

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CÂMPUS MEDIANEIRA**

**ANDRÉ HOFFMANN PINTO**

**CONTROLE BASEADO EM REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS,  
APLICADO A UM SISTEMA HÍBRIDO DE TRATAMENTO PARA  
REMOÇÃO DO CORANTE REATIVO AZUL 5G DE SOLUÇÃO  
SINTÉTICA.**

**DISSERTAÇÃO**

**MEDIANEIRA**

**2016**

**ANDRÉ HOFFMANN PINTO**

**CONTROLE BASEADO EM REDES NEURAS ARTIFICIAIS,  
APLICADO A UM SISTEMA HÍBRIDO DE TRATAMENTO PARA  
REMOÇÃO DO CORANTE REATIVO AZUL 5G DE SOLUÇÃO  
SINTÉTICA.**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Tecnologias Ambientais, do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Dr. Eduardo Eyng.

Co-orientador: Dr. Ilton José Baraldi.

**MEDIANEIRA**

**2016**

## Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

P659c Pinto, André Hoffmann

Controle baseado em redes neurais artificiais aplicado a um sistema híbrido de tratamento para remoção do corante reativo azul 5g de solução sintética / André Hoffmann Pinto – 2016.

67 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Eduardo Eyng

Coorientador: Ilton José Baraldi

Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais. Medianeira, 2016.

Inclui bibliografias.

1. Tecidos - Estampagem. 2. Resíduos industriais. 3. Meio Ambiente – Dissertações. I. Eyng, Eduardo, orient. II. Baraldi, Ilton José, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambientais. IV. Título.

CDD: 620.1

Biblioteca Câmpus Medianeira  
Marci Lucia Nicodem Fischborn 9/1219



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus  
Medianeira  
Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais



## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **CONTROLE BASEADO EM REDES NEURAIS ARTIFICIAIS, APLICADO A UM SISTEMA HÍBRIDO DE TRATAMENTO PARA REMOÇÃO DO CORANTE REATIVO AZUL 5G DE SOLUÇÃO SINTÉTICA.**

por

**ANDRÉ HOFFMANN PINTO**

Essa dissertação foi apresentada às catorze horas, do dia treze de abril de dois mil e dezesseis, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Tecnologias Ambientais, Linha de Pesquisa Tecnologias de Tratamento e Valorização de Resíduos, no Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Dr. Eduardo Eyng (Orientador – PPGTAMB)

---

Prof. Prof. Dr. Ilton José Baraldi (Coorientador – PPGTAMB)

---

Prof. Dr. Carlos Eduardo Borba (Membro externo – UNIOESTE)

---

Prof. Dr. Laercio Mantovani Frare (membro interno – PPGTAMB)

**A folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Programa.**

*Dedico este trabalho aos meus Pais, irmãos,  
filhas e esposa pelo apoio e infinita compreensão  
em todos os momentos de minha vida.*

## **AGRADECIMENTOS**

Não poderia ser diferente iniciar meus agradecimentos a DEUS. A vida tem ocupado meus dias com novos e gratiosos desafios. É graças a Deus que tenho ultrapassado todos eles com dedicação, amor e muito empenho sendo privilegiado da companhia de pessoas boas e amigas que estiveram presente em minha vida no decorrer desse trabalho.

Provavelmente não contemplarei todos os envolvidos nessa jornada e já de antemão peço perdão por esse relapso.

Aos meus pais agradeço pelo amor incondicional que recebo ao longo de minha vida, a educação que me deram onde a prioridade sempre foi o respeito e a honestidade acima de tudo.

As minhas queridas e amadas filhas Karoline, Karine, Adryelly e Dalila as quais são o combustível que necessito sempre para continuar a explorar novos horizontes em busca sempre de crescimento.

A minha amada esposa e parceira Maritssani, meu porto seguro a qual atribuo grande participação na conclusão desse trabalho, com sua paciência nos momentos difíceis de incertezas e ao tempo que tirei de nosso lar para dedicar aos estudos, pois sem ela não teria condições físicas e emocionais para a realização do mesmo.

A todos os professores do programa especialmente aos professores, Dr. Eduardo Eyng (orientador), Dr. Ilton José Baraldi (coorientador) e Dr. Laércio Mantovani Frare, pela grande ajuda e dedicação, além da amizade e confiança que depositaram em mim, acreditando que eu seria capaz de executar tal tarefa.

Aos colegas e amigos de jornada, meus agradecimentos pelas contribuições ao longo desse período.

Aos professores da banca examinadora pela atenção e contribuição ao aceitarem o convite para participarem do meu trabalho.

A empresa Texpal Química LTDA. por fornecer gratuitamente o corante reativo azul 5G para a pesquisa.

Agradeço à CAPES pelo apoio financeiro.

Por fim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para que essa pesquisa fosse concluída o meu MUITO OBRIGADO!

## RESUMO

PINTO, André Hoffmann. **Controle baseado em redes neurais artificiais, aplicado a um sistema híbrido de tratamento para remoção do corante reativo azul 5g de solução sintética.** 2016. 66 folhas. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira-PR, 2016.

O complexo têxtil abrange uma das indústrias mais tradicionais da economia mundial e de grande importância na vida das pessoas, seus processos principalmente nas etapas de tingimento e acabamento, requerem um grande volume de água. Corantes são largamente utilizados e os efluentes gerados tornam-se altamente contaminadores de corpos receptores. Várias opções de tratamentos vêm sendo estudadas. O processo eletrolítico conhecido como eletrofloculação vem sendo visto como um método promissor. Outro método de tratamento muito promissor é a coagulação orgânica a qual possui vantagens em relação à coagulação química como a baixa toxicidade e biodegradabilidade. A eletrofloculação combinada com a coagulação orgânica torna-se um tratamento híbrido vantajoso desde que controlado. Neste contexto, o objetivo desse trabalho foi implementar um controle baseado em Redes Neurais Artificiais (RNA's) em um sistema híbrido de tratamento (eletrofloculação e coagulação natural) para remoção do Corante Reativo Azul 5G de uma solução sintética. A escolha do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) deu-se por abranger todo o espaço experimental utilizando um número menor de ensaios. A partir desse delineamento foram executados 17 ensaios para análise estatística a qual validou o modelo matemático gerado. Com base nesse modelo foram gerados os bancos de dados de treinamento e validação da RNA que foi implementada no software Matlab. Testes empíricos definiram a arquitetura da RNA baseado no desempenho do treinamento com a configuração 3 camadas sendo 2 ocultas com 9 neurônios na primeira, 12 na segunda e 2 na camada de saída. O controle foi do tipo *feedforward*, mas devido ao ferro residual decorrente do tratamento necessitar de 24 horas de decantação para posterior leitura a ação *feedback* foi fornecida pelo modelo matemático preditivo. Os ensaios de controle comprovaram a eficiência do controlador para testes com perturbações negativas na concentração de corante na entrada do tratamento garantindo um valor de saída de concentração sempre abaixo do valor de set point estabelecido. Para perturbações positivas o controle não foi significativo o que se pode atribuir ao erro incluso do modelo matemático podendo ainda estar relacionado à variabilidade da qualidade das sementes de *Moringa Oleífera* Lam.

**Palavras chave:** Eletrofloculação. Coagulação orgânica. Controle de processos. Redes neurais artificiais.

## ABSTRACT

PINTO, André Hoffmann. **Control based on artificial neural networks applied to a hybrid treatment system for removal of the blue reactive dye 5g synthetic solution.** 2016. 66 folhas. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira-PR, 2016.

The textile complex covers one of the most traditional industries of the world economy and of great importance in the lives of people, processes mainly in the steps of dyeing and finishing, they require a large volume of water. Colorants are widely used and effluents become highly contaminants receptor bodies. Several treatment options are being studied. The electrolytic process known as electroflocculation has been seen as a promising method. Another very promising method of treatment is the organic coagulation which has advantages over chemical coagulation such as low toxicity and biodegradability. The electro flocculation combined with the organic coagulating becomes an advantageous hybrid treatment since controlled. In this context, the objective was to implement a control based on Artificial Neural Networks (ANN) in a hybrid treatment system (electro flocculation and natural coagulation) to remove the dye Reactive Blue 5G of a synthetic solution. The choice of Central Composite Rotational Design (CCRD) was given to cover the entire experimental space using a smaller number of trials. From this design were performed 17 tests for statistical analysis which validated the mathematical model generated. Based on this model were generated banks of training and validation of ANN data that was implemented in Matlab software. Empirical tests defined the ANN architecture based on training performance with setting 3 layers and 2 hidden with 9 neurons in the first, 12 in the second and two in the output layer. The control was the feedforward type, but due to residual iron resulting from treatment requires 24 hours of decanting for later reading the feedback action was provided by the predictive mathematical model. Control assays confirmed the efficiency of the controller to tests with negative perturbations in dye concentration at the entrance of the treatment concentration of ensuring output value always below the set setpoint value. For positive disturbances control was not significant which can be attributed to the mathematical model included error may also be related to the variability of the quality of the seeds of *Moringa oleifera* Lam.

**Keywords:** Electroflocculation. Organic coagulation. Dye. Process control. Artificial neural networks.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Representação da molécula Reativo azul 5G .....   | 17 |
| Figura 2 - Estrutura tridimensional da molécula do corante. ....   | 17 |
| Figura 3 - Representação esquemática do módulo experimental de tratamento híbrido em fluxo de escoamento contínuo.....               | 31 |
| Figura 4- Fluxograma do sistema de tratamento híbrido / controle .....   | 38 |
| Figura 5 - Software gerador dos dados para construção do banco de treinamento. .   | 40 |
| Figura 6 - Arquitetura de uma RNA do tipo direta (Feedforward) .....   | 41 |
| Figura 7 - Gráfico de resposta para curva de calibração da bomba peristáltica.....   | 45 |
| Figura 8 - Resultados de ensaios da matriz do delineamento experimental. ....  | 46 |
| Figura 9 - Gráfico de dispersão entre os valores de concentração de saída do corante preditos pelo modelo e valores observados ..... | 48 |
| Figura 10 - Diagrama de Pareto para concentração de saída, com 95 % de confiança.....  | 50 |
| Figura 11 - Ensaio 1 e Ensaio 2 , resultados dos pontos experimentais. ....  | 55 |
| Figura 12 - Ensaio 3 e Ensaio 4, resultados dos pontos experimentais. ....   | 56 |
| Figura 13- Ensaio 5 e ensaio 6, resultados dos pontos experimentais. ....  | 57 |
| Figura 14 - Ensaio 7 e ensaio 8, resultado dos pontos experimentais. ....  | 59 |
| Figura 15 - Ensaio 9 e ensaio 10, resultados dos pontos experimentais. ....  | 60 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Valores reais correspondentes aos codificados (variáveis em estudo) ....                            | 32 |
| Tabela 2 - Matriz experimental, valores reais correspondentes aos codificados.....                             | 33 |
| Tabela 3 - Variáveis de Entrada e Saída do Controlador RNA.....  | 35 |
| Tabela 4 - Variáveis de Entrada e Saída do Controlador RNA (valores codificados e reais). ....                 | 44 |
| Tabela 5 - Valores de concentração e vazão da bomba peristáltica em função da tensão de alimentação. ....      | 45 |
| Tabela 6 - Matriz do delineamento experimental, valores codificados e reais. ....                              | 47 |
| Tabela 7 - Coeficientes de regressão.....  | 48 |
| Tabela 8 - Análise de variância para a resposta concentração de cor ( confiança 95%).....                      | 50 |
| Tabela 9 - Valores das variáveis para os ensaios de validação. ....  | 51 |
| Tabela 10 - Resultados dos ensaios de validação comparativos com os dados do modelo estatístico para CS15..... | 51 |
| Tabela 11 - Testes para escolha da arquitetura da RNA. ....  | 53 |
| Tabela 12 - Condição inicial para os ensaios de controle (valores codificados e reais). ....                   | 54 |
| Tabela 13 - Valores das médias da concentração do corante na saída do módulo de tratamento. ....               | 55 |

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....  | <b>13</b> |
| <b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....   | <b>15</b> |
| 2.1 INDÚSTRIA TÊXTIL.....  | 15        |
| 2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS CORANTES .....   | 15        |
| 2.3 CORANTE REATIVO AZUL 5G .....  | 17        |
| 2.4 TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO APLICADAS AOS EFLUENTES<br>TÊXTEIS.....              | 18        |
| 2.5 ELETROFLOCULAÇÃO.....  | 19        |
| 2.6 COAGULAÇÃO NATURAL .....   | 19        |
| 2.7 CONTROLE DE PROCESSOS E AS REDES NEURAIS.....                                  | 21        |
| 2.7.1.1 Treinamento da RNA.....  | 24        |
| 2.7.1.2 Algoritmo da retropropagação - ( <i>backpropagation</i> ).....             | 25        |
| 3.1 OBJETIVO GERAL .....   | 28        |
| 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....  | 28        |
| <b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....   | <b>29</b> |
| 4.1 PREPARO DA SOLUÇÃO DE CORANTE REATIVO AZUL 5G .....                            | 29        |
| 4.2 PREPARO DO EXTRATO DE MORINGA OLEÍFERA.....                                    | 29        |
| 4.2.1 Calibração da bomba peristáltica dosadora de coagulante. ....                | 29        |
| 4.3 MÓDULO DE TRATAMENTO .....   | 30        |
| 4.4 DETERMINAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS MANIPULADAS E<br>CONTROLADA .....   | 31        |
| 4.4.1 Delineamento experimental.....   | 31        |
| 4.4.2 Codificação dos valores reais da matriz experimental. ....                   | 32        |
| 4.4.3 Determinação da concentração de saída do corante reativo azul 5G. ....       | 33        |
| 4.4.4 Cálculo de remoção percentual (REM%) .....                                   | 34        |
| 4.4.5 Cálculo de concentração de saída (CS):.....                                  | 34        |
| 4.4.6 Procedimentos dos ensaios .....  | 34        |
| 4.5 ESTRATÉGIA DE CONTROLE.....  | 35        |
| 4.5.1 Variáveis do sistema de controle.....  | 36        |
| 4.6.1 Bancos de dados de treinamento e validação da RNA .....                      | 39        |
| 4.6.2 Detalhamento da RNA.....   | 41        |
| 4.6.2.1 Software utilizado .....   | 41        |
| 4.6.2.2 Tipo de RNA utilizada.....   | 41        |
| 4.6.2.3 Definição da arquitetura da RNA.....                                       | 41        |
| 4.7 APLICAÇÃO DO CONTROLE RNA NO SISTEMA HÍBRIDO DE TRATAMENTO<br>DE EFLUENTE..... | 42        |
| <b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....  | <b>45</b> |
| 5.1 CURVA DE CALIBRAÇÃO DA BOMBA PERISTÁLTICA.....                                 | 45        |

|   |           |
|---|-----------|
| 5.2 ENSAIOS PARA A MATRIZ DO DELINEAMENTO EXPERIMENTAL.....   | 46        |
| 5.2.1 Análise estatística. ....                               | 48        |
| 5.2.2 Ensaios de validação.....                               | 50        |
| 5.3 IMPLEMENTAÇÃO E TREINAMENTO DA RNA .....                  | 52        |
| 5.3.1 Bancos de dados de treinamento e validação da RNA ..... | 52        |
| 5.3.2 Testes para escolha da arquitetura da RNA.....          | 52        |
| 5.4 ENSAIOS DE CONTROLE.....                                  | 54        |
| 5.4.1 Definição da condição inicial .....                     | 54        |
| 5.4.2 Resultados dos ensaios de controle.....                 | 54        |
| <b>6 CONCLUSÕES .....</b>                                     | <b>61</b> |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                       | <b>63</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

O complexo têxtil abrange uma das indústrias mais tradicionais da economia mundial. Considera-se que a efetiva implementação da atividade ocorreu entre a segunda metade do século XIX e as primeiras décadas do século XX, beneficiada por uma série de eventos externos, como a Guerra Civil Americana e a Primeira Guerra Mundial.

Para o Ministério do Desenvolvimento de Indústrias e Comércio, o setor têxtil, inclusive confecções e vestuário, tem grande importância na economia brasileira, por ser um forte gerador de empregos, com grande volume de produção e exportações crescentes.

De acordo com Kroeff e Teixeira (2012), no ano de 1957 foi fundada a Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção (ABIT) e desde então vem representando e firmando a importância desse segmento econômico para o país. Os dados gerais do setor referentes ao ano de 2010 e atualizados em 2011, indicam que há 30 mil empresas em atividade no Brasil, que geraram um faturamento de US\$ 60,5 bilhões para a cadeia têxtil e de confecção. Esses números são alcançados com o trabalho dos 1,7 milhões de empregados, o qual representa uma parte significativa dos empregos formais no Brasil.

Com esse volume considerável de produção e crescimento do setor é inevitável que a atividade gere um impacto significativo ao meio sócio - ambiental em que está inserida, em particular nos recursos hídricos.

De acordo com Aksu (2005) os efluentes gerados pela indústria têxtil, em sua maioria, apresentam elevadas demandas química e bioquímica de oxigênio, grande quantidade de sólidos suspensos e coloração bastante acentuada, constituindo um dos efluentes mais complexos e problemáticos a serem tratados.

Para Dallago et al. (2005) alguns dos tipos de tratamentos empregados para remoção do corante envolve processos físicos ou químicos, incluindo coagulação, floculação, oxidação avançada  $H_2O_2/UV$ , ozonização, troca iônica, irradiação. Os processos oxidativos, como o tratamento com ozônio, fotocatalise heterogênea e via sistema Fenton, baseiam-se no emprego de agentes oxidantes destinados a acelerar a degradação destes compostos. No entanto, estes processos considerados destrutivos apresentam vários inconvenientes inerentes às características dos efluentes têxteis, especialmente a dificuldade de remoção, no

tratamento da cor intensa causada pela presença de corantes oriundos dos processos de tingimento e o alto custo.

Neste contexto, Ciardelli e Ranieri (2001) mostraram que a eletrofloculação pode ser um método promissor no processo de reciclagem da água, uma vez que combina a oxidação parcial do poluente, por via eletrolítica, com a precipitação físico-química ou eletroquímica do lodo.

Em complemento Yuksel et al. (2011) realizaram estudo comparativo da viabilidade técnico - econômica entre a técnica de coagulação/floculação convencional e a eletrofloculação constatando que o custo com a energia elétrica, torna-se compensado pela diminuição do lodo, assim diminuindo o custo do processo.

Uma técnica complementar para um tratamento “mais limpo” é a adição de coagulantes naturais, neste caso específico usar-se-á um a base de *Moringa oleífera Lam.*

Para Nishi et al. (2011) o uso de coagulante a base de Moringa torna-se promissor devido às proteínas catiônicas de baixo peso molecular presentes nesse material, que interagem com o material orgânico do efluente destruindo a estabilidade das estruturas coloidais facilitando a remoção das mesmas através da sedimentação. Sendo assim a eletrofloculação combinada com um coagulante natural pode diminuir ainda mais a geração de lodo, tornando-o ainda mais atrativo economicamente e ambientalmente.

De acordo com Eyng (2006) como este sistema de tratamento se caracteriza por relações não-lineares entre suas variáveis, as Redes Neurais Artificiais (RNAs) superam o controle Proporcional Integral Derivativo (PID) e tornam-se uma opção atrativa, pois possuem características não lineares inerentes ao mapeamento entre as camadas de RNAs *feedforward* tornando-se uma poderosa ferramenta para controle visto a atual capacidade de processamento computacional.

A sustentabilidade é pauta constante nesse trabalho: A otimização dos recursos energéticos, o estudo sobre a eletrofloculação assistida pelas propriedades coagulantes do extrato da *moringa oleífera* e o controle de processos via RNA servirão para assegurar que as perdas serão minimizadas e a eficiência de tratamento garantida. Por isso faz-se necessário um controle no processo tendo em vista minimizar as perdas decorrentes das oscilações nas cargas de poluição afluente.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 INDÚSTRIA TÊXTIL

De acordo com Lambrecht (2007) a indústria têxtil caracteriza-se pela utilização de grandes volumes de água, corantes reativos e produtos químicos ao longo de uma complexa cadeia produtiva.

Estes corantes reativos contribuem com cerca de 20 a 30% do mercado de corante total e mostram a mais pobre taxa de fixação, gerando um efluente têxtil de cor forte, além de natureza não biodegradável (Al-Degs et al. 2008; Tanyildizi, 2011).

A principal preocupação das indústrias têxteis refere-se à remoção de corantes do efluente gerado no processo produtivo, devido, principalmente, a sua baixa degradabilidade (CERQUEIRA et al., 2009).

Segundo Kunz et al (2002) a poluição dos corpos d'água por corantes têxteis provoca, além da poluição visual, alterações em ciclos biológicos afetando principalmente processos de fotossíntese, interferindo diretamente na biota aquática podendo também interferir na solubilidade dos gases no corpo receptor, e de acordo com Guaratini e Zanoni (2000), dependendo das condições do meio, se decompõem em aminas aromáticas potencialmente carcinogênicas.

O processo produtivo das indústrias têxteis sofre constante mudança no corante utilizado, o que por consequência modifica as características químicas e físicas do efluente gerado, alterando a concentração da demanda química de oxigênio (DQO) e pH (CERQUEIRA et al., 2009).

### 2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS CORANTES

De acordo com Guaratini e Zanoni (2000) a classificação dos corantes pode ser feita de acordo com a sua estrutura química ou de acordo com a fixação do corante a fibra têxtil.

Bastian (2009) classifica os corantes em:

**A) Corantes à tina:** Os corantes à tina, com poucas exceções, são subdivididos em dois grupos: os indigóides e os antraquinônicos. Possuem, como característica química, a presença de um grupo cetônico e são essencialmente insolúveis em água.

**B) Corantes reativos:** Os corantes reativos se caracterizam por terem pelo menos um grupo cromóforo e um grupo reativo, sendo solúveis em água. O grupo

cromóforo é aquele que é responsável pela cor do produto e o grupo reativo é a parte química do corante que reage com os grupamentos hidroxílicos (OH) da celulose. Daí estes corantes se chamarem corantes reativos.

**C) Corantes dispersos ou plastosolúveis:** Os corantes dispersos são definidos como substâncias insolúveis em água, de caráter não iônico, que possuem afinidade com fibras hidrofóbicas.

**D) Corantes diretos:** São corantes que foram originalmente concebidos para tingir algodão. Formalmente, são definidos como corantes aniônicos, com grande afinidade para a celulose. Os corantes diretos apresentam a maneira mais simples de colorir materiais celulósicos, uma vez que são aplicados a partir de um banho neutro ou levemente alcalino, próximo ou no ponto de ebulição, no qual são aplicado cloreto ou sulfato de sódio em quantidade e intervalos de tempo apropriados.

**E) Corantes ácidos:** São corantes aniônicos, bastante solúveis em água, cuja aplicação se dá em fibras nitrogenadas como a lã, seda, couro e algumas fibras acrílicas modificadas. Possui uma ampla gama de coloração e, também, as mais diversas propriedades com relação ao tipo de tingimento e solidez. Alguns corantes ácidos são metalizados e absolutamente indispensáveis para certas aplicações na indústria têxtil (alta solidez). A estabilidade desses complexos é tal que esses corantes permanecem estáveis durante o processo de tingimento, mesmo sob severas condições de uso, não liberando o metal de sua estrutura mesmo que haja flutuações dramáticas de pH e temperatura.

**F) Corantes catiônicos (básicos modificados):** São corantes solúveis em água que produzem soluções coloridas catiônicas devido à presença de grupamento amino (NH<sub>2</sub>). Suas aplicações são direcionadas principalmente para as fibras acrílicas, e em casos especiais para a lã, seda e acetato de celulose.

**G) Corantes ao enxofre (sulfurosos):** É uma classe de corantes que se caracteriza por compostos macromoleculares com pontes dissulfídicas. São produtos insolúveis em água e sua aplicação assemelha-se à dos corantes à tina, devendo ser inicialmente reduzidos a uma forma solúvel, quando passam a ter afinidade com fibras celulósicas. Após o tingimento, são trazidos à sua forma original, insolúvel por oxidação. Possuem uma boa solidez à luz e à lavagem, mas resistem muito pouco ao cloro.

**H) Corantes naturais:** São corantes obtidos a partir de substâncias vegetais ou animais, com pouco ou nenhum processamento químico, são principalmente, do tipo



mordente, embora existam alguns do tipo à tina, solventes, pigmentos, diretos e ácidos. Não existem corantes naturais dispersos, azóicos ou ao enxofre. A toxicologia de corantes sintéticos não difere fundamentalmente dos corantes naturais, quando avaliados sob os mesmos critérios.

### 2.3 CORANTE REATIVO AZUL 5G

De acordo com Canevesi et al (2009) o corante reativo azul 5G é um dos principais corantes utilizados pelas lavanderias industriais. Sua estrutura molecular é formada pelos grupos reativos vinilsulfona e clorotriazina. A estrutura molecular do corante se encontra patenteada até 2018 pela *Chemical Abstracts Society* (CAS: 147826-71-9) é também chamado de azul reativo 203.

Na Figura 1 é demonstrada a representação molecular do corante Reativo azul 5 G.

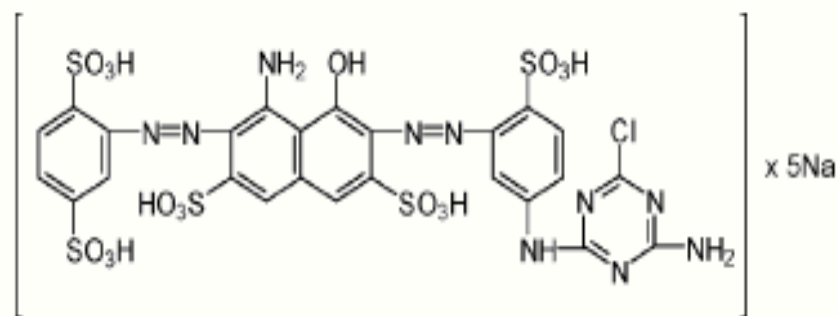


Figura 1 - Representação da molécula Reativo azul 5G (KOPRIVANAC et al., 2005).

Na figura 2 é demonstrada a estrutura tridimensional da molécula do corante Reativo azul 5 G.

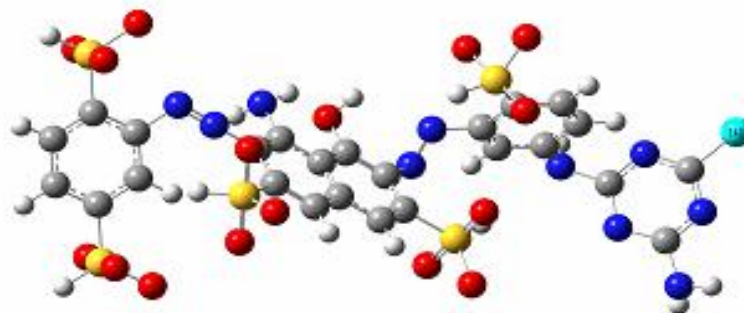


Figura 2 - Estrutura tridimensional da molécula do corante (LAMBRECHT, 2007).

## 2.4 TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO APLICADAS AOS EFLUENTES TÊXTEIS

O tingimento de materiais têxteis não é um processo eficiente, tanto que os corantes utilizados para tingir tecidos permanecem no meio de tingimento porque a composição exata do meio varia. Como consequência, este meio de tingimento residual é normalmente descartado, resultando na liberação de grandes quantidades de águas residuais contaminadas com corante para o meio ambiente.

Para Guaratini e Zanoni (2000) o efluente industrial colorido pode causar danos consideráveis ao ecossistema, por exemplo, devido aos seus efeitos sobre a atividade fotossintética na vida aquática devido à redução da penetração da luz.

De acordo com os autores Lora (2000) e Braile (1979), as técnicas de tratamento convencionais aplicadas ao efluente têxtil para remoção de corante incluem métodos físicos, físico-químicos (coagulação / floculação), separação por membranas (ultrafiltração, osmose reversa), e eliminação por adsorção em carvão ativado. Tais métodos são dispendiosos e, também resultam na transferência de fase de poluentes. Os métodos microbiológicos atuais não são uma solução eficiente para o tratamento dessas águas residuais, devido às estruturas complexas de alguns corantes que os tornam resistentes à biodegradação.

Para Gomes et al (2009) a oxidação com peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) é comumente utilizada porque subprodutos limpos são gerados, em comparação com outros agentes, tais como o cloro ou lixívia convencional (isto é, hipoclorito). Peróxido de Hidrogênio é conhecido por ser ineficaz com antraquinona ou corantes azo, que são amplamente utilizados na indústria têxtil e tem um impacto ambiental significativo. Além disso, a reação de descoloração com  $H_2O_2$  é lenta.

De acordo com Salgado et al (2009) os métodos de descoloração oxidativos mais rápidos utilizam os processos de oxidação avançada (POA), que, tipicamente, usam ozônio ( $O_3$ ), o ozônio ativado com luz ultravioleta (UV), o peróxido de hidrogênio ativado por radiação ultravioleta (UV/ $H_2O_2$ ), ou “ativadores” que geram agentes de oxidação fortes tais como os peróxidos. Tais processos podem ser inviáveis financeiramente em larga escala, por exemplo, devido ao custo dos ativadores químicos ou da energia ultravioleta.

## 2.5 ELETROFLOCULAÇÃO

Para Giordano (1999) a eletrofloculação é a passagem da corrente elétrica pelo efluente em escoamento pela calha eletrolítica, sendo responsável por diversas reações que ocorrem no meio, a oxidação dos compostos, a substituição iônica entre os eletrólitos inorgânicos e os sais orgânicos, com a consequente redução da concentração da matéria orgânica dissolvida na solução ocorre a desestabilização das partículas coloidais.

Segundo Aquino Neto et al. (2011) este processo eletroquímico ocorre em três etapas. Na primeira o coagulante é gerado *in situ* pela oxidação de um ânodo metálico de sacrifício, logo após os respectivos cátions são gerados na fase anódica e reagem com moléculas de água para formação dos hidróxidos e poli-hidróxidos. Na segunda etapa, os hidróxidos que são formados adsorvem-se em partículas coloidais originando os flóculos e ocorre o transporte dessas espécies que entram em contato com as impurezas. Na terceira etapa ocorre a flotação, em consequência da formação das microbolhas de oxigênio no ânodo e hidrogênio no cátodo, geradas da eletrólise da água, que carregarão o material floculado para a superfície.

Durante a eletrólise, o eletrodo positivo sofre reações anódicas, enquanto as reações catódicas ocorrem no eletrodo negativo. Os íons liberados neutralizam as cargas das partículas e, assim, iniciam a coagulação (CERQUEIRA; MARQUES 2011).

## 2.6 COAGULAÇÃO NATURAL

De acordo com Libânio (2010) o sulfato de alumínio destaca-se como o coagulante mais utilizado no Brasil no tratamento de água de abastecimento público, em razão da alta eficiência na remoção de sólidos em suspensão e pelo relativamente baixo custo de sua aquisição. Um problema relacionado ao uso do sulfato de alumínio é o lodo gerado, após o sal ser solubilizado, o cátion  $Al^{3+}$  será adsorvido no material sólido em suspensão, proporcionando em razão de um fenômeno físico-químico, a formação de flocos que se sedimentaram no tanque, proporcionando a clarificação da água em tratamento. O material sedimentado é, por esta razão, muito rico em alumínio, o que dificulta a disposição final deste material no meio ambiente.

De acordo com Lo Monaco et al (2010) elevadas concentrações de alumínio do meio podem ocasionar problemas à saúde humana, inclusive acelerando o processo degenerativo do mal de Alzheimer.

A utilização de coagulantes naturais, de baixo custo financeiro, pode proporcionar atenuações nos problemas ligados ao consumo da água não potável e despejos de águas residuárias, sem tratamento, em corpos hídricos receptores. Além disso, de acordo com Cardoso et al (2008) os coagulantes/floculantes naturais têm demonstrado vantagens em relação aos químicos, especificamente em relação à biodegradabilidade, baixa toxicidade e baixo índice de produção de lodos residuais.

Para Muyibi e Evison (1995) os coagulantes naturais apresentam-se como uma alternativa viável, destacando-se a semente da *Moringa oleífera* Lam., já que vários estudos laboratoriais desta última com águas brutas com elevada turbidez têm mostrado que suas sementes possuem propriedades coagulantes efetivas e que elas não são tóxicas a humanos e animais sendo bastante eficientes não somente na remoção de turbidez e microrganismos, como também no condicionamento do lodo.

Segundo Ndabigengesere e Narasiah (1996) as sementes de *Moringa oleífera* Lam. são uma alternativa viável de agente coagulante em substituição aos sais de alumínio, que são utilizados no tratamento de água em todo o mundo. Comparada com o alumínio, as sementes de *Moringa* não alteram significativamente o pH e a alcalinidade da água após o tratamento e não causam problemas de corrosão.

Os estudos sobre a *Moringa oleífera* Lam. têm evoluído em varias áreas dando uma ênfase na área ambiental onde sua aplicabilidade devido suas propriedades coagulante e de remoção bacteriológicas motivou vários trabalhos acadêmicos podendo citar, Muniz et al. (2015) que comprovou a eficiência de remoção da turbidez de água para abastecimento analisando ainda a diferença dessa eficiência para sementes com casca e sem casca.

Neste contexto, Gonçalves Junior et al.(2013) estudaram a aplicabilidade da torta de *Moringa oleífera* Lam. como adsorvente para remoção de metais pesados de águas e concluíram que o adsorvente foi eficaz na remediação de soluções contendo íons de Cd, Pb e Cr e, assim, sendo viável a utilização desse adsorvente

como material alternativo sustentável, pois apresenta baixo custo, não necessitando de tratamento prévio e se tratando de um coproduto.

Em um estudo feito por Arantes et al. (2012) sobre o processamento da semente de *Moringa Oleífera* Lam. utilizando diferentes equipamentos de moagem da semente, comprovaram que a maneira mais eficiente para obtenção do extrato de moringa para coagulação foi o método utilizando o pilão manual e com máquina de moer manual, sobrepondo os meios de mixer's elétricos e liquidificadores.

## 2.7 CONTROLE DE PROCESSOS E AS REDES NEURAIIS

A sustentabilidade é fator importante para o desenvolvimento de controladores de processos, na busca de um sistema de controle compatível com a complexidade da maioria dos processos industriais, várias pesquisas têm sido elaboradas de acordo com o desenvolvimento de novas ferramentas e tecnologias.

Os processos industriais dependem de diversas variáveis que necessitam serem controladas, como temperatura, vazão, pressão, etc.

Alves (2010) descreve que no início do século XX, a operação dos processos era feita de forma manual. A partir da metade do século, os sistemas de controle foram automatizados de uma forma empírica, os quais foram aprimorados a partir da elaboração da teoria de controle e análise dinâmica, a partir da década de 60. Nas duas décadas seguintes, foi introduzido o controle na forma digital, a partir do desenvolvimento de algoritmos, e no final do século, o foco era a aplicação de técnicas de inteligência artificial ao controle.

Para Alves (2010) a teoria de controle moderno está baseada na análise do domínio do tempo em sistemas de equações diferenciais.

Segundo Nise (2012) “um sistema de controle consiste em *subsistemas* e *processos* (ou *plantas*) construídos com o objetivo de se obter uma *saída* desejada com um *desempenho* desejado, dada uma *entrada* específica”, sendo que o desempenho do controlador pode ser medido através de duas formas principais: a resposta transitória e o erro em regime permanente.

Para se definir a estratégia do controle e posterior construção de uma Rede Neural Artificial é necessário que se observe alguns conceitos para a definição do modelo a ser utilizado (direto / inverso).

Para Eyng (2006), o modelo inverso difere do direto na variável predita pela rede. Neste contexto, descreve que a utilização do modelo direto implica na necessidade de um processo de otimização para a obtenção da ação de controle, desta maneira, a rede neural prevê a variável controlada para um dado valor da variável manipulada. Ao receber o valor predito da variável controlada, o otimizador avalia o erro propiciado por esta ação de controle, e caso este erro seja superior a um valor pré-determinado, a ação é descartada e uma nova é calculada. Este procedimento é repetido até que o erro gerado pela ação de controle seja tão pequeno quanto o desejável. O modelo inverso, ao contrário do direto, não necessita de um processo de otimização para definir a ação de controle, o que lhe confere a vantagem de exigir menor esforço computacional. Deste modo, a ação de controle é determinada pela própria rede neural, conferindo assim, uma maior agilidade ao sistema de controle, fator importante na implementação *on line* do controlador.

Aplicações de controle e modelagem na área ambiental vêm ganhando notório espaço visto a necessidade de cada vez mais aperfeiçoar os processos em busca de melhores resultados, tanto em eficiência como economia de insumos e utilidades, evitando assim o desperdício, a exemplo disso, Bousfield et al. (2011) desenvolveram um estudo como objetivo principal o uso de uma Rede Neural Artificial para prever a quantidade de lodo gerado pela Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) de uma Indústria Têxtil da cidade de Joinville - SC. O estudo obteve êxito nos testes que foram baseados no resultado do erro quadrático médio e a regressão linear obtidos de predição da rede. Em seu trabalho ficou evidente que o uso de técnicas alternativas como a do aprendizado conexionista, neste caso as RNA's para modelagem de estações de tratamento de efluente, foram adequados tendo grande relevância para aprimorar as técnicas de modelagem de processos.

Dias et al. (2013) desenvolveram um trabalho com o objetivo de estudar a degradação do corante remazol preto-B utilizando o processo de oxidação avançada foto-Fenton com radiação UV-A, visando o reuso de água e redução dos custos de produção. Foi desenvolvido um modelo de redes neurais artificiais (RNA) com a utilização do software Statistica 8.0 que possibilitou a modelagem e a otimização do processo, comprovando o bom desempenho do modelo empírico de redes neurais artificiais para a predição e otimização do processo foto-Fenton.

### 2.7.1 Redes Neurais Artificiais (RNA's)

O cérebro humano é considerado o mais fascinante processador baseado em carbono existente, sendo composto por aproximadamente 10 bilhões neurônios. Todas as funções e movimentos do organismo estão relacionados ao funcionamento destas pequenas células. Os neurônios estão conectados uns aos outros através de sinapses, e juntos formam uma grande rede, chamada rede neural (BRAGA, 2000).

Para Braga (2010) a ideia principal de desenvolver a redes neurais artificiais era de simular sistemas naturais utilizando-se de estruturas análogas redes neurais biológicas. A complexidade com que os neurônios interagem através das sinapses é responsável pela característica atribuída à inteligência.

De acordo com Kovács (2006) o primeiro trabalho sobre RNA aconteceu na década de 40, pelo neurofisiologista *McCulloch* e o matemático *Pitts*, sendo um trabalho pioneiro considerado ingênuo, pois sustentava a premissa que redes relativamente simples com alguns neurônios implementariam máquinas booleanas no sistema nervoso. Dando sequência em seus estudos, *McCulloch* e *Pitts* publicaram o artigo “*A Logical Calculus of the ideas Immanent in Nervous Activity*” em 1943, onde estabeleceram uma analogia entre os processos de comunicação das células nervosas vivas e os processos de comunicação elétrica, percebendo que em um dado instante temporal o neurônio está ativo e hora inativo, com isso propuseram a criação de neurônios formais.

Em 1947, eles conseguiram demonstrar que era possível conectar neurônios formais e criar uma rede capaz de executar funções complexas.

No final da década de 50, *Frank Rosenblatt* prosseguiu com as ideias de *McCulloch* e criou uma rede de múltiplos neurônios do tipo *discriminadores lineares* chamando de rede de *perceptron*, que consiste em neurônios dispostos em várias camadas. Os neurônios que recebem diretamente as entradas da rede constituem o que se chama de camada de entrada, os neurônios que recebem as saídas dessa camada como sua entrada constituem a segunda camada (camadas ocultas) e assim sucessivamente até a última camada que constitui a camada de saída (KOVÁCS, 2006).

A rede *perceptron* teve sua credibilidade abalada em 1969 com a publicação do livro “*perceptron*”, por *Marvin Minsky* e *Seymour Papert*, os quais fizeram duras críticas às redes neurais argumentando que os perceptrons possuíam muitas

limitações em suas aplicações, não possuíam capacidade de aprendizado e não possuíam sustentação matemática. Ainda provaram formalmente que uma rede formada de uma única camada só era capaz de resolver problemas de associação de padrões linearmente separáveis. Com isso os avanços em relação às RNA's foram deixados de lado por décadas.

Em 1986 a incapacidade da RNA's de resolver problemas não lineares foi resolvida por *RUMELHART et al.*(1986) e sua solução foi a “*Generalized Delta Rule*” conhecida como “*Backpropagation Error Correction Algorithm*”, onde as funções de ativação foram substituídas por funções contínuas sigmoidais.

Braga et al. (2000) define as RNA's como sendo sistemas paralelos distribuídos, compostos de unidades simples de processamento, que calculam determinadas funções matemáticas. Tais unidades são dispostas em uma ou mais camadas e interligadas por um grande número de conexões.

Para Haykin (2001) na maioria dos modelos, essas conexões estão associadas a pesos os quais, após o processo de aprendizagem, armazenam o conhecimento adquirido pela rede. O funcionamento dessas redes é inspirado em uma estrutura biológica concebida pela natureza: o cérebro humano (KOVÁCS, 2002).

De acordo com Eyng (2006) a utilização da rede neural artificial para um determinado fim está diretamente vinculada à eficiência com que esta é capaz de fornecer respostas próximas, o suficiente, dos dados de saída reais.

Eyng (2006) descreve ainda que devido às características não lineares inerentes ao mapeamento entre camadas de RNA's *feedforward*, estas se caracterizam como ferramentas de modelagem bastante apropriadas para o modelamento e controle.

#### 2.7.1.1 Treinamento da RNA

Para se utilizar uma RNA para um determinado fim sua eficiência está vinculada diretamente com a capacidade que ela possui de fornecer respostas próximas, o suficiente, dos dados de saída reais. Para tanto, o neurônio artificial deve ser capaz de aprender uma determinada tarefa.



Eyng (2009) descreve que na fase de treinamento, a rede extrai informações relevantes de padrões de informação apresentados a ela, criando assim uma representação própria do problema.

Nesta etapa, portanto, há o ajuste dos parâmetros da rede, que são caracterizados pelos pesos das conexões entre as unidades de processamento. Deste modo, ao final do processo de treinamento, a rede terá adquirido conhecimento sobre o ambiente em que esta operando, sendo este, “armazenado” em seus parâmetros EYNG (2009).

#### 2.7.1.2 Algoritmo da retropropagação - (*backpropagation*)

Existem vários métodos para realizar o treinamento de uma RNA, porém, quando estas são aplicadas na modelagem de processos, utiliza-se o aprendizado supervisionado. Neste trabalho o método de treinamento utilizado foi o da retropropagação (*backpropagation*).

De acordo com Eyng (2009), o aprendizado é efetuado com base no erro incluso na resposta fornecida pela rede, o que significa que a diferença entre a resposta atual da simulação e a desejada deve ser minimizada, sendo necessário, portanto, o ajuste dos pesos sinápticos associados às entradas dos neurônios. Assim, o erro calculado na camada de saída é retropropagado às camadas anteriores, servindo de base para a modificação de todos os pesos, até que a resposta obtida pela rede seja satisfatória.

Segundo Demuth e Beale (2002), pelo fato do algoritmo *backpropagation* apresentar um processo de convergência lento, foram desenvolvidos métodos alternativos que convergem a uma velocidade maior que aquele.

Dentre estes métodos de otimização para treinamento de redes neurais, se destaca o algoritmo de Levenberg-Marquardt.

De acordo com Kernani *et al.* (2005), este algoritmo representa a combinação entre o método Gauss-Newton e o de gradiente descendente. O primeiro método possui uma velocidade de convergência muito alta, devida a suas propriedades quadráticas, tendo como problema dependência elevada dos valores iniciais dos pesos e bias, cujas estimativas podem ser muito difíceis em uma aplicação em um sistema real. Já o segundo método citado, apresenta uma maior precisão quando a região próxima ao mínimo da função objetivo é alcançada.

Porém, sua velocidade de convergência é baixa, pois minimiza a função objetivo de maneira linear.

De acordo com Eyng (2009) combinando os atributos positivos dos dois métodos, o algoritmo de Levenberg-Marquardt faz uso de uma técnica de otimização híbrida, a qual pode ser aplicada no tratamento de muitos problemas reais.

A aplicação das redes neurais artificiais em várias áreas de estudo é muito vasta, na área ambiental não é diferente.

Soares et al. (2014) apresentaram uma proposta de metodologia para estimativa da curva de retenção de água, para solos do Estado do Rio Grande do Sul, a partir do uso de redes neurais artificiais, comprovando que o uso de redes neurais, para estimativa da curva de retenção de água no solo, é uma ferramenta com alta capacidade preditiva trazendo grande contribuição ao setor agrícola.

Fiorin et al. (2011) demonstraram a aplicação da ferramenta RNA para o levantamento de disponibilidade de recursos de energia solar no Brasil a partir de dados de superfície coletados em estações da rede SONDA operada pelo Centro de Ciência do Sistema Terrestre do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, concluindo que as redes neurais puderam fornecer estimativas com a confiabilidade necessária para avaliação da disponibilidade de energia solar e com melhor desempenho que outras técnicas estatísticas utilizadas na literatura.

## 2.8 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O planejamento experimental consiste em uma ferramenta, fundamentada em conceitos estatísticos, que permite otimizar, ou seja, descobrir as condições ótimas, de um processo ou produto nos quais influem duas ou mais variáveis, ou ainda, avaliar os efeitos por estas ocasionados na resposta analisada (RODRIGUES; LEMMA, 2014).

A metodologia do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) consiste em um grupo de procedimentos, estatísticos e matemáticos, que podem ser usados no estudo das inter-relações entre uma ou mais respostas (variáveis dependentes) com inúmeros fatores (variáveis independentes). É uma técnica estatística baseada no emprego de planejamentos fatoriais, introduzida na década de 50, que, desde então, tem sido usada com grande sucesso na modelagem de diversos processos industriais (Barros Neto et al., 1996).

A utilização do DCCR tem por objetivo a obtenção de um modelo válido que descreva o processo estudado e as relações entre as variáveis independentes com a variável dependente. Tais modelos consistem em equações, obtidas empiricamente, através das quais é possível calcular o valor aproximado da resposta que seria obtida no processo, a partir dos dados das variáveis independentes.

Para Rodrigues e Lemma (2014) a resolução do problema através de um planejamento estatístico conhecido como planejamento experimental fatorial, para solução de um projeto experimental, pode ser feita usando um número menor de medidas e explorando todo o espaço experimental.

### 3 OBJETIVOS

#### 3.1 OBJETIVO GERAL

Implementar um controle baseado em Redes Neurais Artificiais (RNA's) em um sistema híbrido de tratamento em escala de bancada (eletrofloculação e coagulação natural) para remoção do Corante Reativo Azul 5G de uma solução sintética, conciliando a eficiência de tratamento à otimização da utilização de utilidades / insumos como energia e coagulantes.

#### 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Ajustar um modelo matemático para estabelecer uma relação entre as variáveis manipuladas (intensidade de corrente e concentração de extrato de *Moringa oleífera*) e a variável controlada (concentração de corante na saída do módulo de tratamento).

Aplicar um controlador via RNA, ao sistema de tratamento híbrido para remoção do Corante Reativo Azul 5G da solução sintética.

Avaliar o desempenho do controlador frente a perturbações na concentração de corante na solução afluyente.

Comparar as eficiências de tratamento e a economia de energia para um sistema com e sem controle.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 PREPARO DA SOLUÇÃO DE CORANTE REATIVO AZUL 5G

Para a realização dos ensaios, foram preparadas soluções aquosas do corante reativo azul 5G com as concentrações definidas em uma matriz de delineamento experimental. Além disso, adicionou-se  $2 \text{ g.L}^{-1}$  de NaCl a solução para garantir a condutividade da solução para a eletrofloculação (SANTOS, 2015).

### 4.2 PREPARO DO EXTRATO DE MORINGA OLEÍFERA

Foram utilizadas sementes de *Moringa oleífera*, as quais foram adquiridas com cascas, removidas manualmente, colocadas em um gral e maceradas com um pistilo a fim de obter um material homogêneo.

De acordo com Santos (2015) utiliza-se esta torta produzida para o preparo da solução coagulante na proporção de 5g de sementes de Moringa para 100 mL de água destilada. A essa solução adicionou-se 20 % de NaCl, em seguida, foi colocada por 20 segundos em agitação no ultrassom, marca Elmasonic modelo P60H, com potência máxima de 580 watts, em uma frequência de 80 kHz e 100 % de potência, com a finalidade de extrair o princípio ativo das sementes de *Moringa oleífera* Lam. (SANTOS, 2015). Ao término do tempo de extração a solução foi submetida a uma filtração a vácuo com o uso de papel filtro de poro de 28 micrômetros. A solução obtida apresenta uma razão de moringa de  $50.000 \text{ mg. L}^{-1}$  (solução matriz), que foi diluída na razão de 10/50 a fim de obter os valores correspondentes a matriz de delineamento experimental.

Seguindo recomendações de Ndabigengesere e Narasiah (1998) a solução coagulante foi preparada sempre no momento da realização do ensaio.

#### 4.2.1 Calibração da bomba peristáltica dosadora de coagulante.

A bomba utilizada para dosar o extrato de *moringa oleífera* foi uma bomba peristáltica de tensão nominal de 12 volts, corrente máxima de 80 mili ampéres, velocidade de rotação de 0,1 a 100 rotações por minuto (RPM) e taxa de fluxo de 20 a  $60 \text{ mL.min}^{-1}$ .

Para ajustar a vazão da bomba peristáltica em função da tensão de alimentação foram feitos ensaios utilizando uma proveta de 100 mL e um cronômetro, para diferentes valores de tensão aplicados a alimentação da bomba foram obtidas diferentes vazões.

A faixa de tensão que a bomba dosadora de extrato foi testada variou entre 7,5 a 12 volts com valores intermediários variando de 0,5 volts.

A partir desses valores foi ajustada uma curva de calibração que representa a relação entre a vazão da bomba e a tensão de alimentação aplicada à mesma.

#### 4.3 MÓDULO DE TRATAMENTO

O módulo de tratamento consiste em uma cuba de vidro de dimensões de 65 cm de comprimento, 12,5 cm de largura por 12 cm de altura (área útil) fornecendo um volume de tratamento de, aproximadamente, 9,480 Litros a ser operado em um fluxo de escoamento contínuo.

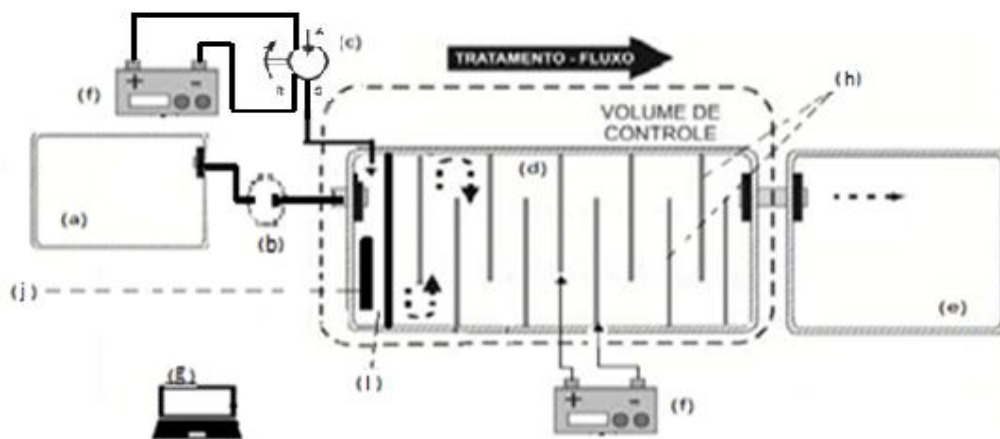
Na Figura 3, demonstra-se uma ilustração do módulo experimental de tratamento híbrido em fluxo de escoamento contínuo. O fluxo da solução sintética de corante afluente é garantido por uma bomba submersa (b) da câmara (a) para dentro da câmara de mistura (l).

Nessa câmara (l) a bomba dosadora de extrato de *Moringa oleífera* (c) aplica a dosagem especificada pela matriz do delineamento experimental para que seja misturada através da entrada de ar comprimido (j) seguindo assim para a câmara de eletrofloculação (d).

A corrente elétrica foi fornecida por uma fonte de alimentação (f), marca Instrutherm, modelo FA 3050, a qual possui duas saídas sendo uma utilizada para fornecer corrente elétrica para a eletrofloculação e a outra saída utilizada para fornecer tensão elétrica para a bomba dosadora de extrato de moringa oleífera.

Durante o processo de tratamento a aplicação de corrente elétrica é feita em cinco pares de eletrodos de sacrifício de ferro (h), conectados em paralelo, de dimensões de 9 cm de largura por 13 cm de altura, visto que o módulo possui uma altura de 12 cm (útil) então o eletrodo possui uma área útil de 108 cm<sup>2</sup> por eletrodo, espaçados entre si em 10 cm e unidos por uma rosca sem fim, fixados por porcas em ambos os lados para garantir uma boa condutibilidade da corrente elétrica aplicada na extremidade dessa rosca. Considerando quatro eletrodos intermediários,

atuando como ânodos, igualmente espaçados em relação aos dois cátodos adjacentes, tendo portanto suas duas faces ativas, e um ânodo na extremidade final do módulo, com apenas uma das faces ativas, a área total empregada foi de 972 cm<sup>2</sup>



**Figura 3 - Representação esquemática do módulo experimental de tratamento híbrido em fluxo de escoamento contínuo.**

#### 4.4 DETERMINAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS MANIPULADAS E CONTROLADA

##### 4.4.1 Delineamento experimental

Por meio de um DCCR avaliou-se a influência das seguintes variáveis: Concentração de corante afluente ( $C_0$ ), corrente elétrica aplicada nos pares de eletrodos de sacrifício ( $I$ ) e concentração de extrato de moringa oleífera aplicada no tratamento ( $M_0$ ). A variável-resposta foi a concentração do corante na saída do módulo tratamento ( $C_S$ ) após a inserção da perturbação.

De acordo com o planejamento experimental DCCR, foram executados 2<sup>3</sup> ensaios fatoriais, somados a três repetições no ponto central e seis ensaios nos pontos axiais, totalizando-se 17 ensaios.

Os valores reais e codificados, correspondentes à faixa de estudo das variáveis, são apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1- Valores reais correspondentes aos codificados (variáveis em estudo)**

|                                      | <b>-1,68</b> | <b>-1</b> | <b>0</b> | <b>+1</b> | <b>+1,68</b> |
|--------------------------------------|--------------|-----------|----------|-----------|--------------|
| C <sub>0</sub> (mg.L <sup>-1</sup> ) | 10,00        | 16,07     | 25,00    | 33,93     | 40,00        |
| I (A)                                | 1,00         | 1,81      | 3,00     | 4,19      | 5,00         |
| Mo (mg.L <sup>-1</sup> )             | 500,00       | 601,19    | 750,00   | 898,81    | 1000,00      |

#### 4.4.2 Codificação dos valores reais da matriz experimental.

Para codificar os valores reais da matriz experimental é necessário calcular os valores correspondentes a cada valor real das variáveis, esses cálculos estão demonstrados a seguir, sendo:

X1 o valor codificado para os valores de concentração de corante (Co) (Eq.1).

X2 é o valor codificado para a intensidade de corrente elétrica aplicada no sistema (I) (Eq.2).

X3 é o valor codificado para a concentração da dosagem de extrato de Moringa (Mo) (Eq. 3).

$$\frac{X1 - (-1,68)}{C_0 - 10} = \frac{1,68 - (-1,68)}{40 - 10} \quad \text{Eq. 1}$$

$$\frac{X2 - (-1,68)}{I - 1} = \frac{1,68 - (-1,68)}{5 - 1} \quad \text{Eq. 2}$$

$$\frac{X3 - (-1,68)}{Mo - 500} = \frac{1,68 - (-1,68)}{1000 - 500} \quad \text{Eq. 3}$$

O modelo matemático a ser ajustado é apresentado na Eq.4. Os coeficientes (a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>, ... a<sub>10</sub>) do modelo codificado, são obtidos por regressão.



$$CS = a_1 + a_2 * (x_1) + a_3 * (x_1)^2 + a_4 * (x_2) + a_5 * (x_2)^2 + a_6 * (x_3) + a_7 * (x_3)^2 + a_8 * (x_1 * x_2) + a_9 * (x_1 * x_3) + a_{10} * (x_2 * x_3) \quad \text{Eq. 4}$$

Na Tabela 2, estão demonstrados os valores da matriz de ensaios experimentais com seus valores codificados e valores reais.

**Tabela 2 - Matriz experimental, valores reais correspondentes aos codificados.**

| Ensaio | Co<br>(mg.L <sup>-1</sup> )<br>Cod / Real | I<br>(A)<br>Cod / Real | Mo<br>(mg.L <sup>-1</sup> )<br>Cod / Real |
|--------|---|------------------------|---|
| 1      | -1 (16,07)                                | -1 (1,81)              | -1 (601,19)                               |
| 2      | -1 (16,07)                                | -1 (1,81)              | +1 (898,81)                               |
| 3      | -1 (16,07)                                | +1 (4,19)              | -1 (601,19)                               |
| 4      | -1 (16,07)                                | +1 (4,19)              | +1 (898,81)                               |
| 5      | +1 (33,93)                                | -1 (1,81)              | -1 (601,19)                               |
| 6      | +1 (33,93)                                | -1 (1,81)              | +1 (898,81)                               |
| 7      | +1 (33,93)                                | +1 (4,19)              | -1 (601,19)                               |
| 8      | +1 (33,93)                                | +1 (4,19)              | +1 (898,81)                               |
| 9      | 0 (25,00)                                 | 0 (3,00)               | 0 (750,00)                                |
| 10     | 0 (25,00)                                 | 0 (3,00)               | 0 (750,00)                                |
| 11     | 0 (25,00)                                 | 0 (3,00)               | 0 (750,00)                                |
| 12     | -1,68 (10,00)                             | 0 (3,00)               | 0 (750,00)                                |
| 13     | +1,68 (40,00)                             | 0 (3,00)               | 0 (750,00)                                |
| 14     | 0 (25,00)                                 | -1,68 (1,00)           | 0 (750,00)                                |
| 15     | 0 (25,00)                                 | +1,68 (5,00)           | 0 (750,00)                                |
| 16     | 0 (25,00)                                 | 0 (3,00)               | -1,68 (500,00)                            |
| 17     | 0 (25,00)                                 | 0 (3,00)               | +1,68 (1000,00)                           |

#### 4.4.3 Determinação da concentração de saída do corante reativo azul 5G.

Para avaliar a concentração do corante na saída, lê-se a absorbância, no comprimento de onda de 618 nm, definido como ideal em espectro de absorção do corante Azul Reativo 5G (SANTOS, 2015).

Para determinar o valor de concentração do corante na saída calcula-se a remoção do corante em percentual (Eq.5) a partir desse valor pode-se calcular a concentração do corante (Eq.6) descrita a seguir:

#### 4.4.4 Cálculo de remoção percentual (REM%)

$$\text{Rem (\%)} = \left( \frac{\text{abs}_{\text{in}} - \text{abs}_{\text{out}}}{\text{abs}_{\text{in}}} \right) \times 100 \quad \text{Eq. 5}$$

Sendo:

Rem (%) é a remoção do corante em percentual.

$\text{abs}_{\text{in}}$  é a absorvância medida na entrada do módulo de tratamento.

$\text{abs}_{\text{out}}$  é a absorvância de saída do módulo de tratamento.

#### 4.4.5 Cálculo de concentração de saída (CS):

$$\text{CS} = \left( 1 - \frac{\text{Rem (\%)}}{100} \right) \times \text{Co} \quad \text{Eq. 6}$$

Sendo:

$\text{Cs}$  é a concentração do corante na saída do módulo de tratamento ( $\text{mg.L}^{-1}$ ).

Rem (%) é a remoção do corante (em percentual).

$\text{Co}$  é a concentração do corante na entrada do módulo de tratamento ( $\text{mg.L}^{-1}$ ).

#### 4.4.6 Procedimentos dos ensaios

Para os ensaios do tratamento híbrido foi preparada a solução de corante na concentração fornecida pela matriz do DCCR para cada caso e ajustado o sistema com valores de corrente elétrica e tensão na bomba dosadora de extrato de moringa.

Optou-se por um tempo de retenção hidráulico (TRH) de 20 minutos, pois em testes preliminares obteve-se, com esse tempo, uma eficiência satisfatória.

Após esses ajustes iniciou-se o sistema para o tratamento híbrido sendo cronometrado o tempo e coletadas amostras da saída do módulo a cada 5 minutos até que sua estabilização fosse alcançada. Essas amostras então foram

armazenadas por 24 horas para decantação do ferro residual liberado no tratamento para serem lidos os valores de absorvância. Esse procedimento foi executado para todos os pontos da matriz para fornecer dados para a análise estatística.

Posteriormente foram feitos 2 ensaios de validação do modelo, em duplicata.

#### 4.5 ESTRATÉGIA DE CONTROLE

O sistema de controle a ser empregado no sistema de tratamento híbrido consiste na utilização de um controlador *feedforward* “*pseudo-feedback*” baseado em modelo inverso de redes neurais.

Devido à influência da concentração residual de ferro, a determinação da concentração de corante via espectroscopia não foi possível de ser feita em tempo real, sendo requerida uma etapa posterior de decantação para a remoção deste interferente. Entretanto, como a RNA deve receber a informação da concentração de saída do corante (*feedback*) esta necessidade foi suprida por estimativa realizada com modelo matemático empírico. Devido a este fato, optou-se por classificar o controlador como *feedforward*, pois recebe informações da concentração de corante afluente e *pseudo-feedback* (apesar de não ser medida a concentração efluente de corante, esta é estimada).

As variáveis de entrada e de saída do controlador são apresentadas na tabela 3.

**Tabela 3 - Variáveis de Entrada e Saída do Controlador RNA.**

| Variáveis de entradas | Variáveis de saída |
|-----------------------|--------------------|
| $Co  _k$              |                    |
| $Co  _{k+1}$          | $I  _{k+1}$        |
| $CS.sp  _{k+1}$       | $Mo  _{k+1}$       |
| $CS  _{K+1}$          |                    |
| $I  _k$               |                    |
| $Mo  _k$              |                    |
| $CS  _k$              |                    |

Sendo:

$Co |_k$  = Concentração de corante na entrada no módulo de tratamento.

$I|_k$  = Intensidade de Corrente.

$Mo|_k$  = Dosagem de extrato de *Moringa oleífera*.

$CS.sp|_k$  = Valor da concentração de corante na saída do módulo de tratamento utilizada como set point para o sistema de controle.

$CS|_k$  = Concentração de corante na saída do módulo de tratamento.

O instante K refere-se ao instante de tempo onde não há perturbação na concentração afluente de corante, já o instante de tempo K+1 refere-se ao futuro, ou seja, o instante onde a perturbação passa a ser detectada, sendo este referencial temporal utilizado pela RNA para predizer o valor da intensidade de corrente e dosagem de extrato de *Moringa oleífera*, a serem implementados no sistema de tratamento.

#### 4.5.1 Variáveis do sistema de controle

O Controle de processos tem desempenhado um papel vital no avanço da engenharia e da ciência, sendo ferramenta importante em aplicações de tecnologia de ponta, além disso, o controle dos processos tornou-se uma parte importante e integrante dos processos industriais e de manufatura modernos. Um dos importantes fatores em um controle de processos são as variáveis de controle definidas como aquelas que permitem manter o sistema dinâmico, operando dentro de algumas condições pré-estabelecidas.

Neste trabalho, podemos estabelecer as variáveis como:

A) Variável controlada como sendo a concentração do efluente do sistema (CS).

B) Variável manipulada sendo a intensidade de corrente elétrica (I) e dosagem do coagulante (Mo).

C) Set point (SP), é o valor pré-estabelecido o qual o controle deve manter como resposta do sistema, nesse trabalho a concentração (CS.sp).

D) Perturbações: Em geral, os processos estão sujeitos à ação de outras entradas externas que não podem ser manipuladas e que são denominadas de perturbações, neste caso as mudanças foram inseridas intencionalmente na concentração do afluente ( $Co$ ) para que o sistema de controle se adapte e responda de maneira satisfatória, alcançando o set point.

O controle teve como informação inicial uma situação de tratamento onde os valores de  $(Co | k)$ ,  $(I | k)$  e  $(Mo | k)$  eram conhecidos e a variável controlada  $(CS | k)$  teve seu valor estimado utilizando o modelo resultante da análise dos dados do DCCR.

Logo após, foi inserido uma perturbação na variável de entrada  $(Co |_{k+1})$ , com esse distúrbio houve uma nova resposta  $(CS |_{k+1})$ , visto que a corrente elétrica e Dosagem de extrato de *Moringa oleífera* ainda eram as do instante anterior  $(I | k)$  e  $(Mo | k)$ , esse valor foi utilizado como entrada para a rede, que comparando com o valor estabelecido de set point, informasse os novos valores das variáveis manipuladas para que o valor de set point fosse alcançado.

Na figura 4 está demonstrado o fluxograma representativo do sistema de controle do tratamento híbrido bem como as variáveis do sistema.

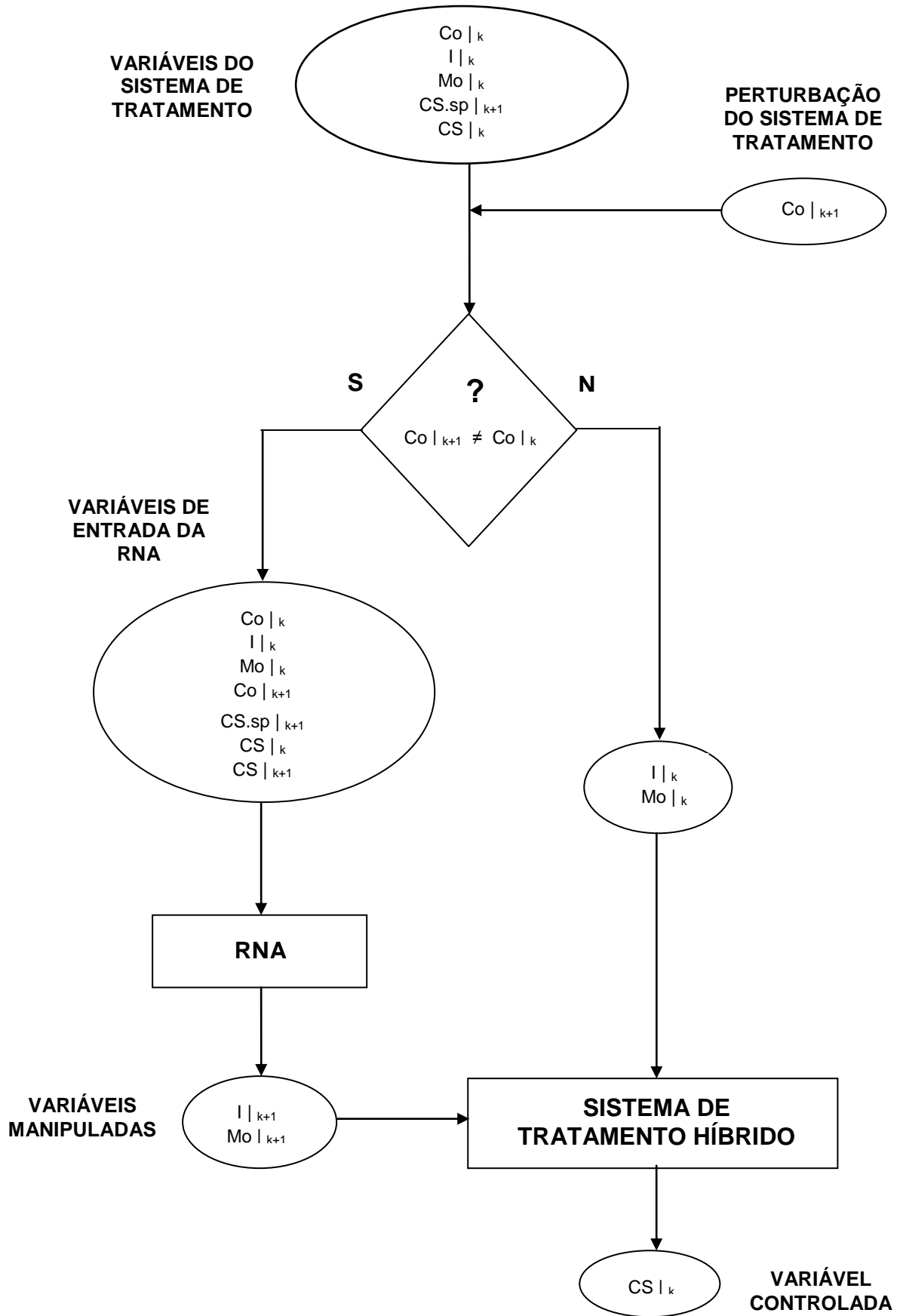


Figura 4- Fluxograma do sistema de tratamento híbrido / controle

## 4.6 DESENVOLVIMENTO DA REDE NEURAL ARTIFICIAL PARA CONTROLE DO SISTEMA HÍBRIDO DE TRATAMENTO DE EFLUENTE

### 4.6.1 Bancos de dados de treinamento e validação da RNA

Para que a RNA forneça resultados satisfatórios, além de uma arquitetura adequada, o processo de treinamento deve ser efetuado com qualidade. Para tanto se deve construir um banco de dados representativos da dinâmica do processo bem como um banco de dados para validação da RNA.

Para gerar os dados, utilizou-se um software desenvolvido em Delphi 7, cuja interface é apresentada na Figura 5. O software utiliza o modelo obtido com o DCCR, para obter todas as combinações possíveis de  $(Mo | k)$  e  $(I | k)$  para cada valor de  $(Co | k)$ , fornecendo os valores de  $(CS)$ . O software possui opções como filtro de valores de saída (mínimo e máximo), valores de incrementos para cada variável além da opção de eliminar os valores negativos, para analisar cada situação individual o mesmo possui a opção de “teste único”, ainda a opção de limpeza do contador e de parada quando solicitado.

Com o auxílio do software as condições iniciais de  $(Co | k)$ ,  $(Mo | k)$ ,  $(I | k)$  foram definidas arbitrariamente de modo a proporcionar uma saída  $(CS | k)$  próxima ao set point definido na etapa preliminar de determinação da relação entre as variáveis de perturbação, manipuladas e controladas, obtidas com base em experimentos (DCCR), utilizando-se como critério de escolha, os conjuntos de dados que proporcionassem uma amplitude de  $\pm 0,03$  em relação ao set point. Assim, os valores de  $(Co | k)$ , utilizados, contemplaram toda a faixa de estudo do DCCR, iniciando-se em -1,68 (valor codificado), com incremento de + 0,10 para as variáveis  $(Co | k)$ ,  $(Mo | k)$ ,  $(I | k)$ .

| Co                    | I     | MO                                    | CS15        |                     |
|-----------------------|-------|---------------------------------------|-------------|---------------------|
| -1,68                 | -1,68 | -1,68                                 | -0,78684448 |                     |
| Incremento            | 0,10  | 0,10                                  |             |                     |
| Maximo Contador       | 1,68  | 1,68                                  |             |                     |
| Testar Contador até : |       | Parar Contador                        |             |                     |
| Limpar                |       | Considerar apenas valores Maiores que | -3          |                     |
|                       |       | Considerar apenas valores Menores que | 3           |                     |
| -1,58                 | -0,78 | -0,98                                 | 0,70        | 0,7022739200000001  |
| -1,58                 | -0,78 | -0,88                                 | 0,55        | 0,5491715200000001  |
| -1,58                 | -0,78 | -0,78                                 | 0,42        | 0,4160851200000001  |
| -1,58                 | -0,78 | -0,68                                 | 0,30        | 0,3030147200000001  |
| -1,58                 | -0,78 | -0,58                                 | 0,21        | 0,2099603200000001  |
| -1,58                 | -0,78 | -0,48                                 | 0,14        | 0,1369219200000001  |
| -1,58                 | -0,78 | -0,38                                 | 0,08        | 0,08389952000000013 |

**Figura 5 - Software gerador dos dados para construção do banco de treinamento.**

Para a variável  $(Co |_{k+1})$ , que é a concentração afluyente após a perturbação, foi atribuído valores, de forma a contemplar a faixa de estudo do DCCR. Com base no novo valor de  $(Co |_{k+1})$ , porém com os valores inalterados de  $(Mo |_k)$ ,  $(I |_k)$ , fazendo uso, novamente, do modelo obtido pelo DCCR, foi gerado um valor para  $(CS|_{k+1})$ , que se distanciava do set point.

Utilizando-se novamente o gerador de dados, baseado no modelo, buscou-se condições de  $(I |_{k+1})$  e  $(Mo|_{k+1})$ , que proporcionassem um valor de concentração de saída do corante próximo ao set point, para amenizar o impacto da nova concentração afluyente  $(Co|_{k+1})$ . Este valor gerado no programa foi utilizado no set point da rede  $(Csp |_{k+1})$ .

Como o modelo pôde proporcionar várias combinações de  $(I)$  e  $(Mo)$  para uma mesma saída  $(CS)$ , optou-se por aquela que preferencialmente utilizasse o menor valor de  $(I)$ , em detrimento da  $(Mo)$ . Esta opção foi pautada nos preceitos da sustentabilidade, visando o menor consumo energético do processo.

Do total de conjunto de dados gerados, 70% foram destinados ao banco de dados de treinamento da RNA, enquanto que os 30% restantes foram destinados ao banco de dados de validação.



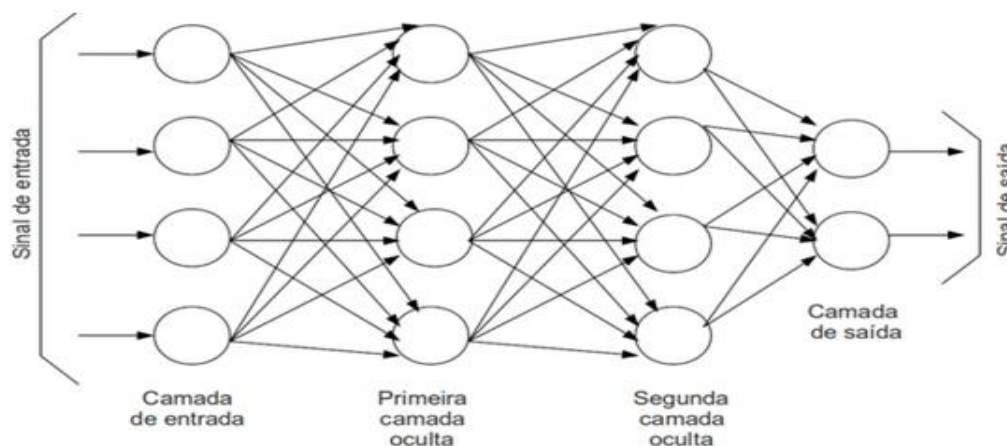
## 4.6.2 Detalhamento da RNA

### 4.6.2.1 Software utilizado

O software utilizado para desenvolver a RNA foi o MATLAB®, versão R2012a, desenvolvido pela *Matrix Laboratory*, trata-se de um software interativo de alto desempenho voltado para o cálculo numérico. O MATLAB® integra análise numérica, cálculo com matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos em ambiente fácil de usar onde problemas e soluções são expressos somente como eles são escritos matematicamente, ao contrário da programação tradicional.

### 4.6.2.2 Tipo de RNA utilizada

Na Figura 6 está demonstrada uma imagem ilustrativa da rede utilizada que é a do tipo direta (Feedforward), completamente conectada, ou seja, cada neurônio em uma determinada camada está conectado aos demais da camada seguinte. Em uma rede feedforward, cada camada se conecta à próxima camada, porém não há caminho de volta. Todas as conexões, portanto, tem a mesma direção, partindo da camada de entrada rumo à camada de saída.



**Figura 6 - Arquitetura de uma RNA do tipo direta (Feedforward)**

### 4.6.2.3 Definição da arquitetura da RNA

Eyng (2006) comenta que a determinação da arquitetura da rede depende de vários fatores, entre eles o número de variáveis de entrada e saída. Desta forma, a arquitetura da rede foi representada por (7:mM:2), para o problema regulatório

proposto, onde “7” é o número de variáveis de entrada, “m” e “M” correspondem ao número de camadas escondidas e ao número de neurônios em cada camada, respectivamente e “2” é o número de variáveis de saída, sendo que a determinação destes valores é efetuada de modo a propiciar uma rede que forneça bons resultados sem que haja um esforço computacional excessivo.

Para a definição da arquitetura da RNA foram testados empiricamente configurações de quantidade de camada e quantidades de neurônios por camada a fim de se obter a melhor condição de resposta da RNA.

Para isso foram analisados os dados de:

- Época que é o número de interações para treinamento da RNA.
- *Performance*, o desempenho da RNA.
- Parâmetros, máximo de iterações alcançadas para determinada arquitetura.
- Motivo, o motivo pelo qual a RNA cessou o treinamento.
- Erro percentual médio da corrente e erro percentual médio de extrato de moringa.

O cálculo do erro percentual médio, tanto para corrente quanto para extrato de moringa, está demonstrado na equação 7.

$$\text{Erro percentual médio} = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{|Y_{RNAi} - Y_{REALi}|}{|Y_{REALi}|} \right) \times 100}{N} \quad \text{Eq. 7}$$

Sendo:

$Y_{RNAi}$  o valor da variável manipulada predita pela RNA.

$Y_{REALi}$  o valor real da variável manipulada.

#### 4.7 APLICAÇÃO DO CONTROLE RNA NO SISTEMA HÍBRIDO DE TRATAMENTO DE EFLUENTE

Para avaliar o desempenho do sistema de controle proposto quando aplicado ao módulo de tratamento híbrido de efluente têxtil, foram realizados 10

ensaios com diferentes configurações de perturbações na concentração de corante afluente ao módulo.

Na Tabela 4, são demonstrados os valores dos ensaios de controle, bem como suas perturbações.

Para todos os ensaios foram ajustados os valores de  $(C_0)$ ,  $(I)$  e  $(M_0)$  pré-definidos pelo modelo, bem como suas perturbações que foram inseridas no sistema de tratamento. Foram feitos ensaios em pares com as mesmas condições, porém um com ação do controle e outro sem ação deste. Iniciado os ensaios com ação de controle, a informação do valor da concentração de entrada  $(C_0)$  era fornecida para a RNA a qual respondia com os valores de  $(I|_{k+1})$  e  $(M_0|_{k+1})$  que deveriam ser ajustados.

Como o TRH utilizado foi de 20 minutos, cada perturbação era inserida depois de decorrido o dobro deste tempo, ou seja, para uma primeira perturbação, esta era inserida em 40 minutos, para uma segunda, esta era inserida em 80 minutos, tempos estes contados do início do tratamento.

Para todas as perturbações foram coletadas amostras das soluções da entrada do módulo de tratamento antes do início do tratamento. Todas as amostras foram armazenadas por um período de 24 horas para decantação do ferro residual e posteriormente lidas suas absorvâncias.

Para a análise de comparação de médias e variâncias como forma de análise do desempenho do sistema de controle foi utilizado um suplemento do Excel chamado "*Action*" sendo utilizado o teste "t" para comparativo de médias e teste "F" para variâncias.

Tabela 4 - Variáveis de Entrada e Saída do Controlador RNA (valores codificados e reais).

| Ensaio | $Co _k$<br>(mg.L <sup>-1</sup> )<br>Cod/Real | $I _k$<br>(A)<br>Cod/Real | $Mo _k$<br>(mg.L <sup>-1</sup> )<br>Cod/Real | $Co _{k+1}$<br>(mg.L <sup>-1</sup> )<br>Cod/Real | $Co _{k+2}$<br>(mg.L <sup>-1</sup> )<br>Cod/Real |
|--------|--|---------------------------|--|--|--|
| 1      | 0 (25,00)                                    | -0,68 (2,2)               | 0,82 (872,00)                                | 0,5 (29,5)                                       |  |
| 2*     | 0 (25,00)                                    | -0,68 (2,2)               | 0,82 (872,00)                                | 0,5 (29,5)                                       |  |
| 3      | 0 (25,00)                                    | -0,68 (2,2)               | 0,82 (872,00)                                | -0,5 (20,5)                                      |  |
| 4*     | 0 (25,00)                                    | -0,68 (2,2)               | 0,82 (872,00)                                | -0,5 (20,5)                                      |  |
| 5      | 0 (25,00)                                    | -0,68 (2,2)               | 0,82 (872,00)                                | 0,4 (28,5)                                       | 0,8 (32,15)                                      |
| 6*     | 0 (25,00)                                    | -0,68 (2,2)               | 0,82 (872,00)                                | 0,4 (28,5)                                       | 0,8 (32,15)                                      |
| 7      | 0 (25,00)                                    | -0,68 (2,2)               | 0,82 (872,00)                                | -0,4 (21,4)                                      | -0,8 (17,89)                                     |
| 8*     | 0 (25,00)                                    | -0,68 (2,2)               | 0,82 (872,00)                                | -0,4 (21,4)                                      | -0,8 (17,89)                                     |
| 9      | 0 (25,00)                                    | -0,68 (2,2)               | 0,82 (872,00)                                | -0,4 (21,4)                                      | 0,8 (32,15)                                      |
| 10*    | 0 (25,00)                                    | -0,68 (2,2)               | 0,82 (872,00)                                | -0,4 (21,4)                                      | 0,8 (32,15)                                      |

\* Ensaio sem ação de controle

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 CURVA DE CALIBRAÇÃO DA BOMBA PERISTÁLTICA.

A partir dos dados obtidos dos resultados da calibração, isto é, as vazões obtidas para cada tensão empregada, ajustou-se uma curva de calibração. O modelo gerado pelo software Excel foi linear com um  $R^2$  igual a 0,9953 e equação igual a:  $y = 6,1677x - 26,381$ , sendo “x” a tensão de alimentação (V) aplicada na bomba e “y” a vazão da bomba ( $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ), demonstrados na Figura 7.

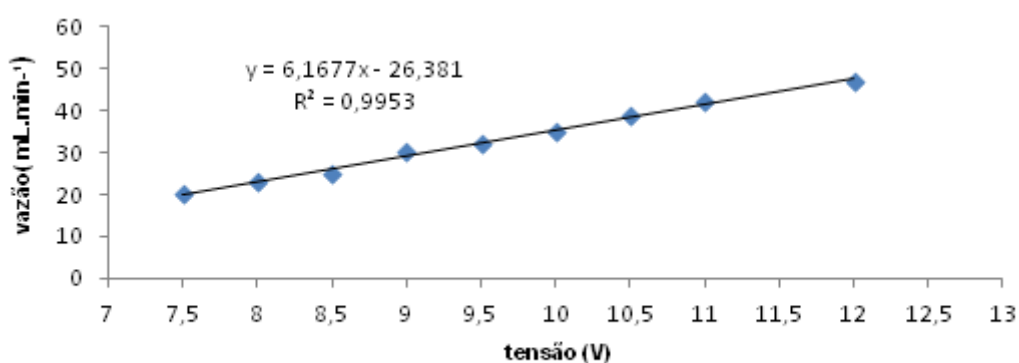


Figura 7 - Gráfico de resposta para curva de calibração da bomba peristáltica.

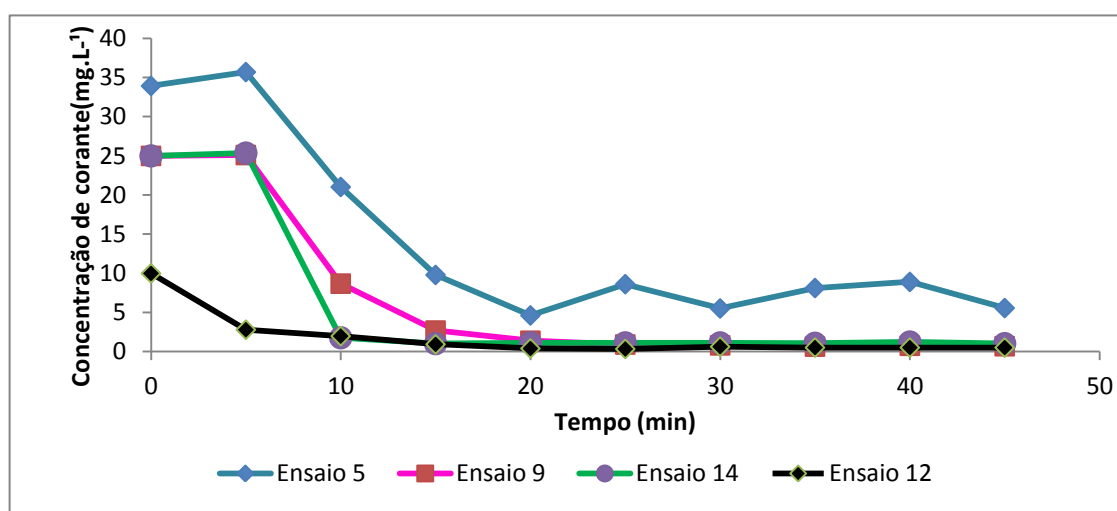
Na Tabela 5, observam-se os valores correspondentes de tensão que devem ser aplicados à bomba peristáltica para obter a vazão desejada em relação à concentração de Mo fornecida pela matriz experimental.

Tabela 5 - Valores de concentração e vazão da bomba peristáltica em função da tensão de alimentação.

| Mo<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | Vazão<br>( $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ) | Tensão da fonte<br>(V) |
|---|--|------------------------|
| 500,00                                  | 23,70  | 8,00                   |
| 601,19                                  | 28,50  | 8,90                   |
| 750,00                                  | 35,55  | 10,00                  |
| 898,81                                  | 42,60  | 11,20                  |
| 1000,00                                 | 47,40  | 12,00                  |

## 5.2 ENSAIOS PARA A MATRIZ DO DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Para fim de análise, na Figura 8 são apresentados alguns resultados dos ensaios da matriz do delineamento experimental, demonstrando a diferença no tempo de estabilização do sistema, assim como a eficiência de tratamento, para as diversas condições testadas.



**Figura 8 - Resultados de ensaios da matriz do delineamento experimental.**

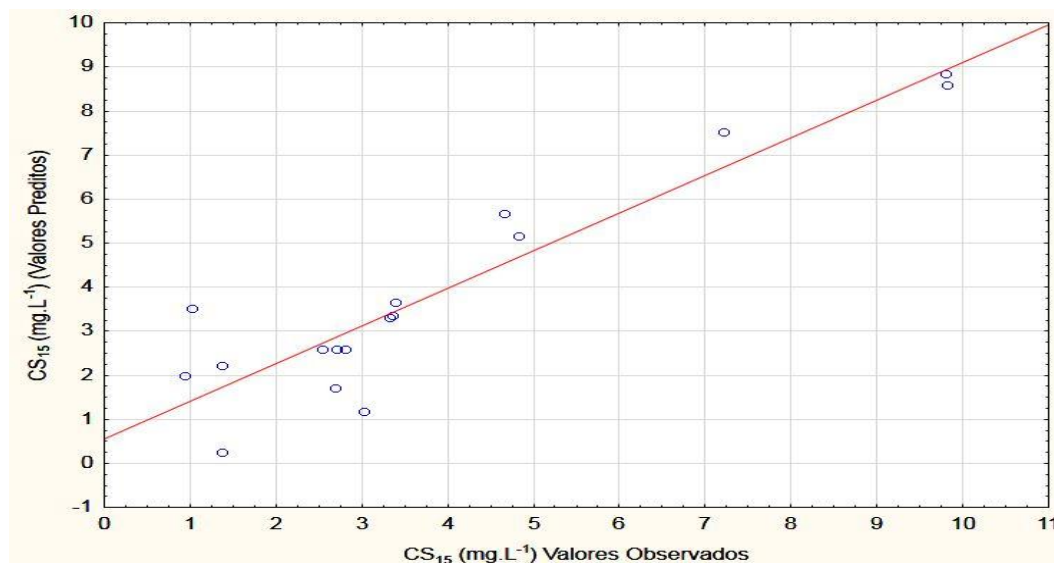
Observando os valores das concentrações de saída dos tratamentos apresentados, nota-se que as mesmas diminuem ao longo do tempo decorrente da ação do tratamento híbrido. Observa-se que no tempo de 15 minutos tem-se uma concentração de saída próxima da concentração no estado estacionário, e por esse motivo, a concentração efluente neste tempo foi escolhida como variável controlada. Com isso, a ação de controle atuará a fim de que o sistema de controle seja capaz de fazer com que a variável controlada fique o menor tempo possível distante do set point. Na Tabela 6, observam-se os valores da variável resposta, concentração do corante na saída do módulo tratamento após 15 minutos ( $CS_{15}$ ).

Tabela 6 - Matriz do delineamento experimental, valores codificados e reais.

| Ensaio | Co<br>(mg.L <sup>-1</sup> )<br>Cod/Real | I<br>(A)<br>Cod/Real | Mo<br>(mg.L <sup>-1</sup> )<br>Cod/Real | CS <sub>15</sub><br>(mg.L <sup>-1</sup> )<br>Cod/Real |
|--------|---|----------------------|---|---|
| 1      | -1 (16,07)                              | -1 (1,81)            | -1 (601,19)                             | 3,01  |
| 2      | -1 (16,07)                              | -1 (1,81)            | +1 (898,81)                             | 2,69  |
| 3      | -1 (16,07)                              | +1 (4,19)            | -1 (601,19)                             | 3,39  |
| 4      | -1 (16,07)                              | +1 (4,19)            | +1 (898,81)                             | 3,33  |
| 5      | +1 (33,93)                              | -1 (1,81)            | -1 (601,19)                             | 9,80  |
| 6      | +1 (33,93)                              | -1 (1,81)            | +1 (898,81)                             | 9,81  |
| 7      | +1 (33,93)                              | +1 (4,19)            | -1 (601,19)                             | 3,35  |
| 8      | +1 (33,93)                              | +1 (4,19)            | +1 (898,81)                             | 1,37  |
| 9      | 0 (25,00)                               | 0 (3,00)             | 0 (750,00)                              | 2,70  |
| 10     | 0 (25,00)                               | 0 (3,00)             | 0 (750,00)                              | 2,53  |
| 11     | 0 (25,00)                               | 0 (3,00)             | 0 (750,00)                              | 2,80  |
| 12     | -1,68 (10,00)                           | 0 (3,00)             | 0 (750,00)                              | 0,94  |
| 13     | +1,68 (40,00)                           | 0 (3,00)             | 0 (750,00)                              | 7,21  |
| 14     | 0 (25,00)                               | -1,68 (1,00)         | 0 (750,00)                              | 1,02  |
| 15     | 0 (25,00)                               | +1,68 (5,00)         | 0 (750,00)                              | 1,37  |
| 16     | 0 (25,00)                               | 0 (3,00)             | -1,68 (500,00)                          | 4,65  |
| 17     | 0 (25,00)                               | 0 (3,00)             | +1,68(1000,00)                          | 4,82  |

Observa-se que a concentração do corante na saída do tratamento após 15 minutos teve uma variação de 0,94 mg.L<sup>-1</sup> a 9,81 mg.L<sup>-1</sup>, com um valor médio de todos os ensaios de 3,81 mg.L<sup>-1</sup>, valor esse definido com o valor de set point para o controle.

Na figura 9 está demonstrado o gráfico de dispersão entre os valores da concentração de corante na saída do módulo de tratamento aos 15 minutos preditos pelo modelo matemático e os valores de concentração de corante na saída do módulo aos 15 minutos observados nos ensaios da matriz do delineamento experimental.



**Figura 9 - Gráfico de dispersão entre os valores de concentração de saída do corante preditos pelo modelo e valores observados**

### 5.2.1 Análise estatística.

Através dos resultados obtidos demonstrados na Tabela 6 foram calculados os coeficientes de regressão apresentados na Tabela 7 obtidos a partir do software Statistica 10.

**Tabela 7 - Coeficientes de regressão.**

|                   | <b>Efeitos</b> | <b>Coefficientes de regressão</b> | <b>Erro padrão</b> | <b>p-valor</b> |
|-------------------|----------------|-----------------------------------|--------------------|----------------|
| MÉDIA             |                | 2,5964                            | 0,9091             | 0,0244         |
| x1                | 3,2897         | 1,6448                            | 0,4271             | 0,0062         |
| (x1) <sup>2</sup> | 1,5323         | 0,7661                            | 0,4706             | 0,1475         |
| x2                | -1,9495        | -0,9747                           | 0,4271             | 0,0564         |
| (x2) <sup>2</sup> | -0,5065        | -0,2532                           | 0,4706             | 0,6071         |
| x3                | -0,3036        | -0,1518                           | 0,4271             | 0,7327         |
| (x3) <sup>2</sup> | 2,0016         | 1,0008                            | 0,4706             | 0,0710         |
| x1:x2             | -3,9782        | -1,9891                           | 0,5579             | 0,0091         |
| x1:x3             | -0,3968        | -0,1984                           | 0,5579             | 0,7326         |
| x2:x3             | -0,4337        | -0,2168                           | 0,5579             | 0,7090         |

Sendo:

x1 o valor codificado para a variável concentração de corante afluente.

x2 o valor codificado para a variável corrente elétrica.

x3 o valor codificado para a variável dosagem de extrato de moringa oleífera.



Analisando-se os resultados dos coeficientes de regressão se obtém o modelo quadrático da resposta concentração de saída do tratamento após 15 minutos ( $CS_{15}$ ), em função dos parâmetros relativos às variáveis, os valores de p - valor menores que 0,05 nos demonstram quais parâmetros foram significativos a 5% de significância e os efeitos positivos demonstram quais os parâmetros influenciam diretamente na resposta enquanto os negativos influenciam inversamente.

Optou-se por manter todos os termos no modelo, mesmo os que não se mostraram significativos a 5% de significância, devido ao fato de os mesmos explicarem uma pequena parcela do fenômeno contribuindo para o coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

O modelo codificado obtido a partir dos coeficientes de regressão está demonstrado na equação 8.

$$CS = 2,5964 + 1,6448 * (x1) + 0,7661 * (x1)^2 - 0,9747 * (x2) - 0,2532 * (x2)^2 - 0,1518 * (x3) + 1,0008 * (x3)^2 - 1,9891 * (x1.x2) - 0,1984 * (x1.x3) - 0,2168 * (x2.x3) \quad \text{Eq. 8}$$

Na Figura 10 observa-se o Gráfico de Pareto para os parâmetros estudados. Este gráfico permite verificar o efeito de cada parâmetro, bem como quais termos são estatisticamente significativos. Pela análise da figura é possível verificar que, considerando o intervalo de confiança de 95 %, o termo linear da concentração de corante de entrada ( $x1$ ) e a interação da concentração de corante de entrada com a intensidade da corrente elétrica ( $x1.x2$ ) foram estatisticamente significativos ao nível de significância de 5% ( $p < 0,05$ ), parâmetros como o termo linear da intensidade da corrente elétrica ( $x2$ ) e o termo quadrático da dosagem do extrato de moringa ( $x3$ )<sup>2</sup> embora não foram estatisticamente significativos ao nível de significância de 5% mantiverem-se muito próximos ao nível de significância, e de qualquer forma optou-se pela manutenção de todos os termos.

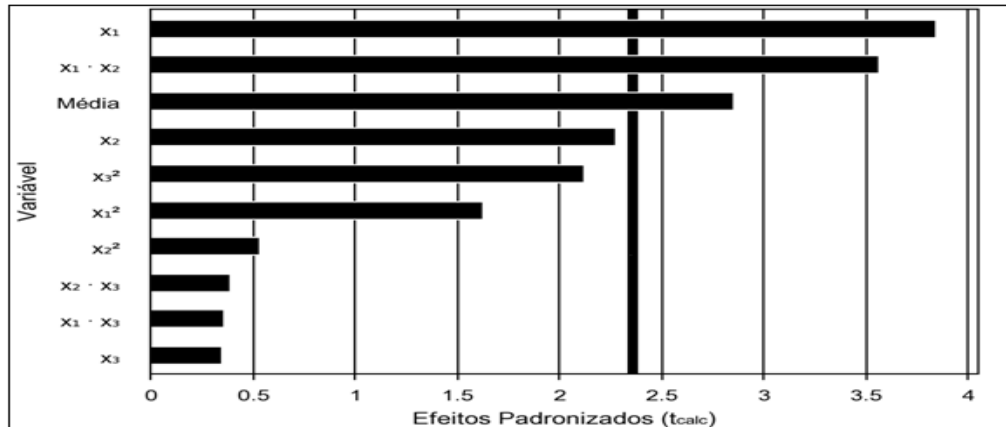


Figura 10 - Diagrama de Pareto para concentração de saída, com 95 % de confiança.

Para realização do teste F e conseqüente avaliação da validade do modelo é necessário à análise de variância (ANOVA) para a resposta concentração, conforme é observada na Tabela 8. Esta análise é a mais utilizada para se avaliar numericamente a qualidade do ajuste de um modelo, fazendo um exame dos resíduos. De acordo com os dados, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) explica 85,42% da variação total das respostas, o valor de  $F_{\text{calculado}}$  é maior que o  $F_{\text{tabelado}}$  determinando a validade do modelo a 95% de confiança, o que também pode ser observado pelo fato do p-valor ser menor que 0,05.

Tabela 8-Análise de variância para a resposta concentração de cor ( confiança 95%)

| Fonte de Variação | Soma dos quadrados | Graus de liberdade | Média dos Quadrados | F calculado | F tabelado $F_{0,05;9;7}$ | p- Valor |
|-------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-------------|---------------------------|----------|
| Regressão         | 102,111            | 9                  | 11,346              | 4,556       | 3,677                     | 0,029    |
| Resíduos          | 17,431             | 7                  | 2,490               |             |                           |          |
| Total             | 119,542            | 16                 |                     |             |                           |          |

Coeficiente de determinação ( $R^2$ ) = 85,42%

### 5.2.2 Ensaio de validação.

Após os ensaios da matriz experimental e a análise estatística foram executados 2 ensaios de validação, em duplicata, com valores de ( $C_0$ ) de  $35 \text{ mg.L}^{-1}$  e  $20 \text{ mg.L}^{-1}$ , valores estes escolhidos arbitrariamente sendo diferentes dos valores

apresentados na matriz com o objetivo de analisar a resposta observada com a predita pelo modelo.

Os valores codificados e reais dos ensaios de validação estão demonstrados na Tabela 9.

**Tabela 9 - Valores das variáveis para os ensaios de validação.**

| Ensaio | Co<br>(mg.L <sup>-1</sup> )<br>Cod/Real | I<br>(A)<br>Cod/Real | Mo<br>(mg.L <sup>-1</sup> )<br>Cod/Real |
|--------|---|----------------------|---|
| 1      | +1,12 (35,00)                           | -1 (1,81)            | +1 (898,81)                             |
| 2      | -0,56 (20,00)                           | +1 (4,19)            | -1 (601,19)                             |

A tabela 10 demonstra os valores dos ensaios da validação comparando com os valores preditos pelo modelo, todos para CS<sub>15</sub>, bem como seus valores observados e seus respectivos erros.

**Tabela 10 - Resultados dos ensaios de validação comparativos com os dados do modelo estatístico para CS<sub>15</sub>.**

| Ensaio | CS <sub>15</sub> (1 <sup>o</sup> )<br>(mg.L <sup>-1</sup> ) | CS <sub>15</sub> (2 <sup>o</sup> )<br>(mg.L <sup>-1</sup> ) | CS média<br>(mg.L <sup>-1</sup> ) | CS predita<br>(mg.L <sup>-1</sup> ) | Erro de predição<br>(mg.L <sup>-1</sup> ) |
|--------|---|---|-----------------------------------|-------------------------------------|---|
| 1      | 7,76  | 7,67  | 7,72 ± 0,0636                     | 9,19                                | -1,47                                     |
| 2      | 2,10  | 1,75  | 1,93 ± 0,2475                     | 3,06                                | -1,13                                     |

Observa-se que os valores preditos pelo modelo diferem dos valores observados entre -1,13 mg.L<sup>-1</sup> e -1,47 mg.L<sup>-1</sup>, essas diferenças analisadas foram relativamente baixas todas inferiores a 1,5 mg.L<sup>-1</sup> (valor absoluto) de concentração na saída do tratamento após 15 minutos, comprovando assim a validade do modelo obtido.

Com os valores dos ensaios de validação ressalta-se a eficiência do sistema do tratamento híbrido proposto e as relações das variáveis de entrada com a variável de saída propostas pelo modelo, observando ainda que devido ao baixo erro apresentado nos ensaios de validação o modelo pôde ser utilizado para prever a concentração de saída do corante, para utilizar essa variável como entrada da RNA.

### 5.3 IMPLEMENTAÇÃO E TREINAMENTO DA RNA

#### 5.3.1 Bancos de dados de treinamento e validação da RNA

Para a construção dos bancos de treinamento e validação da RNA os dados foram obtidos a partir do programa gerador, onde se configurou o programa para fornecer as combinações possíveis para  $(I)$  e  $(Mo)$  a partir de todas as concentrações de entrada  $(Co)$  entre  $(-1,68$  a  $1,68)$  valores codificados, com incremento de  $(0,10)$  que fornecesse uma  $(CS)$  entre  $3,78 \text{ mg.L}^{-1}$  e  $3,84 \text{ mg.L}^{-1}$  ( $3,81 \pm 0,03$ ).

Os dados analisados e selecionados resultaram em 411 linhas de combinações as quais foram submetidas a perturbações arbitrárias de  $\pm 0,2$  da  $(Co)$ , com isso o valor da  $(CS)$  se distanciava do set point. Para essa nova condição novos valores de  $(I|_{k+1})$  e  $(Mo|_{k+1})$  eram fornecidos pelo gerador para alcançar o valor de set point. Depois de completadas as linhas com as perturbações e suas novas condições, 70% desses dados compuseram o banco de dados de treinamento e os 30% restantes foram utilizados no banco de dados de validação da RNA.

#### 5.3.2 Testes para escolha da arquitetura da RNA

A Tabela 11 demonstra os valores observados dos testes para obtenção da melhor arquitetura da RNA.

A letra “A” representa a quantidade de camadas ocultas em que a RNA foi testada. As letras “b” e “c” representam o número de neurônio por camada.

Para cada arquitetura testada empiricamente observou-se o motivo da parada de treinamento, informação importante na escolha da melhor arquitetura para a RNA que será utilizada. O motivo de parada esperado é o de “*performance*” pois significa que a rede atingiu o nível de desempenho esperado, de acordo com a função objetivo pré-estabelecida.

O motivo de parada “MU” significa que o valor máximo de gradiente foi atingido, um resultado ruim, pois informa que a rede não conseguiu convergir para um conjunto de valores de pesos sinápticos que proporcionassem o atendimento da função objetivo de treinamento.

O motivo de parada por “época” significa que a quantidade de iterações estabelecidas para a rede foi alcançada e a mesma não obteve seu melhor desempenho.

**Tabela 11 - Testes para escolha da arquitetura da RNA.**

| A; (b,c)  | Época | Performance          | Parâmetros | Motivo             | Erro (I)% | Erro (Mo) % |
|-----------|-------|----------------------|------------|--------------------|-----------|-------------|
| 1; (8)    | 228   | 4,61                 | 77,5/82    | MU                 | 14,280    | 78,37       |
| 1; (11)   | 555   | 0,18                 | 110/112    | MU                 | 4,460     | 9,81        |
| 1; (13)   | 1649  | 0,39                 | 126/132    | MU                 | 8,580     | 26,36       |
| 1; (15)   | 833   | 0,03                 | 146/152    | MU                 | 3,110     | 9,51        |
| 1; (17)   | 686   | 0,01                 | 155/172    | MU                 | 1,700     | 4,51        |
| 1; (18)   | 2000  | 0,0003               | 177/182    | época              | 0,410     | 2,44        |
| 1; (19)   | 1222  | 9,80E <sup>-06</sup> | 183/192    | <i>performance</i> | 0,410     | 2,27        |
| 1; (20)   | 1016  | 6,51E <sup>-06</sup> | 188/202    | <i>performance</i> | 0,040     | 1,73        |
| 1; (21)   | 2000  | 2,72E <sup>-05</sup> | 202/212    | época              | 0,310     | 3,12        |
| 1; (22)   | 1328  | 9,85E <sup>-06</sup> | 212/222    | <i>performance</i> | 5,550     | 9,71        |
| 1; (23)   | 1021  | 9,03E <sup>-06</sup> | 218/232    | <i>performance</i> | 0,050     | 1,81        |
| 2; (8,9)  | 912   | 6,63E <sup>-06</sup> | 141/165    | <i>performance</i> | 0,176     | 1,95        |
| 2; (8,10) | 1271  | 7,88E <sup>-06</sup> | 135/176    | <i>performance</i> | 0,293     | 2,32        |
| 2; (8,11) | 391   | 8,78E <sup>-06</sup> | 142/187    | <i>performance</i> | 0,189     | 4,06        |
| 2; (8,12) | 437   | 9,68E <sup>-06</sup> | 163/198    | <i>performance</i> | 0,157     | 2,23        |
| 2; (9,9)  | 1084  | 9,43E <sup>-06</sup> | 150/182    | <i>performance</i> | 1,291     | 3,31        |
| 2; (9,10) | 316   | 9,42E <sup>-06</sup> | 125/194    | <i>performance</i> | 0,020     | 1,71        |
| 2; (9,11) | 476   | 3,10E <sup>-06</sup> | 125/206    | <i>performance</i> | 0,030     | 1,76        |
| 2; (9,12) | 232   | 9,98E <sup>-06</sup> | 152/218    | <i>performance</i> | 0,010     | 1,77        |

Analisando os valores dos testes, observa-se que a RNA teve um melhor desempenho com uma arquitetura de 2 camadas onde o “motivo” constatado para a parada do treinamento foi o de *performance*. A escolha pautou-se pelo menor erro percentual da corrente (I) combinado com um baixo erro do extrato de moringa (Mo) e uma arquitetura que fosse mais robusta, optando-se por 2 camadas, 9 neurônios na primeira camada oculta, 12 neurônios na segunda camada oculta.

## 5.4 ENSAIOS DE CONTROLE

### 5.4.1 Definição da condição inicial

Utilizando-se o programa gerador, escolheu-se uma condição que promovesse a saída do processo no set point definido ( $3,81 \text{ mg.L}^{-1}$ ), valor predito pelo modelo. Essa condição escolhida está demonstrada na Tabela 12, com valores codificados e reais.

**Tabela 12 - Condição inicial para os ensaios de controle (valores codificados e reais).**

| $Co  _k$<br>( $\text{mg.L}^{-1}$ ) | $I  _k$<br>(A) | $Mo  _k$<br>( $\text{mg.L}^{-1}$ ) | CS<br>( $\text{mg.L}^{-1}$ ) |
|------------------------------------|----------------|------------------------------------|------------------------------|
| 0 (25,00)                          | -0,68 (2,2)    | 0,82 ( 872,00 )                    | (3,81 )                      |

### 5.4.2 Resultados dos ensaios de controle

Na Tabela 13 estão demonstrados os valores das médias da concentração de saída do módulo de tratamento (CS) bem como seus Desvios padrão, onde o valor apresentado são as médias das últimas três amostras, para o sistema já em estado estacionário, ou seja, para os ensaios que tiveram uma perturbação inserida aos 40 minutos a média 1 é a média aritmética das amostras 30, 35 e 40 minutos e a média 2 é a média aritmética das amostras 70,75 e 80 minutos.

A partir do ensaio 5 todos os ensaios tiveram duas perturbações, a primeira com 40 minutos e a segunda com 80 minutos, com a média 3 sendo a média aritmética das amostras 110,115 e 120 minutos.

Tabela 13 - Valores das médias da concentração do corante na saída do módulo de tratamento.

| Ensaios | (CS)<br>Média 1<br>(mg.L <sup>-1</sup> ) | Desvio<br>Padrão<br>1 | (CS)<br>Média 2<br>(mg.L <sup>-1</sup> ) | Desvio<br>Padrão<br>2 | Perturb.1<br>% | (CS)<br>Média 3<br>(mg.L <sup>-1</sup> ) | Desvio<br>Padrão<br>3 | Perturb.2<br>% |
|---------|--|-----------------------|--|-----------------------|----------------|--|-----------------------|----------------|
| 1       | 2,46                                     | ± 0,69                | 1,64                                     | ± 0,14                | 18             |  |                       |                |
| 2*      | 1,25                                     | ± 1,01                | 2,07                                     | ± 0,37                | 18             |  |                       |                |
| 3       | 3,42                                     | ± 0,74                | 2,13                                     | ± 0,15                | - 18           |  |                       |                |
| 4*      | 3,00                                     | ± 0,13                | 3,22                                     | ± 0,93                | - 18           |  |                       |                |
| 5       | 2,37                                     | ± 0,42                | 2,30                                     | ± 0,11                | 14             | 2,11                                     | ± 0,44                | 12,8           |
| 6*      | 2,58                                     | ± 1,35                | 3,69                                     | ± 1,83                | 14             | 2,17                                     | ± 1,39                | 12,8           |
| 7       | 1,24                                     | ± 0,25                | 1,55                                     | ± 0,12                | - 14,4         | 3,12                                     | ± 0,26                | - 16,4         |
| 8*      | 1,71                                     | ± 0,08                | 2,50                                     | ± 1,84                | - 14,4         | 0,72                                     | ± 0,08                | - 16,4         |
| 9       | 2,73                                     | ± 1,39                | 2,70                                     | ± 0,21                | - 14,4         | 2,77                                     | ± 0,32                | 50,2           |
| 10*     | 1,47                                     | ± 0,95                | 0,71                                     | ± 0,42                | - 14,4         | 1,64                                     | ± 0,91                | 50,2           |

\* Ensaios sem controle

A figura 11 demonstra os ensaios 1 e 2 com atuação de controle e sem atuação do controle respectivamente. A perturbação na variável concentração de corante na entrada do módulo de tratamento foi inserida aos 40 minutos com um acréscimo de 18% na concentração inicial do corante.

No ensaio 1 a média 1 teve o valor de 2,46 mg.L<sup>-1</sup> e a média 2 o valor de 1,64 mg.L<sup>-1</sup>. No ensaio 2 a média 1 teve o valor de 1,25 mg.L<sup>-1</sup> e a média 2 o valor de 2,07 mg.L<sup>-1</sup>.

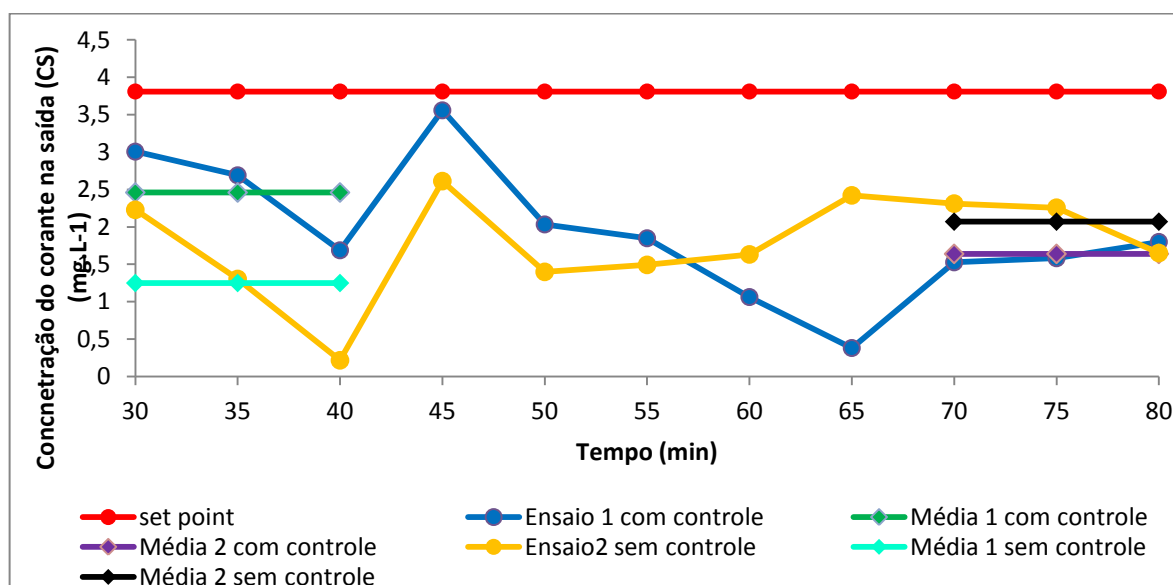


Figura 11 - Ensaio 1 e Ensaio 2 , resultados dos pontos experimentais.

O teste t de comparação de médias e o teste F de variâncias do ensaio 1 mostram que as médias e as variâncias entre as duas amostras foram iguais, para a perturbação de 18% a mais na concentração de entrada do sistema, o controle não foi significativo havendo um aumento no valor da corrente elétrica, (2,2 A para 2,7 A) fato considerado ruim para essa condição. Para o teste de médias e variâncias, o ensaio 2 teve a mesma resposta do ensaio anterior, ou seja, médias e variâncias iguais, para esse caso, o controle não foi efetivo, pois sem a ação do controle a corrente e a dosagem de extrato de moringa se mantiveram iguais e a saída após a perturbação ainda se manteve abaixo do set point estabelecido. Neste contexto, o controle atuou no sistema de modo a aumentar a intensidade de corrente e diminuir a dosagem do extrato de moringa sem que houvesse a necessidade.

Na figura 12 está demonstrado o ensaio 3 e 4 com e sem atuação de controle respectivamente. A perturbação teve um decréscimo de 18% em relação ao valor da concentração inicial.

No ensaio 3 a média 1 teve o valor de  $3,42 \text{ mg.L}^{-1}$  e a média 2 o valor de  $2,1 \text{ mg.L}^{-1}$ . No ensaio 4 a média 1 teve o valor de  $3,00 \text{ mg.L}^{-1}$  e a média 2 o valor de  $3,22 \text{ mg.L}^{-1}$ .

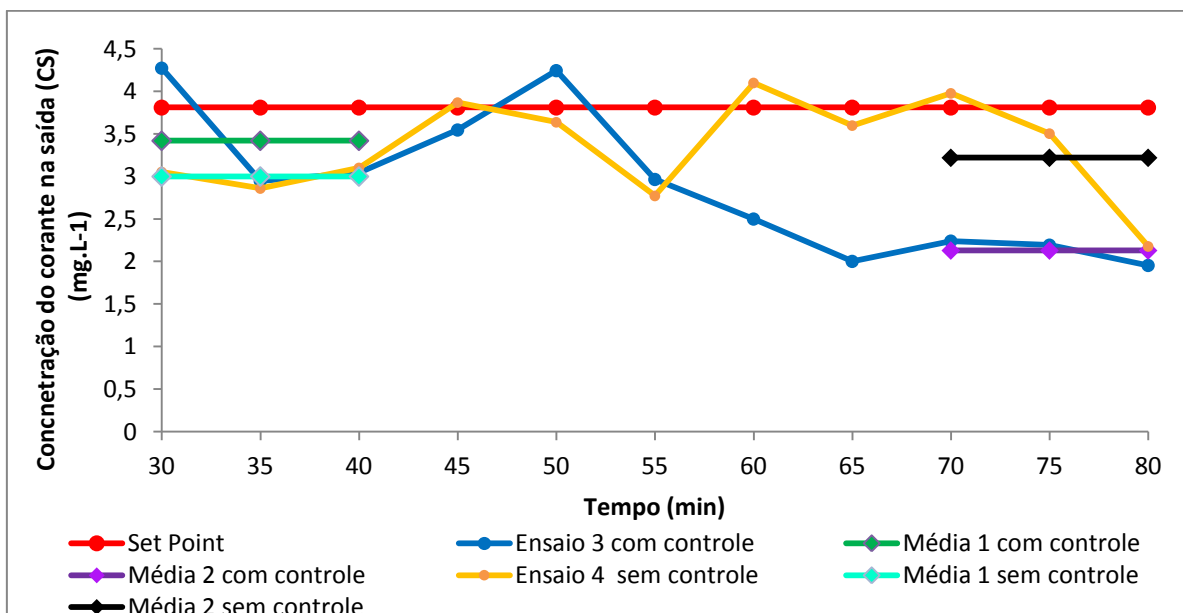


Figura 12 - Ensaio 3 e Ensaio 4, resultados dos pontos experimentais.

Para o ensaio 3 os testes t e teste F, demonstraram que as médias foram diferentes e as variâncias foram iguais havendo uma redução na concentração média 2 em relação à concentração média 1.



No ensaio 4 os testes t e F mostram que houve médias iguais e variâncias diferentes enquanto que no ensaio 4 foram iguais para ambas comparações.

Quando comparado os ensaios com e sem controle observa-se que houve uma efetiva ação do controle o qual reduziu a corrente elétrica de 2,2 (A) para 1,7 (A) e aumentou a dosagem de extrato de moringa de 872 mg.L<sup>-1</sup> para 1000 mg.L<sup>-1</sup>. Ressalta-se que além de reduzir a corrente elétrica empregada no processo, houve uma diminuição na concentração de saída do corante. Embora isto tenha distanciado mais a variável controlada do set point, avaliando-se sob o ponto de vista da eficiência do sistema de tratamento, este efeito foi interessante.

Na figura 13 está demonstrado o ensaio 5 e 6 com ação e sem de controle respectivamente. A partir destes ensaios todos tiveram duas perturbações, a primeira aos 40 minutos e a segunda aos 80 minutos.

A primeira perturbação teve um acréscimo de 14% da concentração inicial e a segunda perturbação um acréscimo de 12,8% da concentração da primeira perturbação.

No ensaio 5 a média 1 foi de 2,37 mg.L<sup>-1</sup>, a média 2 foi de 2,30 mg.L<sup>-1</sup> e a média 3 o valor de 2,11 mg.L<sup>-1</sup>. No ensaio 6 a média 1 foi de 2,58 mg.L<sup>-1</sup>, a média 2 foi de 3,69 mg.L<sup>-1</sup> e a média 3 de 2,17 mg.L<sup>-1</sup>.

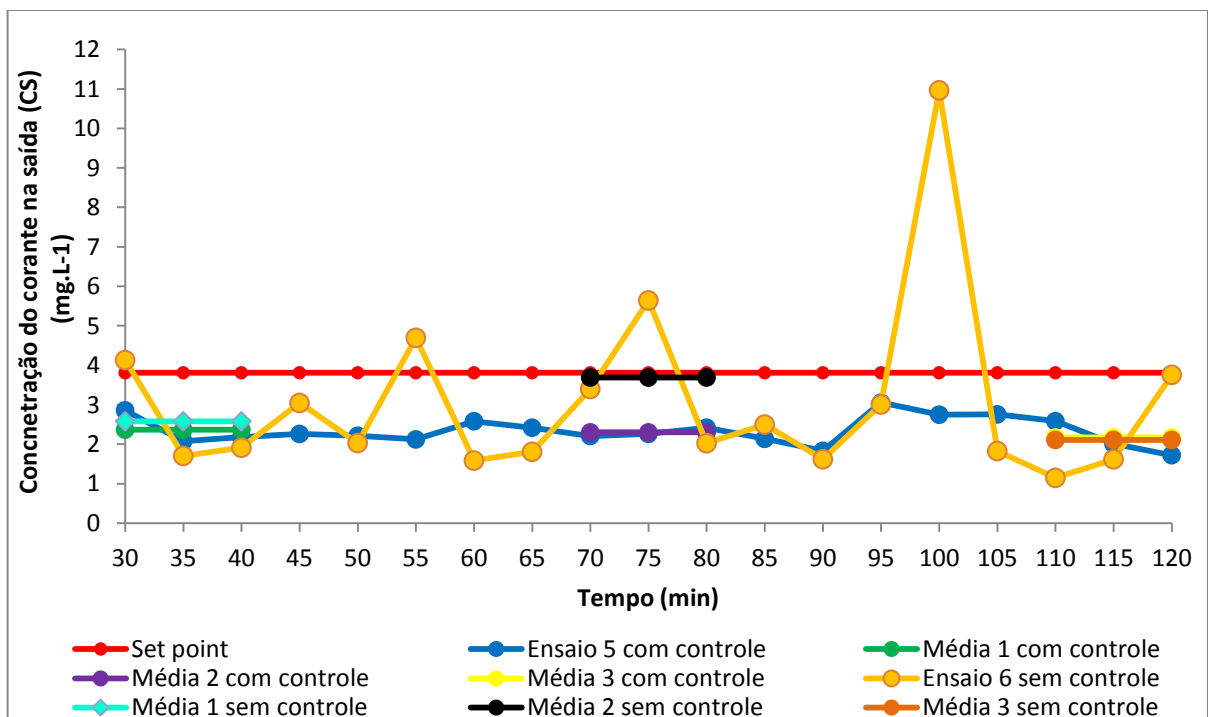


Figura 13- Ensaio 5 e ensaio 6, resultados dos pontos experimentais.

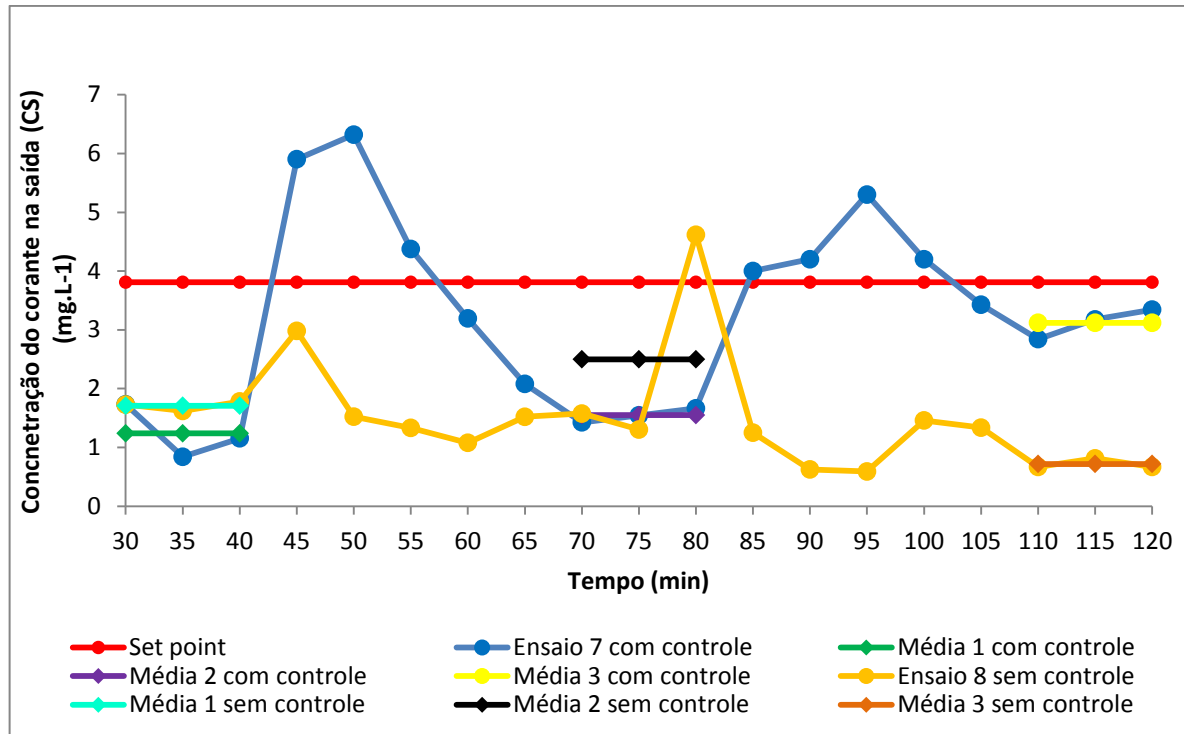
No ensaio 5, para os testes t e F as respostas de médias e variâncias foram iguais tanto para as médias quanto para variâncias entre as médias 1 e 2 e para as médias 2 e 3.

Os testes de comparação de média t e de variância F para o ensaio 6 forigual ao anterior com médias e variâncias iguais para todas as médias analisadas.

Comparando os dados dos ensaios 5 e 6 observa-se que para esse caso, o controle não foi significativo, pois com a ação do controle houve um aumento da corrente elétrica nas duas perturbações (2,54 A e 3,43 A) e sem a ação do controle a corrente e a dosagem de extrato de moringa se mantiveram iguais e as médias das concentrações após as perturbações ainda se mantiveram abaixo do set point estabelecido. Neste caso, o controle atuou no sistema de modo a aumentar a intensidade de corrente e diminuir a dosagem do extrato de moringa sem que houvesse a necessidade.

Na figura 14 estão demonstrados os ensaios 7 e 8 com ação e sem ação de controle respectivamente. A primeira perturbação teve um decréscimo de 14,4% da concentração inicial. A segunda perturbação teve um decréscimo de 16,4% da concentração da primeira perturbação.

No ensaio 7 a média 1 teve o valor de  $1,24 \text{ mg.L}^{-1}$ , a Média 2 o valor de  $1,55 \text{ mg.L}^{-1}$  e a média 3 o valor de  $3,12 \text{ mg.L}^{-1}$ . No ensaio 8 a média 1 teve o valor de  $1,71 \text{ mg.L}^{-1}$ , a média 2 de  $2,5 \text{ mg.L}^{-1}$  e a média 3 de  $0,72 \text{ mg.L}^{-1}$ .



**Figura 14 - Ensaio 7 e ensaio 8, resultado dos pontos experimentais.**

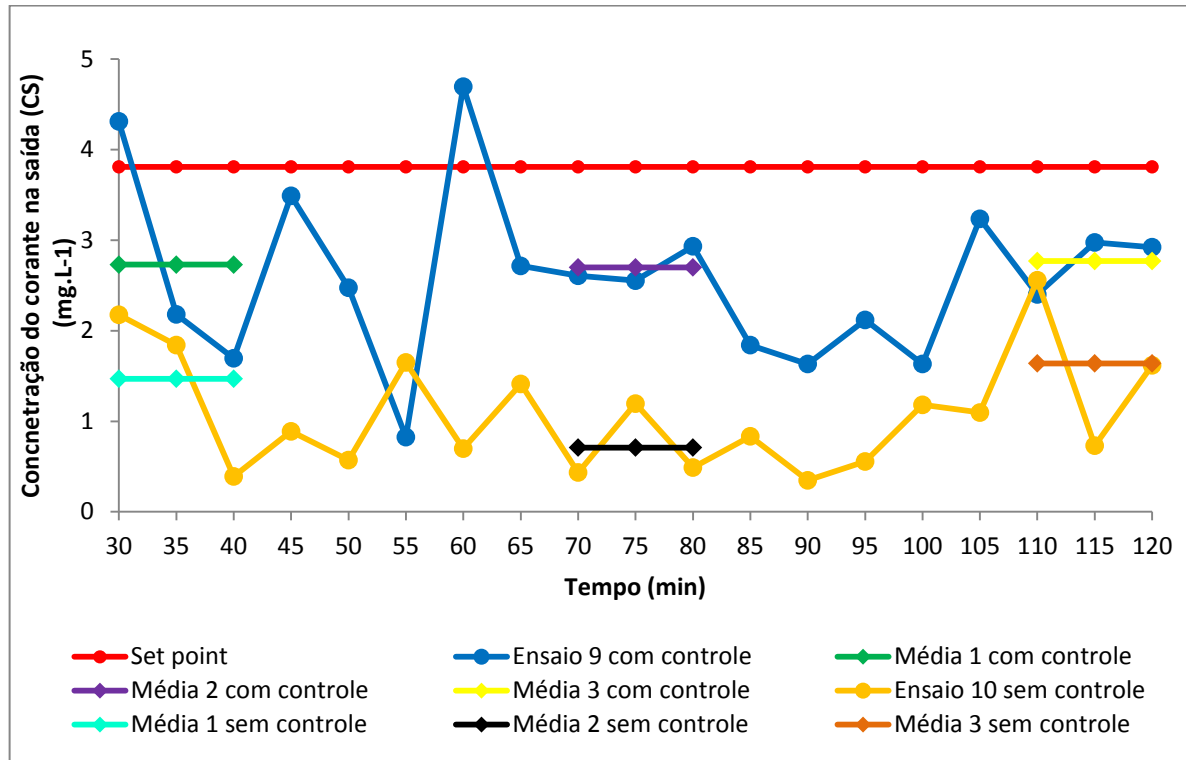
Para o ensaio 7 o teste t e o teste F deram a resposta de médias e variâncias iguais para as médias 1 e 2, porém médias diferentes e variâncias iguais para as médias 2 e 3.

No ensaio 8 as médias foram iguais e as variâncias diferentes para as médias 1 e 2 e médias iguais e variâncias diferentes para as médias 2 e 3.

Comparando os ensaios 7 e 8 observa-se que o controle foi significativo, pois atuou de maneira a reduzir a corrente elétrica para 1,73 A e aumentando a dosagem de extrato de moringa na primeira perturbação para 974,7 mg.L<sup>-1</sup> e reduzindo ainda mais a corrente elétrica para 1,34 A e também a dosagem de extrato de moringa para 500 mg.L<sup>-1</sup> na segunda perturbação. Em ambas as perturbações a concentração média de corante na saída do sistema ficou abaixo do set point estabelecido.

Na figura 15 estão demonstrados os ensaios 9 e 10, com ação e sem ação de controle respectivamente. A primeira perturbação teve um decréscimo de 14,4% da condição inicial e a segunda perturbação um acréscimo de 50,4% do valor da primeira perturbação.

No ensaio 9 a média 1 foi de  $2,73 \text{ mg.L}^{-1}$ , a média 2 de  $2,7 \text{ mg.L}^{-1}$  e a média 3 de  $2,77 \text{ mg.L}^{-1}$ . No ensaio 10 a média 1 foi de  $1,47 \text{ mg.L}^{-1}$ , a média 2 de  $0,71 \text{ mg.L}^{-1}$  e a média 3 de  $1,64 \text{ mg.L}^{-1}$



**Figura 15 - Ensaio 9 e ensaio 10, resultados dos pontos experimentais.**

Para o ensaio 9, os testes t e F informaram que para as médias 1 e 2 as médias foram iguais e as variâncias diferentes e para as médias 2 e 3 as médias e as variâncias foram iguais.

Para o ensaio 10 os testes t e F informaram que entre as médias 1 e 2 e médias 2 e 3 todas foram iguais.

Comparando os ensaios de controle e sem controle, nota-se que a ação de controle foi significativa, pois reduziu a corrente para  $1,73 \text{ A}$  e teve um aumento de extrato de moringa para  $974,7 \text{ mg.L}^{-1}$  na primeira perturbação e após a segunda perturbação aumentou a corrente elétrica para  $3,43 \text{ A}$  e diminui a dosagem do extrato de moringa para  $810 \text{ mg.L}^{-1}$ , mas em ambas as perturbações a variável controlada apresentou um valor de saída abaixo do set point estipulado.

## 6 CONCLUSÕES

Levando em consideração os resultados obtidos a partir dos ensaios do delineamento experimental e a análise estatística conclui-se que houve uma relação entre as variáveis de entrada do controle com a variável de saída comprovada com a validade do modelo obtido e a valor do erro apresentado nos ensaios de validação, com diferença menor que  $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ , podendo assim o modelo ser utilizado para prever a concentração de saída do corante, e esta variável ser utilizada como entrada da RNA.

Pôde-se ainda fazer uso do modelo para gerar dados para aquisição do banco de dados para treinamento e validação da rede.

O tratamento híbrido comprovou-se eficiente na remoção do corante reativo azul 5g de solução sintética destacando ainda a importância do coagulante natural conciliado a eletrofloculação para minimizar o consumo energético.

Pode-se concluir também que o controlador mostrou-se eficiente quando as perturbações inseridas no sistema foram perturbações negativas, ou seja, o novo valor da concentração do corante afluente diminuiu em relação ao valor da concentração de corante que estava alimentando o sistema, diminuindo os valores de corrente elétrica, fator importante nos termos de sustentabilidade, e garantindo que a concentração de corante na saída do tratamento não ultrapasse o valor de set point.

Nos casos de perturbações positivas, ou seja, o novo valor da concentração do corante afluente aumentou em relação ao valor da concentração de corante que estava alimentando o sistema, o controlador não se mostrou significativo o que se pode atribuir ao erro incluso no modelo matemático, tendo em vista que sua predição foi usada como variável de entrada pelo motivo de que a determinação *in line* da concentração de saída do corante não foi possível de se obter devido a interferência do ferro residual, assim o valor de *feedback* era predito pelo modelo matemático.

Pode-se supor ainda que a diferença de desempenho do modelo nos ensaios que foram utilizados para a sua obtenção (matriz DCCR e validação) e nos ensaios de controle pode estar relacionada à variabilidade da qualidade das sementes de *Moringa Oleífera* Lam.

Com essas diferenças o controle efetivou um tratamento o qual diminui ainda mais a concentração de saída, sem a necessidade de atuação, pois os valores iniciais preditos pelo modelo foram suficientes para garantir valores menores que o set point com as perturbações oferecidas.

Do ponto de vista ambiental essa condição pode ter seus benefícios, pois os valores de concentração de corante na saída do módulo de tratamento, mesmo onde o controle não foi significativo, sempre estiveram bem abaixo do valor de set point.

O sistema de controle mostrou-se robusto, pois absorveu os impactos das perturbações inseridas.

Sugere-se para trabalhos futuros a expansão da faixa de estudo, aumentando-se a concentração afluyente do corante, o que exigiria mais do sistema de controle.

Para melhores respostas do sistema notou-se a necessidade de se obter a medida da concentração do corante na saída do módulo para alimentar a RNA, “*in line*” o que evitaria possíveis erros devido a estimativa promovida pelo modelo ajustado para este fim.

## REFERÊNCIAS

AQUINO NETO, S; MAGRI, T. C; SILVA, G. M; ANDRADE, A. R. **Tratamento de Resíduos de Corante por Eletrofloculação: Um Experimento para Cursos de Graduação em Química.** Química Nova, v.34, n.8, p.1468-1471, 2011.

AKSU, Z. **Application of biosorption for the removal of organic pollutants: a review.** *Process Biochemistry*, v.40, p.997-1026, 2005. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003295920400158X>, acesso em 11 set. 2014, 10:00.

AL-DEGS, Y. S.; EL-BARGHOUTH, M. I.; EL-SHEIKH, A. H.; WALKER, G. M. **Effect of solution pH, ionic strength, and temperature on adsorption behavior of reactive dyes on activated carbon.** *Dyes and Pigments*, v. 77, p. 16–23, 2008. Disponível em: <https://eis.hu.edu.jo/deanshipfiles/pub104813800.pdf>, acesso em: 14 set 22:30.

ALVES, J. L. L. **Instrumentação, controle e automação de processos** . 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2010. x, 201 p.

ARANTES, Camila C.; RIBEIRO, Tulio A. P.; PATERNIANI, José E. S.. **Processamento de sementes de Moringa oleifera utilizando-se diferentes equipamentos para obtenção de solução coagulante.** *Rev. bras. eng. agríc. ambient.*, Campina Grande , v. 16, n. 6, p. 661-666, June 2012 . Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S141543662012000600011&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S141543662012000600011&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 04 Feb. 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662012000600011>.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I.S.; BRUNS, R.E. **Planejamento e otimização de experimentos.** Campinas: Editora Unicamp, 1996.

BASTIAN, E.Y.O. **Guia Técnico Ambiental da Indústria Têxtil.** São Paulo: CETESB – SINDITEXTIL, 2009. Disponível em: [http://www.inovacao.usp.br/APL/pdf/docs/guia\\_textil.pdf](http://www.inovacao.usp.br/APL/pdf/docs/guia_textil.pdf), acesso em: 12 set 2014, 15:00.

BOUSFIELD, P. SILVA, J. C. S. CHAPUIS, L.; **Uso de uma rede neural artificial para previsão do volume de lodo gerado em estações de efluente têxtil: um estudo de caso.** Domínio público - 2011 disponível em: [http://dimap.ufrn.br/csbc2011/anais/eventos/contents/WCAMA/Wcama\\_Sessao2\\_Artigo1\\_Bousfield.pdf](http://dimap.ufrn.br/csbc2011/anais/eventos/contents/WCAMA/Wcama_Sessao2_Artigo1_Bousfield.pdf). Acesso em 20 de fev. 2016.

BRAGA, A. de P.; CARVALHO, A. C. P. de L. F.; LUDERNIR, T. B. **Redes Neurais Artificiais Teoria e Aplicações.** LTC, 2000.

BRAILE, P. M.; **Manual de Tratamento de Águas Residuárias Industriais.** São Paulo: CETESB. (1979), 764 p.

CANEVESI, R.L.S.; et al, **Remoção do corante azul 5G pela macrófita *Salvinia sp.pré tratada***. Anais do I ENDITEC – Encontro de divulgação Científica e Tecnológica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná UTFPR, 2009.

CARDOSO, K. C; BERGAMASCO, R; COSSICH, E. S.; MORAES, L. C. K. **Otimização dos tempos de mistura e decantação no processo de coagulação/floculação da água bruta por meio da *Moringa oleifera* Lam.** Acta Sci. Tech., v. 30, n. 2, p. 193-198, 2008.

CERQUEIRA, A. A; MARQUES, M. R. da C. **Avaliação do processo eletrolítico em corrente alternada no tratamento de água de produção.** Quim. Nova, Vol. 34, No. 1, 59-63, 2011, Disponível em : <http://www.scielo.br/pdf/qn/v34n1/v34n1a12.pdf>

CERQUEIRA, A; RUSSO, C; MARQUES, M. R. C. **Electroflocculation For Textile Wastewater Treatment.** Brazilian Journal of Chemical Engineering, v.26, n.4, p.659-668, 2009.

CIARDELLI, G.; RANIERI, N. **The treatment and reuse of wastewater in the textile industry by means of ozonation and electroflocculation.** Volume 35, Issue 2, p. 567–572, 2001. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135400002864>, acesso em 12 set. 2014, 13:30.

DALLAGO, R.M.; SMANIOTTO, A.; OLIVEIRA, L.C.A. **Resíduos sólidos de curtumes como adsorventes para a remoção de corantes em meio aquoso.** *Química Nova*, v.28, n.3, p. 433-437, 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/qn/v28n3/24132.pdf> , acesso em: 11 set 2014, 13:00.

DEMUTH, H., BEALE, M., **Neural Network Toolbox User's Guide for Use with MATLAB®.** Version 4, Reading: Hagan, M., 2002 Cap. 5: Backpropagation. Disponível em: <http://www.mathworks.com/support/product/NN/>. Acesso em 15 set 2014, 09:00.

DIAS, F.F.S.; FILHO, O.C.; LIRA, R.M.; CARVALHO, F.O.; PACHECO, J.G.; **Degradação de corante Reative Black 5 via processo foto-Fenton com modelagem e otimização utilizando RNA.** Scientia Plena v9. n10, 2013. Disponível em: <http://www.nupeg.ufrn.br/foteq/pdf/degradacao%20de%20corante.pdf>. Acesso em 20 de fev 2016.

EYNG, E. **Controle *feedforward-feedback* aplicado às colunas de absorção do processo de produção de etanol por fermentação.** 2008. 177 f. Tese (doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, 2008.

EYNG, E. **Controle *feedforward* baseado em redes neurais aplicado em coluna de absorção do processo de produção de etanol.** 2006. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, 2006.



EYNG, E. et al. **Neural Network Based Control of an Absorption Column in the Process of Bioethanol Production**. 2009. Brazilian Archives of Biology and Technology, v. 52, p. 961-972, 2009. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1516-89132009000400020](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-89132009000400020), acesso em 16 set 2014, 19:00.

FIORIN, Daniel V. et al . **Aplicações de redes neurais e previsões de disponibilidade de recursos energéticos solares**. Rev. Bras. Ensino Fís., São Paulo , v. 33, n. 1, p. 01-20, Mar. 2011. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1806-11172011000100009&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172011000100009&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 04 Feb. 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-11172011000100009>.

GIORDANO, G. **Avaliação ambiental de um balneário e estudo de alternativa para controle da poluição utilizando o processo eletrolítico para o tratamento de esgotos**. Niterói – RJ, 1999. 137 p. Dissertação de Mestrado (Ciência Ambiental) Universidade Federal Fluminense, 1999.

GOMES, A. M. et al, **Estudo do processo de descoloração utilizando-se UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> do corante Iurazol bege Ib-Ic utilizado em curtumes**. 2009. XIII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e IX Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba. Disponível em: [http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC\\_2009/anais/arquivos/RE\\_0261\\_0049\\_01.pdf](http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2009/anais/arquivos/RE_0261_0049_01.pdf), acesso em: 11 set 2014, 13:30.

GONCALVES JUNIOR, A. C. et al . **Applicability of Moringa oleifera Lam. pie as an adsorbent for removal of heavy metals from waters**. Rev. bras. eng. agríc. ambient., Campina Grande , v. 17, n. 1, p. 94-99, Jan. 2013 Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S141543662013000100013&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S141543662013000100013&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 04 Feb. 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662013000100013>.

GUARATINI, C.C.I.; ZANONI, M.V.B.; **Corantes têxteis**. Revista Química Nova, p. 71 78. 2000. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/qn/v23n1/2146.pdf>. acesso em: 12 set 2014, 14:00.

HAYKIN, S. **Redes Neurais: Princípios e prática**. 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 900p.

KERNANI, B. G., SCHIFFMAN, S. S., NAGLE, H. T., **Performance of the Levenberg-Marquardt neural network training method in electronic nose applications**. Sensors and Actuators B, Elsevier B. V., 2005. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400505000961>. Acesso em: 15 fev.2016.

KOPRIVANAC, N., KUSIC, H., VUJEVI, D. et al **“Influence of iron on degradation of organic dyes in corona”** *Journal of Hazardous Materials* 117, pp. 113-119, 2005.

KOVÁCS, Z. L. **Redes neurais artificiais: Fundamentos e aplicações**. 3.ed. São Paulo: Livraria da Física, 2002. 174p.

KOVÁCS, Z. L. **Redes neurais artificiais: fundamentos e aplicações: um texto básico** - Zsolt L. Kovács - 4 ed. Ver.- São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006.

KROEFF, S.M.T; TEIXEIRA, F.G; **Contexto industrial têxtil brasileiro e as prospecções para apesquisa científica**. 2012. [S.l.]: Disponível em: [http://moda.feevale.files.wordpress.com/2012/11/cimode\\_original\\_samira.pdf](http://moda.feevale.files.wordpress.com/2012/11/cimode_original_samira.pdf), acesso em: 15 set. 2014, 18:30.

KUNZ, A.; PERALTA-ZAMORA, P.; DE MORAES, S.G.; DURAN, N. **Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis**. Química Nova, 25, No. 1, 78-82, 2002. Disponível em: <http://www.abqct.com.br/artigost/artigoesp23.pdf>, acesso 16 set 2014, 08:00.

LAMBRECHT, R., **Adsorção do corante azul 5G em carvão ativado e em xisto retornado**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2007.

LIBÂNIO, M.; **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**, 3ª edição - Editora - Átomo e Alínea, Campinas - São Paulo, 2010.

LO MONACO, P. A. V. et al. **Utilização de extrato de sementes de moringa como agente coagulante no tratamento de água para abastecimento e águas residuárias**. *Ambi – água*, Taubaté, v.5, n.3, p.221 – 231, 2010. (doi: 104136/ambi-agua.164). Disponível em: [www.ambi-agua.net/seer/index.php/ambi-agua/article/download/.../785](http://www.ambi-agua.net/seer/index.php/ambi-agua/article/download/.../785), acesso em 15 set 2015, 20:00.

LORA, E, S.; **Prevenção e controle da poluição nos setores energéticos, industrial e de transporte/Electo Silva Lora**. Brasília. ANEEL, 2000.

MUNIZ, G. L.; DUARTE, F. V.; OLIVEIRA, S. B. de. **Uso de sementes de Moringa oleifera na remoção da turbidez de água para abastecimento**. *Rev. Ambient. Água*, Taubaté, v. 10, n. 2, p. 454-463, June 2015 Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1980-993X2015000200454](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1980-993X2015000200454) Acesso em: 04 Feb. 2016. <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1439>.

MUYIBI, S. A.; EVISON, L. M. **Optimizing physical parameters affecting coagulation of turbid water with Moringa Oleifera seeds**. *Water Resources*, Fenix, v. 29, n. 12, p. 2689-2695, 1995. Disponível em: <http://www.Sciencedirect.com/science/article/pii/0043135495001336>, acesso em: 15 set 2015, 10:30.

NDABIGENGESERE, A.; NARASIAH, K.S. **Quality of water treated by coagulation using Moringa oleifera seeds**. *Water Research*, v.32, p.781-791, 1998. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135497002959>. Acesso em 04 Feb. 2016.

NDABIGENGESERE A.; NARASIAH, S. K.. **Influence of operating parameters on turbidity removal by coagulation with Moringa oleifera seeds**. *Environmental Technology*, v.17, p.1103-1112, 1996.

NISE, Norman S. **Engenharia de sistemas de controle**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 745 p.

NISHI, L; et al. **Coagulação/Floculação com Sementes de Moringa oleifera Lam para Remoção de Cistos de *Giardia spp.* e Cistos de *Cryptosporidium spp.* da água.** 3rd International Workshop | Advances in Cleaner Production. São Paulo – Brazil – 2011: Disponível em: [http://www.advancesincleanerproduction.net/third/files/sessoes/6B/4/Nishi\\_L%20-%20Paper%20-%206B4.pdf](http://www.advancesincleanerproduction.net/third/files/sessoes/6B/4/Nishi_L%20-%20Paper%20-%206B4.pdf), acesso em 13 set 2014, 17:00.

RODRIGUES, M. I.; LEMMA, A. F. **Planejamento de experimento e otimização de processos.** Editora Cárita – 3ª ed. Campinas – São Paulo, 2014.

RUMELHART, D. E.; HINTON, G.E.; WILLIAMS, R.J. **Learning representations by back-propagating errors.** Nature, 323, pp.533-536, 1986.

SALGADO, B. C. B.; et al . **Descoloração de efluentes aquosos sintéticos e têxtil contendo corantes índigo e azo via processos Fenton e foto-assistidos (UV e UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>).** Eng. Sanit. Ambient., Rio de Janeiro , v. 14, n. 1, p. 1-8, Mar. 2009 . Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1413-41522009000100001](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522009000100001). Acesso em 21 Feb. 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522009000100001>.

SANTOS, B.S. dos; **Sistema de tratamento híbrido utilizado na remoção do corante reativo 5G de um efluente têxtil.** Dissertação (Mestrado em Tecnologias ambientais) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais. Medianeira, 2015.

SOARES, F. C. et al . **Redes neurais artificiais na estimativa da retenção de água do solo.** Cienc. Rural, Santa Maria , v. 44, n. 2, p. 293-300, Feb. 2014. Available from <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-84782014000200016&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782014000200016&lng=en&nrm=iso)>. access on 05 Fev. 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782014000200016>.

TANYILDIZI, M. Ş. **Modeling of adsorption isotherms and kinetics of reactive dye from aqueous solution by peanut hull.** Chemical Engineering Journal, v.168, p.1234-1240, 2011. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894711001896>, acesso em : 13 set 2014, 21:00.

YUKSEL, E. et al. **Decolorization of a Reactive Dye Solution and Treatment of a Textile Wastewater by Electrocoagulation and Chemical Coagulation: Techno-Economic Comparison.** Environmental Progress & Sustainable Energy, 2011.