AVALIAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTE TÊXTIL POR ELETROFLOCULAÇÃO COM MONITORAMENTO E CONTROLE AUTOMÁTICO CONSIDERANDO ESTUDO DE VIABILIDADE DE USO DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA**EVALUATION OF TREATMENT OF TEXTILE EFFLUENT BY ELECTROFLOCCULATION WITH MONITORING AND AUTOMATIC CONTROL CONSIDERING A FEASIBILITY STUDY OF THE USE OF PHOTOVOLTAIC GENERATION**

COMINOTE, Marina^{1*}; SILVA, Gabriel Libardi²; HERINGER, Netalianne Mitchell Fagundes³; GAZEL, Façal⁴; OLIVEIRA, Renato César de Souza⁵

^{1,2,3,4,5} Instituto Federal do Espírito Santo, *Campus Linhares*

* Autor correspondente
e-mail: mcominote@ifes.edu.br

Received 03 April 2020; received in revised form 02 June 2020; accepted 24 June 2020

RESUMO

A eletrofloculação é uma técnica de tratamento de efluente líquido que tem sido largamente usada devido à sua simplicidade de operação e aplicação em diversos tipos de efluentes. O objetivo do trabalho foi avaliar a eficiência do tratamento por eletrofloculação com monitoramento e controle automático de um efluente de indústria têxtil, considerando ainda um estudo de viabilidade de uso de geração fotovoltaica. Os ensaios de eletrofloculação foram realizados com efluente bruto, em reator de batelada com eletrodos de alumínio, e com cuba de vidro. Utilizou-se um sistema eletrônico, constituído de sensores e um microcontrolador, para controlar a corrente e monitorar as variáveis de tensão, temperatura e tempo, processando os dados e enviando-os a um computador. O volume tratado a cada ensaio foi de 3 litros e submetidos às correntes de 1 e 2A, retirando alíquotas em 5, 10, 15 min. Os parâmetros analisados foram: pH, condutividade, turbidez, Demanda Química de Oxigênio e varredura de absorbância na faixa de 200 a 800 nm. As amostras apresentaram na região do visível uma banda com a máxima absorbância em 670nm, assim optou-se por avaliar o sistema nesse comprimento de onda. Os resultados dos ensaios de eletrofloculação mostraram que a melhor remoção de turbidez, DQO e absorbância em 670nm ocorreram nas condições de 2A/10min, com eficiência média acima de 70%. A partir do projeto elaborado de energia fotovoltaica para o sistema de tratamento, foi constatado que a melhor estratégia é conectar o sistema fotovoltaico à rede de energia elétrica. Por meio de simulação financeira foi possível identificar grande economia de energia que compensam os custos com a instalação do sistema fotovoltaico. Pode-se concluir, portanto, que o sistema tem eficiência no tratamento de efluente têxtil e que a demanda de energia elétrica consegue ser atendida por energia fotovoltaica, permitindo que o projeto seja sustentável.

Palavras-chave: *resíduo líquido, processo eletroquímico, eficiência, energia fotovoltaica.*

ABSTRACT

Electroflocculation is a technique for liquid effluent treatment that has been widely used due to simplicity in operation and to the possibility of application in different types of effluents. This study aimed to evaluate the electroflocculation treatment efficiency, monitoring and controlling an effluent automatically from the textile industry, also considering a feasibility study to photovoltaic generation application. The electroflocculation tests were performed with raw effluent, in a batch reactor containing aluminum electrodes and glass vat. Sensors and a microcontroller make up the electronic system, which monitors and controls voltage, temperature, and time variables and also processes and sends the data to the computer. The tests consist of applying 1 and 2A current in a 3 liters volume taking aliquots in 5, 10, 15 min. The parameters analyzed were: pH, conductivity, turbidity, Chemical Oxygen Demand, and absorbance sweep in 200 to 800 nm range. The samples presented in the visible region a band with the maximum absorbance at 670nm; thus, it was decided to evaluate the system at this wavelength. The results of the electroflocculation tests showed that the best removal of turbidity, COD, and absorbance at 670nm occurred in the conditions of 2A / 10min, with average efficiency above 70%. A photovoltaic system was projected to meeting the demand for the energy electroflocculation system, whose analysis found that the best strategy is connecting the photovoltaic system to the electric power grid. Through financial simulation, It was identified as a significant energy-saving which offsets costs related to system installation. In conclusion, the system developed is efficient in textile effluent treatment and that the photovoltaic

system meets the demand for energy from the electroflocculation system, ensuring project sustainability.

Keywords: *liquid waste, electrochemical process, efficiency, photovoltaic energy.*

1. INTRODUÇÃO:

A poluição das águas superficiais e subterrâneas por efluentes líquidos provoca graves mudanças nas características físicas, químicas e biológicas as quais interferem na qualidade da água e praticamente impossibilitando o seu uso pelo ser humano (Crini e Lichtfouse, 2019).

A legislação ambiental, através das Resoluções CONAMA nº 357/2005 e nº 430/2011, dispõe que os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados diretamente nos corpos d'água após o devido tratamento e desde que obedeçam às condições padrões. Diante dessas exigências as empresas e indústrias buscam a implementação de sistemas de tratamento de efluentes. O sistema ideal para a empresa ou indústria é a integração do processo que gera o efluente com um processo que promova a recirculação ou reúso da água. Para que isso seja viável é necessário um processo de tratamento de efluente líquido de alta eficiência e baixo custo (Crini e Lichtfouse, 2019).

Diante dos inúmeros processos de tratamento de efluentes líquidos, a eletrofloculação (ou eletrocoagulação) é uma técnica que tem sido largamente estudada (Sen *et al.*, 2019; Babu *et al.*, 2019) devido à sua simplicidade de operação e aplicação em diversos tipos de efluentes tais como: têxtil (Núñez *et al.*, 2019; Tomassoni *et al.*, 2019), indústria de processamento de coco (Crespilho *et al.*, 2004; Jose *et al.*, 2019), laticínio (Dallago *et al.*, 2012; Tchamango *et al.*, 2020), lavanderia industrial (Orssatto *et al.*, 2016; Nugroho *et al.*, 2020), água pluvial (Zhang *et al.*, 2012; Carvalho *et al.*, 2019), reciclagem de papel (Katal e Pahlavanzadeh, 2011; Izadi *et al.*, 2018), doméstico (Kurt *et al.*, 2008; Bracher *et al.*, 2019), refinaria de óleos vegetais (Preethi *et al.*, 2020; Swati *et al.*, 2020), metais tóxicos (Koby et al., 2017; Krystynik *et al.*, 2019).

Esta técnica de tratamento faz uso de corrente elétrica para a geração de agentes coagulantes/floculantes em reações de oxidação. Os metais mais utilizados nos eletrodos de sacrifício são o ferro (Fe) e o alumínio (Al) devido a eficácia no processo de floculação e ao seu baixo custo (Sen *et al.*, 2019). Entretanto, a

eficiência do sistema pode alterar entre os eletrodos de ferro (Fe) e alumínio (Al) (Sher *et al.*, 2019; Aygun *et al.*, 2019; Papadopoulos *et al.*, 2019).

Para garantir a eficiência do sistema de eletrofloculação no processo de remoção dos contaminantes do efluente, é fundamental monitorar e controlar: a corrente elétrica aplicada, a distância entre os eletrodos, a agitação, o tempo de eletrólise, a condutividade do efluente, o pH inicial do efluente e a temperatura (Hashim *et al.*, 2019; Bracher *et al.*, 2019; Nidheesh *et al.*, 2020).

O consumo de energia elétrica, que se faz necessário na operação do sistema de tratamento por eletrofloculação, é uma das principais desvantagens ao defrontá-lo com sistemas convencionais, pois a mesma pode ser cara em certos lugares (Mollah *et al.*, 2001). Normalmente o consumo de energia contribui acima de 50% do gasto unitário (Mao *et al.*, 2008).

Dentre várias fontes de energia a energia solar fotovoltaica se destaca por ter a capacidade de se instalar em qualquer lugar, gerando eletricidade no mesmo local de utilização, por ter baixa necessidade de manutenção e por ser autossuficiente e renovável (Sampaio e González 2017). Estudos realizados por Pavón-Silva *et al.* (2018) e Khemila *et al.* (2018), em que ambos trabalharam com efluentes sintéticos (produzidos com corantes distintos), com eletrodos de alumínio, com reator de eletrofloculação de fluxo contínuo e com módulos fotovoltaicos conectados diretamente ao reator, obtiveram respectivamente uma eficiência de remoção dos corantes de 70% e 95%, demonstrando que é possível utilizar essa fonte de energia. Entretanto Pavón-Silva *et al.* (2018), salienta que além da eficiência de remoção de poluentes no efluente é importante também levar em consideração os custos de implementação dessa fonte de energia.

Diante do exposto e frente a escassez dos recursos naturais e contaminação dos recursos hídricos este trabalho visou montar e avaliar em escala laboratorial um sistema de tratamento para efluente líquido gerado por empresa têxtil, utilizando a técnica de eletrofloculação com monitoramento e controle

automático, considerando ainda um estudo de viabilidade econômica de uso de geração de energia fotovoltaica.

2. MATERIAIS E MÉTODOS:

Com base na tipologia do efluente proposto para os ensaios de tratamento por eletrofloculação optou-se pelo efluente bruto de uma empresa localizada no município de Linhares/ES, na qual apresenta atividade de lavanderia (descoloração) e tingimento. Esse processo industrial gera grande volume de efluente e com enorme diversidade e complexidade de compostos orgânicos e inorgânicos tóxicos em emulsão, os quais se destacam os corantes (Kumar e Saravanan, 2017; Hossini *et al.*, 2017; Samanta *et al.*, 2019).

As amostras foram coletadas na caixa de entrada da estação de tratamento de efluentes da empresa nos dias 26/04/18, 14/06/18, 12/04/19, 10/05/19 e 31/05/19. A caracterização do efluente foi realizada no laboratório de química do Ifes *campus* Linhares por meio dos seguintes parâmetros: pH, condutividade, turbidez, demanda química de oxigênio (DQO). As análises foram realizadas seguindo metodologias propostas pelo "Standart Methods for the Examination of Water and Wasterwater" (Rice *et al.*, 2012).

2.1. Reator de bancada

O reator de batelada foi construído com eletrodos de alumínio constituído por 8 lâminas com dimensões de 19 cm de comprimento, 3 cm de largura, e 1 mm de espessura (Figura 1). A cuba foi construída em vidro com as seguintes dimensões: 20 cm de altura, 20 cm de comprimento e 10 cm de largura.

O reator foi alimentado por uma fonte de corrente contínua regulável, ou seja, que viabilize o ajuste dos valores da intensidade da corrente a ser aplicada no efluente.

Durante o processo de eletrofloculação é necessário que a corrente elétrica permaneça constante. Ocorre que no início do processo a resistência do meio aquoso (eletrólito) é maior, assim se faz necessário aplicar uma tensão mais alta para um dado valor de corrente. Com o decorrer da reação de oxidação são liberados íons de alumínio (Al^{3+}) aumentando a condutividade e consequentemente diminuindo a resistência elétrica apresentada pelo eletrólito, sendo assim, o valor de tensão para manter a corrente constante deve ser menor.

Desta forma, foi necessário monitorar a tensão e ainda a temperatura a fim de realizar as análises necessárias. O sistema eletrônico utilizado para fazer o monitoramento e controle dos ensaios de eletrofloculação foi composto por um microcontrolador Atmega328P presente na plataforma Arduino Nano, sendo o responsável pela atuação, leitura e envio de informações do reator para o computador através de uma interface USB.

Para ler e armazenar os valores da tensão aplicada aos eletrodos, foi necessário realizar um condicionamento de dados, por meio de um circuito divisor de tensão resistivo, e um filtro com uso de capacitor.

A leitura da temperatura foi realizada por meio do sensor DS18B20 que possui uma faixa de medição de $-55^{\circ}C$ a $125^{\circ}C$, exatidão de $0.5^{\circ}C$. A comunicação entre sensor e microcontrolador foi realizada através das bibliotecas "Dallas Temperature e OneWire".

As informações coletadas e tratadas pelo microcontrolador foram enviadas a um computador portátil por meio de uma comunicação serial com a porta USB. O software PLX-DAQ foi utilizado em conjunto com um software de edição de planilhas para receber, armazenar e exibir todas as variáveis do processo em uma planilha (Figura 2).

A Figura 3 apresenta o sistema eletrônico montado.

2.2. Ensaios de eletrofloculação

Os ensaios foram realizados com as amostras coletadas nos dias 12/04/19, 10/05/19 e 31/05/19. O volume do efluente a cada ensaio foi de 3 litros e manteve sob constante agitação (300 rpm), com auxílio de agitador magnético. Essas amostras foram submetidas a correntes de 1 e 2A, recolhendo alíquotas de 100ml nos tempos de 5, 10 e 15 minutos. Para a remoção das alíquotas adotou-se o seguinte procedimento: desligar a agitação, esperar 2 minutos para o material flotar ou sedimentar, e com auxílio de uma pipeta posicionada no centro da cuba retirar o volume de 100ml.

As alíquotas foram filtradas à vácuo com papel de filtro qualitativo que retém partículas maiores que $19\mu m$ (marca: J. Prolab). Esse procedimento foi adotado para evitar possíveis variações nos resultados relativos aos diferentes tempos de flotação ou sedimentação das partículas de cada amostra. Posteriormente foram executados os ensaios dos parâmetros:

pH, turbidez, demanda química de oxigênio (DQO) e varredura de absorvância na faixa de 200 a 800 nm em espectrofotômetro Agilent-Cary60/UV-Vis.

2.3. Energia fotovoltaica

Analisando a literatura e outros trabalhos que utilizam a energia fotovoltaica de forma a prover o fornecimento de energia a sistemas de eletrofloculação, foram levantadas três possíveis maneiras de trabalhar com o sistema fotovoltaico: I) sistema *off-grid* com armazenamento de energia em baterias (Vieira e Cavalcante, 2018; de Lima *et al.*, 2019); II) sistema *off-grid* conectado ao sistema de eletrofloculação sem meios de armazenamento (de Lima *et al.*, 2019; Rahmani *et al.*, 2017; Balabel *et al.*, 2014); III) sistema *grid-tie* (conectado à rede elétrica de forma híbrida ao fornecimento de energia da concessionária) (Akikur *et al.*, 2013) utilizando a compensação de crédito de energia conforme resolução (ANEEL, 2012).

A primeira opção foi desconsiderada por estar em desacordo com a proposta de sustentabilidade ambiental do trabalho. A utilização de baterias aumenta o custo do sistema e seu descarte gera resíduos poluentes. As outras duas formas descritas foram analisadas para avaliar a melhor proposta. Foi realizado um projeto para atendimento da unidade consumidora considerando apenas o consumo de energia demandado pelo sistema de eletrofloculação, com o intuito de comparar financeiramente o custo de implementação do sistema e o tempo de retorno do investimento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO:

3.1. Características físico-químicas do efluente bruto.

Na Tabela 1 encontram-se os resultados de caracterização das amostras de efluente bruto coletadas em dias e anos distintos. Verifica-se que os valores de pH do efluente bruto apresentaram próximo de neutro, com exceção da amostra 5 que apresentou caráter ácido (pH = 4,1). Para esse tipo de efluente já foram encontrados na literatura valores de pH da faixa ácida (Pizato *et al.*, 2016), próximo da neutra (Afanga *et al.*, 2020; Bener *et al.*, 2019; Núñez *et al.*, 2019; Nidheesh *et al.*, 2020) até a alcalina (Cerqueira *et al.*, 2009; Soltani *et al.*, 2019).

O efluente bruto apresentou valores de DQO (173 a 410 mgO₂/L) próximos aos

resultados encontrados por Afanga *et al.* (2020), Bener *et al.* (2019), Soltani *et al.* (2019) e Núñez *et al.* (2019), e baixo comparando com os teores encontrados por Cerqueira *et al.* (2009), 1.179 a 2.553 mgO₂/L, por Nidheesh *et al.* (2020) 1.727 mgO₂/L, e por Pizato *et al.* (2016), 659 mgO₂/L.

As amostras do efluente de estudo apresentaram valores de turbidez (62,8 a 249 NTU) superior aos identificados por outros trabalhos: Cerqueira *et al.* (2009), 8,0 a 75,3 NTU; Pizato *et al.* (2016), 37 NTU; Bener *et al.* (2019), 15 a 35 NTU; Núñez *et al.* (2019), 12,5 NTU.

A condutividade do efluente de estudo apresentou resultado elevado (52 a 121 mS/cm) comparando com efluentes de mesma tipologia caracterizados por Cerqueira *et al.* (2009), Pizato *et al.* (2016), Afanga *et al.* (2020), Bener *et al.* (2019) e Núñez *et al.* (2019) que foram respectivamente 4,61; 0,80; 2,5; 8,96 e 0,67 mS/cm. Para sistema de tratamento por eletrofloculação esse resultado se torna vantajoso, pois diminui a resistividade do meio demandando menor tensão para manter a corrente.

3.2. Avaliação da eficiência do sistema de tratamento

Os resultados dos ensaios de eletrofloculação para a amostra 3 (Tabelas 2 e 3), mostram que a melhor remoção de turbidez e DQO ocorreram nas condições de 2A/10min. com eficiência de 87% e 80% respectivamente. Verifica-se também para a amostra 4, nas mesmas condições (2A/10min.), um comportamento semelhante com remoção de turbidez de 93%, e DQO de 81%. Essa mesma eficiência foi encontrada por Cerqueira *et al.* (2009), turbidez 98% e DQO 87%, entretanto as condições de ensaio foram diferentes, tais como: ajuste de pH inicial do efluente bruto para o valor próximo de 7; formato dos eletrodos de alumínio; corrente 15A; tempo de eletrofloculação de 30min.

Todavia a amostra 5 apresentou comportamento diferente, pois ocorreu melhor remoção de turbidez em 1A/5min de 91%, e a DQO apresentou uma redução máxima de 57% em 2A/10min, valor esse bem inferior comparado com as outras amostras. Sabe-se que o pH inicial do efluente a ser tratado por eletrofloculação influencia significativamente na eficiência do processo (Cerqueira *et al.*, 2009; Tchamango *et al.*, 2020; Nidheesh *et al.*, 2020; Bener *et al.*, 2019). O valor do pH inicial (4,1)

dessa amostra foi o que possivelmente corroborou para a queda da remoção de DQO, esse comportamento também foi constatado por Vepsäläinen e Sillanpää (2020) e por Nidheesh *et al.* (2020), usando eletrodos de alumínio.

Verifica-se que o pH do efluente no decorrer dos ensaios (Tabela 2) aumenta gradualmente até valores na faixa de neutro. Esse sistema de tratamento tem a grande vantagem de manter ou tornar o efluente com pH neutro por meio das reações que ocorrem no catodo, redução do hidrogênio, e no anodo, oxidação do alumínio seguida de hidrólise.

As varreduras espectrais das 3 amostras de efluente bruto filtrado (Figura 4) apresentaram na região do visível uma banda com a máxima absorvância em 670nm. Esse pico de absorvância próximo a esse comprimento de onda também foi constatado por Pizato *et al.* (2016) e Afanga *et al.* (2020) num efluente de mesma tipologia. Assim optou-se por calcular o percentual de remoção ou verificar a eficiência dos ensaios por meio da absorvância nesse comprimento de onda.

A remoção da absorvância em 670nm foi muito rápida, pois logo nos primeiros 5min de ensaio constata-se uma remoção de 74 a 97% na menor amperagem (Tabelas 2 e 3). Assim pode-se considerar que o sistema tem uma ótima eficiência na remoção de substâncias que absorvem nesse comprimento de onda.

A varredura espectral de todos os ensaios realizados com a amostra 3 (Figura 5) mostra que também há decaimento da absorvância em toda a faixa do visível e em parte do ultravioleta. O mesmo comportamento foi observado com as amostras 4 e 5.

Foi possível verificar visualmente a remoção de sólidos em suspensão e a cor das amostras do efluente (Figuras 6 e 7) durante os ensaios. Constata-se também que em ambos os ensaios das amostras 3 e 4 em 2A/15min o sistema encontra-se saturado do agente floculante, pois há uma espessa camada de espuma branca, o que provocou possivelmente o aumento da turbidez e da DQO (Tabela 2).

Durante os ensaios de eletrofloculação a temperatura do efluente foi monitorada e manteve-se entre 25 a 27°C, assim averigua-se que nos ensaios esse parâmetro não variou de forma significativa.

3.3. Viabilidade de uso de energia fotovoltaica

Com os resultados da porcentagem média de remoção das amostras 3, 4 e 5 dos parâmetros DQO, turbidez e absorvância em 670nm contidos na Figura 8, verifica-se que a melhor condição do ensaio de eletrofloculação foi com 2A no tempo de 10min.

Nesta condição, foi possível identificar que o maior consumo de energia aconteceu quando o valor de tensão era de 5,38V com 0,6Wh/l (Tabela 2).

De acordo com Kobya *et al.* (2006) o consumo de energia em um reator batelada pode ser calculado utilizando-se a equação 1 adaptada:

$$E = \frac{V \cdot i \cdot t}{1000 \cdot v} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

E: energia em KWh

V: tensão elétrica aplicada ao processo em Volts (V).

i: corrente elétrica aplicada em amperes (A).

T: tempo de aplicação da corrente ou tempo de processo (h).

v: volume tratado em m³.

Conhecendo o valor de consumo médio mensal encontrado pela equação, para um sistema *grid-tie* (conectado à rede elétrica), o projeto foi realizado considerando inclinação dos módulos em 19° Norte e dados de irradiação solar diária média mensal do local com a base de dados do SunData (Brito, 2008). Uma análise de viabilidade econômica foi levantada considerando os principais critérios abordados na literatura (Lopez, 2012; Türkay e Telli, 2011) Bazilian *et al.*, 2013; de Almeida *et al.*, 2017) como custo de instalação, previsão de geração, tempo de retorno do investimento e economia total no final da vida útil do sistema implantado.

Foi prevista a instalação de 13 módulos Canadian Solar CS6U-320P. Os módulos estariam conectados em série a um inversor Fronius Primo 5.0-1 possibilitando a conexão na rede. A Tabela 4 apresenta a irradiação solar média mensal da região considerada e a Figura 9 apresenta a previsão de geração com o consumo médio considerado do sistema. Com estimativa de preço baseado no mercado, considerando

equipamentos e instalação, o custo médio de instalação do sistema é aproximadamente R\$25.940.

A fim de avaliar financeiramente a viabilidade da utilização deste sistema, considerando a unidade consumidora do grupo A, com geração de energia e abatimento em crédito no horário fora ponta, a simulação foi realizada observando as relevâncias de algumas variáveis como incidência de impostos, previsão de aumento do Kwh ao ano e valor de tarifa baseado na regulamentação da distribuidora onde se encontra a indústria (EDP, 2019). A Figura 10 apresenta o resultado da simulação. Considerando a vida útil do sistema em 25 anos, a economia total simulada ao final da vida útil do sistema é de R\$88.716,00.

Para um sistema *off-grid* (sem bateria), seria necessário a construção de um conversor eletrônico que permitisse a regulação do ponto de operação elétrico do sistema. Considerando o número de módulos utilizados no projeto anterior (sistema *grid-tie*) e a previsão de geração mostrada na Figura 9, é possível identificar que durante os meses de abril a agosto o sistema fotovoltaico geraria menos energia do que seria consumido pelo sistema de eletrofloculação. Contudo se o sistema for *grid-tie* (conectado à rede elétrica), isso não seria um problema, pois a energia excedente nos meses de alta geração compensaria os meses de baixa geração (a energia seria convertida em créditos).

Assim, em um sistema *off grid* (sem bateria), é necessário projetar levando em consideração o pior mês de geração (junho), desse modo o número de módulos deverá aumentar para 17. A previsão de geração é retratada na Figura 11.

Em uma pesquisa de mercado é possível identificar que mesmo sem a utilização do inversor, o preço do sistema sem conexão à rede passa a não compensar pelo fato da geração ser superdimensionada para atender aos meses de menor radiação solar na região. Neste caso o projeto mais indicado é o sistema *grid-tie* (conectado à rede elétrica) que atende à demanda de energia do sistema de eletrofloculação de maneira eficiente.

4. CONCLUSÕES:

A técnica de eletrofloculação com eletrodos de alumínio mostrou-se ter grande eficiência na remoção de substâncias que absorvem a luz na faixa espectral do visível

independente das características iniciais do efluente bruto têxtil. As remoções de turbidez e Demanda Química de Oxigênio (DQO) também foram eficientes, entretanto tiveram variações significativas principalmente em função do pH inicial do efluente.

As condições dos ensaios de eletrofloculação que levaram a melhor eficiência de tratamento do efluente de estudo foram quando se manteve a corrente em 2A e tempo de processo 10 min.

Em relação ao consumo de energia, as simulações financeiras, baseadas no projeto de um sistema fotovoltaico, apontam que o sistema do tipo *grid-tie* (conectado à rede elétrica) é a melhor forma de atender à demanda de energia do sistema de eletrofloculação. Apesar dos custos de instalação do sistema fotovoltaico, a longo prazo, existe não apenas um retorno do investimento, mas também economia financeira, além de garantir a sustentabilidade da proposta.

5. REFERÊNCIAS:

1. ANEEL (2012, 17 de abril). *Resolução normativa nº 482*. Retrieved from <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>.
2. Akikur, R. K., Saidur, R., Ping, H. W., & Ullah, K. R. (2013). Comparative study of stand-alone and hybrid solar energy systems suitable for off-grid rural electrification: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27(C), 738-752.
3. Aygun, A., Nas, B., & Sevimli, M. F. (2019). Treatment of reactive dyebath wastewater by electrocoagulation process: Optimization and cost-estimation. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 36(9), 1441-1449.
4. Balabel, A., Zaky, M. S., & Sakr, I. (2014). Optimum operating conditions for alkaline water electrolysis coupled with solar PV energy system. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(5), 4211-4220.
5. Bazilian, M., Onyeji, I., Liebreich, M., MacGill, I., Chase, J., Shah, J., ... & Zhengrong, S. (2013). Re-considering the economics of photovoltaic power. *Renewable Energy*, 53, 329-338.
6. Bener, S., Bulca, Ö., Palas, B., Tekin, G., Atalay, S., & Ersöz, G. (2019).

- Electrocoagulation process for the treatment of real textile wastewater: effect of operative conditions on the organic carbon removal and kinetic study. *Process Safety and Environmental Protection*, 129, 47-54.
7. Bracher, G. H., Carissimi, E., Wolff, D. B., Graepin, C., & Hubner, A. P. (2020). Optimization of an electrocoagulation-flotation system for domestic wastewater treatment and reuse. *Environmental Technology*, 1-11.
 8. Brito, S. D. S. (2008). Centro de referência para energia solar e eólica. *CRESEB Informe-Rio de Janeiro*, 12(13), 3.
 9. Carvalho, E. H. D. S., Cuba, R. M. F., de Carvalho, R. V., & Marra, E. G. (2019). Application of eletrocoagulation/flotation process for rainwater reuse. *Periódico Tchê Química*, 16(31), 89-94.
 10. Cerqueira, A., Russo, C., & Marques, M. R. C. (2009). Electroflocculation for textile wastewater treatment. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 26(4), 659-668.
 11. CONAMA (2005, 17 de março). *Resolução n° 357*. Retrieved from <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>.
 12. CONAMA (2011, 13 de maio). *Resolução n° 430*. Retrieved from <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>.
 13. Crespilho, F. N., Santana, C. G., & Rezende, M. O. O. (2004). Tratamento de efluente da indústria de processamento de coco utilizando eletroflotação. *Química Nova*, 27(3), 387-392.
 14. Crini, G., & Lichtfouse, E. (2019). Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, 17(1), 145-155.
 15. Dallago, R., Di Luccio, M., Kühn, M., Krebs, J., Do Nascimento, M. S., Benazzi, T., ... & Mores, R. (2012). Eletrofloculação Aplicada ao Tratamento de Efluente de Laticínio. *PERSPECTIVA, Erechim*, 36(135), 101-111.
 16. Darvishi Cheshmeh Soltani, R., Jorfi, S., Alavi, S., Astereki, P., & Momeni, F. (2020). Electrocoagulation of textile wastewater in the presence of electro-synthesized magnetite nanoparticles: simultaneous peroxi-and ultrasonic-electrocoagulation. *Separation Science and Technology*, 55(5), 945-954.
 17. de Almeida, R. R. G., Brito, N. S. D., Medeiros, M. V. B., Simões, M. C. S., & de Oliveira, S. A. (2017). Proposição de uma metodologia para análise de viabilidade econômica de uma usina fotovoltaica. *Rev Principia*, 1(34), 84-92.
 18. de Lima, G. G. C., de Lima, C. A. P., Costa, R. B., de Medeiros, K. M., & Vieira, F. F. (2019). Eletrofloculação alimentada via energia solar fotovoltaica para o tratamento de águas eutrofizadas. *Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária. 30º Congresso ABES 2019*, II(406), 1-6.
 19. Hashim, K. S., Kot, P., Zubaidi, S. L., Alwash, R., Al Khaddar, R., Shaw, A., ... & Aljefery, M. H. (2020). Energy efficient electrocoagulation using baffle-plates electrodes for efficient Escherichia coli removal from wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 33, 101079.
 20. Hossini, H., Darvishi Cheshmeh Soltani, R., Safari, M., Maleki, A., Rezaee, R., & Ghanbari, R. (2017). The application of a natural chitosan/bone char composite in adsorbing textile dyes from water. *Chemical Engineering Communications*, 204(9), 1082-1093.
 21. EDP (2019, 06 de agosto). Tarifas - clientes atendidos em Baixa Tensão (Grupo B). *Resolução Homologatória: n°2.589*. Retrieved from <https://www.edp.com.br/distribuicao-es/saiba-mais/informativos/tabela-de-fornecimento-de-baixa-tensao>.
 22. Izadi, A., Hosseini, M., Darzi, G. N., Bidhendi, G. N., & Shariati, F. P. (2018). Treatment of paper-recycling wastewater by electrocoagulation using aluminum and iron electrodes. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 16(2), 257-264.
 23. Jose, S., Mishra, L., Debnath, S., Pal, S., Munda, P. K., & Basu, G. (2019). Improvement of water quality of remnant from chemical retting of coconut fibre through electrocoagulation and activated carbon treatment. *Journal of cleaner production*, 210, 630-637.
 24. Katal, R., & Pahlavanzadeh, H. (2011).

- Influence of different combinations of aluminum and iron electrode on electrocoagulation efficiency: *Application to the treatment of paper mill wastewater. Desalination*, 265(1-3), 199-205.
25. Khemila, B., Merzouk, B., Chouder, A., Zidelkhir, R., Leclerc, J. P., & Lapicque, F. (2018). Removal of a textile dye using photovoltaic electrocoagulation. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 7, 27-35.
 26. Kobya, M., Demirbas, E., Can, O. T., & Bayramoglu, M. (2006). Treatment of levafix orange textile dye solution by electrocoagulation. *Journal of hazardous materials*, 132(2-3), 183-188.
 27. Kobya, M., Demirbas, E., Ozyonar, F. U. A. T., Sirtbas, G., & Gengec, E. R. H. A. N. (2017). Treatments of alkaline non-cyanide, alkaline cyanide and acidic zinc electroplating wastewaters by electrocoagulation. *Process Safety and Environmental Protection*, 105, 373-385.
 28. Krystynik, P., Masin, P., Krusinova, Z., & Kluson, P. (2019). Application of electrocoagulation for removal of toxic metals from industrial effluents. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(8), 4167-4172.
 29. Kumar, P. S., & Saravanan, A. (2017). Sustainable wastewater treatments in textile sector. In *Sustainable fibres and textiles. Woodhead Publishing*, 323-346.
 30. Kurt, U.; Gonullu, M.T.; Ilhan, F.; Varınca, K. (2008) Treatment of domestic wastewater by electrocoagulation in a cell with Fe-Fe electrodes. *Environmental Engineering Science*, 25(2), 153-161.
 31. Lopez, R. A. (2012). *Energia solar para produção de eletricidade*. São Paulo: Artliber.
 32. Mao, X., Hong, S., Zhu, H., Lin, H., Wei, L., & Gan, F. (2008). Alternating pulse current in electrocoagulation for wastewater treatment to prevent the passivation of al electrode. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 23(2), 239-241.
 33. Mollah, M. Y. A., Schennach, R., Parga, J. R., & Cocke, D. L. (2001). Electrocoagulation (EC)—science and applications. *Journal of hazardous materials*, 84(1), 29-41.
 34. Nidheesh, P. V., Kumar, A., Babu, D. S., Scaria, J., & Kumar, M. S. (2020). Treatment of mixed industrial wastewater by electrocoagulation and indirect electrochemical oxidation. *Chemosphere*, 126437.
 35. Nugroho, F. A., Sani, M. M., Apriyanti, F., & Aryanti, P. T. P. (2020). The Influence of Applied Current Strength and Electrode Configuration in Laundry Wastewater Treatment by Electrocoagulation. In *Journal of Physics: Conference Series*, 1477, 052018.
 36. Núñez, J., Yeber, M., Cisternas, N., Thibaut, R., Medina, P., & Carrasco, C. (2019). Application of electrocoagulation for the efficient pollutants removal to reuse the treated wastewater in the dyeing process of the textile industry. *Journal of hazardous materials*, 371, 705-711.
 37. Orssatto, F., Ewerling, A., do Amaral Domingues, M. D., Eduardo, E. Y. N. G., & Tavaré, M. H. F. (2016). Tratamento de efluente de uma lavanderia industrial por meio da eletrofloculação: Uma opção para o reúso. *Revista ESPACIOS*, 37 (11), 07.
 38. Papadopoulos, K. P., Argyriou, R., Economou, C. N., Charalampous, N., Dailianis, S., Tatoulis, T. I., ... & Vayenas, D. V. (2019). Treatment of printing ink wastewater using electrocoagulation. *Journal of environmental management*, 237, 442-448.
 39. Pavón-Silva, T. B., Romero-Tehuiztil, H., Munguia del Río, G., & Huacuz-Villamar, J. (2018). Photovoltaic energy-assisted electrocoagulation of a synthetic textile effluent. *International Journal of Photoenergy*, 2018.
 40. Pizato, E., Lopes, A. C., Rocha, R. D. C., Barbosa, A. D. M., & Cunha, M. A. A. D. (2017). Caracterização de efluente têxtil e avaliação da capacidade de remoção de cor utilizando o fungo *Lasioidiplodia theobromae* MMPI. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 22(5), 1027-1035.]
 41. Preethi, V., Ramesh, S. T., Gandhimathi, R., & Nidheesh, P. V. (2020). Optimization of batch electrocoagulation process using Box-Behnken experimental design for the treatment of crude vegetable oil refinery

- wastewater. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 41(4), 592-599.
42. Rahmani, A., Zerrouki, D., Djafer, L., & Ayrar, A. (2017). Hydrogen recovery from the photovoltaic electroflocculation-flotation process for harvesting *Chlorella pyrenoidosa* microalgae. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(31), 19591-19596.
 43. Rice, E.W., Baird, R.B., Eaton, A.D., (2012). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (22nd ed.). Washington, U.S.A: American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation.
 44. Samanta, K. K., Pandit, P., Samanta, P., & Basak, S. (2019). Water consumption in textile processing and sustainable approaches for its conservation. In *Water in textiles and fashion*. Woodhead Publishing, 41-59.
 45. Sampaio, P. G. V., & González, M. O. A. (2017). Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 590-601.
 46. Sen, S., Prajapatib, A. K., Bannatwalac, A., & Pala, D. (2019). Electrocoagulation treatment of industrial wastewater including textile dyeing effluent—a review. *DESALINATION AND WATER TREATMENT*, 161, 21-34.
 47. Sher, F., Hanif, K., Iqbal, S. Z., & Imran, M. (2020). Implications of advanced wastewater treatment: Electrocoagulation and electroflocculation of effluent discharged from a wastewater treatment plant. *Journal of Water Process Engineering*, 33, 101101.
 48. Swati, S., Ahmet, A., & Halis, S. (2020). Electrochemical treatment of sunflower oil refinery wastewater and optimization of the parameters using response surface methodology. *Chemosphere*, 126511.
 49. Syam Babu, D., Anantha Singh, T. S., Nidheesh, P. V., & Suresh Kumar, M. (2019). Industrial wastewater treatment by electrocoagulation process. *Separation Science and Technology*, 1-33.
 50. Tchamango, S. R., Wandji Ngayo, K., Belibi Belibi, P. D., Nkouam, F., & Ngassoum, M. B. (2020). Treatment of a dairy effluent by classical electrocoagulation and indirect electrocoagulation with aluminum electrodes. *Separation Science and Technology*, 1-12.
 51. Tomassoni, F., Giroletti, C. L., Dalari, B. L. S. K., Nagel-Hassemmer, M. E., Recio, M. Á. L., & Lapolli, F. R. (2019). Otimização da eletrocoagulação aplicada em efluente têxtil. *A Revista DAE é classificada pelo QUALI/CAPEs e está adicionada/indexada nas seguintes bases*, 67, 89-102.
 52. Türkay, B. E., & Telli, A. Y. (2011). Economic analysis of standalone and grid connected hybrid energy systems. *Renewable energy*, 36(7), 1931-1943.
 53. Vieira, S. P., & Cavalcanti, L. A. P. (2018). Construção de protótipo de eletrofloculação em fluxo contínuo alimentado por energia solar fotovoltaica para purificação de efluentes. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, 5(9), 181-190.
 54. Zhang, G., Gong, S., Wu, F., Yang, S., & Liu, L. (2012). Study on optimum parameter for turbidity removal in rainwater collection by electro-coagulation in northwest region. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, (1), 10.

Tabela 1. Características físico-químicas do efluente bruto

Amostra	Data da coleta	pH	Turbidez (NTU)	Condutividade (mS/cm)	DQO* (mgO ₂ /L)
1	26/04/18	6,7	69,9	98	347
2	14/06/18	6,7	249	52	410
3	12/04/19	6,8	62,8	104	292
4	10/05/19	7,0	106	94	226
5	31/05/19	4,1	70,1	121	187

* Média aritmética simples de triplicata.

Tabela 2. Resultados das análises das amostras filtradas, antes e após os ensaios de Eletrofloculação.

Amostra	Corrente (A)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	DQO* (mgO ₂ /L)	Absorbância** (670nm)	pH	Tensão Média (V)
3	-	0	38,9	182	0,1593	6,5	-
	1	5	13,5	147	0,0410	7,6	3,55
		10	5,49	141	0,0082	7,6	3,55
		15	4,21	102	0,0054	7,6	3,61
	2	5	6,60	85	0,0125	7,5	5,64
		10	5,03	36	0,0070	7,8	5,38
		15	5,39	104	0,0122	8,0	5,00
4	-	0	45,3	131	0,1540	7,0	-
	1	5	11,0	126	0,0272	7,1	2,09
		10	9,80	< 25	0,0108	7,3	2,00
		15	7,08	97	0,0061	7,3	2,06
	2	5	8,58	71	0,0101	7,4	2,97
		10	3,36	< 25	0,0032	7,8	2,83
		15	4,98	45	0,0071	8,6	2,89
5	-	0	28,0	177	0,0799	3,7	-
	1	5	2,57	146	0,0042	4,0	0,24
		10	7,14	79	0,0008	4,5	0,45
		15	5,38	94	0,0006	5,6	0,66
	2	5	9,09	119	0,0021	4,5	0,62
		10	8,56	76	0,0084	5,7	1,23
		15	13,2	152	0,0182	6,2	1,84

* Média aritmética simples de triplicata;

** Valor da absorbância da amostra menos a absorbância da água destilada.

Tabela 3. Porcentagem de remoção dos parâmetros físico-químicos nos ensaios de Eletrofloculação.

Amostra	Corrente (A)	Tempo (min)	Porcentagem de remoção (%)		
			Turbidez	DQO	Absorbância (670nm)
3	1	5	65	19	74
		10	86	23	95
		15	89	44	97
	2	5	83	53	92
		10	87	80	96
		15	86	43	92
4	1	5	76	4	82
		10	78	81	93
		15	84	26	96
	2	5	81	46	93
		10	93	81	98
		15	89	66	95
5	1	5	91	18	95
		10	75	55	99
		15	81	47	99
	2	5	68	33	97
		10	69	57	89
		15	53	14	77

Tabela 4. Dados de irradiação solar média mensal da região e previsão de geração mensal.

Irradiação solar diária média mensal [kWh/m2.dia]												
Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média anual
6,12	6,1	5,28	4,46	3,87	3,54	3,63	4,27	4,78	4,93	4,99	5,91	4,82
Previsão de geração média mensal [kWh]												
Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total anual
630,12	628,06	543,63	459,20	398,46	364,48	373,74	439,64	492,15	507,59	513,77	608,49	5.959,32

Figura 1. (a) Desenho do formato do eletrodo, vista de cima; (b) posição do eletrodo na cuba; (c) conjunto da unidade do reator de eletrofloculação de bancada.

Hora	Tensao	Temperatura
10:53:59	3,06	25,4
10:54:01	3,01	25,3
10:54:03	2,92	25,3
10:54:05	2,92	25,4
10:54:08	2,92	25,5
10:54:10	2,92	25,3
10:54:12	2,88	25,3
10:54:14	2,88	25,5

PLX-DAQ for Excel "Version 2" by Net^Devil

Settings

Port:

Baud:

☒ Reset on Connect

☒ Use 1st Worksheet at the time of "Connect"
 ☐ Use active Worksheet at the time of "Connect"

Control

☐ Download Data
☐ Clear Stored Data
☐ User1
☐ User2

Controller Messages:

PLX-DAQ Status

Figura 2: Software de aquisição e armazenamento.

Figura 3: Sistema eletrônico.

Figura 4. Varredura espectral das amostras filtradas antes dos ensaios de eletrofloculação.

Figura 5. Varredura espectral da amostra 3 após todos os ensaios de eletrofloculação: (a) em toda faixa UV e Vis (200 a 800nm); (b) ampliação da região do visível de maior absorbância.

Figura 6. Ensaios de Eletrofloculação (EF) amostra 3: (a) efluente bruto; (b) 1A/15 min.; (c) 2A/15min.

Figura 7. Ensaio de Eletrofloculação (EF) amostra 4: (a) efluente bruto; (b) 1A/15 min.; (c) 2A/15min.

Figura 8. Porcentagem média (das amostras 3, 4 e 5) de remoção dos parâmetros DQO, Turbidez e Absorbância em 670nm, com seus respectivos desvios padrões.

Figura 9. Previsão de geração e consumo médio de energia do sistema grid-tie projetado

Figura 10. Simulação financeira do sistema grid-tie projetado

Figura 11. Previsão de geração e consumo médio de energia do sistema off- grid sem bateria projetado