

III-058 - REMOÇÃO DA AMÔNIA POR IRRADIAÇÃO DE MICRO-ONDAS E AIR STRIPPING UTILIZANDO A METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

Ajadir Fazolo⁽¹⁾

Engenheiro Sanitarista pela Universidade Federal de Santa Catarina. Mestre e Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Londrina -PR.

Carlos Alberto Segatto Rios

Engenheiro Mecânico pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Especialista em Gerência de Engenharia de Manutenção. Mestre em Engenharia Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR Londrina/Paraná.

Marcelo Hidemassa Anami

Engenheiro Agrônomo pela Universidade Estadual de Londrina. Mestre em Engenharia Agrícola pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Doutor em Agronomia pela Universidade Estadual de Maringá. Pós-doutor em Agronomia pela Universidade Estadual de Maringá.

Stephanie Luri Kacuta

Engenheira Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR Londrina/Paraná.

Endereço⁽¹⁾: Avenida dos Pioneiros, 3131 – Jardim Marumbi - Londrina - PR - CEP: 86036-370 - Brasil - Tel: (43) 3315-6100 - e-mail: afazolo@utfpr.edu.br

RESUMO

Esta pesquisa buscou contribuir com o desenvolvimento de alternativas tecnológicas aplicadas à remoção da amônia, presente no efluente da etapa de desencalagem do couro, proveniente de uma indústria de processamento de peles, seguida da recuperação do nitrogênio em lavador de gases. Foram realizados 30 experimentos, aplicando-se irradiação de micro-ondas por 1 minuto, em forno doméstico adaptado 700 W, e 4 minutos de aeração, seguindo planejamento estatístico do tipo Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR). Variou-se a potência de irradiação (Pot.%), vazão de ar (Qar), pH inicial (pH) e diluição do efluente (Conc.). A máxima eficiência de remoção de amônia foi de 94,9% com potência de irradiação 80%, vazão de ar 1,5 L min⁻¹, pH 12 e diluição do efluente de 60%. A recuperação do nitrogênio, em lavador de gases (solução de ácido sulfúrico 0,2 M), foi próxima de 100%.

PALAVRAS-CHAVE: Micro-ondas; Curtume; Nitrogênio; Água residuária

INTRODUÇÃO

O excesso de nitrogênio liberado no meio ambiente pode causar impactos negativos nas qualidades da água, do ar, do solo, na saúde humana e nos ecossistemas (GHALY; RAMAKRISHNAN, 2015).

No entanto, uma ampla gama de tecnologias está disponível para remoção do nitrogênio no meio ambiente, como a nitrificação e desnitrificação biológica, troca iônica, eletrodíálise e *air stripping* (METCALF & EDDY, 2016).

A remoção por *air stripping*, consiste em um processo físico de transferência de um gás solúvel, do líquido para o ar, em virtude de a concentração no líquido ser maior que a concentração de equilíbrio com o gás (FOUST *et al.* 2002). A tecnologia do *air stripping* da amônia possui vários pontos positivos, pois é um processo relativamente simples e de baixo custo para remover amônia em águas residuais (OZTURK *et al.* 2003), é considerado um método apropriado para efluentes que contêm alta concentração de amônia e compostos tóxicos (USEPA, 2000). Além disso, a amônia removida das águas residuais podem ser recuperada como fertilizante agrícola (METCALF & EDDY, 2016).

O sistema de remoção por *air stripping* tem sido amplamente utilizado em experimentos com diversos tipos de efluentes nitrogenados sintéticos e reais (KINIDI *et al.* 2018).

Numerosos estudos destacam os efeitos de diferentes parâmetros operacionais sobre o desempenho do *air stripping* da amônia, tais como a temperatura, o pH e a proporção ar / água.

Pesquisas realizadas por Lin et al. (2009a), Lin et al. (2009b), Remya e Lin (2011) e Rabah e Darwish (2012) Ata et al. (2017), YIN et al. (2018) investigaram os efeitos da irradiação das micro-ondas (MO) na remoção de N-NH₃ da água. Os autores destacam que, além da elevação da temperatura (efeito térmico) a aplicação das micro-ondas pode favorecer a remoção da NH₃ por efeitos não térmicos. Segundo Sanseverino (2002), o aquecimento por micro-ondas difere do forno convencional (a gás ou elétrico) porque nestes casos ocorrem aquecimento por condução, irradiação ou convecção. No aquecimento por MO, também denominado de dielétrico, existem dois mecanismos principais que ocasionam a transformação de energia eletromagnética em calor. O primeiro caso é chamado de rotação de dipolo, que alinha as moléculas (que tenham dipolos permanentes ou induzidas) com o campo elétrico aplicado. Retirando-se o campo as moléculas voltam ao estado desordenado e a energia que foi absorvida é dissipada na forma de calor. O campo elétrico de 2450 MHz oscila mudando de sinal 4,9 x 10⁹ vezes por segundo, causando o aquecimento das moléculas.

Assim, a aplicação a radiação das micro-ondas associada ao *air stripping* da amônia das águas residuais resultou em elevadas eficiências de remoção em escala de bancada (Lin et al. 2009b) e escala piloto contínua (Lin et al. 2009a). Os resultados dos estudos indicaram que pH e o tempo de radiação têm um efeito significativo na remoção do nitrogênio amoniacal, enquanto a concentração inicial de amônia e a aeração não afetam o rendimento. A comparação entre os aquecimentos convencional e o assistido por micro-ondas indicou que o *air stripping* assistida por MW permite elevar a eficiência de remoção de amônia entre 20 a 25% maior do que pelo aquecimento convencional.

O objetivo deste trabalho foi o de avaliar o desempenho de um sistema de micro-ondas associado ao *air stripping* operado em bateladas, na remoção e recuperação do nitrogênio presente em água residuária proveniente da etapa de desengalagem do couro.

MATERIAL E MÉTODOS

Os efeitos da radiação de micro-ondas (MO) aplicada à remoção e posterior recuperação do nitrogênio amoniacal da água residual da etapa de desengalagem (ribeira) foi investigado com o auxílio de um sistema de MO, montado em cima de uma bancada.

A seguir são detalhadas as instalações e os equipamentos utilizados.

Instalações experimentais. A Figura 1 detalha as unidades do sistema de remoção/recuperação de N-NH₃.

Forno de micro-ondas adaptado: marca Philips, modelo PME 22, capacidade de 25 Litros, potência nominal de 750 W (medida 545 W) e frequência de 2450 MHz. Na parte superior, foram executados 2 furos, para entrada e saída de uma mangueira de silicone, que conduzia o ar e ar + NH₃, respectivamente (Figura 1a). Foi realizada a calibração do forno micro-ondas, realizando ensaio com um recipiente contendo 1 litro de água.

O cálculo da potência de saída foi determinado pela medida do aumento da temperatura (°C) de 1 litro de água aquecida conforme potência selecionada, no tempo de 2 minutos. A Equação 1 foi utilizada para o cálculo da potência de saída.

$$P = c_p \cdot K \cdot \Delta T \cdot m / t \quad (1)$$

Sendo:

P = potência absorvida pela amostra (W)

K = fator de conversão de calorias para watts

c_p = capacidade calorífica (cal.°C⁻¹)

m = massa da amostra (g)

t = tempo (s)

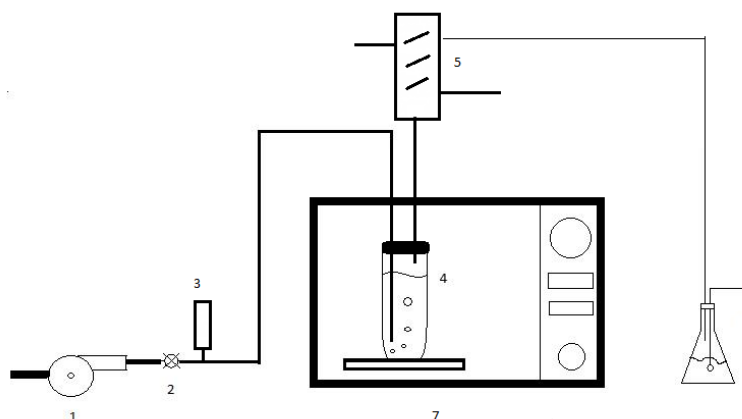
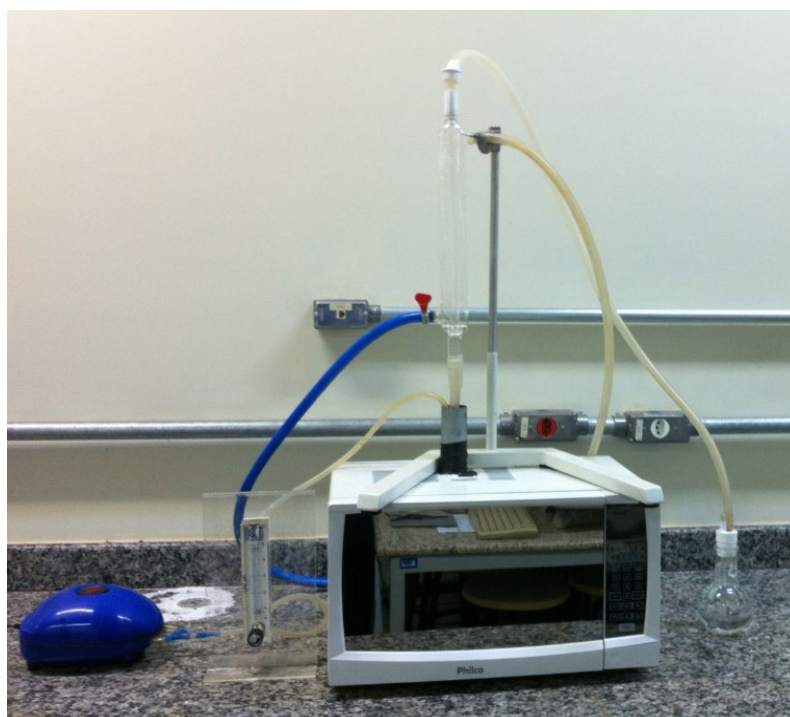


Figura 1: Fotografia e esquema do sistema de micro-ondas e dispositivos: (1) Compressor de ar; (2) válvula de regulação; (3) rotâmetro; (4) recipiente com água residual; (5) condensador; (6) recipiente com solução de ácido sulfúrico; (7) forno de micro-ondas

Foram selecionadas diversas potências de irradiação (entre 0 e 100%), medindo a temperatura inicial e final da água para a verificação da potência de saída da válvula de magnetron. Os dados e resultados obtidos foram plotados em um gráfico, Figura 2, fornecendo a curva de calibração.

Para a verificação de possíveis vazamentos foi utilizado um aparelho Medidor de Vazamentos de Micro-ondas, marca ICEL, modelo MW-2020, escala de 0 a 9,00 mW/cm², calibrado a 2450 MHz, exatidão ± 1 db. Conforme norma americana IEC 335-2-25 a fuga de radiação de micro-ondas máxima permitida é de 5,0 mW/cm² (INMETRO, 2015). Foram realizadas medições próximas ao forno micro-ondas simulando as condições do experimento e a medição máxima foi de 2,5 mW/cm², demonstrando a eficiência do adaptador em conter a radiação de micro-ondas dentro das normas de segurança.

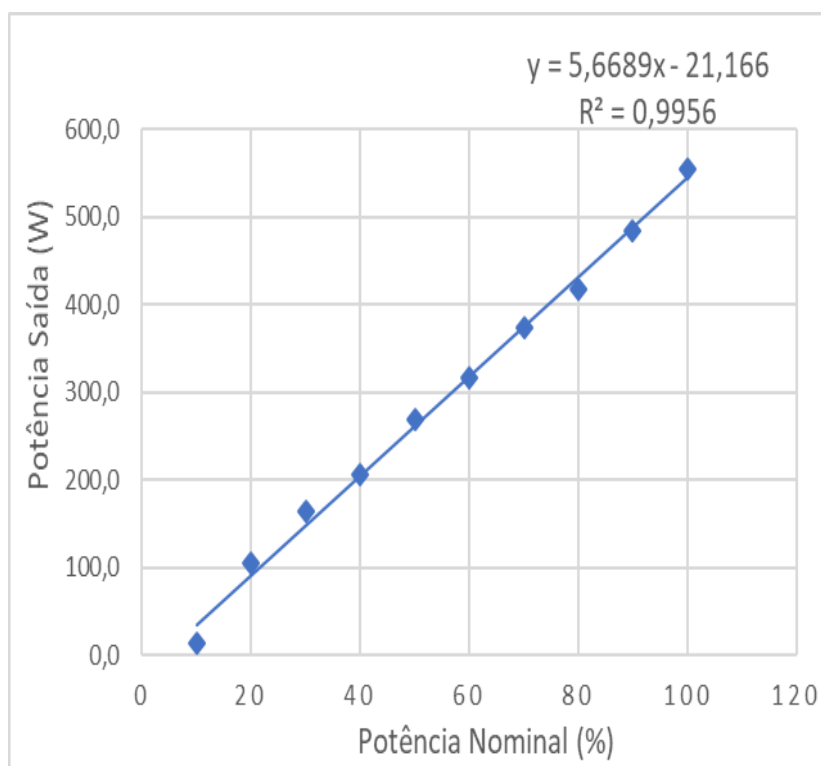


Figura 2: Curva de calibração do micro-ondas

Gás de arraste: O ar (gás de arraste) foi fornecido por um compressor, Figura 1, marca SERA, modelo SERA AIR 550 R, tensão 110 V, frequência 60 Hz, potência 12 W, capacidade 550 L h⁻¹, pressão 150 mbar. A vazão do ar foi regulada em uma válvula na entrada do rotâmetro (entre 0 e 3 L min⁻¹) de marca KEY INSTRUMENTS, modelo FR 4000, série FR.

Condensação da água: na saída do forno de micro-ondas foi instalado um condensador de água para evitar que o vapor de água arrastado pelo ar, contaminasse e saturasse rapidamente a solução ácida de recuperação da amônia.

Recuperação do nitrogênio: o N-NH₃ que saía da torre era recuperado em solução de H₂SO₄ 0,2M, obtendo-se sulfato de amônio, com uso potencial como fertilizante. Para recuperar a amônia, um recipiente contendo 250 mL de solução de ácido sulfúrico 0,2 M foi conectado na mangueira da saída de gases do condensador, proporcionando o contato dos gases com a solução ácida e a lavagem dos gases.

Protocolo experimental: Foram executados trinta (30) ensaios, realizando o planejamento estatístico do tipo delineamento composto central roacional (DCCR) com quatro variáveis independentes: potência de radiação (%), pH inicial (pH), vazão de ar (Qar, L min⁻¹), concentração do efluente (%). Na Tabela 1, elaborada conforme descrito por Rodrigues e Iemma (2005), são apresentados os valores codificados e reais das variáveis independentes utilizadas.

Tabela 1: Valores codificados e reais para as variáveis estudadas – Sistema MO

Variáveis independentes	Valores codificados / reais				
	-2	-1	0	1	2
Potência (%)	60	70	80	90	100
Qar (L min ⁻¹)	0	0,75	1,50	2,25	3,00
pH	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0
Concentração (%)	20	40	60	80	100

Parâmetros monitorados: Os parâmetros analisados estão apresentados na Tabela 2 e seguiram as metodologias descritas no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA 2012).

Tabela 2: Parâmetros analisados e métodos utilizados

Parâmetro analisado	Método utilizado
Condutividade ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	2510 B
pH	4500 H ⁺ B
Alcalinidade Total ($\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$)	2320 B
DQO ($\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1}$)	5220 D
NAT ($\text{mg N-NH}_3 \text{ L}^{-1}$)	4500 NH ₃ B e C
NKT ($\text{mg N-NH}_3 \text{ L}^{-1}$)	4500 N _{org} B
Sólidos Totais (mg L^{-1})	2540 B

Operação do sistema: Inicialmente, para cada ensaio, foi ajustado o pH da água residuária, adicionando-se uma solução de NaOH (6 N), conforme Tabela 1. Imediatamente após a correção do pH, foram segregadas as amostras para análise e para o experimento (150 mL cada). O recipiente contendo a água residuária foi introduzido no forno micro-ondas e conectado às mangueiras de alimentação do ar de arraste, proveniente do compressor, e de retirada dos gases. Na outra extremidade do tubo de saída de gases, na área externa, acima do forno de MO, foi conectado um condensador (Figura 1). A água do condensador permaneceu em circulação para garantir a condensação do vapor de água evitando o arraste da solução da água residual.

O ar (gás de arraste) foi fornecido por um compressor, Figura 1, e a vazão do ar regulada em uma válvula na entrada do rotâmetro (entre 0 e 3 L min⁻¹), conforme o planejamento experimental.

Para recuperar a amônia, foi conectado, um recipiente contendo 250 mL de solução de ácido sulfúrico 0,2 M, na mangueira da saída de gases do condensador, proporcionando o contato dos gases com a solução ácida. A potência de irradiação para cada ensaio foi selecionada no forno micro-ondas conforme a Tabela 1.

Em todos os ensaios, o tempo de aquecimento pelo forno de MO foi de 1 min, ligando-se concomitantemente a bomba de ar. Finalizado o tempo de 1 min de funcionamento do MO, foram cronometrados mais 3 min para que o ar do compressor realizasse o arraste dos gases presentes na solução de água residuária. Logo após, o compressor de ar foi desligado, a solução de água residual foi retirada para as devidas medições e análises, bem como a solução de ácido sulfúrico.

Água residuária: Foi utilizada água residuária retirada diretamente de um fulão após o final da etapa de decalcinação (desencalagem) de uma indústria de couro. As principais características estão na Tabela 3.

Tabela 3: Características da água residuária

Parâmetro	Unidade	Água Residuária
DQO	$\text{g O}_2 \text{ L}^{-1}$	20,34
ST	g L^{-1}	52,35
STV	g L^{-1}	20,2
N-NH ₃	g N L^{-1}	5,43
NTK	g N L^{-1}	6,43
Condutividade	uS cm^{-2}	47
Alcalinidade	$\text{g CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	2,9
pH	-	8,49

RESULTADOS

A Tabela 4 sumariza os valores codificados e reais das variáveis independentes e das remoções de N-NH₃ (%). Observa-se que os valores de remoção do N-NH₃ no ponto central do DCCR (ensaio 25 a 30), apresentaram pouca variação, com média de 76,8 e desvio padrão 2,58, inferindo-se controle do processo.

A máxima remoção do N-NH₃ (94,9%) foi obtida no ensaio 22, com pH 12, porém elevadas eficiências também ocorreram nos ensaios com pH igual a 11. A menor eficiência de remoção do N-NH₃ foi de 3,5% (ensaio 21) com pH 8, indicando a forte influência desse parâmetro no desempenho do sistema.

Tabela 4: Remoção de N-NH₃ no sistema de micro-ondas

Fatores – valores codificados/reais					
Ensaio	Potência	Q ar	pH	Conc.	Rem. N-NH ₃
1	-1 (70)	-1 (0,75)	-1 (9)	-1 (40)	20,3
2	1 (90)	-1 (0,75)	-1 (9)	-1 (40)	20,6
3	-1 (70)	1 (2,25)	-1 (9)	-1 (40)	25,2
4	1 (90)	1 (2,25)	-1 (9)	-1 (40)	27,4
5	-1 (70)	-1 (0,75)	1 (11)	-1 (40)	75,6
6	1 (90)	-1 (0,75)	1 (11)	-1 (40)	70,4
7	-1 (70)	1 (2,25)	1 (11)	-1 (40)	91,3
8	1 (90)	1 (2,25)	1 (11)	-1 (40)	94,3
9	-1 (70)	-1 (0,75)	-1 (9)	1 (80)	29,0
10	1 (90)	-1 (0,75)	-1 (9)	1 (80)	26,0
11	-1 (70)	1 (2,25)	-1 (9)	1 (80)	25,2
12	1 (90)	1 (2,25)	-1 (9)	1 (80)	28,3
13	-1 (70)	-1 (0,75)	1 (11)	1 (80)	93,7
14	1 (90)	-1 (0,75)	1 (11)	1 (80)	81,0
15	-1 (70)	1 (2,25)	1 (11)	1 (80)	94,3
16	1 (90)	1 (2,25)	1 (11)	1 (80)	94,3
17	-2 (60)	0 (1,5)	0 (10)	0 (60)	58,5
18	2 (100)	0 (1,5)	0 (10)	0 (60)	74,0
19	0 (80)	-2 (0)	0 (10)	0 (60)	19,7
20	0 (80)	2 (3,0)	0 (10)	0 (60)	73,7
21	0 (80)	0 (1,5)	-2 (8)	0 (60)	3,5
22	0 (80)	0 (1,5)	2 (12)	0 (60)	94,9
23	0 (80)	0 (1,5)	0 (10)	-2 (20)	82,8
24	0 (80)	0 (1,5)	0 (10)	2 (100)	70,3
25	0 (80)	0 (1,5)	0 (10)	0 (60)	76,7
26	0 (80)	0 (1,5)	0 (10)	0 (60)	80,4
27	0 (80)	0 (1,5)	0 (10)	0 (60)	74,2
28	0 (80)	0 (1,5)	0 (10)	0 (60)	73,3
29	0 (80)	0 (1,5)	0 (10)	0 (60)	78,1
30	0 (80)	0 (1,5)	0 (10)	0 (60)	76,9

Os resultados da Tabela 4 foram analisados estatisticamente, ao nível de significância de 5% ($p < 0,05$), utilizando-se o *software* Statistica 12 (Statsoft). Foram estimados os coeficientes de regressão das variáveis independentes (Tabela 5).

Tabela 5: Coeficiente de Regressão no sistema de micro-ondas

Fatores	Coeficiente de Regressão	Erro	t(15)	P	Lim. -95%	Lim +95%
Média	76,606	3,474	22,051	<0,001	69,201	84,011
Potência (L)	1,198	1,737	0,689	0,501	-2,505	4,9
Potência (Q)	-3,301	1,625	-2,032	0,06	-6,765	0,162
Q ar (L)	7,579	1,737	4,363	<0,001	3,877	11,281
Q ar (Q)	-8,19	1,625	-5,041	<0,001	-11,653	-4,727
pH (L)	27,732	1,737	15,965	<0,001	24,029	31,434
pH (Q)	-7,559	1,625	-4,652	<0,001	-11,022	-4,096
Conc. (L)	0,488	1,737	0,281	0,782	-3,214	4,191
Conc. (Q)	-0,713	1,625	-0,439	0,667	-4,176	2,751
Potência x Q ar	1,182	2,127	0,555	0,587	-3,353	5,716
Potência x pH	-0,47	2,127	-0,221	0,828	-5,004	4,065
Potência x Conc.	-0,184	2,127	-0,086	0,932	-4,718	4,351
Q ar x pH	3,331	2,127	1,566	0,138	-1,203	7,865
Q ar x Conc.	-1,795	2,127	-0,844	0,412	-6,33	2,739
pH x Conc.	0,421	2,127	0,198	0,846	-4,114	4,955

Pode-se verificar pela Tabela 5 que os termos lineares (L) das variáveis independentes elevam a eficiência de remoção de N-NH₃. Entretanto, o efeito linear da potência (1,198) e da concentração (0,488) são muito inferiores aos da vazão de ar (7,579) e do pH (27,732) não sendo significativos ao nível de confiança de 95% (p<0,05). Com os valores da Tabela 5, foi obtida a Equação 2, que representa o modelo matemático reparametrizado das variáveis codificadas, submetido a análise de variância (ANOVA), conforme Tabela 6.

$$\text{Remoção de N-NH}_3 (\%) = 72,59 + 7,58 \text{ Qar} - 7,69 \text{ Qar}^2 + 27,73 \text{ pH} - 7,06 \text{ pH}^2 \quad (2)$$

Tabela 6: Análise de variância (ANOVA)

Fonte de variação	Soma	Graus de	Quadrados	F calculado
Regressão	22933,9	4	5733,5	85,1
Resíduos	1685,3	25	67,4	-
Total	24619,2	29	-	-

O F calculado é 30 vezes maior que o F tabelado ($F_{4,25} = 2,76$) e o R² igual a 90,69 indicam que o modelo descrito pela Equação 1 se ajusta bem aos dados experimentais, os quais podem ser representados graficamente (Figuras 3 e 4).

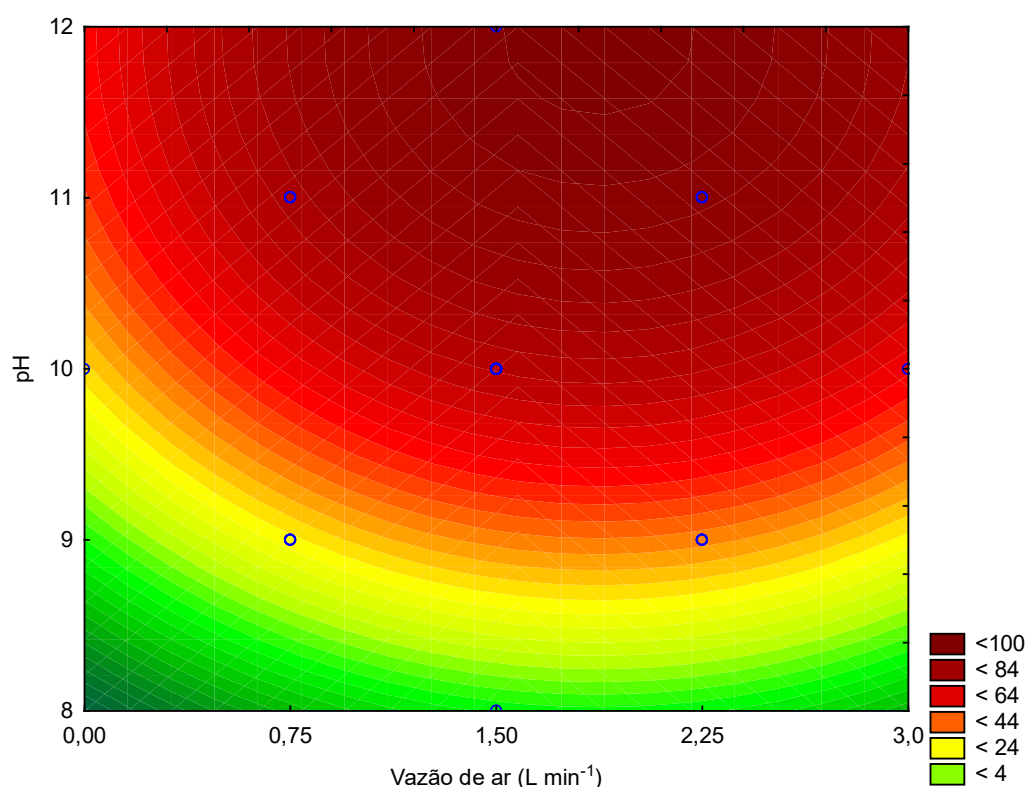


Figura 3: Curva de contorno da remoção de nitrogênio (%) em função do pH e da vazão de ar

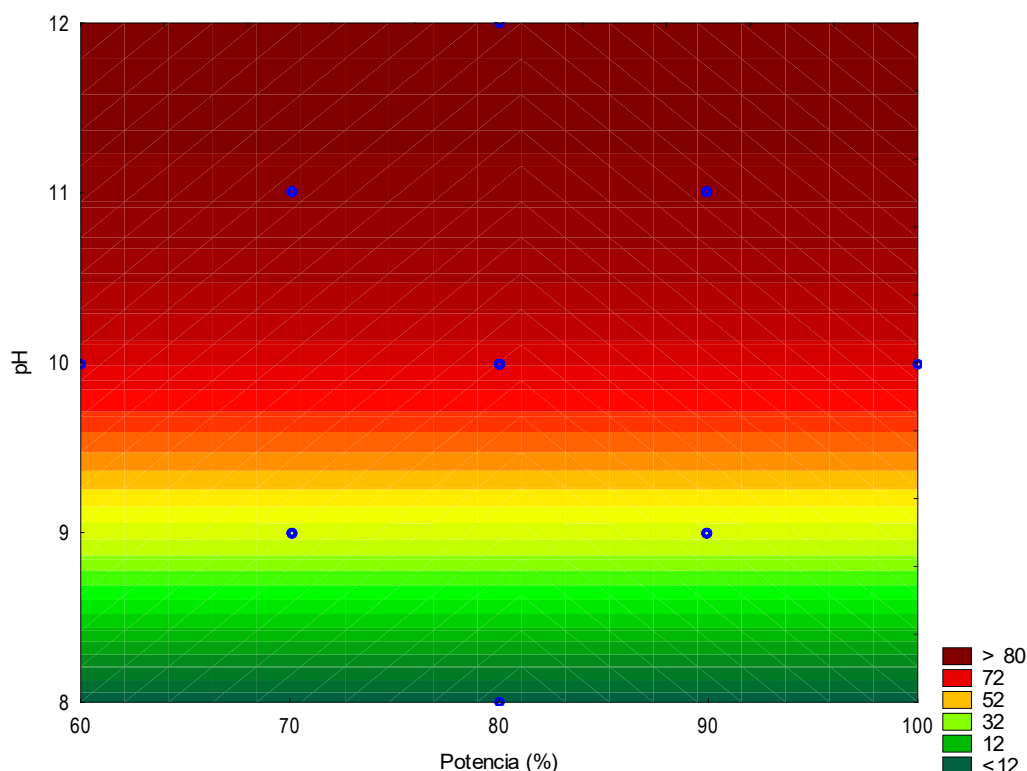


Figura 4: Curvas de contorno da remoção de nitrogênio (%) em função do pH e da potência do forno de micro-ondas

Para o valor de potência igual a 60% (320 W) o consumo de energia elétrica pelo forno de micro-ondas foi estimado em 36 kWh m⁻³ de água residuária, elevando a temperatura de 25°C para 41°C.

Foram realizados dois ensaios para verificar a validação do modelo matemático. Nestes ensaios foram adotados os valores de potência 80%, vazão de ar 1,5 Lmin⁻¹, pH 11 e concentração 100% (5,43 g NNH₃L⁻¹).

Os valores de eficiência de remoção do N-NH₃ obtidos no experimento e previstos no modelo foram bem próximos, com o erro inferior a 2%, comprovando que o modelo se ajusta de forma adequada aos valores experimentais, conforme consta na Tabela 7.

Tabela 7: Validação do modelo matemático

Ensaio	Remoção N-NH ₃ (%) Experimental	Remoção N-NH ₃ (%) Modelo	Erro (%)
1	94,9	93,26	1,6
2	94,3	93,26	1,0

CONCLUSÕES

Com base no trabalho desenvolvido, pode-se concluir que:

- O sistema de micro-ondas se mostrou promissor na remoção da amônia de efluente de curtume;
- O pH e a vazão de ar influenciaram de forma positiva a eficiência de remoção da amônia, enquanto a potência de irradiação não foi significativa, podendo ser reduzida visando diminuir o consumo da energia;
- A máxima eficiência de remoção de amônia foi de 94,9% com potência de irradiação 80%, vazão de ar 1,5 L min⁻¹ e pH 12;
- O lavador de gases com solução de ácido sulfúrico 0,2 M do sistema de micro-ondas foi eficiente na recuperação da amônia (sulfato de amônia), com eficiências próximo de 100%.

REFERENCIAS

1. APHA, American Public Health Association. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 22nd ed. Washington, DC, 2012.
2. ATA, O. N.; KANCA, A.; DEMIR, Z.N.; YIGIT, V. "Optimization of ammonia removal from aqueous solution by microwave assisted airstripping," *WaterAirSoilPollution*, vol.228,no.11, p. 448–458, 2017.
3. FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. *Princípios das Operações Unitárias*. 2ª Ed. LTC Editora, Rio de Janeiro. 670 p. 1982.
4. GHALY, A. E.; RAMAKRISHNAN, V. V. *Nitrogen Sources and Cycling in the Ecosystem and its Role in Air, Water and Soil Pollution: A Critical Review*. *Journal of Pollution Effects & Control* 3: 136. 2015.
5. KINIDI, L.; TAN, I. A. W.; WAHAB, N. B.; TAMRIN, K. F. B.; HIPOLITO, C. N.; SALLEH, S. F. *Recent development in ammonia stripping process for industrial wastewater treatment*, *International Journal of Chemical Engineering*, v. 2018, 2018.
6. LIN, L.; YUAN, S.; CHEN, J.; XU, Z.; LU, X. *Removal of ammonia nitrogen in wastewater by microwave radiation*. *Journal of Hazardous Materials*. 161. p.1063–1068. 2009a.
7. LIN, L.; CHEN, J.; XU, Z.; YUAN, S.; CAO, M.; LIU, H.; LU, X. *Removal of ammonia nitrogen in wastewater by microwave radiation: a pilot-scale study*. *Journal of Hazardous Materials* 168.p.862–867. 2009b.
8. METCALF, L.; EDDY, H. P. *Tratamento de efluentes e recuperação de recurso*. 5a ed. Porto Alegre: Mcgraw-hill, 2016.
9. OZTURK, I.; ALTINBAS, M.; KOYUNCU, I.; GOMEZ, Y. C. *Advanced physico-chemical treatment experiences on young municipal landfill leachates*, *Waste Management*, vol. 23, no. 5, pp. 441–446, 2003.
10. SANSEVERINO, A. M. *Microwaves in organic synthesis*. *Química Nova* 25.4: 660-667. 2002.
11. USEPA, "Wastewater technology fact sheet: ammonia stripping," 2000.
12. RABAH, F.J. K.; DARWISH, M.S. *Characterization of ammonia removal from municipal wastewater using microwave energy: batch experiment*. *Environmental and Natural Resources Research*, 3,1 , p. 42-50, 2013.
13. REMYA, N.; LIN, J. G. *Current status of microwave application in wastewater treatment - A review*. *Chemical Engineering Journal* 166. 797–813. 2011.
14. RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. *Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos: uma estratégia sequencial de planejamentos*, Campinas, SP, Casa do Pão Editora, 2005.
15. YIN, S.; CHEN, K.; SRINIVASAKANNAN, C.; GUO, S.; LI, S.; PENG, J.; ZHANG, L. *Enhancing recovery of ammonia from rare earth wastewater by air stripping combination of microwave heating and high gravity technology*. *Chemical Engineering Journal*. V. 337, 1. p. 515-521. 2018.