

TRATAMENTO DE EFLUENTES TÊXTEIS UTILIZANDO O MÉTODO DA ELETROCOAGULAÇÃO

Fernando Gomes da Silva Junior, Soraya Moreno Palácio, Fernando Rodolfo Espinoza Quiñones, Aparecido Nivaldo Módenes, Cláudio Celestino de Oliveira, e-mail: fernandogomes_eq@hotmail.com

Universidade Estadual do Oeste do Paraná/Centro de Engenharias E Ciências Exatas – Toledo – PR.

Palavras-chave: eletrocoagulação, efluente têxtil, remoção de corantes.

Resumo:

A poluição dos corpos d'água proveniente dos efluentes têxteis provoca alterações em ciclos biológicos, como a fotossíntese, além disso, muitos podem ser carcinogênicos e/ou mutagênicos. A eletrocoagulação é uma técnica promissora no tratamento de efluentes têxteis. O processo foi realizado com eletrodo de ferro em reator de batelada. Durante o processo da eletrocoagulação da mistura de corantes padrão foi encontrado as condições ideais de trabalho que correspondem a pH 7 e intensidade de corrente (IC) 5A, onde obteve-se uma redução de 98% na demanda química de oxigênio (DQO) e redução de aproximadamente 85% na absorvância. Escolhida a melhor condição na mistura de corantes, foi variado o tempo para realizar a eletrocoagulação do efluente obtendo um tempo ideal de 60 minutos obtendo-se uma redução de 77 % para DQO, 97% para a turbidez, de aproximadamente 100% na absorvância e uma remoção de aproximadamente de 45% de Nitrogênio Kjeldahl Total (NKT).

Introdução

Desde os primórdios de sua existência, o homem, como qualquer outra espécie que habita o planeta Terra, interage com o ambiente à sua volta, modificando-o e transformando-o de acordo com suas necessidades. Os resultados dessas ações são facilmente perceptíveis ao longo de toda biota aquática, terrestre e atmosférica. Dentro deste processo evolutivo a atividade industrial adquiriu um caráter essencial para a sociedade moderna, gerando vários produtos de primeira necessidade. Porém, em função das próprias características dos processos envolvidos na produção dos bens de consumo, as atividades industriais costumam ser apontadas com bastante frequência como um dos principais agentes de contaminação ambiental. Devido ao fenômeno da poluição ter alcançado dimensões elevadas e estar em contínua expansão, a população tem buscado estar mais atenta às questões ambientais associadas ao desenvolvimento sócio-tecnológico buscando evitar o fenômeno de contaminação. Dessa forma, expressões do tipo “desenvolvimento sustentável”, “sistemas de descarga zero”, medidas de desenvolvimento limpo (MDL), entre outras, são cada vez mais

freqüentes no meio industrial. Além de que, incentivos econômicos estão sendo implantados, de maneira a onerar os processos que contribuem com a degradação do meio ambiente. A indústria têxtil tem papel de extrema importância na maioria dos países, sendo também uma das indústrias mais tradicionais. Os beneficiamentos dos tecidos dividem-se basicamente nas seguintes etapas: preparação do substrato para receber tintura e/ou acabamento; tingimento e mercerização. O que mais prejudica as indústrias têxteis é o elevado consumo de água, fazendo com que esse segmento ocupe o 4º lugar mundial de indústrias com alto potencial poluidor. O maior consumo de água e conseqüentemente maior geração de efluente está nas etapas de lavagem, tingimento e acabamento.

O maior problema desse tipo de indústria está relacionado com a emissão de efluentes líquido contendo elevada demanda química de oxigênio (DQO) e coloração devido à presença de corantes, pigmentos e produtos químicos auxiliares, que fazem com que o efluente têxtil necessite de um tratamento específico.

A eletrocoagulação é um processo que envolve a geração de coagulantes "in situ" pela dissolução de íons ferro e/ou alumínio a partir, respectivamente, de eletrodos de ferro e alumínio pela ação da corrente elétrica aplicada a esses eletrodos. A geração de íons metálicos ocorre no anodo, enquanto o gás hidrogênio surge no catodo, Segundo Mollah et al. (2001), o mecanismo da eletrocoagulação é altamente dependente da química do meio aquoso, especialmente a condutividade. Além disso, outras características, tais como pH, tamanho da partícula e concentrações dos constituintes influenciam também o processo de eletrocoagulação. Conseqüentemente, a seleção apropriada dos materiais é muito importante, e os mais comuns são o alumínio e o ferro, pois são baratos, eficazes e prontamente disponíveis. Assim, ambos são geralmente utilizados em estudos eletroquímicos.

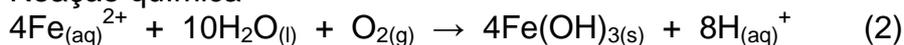
O mecanismo de geração de íons pela eletrocoagulação pode ser explicado com o exemplo do ferro, que foi o tipo de material utilizado no estudo. Em um sistema eletrolítico, o ferro produz hidróxido de ferro. Para o caso, dois mecanismos de hidróxido de ferro têm sido propostos (Mollah, et al., 2001; Rajeshwar, et al., 1997; Chen, 2004). As reações são dadas nas Equações 1 a 8.

Mecanismo 1

Anodo



Reação química



Cátodo



Global:

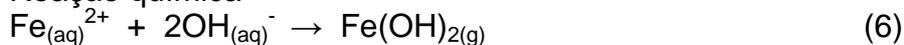


Mecanismo 2

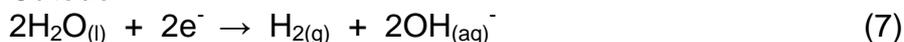
Anodo



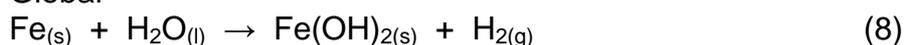
Reação química



Cátodo



Global



Na aplicação com anodos de ferro, é esperado que as reações (1)-(8) ocorram.

A literatura evidencia alguns trabalhos utilizando a técnica de eletrocoagulação no tratamento de efluentes têxteis na remoção de cor e DQO. Ciardelli & Ranieri (2000) pesquisaram dois tipos diferentes de tratamento ozonização e eletrocoagulação. O tratamento eletroquímico mostrou-se muito eficiente removendo 80 – 100% da cor 70 – 90% da DQO.

Materiais e Métodos

Foram utilizados efluentes fornecidos por uma lavanderia industrial localizada no município de Toledo no Paraná, cujas atividades principais são o tingimento e o descoramento de jeans. Foram utilizados como padrões os corantes do tipo direto: Laranja TGL (LA), Escarlata (ES), Azul 71 (AZ), Preto RF (PR), Amarelo ARLE (AM) e Azul 98 (MA), fornecidos pela lavanderia industrial. Os demais reagentes utilizados foram de grau analítico e utilizados sem purificação prévia.

Foram preparadas em balões volumétricos de $1000 \pm 0,01$ mL, soluções estoque de $1,00 \text{ g L}^{-1}$ dos seis corantes padrões (AZ, PR, ES, AM, MA e LA) em água destilada. A partir destas soluções foram feitas diluições pertinentes para obtenção de soluções de $50,0 \text{ mg L}^{-1}$ de corante padrão puro que mostraram coloração característica. Com estas soluções obteve-se o espectro de absorção UV-VIS na faixa de 200 a 600 nm (Espectrofotômetro Shimadzu UV-1610 PC) e os comprimentos de onda de máxima absorção para cada corante.

A partir das soluções preparadas anteriormente, preparou-se uma solução onde os corantes foram misturados com concentração final de 8,33 mg/L para cada corante.

Para os ensaios de eletrocoagulação utilizou-se um eletrodo de ferro mono polar acoplado a uma fonte estabilizada de corrente contínua e um reator de vidro com capacidade de 1L, no qual é inserido verticalmente o eletrodo construído com 8 placas de ferro intercaladas (Figura 1).

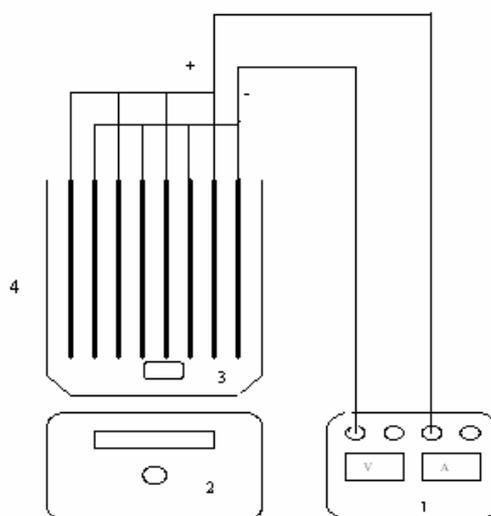


Figura 1 - Diagrama esquemático do arranjo experimental: (1) Fonte estabilizada de corrente contínua (V, regulador de tensão e A, regulador de corrente); (2) agitador magnético; (3) barra magnética; (4) célula de eletrocoagulação.

Para avaliar os efeitos do pH e da Intensidade de Corrente (A) aplicada, foi realizado um experimento fatorial para modelagem das condições experimentais, utilizando a mistura de corantes padrão de $8,33 \text{ mg.L}^{-1}$, onde foi necessário a adição de NaCl para aumentar a condutividade elétrica. A condutividade foi aumentada até atingir o valor obtido para o efluente ($16,88 \text{ mS cm}^{-1}$), utilizando um condutímetro TECNAL R-TEC-04P-MP.

Realizou-se então um ensaio variando o pH utilizando um pHmetro (TECNAL TEC-2) e a corrente (DC Power Supply FA 1030), com um tempo fixo de 15 minutos de eletrocoagulação. Após este período as amostras foram filtradas em membrana de acetato de celulose $0,45 \mu\text{m}$ de porosidade e 47 mm de diâmetro (Millipore®), para análise de DQO e membrana de teflon não estéril com estrutura de polietileno $0,22 \mu\text{m}$ de porosidade e 25 mm de diâmetro (Millipore®) para avaliar o decaimento da cor através de espectros de absorção UV-VIS na faixa de 200 a 600 nm (Espectrofotômetro Shimadzu UV-1610 PC).

Tabela 1 – Planejamento fatorial para a otimização do sistema de eletrocoagulação.

Variável	Nível (-)	Nível (•)	Nível (+)
pH	3	7	11
C (A)	1	3	5

Com a melhor condição de pH e corrente obtida com a mistura de corantes padrão, procedeu-se um experimento variando tempo (5, 15, 30, 60 e 90 minutos) em triplicata com o efluente. As análises de turbidez (Turbidímetro TECNAL TB-1000) foram realizadas após a decantação e filtração da amostra em papel de filtro qualitativo, filtrou-se novamente as

amostras em membrana de acetato de celulose 0,45 μm de porosidade e 47 mm de diâmetro (Millipore[®]), para análise da demanda química de oxigênio, DQO (Método Titrimétrico em Refluxo Aberto - Standard Methods, 1998) e membrana de teflon não estéril com estrutura de polietileno 0,22 μm de porosidade e 25 mm de diâmetro (Millipore[®]) para avaliar o decaimento da cor através de espectros de absorção UV-VIS na faixa de 200 a 600 nm.

As análises de Nitrato, Amônia e Nitrogênio Kjeldahl Total (NKT), foram baseadas no Standard Methods, 1998.

A partir dos resultados obtidos calculou-se o percentual de remoção da DQO, turbidez e da absorbância nos comprimentos de onda de maior absorção de cada corante e a remoção de DQO, turbidez, absorbância nos comprimentos de onda de maior absorção, NKT, amônia e nitrato.

Resultados e Discussão

Os espectros de absorção UV/VIS obtido para cada corante e para a mistura de corantes padrões encontram-se na Figura 2. Os comprimentos de onda de máxima absorção foram: 404nm(AM), 416nm(LA), 483 nm(PR), 494,5nm(ES) e 588nm(AZ e MA).

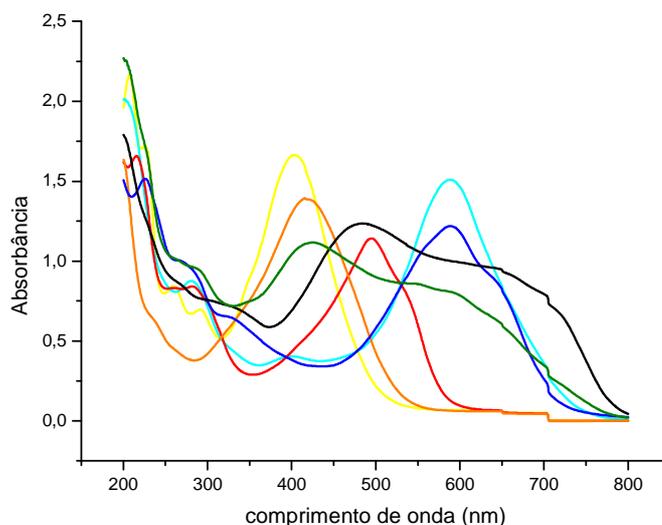


Figura 2 – Espectro de absorção molecular para os corantes estudados.

(●) AM, (●) LA, (●) PR, (●) ES, (●) AZ, (●) MA e (●) mistura de corantes.

Eletrocoagulação da mistura de corantes padrões

Para avaliar o efeito da variação do pH e da corrente aplicada (i) no processo de eletrocoagulação para a mistura de corantes de concentração $8,33 \text{ mg L}^{-1}$, seguiu-se o delineamento experimental apresentado com 3 níveis de pH e 3 níveis de corrente aplicada. Os percentuais de redução da absorbância para a mistura de corantes eletrocoagulada são mostrados na Figura 3. Todas as condições aplicadas no delineamento proporcionaram

altas reduções da cor, no entanto não resalta nenhuma condição predominante.

A remoção de DQO foi maior em pH 7 e i 5 A. A Figura 4 mostra que os percentuais de remoção foram menores quando se aplicou 1A de corrente para todos os valores de pH. Análise de variância e teste de Tukey foram realizados para confirmação dos resultados.

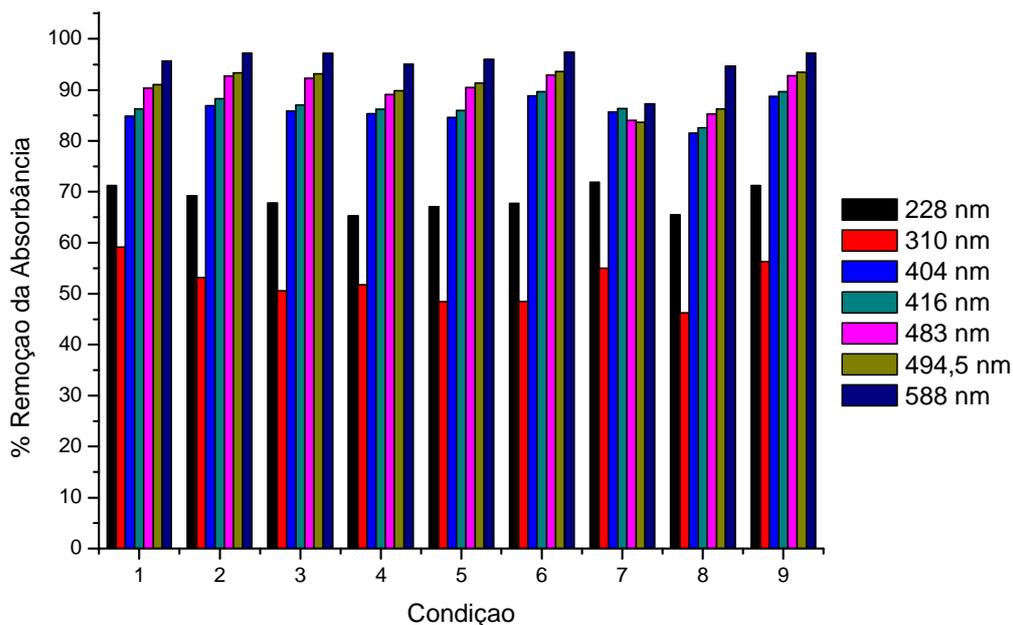


Figura 3 - Percentual de redução da absorbância para a mistura de corantes eletrocoagulada por 15 minutos nas condições testados. Condições: (1): pH 11 e i 1A; (2) pH 11 e i 3A; (3) pH 11 e i 5A; (4) pH 7 e i 1A; (5) pH 7 e i 3A; (6) pH 7 e i 5A; (7) pH 3 e i 1A; (8) pH 3 e i 3A; (9) pH 3 e i 5A.

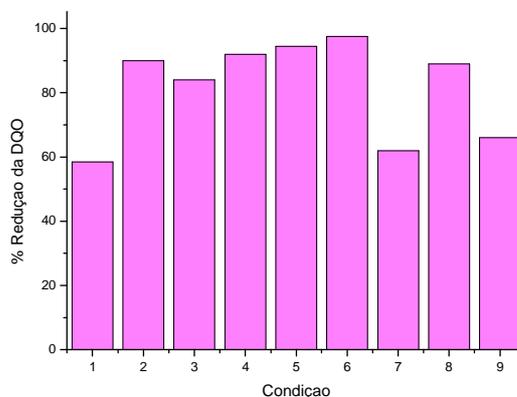


Figura 4 - Percentual de redução da DQO para a mistura de corantes eletrocoagulada por 15 minutos nas condições testados. Condições: (1): pH 11 e i 1A; (2) pH 11 e i 3A; (3) pH 11 e i 5A; (4) pH 7 e i 1A; (5) pH 7 e i 3A; (6) pH 7 e i 5A; (7) pH 3 e i 1A; (8) pH 3 e i 3A; (9) pH 3 e i 5A.

Todas as respostas de percentuais de decaimento das absorvâncias da mistura de corantes padrão e remoção de DQO foram analisadas pelo Programa Minitab 14 para a seleção de modelos fatoriais. O melhor ajuste computacional foi encontrado para a remoção de DQO (R = 99,58%), sendo está a resposta escolhida.

Tabela 2 - Análise de Variância para o percentual de remoção da DQO.

Fonte de variação	Graus de liberdade	Somas dos quadrados	Quadrado médio	F
I	2	970,30	485,15	422,55
pH	2	1161,13	580,56	505,65
i*pH	4	2814,59	703,65	612,85
Resíduo	18	20,67	1,15	
Total	26	4966,67		

S = 1,075 R = 99,58 % Modelo: Remoção DQO = B₀ + B₁ pH + B₂ C + B₁ B₂ pH C

A análise de variância (ANOVA) apresentada na Tabela 2 mostra que existe uma interação significativa a nível de 5% entre pH e intensidade de corrente. Um estudo comparativo das médias foi realizado pelo teste de Tukey apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Teste de Tukey para as médias do percentual de remoção da DQO.

i (A)	pH	Remoção da DQO (%) Média	Desdobramento da variável pH	Desdobramento da variável Corrente
1	3	62,0	B	C
	7	92,0	A	C
	11	58,5	C	C
3	3	89,0	C	A
	7	94,5	A	B
	11	90,0	B	C
5	3	66,0	C	B
	7	97,5	A	A
	11	84,0	B	B

*Médias seguidas com mesmas letras não diferem estatisticamente entre si a nível de 5 % de significância.

O Teste de Tukey mostra que a melhor condição para a remoção da DQO é quando se aplica uma corrente de 5A em pH 7. Analisando-se o desdobramento da variável pH e mantendo-se a corrente fixa temos que as maiores taxas de remoção da DQO ocorreram em pH 7 para todas as correntes aplicadas. Quando se analisa o desdobramento da variável corrente mantendo o pH fixo, os percentuais de remoção da DQO foram maiores quando se aplicam correntes maiores. Quando se aplicou 1A as remoções de DQO foram piores para todos os valores de pH.

Eletrocoagulação do efluente têxtil

Remoção de cor e de DQO no efluente real

As condições ótimas de pH 7,0 e corrente elétrica de 5A obtidas na mistura de corantes padrão foram também aplicadas nas amostras de efluentes reais. Cinco tempos de eletrocoagulação (5, 15, 30, 60, 90 minutos) foram utilizados para selecionar o ponto ótimo de remoção de cor e de DQO.

A Figura 5 mostra a porcentagem de remoção de DQO e de turbidez durante o tempo de eletrólise. A melhor remoção de DQO e de turbidez foi obtida nos tempos de 60 e 90 min. 77 e 78 % para DQO e 97 e 98% para turbidez, respectivamente. O resultado não teve significância estatística maior que 5 % durante as duas vezes.

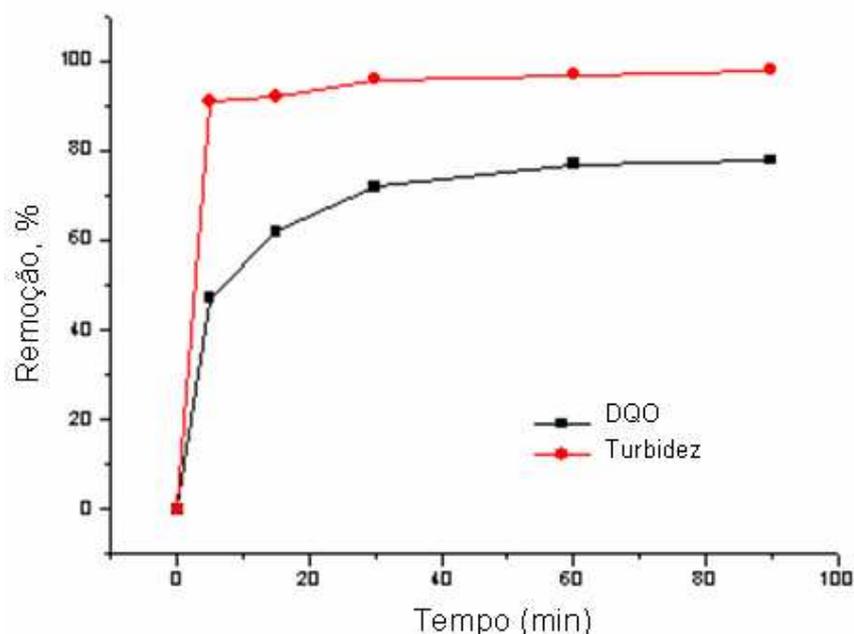


Figura 5. Variação da remoção de DQO e turbidez em uma curva exponencial para pH 7,0 e corrente de 5A.

Redução da absorvância

As absorvâncias obtidas nos comprimentos de onda 404, 416, 483, 494,5 e 588 nm, foram utilizadas para a obtenção do gráfico mostrado na Figura 6. Observa-se elevada remoção da cor nos primeiros 5 minutos e após 30 minutos de eletrocoagulação não houve diferença significativa na remoção da absorvância nos comprimentos de onda referentes à presença de cor sendo aproximadamente de 100 %.

Em função dos resultados obtidos para a remoção de DQO adotou-se o tempo de 60 minutos como ideal para o tratamento do efluente.

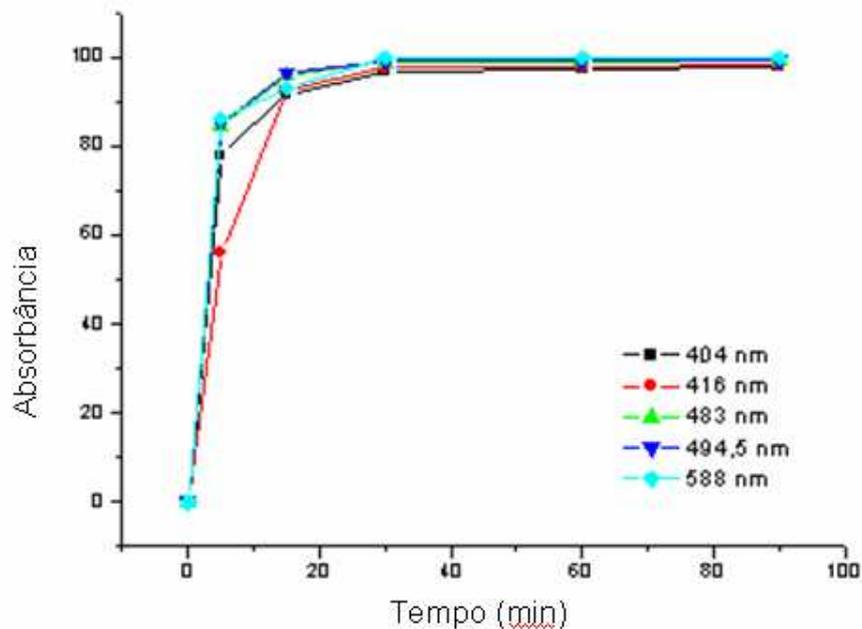


Figura 6 - Percentual de remoção da absorbância através do processo de eletrocoagulação do efluente têxtil em pH 7 e corrente 5 A

Evolução das espécies nitrogenadas

A variação da concentração das espécies nitrogenadas no meio apresentou o comportamento mostrado na Figura 7. Parte do Nitrogênio Kjeldahl Total (NKT) foi removido com formação de lodo e parte permaneceu em solução, sendo oxidado com formação de amônia e subsequente formação de nitrato. A remoção de NKT foi de aproximadamente 45 %.

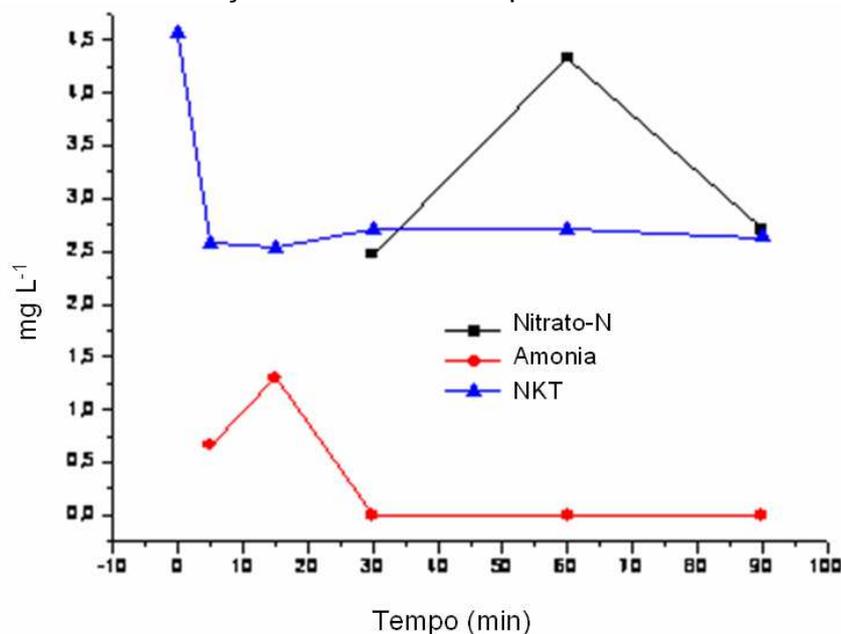


Figura 7 - Variação da concentração das espécies contendo nitrogênio no meio reacional.

Conclusões

É possível concluir então que o método de eletrocoagulação mostra-se eficiente no tratamento efluente têxteis. Na mistura padrão de corantes, houve uma redução máxima de 98% na DQO e de aproximadamente 85% na absorvância em pH 7 e i 5 A. No tratamento do efluente utilizou-se a condição ótima obtida anteriormente e obteve-se uma redução de 77% para a DQO, 97% para a turbidez, aproximadamente 100% na absorvância e uma remoção de 45% de Nitrogênio Kjeldahl Total (NKT). Sendo assim, existe a possibilidade da aplicação da técnica no gerenciamento de resíduos têxteis.

Agradecimentos

Agradecemos ao Núcleo de Biotecnologia e Processos Químicos (NBQ) da UNIOESTE *campus* Toledo por permitir a realização do experimento no Laboratório de Análises e Pesquisas Ambientais (LAPA).

Referências

- Mollah, M.Y.A., Schennach, R., Parga, J.R., Cocke, D.L., 2001. *Electrocoagulation (EC)-science and application*, J. Hazard. Mater. B84, 29-41.
- Rajeshwar, K., Ibanez, J., 1997. *Environmental Electrochemistry Fundamentals and Applications in Pollution Abatement*, Academic Press, London.
- Chen, G., 2004. *Electrochemical technologies in wastewater treatment*. Separation and Purification Technology 38 11-41.
- Ciardelli, G.; Ranieri, N. 2000. *The treatment and reuse by ozonation and eletrofloculation*. Wat.Res. vol. 35 (2):567-572
- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20 ed. Washington, APHA, 1998.