. A variação dos resultados durante a operação pode ser explicada por alguns fatores, um deles é a ocorrência de um possível desprendimento de biomassa do material suporte, ou então como ressalta Gracie e Fernandes (2006), os quais salientaram que em reatores de fluxo ascendente como nesse caso, a diminuição do tempo de detenção hidráulico, acarreta em um aumento da velocidade ascensional do líquido e decorrente a isso proporciona maior arraste de sólidos do sistema.

## 6 CONCLUSÃO

Dos resultados conclui-se que o reator em estudo possui maior eficiência, em se tratando de remoção de nitrogênio total e NKT, quando submetido à aeração intermitente possuindo remoções de NT de 76% e 86% de NKT, do que quando operado com aeração contínua (61% e 79%, respectivamente).

Quanto à remoção de matéria orgânica em ambas as fases estudadas o reator se mostrou eficiente, com remoção média de 93% (fase I) e 87 % (fase II).

Conclui-se que em ambas as fases o reator removeu percentuais elevados de nitrogênio total (acima de 70%) e matéria orgânica (acima de 87%), o que indica que o mesmo pode ser operado em ambas as condições, sem afetar drasticamente a eficiência de remoção desses constituintes. Porém, este sendo operado com aeração intermitente pode vir a gerar uma economia de 33,4% de energia elétrica consumida, e também gerando uma menor quantidade de lodo, o que torna essa condição mais vantajosa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHN, Y. H. Sustainable nitrogen elimination biotechnologies: A review. **Process biochemistry**, v. 41, 1709–1721p, 2006.

APHA; AWWA; WEF. **Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater**. 22 ed. Washington, DC: APHA, 2012.

AWWA/APHA/WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 20th edition Washington: 1998.

BARANA, A.C., LOPES, D.D., MARTINS, T.H., POZZI, E., DAMIANOVIC, M.H.R.Z., DEL NERY, V., FORESTI, E. Nitrogen and organic matter removal in an intermittently aerated fixed-bed reactor for post-treatment of anaerobic effluent from a slaughterhouse wastewater treatment plant. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v.1, p.453-459, 2013.

BIDDANDA, B. A. 1985. **Microbial synthesis of macroparticulate matter**. Mar Ecol Prog Ser., 20: 241–251.

BIDDANDA, B. A.; POMEROY, L. R.. 1988. **Microbial aggregation and degradation of phytoplankton-derived detritus in seawater**. I. Microbial succession. Mar. Ecol. Prog. Ser., 42: 79–88.

BUENO, R. de F. Nitrificação e desnitrificação simultânea em reator com biomassa em suspensão e fluxo contínuo de esgoto. 143f. **Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo**, São Paulo, SP, 2011.

CETESB. Guia Técnico Ambiental de Produtos Lácteos – Série P+L. São Paulo: CETESB, 2008, 95p.

CHEN, K. C.; CHEN, J. J.; HOUNG, J. Y. Improvement of nitrogen-removal efficiency using immobilized microorganisms with oxidation–reduction potential monitoring. **Journal of industrial microbiology & biotechnology**, v. 25, n. 5, p. 229-234, 2000.

CHEN, S.; LING, J.; BLANCHETON, J-P. Nitrification kinetics of biofilm as affected by water quality factors. **Aquacultural Engineering**. V. 34, p. 179-197. 2006.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Alterado pela Resolução CONAMA 397/2008. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/conama>>. Acesso em: 17 nov. 2016.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições de lançamento de

efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. 9 p. Disponível em: [http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res11/propresol\\_lanceflue\\_30e31mar11.pdf](http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res11/propresol_lanceflue_30e31mar11.pdf). Acesso em: 18 nov. 2016.

CORREA, C. Z. Reator de leite estruturado com recirculação submetido à aeração intermitente no tratamento de esgoto sanitário. **Dissertação (Mestrado). Universidade Tecnológica Federal do Paraná**, Londrina, PR, 2015.

CORREA, C. Z.; PRATES, K. V. M. C.; AZEVEDO, C.; LOPES, D. D.; RODRIGUES, E. A.; PETERLINI, G.; BARANA, A. C. Comportamento da remoção de matéria orgânica (DQO) e nitrogênio amoniacal em um reator de leite estruturado operado sob aeração intermitente. **Scientia Plena**, v. 12, n. 3, 2016.

DEPEC – DEPARTAMENTO DE PESQUISAS E ESTUDOS ECONÔMICOS. (Bradesco). **Leite e derivados**. Out. 2016. Disponível em: <[https://www.economiaemdia.com.br/EconomiaEmDia/pdf/infset\\_leite\\_e\\_de\\_rivados.pdf](https://www.economiaemdia.com.br/EconomiaEmDia/pdf/infset_leite_e_de_rivados.pdf)>. Acesso em: 18 nov. 2016.

DEMIREL, B.; YENIGUN, O.; ONAY, T. T. Anaerobic treatment of dairy wastewaters: a review. **Process Biochemistry**, v. 400, p. 2583-2595, 2005.

DO CANTO, C. S. A.; RODRIGUES, J. A. D.; RATUSZNEI, S. M.; ZAIAT, M.; FORESTI, E. Feasibility of nitrification/denitrification in a sequencing batch biofilm reactor with liquid circulation applied to post-treatment. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 3, p. 644-654, 2008.

Environmental Protection Agency (EPA). **Nitrogen control**. Washington (DC): US EPA; 1993.

Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM. **IAQML – Índice de avaliação da qualidade do monitoramento dos efluentes líquidos industriais de laticínios**. Fundação Estadual do Meio Ambiente. Belo Horizonte: FEAM, 2015. 116p.

GADELHA, D. A. C. Desempenho de reator vertical de fluxo contínuo e leite estruturado com recirculação do efluente, submetido à aeração intermitente, para a remoção de nitrogênio de efluente de UASB tratando águas residuárias domésticas. **Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo**, São Carlos, SP, 2013.

GONÇALVES, B. Z. **Tratamento de efluente de laticínio em reator de leite estruturado aeróbio**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, PR, 2017.

GRACIE, F. R.; FERNANDES, L. ROBERTO, A. O. Desempenho de processo anaeróbio em dois estágios (reator compartimentado seguido de reator UASB)

para tratamento de águas residuárias de suinocultura. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, 2006.

HAN, H. J.; WANG, B.; LI, Y. F.; HU, H. B. Experimental Study on Simultaneous Nitrification and Denitrification in Municipal Wastewater. In: **Bioinformatics and Biomedical Engineering (iCBBE), 2010 4th International Conference on**. IEEE, 2010. p. 1-4.

HE, S. B; XUE, G; WANG, B. Z. Factors affecting simultaneous nitrification and de-nitrification (SND) and its kinetics model in membrane bioreactor. **Journal of hazardous materials**, v. 168, n. 2, p. 704-710, 2009.

HIETANEN, S. 1998. **Literature on microbiology of aggregates originating from phytoplankton blooms**. Meri., 37: 37–44.

HU, J., LI, D., LIU, Q. Effect of Organic Carbon on Nitrification Efficiency and Community Composition of Nitrifying Biofilms, **Journal of Environmental Sciences**, v. 21, pp. 387 – 394, 2009.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Panorama do Leite. EMBRAPA-Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2015. Disponível em:  
<<https://www.embrapa.br/documents/1355117/1528925/Panorama+do+Leite++outubro+2015/f97da482-483f-4451-bd26-e9f7e1d95c4b>> Acesso em: maio 2016.

JANCZUKOWICZ, W.; ZIELIN'SKI, M.; DE BOWSKI, M. **Biodegradability evaluation of dairy effluents originated in selected sections of dairy production**. Bioresource Technology, v. 99, p. 4199-4205, 2008.

JOO, H.; HIRAI, M.; SHODA, M. Characteristics of ammonium removal by heterotrophic nitrification-aerobic denitrification by *Alcaligenes faecalis*. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, v.100, n.2, p.184-191, 2005.

JOO, H.; HIRAI, M.; SHODA, M. Piggery wastewater treatment using *Alcaligenes faecalis* strain No. 4 with heterotrophic nitrification and aerobic denitrification. **Water Research**, v.40, n.16, p.3029-3036, 2006.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. Tratamento de esgoto doméstico. **ABES. Rio de Janeiro, Brasil**, 2005

KOKARE, C. R.; CHAKRABORTY, S.; KHOPADE, A. N.; MAHADIK, K. R. Biofilm: Importance and applications. **Indian Journal of Biotechnology**. v. 8, p. 159-168, 2009.

KOZAK, C.; JUSTINO, N. M.; CRISTO, A. da C.; SILVEIRA, J. W. P. **Comparação entre tratamento biológico aeróbio e anaeróbio de esgotos domésticos**. Semana Acadêmica de Engenharia Química-SAEQ: [s.n.], 2012. 2 p. Disponível

em:<<http://saeq.pg.utfpr.edu.br/site/artigos/2012/5.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2016.

LEICK, S. A.; OLIVEIRA, J. G. B.; TAVARES, K. A.; LOPES, D. D.; BARANA, A. C. Efeito da aeração e recirculação na remoção de nitrogênio e demanda química de oxigênio de esgoto sanitário em um reator de leito estruturado. **Engenharia Agrícola**, v. 37, n. 6, 2017.

LI, J.; PENG, Y.; GU, G.; WEI, S. Factors affecting simultaneous nitrification and denitrification in an SBBR treating domestic wastewater. **Frontiers of Environmental Science & Engineering in China**, v. 1, n. 2, p. 246-250, 2007.

LI, M.; NAKHLA, G.; ZHU, J. Simultaneous Carbon and nitrogen removal with enhanced bioparticle circulation in a circulating fluidized bed biofilm reactor. **Chem. Eng. J.** 181-182, 35-44, 2012.

LOWRY, O H., ROSEBROUGH, N.J., FARR, A L., RANDALL, R. Protein measurement with the Folin phenol reagent. *J. Biol. Chem*, v. 193, p. 265-275, 1951.

LUOSTARINEN, S.; LUSTE, S.; VALENTÍN, L.; RINTALA, J. Nitrogen removal from on-site treated anaerobic effluents using intermittently aerated moving bed biofilm reactors at low temperatures. **Water research**, v. 40, n. 8, p. 1607-1615, 2006.

MACHADO, E. L.; KIST, L. T.; KICH, R. O. M.; SCHNEIDER, L. **Gestão tecnológica ambiental de um indústria de laticínios: ênfase em efluentes**. In: CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL. 2006, Punta del Este.

MACHADO, R.M.G.; FREIRE, V.H.; SILVA, P.C.; FIGUERÊDO, D.V.; FERREIRA, P.E. **Controle ambiental nas pequenas e médias indústrias de laticínios**. Projeto Minas Ambiente, Belo Horizonte, 224p., 2002.

METCALF & EDDY Inc. **Wastewater engineering: treatment and reuse**. Tata McGraw-Hill Edition, 2003.

METCALF & EDDY, INC. **Wastewater Engineering: treatment, disposal and reuse**. 3rd Ed. Singapore, McGraw-Hill, 1991.

MENDES, A. A.; CASTRO, H. F.; PEREIRA, E. B.; FURIGO Jr, A. **Aplicação de lipases no tratamento de águas residuárias com elevados teores de lipídeos**. Química Nova, v. 28, n. 2, p. 296-305, 2005.

MIN, H.; KYU, S.; HYUB, J.; MOON, J. Bioresource Technology Microbial community structure in a thermophilic aerobic digester used as a sludge pretreatment process for the mesophilic anaerobic digestion and the enhancement of methane production. **Bioresource Technology**, v. 145, p. 80–89, 2013.



MIRON, Y., ZEEMAN, G., VAN LIER, J. B., LETTINGA, G. **The role of sludge retention time in the hydrolysis and acidification of lipids, carbohydrates and proteins during digestion of primary sludge in CSTR systems**, Water Research, v.34, p.1705-1713, 2000.

MORETTO, C. Remoção de matéria orgânica e nitrogenada de efluente de indústria de ração animal em reatores de leito estruturado e móvel. **Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Londrina**, Londrina, PR, 2014.

MOURA, R. B. D. E. Desempenho de um reator vertical de fluxo contínuo e leito estruturado com recirculação do efluente, submetido à aeração intermitente, na remoção de carbono e nitrogênio de um efluente sintético. **Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo**, São Carlos, SP, 2011.

MOURA, R.B., DAMIANOVIC, M. H. R. Z., FORESTI, E. Nitrogen and carbon removal from synthetic wastewater in a vertical structured-bed reactor under intermittent aeration. **J. Environ. Manage.** v.98, p.163 – 167, 2012. doi:10.1016/j.jenvman.2012.01.009.

Nakhla, G.; Al-Sabawi, M.; Bassi, A.; Liu, V.; J. Harzard. Mater. 2003, B102, 243.

NETTO, A. P. O. **Reator anaeróbio-aeróbio de leito fixo em escala piloto, com recirculação da fase líquida, aplicado ao tratamento de esgoto sanitário**. 2011. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo.

NOGUEIRA, L. A. H. **Biodigestão: A alternativa energética**. São Paulo: Nobel, 1992. 93 p.

NOCKO, L. M. Remoção de carbono e nitrogênio em reator de leito móvel submetido à aeração intermitente. **Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo**, São Carlos, SP, 2008.

OLIVEIRA, P. A. V. de. Produção e aproveitamento do biogás. **Tecnologias para o manejo de resíduos na produção de suínos: Manual de boas praticas**. Concórdia: Gestão Integrada de Ativos Ambientais, 2004. Cap. 4, p. 42-55.

ORDÓÑEZ, J. A. **Tecnologia de alimentos: alimentos de origem animal**. Porto Alegre: Artmed: [s.n.], 2005. 279 p. v. 2.

O'REILLY, E., RODGERS, M. ZHAN, X. M. Pumped flow biofilm reactors (PFBR) for treating municipal wastewater. **Water Science & Technology**, v. 57, n. 12; p. 1857-1865, 2008.

ORHON, D.; GORGUN, E.; ARTAN, N. **Biological treatability of dairy wastewaters**. Water Research, v. 27, p. 625-633, 1993.

PANTOJA FILHO, J. L. R. **Remoção de matéria orgânica carbonácea e nitrogênio em reator aeróbio-anóxico de leito fixo (RAALF) aplicado ao pós-tratamento de efluente de reator anaeróbio.** 2011, 173 f. Tese (Doutorado Hidráulica e Saneamento) Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Hidráulica e Saneamento. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2011.

PEIXOTO, A. L. **Terapia Nutricional Enteral e Parenteral.** AS Sistemas, 2015  
PENG, J.; SONG, Y.; WANG, Y.; YUAN, P.; LIU, R. International Biodeterioration & Biodegradation Spatial succession and metabolic properties of functional microbial communities in an anaerobic baffled reactor. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 80, p. 60–65, 2013.

PEREIRA, R. O. Combinação de tratamento biológico aeróbio com processos oxidativos avançados visando intensificar a remoção de matéria orgânica em efluentes da indústria têxtil e de celulose kraft. **Dissertação (Mestrado).** Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2007.

PONTES, Patrícia Procópio. **Reatores UASB aplicados ao tratamento combinado de esgotos sanitários e lodo excedente de filtro biológico percolador.** 2003. Tese de Doutorado. Ph. D. Thesis. Federal University of Minas Gerais–School of Engineering, 220 p.(in Portuguese).  
POSTMA, T.; STROES, J.A.P. Lipid screening in clinical. *Clin. Chim. Acta*, v. 22, p. 569- 578, 1968.

RITTMANN, B. E.; MCCARTY, P. L. Environmental biotechnology: principles and applications. **New York: McGrawHill**, v. 400, 2001.

SANT'ANNA JUNIOR, G. L. **Tratamento biológico de efluentes: fundamentos e aplicações.** Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 418p.

SANTOS, C. E. D. dos. **Influência da relação carbono/nitrogênio e da fonte de carbono no processo de nitrificação desnitrificação simultânea em reator de leito estruturado.** 2014. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SANTOS, P. I. de A. **Remoção de DQO e de nitrogênio, e estudo dos consórcios microbianos em sistema com três reatores sobrepostos, em série, alimentado com esgoto sanitário.** 2004. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo.

Schmidt, I.; Sliemers, O.; Schmid, M.; Bock, E.; Fuerst, J.; Kuenen, J. G.; Strous, M. **New Concepts of Microbial Treatment Processes for the Nitrogen Removal in Wastewater.** FEMS Microbiology Reviews, v. 27, p. 481-492, 2003  
SEDLAK, Richard L. **Phosphorus and Nitrogen Removal From Municipal Wastewater.** 2. ed. 1991.

SHARMA, B.; AHLERT, R. C. Nitrification and nitrogen removal. **Water Research**, v.11, n.10, p.897-925, 1977.

SILVA, B. G. **Efeitos do tempo de aeração no desempenho de reator de leite estruturado e aeração intermitente usado para remoção de matéria orgânica e nitrogênio de efluente de reator UASB**. 2016. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SILVA, D. J. P. da. **Guia para implantação de um sistema de gestão ambiental na agroindústria**: um estudo da indústria de laticínios. Série Sistema de Gestão Ambiental. Apostila. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2011. 21 p.

SOUZA, C. de F. Produção de biogás e tratamento de resíduos: Biodigestão anaeróbia. **Ação Ambiental**, Viçosa, n. 34, p.26-29, nov./dez. 2005.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Editora UFMG, 1996.

VON SPERLING, M.; CHERNICHARO, C. A. L. **Biological wastewater treatment in warm climate countries**. 1. ed. Londres: IWA Publishing, 2005. v. 2. 1460 p.

TRONCO, V. M. **Controle físico-químico do leite**. Santa Maria, RS: UFSM. Manual Para Inspeção da Qualidade do Leite. 1997. p.103-105.

TONACO, A. S.; PAULA, B. A. de; MOREIRA, C. Q.; MALARD, A. A. M.; MENEGHIN, F.; GUSMÃO, S. **Guia técnico ambiental da indústria de laticínios**. Belo Horizonte, MG: FIEMG - Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais, FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais, 2014. 71 p. Disponível em:<[http://www.feam.br/images/stories/producao\\_sustentavel/GUIAS\\_TECNICOS\\_AMBIENTAIS/guia\\_laticinios.pdf](http://www.feam.br/images/stories/producao_sustentavel/GUIAS_TECNICOS_AMBIENTAIS/guia_laticinios.pdf)>. Acesso em: 17 nov. 2016.

VAZQUEZ-PADIN JR, FERNANDEZ, I. MORALES, N. CAMPOS, J, L. MOSQUERACORRAL, A. MENDEZ, R. Autotrophic nitrogen removal at low temperature. **Water Sci. Technol.** 63:1282–1288, 2011.

VERDUGO, P.; ALLDREDGE, A. L.; AZAM, F.; KIRCHMAN, D. L.; PASSOW, U.; SANTSCHI, P. H. 2004. **The oceanic gel phase: a bridge in the DOM-POM continuum**. *Marine Chemistry*, 92:67–85.

ZABEL, T. Flotation in water treatment. In: IVES, K.J. ed. *The scientific basis of flotation*. NATO Advanced Science Institute on the Scientific Basis of Flotation. Proceedings. Cambridge, England, Jul, Martinus Nijhoff Publishers, The Hague, p.349-77, 1984.

ZENG, R. J.; LEMAIRE, R.; YUAN, Z.; KELLER, J. Simultaneous nitrification, desnitrification, and phosphorus removal in a lab-scale sequencing batch reactor. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 84, n. 2, p. 170-178, 2003.

ZOPPAS, F. M. Estudo da remoção de nitrogênio em efluentes por nitrificação e desnitrificação simultânea. **Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, Porto Alegre, RS, 2012.

WIJFFELS, R. H.; TRAMPER, J. Nitrification by immobilized cells. *Enzyme and Microbial Technology*, v. 17, n. 6, p. 482-492, 1995.

WOLFF, D. B.; PAUL, E.; COSTA, R. H. R. de. Influência do tipo de material suporte no desempenho de reatores biológicos de leito móvel na remoção de carbono e nitrificação de esgoto sanitário. **Eng Sanit Ambient**, v.15, n.2, abr/jun 2010, p.149-154.

WOSIACK, P. A. Remoção de matéria orgânica carbonácea e nitrogenada de águas residuárias da indústria de ração animal em reator de leito estruturado. **Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Ponta Grossa**, Ponta Grossa, PR, 2014.

YAMAGIWA, K.; OOHIRA, Y.; OHKAWA, A. Simultaneous removal of carbonaceous and nitrogenous pollutants by a plunging liquid jet bioreactor with cross-flow filtration operated under intermitente aeration. *Bioresource Technology*, v. 53, n. 1, p. 57-62, 1995.