

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE GRADUAÇÃO E EDUCAÇÃO PROFISSIONAL
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

PAMELLA MENDES E SILVA

**UTILIZAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA PARA O TRATAMENTO
DE EFLUENTE TÊXTIL POR MEIO DA TÉCNICA DE
ELETROFLOCULAÇÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Medianeira

2016

PAMELLA MENDES E SILVA

**UTILIZAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA PARA O TRATAMENTO
DE EFLUENTE TÊXTIL POR MEIO DA TÉCNICA DE
ELETROFLOCULAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Ambiental, do curso de Engenharia Ambiental, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Medianeira.

Orientador: Prof. Dra. Elizandra Sehn
Co-orientador: Prof. Dr. Eduardo Eyng



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Medianeira
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Coordenação do Curso de Engenharia Ambiental
Engenharia Ambiental



TERMO DE APROVAÇÃO

UTILIZAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTE TÊXTIL POR MEIO DA TÉCNICA DE ELETROFLOCULAÇÃO

por

PAMELLA MENDES E SILVA

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado às 10:00h do dia 20 de junho de 2016 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Eduardo Eyng
Prof. Co-orientador

Eduardo Borges Lied
Membro titular

Cesar Henrique Lenzi
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

AGRADECIMENTOS

Às vezes me questiono se as palavras são suficientes para transcrever a gratidão, antes de iniciar este trabalho, gostaria de tentar utilizá-las ao agradecer as pessoas que de alguma maneira colaboraram no seu desenvolvimento.

À minha orientadora professora Dra. Elizandra Sehn pela oportunidade concedida anos atrás que me conduziu até aqui. Por toda a paciência, dedicação e bom humor ao lidar com todas as questões que envolveram este trabalho, tornando esta jornada aprazível. A todos os professores pela dedicação ao transmitirem conhecimento, servindo como fonte de inspiração.

À minha avó Estelina por todas as memórias que perduram por anos e servem como combustível, ao meu avô Osvaldo por toda a sua sabedoria, à minha mãe por sempre acreditar em mim mesmo quando eu não era capaz, aos meus irmãos, familiares e amigos por oferecerem apoio incansável, me dando todo o suporte necessário para que este sonho se tornasse realidade.

Às amizades conquistadas durante a graduação, minha eterna gratidão por tornarem mesmo os momentos singelos em memoráveis, compartilhando conhecimento, alegria, desespero e angústia. Jamais poderei expor o quão agraciada me sinto por tudo o que vivi até aqui, nem mesmo sem a limitação de 140 caracteres.

Você sente que tem um limite e assim que
você toca o limite, algo ocorre e você sente
que pode ir além. Com a sua força,
determinação, instinto e experiência você
pode chegar muito longe.

(SENNÁ, Ayrton)

RESUMO

SILVA, Pamella M. **Utilização de energia fotovoltaica para o tratamento de efluente têxtil por meio da técnica de eletrofloculação**. 2016. Trabalho de conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2016.

O setor têxtil é um dos setores de maior importância da atividade industrial, porém destaca-se também como uma das atividades de maior geração de efluentes, com enorme potencial poluidor. Sendo, desta maneira, imprescindível a utilização de um tratamento eficaz antes do seu descarte. O presente estudo teve como objetivo o tratamento de efluente têxtil utilizando a técnica de eletrofloculação, sendo esta alimentada por energia fotovoltaica em sua última etapa. O efluente têxtil foi coletado em uma Indústria Têxtil localizada em São Miguel do Iguazu – PR. Testes preliminares foram executados visando a escolha do eletrodo de sacrifício, sequencialmente, fez-se uso de um planejamento sequencial, sendo composto por planejamento fatorial fracionado (PFF) 2^{4-1} e um delineamento central composto rotacional (DCCR) 2^2 , os valores otimizados foram utilizados em um tratamento realizado ao longo do dia no qual a eletrofloculação teve como fonte de alimentação a energia fotovoltaica. Os eletrodos de alumínio mostraram-se mais efetivos, dentre as variáveis utilizadas no PFF, a corrente e a distância entre os eletrodos apresentaram efeito significativo sobre o percentual da remoção de cor, sendo estas empregadas no DCCR. Apenas os termos da corrente expressaram significância na variável resposta, obteve-se um modelo válido, sendo permissível a obtenção da superfície de resposta. O valor ótimo da corrente de 2,75 A foi utilizado no teste ao longo do dia, em que foi possível obter uma remoção de 88,85%.

Palavras-chave: Corante Têxtil; Tratamento eletroquímico de efluentes; Energias Renováveis.

ABSTRACT

SILVA, Pamella M. **Electrocoagulation Technology in Textile Wastewater Treatment: Utilization of Photovoltaic Energy**. 2016. Trabalho de conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2016.

The textile sector is one of the major value on industry activities, however it's known of one that activity heads the wastewater generation, with a large pollution potential. This study aimed to treat textile wastewater using electrocoagulation technique, which is powered by photovoltaics on its last step. The textile wastewater was collected in a textile industry in São Miguel do Iguaçu – PR. Preliminary tests were carried out aiming at the choice of the sacrifice electrode in first step, after that the experiment was made using a sequential planning, consisting of a 2^{4-1} fractional design and a Central Composite Rotational Design (CCRD) 2^2 , the optimized values were used in a treatment performed throughout the day in which the electrocoagulation had energy by photovoltaics. The aluminum electrodes were more effective among the variables used in fractional design, the current and the distance between the electrodes had a significant effect on the percentage of color removal, which are employed in the CCRD. Only the current terms expressed significance in the response variable, we obtained a valid model, being permissible to obtain the response surface. The optimum current value of 2.75 A was used in the test throughout the day, it was possible to obtain a removal of 88.85

Keywords: Dyeing; Wastewater Electrochemical Treatment; Renewable Energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Interações no processo de eletrofloculação	18
Figura 2: Radiação direta no Brasil	21
Figura 3: Pontos de coleta do efluente.....	23
Figura 4: Arranjo experimental da EF para a primeira etapa.....	24
Figura 5: Arranjo experimental da EF para a segunda parte.....	25
Figura 6: Curva Padrão Alumínio.	27
Figura 7: Superfície de resposta (a) e curvas de contorno (b) em função da corrente e da distância entre os eletrodos para a remoção da cor.....	32
Figura 8: Média e erro padrão da irradiância.....	33
Figura 9: Média e o erro padrão da corrente.....	34
Figura 10: Remoção da cor ao longo do dia.....	35

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Valores utilizados no planejamento fatorial fracionado.....	26
Quadro 2: Valores utilizados no DCCR.....	26
Quadro 3: Testes preliminares e resultados.....	28
Quadro 4: Valores utilizados no DCCR.....	29
Quadro 5: Delineamento fatorial fracionado 2^{4-1} para a remoção da cor.....	30
Quadro 6: Valores utilizados no DCCR.....	32
Quadro 7: DCCR 2^2 para o estudo da remoção da cor.	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Estimativa dos efeitos para a remoção da cor.....	29
Tabela 2: Coeficientes de regressão do DCCR para a remoção da cor.	31
Tabela 3: Análise de variância para a remoção da cor.	31

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 OBJETIVOS.....	12
1.2.1 Objetivo geral.....	12
1.2.2 Objetivos específicos.....	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	13
2.1 INDÚSTRIA TÊXTIL.....	13
2.2 CORANTES.....	14
2.3 PROCESSOS DE TRATAMENTO.....	16
2.3.1 Eletrofloculação.....	18
2.4 ENERGIA FOTOVOLTAICA.....	20
3 METODOLOGIA.....	23
3.1 AMOSTRA.....	23
3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	23
3.2.1 Eletrofloculação utilizando a fonte de corrente contínua.....	24
3.2.2 Aplicação do painel fotovoltaico.....	24
3.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	25
3.4 ANÁLISE INSTRUMENTAL.....	27
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	28
4.1 RESULTADOS DA ETAPA 1.....	28
4.2 RESULTADOS DA ETAPA 2.....	32
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	36
REFERÊNCIAS.....	37

1 INTRODUÇÃO

Desde os primórdios a humanidade se preocupa com as vestimentas, utilizando peles de animais. Os registros da utilização de substâncias naturais para o tingimento vêm desde a antiguidade, em que os corantes eram obtidos a partir de plantas, fungos, líquens e insetos.

Desta maneira, a indústria têxtil se destaca por sua tradição. Ela é apontada como um dos setores de maior importância na atividade industrial, acrescentando significativamente na economia e na geração de empregos. Em contrapartida, é uma grande consumidora de água em seu processo produtivo, sendo estimado de 45 a 65 L de água por kg de tecido produzido. Como reflexo disto, é um setor gerador de enormes volumes de efluentes (CARDOSO, 2012).

As indústrias têxteis fazem uso de várias classes de corantes, estes corantes podem facilmente ser identificados a olho nu em corpos hídricos mesmo em baixas concentrações.

O efluente têxtil apresenta variação de acordo com o tipo de matéria-prima e insumos utilizados no processo, contendo uma variedade de produtos químicos. A introdução deste efluente sem o tratamento adequado acarreta em modificações no ecossistema, sendo indispensável um tratamento eficiente antes de seu descarte.

Os tratamentos mais usuais são os físico-químicos e biológicos, geralmente as indústrias têxteis realizam um tratamento físico-químico e posteriormente um tratamento biológico, o que apresenta um custo elevado. De acordo com a necessidade de eficiência para este tratamento têm-se buscado outras alternativas, dentre elas a técnica de eletrofloculação.

A eletrofloculação consiste na aplicação de uma corrente elétrica em eletrodos de sacrifício mergulhados na solução a ser tratada eletroquimicamente. A técnica gera coagulantes *in situ* e bolhas de oxigênio e hidrogênio que atuarão na remoção dos poluentes.

Um dos aspectos desta técnica é o alto consumo de energia, fator que tem sido utilizado para rejeição da mesma, todavia não há estudos de comparação com os gastos de energia para a produção de produtos químicos utilizados nos sistemas convencionais de tratamento. A utilização de energia fotovoltaica como fonte de alimentação para a técnica pode vir a ser uma alternativa viável do ponto de vista

técnico, ambiental e econômico.

Diante do exposto, o presente trabalho visa a aplicação da técnica de eletrofloculação para o tratamento do efluente têxtil, obtendo condições ideais de tratamento, e posteriormente a adoção da energia fotovoltaica como fonte de alimentação.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo aplicar a técnica de eletrofloculação no tratamento do efluente têxtil industrial obtendo os parâmetros otimizados inerentes a técnica para melhor remoção da cor, e posteriormente aplicar a energia fotovoltaica como fonte de energia alternativa para a alimentação para a técnica de eletrofloculação.

1.1.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos para a realização desta pesquisa, propõe-se:

- Determinar as variáveis que exercem efeito sobre o processo de tratamento de eletrofloculação a partir do planejamento fatorial fracionado;
- A partir das variáveis significativas, encontrar os valores que otimizem o tratamento, tendo a remoção da cor como variável resposta.
- Aplicar a técnica de eletrofloculação alimentado por um painel fotovoltaico, adaptando a condutividade elétrica do efluente de acordo com os parâmetros otimizados para os horários de maior irradiância solar.
- Obter a quantidade de alumínio/ferro residual no efluente após o tratamento de eletrofloculação na segunda etapa.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 INDÚSTRIA TÊXTIL

Há cerca de 4000 anos o processo de fiação de fibras era manual, os primeiros utensílios de que se tem conhecimento são a Roca e o Fuso, a mecanização do fuso ocorreu entre 800 A.E.C e 750 E.C na Índia (CAMBOIM, 2010).

No Brasil o setor têxtil possui mais de 32 mil, empregando aproximadamente 1,7 milhões de brasileiros. Este setor é responsável por cerca 6% do valor total da produção da indústria de transformação e está entre os 24 setores de maior importância da atividade industrial, destacando-se por sua tradição (ABIT; 2013; ALVARENGA, 2009).

Em 2010 o Brasil encontrava-se na quinta posição entre os maiores produtores têxteis do mundo, sendo o terceiro maior produtor mundial de malhas com predominância de algodão. Todavia, esta produção é basicamente voltada ao mercado interno. O consumo per capita de produtos têxteis no Brasil é elevado mesmo comparado a países desenvolvidos (BEZERRA, 2014; GORINI, 2000).

Segundo Cantelli (1999) “a maioria das empresas produz essencialmente tecidos, estes posteriormente são submetidos a processos de beneficiamento, tingimento, estamparia e acabamento”.

Dentre as matérias-primas, são utilizadas fibras têxteis, podendo ser naturais ou químicas, no mundo as fibras têxteis químicas são mais usuais, entretanto no Brasil as fibras têxteis naturais ainda são mais empregadas, cerca de 68% do consumido. Estas passam pelo processo de fiação, em que após um conjunto de operações são transformadas em fios. No processo de tecelagem os fios dão origem ao tecido. Por fim, passam pelo acabamento gerando a matéria-prima a ser utilizada no setor de confecção (CANTELLI, 1999; COSTA; ROCHA, 2009; GORINI, 2000).

O setor têxtil é o maior responsável pelo consumo de água industrial, além de consumirem grandes quantidades de corantes têxteis. Por exemplo, a tinturaria consome entre 20 a 60 m³.ton⁻¹ de produto. Isto faz com que a indústria têxtil se destaque como uma das maiores do mundo em geração de efluentes, com elevada

complexidade e potencial de contaminação. O seu potencial poluidor pode ser equiparado, em se tratando de carga hidráulica, ao potencial poluidor de 7000 pessoas. Dentre as características do efluente, estão a elevada carga orgânica, volatilidade, salinidade e reatividade química (ANDRADE, 2004; KAMIDA et al, 2005; KUNZ;1999; NUNES, 2008).

Karunya; Rose (2011) aponta que o efluente têxtil contém diversos tipos de produtos químicos e o descarte inadequado resulta na introdução de poluentes não biodegradáveis e tóxicos, o tornando não é só um problema ambiental, como também caso de preocupação em relação à saúde.

Os corantes que apresentam grande solubilidade em água, como é o caso dos reativos, vão interferir na absorção da luz pelos organismos presentes no corpo hídrico, afetando principalmente os mecanismos de fotossíntese, acarretando em modificações no ecossistema. Além disto, os corantes reativos podem ser detectados a olho nu em concentrações de até 5µg. (LUSTOSA; NETO; DA SILVA, 2013; Kunz, 1999)

Em processos industriais descontínuos a grande variação da carga presente afeta diretamente o desempenho do tratamento, diminuindo a sua eficácia (FIGUEIREDO; SANTOS; FERRARI, 2000).

2.2 CORANTES

Mesmo na antiguidade, substâncias naturais eram utilizadas objetivando o tingimento. Corantes naturais foram sendo descobertos ao longo do tempo, obtidos a partir de plantas, insetos, fungos e líquens, como a cor púrpura na Roma Antiga e o índigo conhecido pelos egípcios, mas a história da indústria de corantes sintéticos teve início apenas em 1856 com a descoberta de Willian Henry Perkin (ALMEIDA, 2008; CAMBOIM, 2010; CHEQUER, 2008; RODRIGUES, 2010).

Camboim (2010) define os corantes como “compostos orgânicos complexos capazes de colorir substratos têxteis ou não têxteis, de forma que a cor seja relativamente resistente (sólida) à luz e tratamentos úmidos”.

Estima-se que diariamente 128 toneladas de corante são lançadas ao meio

ambiente, sendo este dado alarmante, uma vez que pequenas concentrações são capazes de produzir uma significativa coloração, prejudicando alguns ciclos biológicos. Grande parte dos corantes são visíveis a baixas concentrações, o corante reativo é identificado pelo olho humano em concentrações de 5p.p.b em um rio limpo. Além disto, algumas classes de corantes podem apresentar efeitos carcinogênicos e mutagênicos (ALMEIDA, 2008; CAMBOIM, 2010; CERVELIN, 2010)

Atualmente, a Society of dyers and colourists (2015) conta com uma lista de 13.000 estruturas químicas e 37.000 nomes de corantes registrados. O foco da produção de corantes é alcançar um composto com características químicas que apresentem tonalidades mais brilhantes, altos valores de estabilidade, persistência e solubilidade em água (ALMEIDA, 2008; CAMBOIM, 2010).

Cerca de 10.000 diferentes corantes e pigmentos são usados industrialmente, o que representa 8×10^5 toneladas no mundo, disto 26.500 toneladas são usadas no Brasil. O grau de fixação do corante ao tecido pode variar entre 50 a 90%, estima-se que aproximadamente 15% deste valor é perdido durante o processo produtivo, compondo o efluente final (CHAVES, 2008; LUCENA, 2013; PINHEIRO, 2011).

Os corantes são compostos por dois grupos principais: o grupo cromóforo, responsável pela coloração e o grupo funcional, responsável pela fixação nas fibras. Exemplos do grupo funcional podem ser: CO, NO₂, OH, OCH₃, NCH₃. Os grupos cromóforos apresentam ligações duplas conjugadas, como >C=C<, >C=N-, >C=O e –N=N-, (CHAVES, 2009; GOMES, 2009).

Os corantes podem ser classificados de acordo com sua constituição química ou de acordo com a forma pelo qual ocorre a fixação às fibras (ALMEIDA, 2008).

Guaritini; Zanoni (1999) apresentaram em seu estudo os principais grupos de corantes classificados segundo o método de fixação:

- Corantes Reativos – são corantes contendo um grupo eletrofílico (reativo) capaz de formar ligação covalente com grupos hidroxila das fibras celulósicas.
- Corantes Diretos – este grupo de corantes caracteriza-se como compostos solúveis em águas capazes de tingir fibras de celulose através de interações de Van der Waals.
- Corantes Azóicos – são compostos coloridos, insolúveis em água, que são realmente sintetizados sobre a fibra durante o processo de tingimento.
- Corantes Ácidos – o termo corante ácido corresponde a um grande grupo de corantes aniônicos portadores de um a três grupos sulfônicos.

- Corantes à Cuba – eles são aplicados praticamente insolúveis em água, porém durante o processo de tintura eles são reduzidos com ditionito, em solução alcalina, transformando-se em um composto solúvel (forma leuco). Posteriormente, a subsequente oxidação pelo ar, peróxido de hidrogênio, etc., regenera a forma original do corante sobre a fibra.
- Corantes de Enxofre - é uma classe de corantes que após a aplicação se caracterizam por compostos macromoleculares com pontos de polissulfetos, os quais são altamente insolúveis em água. São aplicados após pré-redução em banhos de ditionito de sódio que lhes confere a forma solúvel, são reoxidados subsequentemente sobre a fibra pelo contato com ar.
- Corantes Dispersivos – constitui uma classe de corantes insolúveis em água aplicados em fibras de celulose e outras fibras hidrofóbicas através de suspensão.
- Corantes Pré-Metalizados – são caracterizados pela presença de um grupo hidroxila ou carboxila na posição ortho em relação ao cromóforo azo, permitindo a formação de complexos com íons metálicos.
- Corantes Branqueadores: apresentam grupos carboxílicos azometino (-N=CH-) ou etilênicos (-CH=CH-) aliados a sistemas benzênicos, naftalênicos, pirênicos e anéis aromáticos que proporcionam reflexão por fluorescência na região de 430 a 440 nm quando excitados por luz ultra-violeta.

Segundo Almeida (2008) “durante o tingimento com os corantes reativos é necessário o acréscimo de grandes quantidades de sais e amônia (60 até 200 g) para atingir um grau mínimo de fixação”. Esta classe de corantes é utilizada na indústria têxtil por apresentar maior estabilidade de cor, uma vez que ao reagir se tornam quimicamente parte da fibra. Também apresentam tonalidades brilhantes, ampla gama de cores, procedimentos de aplicação flexível e boa equalização em um processo mais rápido. Em contrapartida, apresentam elevados valores de solubilidade e baixa fixação nas fibras, fazendo com que sejam perdidos no efluente (ARAUJO; YOKOYAMA; TEIXEIRA, 2006; CAMBOIM, 2010; MATOS et al., 2013; MORAES, 2010).

2.3 PROCESSOS DE TRATAMENTO

Os efluentes têxteis apresentam grande variação de acordo com o tipo de matéria-prima e insumos utilizados. Uma das maiores problemáticas é a remoção da cor dos banhos de lavagem, uma vez que aproximadamente 15% da produção

mundial de corantes é perdida para o meio ambiente (FORTINO, 2012; ALMEIDA, 2008).

Para a remoção de material particulado, utiliza-se técnicas de tratamento que se baseiam em coagulação, seguidos de separação podendo ser flotação ou sedimentação. Todavia, estes processos não são eficientes para a remoção de cor e de compostos orgânicos dissolvidos. Os processos de adsorção em carvão ativado apresentam maior eficiência, entretanto apresenta limitação em corantes de caráter catiônico. Os processos biológicos destacam-se, em função da facilidade para se implementar sistemas que consigam trabalhar em grande escala (KUNZ, 2002)

São utilizados processos físicos, químicos e biológicos para o tratamento desses efluentes, entretanto há um custo elevado envolvido. As indústrias têxteis usualmente empregam um sistema físico-químico, que tem como desvantagem o grande volume de lodo gerado, para o processo de coagulação, seguidos por tratamento biológico (KUNZ, 2002; SILVA, 2012, FÁVERE, 2010).

Podem ser utilizados também: adsorção, precipitação, degradação química, eletroquímica e fotoquímica, biodegradação, processos de separação por membranas, osmose reversa, microfiltração, nanofiltração e ultrafiltração, sendo as últimas mais atraentes por possibilitarem o reuso da água pela indústria. Ainda estão sendo estudadas outras tecnologias, como a biodegradação, o tratamento com ozônio e a fotocatalise heterogênea. (FORTINO, 2012; KUNZ, 2002)

Segundo Nunes (2008) a indústria têxtil está dentre as indústrias que mais utilizam o tratamento físico-químico, que tem por finalidade a remoção de poluentes inorgânicos, matérias insolúveis, metais pesados, matérias orgânicas não biodegradáveis, sólidos em suspensão, cor, e etc.

Dentre as tecnologias atualmente estudadas encontra-se a eletrofloculação, ao fazer uso deste processo limita-se o uso de substâncias químicas, uma vez que os coagulantes são gerados *in situ*, há mais controle da liberação do agente coagulante se comparado aos processos físico-químicos convencionais. A estabilidade presente nos flocos torna a sua remoção simples, o processo consegue remover até mesmo partículas coloidais menores, além disto os equipamentos requeridos são simples e de fácil operação. Uma das maiores desvantagens da eletrofloculação é o consumo de energia elétrica demandado, mas tendo disponibilidade de uma fonte de energia elétrica, como um painel solar, isto pode ser solucionado (CERQUEIRA, 2006;

CRESPILHO; SANTANA; REZENDE, 2003; KHANDEGAR; SAROHA, 2013).

2.3.1 Eletrofloculação

O processo de eletrofloculação consiste na aplicação de uma corrente contínua em eletrodos de sacrifício, submersos na solução a ser tratada eletroquimicamente, no caso, o efluente têxtil. No ânodo há geração de íons de alumínio/ferro, devido à corrosão em decorrência da oxidação, quando estes íons entram em contato com as moléculas da água é formado um agente coagulante. No cátodo há geração de hidróxidos, devido a reações de redução, que se adsorverão nas moléculas coloidais formadas, originando os floculos. Paralelamente ocorre a eletrólise da água, em que são formados microbolhas de hidrogênio no cátodo e microbolhas de oxigênio no ânodo, responsáveis por carrear os floculos à superfície formando uma camada que contém as partículas flotadas que com facilidade podem ser removidas. A Figura 1 exemplifica o processo sucintamente.

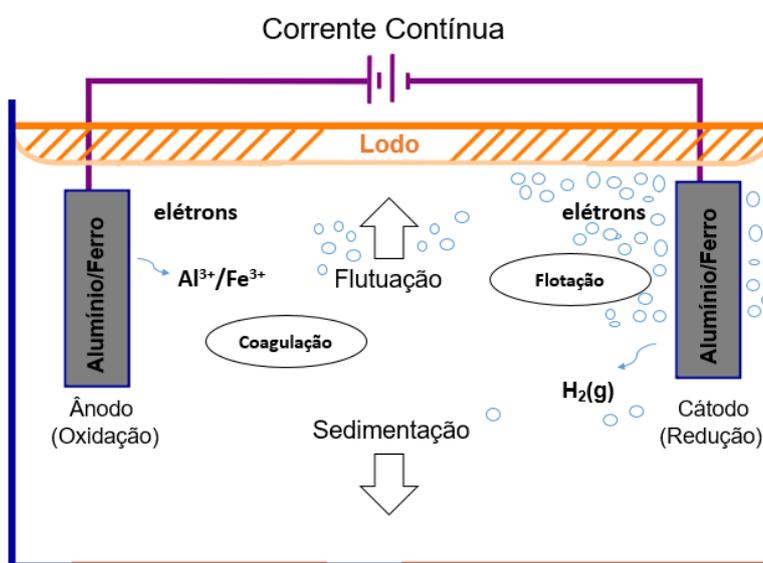
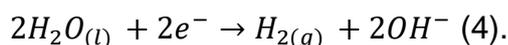
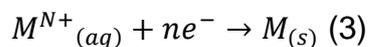
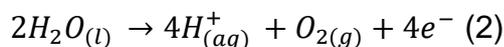
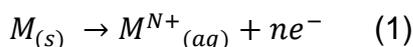


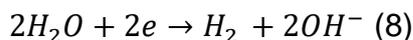
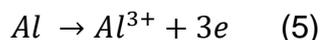
Figura 1 – Interações no processo de eletrofloculação
 Fonte: Adaptado de Holt (2002)

As principais reações com o metal M no ânodo são expostas nas equações 1

e 2 e no cátodo nas equações 3 e 4. (CERQUEIRA, 2006; NETO et al., 2011; PASCHOAL; TREMILIOSI-FILHO, 2005; GOBBI, 2013)



Os eletrodos de sacrifício a serem utilizados podem ser de ferro ou de alumínio, o ideal é que sejam aplicados eletrodos idênticos, uma vez que apresentam o mesmo potencial e sofrem desgastes uniformes. As reações envolvidas no processo em que são utilizados eletrodos de alumínio encontram-se nas equações 5, 6, 7 e 8. (CERQUEIRA, 2006; DROUCHE et al., 2009)



Wiendl (1998) aponta vários fatores que podem influenciar a eletrólise, dentre eles o material escolhido a ser utilizado como eletrodo, a natureza dos compostos responsáveis pela condutividade da solução e o grau de retificação da corrente elétrica. Os principais fatores que devem ser controlados são a tensão entre os eletrodos, a densidade da corrente elétrica, o afastamento entre os eletrodos e a condutividade elétrica do efluente.

Ainda de acordo com o autor supracitado, não há comprovação da dimensão do gasto com a energia elétrica aplicando o processo em uma estação de tratamento de maior porte. Ao utilizar a eletrofloculação para o tratamento de esgoto tratado, por exemplo, o consumo médio de energia é de 1,20 kWh.m⁻³ de esgoto tratado, desta maneira rejeitar a técnica utilizando como o alto consumo de energia é infundada, sendo fundamental uma análise comparativa entre o consumo de energia demandado pela fabricação de produtos químicos, desde a sua produção ao seu transporte.

Quanto a estudos realizados, Cerqueira (2006) pôde obter uma remoção de até 81% ao utilizar 8 placas de alumínio intercaladas, realizando o teste com uma corrente de 3 A, tempo de 10 minutos e distância entre os eletrodos de 0,5 cm. Os seus ensaios foram realizados em escala de bancada, em reator batelada.

2.4 ENERGIA FOTOVOLTAICA

A preocupação com os impactos ambientais e a limitação das energias renováveis aliadas ao aumento da demanda energética aumenta o interesse em fontes de energia menos poluentes e renováveis. Dentre elas, destaca-se a energia fotovoltaica. No Brasil as oportunidades para utilização desta energia estão cada vez maiores, não só pelo potencial de irradiância que o país oferece, mas também pelo crescente aumento da eficiência e a queda dos custos de implantação dos módulos e sistemas fotovoltaicos. A utilização desta energia também favorece o estabelecimento da geração distribuída no país, permitindo a diversidade na nossa matriz energética (ABINEE, 2012; LOPES, 2010; SANTOS; JABBOUR, 2013; PEREIRA et al., 2006).

Em números, a ABINEE (2012) aponta que a energia da radiação solar que atinge a atmosfera anualmente é de $1,25 \times 10^{18}$ kWh enquanto o consumo mundial é de $1,40 \times 10^{14}$ kWh, desta maneira com um aproveitamento de apenas 0,01% seria possível suprir a demanda energética mundial.

O processo de geração da energia fotovoltaica não emite nenhuma emissão, os componentes presentes na célula fotovoltaica têm sido estudados e ofertam possibilidade de reciclagem. Mesmo na produção desses componentes a geração de emissões e resíduos é reduzida e controlada, uma vez que as empresas têm interesse em manter a imagem desta energia como ambientalmente adequada (ABINEE, 2012; CAMARGO, 2000).

Irradiância é a grandeza radiométrica utilizada para medir o fluxo de radiação solar que atinge a superfície terrestre, comumente expressa em $W.m^{-2}$ ou em $kW.m^{-2}$ (CHUERUBIM, 2012; ABINEE, 2012).

O Brasil possui um grande potencial para o aproveitamento da energia solar com aplicações em todos os setores. A irradiação média anual varia entre 1200 e 2400 $kWh.m^{-2}.ano^{-1}$, sendo estes valores maiores à maioria dos países europeus. Na Figura 1 pode-se observar o mapa de radiação direta no Brasil, em que o valor na região do estudo é de 5,0 a 5,5 $kWh.m^{-2}.dia^{-1}$ (CHUERUBIM, 2012; EPE, 2012).

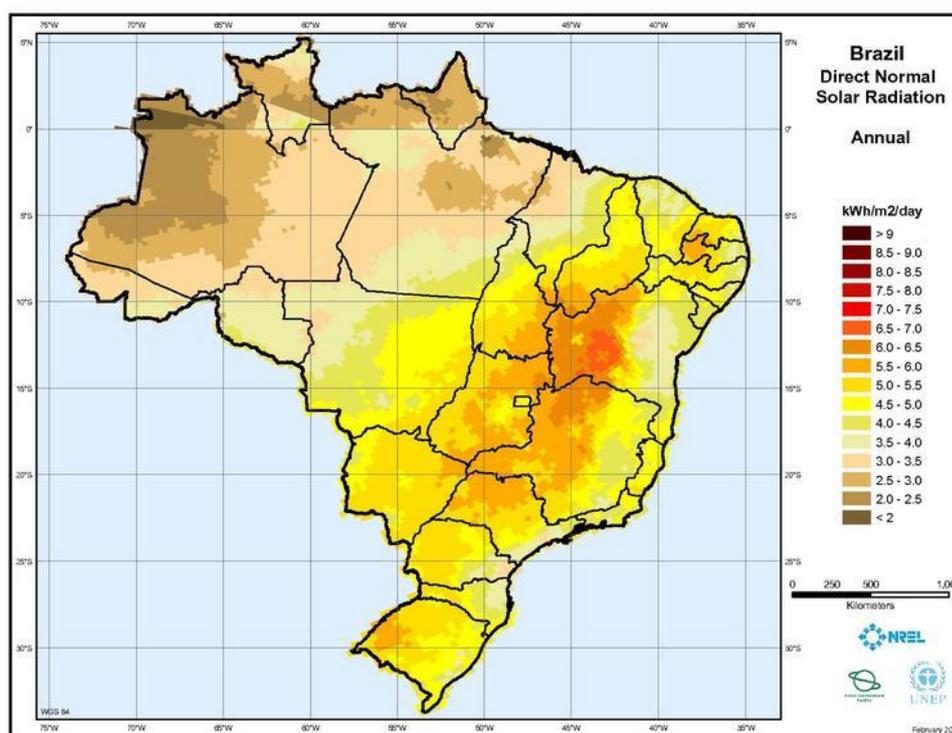


Figura 2 - Radiação direta no Brasil
Fonte: Heimiller (2006)

A energia solar pode ser convertida em eletricidade através do efeito fotovoltaico ou na concentração da energia solar através de espelhos. Na primeira, as células feitas de um material semicondutor quando expostas à luz produzem uma corrente elétrica, na segunda há o aquecimento de um fluido de trabalho visando a produção de vapor a elevadas temperaturas, este vapor é utilizado para movimentar turbinas conectadas aos geradores elétricos (ABINEE, 2012).

O dispositivo que converte a energia solar em eletricidade é a célula fotovoltaica, caracterizada por apresentar baixa tensão e corrente, a associação das células fotovoltaicas compõe os módulos fotovoltaicos. A escolha da maneira em que os módulos serão ligados, série ou paralelo, depende da corrente e tensão desejadas (ABINEE, 2012; KOLLING et al., 2004; ALONSO, 2009).

Segundo a ABINEE (2012) “sistemas fotovoltaicos são compostos por módulos, inversores, dispositivos de proteção, sistema de fixação e suporte de módulos, cabos e, opcionalmente, baterias e controladores de carga”.

A temperatura ambiente de operação e a intensidade de irradiação solar incidente sobre a célula são os fatores que mais interferem na eficiência da conversão da luz solar à energia elétrica. A intensidade de irradiação solar pode ser afetada pela

presença de nuvens e também pelo ângulo de inclinação da célula. Estima-se que a eficiência da conversão é reduzida aproximadamente 1% ao ano (EPE, 2012).

3 METODOLOGIA

3.1 AMOSTRA

O efluente têxtil foi coletado em uma Indústria Têxtil localizada no município de São Miguel do Iguazu-PR. As coletas foram realizadas de acordo com cada etapa do projeto, em cada uma delas foram coletados 25 L. Sendo que duas coletas foram utilizadas para a primeira etapa e uma coleta para a segunda etapa. As amostras foram coletadas em três pontos: diretamente da saída do tingimento, no início da primeira lagoa da estação de tratamento e da lavanderia. Os pontos de amostragem, em vermelho, podem ser visualizados no fluxograma simplificado (Figura 3. Após a coleta homogeneizou-se as amostras dos três pontos.

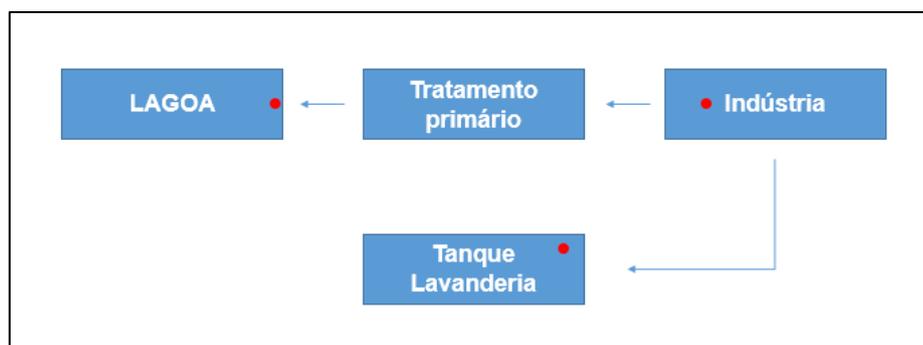


Figura 3 – Pontos de coleta do efluente

3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O trabalho se dividiu em duas etapas, sendo que para a primeira a eletrólise foi obtida a partir de uma fonte *Pollitem*, modelo - POL 16-E de 32 V e 5 A, e para a segunda etapa a energia proveniente do painel fotovoltaico. A eletrofloculação foi desenvolvida em um reator batelada escala de bancada (béquer de 1L) contendo 500 ml do efluente. Foram utilizados dois eletrodos de sacrifício que possuíam uma área de 50 cm² e submersos 25 cm². Para manter o tratamento sob agitação fez-se uso de um agitador magnético. Após 45 minutos de decantação, retirou-se uma alíquota para

a leitura de absorbância nos picos encontrados a fim de se obter o percentual de remoção da cor.

3.2.1 Eletrofloculação utilizando a fonte de corrente contínua

Nesta etapa foram realizados os testes preliminares, o planejamento fatorial fracionado e o delineamento composto central rotacional. Uma vez que para a realização do planejamento experimental é fundamental ter controle sobre as variáveis independentes que exercerão efeito perante a variável dependente analisada.

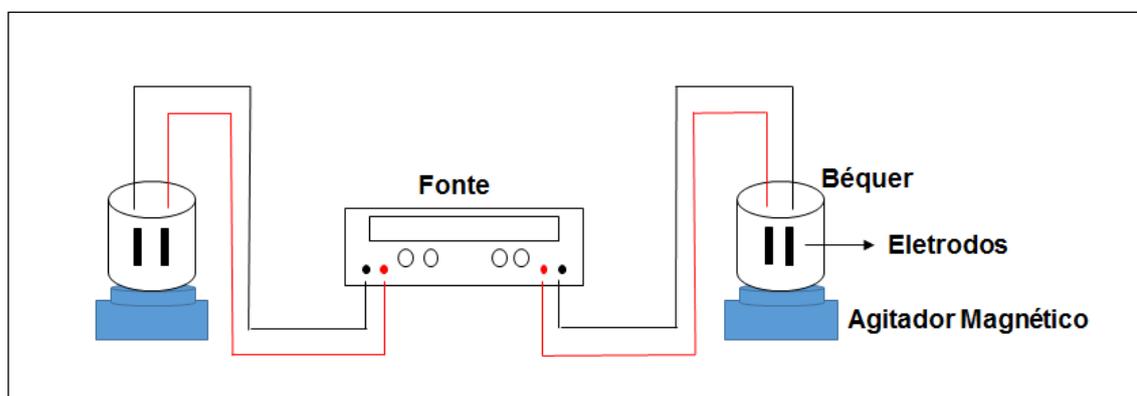


Figura 4 - Arranjo experimental da EF para a primeira etapa

3.2.2 Aplicação do painel fotovoltaico

Nesta etapa a energia foi proveniente do painel fotovoltaico, composto por células de Silício Policristalino, suas especificações são uma irradiação de 1000 W m^{-2} , corrente máxima de $7,87 \text{ A}$, voltagem máxima de $17,8 \text{ V}$, potência máxima de 140 W , diferença de potencial de circuito aberto de $22,2 \text{ V}$ e corrente elétrica de curto-circuito de $8,1 \text{ A}$. Os dados de irradiância e corrente do painel fotovoltaico foram coletados pelo *software LoggerNet*. Conforme pode ser observado na Figura 3.

Para determinar a quantidade de NaCl necessária para que a condutividade do efluente alcançasse a corrente otimizada no horário máximo de absorbância, entre às 11 h e às 14 h, foi realizado um ensaio empírico, medindo a corrente conforme a massa acrescentada.

O teste de eletrofloculação foi realizado em duplicata, conforme explicitado no item 3.2, diferenciando-se pela fonte de alimentação a qual fez uso da energia fotovoltaica, tendo ocorrência ao longo do dia 8 de dezembro de 2015. Foi realizado um ensaio a cada hora do dia, iniciando-se próximo ao nascer-do-sol e finalizando-se próximo ao pôr-do-sol, totalizando 13 ensaios. Para a simulação da remoção de um dia, houve a retirada de uma alíquota de cada teste, sendo esta homogeneizada ao final do dia.

Com os dados de irradiância coletados durante o ensaio foram calculados a média e o erro padrão, com o auxílio do *software* Origin 6.0, das 7 horas às 19 horas.

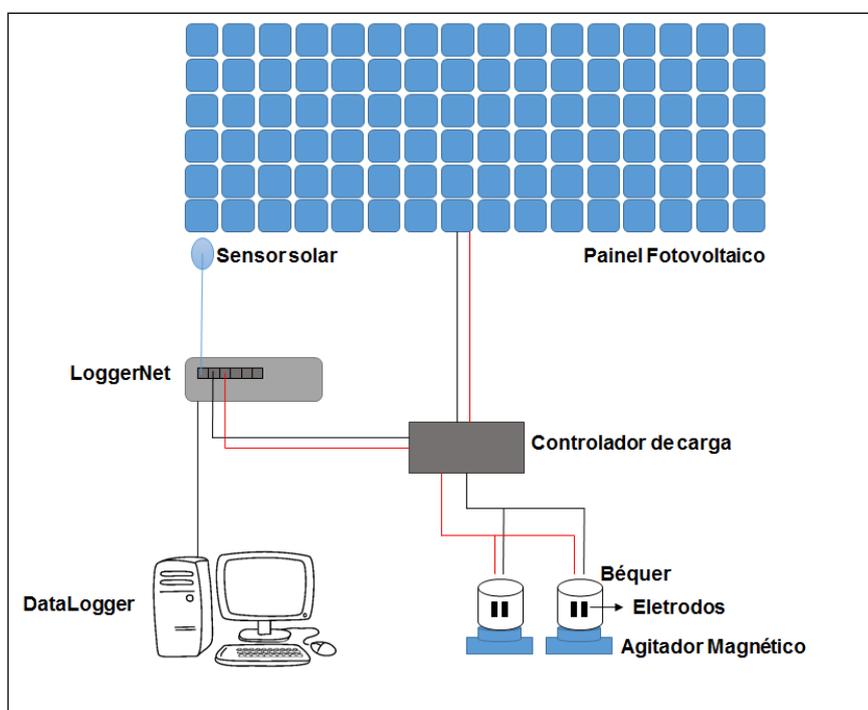


Figura 5 - Arranjo experimental da EF para a segunda parte

3.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Determinou-se as variáveis independentes no processo e a variável dependente, sendo que a variável dependente foi utilizada para análise do efeito das variáveis independentes, os intervalos utilizados nas variáveis independentes foram ajustados conforme os resultados obtidos. Os efeitos das variáveis independentes sobre o percentual de remoção de cor foram avaliados com o auxílio do programa *Statistica 7.0* e Excel, nas duas etapas.

Na primeira parte, os testes preliminares serviram para determinar o eletrodo de sacrifício a ser utilizado, alumínio ou ferro. Optou-se pelo eletrodo que apresentou melhores características. Para análise das variáveis que podem exercer efeito significativo na eficiência do tratamento, foi escolhida a estratégia sequencial de planejamentos, primeiramente se realizou um Planejamento Fatorial Fracionado (PFF) 2^{4-1} (Quadro 1) e 4 repetições no ponto central, uma vez que esta metodologia torna possível analisar mais variáveis com menor número de ensaios (RODRIGUES; LEMMA, 2014). As graduações do agitador magnético utilizado nos ensaios embasaram a obtenção dos valores reais para a rotação, os quais foram calculados proporcionalmente a potência nominal do equipamento.

Variáveis	Nível		
	-1	0	1
Tempo (min) (x_1)	5	20	35
Corrente (A) (x_2)	0,5	2	3,5
Agitação (rpm) (x_3)	≈654	≈818	≈982
Distância eletrodos (cm) (x_4)	1,10	1,30	1,50

Quadro 1 – Valores utilizados no planejamento fatorial fracionado

Após análise e interpretação dos efeitos das quatro variáveis do PFF, as avaliadas como significativas foram utilizadas em um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) para 2 variáveis, realizando 4 repetições no ponto central (Quadro 2). Com isto, foi possível obter os coeficientes de modelo matemático codificado e os pontos otimizados para as variáveis independentes a partir do DCCR. As variáveis otimizadas foram utilizadas na etapa posterior.

Variáveis	Nível				
	-1,41	-1	0	1	1,41
Corrente (A) (x_2)	0,6	1	2	3	3,4
Distância eletrodos (cm) (x_4)	1,05	1,3	1,9	2,5	2,75

Quadro 2 – Valores utilizados no DCCR

3.4 ANÁLISE INSTRUMENTAL

Para análise da remoção da cor, primeiramente, realizou-se a varredura da amostra em um espectrofotômetro de feixe duplo, o que tornou possível a obtenção dos picos de absorbância do efluente. O pico obtido foi utilizado para a leitura das amostras no espectrofotômetro de feixe simples.

Quanto à análise do alumínio/ferro residual fez-se uso da absorção atômica. Para tal, foram coletadas amostras de cada horário do teste realizado com a aplicação da energia fotovoltaica, as mesmas foram digeridas (APHA, 2005), o método de rotina foi utilizado para a avaliação da amostra, obtendo-se uma curva padrão (Figura 6).

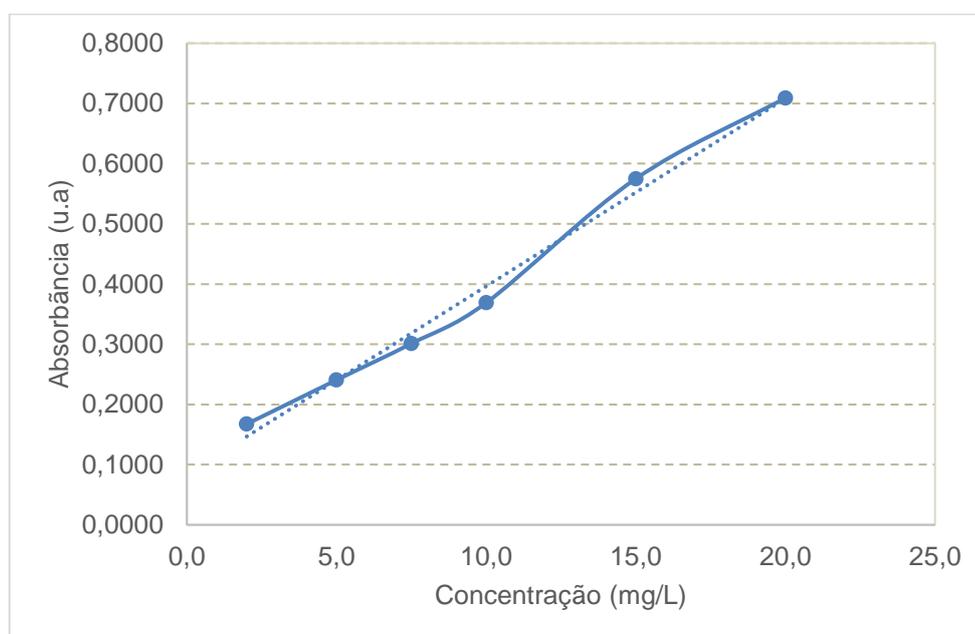


Figura 6 – Curva Padrão Alumínio

A curva padrão do alumínio apresentou um R^2 de 0,9908 (equação 9), a partir dela foi possível obter os resultados da concentração em mg.L^{-1} .

$$Y = 0,0312x + 0,084 \quad (9)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 RESULTADOS DA ETAPA 1

O maior pico de absorvância do efluente se deu em 665 nm, sendo este comprimento de onda utilizado para as leituras das amostras no espectrofotômetro de feixe simples.

Está exposto no Quadro 3 os valores obtidos para a remoção da cor utilizando os dois eletrodos. Sendo perceptível que com o eletrodo de ferro foi possível alcançar, em sua maioria, uma porcentagem de remoção de cor superior ao eletrodo de alumínio. Comparando-os no tempo de 10 minutos e corrente de 2 A, nota-se que o alumínio apresentou maior eficiência, o que seria de maior interesse uma vez que o tempo necessário para o tratamento é menor. A utilização do eletrodo de ferro torna necessário um tempo de decantação superior, para que o ferro precipite e a amostra perca a cor amarelada. Desta maneira, definiu-se a utilização do eletrodo de alumínio, uma vez que a remoção obtida é satisfatória.

Ensaio	Tempo (min)	Corrente (A)	Remoção da cor (%) eletrodo de Al	Remoção da cor (%) eletrodo de Fe
1	10	1	10,12	82,90
2	10	2	97,51	92,20
3	40	1	90,80	99,19
4	40	2	88,79	99,25

Quadro 3 – Testes preliminares e resultado

O Quadro 4 retrata os resultados da porcentagem de remoção de cor obtidos no planejamento 2^{4-1} . O ensaio 8 obteve a maior eficiência, sendo que todas as variáveis se encontravam no nível superior.

Ensaio	x_1	x_2	x_3	x_4	Remoção da cor (%)
1	-1 (5)	-1 (0,5)	-1 (≈ 654)	-1 (1,10)	49,93
2	1 (35)	-1 (0,5)	-1 (≈ 654)	1 (1,30)	92,81
3	-1 (5)	1 (3,5)	-1 (≈ 654)	1 (1,30)	95,45
4	1 (35)	1 (3,5)	-1 (≈ 654)	-1 (1,10)	89,53
5	-1 (5)	-1 (0,5)	1 (≈ 818)	1 (1,30)	89,22
6	1 (35)	-1 (0,5)	1 (≈ 818)	-1 (1,10)	88,57
7	-1 (5)	1 (3,5)	1 (≈ 818)	-1 (1,10)	92,63
8	1 (35)	1 (3,5)	1 (≈ 818)	1 (1,30)	96,28
9	0 (20)	0 (2)	0 (≈ 982)	0 (1,50)	83,49
10	0 (20)	0 (2)	0 (≈ 982)	0 (1,50)	79,52
11	0 (20)	0 (2)	0 (≈ 982)	0 (1,50)	86,52
12	0 (20)	0 (2)	0 (≈ 982)	0 (1,50)	79,24

Quadro 4 – Delineamento fatorial fracionado 2^{4-1} para a remoção da cor, em x_1 corresponde ao tempo (min) x_2 a corrente elétrica (A), x_3 a agitação (rpm) e x_4 a distância entre os eletrodos (cm).

Os resultados (Tabela 1) mostram que a porcentagem de remoção de cor foi afetada pela corrente ($p = 0,082123$) e pela distância entre os eletrodos ($p = 0,08327$), em um nível de confiança de 90%. É possível perceber que um incremento no tempo e na corrente resultaram em um acréscimo na porcentagem de remoção da cor.

Tabela 1 – Estimativa dos efeitos para a remoção da cor

Fatores	Efeito	Erro Padrão	t(7)	P
Média	85,26	2,68	31,76	0,000000
Tempo (min)	9,99	6,57	1,52	0,172453
Corrente (A)	13,34	6,57	2,03	0,082123*
Agitação	9,74	6,57	1,48	0,181965
Distância eletrodos	13,27	6,57	2,01	0,083273*

Desta maneira, a corrente elétrica e a distância entre os eletrodos foram selecionadas e estudadas através do DCCR também para a resposta da remoção de cor. O tempo foi fixado em 5 min, apesar de possuir efeito positivo, pois o mesmo contribui para um maior consumo de energia elétrica utilizada no processo, além de ser levado em consideração a possibilidade de ter um menor tempo de tratamento, tornando-o mais viável. A agitação também foi mantida no nível inferior, apesar da

variável ter um efeito positivo, pois em uma escala industrial seria necessária a utilização de energia elétrica para a realização da agitação do efluente. Os 14 ensaios e as respostas da remoção da cor podem ser visualizados no Quadro 7. O melhor valor para a variável resposta ocorreu no ensaio 7, com a corrente no ponto central e a distância entre os eletrodos no nível -1,41. O erro médio entre os valores obtidos no ponto central foi de 1,27, valor baixo este baixo, podendo-se então garantir a repetitividade do processo.

Ensaio	x_2	x_4	Remoção da cor (%)
1	-1 (1)	-1 (1,3)	82,91
2	1 (1,3)	-1 (1,3)	96,42
3	-1 (1)	1 (2,5)	90,89
4	1 (1,3)	1 (2,5)	96,74
5	-1,41 (0,6)	0 (1,9)	81,37
6	1,41 (3,4)	0 (1,9)	96,07
7	0 (2)	-1,41 (1,05)	97,51
8	0 (2)	1,41 (2,75)	95,94
9	0 (2)	0 (1,9)	96,96
10	0 (2)	0 (1,9)	92,81
11	0 (2)	0 (1,9)	94,22
12	0 (2)	0 (1,9)	93,71

Quadro 5 – DCCR para o estudo da remoção da cor, em x_2 correspondente ao tempo (min) e x_4 a distância entre os eletrodos (cm).

Na Tabela 2 estão expostos os coeficientes de regressão, o erro padrão, o valor do t_{Calc} , o p-valor para a remoção da cor. Os termos não significativos podem ser atribuídos aos resíduos. Desta maneira, é possível verificar na Tabela 2 que apenas o termo da corrente linear e quadrático foram significativos a 10% de significância ($p < 0,1$).

Tabela 2 – Coeficientes de regressão do DCCR para a remoção da cor

Fatores	Efeito	Erro Padrão	t(6)	p-valor
Média	94,43	1,03	91,51	0,000000
x_1 (L)	5,02	0,73	6,88	0,000466
x_1 (Q)	-3,11	0,82	-3,80	0,008934
x_4 (L)	0,76	0,73	1,04	0,336616
x_4 (Q)	0,91	0,82	1,11	0,308713
$x_1 x_4$	-1,91	1,03	-1,85	0,112875

A Tabela 3 contém a ANOVA realizada considerando apenas os termos significativos, os quais foram o termo linear e quadrático da corrente elétrica. Como o valor do $F_{\text{calculado}}$ é superior ao valor de F_{tabelado} o modelo é adequado para descrever os resultados através da superfície de resposta (Figura 4), sendo obtido um modelo de segunda ordem (Equação 9). Os parâmetros estatisticamente não significativos foram removidos do modelo e atribuídos aos resíduos.

Tabela 3 – Análise de variância para a remoção da cor

Fonte de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	$F_{\text{calculado}}$
Regressão	273,17	2	136,58	24,52
Resíduo	50,13	9	5,58	
Total	323,30	11		

% da variação explicada (R^2) = 84,45 $F_{2;9;0,1}=3,01$

$$\text{Remoção da cor (\%)} = 95,15 + 5,02x_1 - 3,29x_1^2 \quad (9)$$

Utilizando a superfície de resposta obtida pelo modelo (Figura 4), é possível obter as condições de corrente para a eletrofloculação que resultam em maior valor de remoção da cor. É possível visualizar através da superfície e curvas de contorno que para a corrente a faixa ótima é de 2,7 a 3,8 A. A condição ótima foi obtida derivando-se a equação, determinando assim o ponto crítico de 2,75 A. Pode-se observar que a distância entre os eletrodos, nos intervalos analisados, não apresentou diferença significativa, sendo assim, optou-se por fixá-la no ponto central.

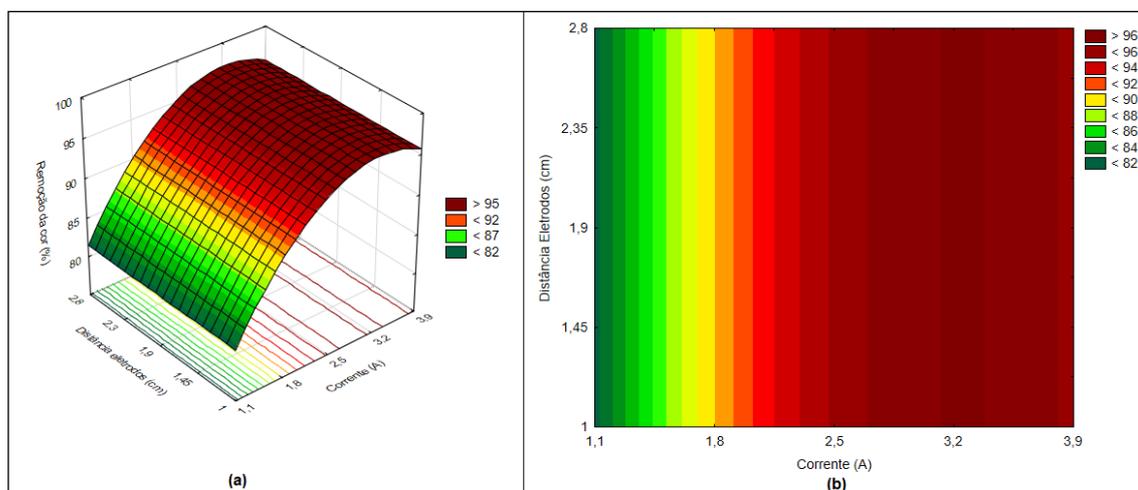


Figura 7 – Superfície de resposta (a) e curvas de contorno (b) em função da corrente e da distância entre os eletrodos para a remoção da cor.

Para validação do modelo foi realizado um ensaio no ponto da derivada da Equação 9 (0,76) em triplicata, o valor teórico da remoção da cor para este caso é de 97,06%. Os resultados obtidos podem ser visualizados no Quadro 8. O valor médio obtido foi de $(98,91 \pm 0,11)\%$. Como o erro é de apenas 1,89% entre o valor teórico e o valor real é possível afirmar que o modelo é válido.

Repetição	Remoção da cor (%)
1	98,88
2	99,02
3	98,81

Quadro 8 – Resultados na validação do modelo

4.2 RESULTADOS DA ETAPA 2

Para a etapa de aplicação da energia fotovoltaica, utilizou-se a corrente otimizada obtida através do DCCR, de 2,75 A, a distância entre os eletrodos foi utilizada no ponto central, 1,9 cm.

Conforme exposto na Figura 5, é possível observar a média acompanhada do erro médio da irradiância no dia em que foi realizado o teste (08/12/2015), sendo este um dia de céu limpo. A irradiância máxima obtida ficou próximo a 1200 W.m^{-2} . Percebe-se que a variação maior do erro ocorreu nos testes 11h30, 12h30 e 15h30,

isto se deve a ocorrência de nuvens neste período.

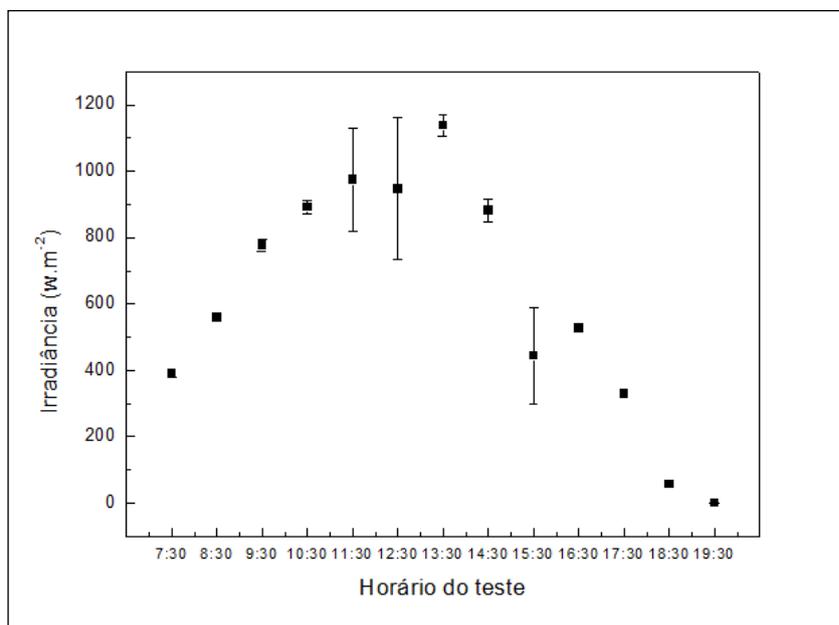


Figura 8 – Média e erro padrão da irradiância

É apresentado na Figura 6 a média das correntes obtidas e seus respectivos erros padrão. A corrente otimizada através do DCCR foi de 2,75 A, podendo esta ser visualizada na Figura através da linha tracejada em vermelho. Nos testes realizados entre às 9 horas e às 14 horas foi possível alcançar valores próximos ou superiores ao almejado.

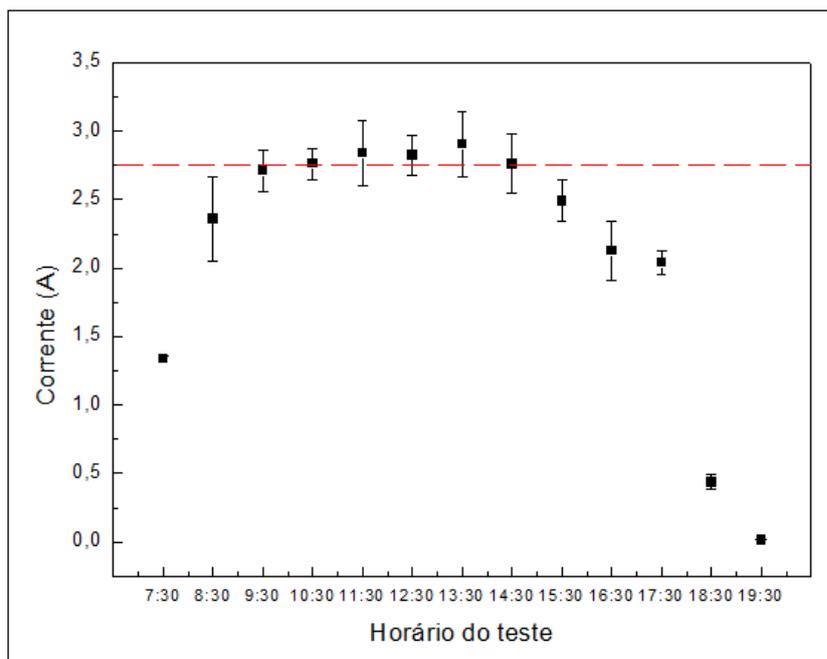


Figura 9 – Média e erro padrão da corrente

Os valores da porcentagem de remoção da cor ao longo do dia, bem com o desvio padrão amostral da duplicata, podem ser visualizados na Figura 7. É visível que o tratamento apresentou eficiência obtendo valores superiores ou próximos a 90% na maior parte do dia. A maior eficiência ocorreu às 13h30, período em que houve o pico máximo de irradiância, sendo esta de 98,63%. Quanto a remoção da amostra homogênea obtida ao longo do dia, o resultado foi de 88,85%.

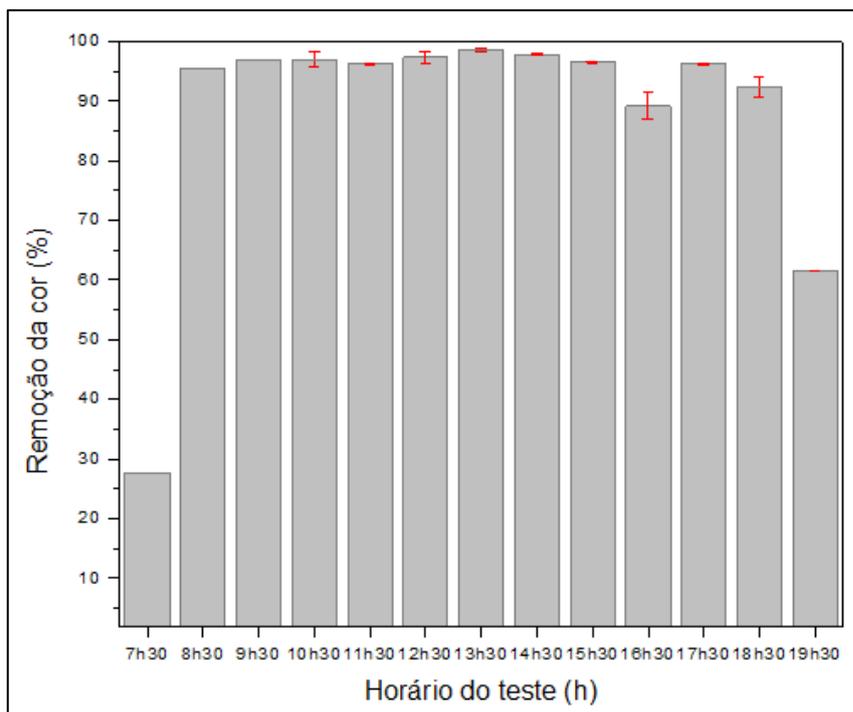


Figura 10 – Remoção da cor ao longo do dia

No Quadro 7 estão expostos os valores de concentração nos 13 ensaios. Excetuando o teste das 16h30, não foi detectada concentração de alumínio.

Amostra	Concentração (mg/L)
7h30	Não detectado
8h30	Não detectado
9h30	Não detectado
10h30	Não detectado
11h30	Não detectado
12h30	Não detectado
13h30	Não detectado
14h30	Não detectado
15h30	Não detectado
16h30	0,0512
17h30	Não detectado
18h30	Não detectado
19h30	Não detectado

Quadro 7 – Concentração de alumínio nos testes ao longo do dia

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O planejamento sequencial reduziu o número de ensaios realizados, tornando possível a análise de mais variáveis e a obtenção do valor que otimiza o processo de tratamento, sendo no caso deste estudo uma corrente de 2,75 A.

A técnica de eletrofloculação mostrou elevada eficiência, necessitando de um tempo curto, sendo esta uma grande vantagem frente a outros processos de tratamento, que demandam um tempo elevado. Mesmo com a corrente abaixo do estipulado, obteve-se uma eficiência superior a 90%. Sua viabilidade ambiental neste trabalho é comprovada pela utilização de energia limpa e a minimização do lançamento de xenobióticos aos corpos hídricos, como também o valor ínfimo de alumínio residual após o tratamento.

Para melhores resultados, o tratamento deve funcionar nos horários em que os resultados pretendidos são atingidos, neste caso, das 8h às 18h. Este valor é variável de acordo com a estação do ano e o clima no dia, sendo necessária a ponderação destes fatores a partir de estudos que as contemplem para uma determinação precisa.

Para trabalhos posteriores, sugere-se a utilização de um módulo contínuo que simule uma estação de tratamento em escala industrial. A apreciação da viabilidade econômica torna-se fundamental para que este processo de tratamento possa ser implantado, sendo isto sugerido.

REFERÊNCIAS

ABINEE – Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica. Propostas para inserção da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica brasileira. 174 f. jun, 2012.

ABIT – Associação Brasileira da Indústria têxtil e de confecção. Indústria Têxtil e de Confecção brasileira. Brasília, jun. 2013.

ALMEIDA, Ana Carolina Maganha de. **Estudo da biodegração de corantes azoicos por inóculo proveniente de biodigestor anaeróbio de alimentos**. 2008. 81 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas). Universidade Estadual de São Paulo, Rio Claro, 2008.

ALONSO, Rafael Herrero. **Sistema autônomo de comunicação sem fio em malha alimentado por energia solar fotovoltaica**. 2009. 99 f. Dissertação (Mestrado). Universidade De São Paulo, São Paulo, 2009.

ALVARENGA, Rodrigo Neder. **Tratamento de efluente têxtil através de processos redox e separação com membranas combinados**. 2009. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade de São Paulo, Lorena, 2009.

ANDRADE, Rui Miguel Sanches Linhares de. **Efeitos da exposição de peixe zebra, Danio rerio, a um efluente têxtil**. 2004. 74 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia). Universidade do Porto, Porto, 2004.

APHA. American Public Health Association. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21^a Ed. Washington – DC: APHA, 2005.

ARAUJO, Fabiana Valéria da Fonseca; YOKOYAMA, Lídia; TEIXEIRA, Luiz Alberto César. Remoção de cor em soluções de corantes reativos por oxidação com H₂O₂/UV. **Quim. Nova**. v. 29, n. 1, p. 11-14, 2006.

BEZERRA, Francisco Diniz. Análise retrospectiva e prospectiva do setor têxtil no Brasil e no Nordeste. Informe Técnico do ETENE. Fortaleza, ano VIII, n. 2, ago. 2014.

CAMARGO, José Carlos. **Medidas do potencial fotovoltaico na região das bacias dos rios Piracicaba e Capivari**. 2000. 108 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Porto, 2000.

CAMBOIM, Ricardo Augusto. **Técnica de eletroflotação aplicada na remoção de cores de efluentes têxteis**. 2010. 216 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

CANTELLI, Dirceu Luchesi. **Reuso de água de processo industrial: uma proposta para o setor têxtil**. 1999. 186 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

CERVELIN, Patricia Caroline. **Avaliação da remoção do corante comercial reativo azul 5g utilizando macrófita *Salvinia sp.*** 2010. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade do Oeste do Paraná, Toledo, 2010.

CERQUEIRA, Alexandre Andrade. **Aplicação da técnica de eletrofloculação no tratamento de efluentes têxteis**. 2006. 111 f. Dissertação (Mestrado). Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CHAVES, José Alberto Pestana. **Adsorção de corantes têxteis sobre quitosana: condições, modelagem e otimização**. 2009. 96 f. Dissertação (Doutorado em Química). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2009.

CHEQUER, Farah Maria Drumond. **Utilização de Micronúcleo na avaliação da toxicidade dos azo corantes Disperse Red 1, Disperse Orange 1 e Disperse Red 13**. 2008. 141 f. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2008.

CHUERUBIM, Maria Lígia. Análise da variação da radiação solar na superfície terrestre com base no cálculo da irradiância para diferentes latitudes. **Rev. Geogr. Acadêmica**. v. 6, n.1, p. 75-80, 2012.

COSTA, Ana Cristina Rodrigues da; ROCHA, Érico Rial Pinto da. Panorama da cadeia produtiva têxtil e de confecções e a questão da inovação. **BNDES Setorial**. Rio de Janeiro, n. 29, p. 159-202, mar. 2009.

CRESPILHO, Frank Nelson; SANTANA, Claudemir Gomes; REZENDE, Maria Olímpia Oliveira. Tratamento de efluente da indústria de processamento de coco utilizando eletroflotação. **Quim. Nova.** v. 27, n. 3, p. 387-392, 2004.

DROUICHE, N. Study on the treatment of photovoltaic wastewater using eletrocoagulation: fluoride removal with aluminium electrodes – characteristics of products. **Journal of Hazardous Materials.** v. 169, p. 65-69, 2009.

EPE- Empresa de Pesquisa Energética. Nota técnica EPE - Análise da inserção da geração solar na matriz energética brasileira. Rio de Janeiro, 2012.

FIGUEIREDO, Maria da.; SANTOS, Mateus Sales dos.; FERRARI, Lucila Ramos. I-068 – Estação de tratamento de efluentes das indústrias têxteis – otimização através da implantação de medidas de prevenção à poluição. In: XXVII CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL – ABES. 2012.

FORTINO, Patricia. **Pós-tratamento de efluente têxtil usando coagulação/floculação combinado com processos de separação por membranas.** 2012. 84 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

FÁVERE, Valfredo T.; RIELLA, Humberto G.; ROSA, Sirlei da. Cloreto de N-(2-Hidroxil) Propil-3-Trimetil amônio quitosana como adsorvente de corantes reativos em solução aquosa. **Quim. Nova.** v. 33, n. 7, p. 1476-1481, 2010.

GUARATINI, Cláudia C. I. ZANONI, Maria Valnice B. Corantes têxteis. **Quim. Nova.** v. 23, n. 1, 1999.

GOBBI, Lorena Cristina Abrahão. **Tratamento de água oleosa por eletrofloculação.** 2013. 120 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, 2013.

GOMES, Luana Marques. **Estudo da otimização do processo fenton para o descolorimento de corantes azo.** 2009. 106 f. Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

GORINI, Ana Paula Fontenelle; Panorama do setor têxtil no Brasil e no mundo: reestruturação e perspectivas. **BNDES Setorial.** Rio de Janeiro, n. 12, p. 17-50, set.

2000.

HEIMILLER, Donna. Brazil – Annual Direct Normal Solar Radiation. Disponível em <<http://en.openei.org/w/index.php?title=File:NREL-brazil-dir.pdf&page=1>>. Acesso em 24 ago. 2015.

HOLT, Peter Kevin. **Electroagulation unravelling and synthesing the mechanisms behind a water treatment process**. 2002. 229 f. Dissertação (PhD). University of Sidney, Australia, 2002.

KAMIDA, Hélio Mitoshi et al. Biodegradação de efluente têxtil por *Pleurotus sajor-caju*. **Quim. Nova**. v. 28, n. 4, p. 629-632, 2005.

KARUNYA, A. C.; ROSE, C. Studies on decolorisation of textile Azo Dye, Mordant Black 17 usin *Pseudomonas Aeruginosa* SBU7, isolated from textile effluent. In: GREEN TECHNOLOGY AND ENVIRONMENTAL CONSERVATION, **IEEE**. Chennai, p. 244-247, 2011.

KHANDEGAR, V. SAROHA, Anil K. Eletrocoagulation for the treatment of textile industry effluent – a review. **Journal Of Environmental Managment**. v. 128, p. 949-953, 2013.

KOLLING, Evandro M. et al. Análise operacional de um sistema fotovoltaico de bombeamento de água. **Eng. Agríc**. Jaboticabal, v. 24, n.3, p. 527-535, 2004.

KUNZ, Airton. **Remediação de efluente têxtil: combinação entre processo químico (ozônio) e biológico (*P. Chrysosporium*)**. 1999. 74 f. Tese (Doutorado). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

KUNZ, Airton et al. Novas Tendências no tratamento de efluentes têxteis. **Quim. Nova**. v. 25, n. 1, p. 78-82, 2002.

LOPES, José Henrique Oliveira. **Previsão de produção fotovoltaica a muito curto prazo usando análise e modelação de dinâmica de sombras**. 2010. 86 f. Dissertação (Mestrado). Universidade do Porto, Porto, 2010.

LUSTOSA, Glauco M. M. M.; NETO, José M. M.; SILVA, Carlos E. da. Degradação de efluente têxtil pela reação de fenton. **Revista Virtual de Química**. v. 5, n. 5, p.

973-980, set-out. 2013.

LUCENA, Guilherme Leocárdio. Remoção de corantes têxteis a partir de soluções aquosas por quitosana modificada com tioacetamida. **Revista Ambiente & Água**. v. 8, n. 1, 2013.

MATOS, T. T. S. et al. Aplicação de subprodutos industriais na remoção de corantes reativos têxteis. **Revista Virtual de Química**. v. 5, n. 5, p. 840-852, 2013.

MORAES, Cristina Martins de. **Estudo da difusão de corantes reativos em tecido de algodão**. 2010. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

NETO, Sidney de Aquino et al. Tratamento de resíduos de corante por eletrofloculação: um experimento para cursos de graduação em química. **Quim. Nova**. v. 34, n. 8, p. 1468-1471, 2011.

NUNES, José Alves. **Tratamento físico-químico de águas residuárias industriais**. 5. Ed. Sergipe: Info Graphcs Gráfica & Editora Ltda, 2008.

PASCHOAL, Fabiana Maria Monteiro; TREIMILIOSI-FILHO, Germano. Aplicação da tecnologia de eletrofloculação na recuperação do corante índigo blue a partir de efluentes industriais. **Quim. Nova**. v. 28, n. 5, p. 766-772, 2005.

PEREIRA, Enio Bueno et al. Atlas brasileiro de energia solar. São José dos Campos: INPE, 2006.

PINHEIRO, Alessandro de Sá. **Avaliação da toxicidade e genotoxicidade dos corantes azo reativos Remazol Preto B e Remazol Alaranjado 3R e da eficácia da radiação com feixe de elétrons na redução da cor e efeitos tóxicos**. 2011. 125 f. Dissertação (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

RODRIGUES, Heide Dayane Prates Rodrigues. **Potencial biossorbitivo e biodegradativo das células de "Saccharomyces cerevisiae" livres e imobilizadas em alginato de cálcio na remoção de corantes têxteis**. 2010. 79 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas). Universidade Estadual Paulista, Lorena, 2010.

RODRIGUES, Maria Isabel. **Planejamento de experimentos & otimização de processos**. Campinas, SP: Casa do Espírito Amigo Fraternidade Fé e Amor, 2014.

SANTOS, Juliane Barbosa; JABBOUR, Charbel José Chiappetta. Adoção da energia solar fotovoltaica em hospitais: revisando a literatura e algumas experiências internacionais. **Saúde Soc**. São Paulo, v. 22, n.3, p. 972-977, 2013.

SDC – Society of dyers and colourists. Disponível em <<http://www.colour-index.com/>>. Acesso em 10 de out. 2015.

WIENDL, Wolfgang Guilherme. **Processos eletrolíticos no tratamento de esgotos sanitários**. Rio de Janeiro: ABES, 1998.