

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

**ABEL SIDNEY BRAVIN JUNIOR**

**APLICAÇÃO DE CONDUTO CORRUGADO NA REMOÇÃO DE NITROGÊNIO  
AMONÍACAL EM SISTEMA DE *AIR STRIPPING***

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**LONDRINA**  
**2016**

**ABEL SIDNEY BRAVIN JUNIOR**

**APLICAÇÃO DE CONDUTO CORRUGADO NA REMOÇÃO DE  
NITROGÊNIO AMONÍACAL EM SISTEMA DE *AIR STRIPPING***

Monografia apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Londrina.

Orientador: Prof. Dr. Ajadir Fazolo

**LONDRINA  
2016**

## TERMO DE APROVAÇÃO



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



## TERMO DE APROVAÇÃO

Aplicação de conduto corrugado na remoção de nitrogênio amoniacal em sistema de *air stripping*

por

Abel Sidney Bravin Junior

Monografia apresentada no dia 23 de junho de 2016 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).

---

Profa. Dra. Joseane Debora Peruço Theodoro  
(UTFPR)

---

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

---

Prof. Dr. Ajadir Fazolo  
(UTFPR)  
Orientador

---

Profa. Dra. Ligia Flávia Antunes Batista  
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Ambiental

"A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso"

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer aos meus familiares por todo apoio dado a mim desde o início de minha vida acadêmica, sempre me apoiando em toda e qualquer decisão. Sem eles não teria chegado até este ponto, foram peças fundamentais e sempre serão.

Agradeço a todos os envolvidos direta e indiretamente em minha formação na instituição Universidade Tecnológica Federal do Paraná, onde conheci pessoas brilhantes que me ensinaram muitas coisas. Um agradecimento especial ao meu orientador, Prof. Dr. Ajadir Fazolo, pela paciência, dedicação, orientação e conhecimentos valiosíssimos a mim passados.

Na realização deste trabalho tive ajuda de amigos, os quais gostaria de agradecer: Thalita Pereira Delduque, Stephanie Luri Kacuta, Lilian Costa, André Abou Faissal e Gabriela dos Santos Rodolfo.

## RESUMO

**BRAVIN JR., ABEL SIDNEY.** Aplicação de conduto corrugado na remoção de nitrogênio amoniacal em sistema de air stripping. 2016. 48 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2016.

Nesta pesquisa foi realizada a investigação da aplicação de um conduto corrugado em um sistema de *air stripping*, mostrando uma nova configuração para esta tecnologia levando em conta suas vantagens dimensionais e energéticas, por possuir facilidade em sua montagem e menor número de componentes estruturais. O diferencial deste sistema está na turbulência gerada na interface gás-líquido, a qual é realizada pelo conduto corrugado. Foi avaliada a influência do pH inicial (9 a 12), vazão de ar ( $1000$  a  $2000 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ) e vazão de líquido ( $500$  a  $1000 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ) na eficiência de remoção de nitrogênio amoniacal de efluente sintético, utilizando o planejamento estatístico Delineamento do Composto Central Rotacional (DCCR) em 20 ensaios. Os resultados foram analisados estatisticamente com nível de significância de 5% e um modelo matemático que expressa a remoção de nitrogênio amoniacal deste sistema pôde ser criado. O pH inicial foi o fator mais influente na remoção do  $\text{N-NH}_3$ , enquanto que a vazão de ar foi menos expressiva e a vazão de líquido teve efeito negativo, dentro das condições aplicadas, já que seu aumento diminuiu o tempo de detenção do efluente dentro do conduto corrugado. A maior porcentagem de remoção encontrada foi de 58,7% nos ensaios planejados inicialmente e de 70,9% em um ensaio de validação do modelo matemático, onde foram testadas as influências máximas do pH, vazão de ar e vazão de líquido.

**Palavras-chave:** *Air stripping*. Nitrogênio amoniacal. Remoção de amônia. Conduto corrugado.

## ABSTRACT

**BRAVIN JR., ABEL SIDNEY.** Corrugated conduit application in ammoniacal nitrogen removal on *air stripping* system. 2016. 48 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2016.

In this research, it was accomplished the investigation of a corrugated conduit application on an air stripping system, showing a new configuration for this technology taking in account its dimensional and energetical advantages, having facility in its assembly and a little number of structural components. The differential of this system is in the turbulence created on the gas-liquid interface, which is performed by the corrugated conduit. It was evaluated the influence of initial pH (9 to 12), air flow (1000 to 2000 L.min<sup>-1</sup>) and liquid flow (500 to 1000 mL.min<sup>-1</sup>) in the ammoniacal nitrogen removal efficiency of synthetic wastewater, using the statistical design Central Composite Rotacional Design (CCRD) in 20 trials. The results were statistically analyzed with significance level of 5% and a mathematic model that express the ammoniacal nitrogen removal of this system was created. The initial pH was the most influential factor on the N-NH<sub>3</sub> removal, while the air flow was less expressive and the liquid flow had a negative effect, since its increase reduces the effluent's retention time inside the corrugated conduit. The greatest removal percentage found was 58,7% on trials originally planned and 70,9% in a validation test of the mathematic model, which the maximum influence of pH, air flow and liquid flow was tested.

**Keywords:** *Air stripping*. Ammoniacal Nitrogen. Ammonia removal. Corrugated conduit.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Proporção entre nitrogênio amoniacal livre e ionizado com a temperatura fixa.....	18
Figura 2: Classificação dos sistemas de arraste de acordo com as características de escoamento das fases líquida e gasosa: (a) escoamento em contracorrente; (b) escoamento em co-corrente; (c) escoamento cruzado. ....	20
Figura 3: Componentes do balanço de massa em uma torre de Air Stripping. 22	
Figura 4: Sistema de Air Stripping com conduto corrugado montado, onde: (1) dosadora eletromagnética; (2) soprador de ar; (3) entrada do conduto corrugado; (4) saída para o gás de arraste e (5) saída para o efluente tratado. ....	26
Figura 5: Conduto corrugado montado.....	27
Figura 6: Soprador de ar e cano controlador de vazão. ....	28
Figura 7: Dosadora eletromagnética utilizada para bombear o efluente sintético. ....	29
Figura 8: Eficiência de remoção de nitrogênio amoniacal por ensaio. ....	33
Figura 9: Diagrama de Pareto. ....	35
Figura 10: Comparação entre valores previstos e obtidos experimentalmente de eficiência de remoção do nitrogênio amoniacal.....	37
Figura 11: Comparação da influência da vazão de ar e vazão de líquido na remoção de nitrogênio amoniacal de efluente de curtume.....	39
Figura 12: Comparação da influência da vazão de ar e vazão de líquido na remoção de nitrogênio amoniacal. ....	40
Figura 13: comparação da influência da vazão de ar e pH na remoção de nitrogênio amoniacal de efluente de curtume.....	41
Figura 14: comparação da influência da vazão de ar e pH na remoção de nitrogênio amoniacal. ....	42
Figura 15: Comparação da influência da vazão de líquido e pH na remoção de nitrogênio amoniacal de efluente de curtume.....	43
Figura 16: comparação da influência da vazão de líquido e pH na remoção de nitrogênio amoniacal. ....	43

Figura 17: Perda de carga em cada metro cúbico soprado de ar por área em um minuto na torre de air stripping.....	44
Figura 18: Perda de carga em cada metro cúbico soprado de ar por área em um minuto no sistema de air stripping com conduto corrugado. ....	45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores encontrados para as variáveis independentes de estudo utilizando DCCR.....	31
Tabela 2: Resultados obtidos de remoção de nitrogênio amoniacal. ....	32
Tabela 3: Efeito das variáveis independentes na eficiência do sistema.....	34
Tabela 4: Coeficientes de regressão gerados.....	35
Tabela 5: Análise de variância (ANOVA). ....	36
Tabela 6: Diferenças percentuais entre os valores observados experimentalmente e os previstos pelo modelo matemático.....	37
Tabela 7: Ensaio de validação do modelo matemático. ....	38

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANOVA Análise de variância

AWWA American Water Works Association

DCCR Delineamento do composto central rotacional

G/L Razão Ar-Líquido

N-NH<sub>3</sub> Nitrogênio amoniacal em sua fase livre

N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> Nitrogênio amoniacal em sua forma ionizada

PROSAB Programa de Pesquisa em Saneamento Básico

PVC Policloreto de vinila

Qar Vazão de ar

Qliq Vazão de líquido

USEPA United States Environmental Protection Agency

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>2 OBJETIVO</b> .....	<b>15</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	15
2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO .....	15
<b>3 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>16</b>
3.1 NITROGÊNIO AMONIACAL NO MEIO AMBIENTE .....	16
3.1.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS .....	16
3.1.2 NITROGÊNIO AMONIACAL NOS CORPOS D'ÁGUA E SEU EQUILÍBRIO QUÍMICO .....	16
3.1.2 EFEITOS DELETÉRIOS DO NITROGÊNIO AMONIACAL .....	18
3.2 CONFIGURAÇÕES DE SISTEMAS DE STRIPPING .....	19
3.3 STRIPPING DO NITROGÊNIO AMONIACAL .....	20
3.4 BALANÇO DE MASSA NA TORRE DE STRIPPING .....	22
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>25</b>
4.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE AIR STRIPPING .....	25
4.1.1 CONDUTO CORRUGADO .....	26
4.1.2 SOPRADOR DE AR .....	27
4.1.3 TERMÔMETRO .....	28
4.1.5 DOSADORA ELETROMAGNÉTICA .....	28
4.1.6 MANÔMETRO .....	29
4.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	30
4.3.2 PARÂMETROS DE ESTUDO .....	31
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>32</b>
5.2 PERDA DE CARGA .....	44
<b>6 CONCLUSÃO</b> .....	<b>46</b>

<b>7 SUGESTÕES .....</b>	<b>47</b>
<b>8 REFERÊNCIAS .....</b>	<b>48</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A tecnologia denominada *air stripping* baseia-se nos fundamentos da transferência de massa, onde um composto indesejado como nitrogênio amoniacal, gás sulfídrico ou um composto orgânico volátil presente em um efluente, mais comumente água residuária, seja removido, por meio do contato forçado entre o gás de arraste (ar) e o efluente contendo o poluente. A turbulência e a área de contato entre os fluidos são fatores importantes na eficiência de remoção do contaminante (METCALF & EDDY, 2003).

O processo *air stripping* do nitrogênio foi idealizado como uma modificação do processo de aeração para remoção de nitrogênio amoniacal dissolvido em águas residuária (METCALF & EDDY, 2003). Inicialmente os sistemas de *air stripping* podem ser divididos em dois grandes grupos: sistemas nos quais a fase líquida é contínua, havendo dispersão da fase gasosa, e sistemas na qual a fase gasosa é contínua, havendo a dispersão da fase líquida (SOUTO, 2009). No geral, os sistemas nos quais a fase líquida é contínua são denominados tanques de arraste, e os sistemas nos quais a fase gasosa é contínua são denominadas torres de arraste. Dentre esses dois grandes sistemas, a concepção mais conhecida é a torre de arraste com recheio.

As torres de arraste com recheio são essencialmente cilindros preenchidos com algum material de recheio, que oferece alta superfície específica. A fase líquida passa por esse recheio, onde sofre turbulência, aumentando a área de contato entre a fase líquida e gasosa, maximizando o *stripping* (SOUTO, 2009). Atualmente podem ser encontradas variações desses tipos de sistemas sendo testados em universidades brasileiras, como: *Stripping* em torre de recheio, reator de fluxo pistonado, reator de chicanas, dentre outros (PROSAB, 2009). As torres de arraste comumente possuem custos operacionais mais elevados, já que possuem grandes dimensões e necessitam de material de recheio, aumentando a perda de carga e energia neste tipo de tecnologia.

O sistema utilizado neste trabalho utiliza os princípios de remoção de nitrogênio amoniacal por *air stripping*, porém em um sistema com concepção diferente e materiais alternativos em relação aos convencionais, visando promover a remoção de contaminantes com um menor custo operacional,

energético e de fácil montagem já que possui menor número de peças e não possui recheio. O principal componente estrutural é o conduto corrugado, material por onde o líquido escoar e sofre turbulência, visto que a rugosidade do conduto o faz dispensar a presença de um recheio, além de diminuir a perda de carga.

Portanto, o estudo realizado é de extrema importância, já que mostra um sistema inovador e com características de ser um baixo custo tanto operacional quanto energético para a remoção de um poluente comumente encontrado em efluentes líquidos.

## 2 OBJETIVO

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a eficiência de remoção de nitrogênio amoniacal utilizando conduto corrugado em sistema de *Air Stripping*.

### 2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

O presente trabalho tem como objetivo específico:

- Avaliar os efeitos da vazão de ar, vazão de efluente e pH na remoção de nitrogênio amoniacal.
- Obter modelo matemático que descreva a eficiência de remoção do nitrogênio amoniacal do efluente sintético.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 NITROGÊNIO AMONIACAL NO MEIO AMBIENTE

##### 3.1.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

O nitrogênio amoniacal é um gás incolor a temperatura ambiente, que possui um odor extremamente forte e é consideravelmente mais leve que o ar (densidade relativa ao ar, 0,5963). Apresenta pontos de fusão e ebulição de  $-77,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $-33,35\text{ }^{\circ}\text{C}$ , respectivamente, e é bastante solúvel em água, pois a  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  e 1 atmosfera, um volume de água dissolve 702 volumes de amônia, resultando em uma solução alcalina (FELIX; CARDOSO, 2004).

O nitrogênio amoniacal é um composto de fórmula molecular  $\text{N-NH}_3$  em sua forma livre e  $\text{N-NH}_4^+$  em sua forma ionizada. A principal razão para sua grande solubilidade em água, segundo Russel (1994), é que o nitrogênio amoniacal é uma molécula polar, devido ao arranjo assimétrico de seus átomos, característica essa que provoca acúmulo de carga negativa no átomo de Nitrogênio, tornando sua extremidade negativa eletricamente. Os átomos de hidrogênio são carregados positivamente, garantindo sua polaridade.

##### 3.1.2 NITROGÊNIO AMONIACAL NOS CORPOS D'ÁGUA E SEU EQUILÍBRIO QUÍMICO

Segundo PROSAB (2009), durante seus ciclos, o nitrogênio pode ser encontrado em diversas formas na biosfera, porém as predominantes são o nitrogênio molecular ( $\text{N}_2$ ), nitrogênio orgânico (fórmula variável), nitrogênio amoniacal livre ( $\text{NH}_3$ ), nitrogênio amoniacal ionizado ( $\text{NH}_4^+$ ), íon nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) e íon nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ).

Nos meios aquáticos e no solo as diferentes formas de nitrogênio são metabolizadas biologicamente nos processos de amonificação, assimilação, nitrificação e desnitrificação (MAIER et al., 2009, p. 182).

Von Sperling (2005) diz que o nitrogênio amoniacal pode apresentar-se no meio líquido em duas formas: livre ( $\text{NH}_3$ ) ou ionizado ( $\text{NH}_4^+$ ).

A equação que descreve o equilíbrio entre as fases ionizada e livre do nitrogênio amoniacal, segundo o PROSAB (2009), está descrita na Equação 1:



A variação da concentração de  $\text{NH}_3$  na solução de acordo com o pH e a temperatura, conforme Von Sperling (2005<sup>a</sup>, p. 99), está descrito na Equação 2:

$$\frac{[\text{NH}_3]}{[\text{NH}_4^+] + [\text{NH}_3]} = \frac{100}{1 + 10^{(0,09018 + (\frac{2729,92}{T+273,20}) - \text{pH})}} \quad (2)$$

Sendo:

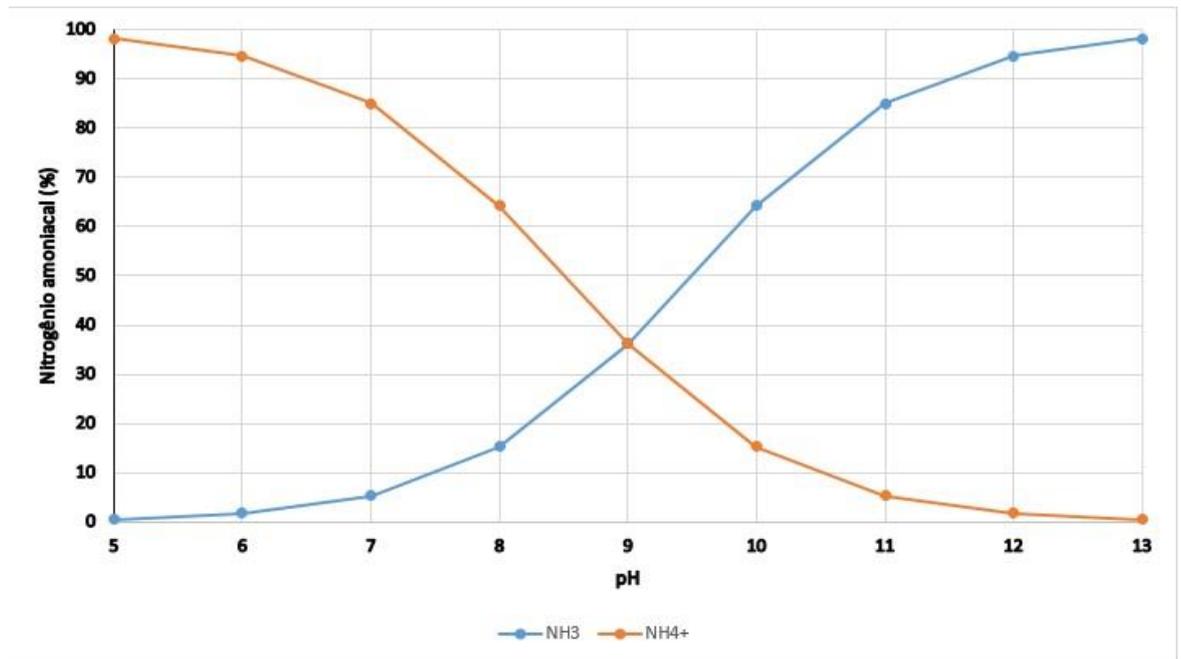
T= Temperatura do meio (°C);

pH= Potencial hidrogeniônico (adimensional);

$[\text{NH}_3]$  = Concentração de nitrogênio amoniacal ( $\text{mg. L}^{-1}$ )

$[\text{NH}_4^+]$  = Concentração de nitrogênio amoniacal ionizado ( $\text{mg. L}^{-1}$ )

Conforme Von Sperling (2005a, p. 322), o aumento do pH desloca o equilíbrio para o lado esquerdo, favorecendo a presença de amônia livre. Com pH acima de 11, praticamente toda a amônia está na forma livre. Fixando-se a temperatura em 25 °C, Souto (2009, p. 157) ilustrou a variação da presença de nitrogênio amoniacal com a mudança de pH (Figura 1):



**Figura 1: Proporção entre nitrogênio amoniacal livre e ionizado com a temperatura fixa.**  
**Fonte: Autoria própria.**

### 3.1.2 EFEITOS DELETÉRIOS DO NITROGÊNIO AMONIACAL

As consequências do despejo de efluentes com altas cargas de nitrogênio amoniacal em corpos hídricos podem causar eutrofização, redução do oxigênio dissolvido e morte de algumas formas de vida, já que o nitrogênio amoniacal em sua forma livre é tóxico.

O nitrogênio amoniacal, segundo Von Sperling (2005), quando em grandes quantidades no ambiente aquático juntamente com o fósforo, os quais são nutrientes, podem levar ao crescimento exacerbado de algas e outras plantas aquáticas, onde o corpo hídrico em que estão presentes pode ser levado a uma situação de eutrofização.

O despejo de efluentes com grandes cargas de nitrogênio amoniacal também podem causar depleções dos níveis de oxigênio dissolvido e até mesmo a redução para um ambiente anóxico. Segundo Souto (2009), isso pode ocorrer por conta de que a maioria dos processos de oxidação do nitrogênio amoniacal em nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) e nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) dependem do consumo do oxigênio dissolvido disponível no corpo hídrico.

O outro grande problema é a toxicidade do nitrogênio amoniacal em sua forma livre, não ionizada. Esta forma de se encontrar o nitrogênio amoniacal é mais tóxica do que a ionizada, segundo a USEPA (1999), porque é uma molécula

neutra, capaz de se difundir no tecido epitelial de organismos aquáticos muito mais rapidamente do que em sua forma ionizada, a qual tem carga positiva.

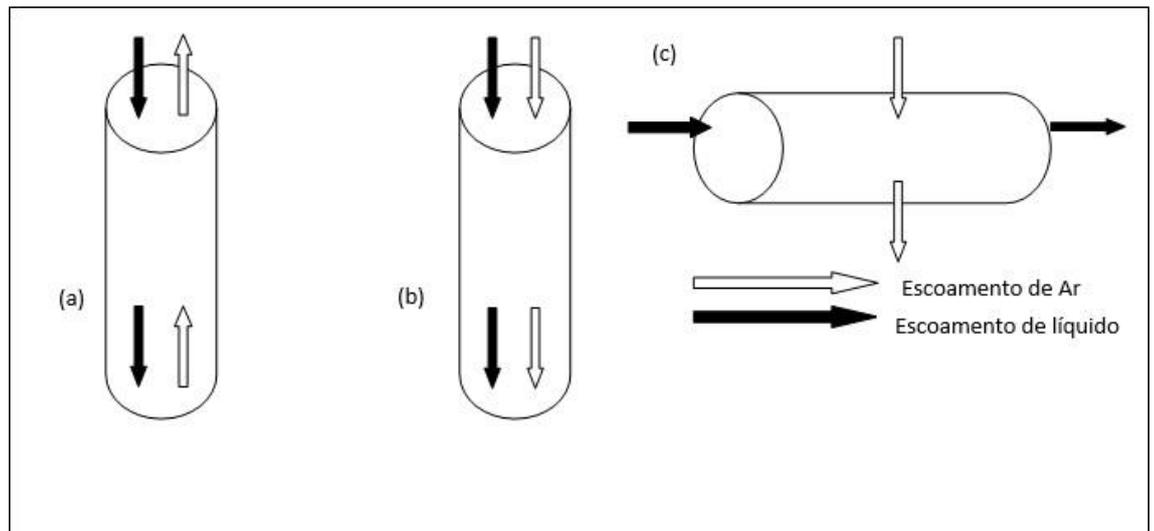
Essas situações podem se tornar pior caso o pH e a temperatura do meio aumente, conforme mostra a Figura 1, onde a presença do nitrogênio amoniacal livre torna-se maior do que sua forma ionizada.

### 3.2 CONFIGURAÇÕES DE SISTEMAS DE STRIPPING

Conforme cita LaGrega *et al.* (2001), os sistemas de arraste com ar podem ser divididos em dois grandes grupos: sistemas nos quais a fase líquida é contínua e sistemas nos quais a fase gasosa é contínua. Para o primeiro grupo dá-se o nome de tanques de arraste, os quais são reservatórios dotados de aeradores, que borbulham ar difuso para aumentar a superfície de contato ar/líquido, aumentando a transferência de massa nessa interface. O grupo onde a fase gasosa é contínua são denominadas torres de arraste, em que uma fina camada de água escoar sobre uma superfície com recheio, ao mesmo tempo em que uma corrente de ar passa através desse recheio, aumentando a transferência de massa entre a interface.

O grupo das torres pode ser dividido em outros três tipos, segundo LaGrega *et al.* (2001): torres com recheios, torres com pratos e torres de nebulização. Na literatura, o tipo mais comum de torre de arraste é a com recheio.

Os sistemas de arraste podem ser divididos também em relação ao sentido e direção dos escoamentos de ar e líquido. De acordo com Hand, Hokanson e Crittenden (1999), os sistemas podem ser divididos em três categorias: escoamento em contracorrente, escoamento em co-corrente e escoamento cruzado. A Figura 2 mostra as diferenças entre os sistemas:



**Figura 2: Classificação dos sistemas de arraste de acordo com as características de escoamento das fases líquida e gasosa: (a) escoamento em contracorrente; (b) escoamento em co-corrente; (c) escoamento cruzado.**

Fonte: Autoria própria, adaptado de Metcalf & Eddy (2003)

Souto (2009) explica que nas torres de recheio, a fase líquida é distribuída sobre o recheio, e passa através dele num processo de gotejamento, maximizando a área de contato com o gás e a turbulência no interior da fase líquida. Sendo assim, a alta rugosidade do tubo tem papel semelhante ao do recheio nas torres convencionais, aumentando a turbulência da fase líquida, favorecendo o aumento da interface líquido/gás.

### 3.3 STRIPPING DO NITROGÊNIO AMONÍACAL

Uma definição geral de Stripping, ou arraste, segundo Souto (2009) seria qualquer processo que acelera a passagem de um composto da fase líquida para a gasosa por transferência de massa. Essa aceleração é dada forçando-se o contato entre o líquido que contenha o composto a ser removido com um gás que não o contenha e, se o tiver, que esteja em concentrações baixas o suficiente para não comprometer o processo. No *air stripping* o ar é utilizado para incorporar a fase gasosa eliminada da fase líquida do lixiviado. Também é citado que a amônia é um composto que pode ser removido por arraste somente na sua fase não ionizada ( $\text{NH}_3$ ), e neste ponto se dá a ligação entre o processo e o composto em questão.

Em meio a esse contexto é introduzida a lei de Henry, que diz “a massa de qualquer gás que irá se dissolver em um dado volume de líquido, à

temperatura constante, é diretamente proporcional à pressão que o gás exerce sobre o líquido” (MOURA, 2008).

A Equação 3 descreve a lei de Henry:

$$p_g = \frac{H}{P_t} X_g \quad (3)$$

Sendo:

$p_g$  = fração molar do gás no ar;

H = constante de Henry (atm);

$P_t$  = pressão total (1 atm usualmente);

$X_g$  = fração molar do gás na água;

Porém, a fração molar do gás corresponde a pressão parcial do gás, possibilitando a simplificação da lei de Henry. A Equação 4 à descreve:

$$P_g = H X_g \quad (4)$$

Onde:

$P_g$  é a pressão parcial do gás (atm);

H é a constante de Henry (atm);

$X_g$  é a fração molar do gás na água;

Além do pH, a temperatura também tem grande influência no processo, variando a constante de Henry. A Equação 5 representa a variação da constante de Henry pela temperatura do efluente.

$$\text{Log}_{10}H = \frac{-1887,12}{(T+273,15)} + 6,315 \quad (5)$$

Onde:

$\text{Log}_{10}H$  é o logaritmo da constante de Henry na base 10;

T é a temperatura em graus Célsius (°C);

A constante de Henry nos diz algumas coisas. Substancias que tem uma constante de Henry elevada são facilmente removidas pelo *stripping*, ao passo que substancias com valor baixo da constante são removidas com maior dificuldade (CORBITT, 1999, p. 5-147; DYKSEN, 2005, p. 5-9).

### 3.4 BALANÇO DE MASSA NA TORRE DE STRIPPING

Metcalf & Eddy (2003) descrevem a equação do balanço de massa para remoção de nitrogênio amoniacal em uma torre de *air stripping* operada em modo contínuo com fluxo em contracorrente. Esse balanço de massa pode ser extrapolado para sistemas de arraste semelhantes ao da torre de arraste descrita pelos autores Metcalf & Eddy (2003), onde o efluente a ser tratado entra na parte superior, sofre o fenômeno do arraste e sai na parte inferior.

A Equação 6 descreve o balanço de massa e a Figura 3 ilustra os componentes do balanço de massa.

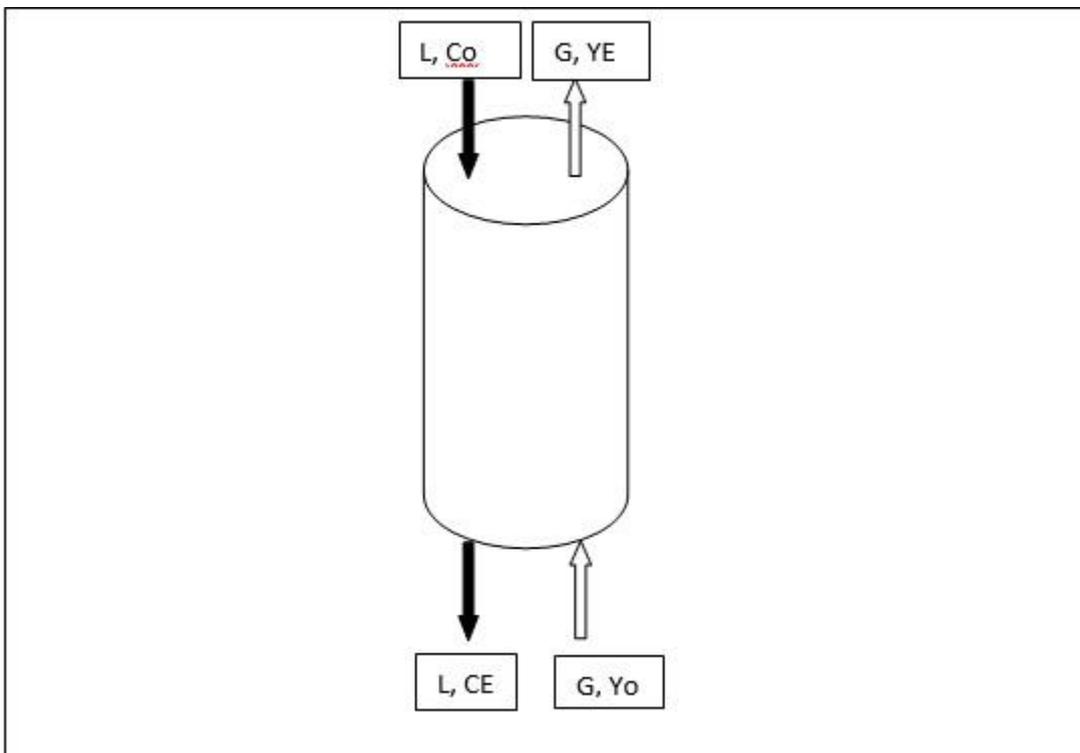


Figura 3: Componentes do balanço de massa em uma torre de Air Stripping.  
Fonte: Autoria própria, adaptado de Metcalf e Eddy (2003).

$$LC_0 + GY_0 = LC_E + GY_E \quad (6)$$

Onde:

$L$  é a vazão molar do líquido que entra na torre ( $\text{mol} \cdot \text{min}^{-1}$ );

$C_0$  é a concentração de nitrogênio amoniacal no líquido que entra da torre ( $\text{molNH}_3 \cdot \text{mol}_{\text{líquido}}^{-1}$ );

$C_E$  é a concentração de nitrogênio amoniacal no líquido que sai da torre ( $\text{molNH}_3 \cdot \text{mol}_{\text{líquido}}^{-1}$ );

$G$  é a quantidade de gás de arraste que entra na torre ( $\text{molAr} \cdot \text{min}^{-1}$ );

$Y_0$  é a concentração de nitrogênio amoniacal no gás de arraste que entra na torre ( $\text{molNH}_3 \cdot \text{mol}_{\text{Ar}}^{-1}$ );

$Y_E$  é a concentração de nitrogênio amoniacal no gás de arraste que sai da torre ( $\text{molNH}_3 \cdot \text{mol}_{\text{Ar}}^{-1}$ );

Considerando que a concentração de nitrogênio amoniacal no gás de entrada da torre é nula ( $Y_0$ ), já que não passou por nenhum processo de arraste até o momento, podemos reescrever a Equação 6 na forma de Equação 7:

$$Y_E = \frac{L(C_0 - C_E)}{G} \quad (7)$$

Utilizando a Lei de Henry (Equação 3), podemos definir  $Y_E$  segundo a Equação 8:

$$Y_E = \frac{H}{P_t} C'_0 \quad (8)$$

Onde:

$Y_E$  é a concentração de soluto no gás deixando o topo da torre, em mols de soluto por mols de ar ( $\text{molNH}_3 \cdot \text{molAr}^{-1}$ );

$H$  é a constante de Henry (atm);

$P_t$  é pressão total, usualmente 1 atm;

$C'_0$  é a concentração de soluto no líquido que está em equilíbrio com o gás que está deixando a torre, em mols de soluto por mols de líquido ( $\text{molNH}_3 \cdot \text{molH}_2\text{O}^{-1}$ );

Utilizando a Equação 8, a Equação 7 pode ser escrita na forma da Equação 9:

$$C'_0 = \frac{P_t L}{H G} (C_0 - C_E) \quad (9)$$

Se for considerado que a concentração do soluto no líquido entrando na torre está em equilíbrio com o gás deixando a torre, a Equação 9 pode ser escrita conforme a Equação 10:

$$\frac{G}{L} = \frac{P_t (C_0 - C_E)}{H C_0} \quad (10)$$

Segundo Metcalf & Eddy (2003), o valor de G/L definido pela Equação 10 representa a quantidade mínima de ar que pode ser usada no *Stripping* para as dadas condições, como  $Y_0$  nulo e  $Y_E = \frac{HC'_0}{P_t}$ . Na prática são utilizados valores de 1,5 a 3,0 vezes o valor teórico encontrado com esta equação para se alcançar um *Stripping* efetivo da maioria dos constituintes.

Existe outra consideração que pode ser feita. Se for levado em conta que a concentração do soluto no líquido de saída da torre é nula, pode-se reescrever a Equação 10 na forma da Equação 11:

$$\frac{G}{L} = \frac{P_t C_0}{H C_0} = \frac{P_t}{H} \quad (11)$$

Utilizando a Equação 11 com temperatura de 20 °C e pressão de 1atm o valor calculado para a relação G/L é de aproximadamente 2500 litros de ar por litro de líquido.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado na UTFPR *campus* Londrina, localizada no norte do estado do Paraná, nas instalações do laboratório de hidráulica.

### 4.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE AIR STRIPPING

Este sistema de *Air Stripping* é formado principalmente pelo conduto corrugado, dosadora eletromagnética e o soprador de ar. O conduto corrugado possui 10 metros de comprimento, 75 milímetros de diâmetro interno, área de 4417,86 mm<sup>2</sup> e 1 metro de altura. Essa altura se dá pela disposição dos 10 metros de conduto corrugado utilizado em forma de espiral. A dosadora eletromagnética fica posicionada estática na parte inferior do sistema de arraste e bombeia o efluente sintético até a entrada superior do conduto corrugado. O soprador de ar que está posicionado na parte inferior envia o ar em contracorrente, fazendo com que o fenômeno de arraste ocorra.

Na parte inferior do sistema de arraste, próximo ao local onde o soprador de ar opera, há uma saída para o efluente sintético que já sofreu os efeitos do *Air Stripping* escoar para que os parâmetros descritos nos objetivos específicos sejam analisados (vazão de ar, vazão de líquido e pH).

A Figura 4 ilustra a configuração e as partes que formam o sistema de *Air Stripping* deste trabalho:



**Figura 4: Sistema de Air Stripping com conduto corrugado montado, onde: (1) dosadora eletromagnética; (2) soprador de ar; (3) entrada do conduto corrugado; (4) saída para o gás de arraste e (5) saída para o efluente tratado.**  
Fonte: Autoria Própria.

#### 4.1.1 CONDUTO CORRUGADO

O conduto corrugado é o meio por onde ocorre o transporte do líquido e do ar dentro do sistema de arraste e também onde ocorre a turbulência do líquido, aumentando a área de contato superficial entre ambos os fluídos para que a transferência de massa ocorra. O conduto tem 10 metros de comprimento e 75 milímetros de diâmetro e é o principal diferencial deste sistema de *Air Stripping* pela sua capacidade de aumentar a superfície de contato entre a fase líquida e a gasosa, com o aumento da turbulência do efluente líquido. Esta característica permite que o recheio convencional utilizado em torres de arraste

não seja utilizado. A Figura 5 relata o conduto corrugado montado na forma em que o sistema funciona:



**Figura 5: Conduto corrugado montado.**  
**Fonte: Aatoria Própria.**

#### 4.1.2 SOPRADOR DE AR

Para injetar o ar no sistema de *Air Stripping*, foi utilizado um aparelho soprador da marca Makita, modelo MUB-103. A entrada de ar do aparelho soprador foi conectada a um cano comum de PVC com 50 milímetros de diâmetro, com sua extremidade fechada e em seu comprimento foram feitos furos para que se possa controlar sua vazão em valores intermediários, tomando nota de que o aparelho em sua situação normal atua com uma vazão fixa de  $135 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . A vazão pode ser controlada quando se tampa os furos do cano de PVC, fazendo com que o ar seja soprado para dentro do sistema de *Air Stripping* com

vazões entre 60 e 120 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> A Figura 6 mostra o soprador de ar e o cano de PVC controlador de vazão:



**Figura 6: Soprador de ar e cano controlador de vazão.**  
**Fonte: Autoria Própria.**

#### 4.1.3 TERMÔMETRO

Foi utilizado um termômetro comum para se realizar a medição da temperatura do efluente sintético no início de cada operação no sistema de *Air Stripping*.

#### 4.1.5 DOSADORA ELETROMAGNÉTICA

O equipamento utilizado para se bombear o efluente sintético foi uma dosadora eletromagnética de marca Hidrogeron, modelo 303, a qual tem vazão ajustável entre 0 e 1000 ml.min<sup>-1</sup>. As vazões utilizadas variaram entre 500 e 1000 ml.min<sup>-1</sup>. A Figura 7 mostra a dosadora eletromagnética utilizada:



**Figura 7: Dosadora eletromagnética utilizada para bombear o efluente sintético.**  
Fonte: Autoria própria.

#### 4.1.6 MANÔMETRO

Um manômetro foi utilizado para se medir a perda de carga no sistema de *Air Stripping* em cada vazão de ar. O manômetro foi conectado no item 5 da Figura 5 com o soprador de ar ligado, porém sem nenhum efluente circulando pelo conduto corrugado. A perda de carga foi medida calculando-se a diferença em milímetros entre os níveis d'água do manômetro, possibilitando assim criar uma curva de calibração para o soprador de ar.

## 4.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A solução sintética utilizada em cada ensaio (3L) foi preparada pela adição de 14,58 g de sulfato de amônio, diluída em 3 L de água do sistema público de abastecimento, resultando em concentração aproximada de  $1 \text{ g N-NH}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ .

Para se iniciar a operação do sistema, deve-se primeiramente corrigir o pH do efluente sintético utilizando NaOH (6M) até atingir-se os valores previstos no planejamento experimental (Tabela 1). Após as correções serem feitas, o efluente sintético está pronto para ser inserido no sistema de *Air Stripping* com a dosadora eletromagnética.

A dosadora eletromagnética bombeia o efluente sintético até a parte superior do sistema de *Air Stripping*, com as vazões descritas também com a metodologia estatística do DCCR (Tabela 1), onde escoar pelo conduto corrugado até a parte mais baixa sofrendo turbulência e onde, simultaneamente, o soprador de ar na parte inferior envia o ar em contracorrente, fazendo com que o fenômeno de arraste ocorra. As vazões de ar também foram obtidas utilizando a metodologia do DCCR (Tabela 1). Após o efluente sintético percorrer todo o conduto corrugado, na parte mais baixa existe uma saída para o líquido escoar, ser coletado e analisado seguindo os parâmetros de estudo, descritos no Quadro 1.

### 4.3.1 PLANEJAMENTO FATORIAL

Aplicando o conceito do DCCR, foram gerados os níveis para as variáveis independentes com  $K=3$ , sendo elas Vazão de Ar ( $Q_{ar}$ ), Vazão de Líquido ( $Q_{liq}$ ) e pH (pH). Os valores de  $\alpha$  calculados foram: +1,68 e -1,68. O número de repetições realizadas foram 6, sendo estas do ensaio 15 ao 20. A Tabela 1 mostra os valores codificados e reais encontrados:

**Tabela 1: Valores encontrados para as variáveis independentes de estudo utilizando DCCR.**

Ensaio	Qar	Qliq	pH	Qar (m³/h)	Qliq (L/h)	pH	Qar/Qliq
1	-1	-1	-1	72	0,6	9,6	2000
2	1	-1	-1	108	0,6	9,6	3000
3	-1	1	-1	72	0,9	9,6	1333
4	1	1	-1	108	0,9	9,6	2000
5	-1	-1	1	72	0,6	11,4	2000
6	1	-1	1	108	0,6	11,4	3000
7	-1	1	1	72	0,9	11,4	1333
8	1	1	1	108	0,9	11,4	2000
9	-1,68	0	0	60	0,75	10,5	1333
10	1,68	0	0	120	0,75	10,5	2666
11	0	-1,68	0	90	0,5	10,5	3000
12	0	1,68	0	90	0,75	10,5	1500
13	0	0	-1,68	90	0,75	9	2000
14	0	0	1,68	90	0,75	12	2000
15	0	0	0	90	0,75	10,5	2000
16	0	0	0	90	0,75	10,5	2000
17	0	0	0	90	0,75	10,5	2000
18	0	0	0	90	0,75	10,5	2000
19	0	0	0	90	0,75	10,5	2000
20	0	0	0	90	0,75	10,5	2000

**Fonte: Autoria Própria.**

#### 4.3.2 PARÂMETROS DE ESTUDO

A metodologia a ser utilizada para o monitoramento dos parâmetros operacionais do experimento é a *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* AWWA/APHA/WEF, conforme mostra a Tabela 2:

Parâmetro analisado	Método utilizado
pH	4500-H <sup>+</sup> B
Nitrogênio Amoniacal (mgNH <sub>3</sub> . L <sup>-1</sup> )	4500-NH <sub>3</sub> D

**Quadro 1: Parâmetros e métodos utilizados.**

**Fonte: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater AWWA/APHA/WEF (2005).**

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

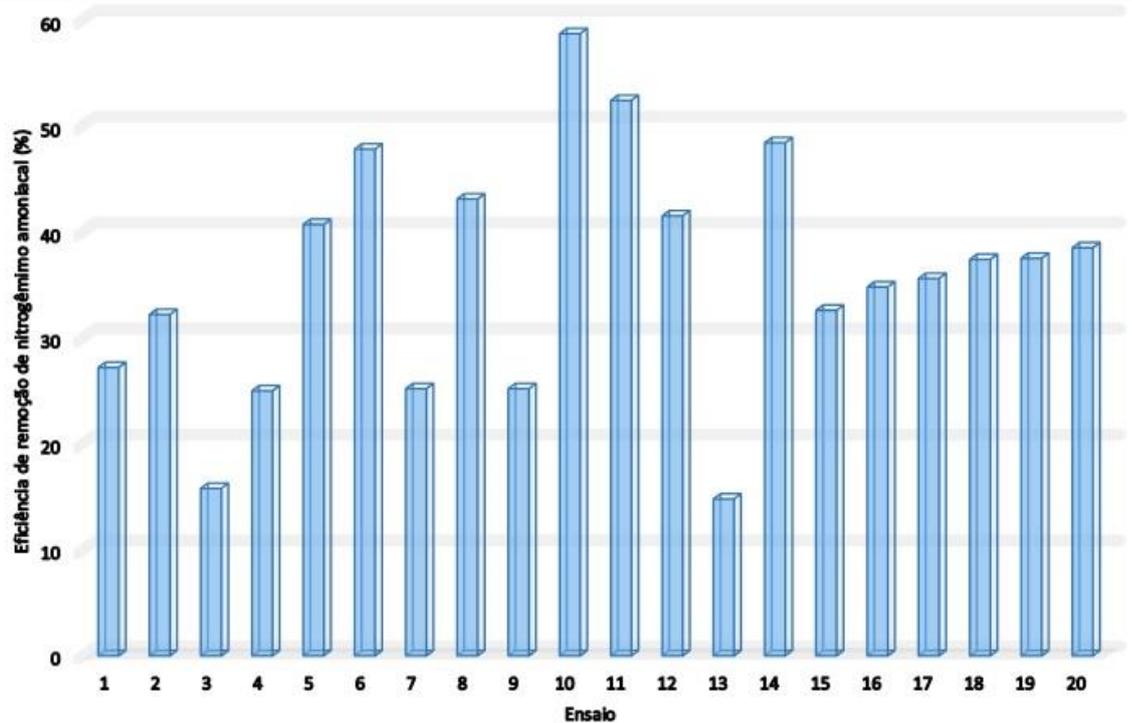
A Tabela 3 mostra as concentrações iniciais de nitrogênio amoniacal no efluente sintético e as concentrações finais após passagem pelo sistema de *Air Stripping* com aplicação de conduto corrugado:

**Tabela 2: Resultados obtidos de remoção de nitrogênio amoniacal.**

Ensaio	Concentração Inicial (mg/L)	Concentração final (mg/L)	Eficiência de remoção (%)
1	1030	750	27,2
2	1010	685	32,2
3	1010	850	15,8
4	1010	758	25,0
5	1020	605	40,7
6	1030	538	47,8
7	928	694	25,2
8	1010	575	43,1
9	924	691	25,2
10	1000	413	58,7
11	1030	490	52,4
12	1030	603	41,5
13	935	797	14,8
14	1010	521	48,4
15	1020	687	32,6
16	1020	665	34,8
17	1020	657	35,6
18	1020	639	37,4
19	1020	637	37,5
20	1020	627	38,5

**Fonte: Aatoria Própria.**

A Figura 8 mostra os resultados da Tabela 2 graficamente, onde podemos perceber que os ensaios que apresentaram a maior eficiência de remoção foram os 10 e 11.



**Figura 8: Eficiência de remoção de nitrogênio amoniacal por ensaio.**  
Fonte: Autoria própria.

A partir destes ensaios, utilizando o *software* Statistica 12 (Statsoft), foram feitas análises estatísticas com a nível de significância de 5% ( $p < 0,05$ ), estimando o coeficiente de regressão das variáveis independentes, o efeito delas na remoção de nitrogênio amoniacal e a modelagem matemática do sistema de *Air Stripping*, validado pela análise de variância (ANOVA).

A Tabela 3 apresenta os efeitos de cada variável independente na eficiência do sistema:

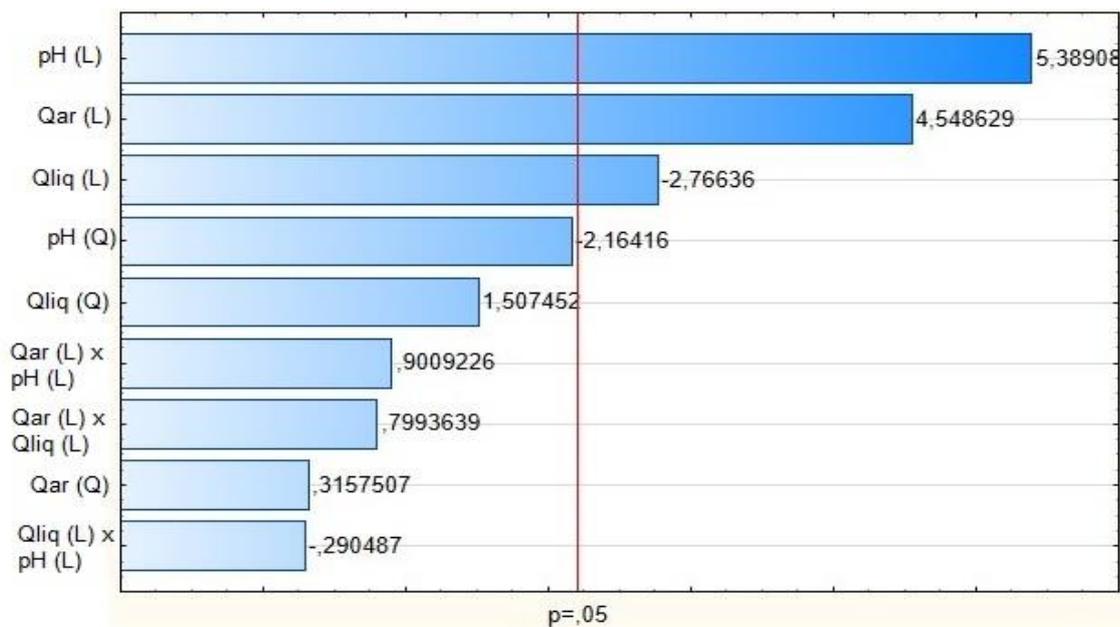
**Tabela 3: Efeito das variáveis independentes na eficiência do sistema.**

Fator	Efeito	Erro	t (10)	P	Lim. - 95%	Lim. -95%
Intersecção	36,355595	2,485120	14,62945	0	30,8188	41,89314
Qar(L)	13,96716	3,299334	4,23333	0,001735	6,6158	21,31853
Qar(Q)	0,64803	3,215513	0,20153	0,844322	-6,5166	7,81264
Qliq(L)	-8,37977	3,299334	-2,53984	0,029371	-15,7311	-1,02839
Qliq(Q)	4,17944	3,215513	1,29977	0,222840	-2,9852	11,34405
pH(L)	16,58159	3,299334	5,02574	0,000517	9,2302	23,93296
pH(Q)	-6,70077	3,215513	-2,08389	0,063780	-13,8654	0,46384
Qar(L) x Qliq(L)	3,72206	4,308885	0,86381	0,407934	-5,8787	13,32285
Qar(L) x pH(L)	2,70796	4,308885	0,62846	0,543789	-6,8928	12,30875
Qliq(L) x pH(L)	-0,39946	4,308885	-0,09271	0,927968	-10,0003	9,20133

Fonte: A autoria própria.

As variáveis significativas estão destacadas em vermelho, sendo estas a vazão de ar linear (Qar (L)), a vazão de líquido linear (Qliq (L)) e o pH linear (pH (L)).

A partir dos dados gerados pela Tabela 3 foi feito um Diagrama de Pareto, que representa as quão significativas ou influentes são estas variáveis independentes. A Figura 9 mostra o Diagrama de Pareto:



**Figura 9: Diagrama de Pareto.**

Fonte: Autoria própria.

A partir da Figura 9 e Tabela 3 pode-se perceber que os efeitos do pH linear (pH (L)) e Vazão de Ar (Qar (L)) linear aumentam a eficiência de remoção de nitrogênio amoniacal neste sistema, ao passo que a Vazão de Líquido linear (Qliq (L)) diminui. É possível observar também que os fatores quadráticos (pH (Q), Qliq (Q) e Qar (Q)) influenciam pouco na remoção, sendo pouco significativos.

Os fatores indicados como não significativos foram excluídos da análise, gerando novos coeficientes de regressão. A Tabela 4 apresenta os coeficientes de regressão gerados:

**Tabela 4: Coeficientes de regressão gerados.**

Fator	Coef.	Erro	t (16)	p	Lim. -95%	Lim.+95%
<b>Regressão</b>						
Intersecção	35,71693	1,439354	24,81456	0	32,66564	38,76822
Qar (L)	6,98358	1,742605	4,00755	0,001016	3,28942	10,67774
Qliq (L)	-4,18988	1,742605	-2,40438	0,028668	-7,88404	-0,49573
pH (L)	8,29079	1,742605	4,75770	0,000214	4,59664	11,98495

Fonte: Autoria própria.

A modelagem matemática com os coeficientes de regressão gerados pelo *software* Statistica equacionou o sistema de *Air Stripping* deste trabalho,

mostrado na Equação 13 e validado pela análise de variância (ANOVA), representada na Tabela 5:

$$\text{Remoção de } N - \text{NH}_3 (\%) = (35,71693) + (6,98358 \cdot Q_{\text{ar}}) + (-4,18988 \cdot Q_{\text{liq}}) + (8,29079 \cdot \text{pH}) \quad (13)$$

**Tabela 5: Análise de variância (ANOVA).**

<b>Fonte de variação</b>	<b>Soma dos quadrados</b>	<b>Graus de Liberdade</b>	<b>Quadrados médios</b>	<b>F calculado</b>
Regressão	1842,904101	3	614,3014	14,82574
Resíduos	662,956511	16	41,43478	-
Total	2505,860613	19	-	-

Fonte: Autoria própria.

O fator F calculado, quando comparado a uma tabela F com significância 5%, aponta que o modelo está ajustado aos dados experimentais, sendo que para isso o fator F calculado obrigatoriamente tem de ser maior que o valor de F tabelado. A tabela F indica um valor de 3,24 para 3 e 16 graus de liberdade, e o valor calculado aponta 14,82574, comprovando o ajuste.

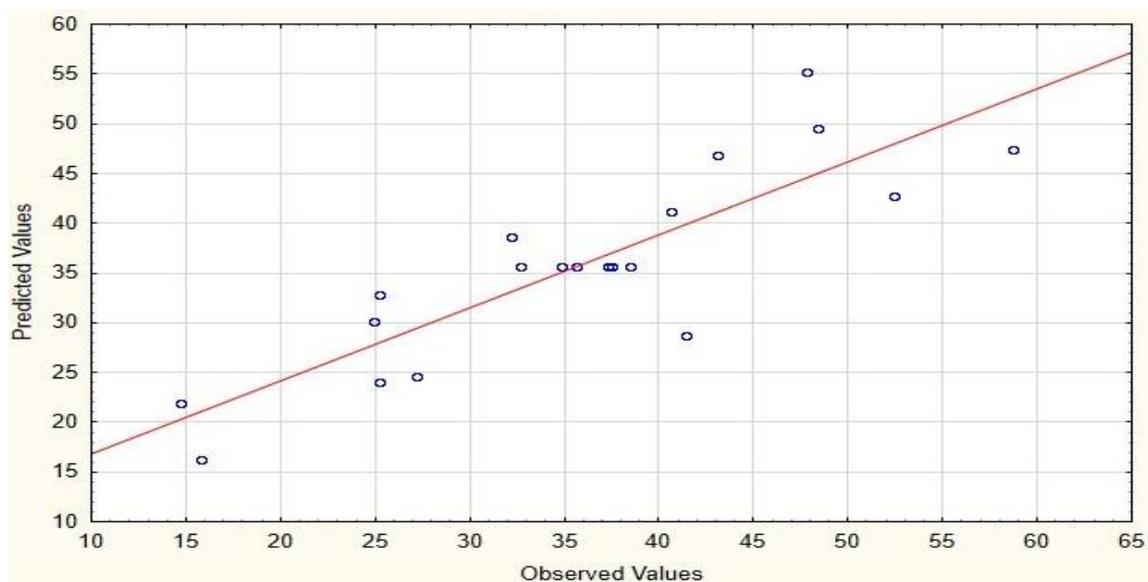
A equação 13 apresenta um coeficiente de regressão linear de 0,73544, o que indica que o modelo está ajustado aos dados, porém pode apresentar alguma divergência entre valores experimentais e previstos pelo modelo.

A Figura 10 mostra a diferença percentual entre os valores observados experimentalmente e os previstos pelo modelo matemático, onde a linha vermelha representa os valores experimentais e os pontos acima dela são diferenças percentuais positivas e os pontos abaixo são diferenças percentuais negativas.

**Tabela 6: Diferenças percentuais entre os valores observados experimentalmente e os previstos pelo modelo matemático.**

Ensaio	Valor experimental (%)	Valor previsto (%)	Diferença (%)
1	27,2	24,6	2,6
2	32,2	38,6	-6,4
3	15,8	16,3	-0,4
4	25,0	30,2	-5,3
5	40,7	41,2	-0,5
6	47,8	55,2	-7,4
7	25,2	32,8	-7,6
8	43,1	46,8	-3,7
9	25,2	24,0	1,2
10	58,7	47,4	11,3
11	52,4	42,8	9,7
12	41,5	28,7	12,8
13	14,8	21,8	-7,0
14	48,4	49,6	-1,2
15	32,6	35,7	-3,1
16	34,8	35,7	-0,9
17	35,6	35,7	-0,1
18	37,4	35,7	1,6
19	37,5	35,7	1,8
20	38,5	35,7	2,8
21	70,9	68,4	2,5

Fonte: Autoria própria.



**Figura 10: Comparação entre valores previstos e obtidos experimentalmente de eficiência de remoção do nitrogênio amoniacal.**

Fonte: Autoria própria.

Foi realizado um ensaio adicional para comprovar a validade do modelo matemático. Foram utilizados os valores de 120 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> para vazão de ar, 500 ml.min<sup>-1</sup> para vazão de líquido e pH 12. A Tabela 7 apresenta o ensaio adicional com os valores codificados:

**Tabela 7: Ensaio de validação do modelo matemático.**

Ensaio	Qar	Qliq	pH	Ef. Experimento (%)	Ef. Modelo (%)
21	1,68 (120m <sup>3</sup> /h)	-1,68 (0,5L/h)	1,68 (12)	70,9	68,4

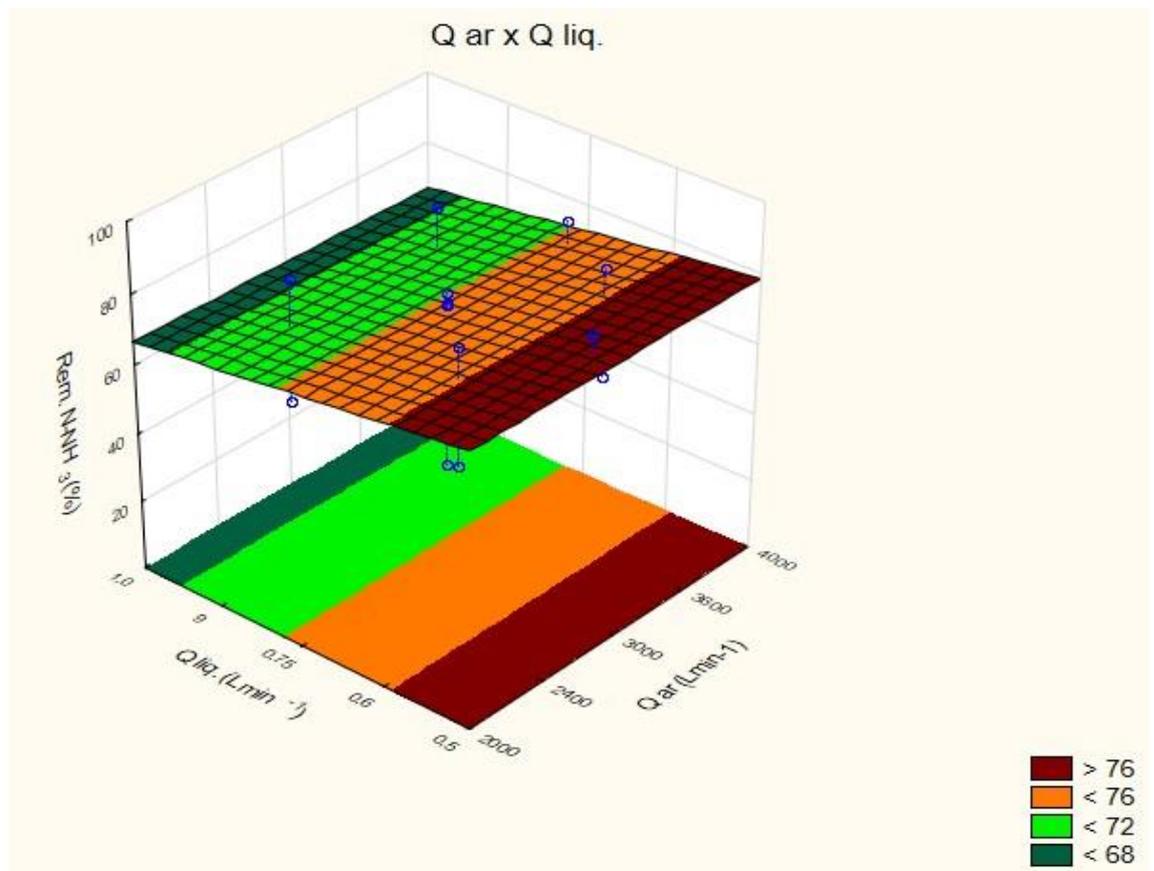
Fonte: Autoria própria.

O ensaio 21 foi feito levando em conta os coeficientes de regressão do modelo matemático, maximizando os efeitos positivos e minimizando os negativos. O resultado obtido foi o de melhor eficiência dentre todos os realizados.

## 5.1 DISCUSSÃO DA INFLUÊNCIA DO PH, VAZÃO DE AR E VAZÃO DE LÍQUIDO NA REMOÇÃO DE NITROGÊNIO AMONIACAL

Como esperado, o pH teve a maior influência no sistema, como pode ser visto na Equação 13, levando em conta que este fator possui o maior coeficiente de regressão, e comprovando a Equação 2, que trata do deslocamento do nitrogênio amoniacal da forma ionizada para a forma livre com o aumento do pH. Como segundo fator mais influente, temos a vazão de ar, que realiza a remoção do nitrogênio amoniacal, facilitada pelos altos valores de pH, e como influência negativa pode-se observar a vazão de líquido.

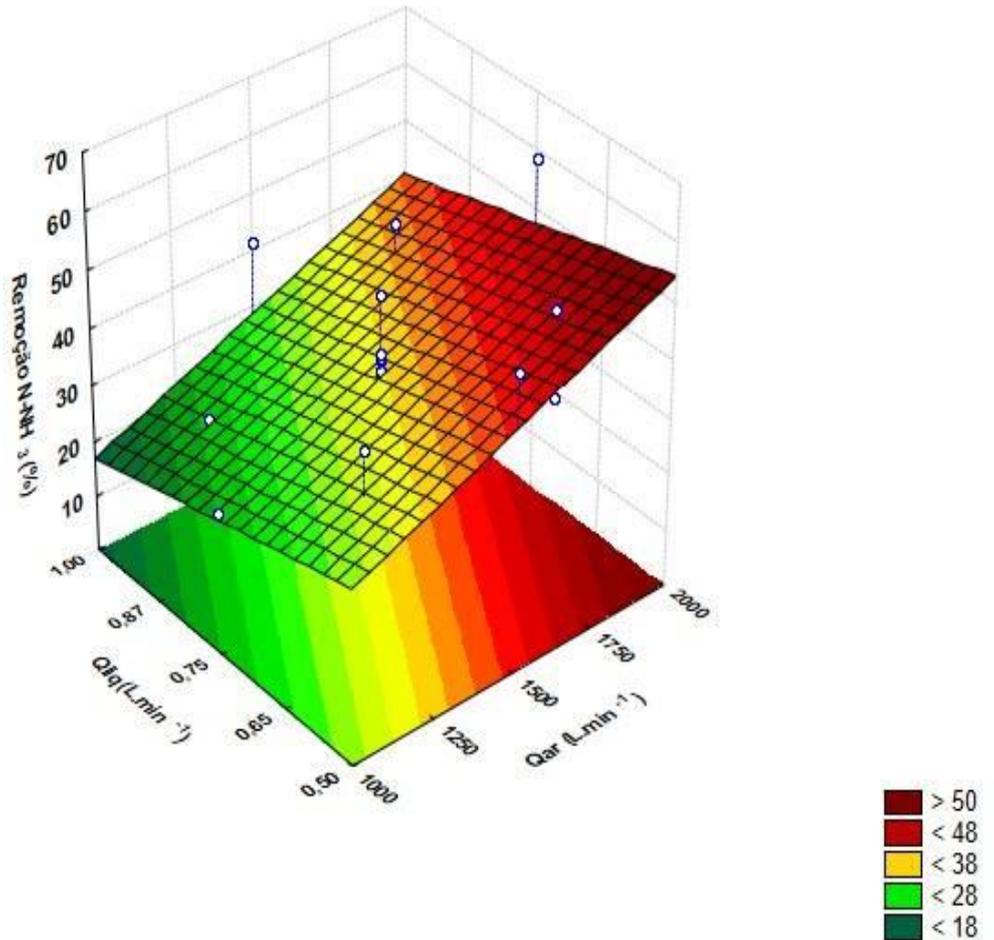
Rios (2015) realizou um experimento de remoção de nitrogênio amoniacal de efluente de curtume em torre de *Air Stripping* com aquecimento em forno micro-ondas, e obteve resultados semelhantes em alguns aspectos: A vazão de líquido influenciou negativamente na remoção do nitrogênio amoniacal quanto maior fosse seu valor, porém a vazão de ar não acarretou aumento de eficiência em seu trabalho. A Figura 11 ilustra seus resultados comparativos de influência entre vazão de ar e vazão de líquido em um gráfico de superfície, gerado também pelo *software* Statistica (Statsoft):



**Figura 11: Comparação da influência da vazão de ar e vazão de líquido na remoção de nitrogênio amoniacal de efluente de curtume.**  
**Fonte: Rios (2015).**

Rios (2015) utilizou vazões de ar elevadas, variando de 2000 até 4000 litros de ar por minuto, o que segundo o próprio autor não foi significativa na remoção do nitrogênio amoniacal por conta de serem altas vazões, e até mesmo o valor mínimo ( $2000 \text{ L. min}^{-1}$ ) de vazão de ar já era suficiente para remover o máximo possível de nitrogênio amoniacal do efluente. Conforme pode ser observado também na Figura 13, a vazão de líquido influenciou negativamente na remoção quanto maior fosse seu valor, razão essa explicada pelo próprio autor como efeito do menor tempo de detenção no interior da torre, fazendo com que houvesse menor contato entre o gás de arraste e o efluente.

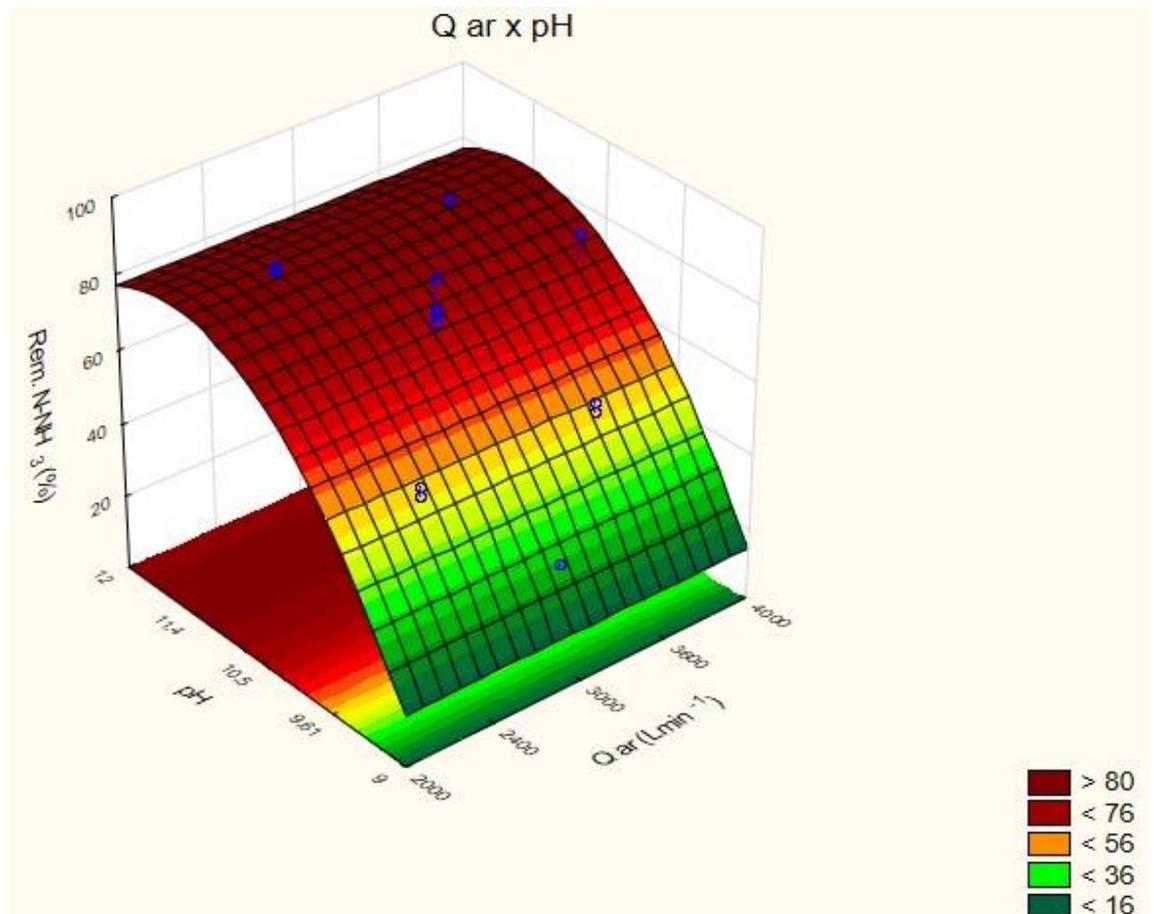
A Figura 12 mostra os resultados comparativos encontrados neste trabalho, semelhante apenas em relação ao aumento da vazão de líquido, que influencia negativamente quanto maior seu valor:



**Figura 12: Comparação da influência da vazão de ar e vazão de líquido na remoção de nitrogênio amoniacal.**  
**Fonte: Autoria própria.**

Pode ser observado na Figura 12 que a vazão de ar tende a aumentar a eficiência do sistema comparada com a vazão de líquido conforme aumenta, o que pode ser explicado por serem utilizadas baixas vazões de ar, onde as menores não são capazes de remover o máximo possível de nitrogênio amoniacal na fase livre do efluente. A influência negativa da vazão de líquido pode ser explicada assim como a de Rios (2015), onde o tempo de detenção do efluente no sistema de *Air Stripping* é diminuído com o aumento da vazão.

Quando analisadas e comparadas entre si as influências do pH e vazão de ar no trabalho executado por Rios (2015), podemos verificar a forte influência do pH e a baixa influência da vazão de ar, mostrada na Figura 13:



**Figura 13:** comparação da influência da vazão de ar e pH na remoção de nitrogênio amoniacal de efluente de curtume.  
**Fonte:** Rios (2015).

No trabalho de Rios (2015) as razões do pH e da vazão de ar terem suas respectivas influencias, como pode ser visto na Figura 15, são por conta de o pH deslocar a fase ionizada do nitrogênio amoniacal para a fase ionizada e a vazão de ar ser suficiente para remover todo o nitrogênio amoniacal possível. Neste trabalho, o pH exerce alta influência em altos valores pelas mesmas razões, porém como as vazões de ar são mais baixas, oferecem influência maior somente em seus mais altos valores (de 1500 a 2000 L.min<sup>-1</sup>) comparado ao pH, pois nestas vazões o ar pode remover o máximo possível de nitrogênio amoniacal na fase livre, como pode ser visto na Figura 14:

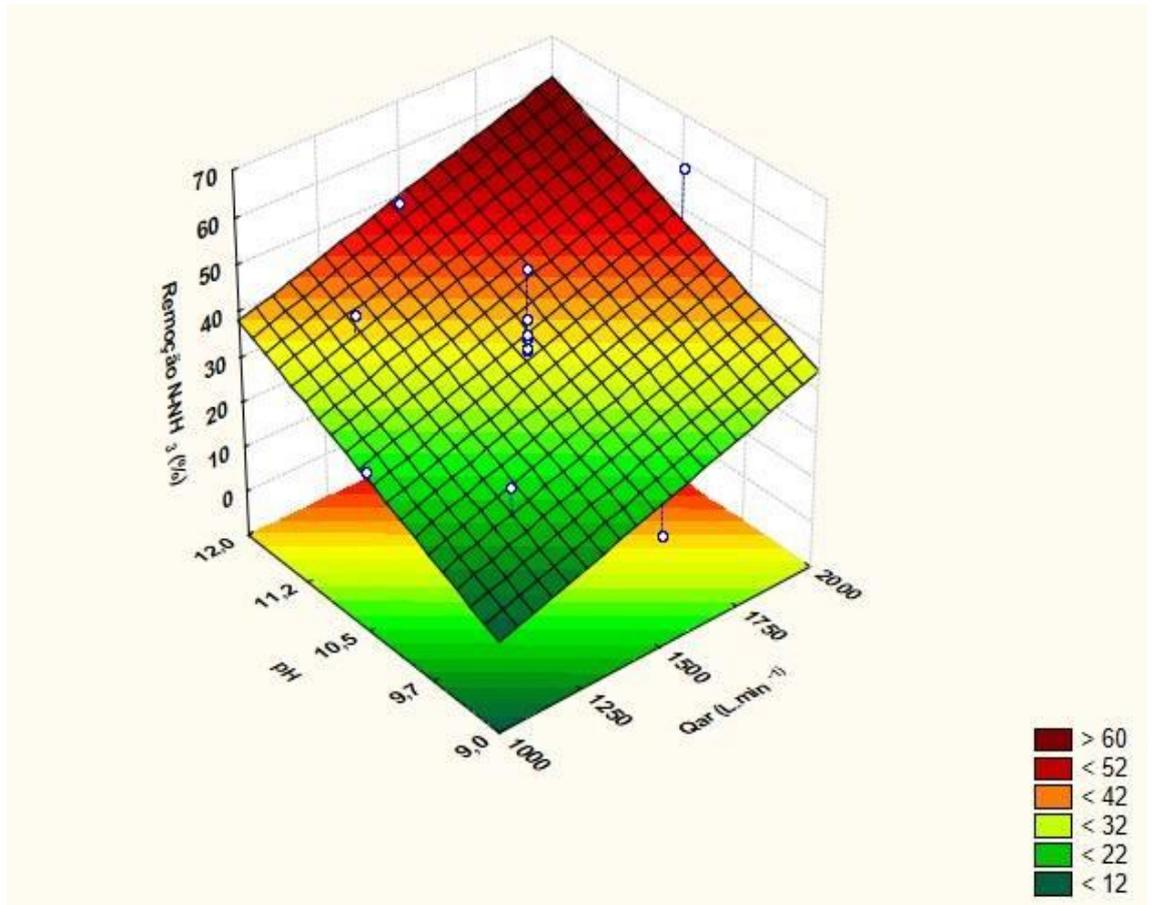


Figura 14: comparação da influência da vazão de ar e pH na remoção de nitrogênio amoniacal.  
 Fonte: Autoria própria.

Rios (2015) comparou também a influência do pH com a vazão de líquido, onde obteve alta influência do pH e influência negativa da vazão de líquido, que pode ser observado na Figura 15. O mesmo efeito foi observado neste trabalho, conforme a Figura 16, onde as diminuições do tempo de detenção causado pelas vazões mais altas de líquido influenciam negativamente a eficiência do sistema:

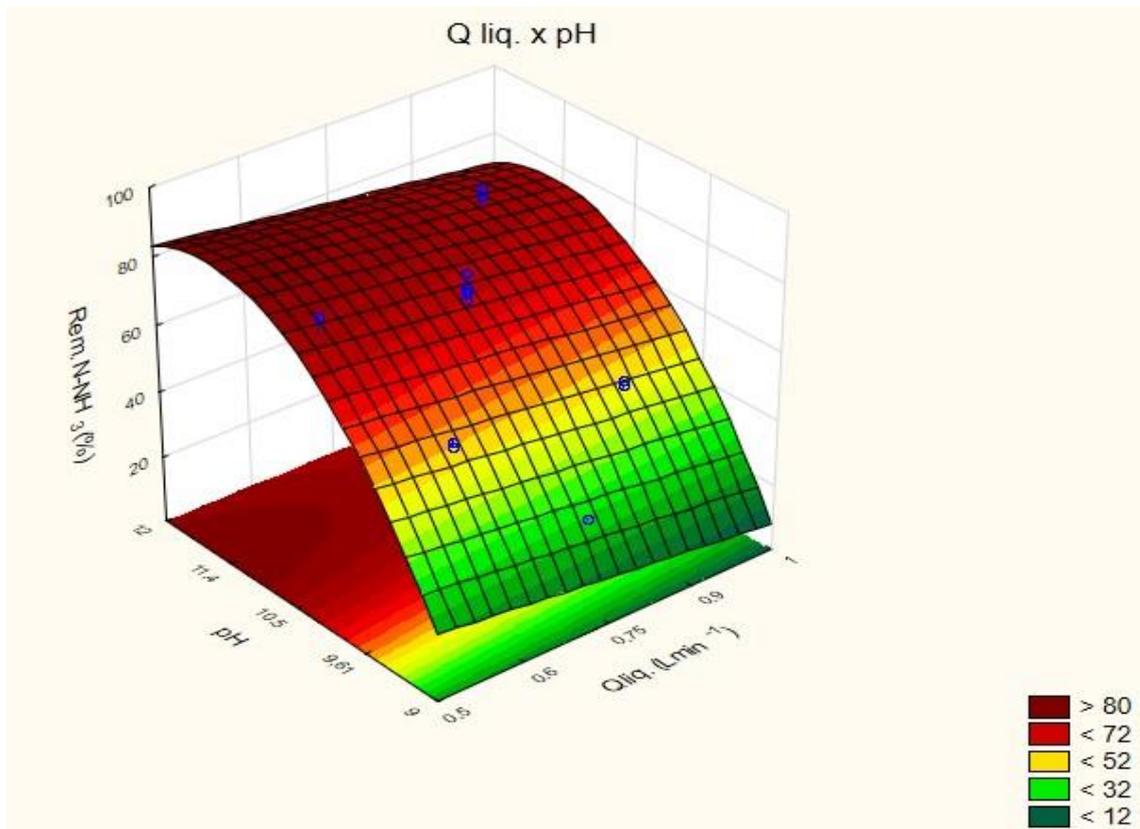


Figura 15: Comparação da influência da vazão de líquido e pH na remoção de nitrogênio amoniacal de efluente de curtume.  
 Fonte: Rios (2015).

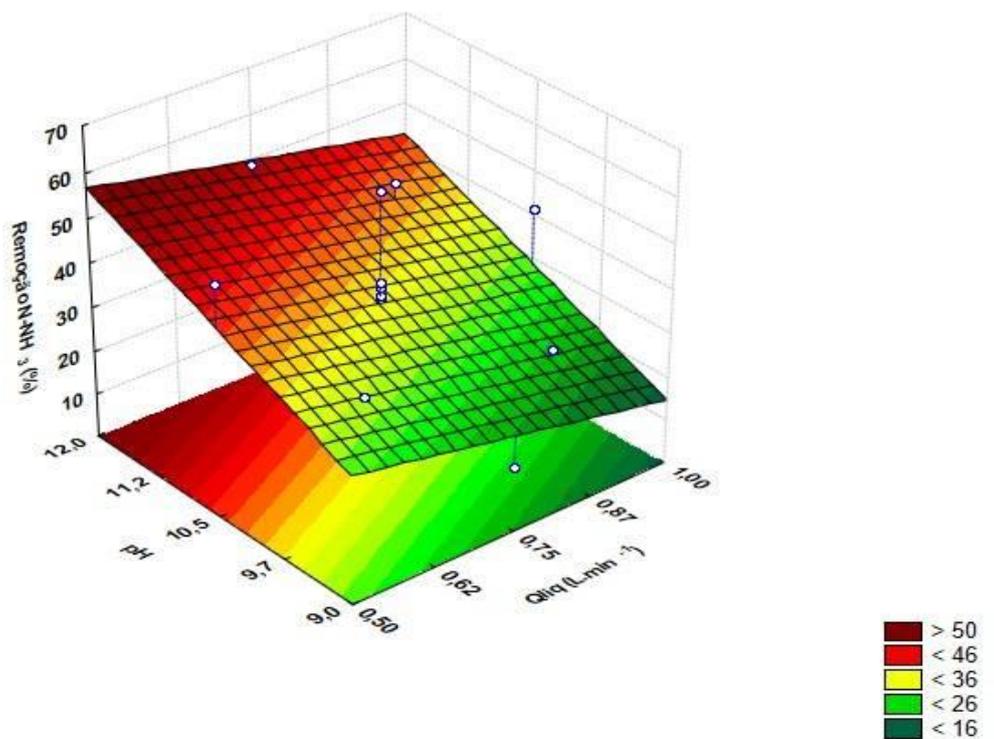
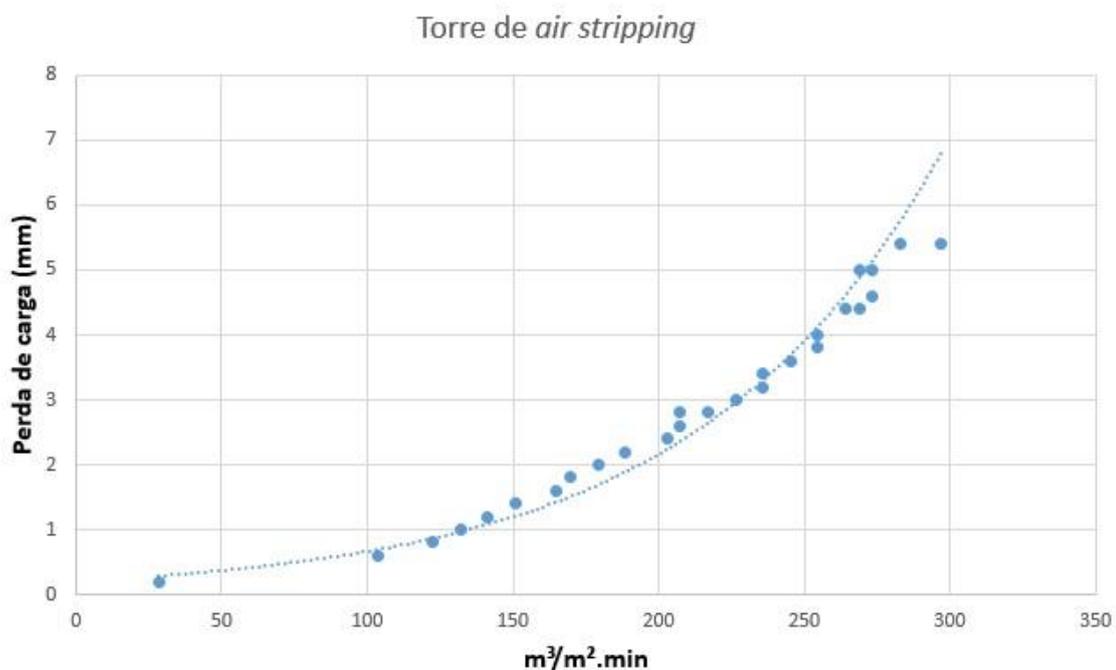


Figura 16: comparação da influência da vazão de líquido e pH na remoção de nitrogênio amoniacal.  
 Fonte: Autoria própria.

O trabalho apresentado por Rios (2015) mostrou eficiências que variam de 27,7% até 84,3%, em contrapartida este trabalho mostrou eficiência mínima de 14,8% e máxima de 58,7%.

## 5.2 PERDA DE CARGA

Levando em conta que a vazão de ar é um fator importantíssimo no processo de air stripping, foram medidas as perdas de carga em ambos os trabalhos e comparados. Como a torre de air stripping possui 4 metros de altura, 150 milímetros de diâmetro e um soprador com vazão mínima de 2000 L.min<sup>-1</sup>, a comparação direta com o sistema de air stripping com conduto corrugado seria imprecisa, já que este possui altura de 1 metro, diâmetro de 75 milímetros e um soprador com vazão máxima de 2000 L.min<sup>-1</sup>. Para se obter uma comparação mais precisa, foi levado em conta a perda de carga do soprador para cada metro cúbico de ar soprado no sistema por área de conduto em um minuto. A Figura 17 mostra a variação da perda de carga para a torre de air stripping, a Figura 19 para o sistema com conduto corrugado e as Equações 14 e 15 equacionam suas perdas de carga respectivamente:

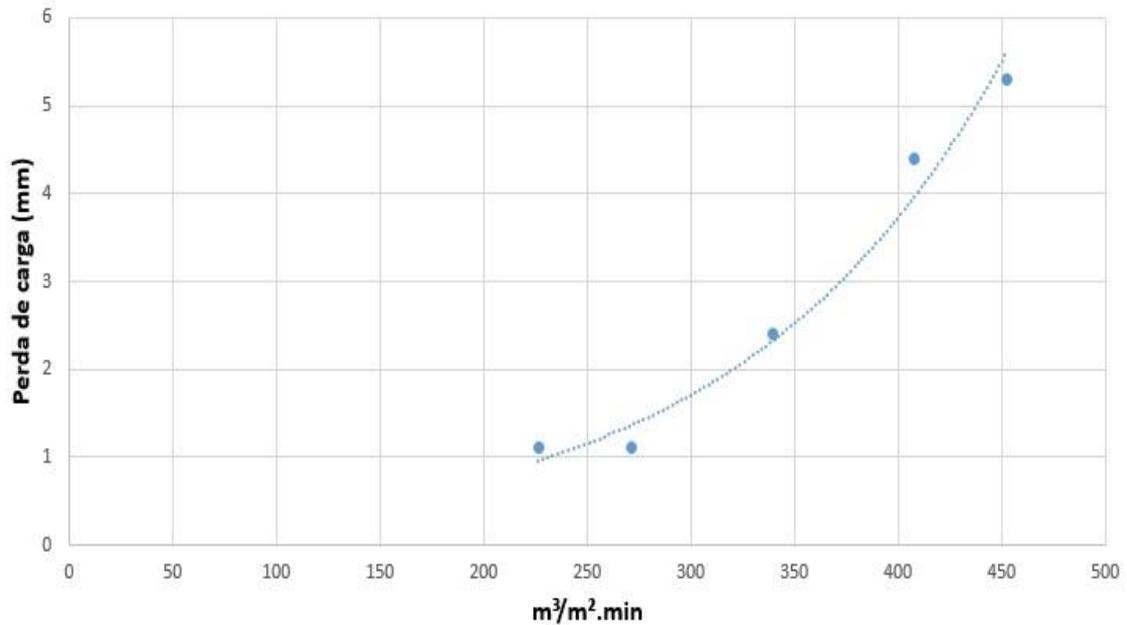


**Figura 17: Perda de carga em cada metro cúbico soprado de ar por área em um minuto na torre de air stripping.**

Fonte: Aatoria própria.

$$\text{Perda de carga} = 0,2036e^{0,0118x} \quad (14)$$

*Air stripping com conduto corrugado*



**Figura 18:** Perda de carga em cada metro cúbico soprado de ar por área em um minuto no sistema de air stripping com conduto corrugado.

Fonte: Autoria própria.

$$Perda\ de\ carga = 0,1639e^{0,0078x} \quad (15)$$

Observando as Figuras 17 e 18 pode-se perceber que a torre de *air stripping* ocasiona maior perda de carga para se realizar a remoção do nitrogênio amoniacal.

## 6 CONCLUSÃO

O sistema de *air stripping* com conduto corrugado possui 25% da área e do tamanho da torre, e levando esses fatores em consideração, o sistema possui características que podem ser testadas com intuito de aumentar sua eficiência, como operar em condições como o ensaio teste 21 em vazão de ar e pH máximo e vazão de líquido mínima, bem como aumentar a potência do soprador de ar para alcançar vazões mais altas

Os parâmetros de estudo se comportaram da seguinte forma:

- pH: mostrou ter a maior influência no processo de *air stripping* facilitando a transferência do nitrogênio amoniacal para o gás de arraste. O pH mostrou-se eficiente independentemente das outras variáveis a partir de 10,5, alcançando sempre os mais altos valores de remoção.
- Vazão de ar: A vazão de ar se mostrou eficiente quando entre 1500 e 2000 L.min<sup>-1</sup>, onde conseguiu obter o maior valor de remoção quando combinada com os outros fatores.
- Vazão de líquido: Se mostrou pouco eficiente nos valores testados quando combinada com os outros fatores, apresentando melhores resultados apenas em sua vazão mínima.

## **7 SUGESTÕES**

A aplicação do conduto corrugado a técnica de *air stripping* se mostrou dimensional e energeticamente menos custosa em relação ao sistema de torre com recheio.

Como sugestão para trabalhos futuros, podem ser testados maiores diâmetros para o conduto corrugado, com intuito de se diminuir ainda mais a perda de carga e aumentar a eficiência, aumentar a vazão de ar, e testar inclinações no sistema, o que pode diminuir seu tempo de detenção, mas também aumentar a turbulência e área de contato superficial entre os fluidos.

## 8 REFERÊNCIAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER ENVIRONMENT FEDERATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21. ed. Washington: American Public Health Association, 2005.

CORBITT, Robert A. **Standard Hand Book of Environmental Engineering**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1999. 1216 p.

DYKSEN, John E. **Aeration and Air Stripping**. In: AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA); AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (ASCE). **Water Treatment Plant Design**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2005. 959 p.

FELIX, E.P.; CARDOSO, A.A. **Amônia (NH<sub>3</sub>) Atmosférica: Fontes, Transformação, Sorvedouros e Métodos de Análise**. Departamento de Química Analítica, Instituto de Química de Araraquara, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", 2004.

HAND, D.W.; HOKANSON, D.R.; CRITTENDEN, J.C. Air stripping and aeration. In: LETTERMAN R.D. (Ed.). **Water quality and treatment: a handbook of community water supplies**, 5<sup>a</sup> ed. New York: McGraw-Hill, Inc., American Water Works Association (AWWA), 1999. Cap. 5, p. 5.1-5.68.

LaGREGA, M.D.; BUCKINGHAM, P.L.; EVANS, J.C.; ENVIRONMENTAL RESOURCES MANAGEMENT. **Hazardous waste management**. 2<sup>a</sup> ed. International Edition. Singapore: McGraw-Hill, 2001. 1 202 p. (McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering).

MAIER, Raina M.; PEPPER, Ian L.; GERBA, Charles P. **Environmental microbiology**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 2009. 598 p.

METCALF; EDDY, INC. **Wastewater engineering, treatment and reuse**. 4. ed. Boston: McGraw-Hill, 2003. 1819 p.

PROSAB. **Resíduos Sólidos Estudos de Caracterização e Tratabilidade de Lixiviados de Aterros Sanitários para as Condições Brasileiras**. 1.ed. v.5. Rio de Janeiro: ABES, 2009.

RIOS, Carlos Alberto Segatto. **Recovery of ammonia by microwave irradiation and air stripping in tannery wastewater**. 2015. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2015.

RUSSEL, J.B. **QUÍMICA Geral**. 2 vols. São Paulo: Makron Books, 1994. 1 268 p. + apêndices.

SEDLAK, Richard I. **Phosphorus and Nitrogen Removal from Municipal Wastewater: Principle and Practice**. 2. ed. New York: Lewis Publishers, 1991. 240 p.

SOUTO, G. A. B. **Lixiviado de aterros sanitários brasileiros - estudo de remoção do nitrogênio amoniacal por processo de arraste com ar ("stripping")**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 371p. São Carlos. 2009.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **1999 Update of Ambient Water Quality Criteriy for Ammonia**. EPA-822-R-99-014. Office of Water, U.S. Environmental Protection Agency, 1999. 147 p.

VON SPERLING, Marcos. **Princípios do Tratamento Biológico de Água Residuárias: Introdução a Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2005a. 452 p.

VON SPERLING, Marcos. **Princípios do Tratamento Biológico de Água Residuárias: Lodos Ativados**. Belo Horizonte: UFMG, 2005b. 428 p.