

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

**STEPHANIE LURI KACUTA**

**IRRADIAÇÃO DE MICRO-ONDAS E *AIR STRIPPING* EM SISTEMA  
CONTÍNUO PARA REMOÇÃO DE AMÔNIA DE ÁGUA RESIDUÁRIA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**LONDRINA**

**2015**

**STEPHANIE LURI KACUTA**

**IRRADIAÇÃO DE MICRO-ONDAS E *AIR STRIPPING* EM SISTEMA  
CONTÍNUO PARA REMOÇÃO DE AMÔNIA DE ÁGUA RESIDUÁRIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina do Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina, como requisito parcial para à obtenção do título de Engenheira Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Ajadir Fazolo

**LONDRINA**

**2015**



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



## TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Monografia

Irradiação de micro-ondas e *Air Stripping* em sistema contínuo para remoção de amônia de água residuária.

por

Stephanie Luri kacuta

Monografia apresentada no dia 16 de novembro de 2015 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)

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Ricardo Costanzi Nagamine  
(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"

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo amor incondicional e por não medirem esforços em prol do meu futuro, são a razão de eu sempre continuar firme e nunca desistir.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço à Deus por sempre me ajudar nesta caminhada, por me dar forças e nunca me desamparar nas horas difíceis.

À minha família, irmãos e aos meus pais pelo amor e apoio em todas as decisões ao longo da minha vida, a educação e aos cuidados que tiveram em todos esses anos mesmo que a distância.

Ao Prof. Dr. Ajadir Fazolo pela oportunidade, orientação, apoio e dedicação para elaboração deste trabalho.

Aos professores Ricardo e Joseane por aceitarem participar da banca de defesa e pelo enriquecimento no trabalho.

À instituição de ensino pela formação acadêmica adquirida ao longo dos anos de graduação.

A todos os professores por terem me proporcionado o conhecimento e serem responsáveis pelo meu crescimento profissional e àqueles que além de professores se tornaram grandes amigos.

Aos que se dispuseram a me ajudar no laboratório no período de análises, pelos ensinamentos e conhecimento repassados por eles.

Às minhas companheiras de república CT, amigas e eternas irmãs pela amizade em todos esses anos.

Aos meus queridos amigos de infância e aos que fiz durante os anos de graduação, obrigada por me mostrarem o verdadeiro valor da amizade, vocês jamais serão esquecidos.

A todos os envolvidos, muito obrigada.

## RESUMO

KACUTA, Stephanie Luri. Irradiação de micro-ondas e *Air Stripping* em sistema contínuo para remoção de amônia de água residuária. 2015. 43p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2015.

Nesta pesquisa foi investigada a remoção de N-amoniaco pela combinação de micro-ondas e *air stripping* em sistema contínuo. Foi avaliada a influência do pH inicial (9 a 12), da vazão do líquido ( $60$  a  $100 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ) e da concentração inicial de  $\text{N-NH}_3$  ( $1$  a  $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) na remoção de  $\text{N-NH}_3$ , utilizando-se planejamento estatístico Delineamento Composto de Central Rotacional (DCCR), totalizando 20 ensaios. A potência de irradiação de micro-ondas foi mantida em 100% ( $555 \text{ W}$ ) e a vazão de ar  $0,95 \text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}$ . Os resultados indicaram que o percentual de remoção de  $\text{N-NH}_3$  pode ser representado por modelo matemático, com intervalo de confiança de 95%. O valor do pH inicial teve maior influência nos resultados, enquanto que o efeito da vazão da bomba e concentração inicial de  $\text{N-NH}_3$  foram menos expressivos. O efeito da irradiação de micro-ondas no sistema foi menos significativo quando comparado ao pH, visto que a vazão da bomba está relacionada com o tempo de detenção/irradiação do afluente dentro do aparelho. Possivelmente, o intervalo de valores adotados para a vazão da bomba pode ter influenciado a pequena variação da temperatura na saída do aparelho de micro-ondas, com valores entre  $77$  a  $64^\circ\text{C}$ . A porcentagem máxima de remoção de amônia foi de 81,1%, indicando o potencial da combinação da irradiação de micro-ondas e torre de *air stripping* no desempenho de um sistema operado continuamente.

**Palavras-chave:** *Air Stripping*. Micro-ondas. Remoção de amônia. Água Residuária Sintética.

## ABSTRACT

KACUTA, Stephanie Luri. Microwave irradiation and air stripping continuous system for removal of ammonia from wastewater. 2015. 43p. Work Completion of course - Federal Technological University of Paraná, Londrina, 2015.

In this final project, it was investigated the removal of N-ammonia by combining microwave and air stripping in a continuous system. It was evaluated the influence of the initial pH (9 to 12), the liquid's flow ( $60$  to  $100 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ) and the initial concentration of  $\text{N-NH}_3$  ( $1$  to  $5 \text{ gL}^{-1}$ ) through statistical planning Composite Design of Rotational Central (CDRC), totalizing 20 trials. The power of microwave irradiation was maintained at 100% ( $555 \text{ W}$ ) and the airflow  $0.95 \text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}$ . With the analysis of ammoniac N of both initial and final samples of the process, it was possible to calculate the removal percentage. The main results indicate that the linear term of the independent variable pH has greater significance with 5% level, followed by the quadratic term pH, linear term of initial concentration of nitrogen and, the last one, the linear term of the pump flow, being the others not considered significant. The microwave effect in the system was less significant if compared to the pH, since the pump flow rate is related to the retention time of the influent in the apparatus. The low significance of the independent variable pump flow may have been experienced by the short amount of flow range. With these pump flows at the exit of the wastewater microwave oven, water reached a temperature range of  $77$  to  $64^\circ\text{C}$ , with only  $13^\circ\text{C}$  difference. The maximum removal percentage of ammonia in this continuous system was 81.1%, indicating the combination potential of microwave irradiation and air stripping tower in the performance of a continuously operated system.

Keywords: Air Stripping. Microwave. Ammonia removal. Wastewater.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Gráfico da proporção entre a amônia gasosa e o íon amônio em função do pH do meio, com temperatura de 25°C.....	16
Figura 2 – Relação de temperatura e pH com a porcentagem de amônia na água.....	17
Figura 3 – (a) Influência do pH (nitrogênio amoniacal de 500 mg/L, 750 W de potência de micro-ondas, tempo de radiação de 3 minutos) e tempo de radiação MO com e sem aeração (b) (nitrogênio amoniacal de 500 mg/L, MW de potência de 750 W, pH 11) sobre a remoção de nitrogênio amoniacal por MO com e sem aeração.....	19
Figura 4 - Esquema do sistema de remoção de amônia por <i>air stripping</i> .....	21
Figura 5 – (a) Micro-ondas e (b) Parte interna do microondas.....	22
Figura 6 – Curva de calibração do forno de micro-ondas.....	22
Figura 7 – Soprador de ar.....	23
Figura 8 – Bomba dosadora.....	24
Figura 9 – (a) Torre de <i>Air Stripping</i> e (b) Entrada do efluente no topo da torre .....	24
Figura 10 – Recheio da torre.....	25
Figura 11 – Armazenamento das amostras dos ensaios.....	26
Figura 12 – Gráfico de efeito padrão de Pareto.....	30
Figura 13 – Curva de contorno para Concentração de N versus Vazão da bomba.....	33
Figura 14 – Curva de contorno para Concentração de N versus pH.....	34
Figura 15 – Curva de contorno para pH versus Vazão da bomba.....	35
Figura 16 – Relação Vazão do líquido x temperatura x Remoção de N-NH <sub>3</sub> (%).....	36
Figura 17 – Variação da remoção em função do pH dos ensaios nos pontos axiais (11 e 12) e média dos pontos centrais (15 a 20).....	37
Figura 18 - Variação da remoção em função da concentração de N (g.L <sup>-1</sup> ) dos ensaios nos pontos axiais (13 e 14) e média dos pontos centrais (15 a 20).....	38



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Remoção de amônia em diferentes concentrações.....	20
Tabela 2 – Códigos em níveis e valores reais para o planejamento.....	25
Tabela 3 – Matriz do planejamento DCCR com 3 variáveis em 5 níveis.....	29
Tabela 4 – Coeficientes de regressão para remoção de amônia (%)......	30
Tabela 5 – ANOVA para remoção de amônia.....	32
Tabela 6 – Remoção de N-NH <sub>3</sub> dos ensaios 9, 10 e 15 ao 20.....	36
Tabela 7 – Relação remoção de N-NH <sub>3</sub> e energia consumida.....	39

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Parâmetros e métodos utilizados.....	27
---	----

## LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E ACRÔNIMOS

CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DCCR	Delineamento Composto Central Rotacional
MO	Micro-ondas
N	Nitrogênio
N-NH <sub>3</sub>	Nitrogênio na forma de amônia livre
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Nitrogênio na forma de amônia ionizada

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>13</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
<b>4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>14</b>
4.1 NITROGENIO AMONIACAL: ASPECTOS FUNDAMENTAIS .....	14
4.2 AIR STRIPPING DA AMÔNIA .....	15
4.2.1 Efeito do pH.....	16
4.2.2 Efeito da Temperatura.....	17
4.2.3 Efeito da concentração inicial de N-amoniacal.....	20
<b>5. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>21</b>
5.1 INSTALAÇÕES EXPERIMENTAIS.....	21
5.1.1 Forno de micro-ondas modificado .....	22
5.1.2 Soprador de Ar .....	23
5.1.3 Bomba dosadora .....	23
5.1.4 Torre de <i>Air Stripping</i> .....	24
5.2 PROTOCOLO EXPERIMENTAL .....	25
5.2.1 Procedimento experimental.....	26
5.2.2 Descrição do Sistema de remoção de amônia .....	27
5.2.3 Parâmetros monitorados .....	27
5.2.4 Parâmetros calculados .....	27
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>29</b>
6.1 NITROGÊNIO AMONIACAL .....	29
6.2 EFEITO DA VAZÃO DO LÍQUIDO .....	35
6.3 EFEITO DO PH .....	37
6.4 EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DE N NO AFLUENTE .....	38
6.5 RELAÇÃO REMOÇÃO DE AMÔNIA E ENERGIA CONSUMIDA.....	39
<b>7. CONCLUSÃO</b> .....	<b>41</b>
<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>42</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Segundo Pacheco (2014) os processos realizados em um curtume, desde a preparação da pele salgada até a obtenção do couro gera grande volume de efluente, com a presença de compostos químicos, incluindo compostos de nitrogênio (orgânico e amoniacal).

Entre as principais alternativas tecnológicas de remoção do Nitrogênio destacam-se os processos biológicos e os físico-químicos. Em águas residuárias com elevadas concentrações de N-amoniacal e pH alcalino, a tecnologia de *air stripping* (transferência do N-NH<sub>3</sub> do meio líquido para o gasoso e arraste pelo ar) pode ser aplicada como etapa preliminar de tratamento.

Recentemente, Remya e Lin (2011) relataram as possíveis aplicações das micro-ondas no tratamento de águas residuárias. Lin et al. (2009), pesquisaram a aplicação das micro-ondas na remoção da amônia por *air stripping*, em sistemas operados em batelada, obtendo eficiências acima de 80%. Segundo os pesquisadores, o efeito térmico foi o principal responsável pelo desempenho do sistema.

Esta pesquisa buscou associar as tecnologias das micro-ondas e de *air stripping* num sistema de remoção do N-NH<sub>3</sub>, com alimentação contínua, tratando água residuária sintética.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a eficiência da remoção de amônia utilizando um forno de micro-ondas e torre de *air stripping*, em escala laboratorial, em sistema de fluxo contínuo, alimentado com água residuária sintética.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar a influência do inicial pH, concentração de nitrogênio amoniacal e da vazão da bomba na remoção do N-NH<sub>3</sub>;
- Avaliar a influência das micro-ondas na remoção de amônia do sistema.

## 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 NITROGENIO AMONIACAL: ASPECTOS FUNDAMENTAIS

Como escreve Von Sperling (2007) o nitrogênio em seu ciclo na biosfera é encontrado em diversas formas moleculares, sendo predominantes: nitrogênio molecular ( $N_2$ ), nitrogênio orgânico, amônia livre ( $NH_3$ ), íon amônio ( $NH_4^+$ ), íon nitrito ( $NO_2^-$ ) e íon nitrato ( $NO_3^-$ ).

Rocha et al. (2009), cita que o nitrogênio apesar de ser um dos elementos mais abundantes na Terra, apenas 0,02% dele está disponível para ser utilizado pelas plantas e a maior parte se encontra na forma molecular ( $N_2$ ) ou agregadas em rochas.

De acordo com Rocha et al. (2009), valores como a de produção industrial de nitrogênio tem sido muito maior do que a taxa de crescimento populacional. Um exemplo apresentado por eles é o caso da produção de nitrogênio para uso como fertilizante, sendo produzido na ordem de  $80 \text{ Tg.ano}^{-1}$ , e a amônia emitida naturalmente pelos continentes é de cerca de  $140 \text{ Tg.ano}^{-1}$  e  $15 \text{ Tg.ano}^{-1}$  pelos oceanos.

Em um curso d'água, a determinação da forma predominante do nitrogênio pode fornecer indicações sobre o estágio da poluição, se o evento ocorrido foi recente ou remoto (Von SPERLING, 2007 p.457).

A presença do nitrogênio nas águas, nas formas de nitrogênio orgânico (40%) e amônia (60%) podem ser relacionadas com o lançamento de despejos domésticos, industriais, assim como os fertilizantes na forma de nitrato que são utilizados em solos passíveis de serem lixiviados pelas chuvas (Libânio, 2010 p.57).

Segundo Rocha et al. (2009), a preocupação quanto ao ciclo do nitrogênio e seu desequilíbrio irá crescer e se tornar motivo de debates ambientais, da mesma forma que hoje ocorre com o ciclo do carbono.

Existem diversos tipos de tecnologias que objetivam a remoção do N-Amoniacal, métodos de âmbito químico, físico e biológico.

Através da literatura (SHRIVER; ATKINS, 2008, p. 383) têm-se que a Equação 1 de equilíbrio do íon amônio com a amônia é:



A Equação 2 (Von SPERLING, 2005 p.99) de equilíbrio mostra que além do pH a temperatura também possui influência, sendo dada por:

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

Sendo que T representa a temperatura (°C) e o pH potencial hidrogeniônico do meio (adimensional).

De acordo com o Programa de Pesquisas em Saneamento Básico (PROSAB) (2009), o equilíbrio de Equação 2 é deslocado pelo pH e pela temperatura. Para águas residuais com pH acima de 7 a equação 1 é deslocada para a esquerda, havendo a conversão do íon amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) em gás amônia. Dessa forma, como o pH influi diretamente para o deslocamento, pode-se dizer que quanto mais elevado o pH for, maior será a conversão a favor do gás amônia.

## 4.2 AIR STRIPPING DA AMÔNIA

Segundo PROSAB (2009) o processo de *air stripping* consiste em basicamente transferências de meios, na qual ocorre a transferência de fases de um meio líquido para o meio gasoso. No *air stripping* o composto transferido para um meio gasoso é o denominado soluto, enquanto que os restantes são inertes. Os equipamentos utilizados podem ser variados, dependendo das características de cada sistema tratado, do tipo de composto que será removido, fatores econômicos entre



outros. A aplicação deste método é utilizada por indústrias em geral, englobando desde a indústria petroquímica à alimentícia.

O *air stripping* da amônia só é possível se houver a predominância de  $\text{N-NH}_3$  no efluente.

Souto (2009), desenvolveu um sistema piloto de torre de *air stripping* para testar o processo de remoção de amônia de lixiviado de aterro sanitário e comprovou que o arraste com ar remove os compostos orgânicos voláteis presentes.

#### 4.2.1 Efeito do pH

Souto (2009) construiu o gráfico de proporção entre  $\text{NH}_3$  e  $\text{NH}_4^+$  encontradas de nitrogênio amoniacal fazendo-se em função do pH em seu trabalho, sendo representado pela Figura 1:

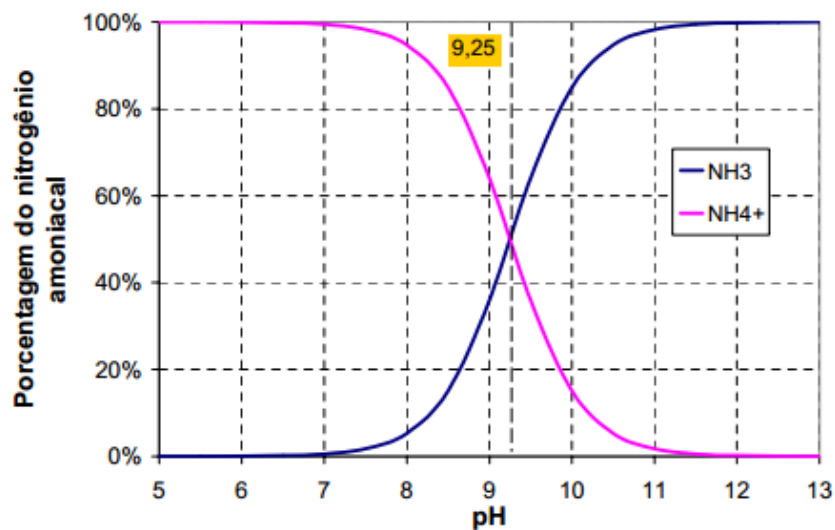
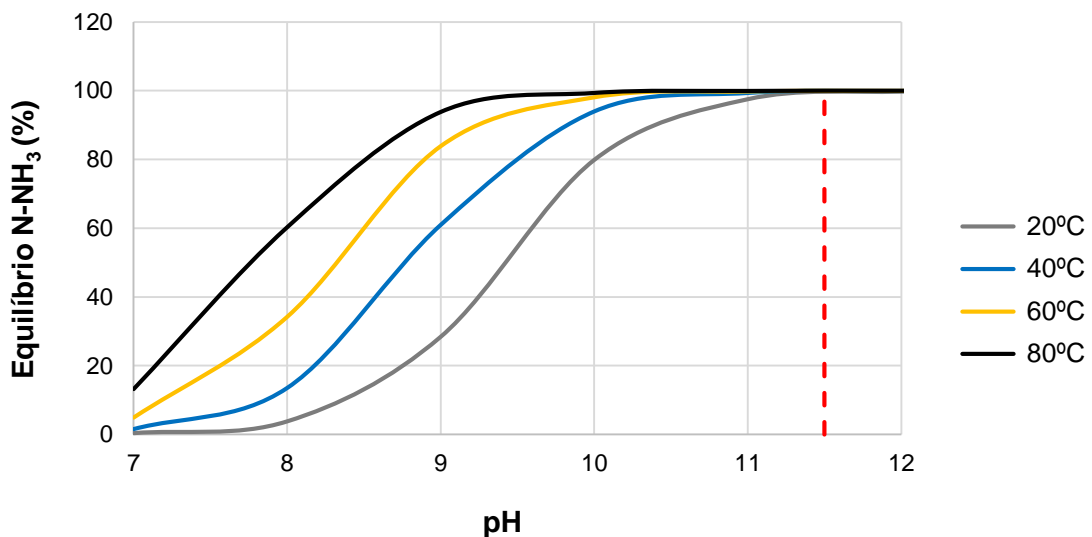


Figura 1 – Gráfico da proporção entre a amônia gasosa e o íon amônio em função do pH do meio, com temperatura de 25°C  
Fonte: Souto (2009, p. 157)

De acordo com a Figura 1, é possível observar claramente a proporção das formas de amônia encontradas em cada pH. Visto que por volta de pH igual ou maior a 11,5 praticamente prevalece a amônia gasosa, o melhor pH para se trabalhar seria este, enquanto que em pH aproximadamente igual ou menor a 7 a forma que prevalece é o íon amônio.

#### 4.2.2 Efeito da Temperatura

A Figura 2, representa a equação de equilíbrio do íon amônio com a amônia considerando as temperaturas de 20°C a 80°C e diferentes valores de pH para observar a porcentagem de amônia.



**Figura 2 – Relação de temperatura e pH com a porcentagem de amônia na água**

Pode-se observar na Figura 2, que a elevação da temperatura resulta no aumento da fração de gás amônia na solução, porém, para pH superior a 10, o acréscimo de N-NH<sub>3</sub> deixa de ser importante.

##### 4.2.2.1 Aplicação das micro-ondas na elevação da temperatura

Micro-ondas (MO) são radiação eletromagnética não ionizante, que possuem uma frequência que vai de 300 a 300.000 MHz e que corresponde a comprimentos de onda de 1 mm a 1 m (SANSEVERINO, 2002).

Rosini et al. (2004, p 1012), explicam que o aquecimento de um material por irradiação com micro-ondas se dá devido à interação da onda eletromagnética com o

dipolo elétrico da molécula. Chama-se atenção a um atributo importante desse tipo de aquecimento, o material a ser aquecido absorve diretamente a energia, ao contrário do que ocorre quando o aquecimento é realizado por convecção, no qual a energia é transferida lentamente do recipiente de reação para a solução. Assim, o aquecimento por micro-ondas é seletivo e dependerá, principalmente, da constante dielétrica e da frequência de relaxação do material.

Atualmente existem várias empresas que fabricam aparelhos de micro-ondas em escala industrial para usos diversos como secagem de madeira, extração de óleo entre outros. Uma das empresas fabricantes é a Ghandehr Tecnologia Avançada, criada em 2001, com sede na cidade Curitiba – PR.

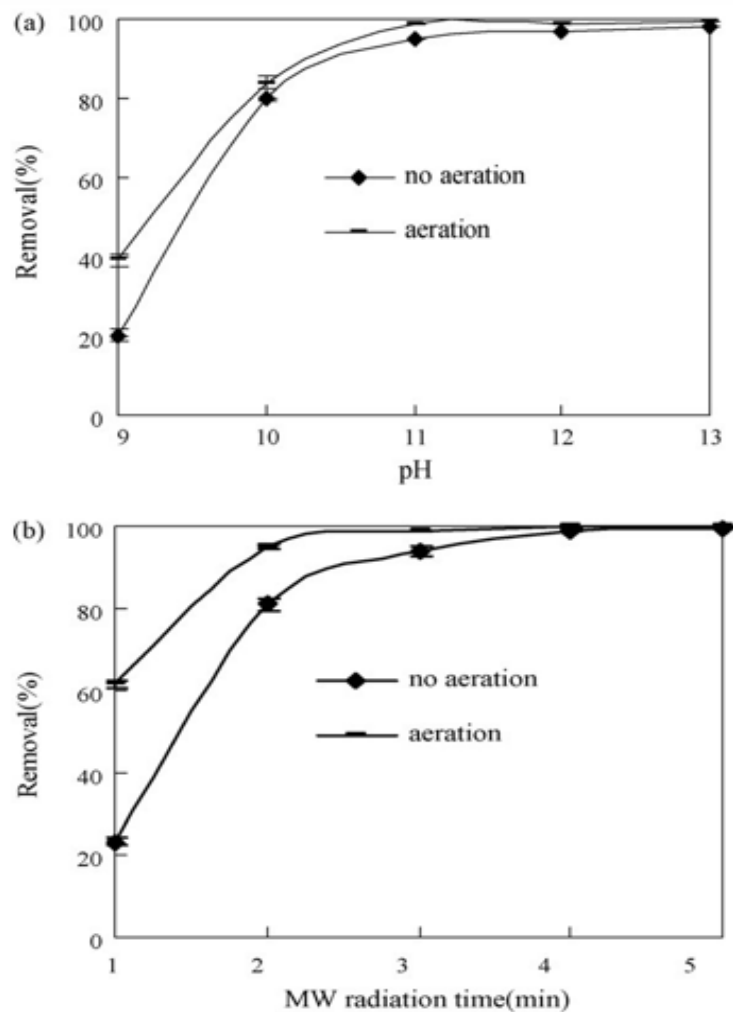
#### 4.2.2.2 Micro-ondas utilizado para remoção de amônia

Lin et al. (2009a), utilizaram um micro-ondas doméstico adaptado para o teste de remoção de amônia de água residual de coqueria. Para que a máxima eficiência do processo fosse alcançada, foram feitas a otimização dos parâmetros de operação, sendo assim investigados: pH inicial, concentração inicial de N-NH<sub>3</sub>, taxa de aeração e tempo de radiação micro-ondas. Chegou-se à conclusão de que o pH e o tempo de radiação são os fatores que mais influenciam na eficiência do processo, ao contrário da aeração e concentração inicial de amônia; comprovaram que a remoção de amônia aumenta drasticamente quando há aumento de temperatura acima de 80°C. Para estes autores o método representa uma abordagem alternativa para a remoção de alta concentração de nitrogênio amoniacal de águas residuais de coqueria.

Rabah e Darwish (2012), realizaram um experimento utilizando o micro-ondas para testar também a eficiência da remoção de amônia, porém de águas residuais municipal e de origem sintética para comparação. Características como o pH, concentração inicial de amônia e tempo de radiação foram analisados. O sistema utilizado foi em batelada, de modo que um aparelho de micro-ondas foi adaptado para haver uma saída para o nitrogênio, este ligado a um condensador para a mudança do estado físico do composto. Os resultados apresentados pelos autores mostram que os parâmetros de pH inicial e o tempo de radiação de micro-ondas são diretamente proporcionais a remoção, quando são fixados valores de pH igual a 11 e concentração inicial de 55 mg.L<sup>-1</sup> de N-NH<sub>3</sub>, ao variar o tempo de radiação de micro-ondas de 1 a 5 minutos por exemplo, a concentração após 1 minuto de radiação de micro-ondas foi

de  $36 \text{ mg.L}^{-1}$  e após 4 minutos chegou a  $4,9 \text{ mg.L}^{-1}$  de  $\text{N-NH}_3$ . O maior valor de remoção foi de 91% e as condições que os autores Rabah e Darwish (2012) consideraram ideais foram de pH igual a 11 e tempo de radiação de micro-ondas com potência 700W de 4 minutos.

Lin et.al (2009b), realizaram processos de *air stripping* com aquecimento de micro-ondas, utilizando águas residuais e seus resultados geraram a Figura 3a e Figura 3b:



**Figura 3 – (a) Influência do pH (nitrogênio amoniacal de  $500 \text{ mg/L}$ ,  $750 \text{ W}$  de potência de micro-ondas, tempo de radiação de 3 minutos) e tempo de radiação MO com e sem aeração (b) (nitrogênio amoniacal de  $500 \text{ mg/L}$ , MO de potência de  $750 \text{ W}$ , pH 11) sobre a remoção de nitrogênio amoniacal por MO com e sem aeração**  
 Fonte: Lin et.al (2009b)

Através da Figura 3 pode-se observar a influência da aeração em ambos os casos da Figura 3a e Figura 3b, em que a aeração é um dos parâmetros que tornam o sistema mais eficiente. No caso da remoção variando o tempo de radiação do micro-

ondas (Figura 3b) a potência de 750W, com pH igual a 11, a completa remoção ocorre com 5 minutos de tempo de radiação. Na Figura 3a a completa remoção ocorre em pH igual a 13 e tempo de radiação de 3 minutos, sendo que ambos os casos são expostos a mesma potência de micro-ondas.

#### 4.2.3 Efeito da concentração inicial de N-amoniaco

No trabalho realizado por Lin et.al (2009), foi analisado também o efeito da variação da concentração de N-NH<sub>3</sub> inicial para o processo de remoção. Na Tabela 1 estão os resultados encontrados ao final do seu trabalho.

**Tabela 1 – Remoção de amônia em diferentes concentrações**

Concentração Inicial (mg.L <sup>-1</sup> )	500	1270	2360	6000	12000
Concentração final (mg.L <sup>-1</sup> )	8	32,8	62,0	216,1	473,1
Remoção (%)	98,4	97,4	97,3	96,4	96,1

**Nota: 750W de potência do micro-ondas, pH 11, 3min de tempo de radiação e presença de aeração**

**Fonte: Lin et.al (2009) adaptado**

Na Tabela 1 é possível perceber o decaimento da porcentagem de remoção de acordo com o aumento da concentração inicial de N-NH<sub>3</sub>. Embora a eficiência de remoção de amônia tenha diminuído no intervalo de concentração de 500 para 12000 mg.L<sup>-1</sup>, a diferença foi pequena comparada a concentração, visto que a redução foi de apenas 2,3%.

## 5. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado nos laboratórios de Saneamento Ambiental e Hidráulica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina. Para o sistema de remoção de amônia foram utilizados um aparelho de micro-ondas adaptado seguido por uma torre de *air stripping* recheada com tubo corrugado.

### 5.1 INSTALAÇÕES EXPERIMENTAIS

A Figura 4 apresenta o esquema das instalações experimentais para o experimento.

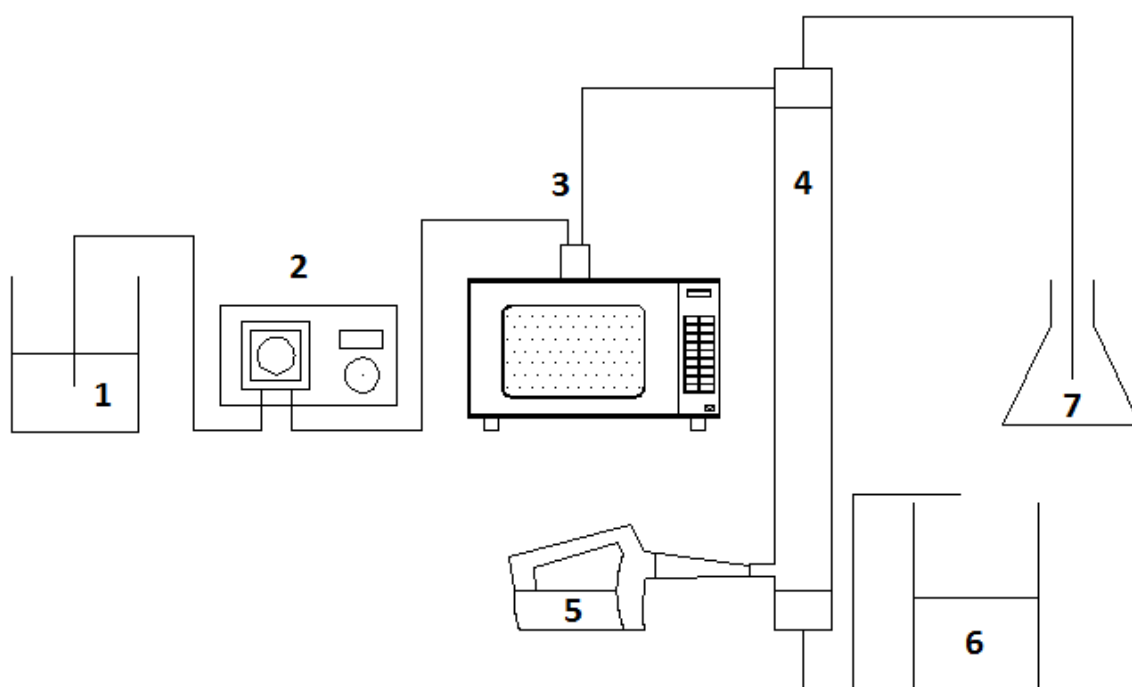


Figura 4 – Esquema do sistema de remoção de amônia por *air stripping*: (1) Entrada do efluente; (2) Bomba dosadora; (3) Aparelho de micro-ondas; (4) Torre de *Air Stripping* recheada; (5) Soprador de ar; (6) Saída do efluente; (7) Recuperação da amônia em ácido.

### 5.1.1 Forno de micro-ondas modificado

O aparelho de micro-ondas utilizado foi um forno doméstico, com capacidade de 25 Litros, potência nominal de 750 W e frequência de 2450 MHz. Foram adaptados 2 furos na parte superior para a entrada e saída do efluente por uma mangueira (Figura 5a). Em seu interior foi colocado um erlenmeyer com 500 mL de água para que a mangueira pudesse ficar enrolada em contato com o vidro para favorecer o aquecimento da mangueira e por precaução a segurança do aparelho (Figura 5b).

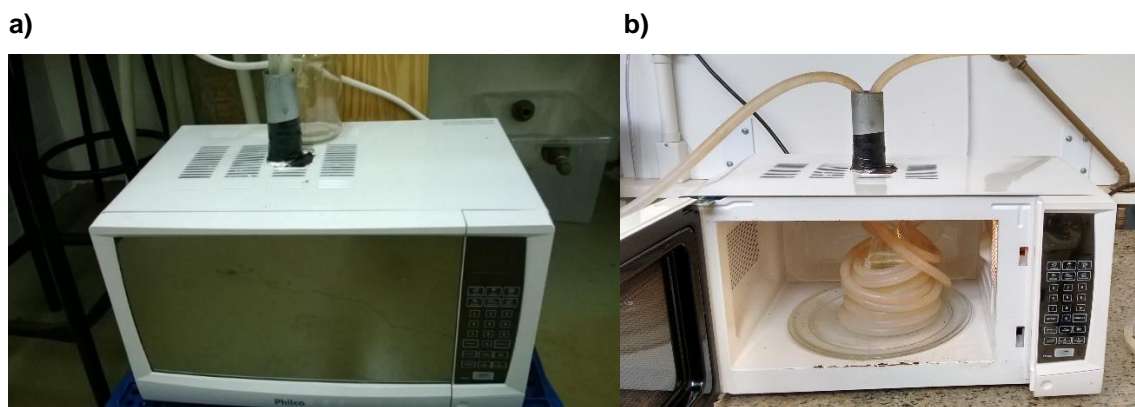


Figura 5 – (a) Micro-ondas e (b) Parte interna do micro-ondas

A curva de calibração para este forno de micro-ondas está representada na Figura 6.

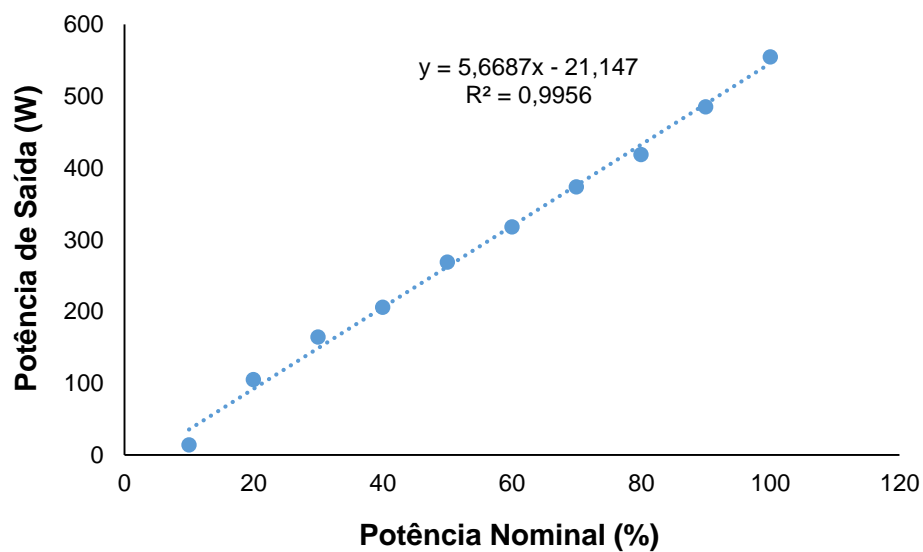


Figura 6 - Curva de calibração do forno de micro-ondas

Na Figura 6 podemos ver que a potência nominal de 100% não alcança o valor de 750 W descrito pelo fabricante, o valor real encontrado para a potência máxima do forno de micro-ondas foi de 555 W.

### 5.1.2 Soprador de Ar

O aparelho utilizado para a vazão de ar na torre foi o soprador de ar (Figura 7) da marca Makita, modelo MUB103 com potência de 530W, vazão de 1,2 a 2,9  $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  com descarga livre. Devido à perda de carga na torre de *air stripping*, a vazão de ar medida foi de 0,95  $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ . Esta vazão foi utilizada em todos os ensaios.



Figura 7 – Soprador de ar

### 5.1.3 Bomba dosadora

Foi utilizado uma bomba dosadora (Figura 8) da marca Provitec com capacidade de 0 a 100  $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$  para bombear o efluente pelo sistema, as vazões foram variadas em 5 valores de acordo com o planejamento experimental.

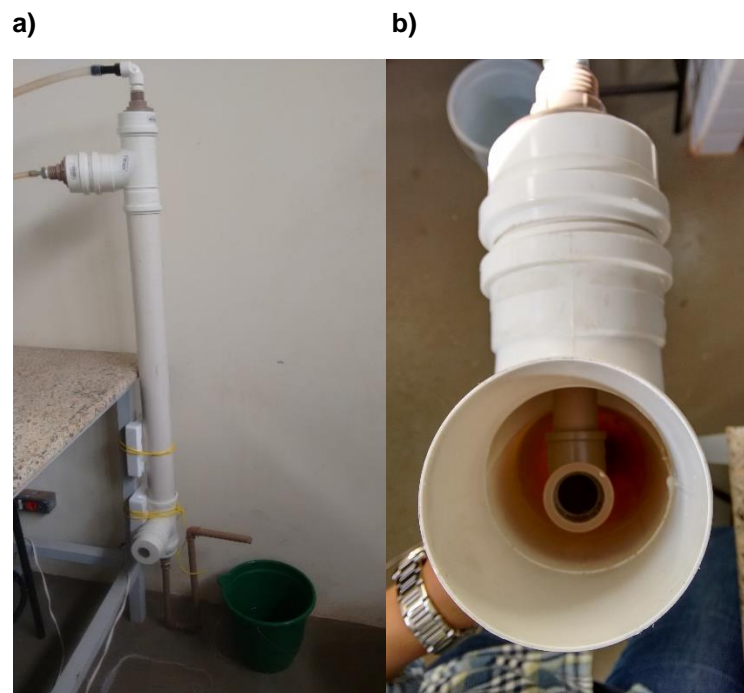




**Figura 8 – Bomba dosadora**

#### 5.1.4 Torre de *Air Stripping*

A torre foi construída no laboratório de hidráulica e possui altura de 1,20 metros (Figura 9a). Na extremidade superior da torre foi colocado um joelho 90° invertido para cima, para facilitar na dispersão do efluente na torre (Figura 9b). A entrada do efluente se dá pela lateral superior da torre e a saída pela parte inferior. Na parte superior da torre há uma mangueira de silicone acoplada para a saída da amônia que foi arrastada e na lateral da parte inferior há uma entrada para o soprador de ar.



**Figura 9 – (a) Torre de *Air Stripping* e (b) Entrada do efluente no topo da torre**

O recheio da torre foi feito com conduítes cortados com espessura de 1,5 cm (Figura 10).



Figura 10 – Recheio da torre

## 5.2 PROTOCOLO EXPERIMENTAL

Para o estudo da remoção de amônia foi utilizado o planejamento estatístico apresentado por RODRIGUES E IEMMA (2005), o DCCR (Delineamento Composto Central Rotacional) que estuda as variáveis independentes no processo.

As variáveis independentes testadas foram 3, sendo elas: pH do efluente inicial, vazão da bomba e concentração inicial de nitrogênio. Os valores das variáveis foram escolhidos para este experimento tendo base no referencial teórico. Segue na Tabela 2 os valores reais e codificados para o planejamento estatístico do DCCR.

Tabela 2 – Códigos em níveis e valores reais para o planejamento

Variáveis Independentes	Valores codificados e reais				
	-1,68	-1	0	1	1,68
pH	9,0	9,6	10,5	11,4	12,0
Vazão da bomba (mL.min <sup>-1</sup> )	60	68	80	92	100
Concentração N-NH <sub>3</sub> (g.L <sup>-1</sup> )	1,0	1,8	3,0	4,2	5,0

### 5.2.1 Procedimento experimental

Para cada ensaio a água residuária foi produzida com a dissolução de Sulfato de Amônio ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ) em 2 L de água ( $\text{H}_2\text{O}$ ). A quantidade em gramas de  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  foi de acordo com a concentração inicial de nitrogênio (N) requerida no DCCR. O ajuste de pH dessa amostra inicial para alcançar aos valores propostos no planejamento foi feito com a adição de hidróxido de Sódio (NaOH) na solução.

Foram preparados então 2 L de água residuária sintética no frasco inicial do sistema para alimentação de cada ensaio, na qual a concentração de nitrogênio na solução variou de acordo com o planejamento estatístico (Tabela 2), assim como o valor de vazão da bomba. A potência do aparelho de micro-ondas e a vazão de ar do soprador foram fixados em 100% (555 W) e  $57 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  ( $950 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ) respectivamente.

Para a parte do sistema especificado como item 7 na figura 4, no qual indica a saída do gás amônia no topo da torre, foi conectada uma mangueira de silicone a um erlenmeyer com 20 mL de ácido sulfúrico aproximadamente 1 M diluído em 500 mL de água para a retenção do gás, a troca dessa solução foi realizada a cada ensaio.

Foram coletadas a cada ensaio 40 mL das amostras iniciais e finais e então reservadas em frascos com tampa previamente limpos na geladeira a  $10^\circ\text{C}$  (Figura 11). Para cada amostra foram feitas as análises de nitrogênio amoniacal e condutividade.



Figura 11 – Armazenamento das amostras dos ensaios

### 5.2.2 Descrição do Sistema de remoção de amônia

O sistema ocorreu em modo contínuo de forma que na parte inicial do sistema o efluente sintético foi bombeado em uma mangueira, cujo destino foi o interior do aparelho de micro-ondas. Um comprimento equivalente a 3,95 metros da mangueira foi deixado dentro do aparelho de micro-ondas para o tempo de aquecimento, a saída foi dada por outro orifício no aparelho de micro-ondas. Dessa forma o efluente foi levado diretamente pela mangueira à entrada da torre de *air stripping*. O efluente fez então o caminho de acordo com a gravidade, passou pelos recheios da torre ao mesmo tempo que estava em processo de arraste de ar pelo soprador em seu interior e saiu na parte inferior da torre. A saída do gás amônia foi feita na parte superior da torre por outra mangueira, a qual estava em contato com ácido sulfúrico diluído para a retenção do gás.

### 5.2.3 Parâmetros monitorados

Foi utilizada a metodologia *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* AWWA/APHA/WEF (2005), de acordo com o Quadro 1 abaixo:

Parâmetro Analisado	Método utilizado
pH	4500 H+B
N-amoniaco	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).

### 5.2.4 Parâmetros calculados

#### Eficiência de remoção de Nitrogênio na torre de arraste

Para obter o cálculo da eficiência do processo de remoção de amônia foi utilizado a Equação 3.

$$E(\%) = \frac{C_{(N-NH_3)a} - C_{(N-NH_3)e}}{C_{(N-NH_3)a}} \times 100 \quad (3)$$

Sendo:

$E(\%)$  a eficiência de remoção N-NH<sub>3</sub> (%)

$C_{(N-NH_3)a}$  a concentração afluente de N-NH<sub>3</sub> (mgN-NH<sub>3</sub>.L<sup>-1</sup>)

$C_{(N-NH_3)e}$  a concentração efluente de N-NH<sub>3</sub> (mgN-NH<sub>3</sub>.L<sup>-1</sup>)

### **Relação da remoção de amônia por energia em Quilowatt-hora consumida**

Para a obtenção da relação entre a amônia em mg removida por energia gasta em kW.h em cada ensaio, foi utilizada a Equação 4 e 5.

$$Y = \frac{V}{Q_b} \times \text{Pot.} \quad (4)$$

Sendo:

$Y$  a energia consumida pelo ensaio (kW.h)

$V$  o volume utilizado em cada ensaio (L)

$Q_b$  a vazão da bomba (L.h<sup>-1</sup>)

$\text{Pot.}$  a potência do aparelho de micro-ondas (kW)

$$\frac{\text{Remoção de amônia (mg N)}}{\text{Energia consumida (kW.h)}} = \frac{\text{Vol.} \times \text{Conc.} \times \text{Rem.}}{Y} \quad (5)$$

Sendo:

$V$  o volume utilizado em cada ensaio (L)

$\text{Conc.}$  a concentração inicial de N-NH<sub>3</sub> (mg.L<sup>-1</sup>)

$\text{Rem.}$  a remoção de amônia (%)

$Y$  a energia consumida pelo ensaio (kW.h)

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 NITROGÊNIO AMONIACAL

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos de remoção do nitrogênio amoniacal as condições operacionais previstas no planejamento DCCR.

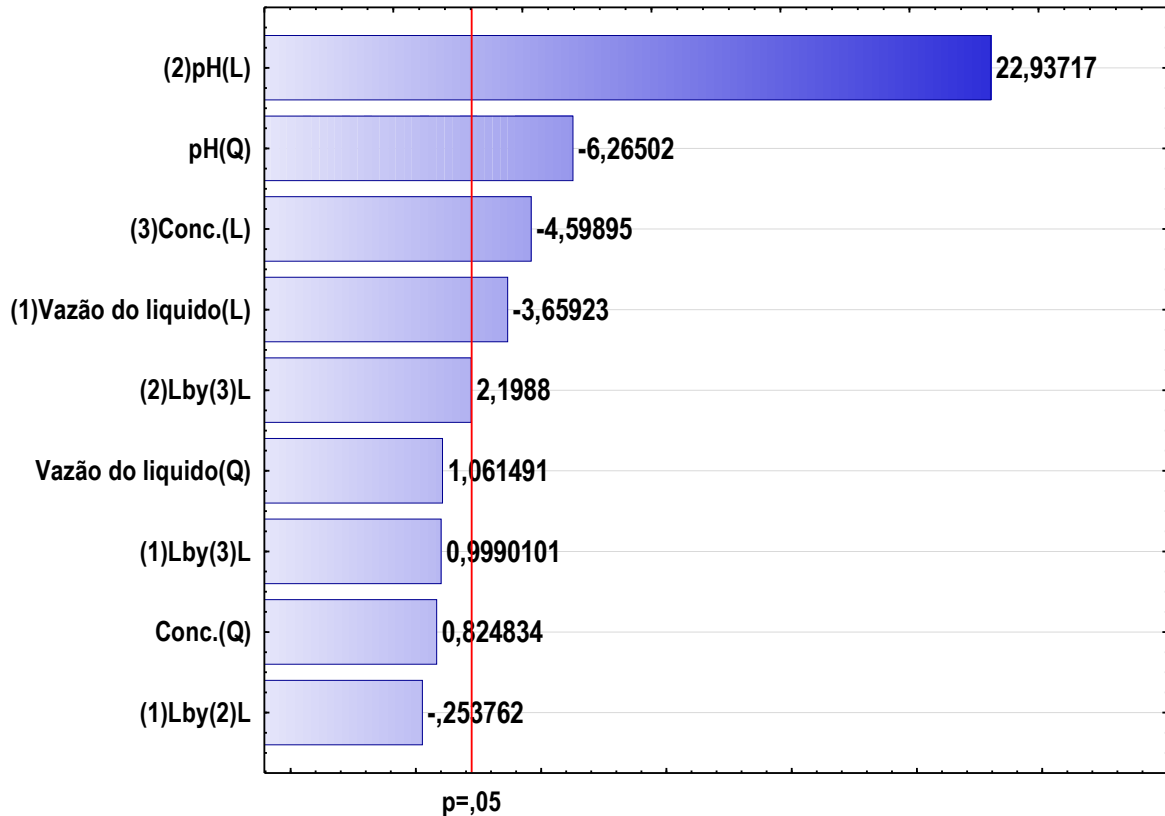
Tabela 3 - Matriz do planejamento DCCR com 3 variáveis em 5 níveis

Ensaio	Fatores (Valores codificados)			Fatores (Valores reais)			Remoção (%)
	Vazão bomba	pH <sub>o</sub>	N-NH <sub>3</sub>	Vazão bomba (mL.min <sup>-1</sup> )	pH <sub>o</sub>	N-NH <sub>3</sub> (g.L <sup>-1</sup> )	
1	-1	-1	-1	68	9,6	1,8	37,9
2	1	-1	-1	92	9,6	1,8	28,7
3	-1	1	-1	68	11,4	1,8	81,1
4	1	1	-1	92	11,4	1,8	72,1
5	-1	-1	1	68	9,6	4,2	19,6
6	1	-1	1	92	9,6	4,2	17,0
7	-1	1	1	68	11,4	4,2	75,4
8	1	1	1	92	11,4	4,2	70,1
9	-1,68	0	0	60	10,5	3,0	65,3
10	1,68	0	0	100	10,5	3,0	51,8
11	0	-1,68	0	80	9	3,0	6,5
12	0	1,68	0	80	12	3,0	71,4
13	0	0	-1,68	80	10,5	1,0	64,9
14	0	0	1,68	80	10,5	5,0	51,0
15	0	0	0	80	10,5	3,0	55,4
16	0	0	0	80	10,5	3,0	54,0
17	0	0	0	80	10,5	3,0	50,4
18	0	0	0	80	10,5	3,0	56,6
19	0	0	0	80	10,5	3,0	57,5
20	0	0	0	80	10,5	3,0	55,5

A maior eficiência de remoção de N-NH<sub>3</sub> (81,1%) foi observada no ensaio 3, enquanto que a menor (6,5%) ocorreu no ensaio 11.

O efeito, em ordem decrescente, das variáveis independentes pode ser observado no Gráfico de Pareto (Figura 12), estimado para o intervalo de confiança

de 95%. Consta-se que as variáveis pH, concentração de N-NH<sub>3</sub> e vazão do líquido foram estatisticamente significativas, com destaque para a influência do pH.



Estimativa de efeito padrão (Valor absoluto)

Figura 12 – Gráfico de efeito padrão de Pareto

Pelos resultados da Tabela 4 foi possível a obtenção dos coeficientes de regressão das variáveis estatisticamente significativas para a de remoção de amônia do efluente ao nível de significância de 5% ( $p < 0,05$ ).

Tabela 4 – Coeficientes de regressão para remoção de amônia (%)

Fatores	Coefficiente de regressão	Erro padrão	T(10)	P
<b>Média</b>	54,9403	1,466089	37,47406	0,000000
<b>Vazão do líquido (L)</b>	-3,55919	0,972659	-3,65923	0,004395
<b>pH (L)</b>	22,31005	0,972659	22,93717	0,000000
<b>pH (Q)</b>	-5,93129	0,946731	-6,26502	0,000093
<b>Concentração (L)</b>	-4,47321	0,972659	-4,59895	0,000982

De acordo com os coeficientes de regressão apresentados na Tabela 4, o parâmetro que obteve maior significância com nível 5%, isto é, que a participação resultou em uma maior eficiência no processo de remoção de amônia nesse sistema foi o termo linear do pH. Desta forma, a Equação 6, válida para os valores codificados das variáveis independentes, descreve o modelo matemático obtido para a remoção de amônia.

$$Y = 54,9403 - 5,93129.pH^2 + 22,31005.pH - 4,47321.Conc - 3,55919.Q_l \quad (6)$$

Nesta equação 6, o Y representa a remoção de N-NH<sub>3</sub> (%), pH o potencial hidrogeniônico inicial da solução, Conc a concentração afluente de Nitrogênio e Q<sub>l</sub> a vazão do líquido bombeado.

De acordo com o que foi apresentado, o termo linear do pH possui uma situação de proporcionalidade direta com a remoção, visto que seu sinal na Equação 6 é positivo, o aumento do valor de pH gera também o aumento da remoção, diferente da concentração inicial de nitrogênio na solução e a vazão do líquido bombeado. Como era esperado, de acordo com a Equação 6 quanto menor é a vazão do líquido, maior a remoção de amônia, visto que a diminuição da vazão está ligada ao tempo de detenção do efluente dentro do micro-ondas, isto ocorre também com a concentração inicial de nitrogênio no efluente e com o termo quadrático do pH. Os efeitos significativos a nível de significância 5% podem ser observados através dos valores na Equação 6 na qual o potencial hidrogeniônico inicial da solução possui maior valor dentre os demais.



A validade estatística do modelo foi avaliada por meio da ANOVA (Tabela 5).

**Tabela 5 – ANOVA para remoção de amônia**

<b>Fator</b>	<b>Soma dos quadrados</b>	<b>Grau de liberdade</b>	<b>Quadrado Médio</b>	<b>F calc</b>
<b>Vazão do líquido (L)</b>	173,020	1	173,020	128,8355
<b>pH (L)</b>	6798,232	1	6798,232	
<b>pH(Q)</b>	544,967	1	544,967	
<b>Conc. (L)</b>	273,296	1	273,296	
<b>Resíduos</b>	226,729	15	15,115	
<b>Total</b>	8016,243	19		

**L: Linear; Q: Quadrático**

Verifica-se na Tabela 5 que o valor de F calculado é igual a 128,83, o valor tabelado de F é igual a 5,86, assim podemos ver que os valores são bem diferentes, sendo o valor calculado muito superior ao tabelado, comprovando assim que as variáveis independentes são altamente significativas para o processo de remoção de amônia. Além disso, o valor de  $R^2$  é igual a 0,97 indicando uma ótima representação do modelo para este processo.

A partir do modelo, foram geradas curvas de contorno (Figura 13, 14 e 15) que representam o comportamento da remoção do  $N-NH_3$  (%) em função das variáveis independentes.

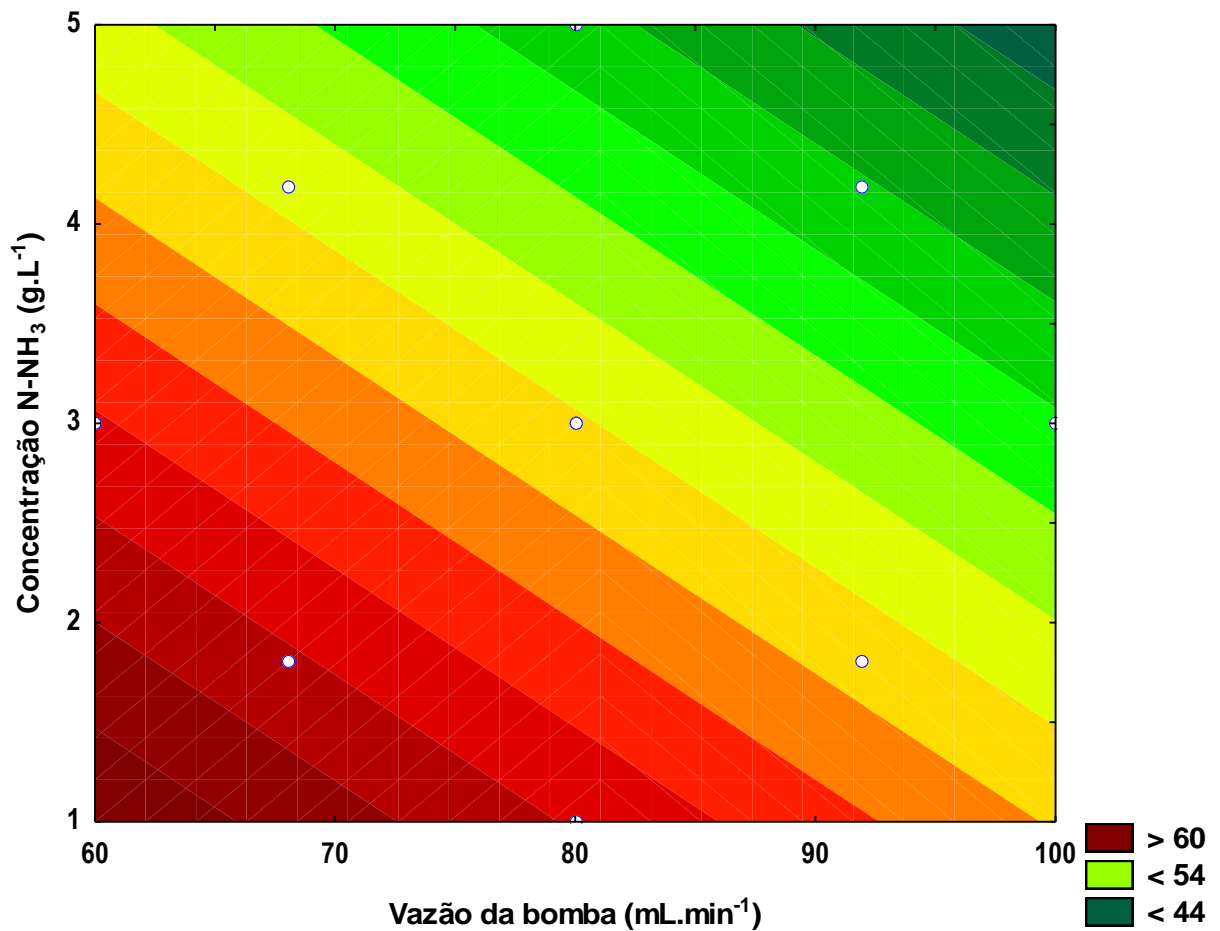


Figura 13 – Curva de contorno para Concentração de N versus Vazão da bomba

A curva de contorno representada na Figura 13 é em função das variáveis independentes Vazão da bomba (mL.min<sup>-1</sup>) e Concentração N-NH<sub>3</sub>. Analisando o gradiente de cores, podemos observar que a maior eficiência de remoção se encontra em valores de concentração baixa de N-NH<sub>3</sub> do afluente em conjunto com a menor vazão de bomba. A medida que se aumenta a vazão da bomba, a remoção diminui, nesse caso se a vazão for igual a 100 mL.min<sup>-1</sup> mesmo que a concentração de N-NH<sub>3</sub> seja a mais baixa (1 g.L<sup>-1</sup>) a remoção não chegaria nem a 50%.

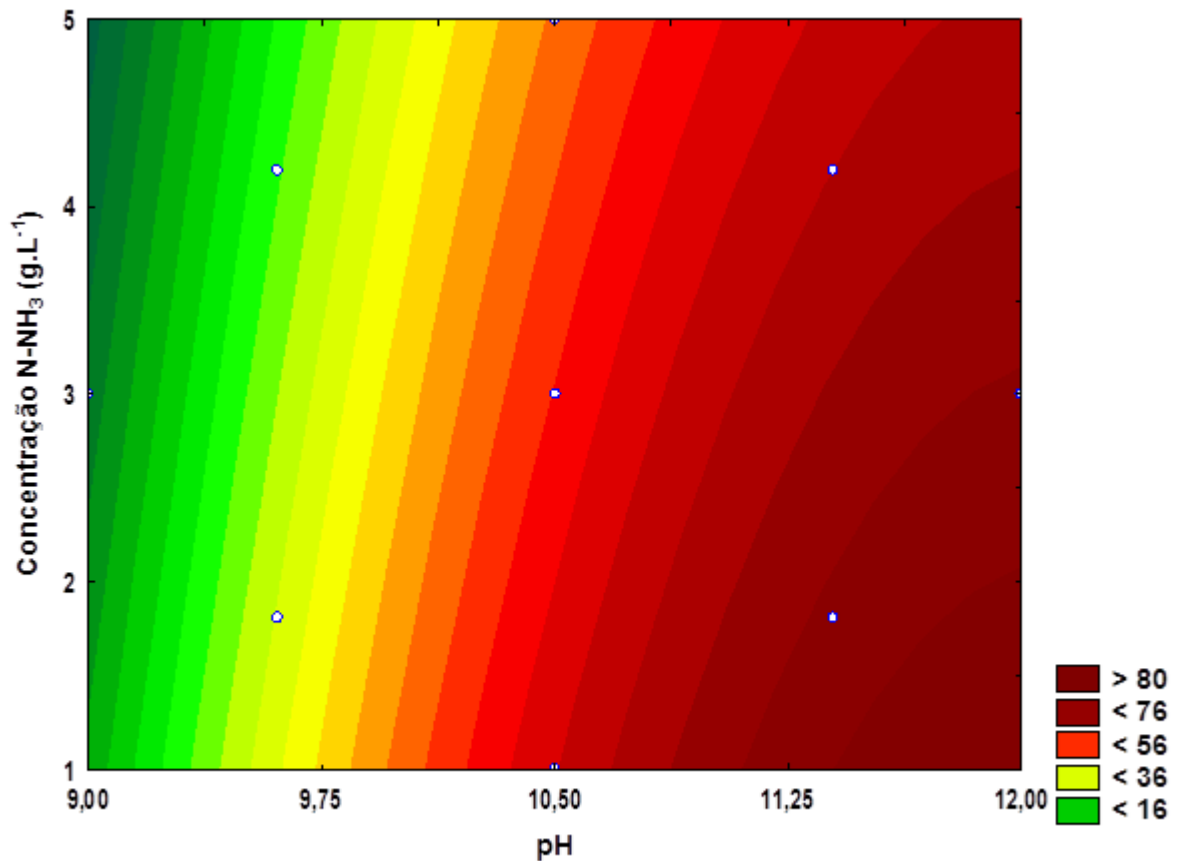


Figura 14 – Curva de contorno para Concentração de N versus pH

As variáveis independentes Concentração de N-NH<sub>3</sub> e pH estão representadas por curvas de contorno na Figura 14 quanto a porcentagem da remoção de N-NH<sub>3</sub>. A maior porcentagem de remoção de amônia quando combinados essas duas variáveis estão na faixa de pH maior que 10,5, independente do valor da concentração de N-NH<sub>3</sub> do afluente. Quanto a concentração de nitrogênio na solução inicial seus valores não influenciam tanto quando combinados com a variável pH.

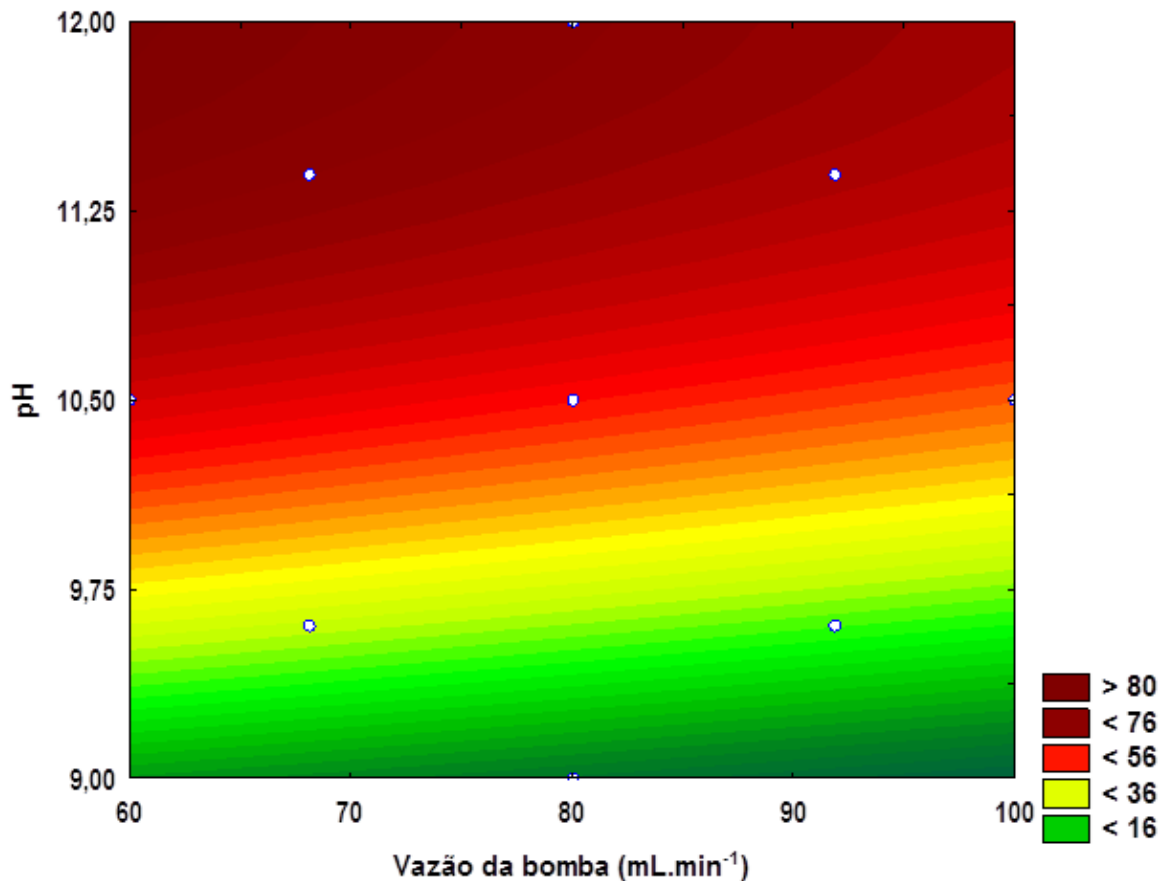


Figura 15 – Curva de contorno para pH versus Vazão da bomba

Analisando a curva de contorno presente na Figura 15, podemos concluir que em relação à variável pH e vazão da bomba, quando combinados, a área de porcentagem de remoção acima de 50% está representada na faixa de pH acima de 10,5 independente da vazão mínima ou máxima testada. Em pH acima de 9 podemos observar que o comportamento do gradiente de cores em relação a remoção de amônia mostra que o aumento da vazão da bomba a um pH constante faz com que a porcentagem de remoção diminua, a menos que haja um aumento de pH de acordo com o aumento da vazão da bomba.

## 6.2 EFEITO DA VAZÃO DO LÍQUIDO

A vazão da bomba está correlacionada com o tempo de irradiação e, conseqüentemente, com a temperatura do líquido, conforme Figura 16. Os dados

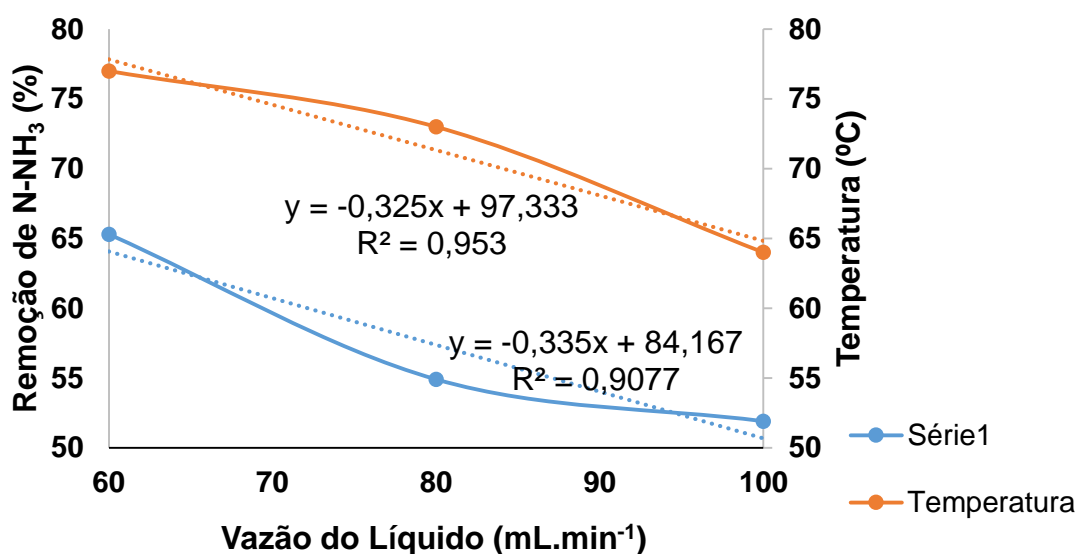
obtidos para a plotagem do gráfico são valores de temperatura do efluente após a passagem pelo micro-ondas na situação do sistema, em relação a vazão ( $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ) do líquido.

Os ensaios 9,10 e os ensaios nos pontos centrais (15 ao 20) foram rodados com os mesmos valores de pH inicial (10,5) e concentração de N inicial ( $3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ), variando apenas a vazão da bomba. Através dessa informação apresentada na Tabela 6 podemos analisar a real relação da vazão do líquido e a remoção da amônia nesta situação.

**Tabela 6 – Remoção de N-NH<sub>3</sub> dos ensaios 9,10 e 15 ao 20**

Ensaio	Vazão da bomba ( $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ )	Tempo de irradiação (min)	Remoção de N-NH <sub>3</sub> (%)
9	60	1,51	65,3
Média (15 ao 20)	80	1,13	54,9
10	100	0,91	51,8

A porcentagem de remoção de N-NH<sub>3</sub> diminuiu com o aumento da vazão do líquido. Com as informações contidas na Figura 16, em relação a vazão do líquido, temperatura e remoção de N-NH<sub>3</sub> podemos observar que a variação da vazão de 60 para  $100 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$  resultou em uma variação de temperatura apenas de  $77^\circ\text{C}$  a  $64^\circ\text{C}$ .

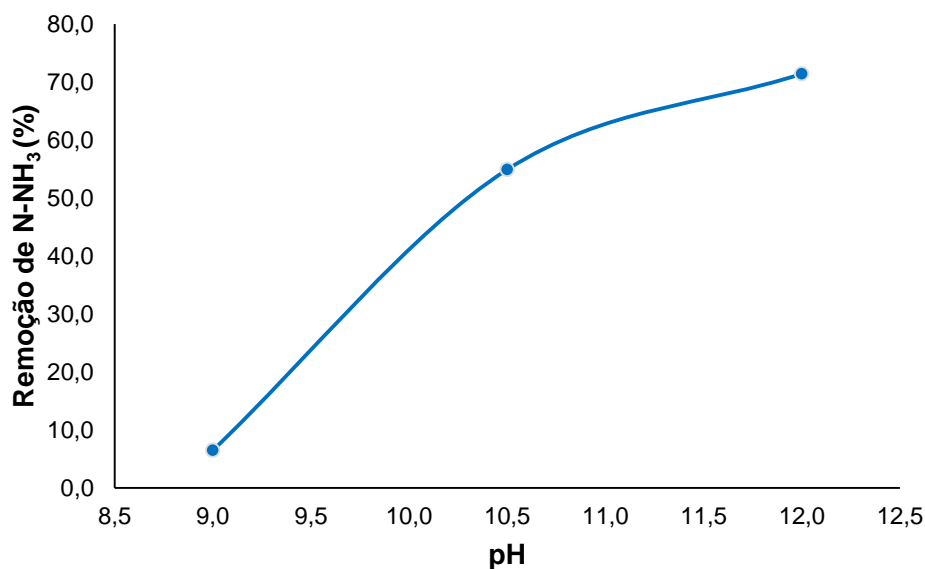


**Figura 16 - Relação Vazão do líquido x temperatura x Remoção de N-NH<sub>3</sub>(%)**

Considerando a análise de variância realizada, vimos que a vazão da bomba, dentre os termos significativos a 5% de significância foi o de menor valor. Isto pode ser explicado por se tratar de temperaturas em um intervalo pequeno e sendo todas em uma faixa de temperaturas altas comparadas ao do meio ambiente, por isso o efeito não foi tão significativo quanto ao do pH. Porém, mesmo possuindo um intervalo curto de vazão da bomba analisado pôde-se comparar e observar que a remoção melhorou de acordo com a diminuição da vazão e aumento da temperatura.

### 6.3 EFEITO DO pH

A variável pH foi a que obteve maior significância para a remoção de N-NH<sub>3</sub>. Na Figura 17 é possível observar o comportamento crescente do gráfico na porcentagem de remoção de acordo com o aumento do pH.

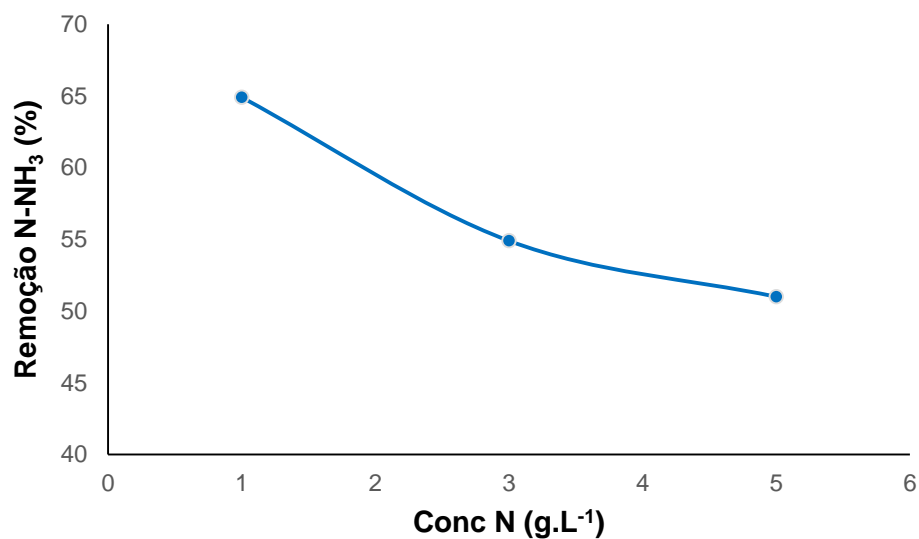


**Figura 17 – Variação da remoção em função do pH dos ensaios nos pontos axiais (11 e 12) e média dos pontos centrais (15 a 20).**

Quando submetidos a situações iguais de vazão do líquido e concentração de N iniciais, a Figura 17 mostra o resultado com valores extremos de pH (9 e 12), a variação na remoção de N-NH<sub>3</sub> nesse caso podemos ver que variou quase 65%.

#### 6.4 EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DE N NO AFLUENTE

No caso da concentração inicial de nitrogênio no afluente, a Figura 18 está representando a remoção de N-NH<sub>3</sub> (%) em relação a ela com iguais valores de vazão do líquido e pH presentes nos ensaios 13, 14 e a média dos pontos centrais do 15 ao 20.



**Figura 18 - Variação da remoção em função da concentração de N (g.L<sup>-1</sup>) dos ensaios nos pontos axiais (13 e 14) e média dos pontos centrais (15 a 20).**

A concentração que obteve maior eficiência no processo de remoção nessa situação foi a menor concentração dada pelo valor de 1 g.L<sup>-1</sup>, que de acordo com os dados obtidos no experimento foram de quase 65% de remoção de amônia em conjunto com o ponto central das outras variáveis (Vazão de bomba igual a 80mL.min<sup>-1</sup> e pH igual a 10,5). Quando em concentração inicial de 5 g.L<sup>-1</sup> o processo de remoção foi menor que em 3 g.L<sup>-1</sup>, o que nos leva a conclusão de que quanto menor a concentração, maior será a remoção de N-NH<sub>3</sub> no efluente.

## 6.5 RELAÇÃO REMOÇÃO DE AMÔNIA E ENERGIA CONSUMIDA

A Tabela 7 apresenta os valores da remoção de amônia pelo sistema utilizado relacionando-o com a energia consumida pelo micro-ondas durante o processo.

Tabela 7 – Relação remoção de N-NH<sub>3</sub> e energia consumida

Ensaio	Fatores (Valores reais)			Remoção (%)	Remoção N- NH <sub>3</sub> / energia consumida (mgN.kW <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> )
	Vazão bomba (mL.min <sup>-1</sup> )	pH <sub>o</sub>	N-NH <sub>3</sub> (g.L <sup>-1</sup> )		
1	68	9,6	1,8	37,9	5015,09
2	92	9,6	1,8	28,7	5138,07
3	68	11,4	1,8	81,1	10731,50
4	92	11,4	1,8	72,1	12907,85
5	68	9,6	4,2	19,6	6051,63
6	92	9,6	4,2	17,0	7101,40
7	68	11,4	4,2	75,4	23280,26
8	92	11,4	4,2	70,1	29282,85
9	60	10,5	3,0	65,3	12707,03
10	100	10,5	3,0	51,8	16800,00
11	80	9	3,0	6,5	1686,49
12	80	12	3,0	71,4	18525,40
13	80	10,5	1,0	64,9	5612,97
14	80	10,5	5,0	51,0	22054,05
15	80	10,5	3,0	55,4	14374,05
16	80	10,5	3,0	54,0	14010,81
17	80	10,5	3,0	50,4	13076,76
18	80	10,5	3,0	56,6	14685,40
19	80	10,5	3,0	57,5	14918,92
20	80	10,5	3,0	55,5	14400,00

De acordo com a Tabela 7 o ensaio de maior eficiência energética, isto é, o ensaio que possuiu maior remoção de nitrogênio amoniacal em mg por Quilowatt-hora foi o ensaio 8, removendo 29.282,85 mg N. O ensaio de número 11, inversamente ao ensaio 8, foi o que obteve a menor remoção de amônia em massa em relação a energia gasta pelo aparelho de micro-ondas sendo igual a 1.686,49 mg. Nos ensaios



nos pontos centrais de 15 a 20, a média calculada de nitrogênio amoniacal removida por Quilowatt-hora é equivalente a 14.244,32 mg. Visto que para o cálculo da relação citada foi utilizada a vazão da bomba como uma forma de mensurar o tempo gasto em cada ensaio e que a variável pH não possui influência direta no valor final obtido, podemos dizer que os valores das variáveis independentes utilizadas no ensaio 8 seriam consideradas pontos ótimos para remoção de amônia em função da energia consumida para o processo.

## 7. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que as variáveis independentes pH, vazão da bomba e concentração de N-NH<sub>3</sub> inicial possuem influência no processo de remoção, sendo o pH o fator de maior significância a nível 5%.

- pH: Foi comprovado que a remoção da amônia aumenta de acordo com o valor do pH sendo a variável responsável pela maior porcentagem de remoção de amônia do sistema; independente de outras variáveis, acima do pH 10,5 a remoção é de no mínimo 50%.
- Vazão da bomba: Possui a menor significância a nível 5%, porém foi constatado que a sua diminuição interfere positivamente na remoção de amônia. A baixa significância da variável pode ter sido pelo curto intervalo de vazão analisado, que foi de 60 a 100 mL.min<sup>-1</sup>, sendo que neste intervalo, a diferença dos valores extremos de remoção foi apenas de 13,5%.
- Concentração de N-NH<sub>3</sub> inicial: Quanto menor a concentração de N-NH<sub>3</sub> no afluente, maior será a remoção ao final do processo. A uma concentração inicial de 1 g.L<sup>-1</sup>, houve uma remoção de 64,9%.

## REFERENCIAS

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.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluentes**. Resolução CONAMA nº 430, de 13 de Maio de 2011. D.O.U., Brasília, Seção I, p. 11356-11361, de 30 de Julho de 1986.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **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**. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. D.O.U. nº 53, Brasília, Seção I, p. 58-63, de 18 de março de 2005.

**Empresa GHANDEHR**. Disponível em: <<http://www.ghandehr.com.br/index.php?i=1>>. Acesso em 26 de Maio de 2015.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 3. Ed. Campinas: Átomo, 2010.

LIN, Li; et al. Removal of ammonia nitrogen in wastewater by microwave radiation: A pilot-scale study. **Journal of Hazardous Materials**, v. 168, p. 862-867, 2009a.

LIN, Li; et al. Removal of ammonia nitrogen in wastewater by microwave radiation. **Journal of Hazardous Materials**, v. 161, p. 1063-1068, 2009b.

PACHECO, J. W. F. **Curtumes – Série P+L**. São Paulo. SP CETESB, 76 p. 2005. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br>>. Acesso em 26 de Maio de 2015.

PEREIRA, L. P. F.; MERCADANTE, C. T. J. A amônia nos sistemas de criação de peixes e seus efeitos sobre a qualidade da água. **Boletim Instituto de Pesca**, v. 31, p. 81-88, 2005.

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.

RABAH, Fahid J. K.; DARWISH, Mohamad S. Characterization of Ammonia Removal from Municipal Wastewater Using Microwave Energy: Batch Experiment. **Environmental and Natural Resources Research**, v. 3, n. 1, p. 42-50, 2013.

REMYA, N.; LIN, J. G. Current status of microwave application in wastewater treatment – A review. **Chemical Engineering Journal**, v. 166, p. 797-813, 2011.

ROCHA, J. C.; ROSA, A. H.; CARDOSO, A. A. **Introdução à Química Ambiental**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

RODRIGUES, Maria I.; IEMMA, Antônio F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos**. Campinas: Casa do Pão, 2005. 326 p.

ROSINI, F.; NASCENTES, C.; NÓBREGA, J. Experimentos didáticos envolvendo radiação microondas. **Química Nova**, v.27, n.6, p.1012-1015, 2004.

SANSEVERINO, A. Microondas em síntese orgânica. **Química Nova**, v.25, n. 4, p. 660-667, 2002.

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.

SHRIVER, D.F.; ATKINS, P. W. **Química inorgânica**. 4ª ed. Porto Alegre, RS: Bookman, 2008. 847 p.

Von SPERLING, Marcos. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Estudos e modelagem da qualidade da água de rios**. 1. ed. v.7. Brasil: Imprensa Universitária da UFMG, 2007.

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.