



Eletrofloculação aplicada ao tratamento de Efluente de Laticínio

**Rogério Marcos Dallago¹, Marco di Luccio², Mateus Erdmann Kühn³ e
Jociane Krebs⁴**

¹Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e Missões – Campus Erechim
(dallago@uricer.edu.br)

²Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e Missões – Campus Erechim
(diluccio@uricer.edu.br)

³Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e Missões – Campus Erechim
(mateus.e.k@gmail.com)

⁴Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e Missões – Campus Erechim
(jocianekrebs@yahoo.com.br)

Resumo

A atividade de industrialização do leite em derivados gera efluentes de alta carga orgânica, com médias de DQO entre 3.600 e 22.000 mg O₂ L⁻¹. Devido a estas flutuações de carga hidráulica e orgânica, os processos convencionais não são suficientes para atender a qualidade final desejada frente às exigências da legislação. Frente a isto, a eletroflotação apresenta-se como uma alternativa em potencial para o tratamento deste tipo de efluente. Neste contexto foi desenvolvido este trabalho o qual tem como objetivos avaliar a potencialidade da eletrofloculação no tratamento de efluentes de laticínios. Durante o estudo foram avaliadas as influências dos parâmetros operacionais pH inicial, afastamento de placas e tensão em relação a remoção de cor, turbidez e DQO, bem como a quantidade de alumínio residual no efluente tratado. Dentre as variáveis avaliadas, o pH e a distância entre os eletrodos apresentam efeitos significativo ($p<0,1$) sobre o tratamento do efluente. Para a variável pH o efeito observado foi positivo, enquanto que para a distância o efeito foi negativo. Para a DQO, a remoção observada foi de 75%, de 4.300 para 976 mgO₂ L⁻¹. Apesar de não atender a legislação, a remoção observada foi significativa. Em relação ao Alumínio residual, todas as condições ensaiadas apresentaram teores superiores ao recomendado pela legislação, sendo que o mesmo apresentou variações significativas em relação ao pH de trabalho.

Palavras-chave: Eletrofloculação; Tratamento de efluentes; Efluente de laticínio.

Área Temática: Tecnologias Ambientais



1 Introdução

Com o desenvolvimento da sociedade e o crescimento acelerado da população, o consumo em larga escala tornou-se necessário para o desenvolvimento da mesma. Por esta razão, a atividade industrial passa a ocupar um papel fundamental na sociedade. Ao mesmo tempo em que se expande a atividade industrial, crescem os problemas decorrentes da aplicação de métodos inadequados ou ineficientes para o tratamento dos efluentes gerados por esta. De acordo com Vieira apud Londero, 1999, “nos anos 70, solidifica-se a consciência planetária das ameaças da civilização industrial-tecnológica: desertificação, destruição da camada de ozônio, etc... e que os recursos naturais são limitados.” Devido a essas preocupações, ocorreu a formação de uma consciência de que os recursos naturais são finitos e a questão ambiental tornou-se preocupação de governos, empresas, ONG's e população mundial. O Brasil, observando as tendências do cenário mundial, passou a criar e aplicar suas próprias legislações ambientais direcionadas à relação indústria e meio ambiente.

Em função das características específicas de cada processo industrial, tem-se o consumo maior ou menor de água e por consequência a variação do volume de efluentes líquidos gerados. Estes quando não tratados adequadamente, possuirão um alto potencial de contaminação da água, solos e ar. Para evitar a degradação do meio ambiente, a legislação ambiental vem cada vez mais obrigar e cobrar dos empreendimentos poluidores a adoção de soluções para os problemas ambientais gerados. Atualmente diversas formas vêm sendo adotadas para obrigar os mais variados tipos de empreendimentos a se adequarem às exigências ambientais. As mais comumente utilizadas são: pesadas multas, compensações ambientais de áreas degradadas ou em outras áreas e algumas vezes podendo chegar a paralisação da atividade industrial até a adequação às exigências dos órgãos ambientais.

Além do mais, exigências do próprio mercado consumidor, para com a preservação do meio ambiente, vêm a contribuir para que indústrias venham a procurar tecnologias cada vez mais eficientes no que se refere à minimização de despejos, tratamento de efluentes e reuso de águas residuárias tratadas.

Dentro do contexto sócio-econômico, a cadeia agroalimentar brasileira contribui de forma a gerar mão-de-obra local (próxima aos segmentos produtivos), gerando excedentes comercializáveis tanto em território nacional como internacional e garantindo renda a grande parcela da população. Neste segmento destaca-se a importância das indústrias de laticínios. Além da importância nutricional do leite e produtos derivados, esta indústria vem mobilizando diversos setores da economia em torno de sua atividade, em todos os estados do Brasil onde está presente.

No entanto, a atividade de industrialização do leite em derivados gera efluentes de alta carga orgânica, podendo caracterizar-se em um grave problema ambiental se não tratado eficientemente. Para este fim, várias metodologias encontram-se disponíveis no mercado, como tratamentos biológicos baseados no emprego de lagoas de decantação (aeróbicas e facultativas) e tratamento químico baseados no emprego de agentes floculantes (cloreto férreo, sulfato de alumínio, polieletrólitos, etc). Outros meios alternativos estão sendo investigados na literatura, apresentando resultados promissores. Neste contexto, este trabalho focou-se na eletroflotação, como uma possível tecnologia para o tratamento de efluentes líquidos da indústria de laticínios.

2- Materiais e Métodos

2.1- Amostra

A coleta do efluente bruto efetuou-se na jusante da estação de tratamento de efluentes de uma indústria de laticínios em Erechim. Após a amostra foi caracterizada em relação aos parâmetros pH, turbidez, cor aparente e verdadeira e DQO.



2.2- Reator de eletrofloculação

O modelo de reator confeccionado foi monopolar com eletrodos em paralelo. Para a montagem utilizou-se de bêquer com capacidade para 1 Litro. As placas de alumínio do reator possuíam 2 mm de espessura por 15 cm de altura e 7 cm de largura. Estas foram fixadas em suportes de madeira e PVC. A fonte de alimentação de energia elétrica utilizada foi da marca/modelo Mastech HY3005D.

2.3. Ensaio de eletrofloculação

Visando a otimização do processo de eletrofloculação e a avaliação de quais fatores interferem sobre o mesmo, foi realizado, inicialmente, um delineamento fatorial completo 2^3 , apresentado na Tabela 1, envolvendo os fatores voltagem (mV), pH e distância entre os eletrodos, mantendo-se constantes o tempo de contato (10 min) e volume de efluente. Todos os ensaios foram realizados em batelada.

Tabela 1- Variáveis e níveis estudados no planejamento fatorial completo 2^3

Variáveis	Níveis		
	-1	0	1
Voltagem (mV)	5	7,5	10
pH	4	5,5	7
Distância (cm)	0,5	1,5	2,5

3- Resultados e Discussões

3.1-Caracterização do efluente bruto

Na tabela 2 são apresentados os resultados obtidos para a caracterização do efluente bruto do laticínio. De acordo com informações do controle de qualidade da indústria, a mesma possuía programação de produção das linhas de doce de leite e queijo no período da segunda coleta.

Tabela 2 – Caracterização do efluente bruto

Parâmetros	Valores
pH	6,19
Turbidez UNT	2200
Cor aparente mg/L Pt-Co	13100
Cor verdadeira mg/L Pt-Co	3750
DQO mg/L O ₂	4351,5
Alumínio mg/ L	n.d.
n.d. não determinado	

Em relação aos parâmetros avaliados, a maioria deles encontra-se fora dos limites estabelecidos pela Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler - FEPAM, demonstrando a necessidade de um tratamento prévio ao seu descarte. Os resultados para cor não puderam ser determinados na primeira coleta devido a falta de efluente para análise e DQO devido a interferente não determinado.

3.2- Influência do Tempo de Contato

O tempo de contato foi avaliado para 3, 5 e 10 minutos, empregando como condições reacionais pH = 6, distância entre eletrodos de 1,5 cm e ddp = 5V. Como respostas foram avaliados a remoção de cor, turbidez e DQO.



Os resultados de cor verdadeira, cor aparente e DQO em função do tempo, encontram-se apresentadas na Figura 1.

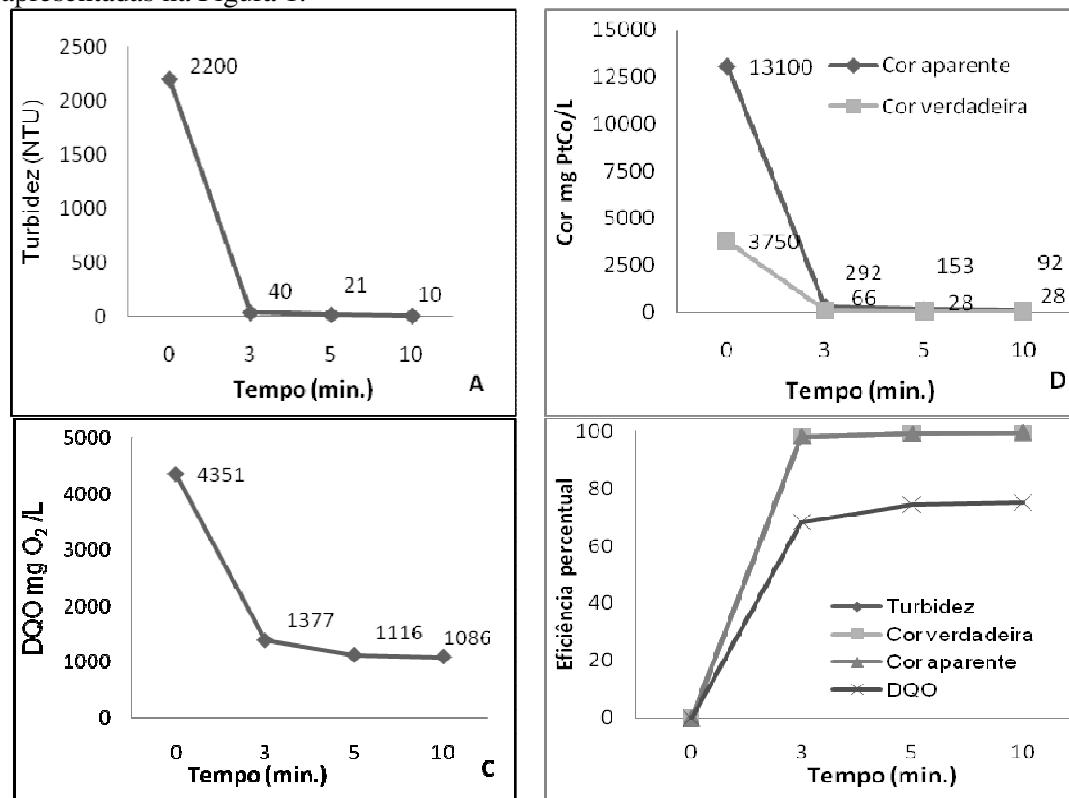


Figura 1 - Redução da turbidez, cor aparente e verdadeira e DQO ao longo do tempo de eletroflocação

Percebe-se que nos três primeiros minutos de reação, ocorre uma redução superior a 98% para a turbidez e cor verdadeira, apresentando valores (40 UNT para turbidez e 66 para cor verdadeira) inferiores aos limites para emissão em corpo hídrico classe 2, conforme resolução CONAMA 357.

Para o parâmetro DQO a remoção observada nos tempos de 3, 5 e 10 minutos foi de respectivamente 68,3%, 74,3% e 75%. Mesmo havendo uma alta remoção, percebe-se a tendência da estabilização dos valores após os três minutos iniciais. Esta estabilização atribui-se a fração de DQO solúvel presente no meio, portanto, impossível de ser removida por processos físico-químicos ou eletro-químicos. Mesmo com esta porcentagem removida, o valor observado para a DQO (1086 mgO₂ L⁻¹) encontram-se acima do limite máximo permitido pela FEPAM (450 mgO₂ L⁻¹) para emissão de efluentes aquosos.

De acordo com os resultados obtidos, considerando-se principalmente a remoção da DQO, a qual varia com o tempo, optou-se por fixar o tempo reacional em 10 minutos.

3.3- Otimização do Processo de Eletroflocação

A otimização do processo foi conduzida a partir de um planejamento completo 2³, onde foram avaliados os efeitos das variáveis voltagem, pH e distância entre os eletrodos sobre a remoção de cor e turbidez.

A matriz do planejamento com os valores reais e as respostas para a remoção de cor e turbidez encontram-se apresentados na Tabela 3.



Tabela 3 - Matriz do planejamento e respostas para remoção de cor e turbidez

Ensaio	Tensão (V)	pH	Distância (cm)	Cor Verdadeira	Turbidez	Turbidez % Removida
1	5	4	0,5	550+	86	83,83
2	5	4	2,5	550+	245	53,95
3	5	7	0,5	31	1	99,81
4	5	7	2,5	135	16	96,99
5	10	4	0,5	550+	199	62,59
6	10	4	2,5	550+	173	67,48
7	10	7	0,5	35	3	99,44
8	10	7	2,5	24	0	100,00
9	7,5	5,5	1,5	550+	91	82,89
10	7,5	5,5	1,5	528	64	87,97
11 ^a	7,5	5,5	1,5	550+	80	84,96

Para as respostas cor verdadeira e turbidez observam-se tendências similares na variação de seus valores. No entanto, as variações mais nítidas, passíveis de uma interpretação global, considerando todas as condições ensaiadas, somente foram observadas para a resposta turbidez. Dentro desse contexto, com o auxílio do software Statistica 6.0 os resultados dos experimentos foram analisados a fim de avaliar o comportamento das variáveis estudadas sobre a remoção percentual da turbidez. O gráfico de Pareto, apresentado na Figura 2, possibilita visualizar o efeito absoluto (aquele que leva em consideração o desvio padrão) de cada variável manipulada sobre a remoção de turbidez do efluente, com um nível de 90% de confiança.

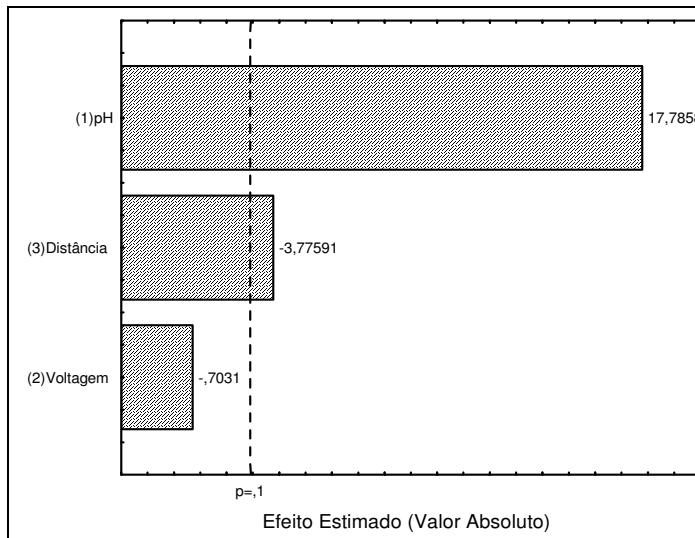


Figura 2 - Influência do pH, distância e voltagem sobre a remoção da turbidez

O gráfico de Pareto demonstra que das três variáveis estudadas, somente as variáveis pH e distância apresentam efeitos significativo sobre a remoção de turbidez, com 90% de confiança ($p<0,1$). Para a variável pH o efeito observado foi positivo, enquanto que para a distância o efeito foi negativo. Em resumo, o aumento do pH e a diminuição da distância entre os eletrodos proporcionam um aumento na remoção da turbidez da solução.

O efeito apresentado pela variável pH está coerente com a faixa de pH estudada, $4 \leq \text{pH} \leq 7$. Se considerarmos a hidrólise do alumínio, observou-se que a região de pH ótima para



formação dos flocos (Al(OH)_3) encontra-se entre $6 \leq \text{pH} \leq 7$ (CRESPILO; REZENDE, 2004, p. 27). Para pHs menores que 6 acentua-se a tendência da formação de formas solúveis de Alumínio, como complexos ($[\text{Al(OH)}_2]^{+}_{\text{aq}}$ e $[\text{Al(OH)}]^{2+}_{\text{aq}}$) íons $\text{Al}^{3+}_{\text{aq}}$ solúveis, os quais apresentam reduzido poder de coagulação, ou seja, de remoção de cor e turbidez.

O efeito negativo observado para a variável distância entre os eletrodos está coerente com a literatura (CRESPILO; REZENDE, 2004, p.26). A redução da distância entre os eletrodos tende a minimizar o efeito de resistividade da solução em relação a passagem da corrente elétrica, possibilitando uma redução na ddp a ser aplicada e, consequentemente no consumo de energia. No entanto, percebeu-se que a redução na distância entre os eletrodos proporciona acúmulo de material flotado entre as mesmas, interferindo na homogeneização do efluente durante a reação.

Considerando que a distância entre os eletrodos poderá vir a dificultar a homogeneização do efluente, para os ensaios posteriores foi fixada uma distância de 1,5 cm.

3.4- Influência da Tensão/Voltagem

As diferenças de potencial aplicado ao sistema foram de 2,5, 5, 7,5 e 10V. Os resultados de eficiências relacionadas ao tempo de reação são apresentados na Figura 2.

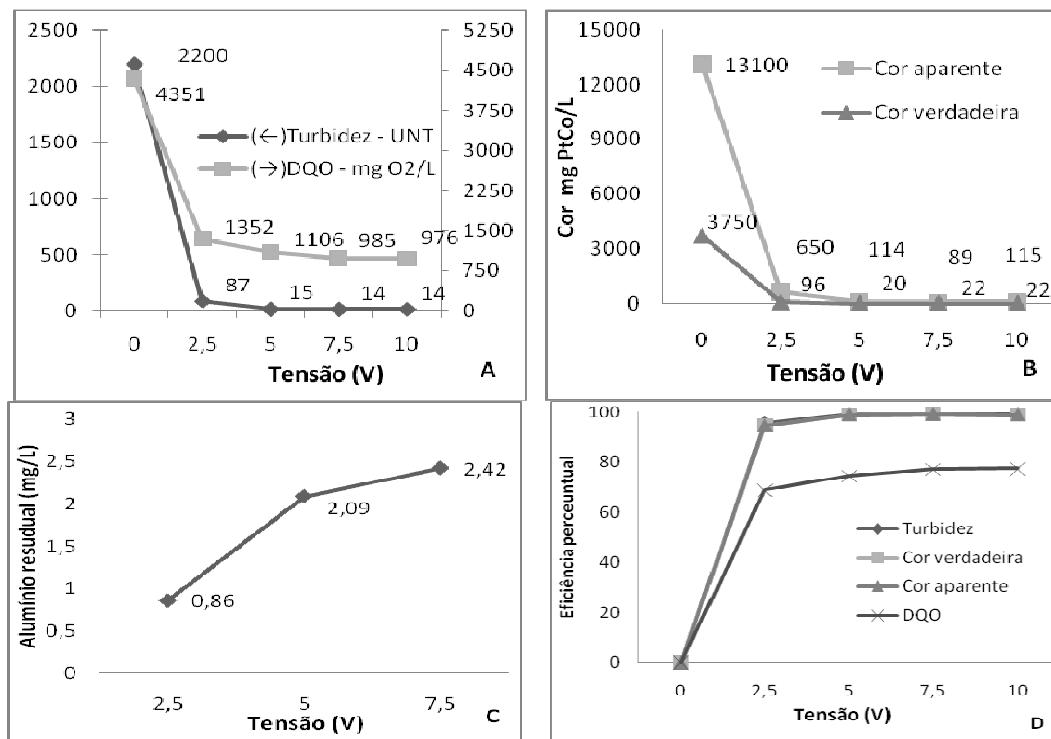


Figura 2 – Resultado das variações em função da ddp dos parâmetros: (A) turbidez e DQO; (B) Cor verdadeira e aparente; (C) Alumínio residual. (D) Eficiências percentuais de turbidez, cor aparente e verdadeira e DQO.

É possível perceber que os resultados de turbidez para 2,5V se encontram dentro do limite exigido para corpos hídricos de classe dois pelo CONAMA sendo que as tensões seguintes conseguem elevar a qualidade do efluente para a classe dois. No entanto, observa-se também que mesmo percentualmente alto, o valor no tratamento com 2,5V não foi satisfatório para os parâmetros, cor verdadeira e turbidez, os quais permaneceram acima do limite máximo permitido pela resolução 357 do CONAMA para corpos de classe um.



Para uma ddp de 5 V, os resultados permitiram a adequação do efluente final ao corpo de classe um no parâmetro de turbidez. Para os tratamentos utilizando ddps de 7,5 e 10 V implicam em um aumento desnecessário de consumo de energia e desgaste das placas sem, no entanto, aumentar a eficiência do tratamento

3.5- Efeito do pH

O pH é um fator que influencia diretamente na eficiência do processo visto atuar na formação dos complexos de alumínio. Nas Figuras 3 e 4 é possível observar o efeito do pH sobre os parâmetros avaliados.

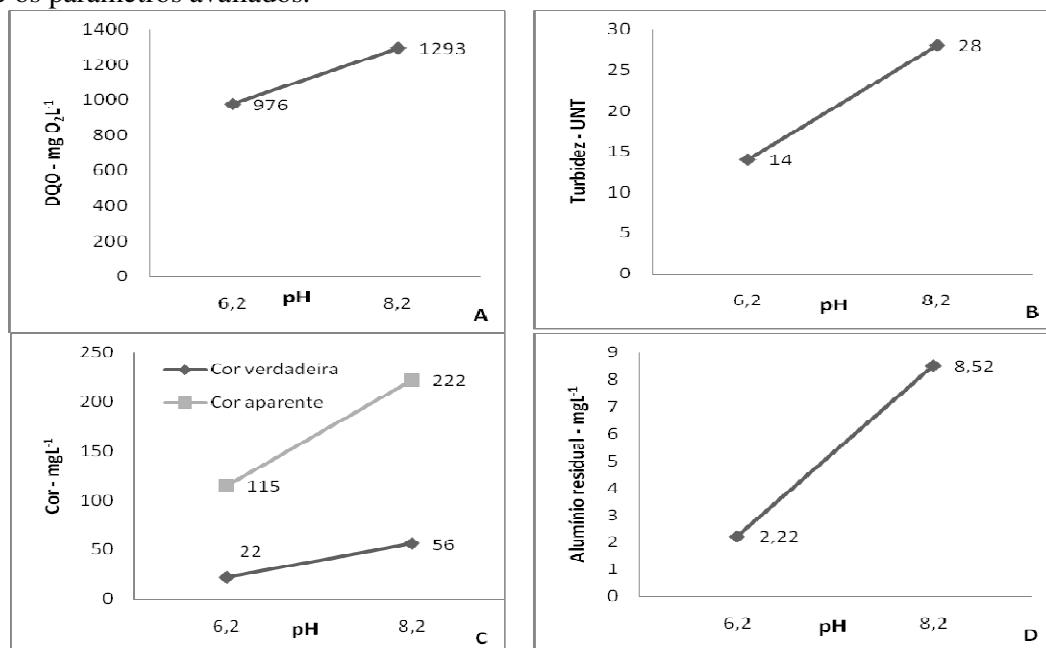


Figura 3 - Resultado das variações, em função do pH inicial, dos parâmetros: (A) DQO; (B) Turbidez; (C) Cor verdadeira e aparente e (D) Alumínio residual

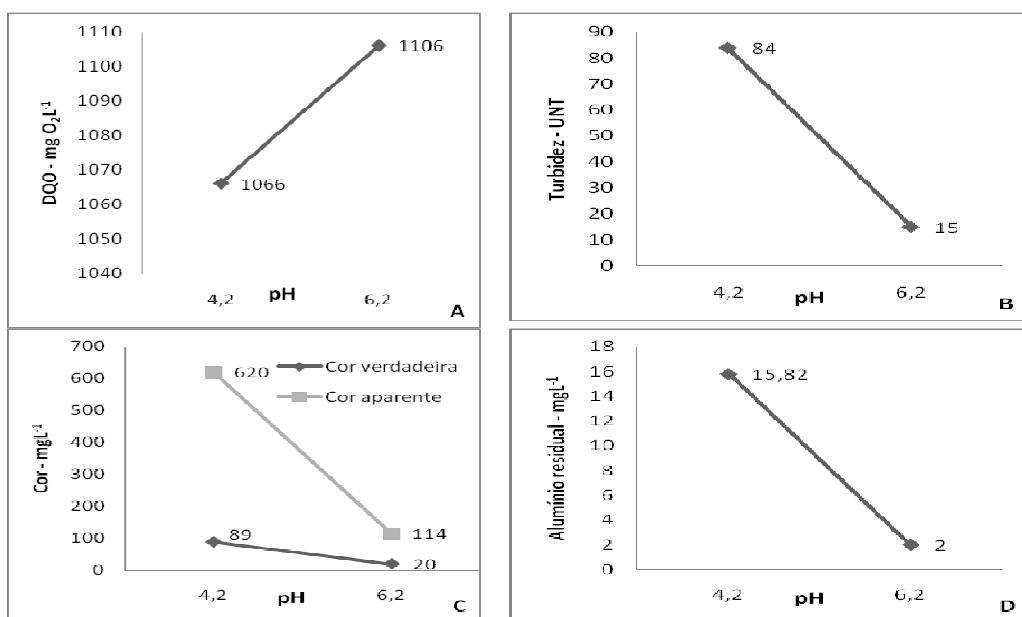


Figura 4 - Resultado das variações, em função do pH inicial, dos parâmetros: (A) DQO; (B) Turbidez; (C) Cor verdadeira e aparente e (D) Alumínio residual.



2º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 28 a 30 de Abril de 2010

Para os ensaios conduzidos com pH inicial de 6,2 os resultados obtidos foram mais eficientes dos que possuíam pH inicial 8,2. (Figura 3) ou 4,2 (Figura 4). Em pH 8,2 ocorreu uma formação de complexos solúveis de alumínio, desestabilizando a floculação. Por sua vez valores de pHs < 5,5, conduzem à formação de íons $Al^{3+}_{(aq)}$ solúveis. A estes fatores também vinculou-se os maiores valores de lixiviação de alumínio observados para as amostras ensaiadas em pHs 4,2 e 8,2, em relação ao conduzida em pH 6,2 (Figuras 3 e 4D). Cabe destacar que independente do pH, os valores de Alumínio ficaram acima dos limites estipulados pelo CONAMA.

4- Conclusões

Os ensaios de eletrofloculação em batelada realizados em bancada apresentaram resultados satisfatórios para o tratamento de efluente bruto de laticínios.

Com três minutos de contato e ddp de 5 V, conseguiu-se obter reduções acima de 99% para cor e turbidez. Para a DQO obteve-se uma redução de 68%, de 4.351,0 para 1.377,0 mg $O_2 L^{-1}$. Esta redução foi vinculada a DQO suspensa e coloidal (micropartículas, coloides, gorduras entre outros), restando somente a DQO solúvel.

5- Agradecimentos

A URI-Campus Erechim e a Secretaria C&T do RS

6- Referências

COLOMBO, José Carlos. Determinação da Demanda Química de Oxigênio. Disponível em: <<http://pessoal.utfpr.edu.br/colombo/arquivos/DQO.pdf>> Acesso em: 23 abr. 2009.

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. *Variáveis de qualidade de águas*. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/Agua/rios/variaveis.asp#aluminio>> Acesso em: 16 mar. 2009.

CRESPILHO, Francisco Nelson; REZENDE, Maria Olímpia Oliveira. *Eletroflotação: princípios e aplicações*. São Carlos: RiMa Editora, 2004. 96 p.

DROSTE, Ronald L. *Theory and practice of water and wastewater treatment*. New York (USA): John Wiley & Sons, 1997. 800p.

FOSCHIERA, José Luiz. *Indústria de laticínios: industrialização do leite, análises, produção de derivados*. Porto Alegre: Suliani Editografia, 2004. 88 p.

LONDERO, Maria Alice Antonello. *O Estudo de Impacto Ambiental no Direito Brasileiro e Argentino*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, RS, 1999.

METCALF E EDDY.; TCHOBANOGLOUS, George; BURTON, Franklin L. *Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse* . 3rd ed Singapore: McGraw-Hill, Metcalf & Eddy, 1991. xvi, 1334p.

RICHTER, Carlos A; AZEVEDO NETTO, José M. de. *Tratamento de água: tecnologia atualizada* . São Paulo: Edgard Blücher, 1991. 332 p.

<http://www.fepam.rs.gov.br/legislacao>> Acesso em: 16 mar. 2009.

www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf >. Acesso em: 14 mai. 2009.