

## **Proposta de otimização do processo de eletrofloculação de uma subunidade de tratamento de efluente da produção de biodiesel**

### **Proposal for the optimization of the electroflocculation process of a subunit for the treatment of effluent from biodiesel production**

DOI:10.34117/bjdv7n2-412

Recebimento dos originais: 23/01/2021

Aceitação para publicação: 20/02/2021

#### **Thalys de Freitas Fernandes**

Mestre em Engenharia Química pela Universidade Federal de Campina Grande  
Instituição: Universidade Federal de Campina Grande – UFCG  
Endereço: Aprígio Veloso, 882 – Universitário, Campina Grande-PB, 58428-830  
E-mail: thalys.fernandes@eq.ufcg.edu.br

#### **David Lucas Gomes Leite**

Mestre em Engenharia Química pela Universidade Federal de Campina Grande  
Instituição: Universidade Federal de Campina Grande – UFCG  
Endereço: Aprígio Veloso, 882 – Universitário, Campina Grande-PB  
E-mail: dluckygl@gmail.com

#### **Gerônimo Barbosa Alexandre**

Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande  
Instituição: Instituto Federal do Pernambuco - IFPE  
Endereço: Padre Agobar Valença, s/n - Severiano Moraes Filho, Garanhuns - PE  
E-mail: geronimo.alexandre@garanhuns.ifpe.edu.br

#### **Gilmar Trindade de Araújo**

Doutor em Física Química pela Universidade de São Paulo  
Instituição: Universidade Federal de Campina Grande – UFCG  
Endereço: Aprígio Veloso, 882 – Universitário, Campina Grande-PB, 58428-830  
E-mail: gilmar.trindade@eq.ufcg.edu.br

#### **José Nilton Silva**

Doutor em Engenharia Química pela Universidade Federal de Campina Grande  
Instituição: Universidade Federal de Campina Grande e Fundação Parque Tecnológico da Paraíba – PaqTcPB  
Endereço: Aprígio Veloso, 882 – Universitário, Campina Grande-PB, 58428-830  
E-mail: nilton@eq.ufcg.edu.br

## **RESUMO**

A exigência dos órgãos ambientais quanto ao uso de processos limpos que minimizem os impactos ambientais, somada a grave crise hídrica da última década, tem impulsionando o desenvolvimento de novas tecnologias para o tratamento e o reúso de efluentes. É com

essa motivação que este trabalho tem como objetivo apresentar, caracterizar e modelar uma subunidade de tratamento de efluentes de uma planta de produção de biodiesel. Organizados em uma matriz de dados (entrada-saída), as variáveis de decisão do processo foram utilizadas para construir os modelos matemáticos que descrevem a dinâmica do sistema. A caracterização da unidade é de suma importância para o reprojeto da planta na sua expansão (produção em escala industrial) ou para simulações em tempo real de problemas rotineiros em plantas análogas. Pôde-se concluir que o sistema atingiu a seu melhor desempenho, quando o reator tubular foi operado para uma vazão de entrada de  $0,8 \times 10^{-3} \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1}$ , uma tensão elétrica de 4,4 volts e um pH inicial do efluente igual a 8,0. Isso resultou em um gasto de R\$ 0,23 por  $\text{m}^3$  de efluente tratado, em 0,5 horas de operação. Os modelos obtidos mostraram-se confiáveis na representação do processo e estáveis para fins de controle da planta.

**Palavras-chave:** tratamento de efluentes, eletrofloculação, modelagem matemática e otimização de processos.

### ABSTRACT

The requirement of environmental agencies regarding the use of clean processes that minimize environmental impacts, added to the serious water crisis of the last decade, has been driving the development of new technologies for the treatment and reuse of effluents. It is with this motivation that this work aims to present, characterize and model a subunit for the treatment of effluents from a biodiesel production plant. Organized in a data matrix (input-output), the process decision variables used to build the mathematical models that describe the dynamics of the system. The characterization of the unit is of paramount importance for the redesign of the plant in its expansion (production on an industrial scale) or for real-time simulations of routine problems in analogous plants. It concluded that the system reached its best performance, when the tubular reactor operated for an input flow of  $0.8 \times 10^{-3} \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1}$ , an electrical voltage of 4.4 Volts and an initial effluent pH equal to 8. This resulted in an expense of R\$ 0.23 per  $\text{m}^3$  of treated effluent, in 0.5 hours of operation. The obtained models proved to be reliable in the representation of the process and stable for the purposes of plant control.

**Keywords:** effluent treatment, electroflocculation, mathematical modeling and process optimization.

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (PG&B) é atualmente uma das mais complexas indústrias do mundo, responsável por uma variedade de matérias primas utilizada no nosso cotidiano. O processamento primário, a separação dos produtos do óleo e o refino geram cada um, rejeitos característicos. Alguns com valor comercial sendo recuperados, outros representam um verdadeiro problema (como é o caso da água utilizada nos diversos processos).

No Brasil a questão ambiental está legitimada pela lei 6.938/1981, a lei da política nacional do meio ambiente, a qual estabelece o conjunto de metas e mecanismos que

visam reduzir os impactos negativos da ação antrópica sobre o meio ambiente. Como toda política, possui justificativas para sua existência, fundamentação teórica, metas e instrumentos e prevê penalidades para aqueles que não cumprem as normas estabelecidas.

Neste cenário de discussão de tratamento e controle de efluentes utilizadas na indústria de processos, o objetivo deste trabalho é apresentar a planta didática de produção de biodiesel localizada na Universidade Federal de Campina Grande, em especial a subunidade de tratamento de efluentes na produção do biodiesel, a qual consiste de um tanque de deposição de efluentes (água + impurezas) que alimenta um reator tubular de fluxo contínuo, em que por meio da técnica de eletrofloculação consegue separar água tratada dos contaminantes oleosos.

Ainda como métricas deste trabalho destacam-se: encontrar o ponto ótimo de operação da subunidade como menor custo possível, levantar o modelo matemático do processo e contribuir para o desenvolvimento da cadeia produtiva do biodiesel nacional.

Experimentos foram realizados com intuito de determinar o ponto ótimo de operação da subunidade e custo ótimo gasto no processo, bem como realizar a caracterização (modelagem matemática) da planta de tratamento de efluentes, tendo como variáveis de entrada do processo: tensão elétrica aplicada, vazão volumétrica de alimentação do reator e o pH inicial do efluente. Já as variáveis respostas (saídas) foram: o pH final do efluente tratado, o consumo energético gasto com a corrente elétrica aplicada no reator tubular e a massa do eletrodo de alumínio (Al) despreendida das chicanas devido a reação ocorrida. A importância de se construir um modelo matemático que descreva a planta de tratamento é de suma importância para o reprojeto da planta na sua expansão (produção em escala industrial) ou para simulações em tempo real de problemas rotineiros em plantas análogas.

A ferramenta utilizada para construir o modelo matemático que nos fornece a relação causa-efeito das variáveis de decisão do processo foi à identificação de sistemas, em especial os modelos lineares e não lineares. Vários testes com diversos modelos foram implementados para estudar a relação causa-efeito das variáveis da planta, até encontrar a melhor para o processo em estudo.

Este artigo está organizado da seguinte maneira. A primeira Seção dedica-se a apresentar a problemática a ser discutida, dando ênfase ao problema do tratamento e controle de efluentes na indústria de PG&B e os objetivos traçados para a problemática. A metodologia de projeto e a descrição da planta de produção do biodiesel e de tratamento de efluentes são apresentadas na segunda Seção. Na terceira Seção discute-se os

principais resultados experimentais da planta em operação e os resultados de simulação da problemática de construção de modelos do processo. Na quarta Seção apresentam-se as conclusões e eventuais trabalhos futuros.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia proposta para consecução dos objetivos estabelecidos, consiste na implementação do diagrama de blocos da Figura 1, sendo:

Etapa I - consistiu em levantar a planta baixa de disposição dos equipamentos que compõe o processo, bem como definir as listas de materiais necessários para montagem da planta experimental.

Etapa II - montagem, comissionamento, integração da planta experimental.

Etapa III - definir pela expertise dos especialistas envolvidos, as principais variáveis de decisão do processo, com foco na relação causa-efeito (entrada e saída).

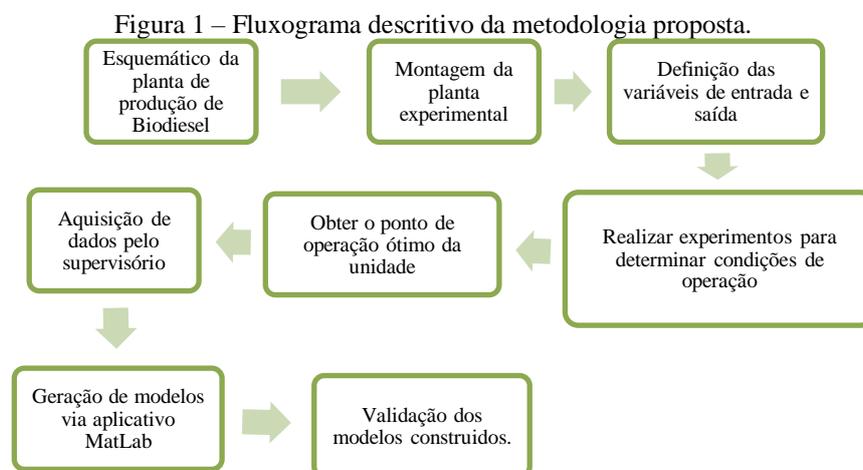
Etapa IV – com base no planejamento experimental (2<sup>3</sup>) foi obtida uma matriz de dados experimentais de entrada-saída do processo.

Etapa V – com base nos experimentos realizados foi determinado o ponto ótimo de operação da planta de tratamento de efluentes.

Etapa VI – construção do banco de dados experimentais que serviu de base para a construção de modelos matemáticos.

Etapa VII - construção de modelos que representam o sistema usando os conceitos de sistemas lineares.

Etapa VIII – validação dos modelos construídos, por meio de simulações de controle on-line e fisicamente.



## 2.1 SÍNTESE DO BIODIESEL E A GERAÇÃO DO EFLUENTE

Na síntese do biodiesel foi utilizado o óleo de algodão comercial e refinado, adquiridos nos estabelecimentos comerciais de Campina Grande - PB, além do Álcool Metílico Absoluto 98% Anidro (Merck) e o Hidróxido de Potássio (KOH) (Lentilhas) (Merck). A metodologia de síntese foi baseada em (COELHO et al., 2020).

Após a reação de transesterificação, realizou-se a etapa de purificação do biodiesel, por via úmida, na qual foram realizadas, em média, seis lavagens consecutivas com um volume de 0,5 dm<sup>3</sup> de água a temperatura entre 323 e 333K, gerando aproximadamente 3 dm<sup>3</sup> de efluente para cada batelada. Seguidamente, o efluente foi caracterizado quanto ao pH, a condutividade, óleos e graxas (O&G), sólidos totais e turbidez, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Resultados das análises físico-químicas para o efluente do biodiesel.

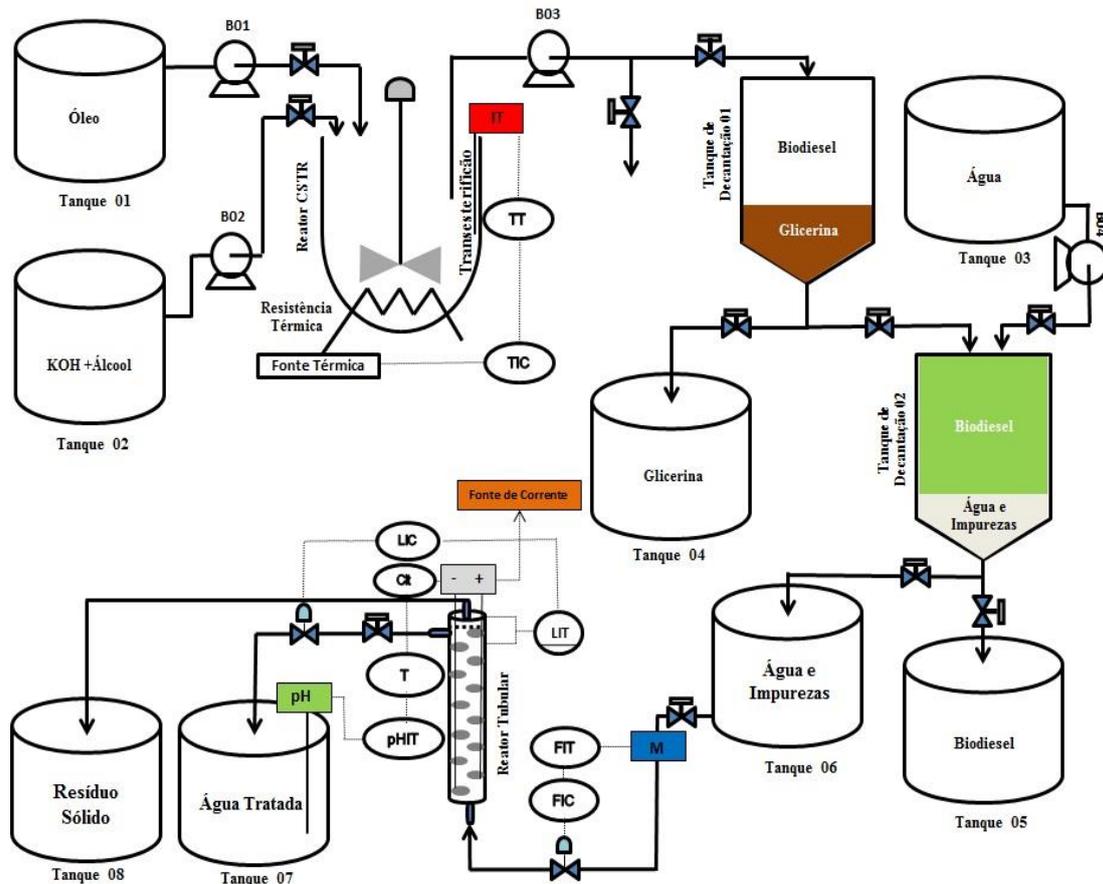
Caracterização do efluente	Valores
pH inicial	11
Temperatura (°C)	25
Condutividade ( $\mu\text{Scm}^{-1}$ )	1040
Sólidos Totais ( $\text{mgL}^{-1}$ )	1220
Óleos e Graxas ( $\text{mgL}^{-1}$ )	9055
Turbidez (NTU)	620

Após a caracterização, o efluente foi armazenado em garrafas plásticas, segundo as normas do Standart Methods (APHA, 1992), para ser posteriormente tratado.

## 2.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

A planta de produção de biodiesel encontra-se localizada no Laboratório de Química e Biomassa (LQB) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), cuja representação em diagrama de blocos pode ser visualizada no fluxograma da Figura 2, conforme proposto por (FERNANDES e ARAÚJO, 2012).

Figura 2 - Fluxograma descritivo da planta de produção de biodiesel e tratamento de efluente. Fonte: autores.



O reator da planta de tratamento do efluente do biodiesel é tubular e foi projetado para ser operado na vertical. É constituído por um cano de PVC contendo 0,225 m de comprimento e 0,047 m de diâmetro, onde foi adaptada uma entrada para o efluente situada na parte inferior e duas saídas para os produtos na parte superior, conforme se observa na Figura 3.

No reator tubular foi inserido uma célula eletroquímica composta por 12 placas de alumínio (Al) ou eletrodos, que foram distribuídos em forma de chicanas em um arranjo de 0,207 m de comprimento. Cada eletrodo possuía diâmetro de 0,034 m e 0,001 m de espessura, separados por uma distância de 0,016 m, totalizando assim uma área global de 0,0109 m<sup>2</sup>.

No topo do reator contêm duas correntes de saída, uma para a saída do efluente tratado, que foi armazenado no (tanque 07) para posteriores análises e, outra para a remoção do lodo, que foi estocado no (tanque 08). Este, por sua vez, está sendo estudado para fins de viabilidade de uso em fornos industriais.

Figura 3 – Desenho esquemático do sistema experimental projetado para o tratamento de efluentes. Fonte: os autores.

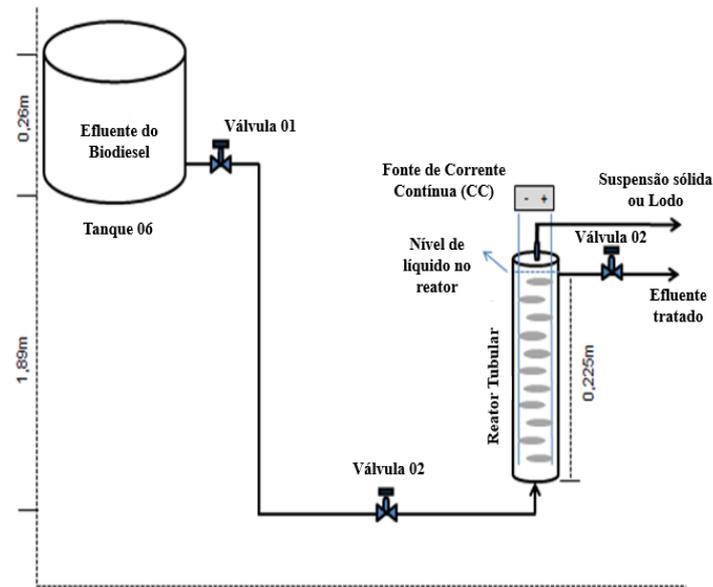


Figura 4 - Visão geral reator tubular em pré-funcionamento (*start-up*).



Fonte: imagens da pesquisa.

A visão geral da subunidade experimental de tratamento e controle de efluentes é visualizada na Figura 4. Foi verificado que a unidade necessita de adaptações no que diz respeito ao controle de nível, à medição do pH de saída do efluente tratado e da vazão de alimentação do reator tubular.

### 2.3 VARIÁVEIS DO EXPERIMENTO

No intuito de avaliar quais variáveis e qual combinação forneceria a melhor eficiência ao funcionamento do reator, três parâmetros foram investigados: o pH inicial

do efluente, a diferença de potencial elétrico e a vazão volumétrica da entrada do reator, conforme se observa na Tabela 2.

Tabela 2. Variáveis de entrada da subunidade de tratamento de efluente do biodiesel.

Ensaio	pH inicial	Vazão ( $\text{dm}^3\text{s}^{-1}$ )	DDP (volts)
1	6	0,0004815	3,6
2	9	0,0005077	3,6
3	6	0,0009628	3,6
4	9	0,0009823	3,6
5	6	0,0004273	6
6	9	0,0004803	6
7	6	0,0010036	6
8	9	0,0009998	6
9	7,5	0,0007288	4,8
10	7,5	0,00072979	4,8
11	7,5	0,00072776	4,8

\* valor aproximado da vazão obtido após a estabilização do sistema.

Segundo (MENEZES e ARAÚJO, 2011) para eletrodos de alumínio, quando o pH está na faixa de 6 a 8,5 há predominância do agente coagulante  $\text{Al}(\text{OH})_3$  (Hidróxido de Alumínio), sendo este composto o maior responsável por remover as impurezas do efluente. Assim, com base nesses estudos e no trabalho de (FERNANDES e ARAÚJO, 2011), que trabalharam com o pH entre 6 e 9, os valores escolhidos para esta pesquisa foram 6, 7,5 e 9.

A tensão nos eletrodos foi aplicada de acordo com a escolha do potencial a ser estudado para o respectivo ensaio, cujo ajuste dessa variável foi realizado em uma fonte de corrente contínua (CC) para as tensões 3,5 volts; 4,8 volts e 6 volts. Tais valores foram escolhidos conforme contribuição verificada no trabalho de (FERNANDES e ARAÚJO, 2011), que para valores abaixo de 3,5 volts, a eletrofloculação não ocorria para o efluente do biodiesel.

As vazões volumétricas escolhidas foram  $1 \times 10^{-3}$ ;  $0,75 \times 10^{-3}$  e  $0,5 \times 10^{-3} \text{ dm}^3\text{s}^{-1}$ . Esses valores foram estabelecidos com base em testes preliminares de fluxo realizados no reator tubular, onde foi observado que a variação da vazão seria mínima durante o processo de tratamento. Como o volume do reator era  $0,3604 \text{ dm}^3$ , portanto, operou-se o reator com os respectivos tempos de residência: 6 min, 8 min e 12 min.

Os parâmetros foram avaliados com base em um planejamento experimental (2<sup>3</sup>), realizado com as variáveis de entrada: pH inicial, vazão volumétrica da entrada do reator ou vazão real do experimento e a diferença de potencial elétrica (DDP).

Como variáveis de saída do sistema de tratamento de efluentes, para fins de aplicação de controle de processos, foram monitorados: o pH final do efluente, a massa de alumínio (Al<sup>3+</sup>) consumida na eletrólise e o custo energético com a eletrólise. Outros dados como medição de turbidez, sólidos totais e óleos e graxas foram coletados para caracterização físico química do efluente tratado.

## 2.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os experimentos foram realizados, considerando inicialmente um volume de 6 dm<sup>3</sup> de efluente no tanque de alimentação da subunidade de tratamento de efluente. Da mesma forma, a massa total da célula eletrolítica foi determinada para cada ensaio. A estabilização inicial do sistema foi realizada a partir do ajuste da válvula de entrada do reator e o ajuste da válvula de saída do efluente, estabelecendo-se o nível no reator, ou seja, quando todo o eletrodo ficou submerso no líquido. Após estabelecer a vazão aproximada do experimento e estabilizar a altura ou o nível de líquido no reator, a fonte CC foi ligada por um período de 30 min, o tempo do experimento.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 ANÁLISE EXPERIMENTAL DA SUBUNIDADE DE TRATAMENTO DE EFLUENTE DO BIODIESEL

O sistema foi montado e operado sob as condições especificadas. Na Figura 5, observa-se à esquerda, o reator em funcionamento com a fonte CC acoplada, sob uma diferença de potencial fixa e uma amperagem que foi gerada. Já à direita, tem-se a visão do lodo formado no processo sendo retirado no topo do reator, o qual é resultante da coagulação e floculação dos contaminantes presentes no efluente.

Figura 5 - Reator tubular em funcionamento, sob o processo da eletrofloculação.



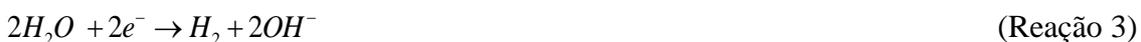
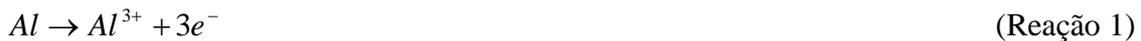
Os dados foram coletados para os onze experimentos, sendo tratados e dispostos na Tabela 3. De acordo com esses resultados apresentados, verificou-se que a subunidade de tratamento de efluente apresentou resultados satisfatório quanto a qualidade do efluente tratado, atingindo remoções de aproximadamente 99,5% para óleos e graxas e para Turbidez, a exemplo do ensaio (3).

Tabela 3: Resultados obtidos para o tratamento do efluente do biodiesel usando o processo de eletrofloculação.

Ensaio	pH final	Óleos e Graxas (mgL <sup>-1</sup> )	Massa de (Al <sup>3+</sup> ) (g)	Sólidos totais (mgL <sup>-1</sup> )	Consumo de Energia (kWh)	Custo de Energia (R\$m <sup>-3</sup> )	Turbidez (NTU)
1	7,2	115	0,087	730	0,33075	0,33	10,6
2	8,3	86	0,032	680	0,318375	0,31	6,97
3	8,48	42	0,105	650	0,2904	0,29	3,29
4	8,01	47	0,1	600	0,3285	0,32	3,38
5	7,5	56	0,174	560	1,183125	1,18	82,8
6	8,73	202	0,155	560	0,872	0,87	9,34
7	7,5	358	0,158	620	1,078125	1,07	13
8	8,72	169	0,098	890	1,07	1,07	7,71
9	9,3	173	0,065	520	0,4245	0,42	53
10	9,4	119	0,08	540	0,414	0,41	49,4
11	9,2	167	0,05	580	0,423	0,42	69,6

Entretanto, uma análise conjunta com todas as variáveis (entradas e respostas), usando ANOVA (analysis of variance) com gráfico de Pareto e superfície de respostas, verificou-se para 90% de confiança, que o sistema atinge seu melhor desempenho para todos os parâmetros analisados, quando é operado com um pH igual a 8, uma vazão volumétrica de  $0,8 \times 10^{-3} \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1}$  e uma DDP de 4,4 volts, resultando em remoções acima de 90% para O&G e turbidez e acima de 50% para sólidos totais O tratamento dos dados foi realizado, usando o software estatístico Minitab®.

As menores remoções obtidas foram para a variável sólidos totais, em que o sistema removeu não mais que 57,4% dos sólidos presentes no meio. De acordo com Chavalparit e Ongwandee (2009), quanto maior a diferença de potencial aplicada no sistema, maior a quantidade de metal  $Al^{3+}$  que se desprende dos ânodos da célula eletroquímica para o meio líquido, formando o hidróxido de alumínio -  $Al(OH)_3$ , principal agente coagulante do meio. As principais reações eletroquímicas envolvidas nesse processo são (MENESES et al., 2012; VLACHOU et al., 2013):



Assim, dependendo do pH e da temperatura do meio, o  $Al(OH)_3$  formado apresentar-se-á no estado sólido, aumentando a quantidade residual de sólidos totais do meio.

Os fenômenos associados à eletrólise dependem da tensão aplicada. Na eletrofloculação este fato está diretamente relacionado ao desgaste do eletrodo, ou seja, a corrosão no processo de geração do agente coagulante. Nesse trabalho a relação causa-efeito (expressão matemática) entre a massa do eletrodo teórica perdida ( $m_{elp}$ ) para uma corrente elétrica gerada no meio (I) em certo intervalo de tempo (t) de eletrofloculação, foi calculada pela equação (1) (JUN LU et al., 2015; MOUSSAVI et al., 2011).

$$m_{elp} = \frac{I.t.M}{F.n} \quad (1)$$

Sendo (M) a massa molar do elemento predominante do eletrodo em ( $gmol^{-1}$ ), (n) é o número de elétrons envolvidos na reação de oxidação do elemento do anodo ( $n_{Al^{3+}} = 3$ ) e (F) é a constante de Faraday ( $F = 9,65 \times 10^4 \text{ Cmol}^{-1}$ ).

Já o consumo energético e o custo da produção foram calculados utilizando as equações (2), (3) e (4).

$$P = V.I \quad (2)$$

Sendo, (P) é a potência elétrica em quilowatts (kW), (V) é a DDP aplicada, dada em Volts (V) e (I) é a corrente elétrica em amperes (A). A energia consumida em (kWh) é expressa como:

$$E_{cons} = P.\Delta t \quad (3)$$

Sendo, ( $\Delta t$ ) é a variação do tempo em horas e ( $P$ ) é a potência elétrica.

O custo em reais (R\$) da energia consumida mensalmente ou por hora é calculado pela expressão (4), sendo a tarifa de energia definida pela concessionária de energia de cada estado sob supervisão da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) e os impostos pagos (ICMS - Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços e ISS – Imposto Sobre Serviço) são definidos pelo governo federal.

$$Custo = Tarifa.E_{cons} + impostos \quad (4)$$

Segundo dados da Companhia Energética da Paraíba (Energisa S.A, 2015) para sistemas que trabalham a baixas tensões, a tarifa convencional para consumo mensal de até 30 kWh, isento de Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços (ICMS) é de 0,45 R\$/kWh. Logo, para o reator tubular funcionando sobre uma tensão de 4,4 volts, um pH inicial 8 e uma vazão de  $0,8 \times 10^{-3} \text{ dm}^3/\text{s}$ , gastar-se-ia em torno de R\$ 0,23 para um tempo de 30 min de operação.

### 3.2 IDENTIFICAÇÃO PARAMÉTRICA APLICADA À PLANTA DE TRATAMENTO DE EFLUENTE

Não existe um roteiro padrão e seguro para obter bons modelos em Identificação de Sistemas (ALEXANDRE e LIMA, 2013). O processo de identificação é caracterizado como um processo de busca: busca de uma estrutura de modelo razoável, busca por um modelo representativo de uma dada estrutura, entre outros (AGUIRRE, 2004). Este processo é fortemente iterativo: várias tentativas serão descartadas antes que se alcance uma descrição do modelo aceitável. Além disto, ele não pode ser completamente automatizado; decisões do especialista no sistema serão agregadas a cálculos numéricos formais para se obter uma eficiência razoável no processo de identificação.

Algumas etapas típicas podem servir de roteiro inicial para se obter um modelo mais adequado, conforme (LJUNG, 2005), são elas: Tratamento dos dados: visualização, filtragem, remoção de média entre outros; Métodos de identificação não paramétrica: resposta ao impulso, resposta ao degrau, análise da resposta em frequência, entre outros; Métodos de identificação parâmetros em várias estruturas de modelos; Validação do modelo estimado com os dados experimentais coletados; Comparação com outros modelos estimados.

Os dados utilizados neste trabalho foram coletados no período de junho a dezembro de 2012, no Laboratório de Química e Biomassa, da Unidade Acadêmica de Engenharia Química (UFCG), conforme apresentado na Tabela 2 (Potencial

Hidrogeniônico (pH) inicial do efluente, a tensão aplicada e a vazão volumétrica) e Tabela 3 (variáveis de saída do processo). Estes dados são utilizados para alimentar o estimador de parâmetros na identificação do modelo do processo.

Neste projeto utilizou-se o ATOMS: *Identification Toolbox* como ferramenta computacional para implementação dos modelos de Estimação do processo. Este *Toolbox*, disponível no pacote Scilab, oferece diversas funcionalidades para simulação de cenários, diversos métodos, opções de estimação de função de transferência e do modelo do processo que atenderam as necessidades do trabalho. Todas as etapas de identificação estão disponíveis neste *Toolbox*.

De posse dos dados era necessário realizar um pré-tratamento dos mesmos e, para isto, foi utilizado um aplicativo do Scilab chamado *ident* que integra o *System Identification*. O *Ident* é, basicamente, uma interface gráfica para o usuário (GUI) das funções disponíveis no toolbox. Nele é possível selecionar os arquivos de dados que serão usados tanto para estimar o tipo do modelo (*Working Data*) como para validá-lo (*Validation Data*). É importante destacar que, sempre que possível, sejam utilizados arquivos de dados distintos para a estimação e para a validação para evitar que o modelo “aprenda” com os dados usados na modelagem e perca a capacidade de generalização que é fundamental neste processo.

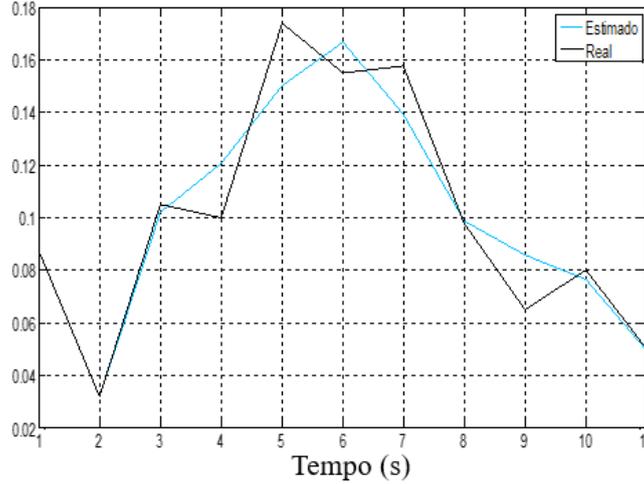
O aplicativo fornece vários métodos (modelos) de identificação de sistemas dentre eles: modelo ARX (do Inglês *Autoregressive with Exogenous Inputs*), modelo ARMAX (do Inglês *Auto Regressive Moving Average with Exogenous Inputs*), modelo OE (*Output Error*), modelo FIR (*Finite Impulse Response*) e expansão ortogonal, modelo Box-Jenkins, mínimos quadrados linear e recursivo, RARX (*ARX Recursive*), modelos não lineares (*Non Linear Model*), *State Space* e *By Initial Model*.

A relação causa-efeito entre a vazão volumétrica do efluente (entrada) e massa de eletrodo depositada (ME) (saída) é dada por um modelo de segunda ordem com amortecimento, dada na equação (5):

$$G_1(s) = \frac{ME(s)}{Vazão(s)} = \frac{-14,117(1 - 60s)}{10,72s^2 + 3,2s + 1} e^{-1,2696s} \quad (5)$$

O comportamento da saída real e da saída estimada é visualizado na Figura 6.

Figura 6 - Saída medida e estimada pelo modelo da Função de transferência  $G_3(s)$ .

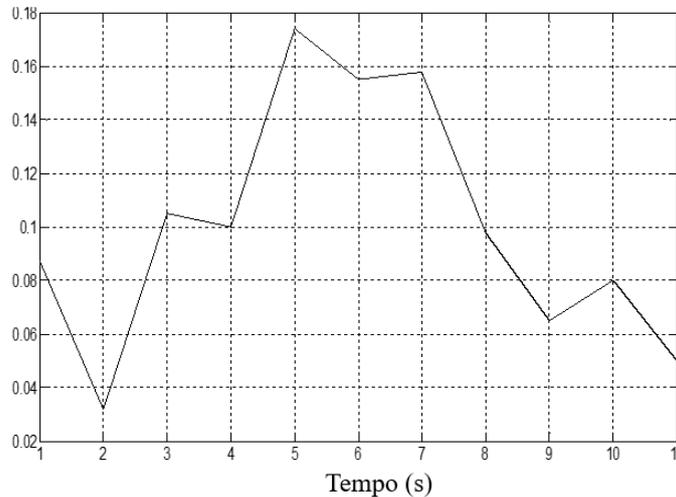


A relação causa-efeito entre a tensão de alimentação aplicada (entrada) e a massa de eletrodo (ME) depositada ou (saída), é dada pela equação (6).

$$G_2(s) = \frac{ME(s)}{Tens\tilde{a}\alpha(s)} = \frac{27}{(1+0,001s)(1+473s)} e^{-30s} \quad (6)$$

O comportamento da saída real e da saída estimada é visualizado na Figura 7.

Figura 7 - Saída medida e saída estimada pelo modelo da Função de transferência  $G_2(s)$

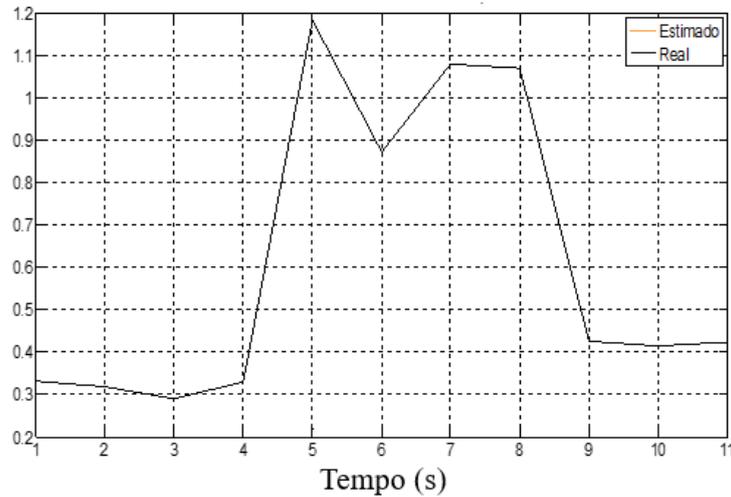


A função de transferência que relaciona o consumo energético (saída) e a tensão aplicada (entrada) é dada pela equação (7).

$$G_3(s) = \frac{CE(s)}{Tens\tilde{a}\alpha(s)} = \frac{-0,15449}{(1+0,001s)(1+15,287s)(1+0,001s)} e^{-30s} \quad (7)$$

Já o comportamento do consumo energético (saída) e da saída estimada é visualizado na Figura 8, ou seja,

Figura 8 - Saída medida e saída estimada pelo modelo da Função de transferência  $G_3(s)$ .



A dinâmica do processo diz respeito ao estudo de estabilidade das funções de transferência obtidas, que descrevem o processo e que são usadas para fins de controle, por meio da análise do diagrama de Bode (reposta em frequência) ou do diagrama de *Nyquist*. A análise dos polos e zeros do sistema pode determinar a estabilidade. As Figuras 9, 10 e 11 ilustram os diagramas da resposta ao degrau das funções de transferências identificadas, o qual se percebe que todas as funções são estáveis e controláveis.

Figura 9 – Resposta ao degrau da função de transferência  $G_1(s)$ .

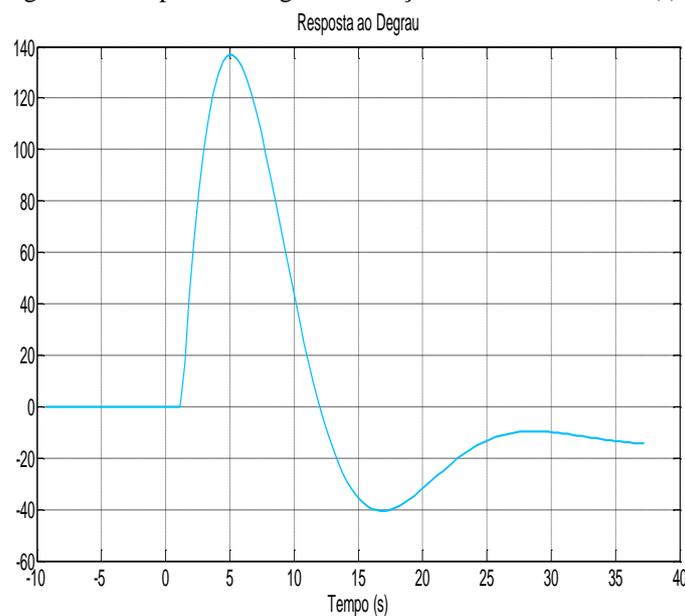
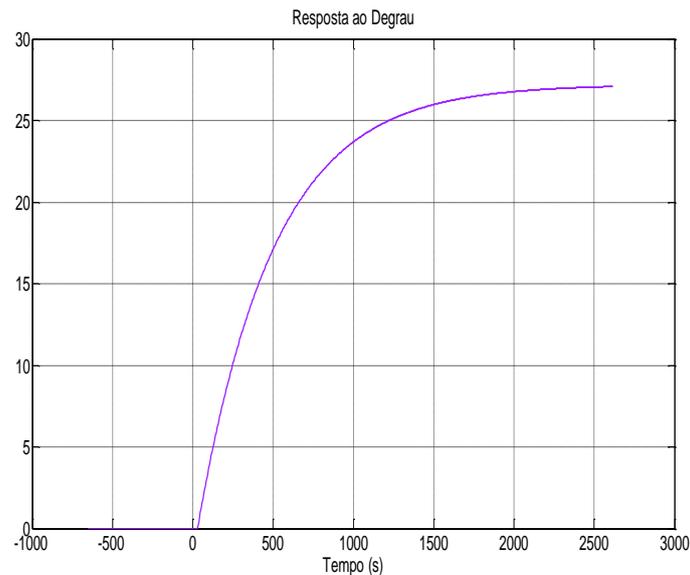
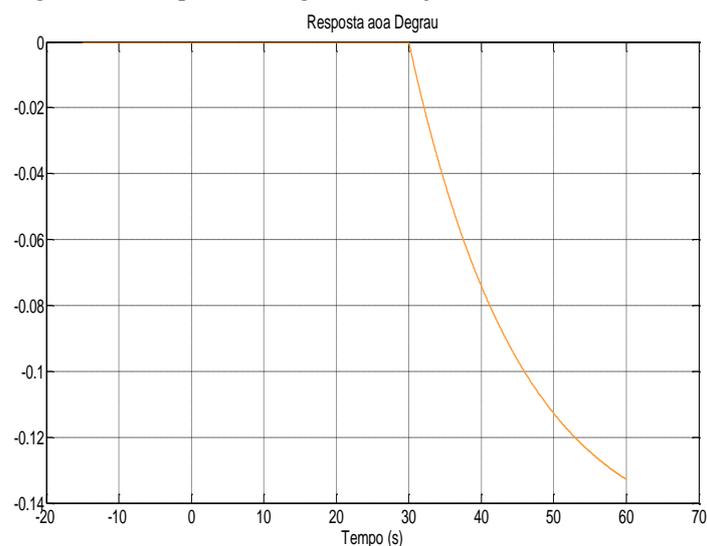


Figura 10 – Resposta ao degrau da função de transferência  $G_2(s)$ .Figura 11 - Resposta ao degrau da função de transferência  $G_3(s)$ .

Identificada as funções de transferências que descreve a dinâmica do processo, a próxima etapa é a simulação em *softwares* especializados destas e a definição das malhas de controle e a estabilidade do processo como um todo. A simulação do controle será feita em outra oportunidade, pois se deve fazer uma auditoria das malhas de controle e do tipo de controle a ser utilizado (técnicas de controle).

#### 4 CONCLUSÕES

O estudo da planta de produção de biodiesel, em especial, a subunidade de tratamento de efluentes por eletrofloculação, possibilitou:

1 - Representar esquematicamente uma planta de biodiesel acoplada a uma subunidade de tratamento de efluente que opera continuamente, utilizando um processo eletroquímico/eletrofloculação, cujo, até o momento, predomina-se em escala de bancada.

2 - Montar a planta de tratamento de efluente e levantar um estudo experimental, com base em um planejamento estatístico, definindo as variáveis de entrada e saída da subunidade.

3 - Foi verificado que o ponto ótimo de operação da subunidade, quanto ao aspecto funcional e de custo era: um pH inicial 8, uma diferença de tensão de 4,4 volts e uma vazão de alimentação de  $0,8 \times 10^{-3} \text{ dm}^3/\text{s}$ , culminando em um consumo energético de R\$ 0,23 para um tempo de 30 min de operação, o equivalente a R\$ 162,00 de operação ininterrupta mensal, mostrando ainda que para o tratamento de efluente do biodiesel por eletrofloculação, o processo contínuo pode ser bem mais viável economicamente quando comparado ao processo em batelada, que foi verificado um gasto de R\$ 720,00 mensal.

4 - Utilizando as variáveis de entrada: vazão de alimentação e tensão; com as variáveis de saída: massa de eletrodo consumida no processo e consumo energético foi obtida as funções de transferência  $G_1$ ,  $G_2$  e  $G_3$ , todas com baixa correlação residual.

Os modelos levantados podem possibilitar o desenvolvimento de estratégias de controle da subunidade, o que pode ser uma motivação para estudos futuros, que visem à automação do processo e, conseqüentemente, o reprojeto da planta, visando o funcionamento em escala industrial.

### **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem o apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

## REFERÊNCIAS

APHA, AWWA, WPCF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. New York, 1992.

AGUIRRE, L. A.; 2004. *Introdução a Identificação de Sistemas: Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais*. 2ª edição, Editora UFMG.

ALEXANDRE, G. B.; LIMA, A.M.N.; 2013. *Diagnose de Falhas e Gestão de Alarmes em Sistemas de Instrumentação e Controle Industrial*. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil.

CHAVALPARIT, O; ONGWANDEE, M.; 2009. *Optimizing eletrocoagulation process for the treatment of biodiesel wasterwater using response surface methodology*. Journal of Environmental Sciences, v. 21, n. 11, p. 1491-1496.

COELHO, L.L.F.; SANTOS, O.I.; PAIXÃO, C.D.; LHAMAS, L.E.D.; RODRIGUEZ, G.; SUFFREDINI, P.F.D.; MEDEIROS, C.A.; 2020. **Produção de biodiesel de óleo de fritura residual em um módulo didático de biodiesel**. Brazil Journal of Development, v. 6, n.5, p.28844-28851.

ENERGISA. Companhia Energética da Paraíba. Resolução ANEEL: 1.191/11. Site: <<https://www.energisa.com.br/>>. Acessado em 21 de fevereiro de 2015.

FERNANDES, F.T.; ARAÚJO, G. T.; 2011. *Desenvolvimento de tratamento para o efluente gerado na produção de biodiesel por eletrofloculação*. Projeto de Iniciação Científica (PIBIC), Centro de ciências e Tecnologia, Unidade Acadêmica de Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande - PB, Brasil.

FERNANDES, T. F.; ARAÚJO, G. T.; 2012. *Desenvolvimento de um reator tubular para tratamento de efluente gerado na produção de biodiesel por eletrofloculação*. Projeto de Iniciação Científica (PIBIC), Centro de ciências e Tecnologia, Unidade Acadêmica de Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande - PB, Brasil.

JUN LU.; YAN LI.; MENGXUAN YIN.; XIAOYUN MA.; SHENGLING LIN.; 2015. *Removing heavy metal ions with continuous aluminum electrocoagulation: A study on back mixing and utilization rate of electro-generated Al ions*, Chemical Engineering Journal, v. 267, p. 86 – 92.

LJUNG, L. *System Identification: Theory for the User*. 1999. Second edition, Prentice Hall Information and System Sciences Series.

MENESES, J. M.; ARAÚJO, G.T.; 2011. *Tratamento do efluente gerado na produção de biodiesel utilizando a eletrocoagulação/flotação*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Química), Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB.

MENESES, J.M.; VASCONCELOS, R. F.; FERNANDES, T. F.; ARAÚJO, G. T.; 2012. *Treatment of biodiesel wastewater by electrocoagulation/flotation process: investigation of operational parameters*. *Química Nova*, v. 35, n. 2, p. 235-240.

MOUSSAVI, G.; KHOSRAVI, R.; FARZADKIA, M.; 2011. *Removal of petroleum hydrocarbons from contaminated groundwater using an electrocoagulation process: Batch and continuous experiments*. *Desalination*, v. 278, p. 288 – 294.

VLACHOU, M.; HAHLADAKIS, J.; GIDARAKOS, E.; 2013. *Effect of various parameters in removing Cr and Ni from model wastewater by using electrocoagulation*. *Glob. Nest. J*, v.15, p. 494 e 503.