



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA - ITEC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL-PPGEC

VANESSA FARIAS FEIO

**VERIFICAÇÃO DA TRATABILIDADE DE ÁGUA RESIDUÁRIA ORIUNDA DE
BENEFICIAMENTO DO AÇAÍ POR PROCESSO FÍSICO-QUÍMICO**

BELEM
2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA - ITEC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL-PPGEC

VANESSA FARIAS FEIO

**VERIFICAÇÃO DA TRATABILIDADE DE ÁGUA RESIDUÁRIA ORIUNDA DE
BENEFICIAMENTO DO AÇAÍ POR PROCESSO FÍSICO-QUÍMICO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, para obtenção do título de Mestre, sob a orientação do Prof. Dr. Neyson Martins Mendonça.

BELÉM
2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA - ITEC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL-PPGEC

VANESSA FARIAS FEIO

**VERIFICAÇÃO DA TRATABILIDADE DE ÁGUA RESIDUÁRIA ORIUNDA DE
BENEFICIAMENTO DO AÇAÍ POR PROCESSO FÍSICO-QUÍMICO**

Data de Defesa: ___/ ___/ ___

Conceito: _____

Banca Examinadora

_____ – Orientador

Prof. Dr. Neyson Martins Mendonça
Universidade Federal do Pará

Prof^a. Dra. Luciana Coelho Mendonça
Universidade Federal de Sergipe

Prof^a. Dra. Luiza Carla Girard Teixeira
Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. André Luiz Salgado Coelho
Universidade Federal do Pará

BELÉM
2016

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me fortalecido durante a realização deste trabalho.

Aos meus pais, pelo incentivo e apoio para que eu finalizasse mais essa etapa da minha vida e a minha família por sempre acreditar e confiar em minha capacidade.

Aos todos os meus amigos, que sempre estiveram presentes, apoiando e incentivando o meu sucesso.

Ao meu orientador Prof. Dr. Neyson Martins Mendonça por mais esse trabalho, e por todos que já foram realizados ao longo dos anos trabalhando juntos.

A CAPES/CNPQ pelo apoio financeiro durante a realização deste trabalho.

Aos colegas do Grupo de Estudos em Gerenciamento da Água e Reuso de Efluentes (GESA) pelo incentivo e em especial aos que contribuíram diretamente para a concretização deste trabalho: Bruno, Yuri, Eduardo e Rodrigo.

Ao responsável pela fábrica de açaí e seus funcionários, que possibilitaram livre acesso para as coletas do esgoto e ofereceram as informações necessárias para elaboração deste trabalho.

Ao Frederico Giusti, representando a SNF Floerger, pela doação de alguns produtos químicos utilizados neste trabalho.

A todos que contribuíram direta e indiretamente para realização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo estudar a tratabilidade do efluente oriundo de fábrica de beneficiamento de açaí por meio de ensaios em *jar test* para obter a melhor condição para o tratamento físico-químico desse efluente. Para isso, o trabalho foi dividido em duas etapas experimentais: 1) Caracterização quantitativa e qualitativa do esgoto bruto para elaboração de hidrogramas de vazão e balanço hídrico; 2) Ensaios de coagulação/floculação/oxidação em *jar test*, utilizando cal hidratada, tanino, hipoclorito de sódio, policloreto de alumínio e polímero. Nos ensaios de tratabilidade, variou-se a dosagem de cada produto e foram analisadas no efluente clarificado as variáveis: pH, cor aparente, turbidez e DQO. Também foi determinado o índice de qualidade do efluente tratado e a caracterização qualitativa do efluente para o tratamento proposto, além da caracterização física do lodo. Além disso, foi estimado o custo mensal com produtos químicos para o tratamento proposto. Como resultados para caracterização quantitativa do esgoto foram obtidos as vazões de $Q_{\text{méd}}=305$ L/h; $Q_{\text{máx}}= 521$ L/h e $Q_{\text{mín}}= 183$ L/h, e $q_{\text{esp.}}$ de 0,51 L/kg.d. Para o balanço hídrico, foi verificado que a massa de água utilizada é de 112,4 ton/d, gerando 7,30 ton/d de esgoto, massa de água na polpa igual a 49,36 ton/d e perda de água de 55,81 ton/d. Para os ensaios de tratabilidade, foi obtido o melhor resultado para a combinação policloreto de alumínio (18 mg/L) e polímero (30 mg/L) em pH 8,0, resultando em remoção cor aparente de 98,5%; turbidez de 99,8% e DQO igual a 90%. Na caracterização física do lodo foram encontrados os valores: densidade igual a 1,002 e massa específica igual a 1001,8 kg/m³; teor de umidade igual a 98,9% e relação SV/ST igual a 73%. Na estimativa de custos com produtos químicos, foi obtido o valor de R\$4,77/mês, representando R\$ 0,022/ m³ de esgoto tratado. Concluiu-se que o tratamento deste efluente é viável por processo de tratamento físico-químico.

Palavras-chave: Tratamento físico-químico; Efluente de açaí; Tratabilidade; *Jar Test*.

ABSTRACT

This work aims to study the wastewater treatability coming from açai processing plant, through *jar test* assay to get the best conditions for the physical-chemical wastewater treatment. For this, two experimental steps were done: 1) Quantitative and qualitative characterization of raw wastewater to elaborate flow hydrograph and hydric balance. 2) Assay coagulation/flocculation/oxidation on *jar test* using hydrated lime, tannin, sodium hypochlorite, polyaluminium chloride and polymer. In treatability test dosage was varied for each product and analyzed in the clarified effluent variables: pH, apparent color, turbidity and COD. It was also determined the treated effluent quality index and the qualitative characterization of effluent of the proposed treatment, beyond the physical characterization of the sludge. Furthermore, it was estimated monthly cost of chemical products for proposed treatment. By the results for wastewater quantitative characterization were obtained flow of $Q_{\text{méd}} = 305 \text{ L/h}$; $Q_{\text{max}} = 521 \text{ L/h}$ and $Q_{\text{min}} = 183 \text{ L/h}$ and $q_{\text{esp.}}$ of 0.51 L/kg.d . To the water balance was found that weight of water used is 112.4 ton/d , generating 7.30 ton/d of wastewater, water in the pulp mass equal to 49.36 ton/d and water loss of 55.81 ton/d . For treatability tests the best result was obtained for the combination polyaluminium (18mg/L) and polymer (30 mg/l) at pH 8.0, resulting in apparent color removal 98.5%; 99.8% of turbidity and COD equal to 90%. In the physical characterization of sludge was found values: density of 1.002 and specific mass equal to 1001.8 kg/m^3 , moisture content of 98.9%, and the SV/ST equal to 73%. In the cost estimate with chemical products was obtained R\$4,77/month, representing R\$0,022/ m^3 of treated effluent. We conclude that this effluent treatment is viable for physical-chemical treatment process.

Keywords: Physical-chemical treatment; Açai effluent; Treatability; *Jar Test*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma de beneficiamento e geração de resíduos no processamento do açaí	8
Figura 2- Fluxograma de aplicação da análise de componentes principais.....	27
Figura 3- Etapas do processo produtivo. a) Descarregamento; b) Lavagem e amolecimento; c)Despolpamento; d) Peneiramento e embalagem.	29
Figura 4- Depósito de acondicionamento dos caroços utilizados no processo.....	29
Figura 5-Contribuições de água residuária para a caixa receptora final. a) caixa intermediária de esgoto. b) silo. c) caixa receptora final.	30
Figura 6: Fluxograma de delineamento experimental da pesquisa	31
Figura 7- Caixa receptora de água residuária	33
Figura 8- Ponto de coleta da água residuária.....	34
Figura 9- Gráfico de controle do processo da 1º campanha de medição de água	45
Figura 10- Gráfico de controle do processo da 2º campanha de medição de água	45
Figura 11- Gráfico de controle do processo da 3º campanha de medição de água	46
Figura 12- Hidrograma de vazão de água residuária das campanhas realizadas.....	47
Figura 13- Estimativa da variação de vazão de água residuária ao longo do tempo.....	49
Figura 14- Balanço hídrico de massa total da água das campanhas de medição.....	51
Figura 15- Influência da variação da dosagem de cal no efluente.....	55
Figura 16- Influência da variação da dosagem de Tanino no efluente. a) Amostras adicionadas de cal. b) Sobrenadante com dosagem de Tanino.	56
Figura 17- Influência da variação de dosagem de Hipoclorito de Sódio no efluente.....	57
Figura 18- Influência da variação da dosagem de PAC no efluente	59
Figura 19- Influência da variação da dosagem de polímero no efluente.....	60
Figura 20- Gráfico da variação de concentração de DQO no clarificado para todos os ensaios	61
Figura 21- Gráfico da variação de concentração de cor aparente no clarificado para todos os ensaios	61
Figura 22- Gráfico da variação de concentração de turbidez no clarificado para todos os ensaios	61
Figura 23- Variação do pH para otimização do resultado	63
Figura 24- Resultado do melhor ensaio de tratabilidade	64
Figura 25- Eficiência de remoção das principais variáveis físico-químicas do esgoto	65

Figura 26- Comparação visual entre o esgoto bruto e o efluente tratado	67
Figura 27- Gráfico de carga fatorial das CP1 e CP2	71
Figura 28- Gráfico de Scree Plot de autovalores para as CPs.	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Caracterização físicas e químicas da polpa de açaí liofilizada.....	9
Tabela 2- Caracterização dos elementos minerais na polpa de açaí liofilizada.....	10
Tabela 3: Características físico-químicas preliminares da água residuária de açaí.....	11
Tabela 4- Características de efluente de indústria têxtil e sua eficiência de remoção utilizando tanino como coagulante.	21
Tabela 5- Características de efluente de galvanoplastia e sua eficiência de remoção utilizando tanino como coagulante	22
Tabela 6- Características do efluente de galvanoplastia e sua eficiência de remoção utilizando sulfato de alumínio e cloreto férrico como coagulante.....	23
Tabela 7- Características do efluente de curtume e sua eficiência de remoção utilizando sulfato de alumínio e cloreto férrico como coagulante.....	24
Tabela 8- Características do efluente de fábrica de polímeros e sua eficiência de remoção utilizando sulfato de alumínio como coagulante e polímero aniônico como floculante	25
Tabela 9- Condições adotadas nos ensaios em <i>Jar test</i> com lixiviado de aterro sanitário	26
Tabela 10- Condições adotadas para os ensaios em <i>Jar test</i>	36
Tabela 11- Estatística descritiva das vazões de água	44
Tabela 12- Estatística descritiva das vazões de esgoto.....	47
Tabela 13: Características físico-químicas do efluente de processamento de açaí	52
Tabela 14- Resultados médios do ensaio para determinação da dosagem de cal.....	54
Tabela 15- Resultados médios do ensaio para determinação da dosagem de Tanino	55
Tabela 16- Resultados médios do ensaio para determinação da dosagem de Hipoclorito de Sódio.....	57
Tabela 17- Resultados do ensaio para determinação da dosagem de PAC	58
Tabela 18- Resultados do ensaio para determinação da dosagem de polímero.....	59
Tabela 19- Variação do pH para otimização do resultado.....	62
Tabela 20- Caracterização do efluente tratado	65
Tabela 21- Diretrizes para interpretar a qualidade de água para irrigação	68
Tabela 22- Características físicas do lodo gerado em <i>Jar test</i>	69
Tabela 23- Componentes obtidos para as variáveis físico-químicas.....	70
Tabela 24- Escores (IQET) obtidos para cada ensaio e ordem de classificação	72
Tabela 25- Estimativa de custo com produtos químicos para o tratamento proposto	74

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Metodologias de análises das variáveis físico-químicas	35
--	----

LISTA DE SIGLAS DE ABREVIATURAS

ACP	Análise de Componentes Principais
APHA	American Public Health Association
AWWA	American Water Works Association
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DP	Desvio Padrão
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EPA	Environmental Protection Agency
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
GESA	Grupo de Estudos em Gerenciamento de Água e Reúso de Efluente
IEC	Instituto Evandro Chagas
IVL	Índice Volumétrico de Lodo
IQET	Índice de Qualidade do Efluente Tratado
LAESA	Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental
LAMAG	Laboratório Multiusuário de Tratabilidade de Águas
MLD	Mínimo Limite Detectável
pH	Potencial Hidrogeniônico
RMB	Região Metropolitana de Belém
RPM	Rotação por minuto
SAMAM	Seção de Meio Ambiente
SST	Sólidos Suspensos Totais
SSV	Sólidos Suspensos Voláteis
TML	Tempo de Mistura Lenta
TMR	Tempo de Mistura Rápida
UFPA	Universidade Federal do Pará
TML	Tempo de Mistura Lenta
TMR	Tempo de Mistura Rápida
WEF	Water Environment Federation

SUMÁRIO

RESUMO.....	III
ABSTRACT	IV
LISTA DE FIGURAS.....	V
LISTA DE TABELAS.....	VII
LISTA DE QUADROS.....	VIII
LISTA DE SIGLAS DE ABREVIATURAS	IX
1. INTRODUÇÃO	4
2. OBJETIVOS.....	5
2.1 OBJETIVO GERAL.....	5
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
3. REVISÃO DE LITERATURA	6
3.1 PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DO AÇAÍ.....	6
3.1.1 Composição da polpa do açaí	8
3.2 ÁGUA RESIDUÁRIA ORIUNDA DO BENEFICIAMENTO DE AÇAÍ.....	10
3.3 TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO DE ESGOTO.....	11
3.3.1 Coagulação	12
3.3.2 Floculação.....	14
3.3.3 Sedimentação ou Flotação	15
3.3.4 Filtração.....	15
3.4 COAGULANTES E FLOCULANTES MAIS UTILIZADOS	15
3.5 OXIDAÇÃO.....	19
3.6 ENSAIOS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO.....	20
3.7 ESTATÍSTICA MULTIVARIADA.....	26
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	28
4.1 CARACTERÍSTICAS E DESCRIÇÃO DO PROCESSO PRODUTIVO DA INDÚSTRIA	28
4.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL.....	30
4.3 CARACTERIZAÇÃO QUANTITATIVA E QUALITATIVA DA ÁGUA RESIDUÁRIA	32

4.3.1 Estimativa de vazão de água e de água residuária	32
4.3.2 Estimativa de vazão de água residuária ao longo do tempo	33
4.3.3 Balanço de massa hídrico.....	33
4.3.4 Caracterização qualitativa da água residuária bruta	34
4.4 ENSAIOS DE TRATABILIDADE.....	35
4.4.1 Determinação da dosagem de cal	37
4.4.2 Determinação da dosagem de Tanino.....	37
4.4.3 Oxidação: determinação da dosagem de Hipoclorito de Sódio	37
4.4.4 Determinação da dosagem de Policloreto de alumínio (PAC).....	38
4.4.5 Determinação da dosagem de Polímero.....	38
4.4.6 Otimização do melhor resultado	38
4.5 ANÁLISE GLOBAL DE TRATABILIDADE	38
4.6 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO LODO GERADO NO TRATAMENTO PROPOSTO	39
4.6.1 Sólidos Sedimentáveis e Sólidos Totais.....	39
4.6.2 Teor de umidade	40
4.6.3 Densidade do lodo (ρ_{lodo}) e Massa específica	40
4.7 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS	40
4.7.1 Índice de Qualidade do Efluente Tratado (IQET)	41
4.8 ESTIMATIVA DE CUSTO COM PRODUTOS QUÍMICOS	42
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5.1 CARACTERÍSTICAS QUANTITATIVAS E QUALITATIVAS	44
5.1.1 Vazão de água	44
5.1.2 Vazão de água residuária.....	46
5.1.3 Estimativa de vazão de água residuária ao longo do tempo	49
5.1.4 Balanço hídrico de massa.....	50
5.1.5 Caracterização qualitativa da água residuária.....	51
5.2 ENSAIOS DE TRATABILIDADE EM JAR TEST	53
5.2.1 Ensaio 1- Determinação da dosagem de cal	54
5.2.2 Ensaio 2- Determinação da dosagem de Tanino	55

5.2.3 Ensaio 3- Oxidação: determinação da dosagem de Hipoclorito de Sódio	56
5.2.4 Ensaio 4- Determinação da dosagem de PAC	58
5.2.5 Ensaio 5- Determinação da dosagem de polímero	59
5.2.6 Ensaio 6- Otimização do melhor resultado	62
5.3 ANÁLISE GLOBAL DOS RESULTADOS	64
5.4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO LODO GERADO.....	69
5.5 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS	70
5.6 ESTIMATIVA DE CUSTO COM PRODUTOS UTILIZADOS NO TRATAMENTO PROPOSTO.....	73
6- CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

1. INTRODUÇÃO

O tratamento de águas residuárias industriais tem grande importância na conservação do meio ambiente, pois a composição desses efluentes inclui vários poluentes indesejáveis que devem ser removidos. Esses despejos industriais possuem uma enorme variedade de poluentes, em composição, volume e concentrações, tendo sua característica ligada a cada tipo de indústria e às vezes variam dentro do mesmo grupo de fabricação. Por isso, para escolha do melhor sistema de tratamento, deve-se analisar a especificidade de cada processo produtivo, considerando fatores técnicos, econômicos e ambientais.

A definição da tecnologia de tratamento a ser adotada muitas vezes depende da realização de ensaios em escala piloto ou bancada. Os ensaios de tratabilidade visam simular em *jar test* ou reatores estáticos, o processo de tratamento do efluente e suas condições de operação.

Em indústrias do setor de alimentos, entre os principais problemas ambientais estão o alto consumo de água e a geração de efluentes líquidos com alta carga orgânica, além da geração de um grande volume de lodo nas estações com tratamento biológico (BETTO *et al.*, 2013). A vazão dessas indústrias é caracterizada por altas concentrações de sólidos em suspensão e matéria orgânica compostos em níveis altamente variáveis (KELLER *et al.*, 2013).

A indústria de beneficiamento de açaí, foco dessa pesquisa, vem se mostrando promissora de interesses econômicos devido às suas diversas possibilidades de utilização, desde a alimentação até a fabricação de energéticos, cosméticos, etc. Ao curso de cinco anos, a fabricação desse produto aumentou e tem importância fundamental para a sociedade paraense, pois além de produzir alimento de alto valor nutricional para as diversas camadas sociais, principalmente para as camadas mais baixas, ele gera emprego e renda (EDER, 2011).

A partir desse cenário, neste trabalho são propostos ensaios em *jar test* para tratabilidade de água residuária oriunda de indústria de beneficiamento de açaí por processo físico-químico, por ser um mercado com forte crescimento e ter necessidade de conhecimento da qualidade da água residuária gerada, além da definição da solução mais adequada ao tratamento desta, haja vista o lançamento sem tratamento de muitas indústrias deste setor e a necessidades das mesmas a se adequarem a legislação ambiental (resoluções do CONAMA nº 430/2011, normas ABNT e etc.) quanto ao licenciamento ambiental.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a tratabilidade de águas residuárias de beneficiamento do açaí por processo físico-químico mediante ensaios em *jar test*.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar quantitativamente e qualitativamente água residuária bruta;
- Realizar um balanço de massa hídrico acerca da água utilizada no beneficiamento do açaí;
- Verificar a influência dos coagulantes/floculantes no tratamento da água residuária;
- Conhecer a qualidade do efluente gerado no melhor ensaio;
- Verificar a possibilidade de reuso do efluente tratado para irrigação;
- Caracterizar o lodo gerado no ensaio proposto;
- Criar um índice de qualidade do efluente tratado por meio de análise estatística e verificar as variáveis mais significantes neste efluente;
- Realizar estimativa de custo dos produtos utilizados no tratamento proposto.

3. REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo serão reportados e discutidos a revisão de literatura sobre processos de beneficiamento do açaí e a problemática da geração de resíduos neste, além da abordagem sobre tratamento físico-químico de águas residuárias por meio de coagulação/floculação, mediante uso de produtos químicos e polímeros como auxiliares neste tipo de tratamento.

3.1 PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DO AÇAÍ

O Açaí (*Euterpe oleracea Mart.*) é uma palmeira tropical que ocorre naturalmente na região amazônica. Seus frutos esféricos variam de cor: são verdes quando jovens e amadurecem, geralmente, para um roxo escuro. Normalmente os frutos são usados para preparar um líquido com textura cremosa e misturá-lo com diferentes quantidades de água, produzindo a polpa de açaí. Na região amazônica, o açaí está integrado na dieta diária dos povos nativos, sendo normalmente usado nas principais refeições para o almoço ou jantar (STRUDWICK & SOBEL, 1988 e LICHTENTHÄLER *et al.*, 2005 apud GORDON *et al.*, 2012).

As etapas do beneficiamento vão desde a colheita até o despulpamento como mostrados nas etapas a seguir.

- **Colheita:** Os frutos são colhidos nos altos do açaizeiro, de maneira tradicional, de forma manual com a utilização da peçonha.
- **Pós-colheita:** Ao descer faz-se liberação dos frutos do cacho (debulha) e sua seleção manual, que segundo Vasconcelos e Alves (2006), são selecionados considerando a coloração ou estágio de maturação.
- **Acondicionamento:** são acondicionados em cestos ou paneiros, de forma a propiciar condições de boa aeração, para melhor conservação destes. Podem ser utilizados para o acondicionamento, também caixas de plásticos com boa aeração.
- **Armazenamento:** Os frutos são armazenados em locais exclusivos para estocagem de açaí e mantidos à temperatura ambiente.
- **Transporte:** O transporte normalmente é realizado por meio fluvial, em embarcações de pequeno porte e nas primeiras horas da manhã, devido à baixa temperatura, para garantir a boa conservação dos frutos.

As etapas posteriores dependem do destino dos frutos, podendo ser despolpamento em pontos comerciais ou em fábricas específicas de fabricação de polpa. Serão utilizadas aqui as etapas utilizadas em uma agroindústria de processamento do fruto.

Após a recepção dos frutos é feita uma pré-lavagem com água de boa qualidade para retirar as impurezas presentes e depois disso os frutos são enxaguados. Posteriormente é feita a separação dos frutos de melhor qualidade em mesa de aço inox e segue para as etapas de maceração seguido do despolpamento do fruto.

Segundo Xavier *et al.* (2006) no despolpamento há a separação de em média 30% de massa do fruto que se transformará em polpa e os 70 % são de resíduos. Estes 70% são novamente lavados, agitados e peneirados. A parte líquida, que corresponde à água residual (15%) será encaminhada para devido tratamento. A fração sólida é seca e armazenada para destinação adequada. Estes resíduos sólidos representam uma parcela de aproximadamente 55% que se constituem basicamente nos caroços e fibras do açaí e podem ser utilizada para diversos fins, como geração de energia elétrica, fabricação de artesanato, adubação orgânica, utilização de meio filtrante em tratamento de água e efluente, etc.

Na Figura 1 é apresentado o fluxograma do beneficiamento e geração de resíduos provenientes das etapas que foram comentadas anteriormente.

Figura 1: Fluxograma de beneficiamento e geração de resíduos no processamento do açaí



Fonte: Autor (2014)

3.1.1 Composição da polpa do açaí

A polpa de açaí é um alimento energético e saudável, sendo fonte de fibras, proteínas, vitaminas e minerais, além de um alto teor de antocianinas em sua composição. Segundo Menezes *et al.*(2008), as antocianinas que são pigmentos hidrossolúveis responsáveis pela coloração avermelhada do fruto e se tornaram conhecidas por suas diversas propriedades farmacológicas e medicinais, incluindo anticarcinogênicas, anti-inflamatória e antimicrobiana, prevenindo a oxidação de proteínas de baixa densidade, enfermidades cardiovasculares e doenças neurológicas.

Nas regiões produtoras de polpa, normalmente esta é comercializada e consumida após sua produção ou após pouco período de refrigeração, devido sua fácil degradação. Porém, quando se destina a comércios distantes, a polpa é congelada. Para Menezes *et al.* (2008), essa técnica de conservação provoca danos irreversíveis ao alimento, como perdas

vitamínicas e alteração de cor que modificam as propriedades originais. Por isso, o referido autor estudou a caracterização nutricional por uma técnica que conservasse as características originais da polpa, obtendo bons resultados com a técnica de liofilização. As polpas utilizadas são do tipo grosso, adquiridas em estabelecimento comercial localizado em Belém-PA. Na Tabela 1, são apresentados os resultados obtidos neste estudo.

Tabela 1- Caracterização físicas e químicas da polpa de açaí liofilizada

PARÂMETRO	RESULTADOS
Umidade (g/100g)	4,92
Cinzas (g/100g)	3,68
Calorias (Kcal/100g)	489,39
Proteínas (g/100g)	8,13
Lipídios (g/100g)	40,75
Carboidratos totais e fibras (g/100g)	42,73

Fonte: Adaptado Menezes *et al.* (2008).

Observa-se que o teor de umidade considerando a polpa de 1Kg, chega ao valor de 49,2 g que é considerado baixo mesmo para a polpa tipo A (grosso), porém isso provavelmente ocorre em virtude da técnica de conservação testada, em que parte da água livre é sublimada. O alto valor de calorias também se deve a maior concentração de sólidos totais que apresenta maior concentração de nutrientes calóricos. Destaca-se o alto valor de carboidratos encontrados que, segundo o autor, pode ter sido mascarado pelo teor de fibras, pois estas contêm quantidades bastante expressivas na polpa. Também foi realizada a caracterização dos elementos minerais presentes na polpa liofilizada. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2- Caracterização dos elementos minerais na polpa de açaí liofilizada

MINERAL	RESULTADOS (mg/100g de polpa)
Cálcio	330
Potássio	900
Sódio	28,5
Magnésio	124,4
Alumínio	0,36
Manganês	10,71
Cobalto	0,009
Cobre	2,15
Cádmio	< 0,0002
Ferro	4,5
Selênio	< 0,02
Zinco	2,82

Fonte: Adaptado Menezes *et al.* (2008).

Destaca-se a abundante presença dos minerais Cálcio e Potássio que são importantes para várias reações metabólicas no organismo, além do Magnésio que tem papel importante no metabolismo de carboidratos, lipídios e proteínas. Percebe-se que a polpa de açaí é um excelente alimento nutricional a ser incorporado nas refeições de indivíduos com baixo peso para um bom desenvolvimento e funcionamento do corpo humano.

3.2 ÁGUA RESIDUÁRIA ORIUNDA DO BENEFICIAMENTO DE AÇAÍ

Os resíduos líquidos provenientes das indústrias do setor de alimentos podem causar danos quando descartados inadequadamente, devido sua carga de poluente. Essa carga é principalmente em virtude do efluente apresentar elevadas concentrações de matéria orgânica, podendo ser encontrada também alta concentração de nutrientes e sólidos suspensos. Essa água residuária deve ter tratamento adequado antes de seu lançamento.

Feio *et al.* (2014) realizou estudo utilizando a água residuária de beneficiamento de açaí em pontos de venda, que normalmente tem como fonte de água residuária, a água de amolecimento do fruto e de lavagem da máquina despulpadeira. As amostras foram coletadas em pontos de vendas comerciais. Algumas variáveis físico-químicas, tais como pH, Demanda

Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO), nitrogênio amoniacal e fósforo total foram analisadas tendo como resultados, os mostrados na Tabela 3.

Tabela 3: Características físico-químicas preliminares da água residuária de açaí

VARIÁVEIS	RESULTADOS (Média±D.P)
pH	5,3 - 5,5
DBO (mg/l)	823 ± 40
DQO (mg/l)	7720 ± 500
N-amoniacoal (mg/l)	2,65 ± 0,3
Fósforo Total (mg/l)	2,5 ± 0,3

Fonte: FEIO *et al.* (2014)

Os valores pH encontrado nessa análise preliminar, entre 5,3 e 5,5 deve ocorrer devido ao baixo valor de pH da polpa que de acordo com DOU (2000) pode variar de 4,0 a 6,2. As concentrações matéria orgânica obtidas foram de 823 mg DBO/L e 7720 mg DQO/L. A alta concentração média de matéria orgânica representa valores bem acima das concentrações encontradas tipicamente em esgoto doméstico.

Com isso, os resultados preliminares encontrados mostram que a problemática dessa água residuária se concentra principalmente no alto teor de matéria orgânica, que neste caso é lançada sem receber tratamento algum, podendo causar vários inconvenientes de maior ou menor importância de acordo com os efeitos adversos que podem causar aos usos benéficos da água. Entre esses inconvenientes estão o consumo de oxigênio dissolvido devido à degradação de grande quantidade de matéria orgânica e lançamento de nutrientes, que pode causar eutrofização nos corpos receptores (VIEIRA & HENKES, 2014).

3.3 TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO DE ESGOTO

Os processos de tratamento de esgoto existentes podem ocorrer de três maneiras: processos físicos, processos químicos e processos biológicos. A utilização de cada processo depende das características do efluente, ou seja, dos poluentes que se deseja remover.

A combinação de processos físico-químicos mais utilizados no esgoto é a coagulação/floculação, no qual há uma separação sólido-líquido para obter a remoção de substâncias suspensas, dissolvidas e coloidais. Para Song (2004), estas substâncias normalmente consistem em grande parte de minerais de argila e matéria protéica em tamanhos

muito diferentes. As taxas de sedimentação dessas substâncias são tão lentas que removê-las do esgoto por sedimentação simples é impossível. Geralmente é rentável aplicar a coagulação seguida de floculação para remover as partículas pequenas e coloidais que se depositam lentamente.

A seguir será conceituado e discutido sobre os processos físico-químicos mencionados acima.

3.3.1 Coagulação

A coagulação de águas e esgotos se define como em todas as reações e mecanismos envolvidos na desestabilização química das partículas coloidais e na formação de partículas maiores através da floculação pericinetica (METCALF & EDDY, 2003).

É um dos estágios mais importantes do tratamento físico-químico dos esgotos industriais, pois nele ocorre a redução de materiais suspensos e coloidais, responsáveis pela turbidez e também ocorre a redução de matéria orgânica a qual contribui para o conteúdo de DBO e DQO (ARVANITOYANNIS & KASSAVETI, 2008 apud SCHMITT, 2011).

Segundo Neves (2011), o processo de coagulação descreve o efeito da adição de um produto químico a uma dispersão coloidal. As partículas coloidais presentes em um meio aquoso em geral desenvolvem cargas elétricas na interface com a água devido à adsorção de íons (principalmente hidroxilas) presentes na água e dessa forma, forças elétricas repulsivas atuam sobre os colóides criando uma barreira que previne a agregação e dificulta a sedimentação, barreira esta que deve ser eliminada para permitir que as partículas se aglomerem.

Segundo Aisse (2001), o processo de coagulação é responsável pela remoção de DBO no esgoto bruto entre 70% e 75% e remoção de sólidos suspensos entre 95% e 98%.

Para Schmitt (2011), na coagulação, um ponto essencial do processo é a dosagem e a condição ótima para aplicação do coagulante, etapa de grande importância no tratamento, uma vez que etapas subsequentes dependem desta. Isso ocorre devido às reações químicas envolvidas no processo são muito rápidas e dependem da energia de agitação, da dose do coagulante, do pH e da alcalinidade da água.

Os mecanismos de coagulação podem ocorrer das seguintes maneiras: compressão da dupla camada, adsorção e neutralização de cargas, varredura e adsorção e formação de pontes.

- Compressão da dupla camada

O mecanismo de compressão da dupla camada elétrica acontece quando contra-íons de carga elevada, são adicionados a uma dispersão coloidal. Essas espécies penetram na dupla camada difusa que circunda os colóides tornando-a mais densa, fina e com menor volume, o que favorece a redução das forças eletrostáticas de repulsão entre as partículas contribuindo para a desestabilização da dispersão coloidal (DI BERNARDO E DANTAS, 2005 apud GUIMARÃES, 2013).

O aumento de íons positivos e negativos acarreta o acréscimo do número de íons na camada difusa que, tem seu volume reduzido para manter-se eletricamente neutra, de modo que as forças de Van Der Waals sejam dominantes, eliminando a estabilização eletrostática (DI BERNARDO, 1993 apud CARVALHO, 2008).

- Adsorção e neutralização de cargas

A desestabilização de uma dispersão coloidal consiste nas interações entre coagulante-colóide, coagulante-solvente e colóide-solvente.

Algumas espécies químicas são capazes de serem adsorvidas na superfície da partícula coloidal. Como tais espécies são de cargas contrárias à da superfície dos colóides, ocorrerá a desestabilização. Esta é causada pelo coagulante em dosagens bem inferiores ao mecanismo da dupla camada (LOPES, 2011).

- Varredura

Segundo Cruz (2004), neste mecanismo são adicionadas quantidades relativamente grandes de coagulantes (normalmente sais de ferro ou alumínio) que precipitam na forma de hidróxido. Alguma neutralização da carga ocorre, mas como o coagulante é adicionado em excesso, os colóides são aprisionados no floco de precipitado metálico sendo literalmente “varridos” do meio.

- Adsorção e formação de pontes

Ocorre quando um coagulante (normalmente polímeros) se adsorve primeiramente a um coloide, capturando-o, e depois se liga a diversos outros formando uma malha ou entrelaçamento que mantém todos unidos (CRUZ, 2004).

Para Carvalho (2008), o comportamento dos polímeros como coagulantes pode ser explicado baseando-se na sua adsorção à superfície das partículas coloidais, seguida pela redução da carga ou pelo entrelaçamento das partículas na cadeia do polímero.

Ainda para Cruz (2004), a formação de pontes pode ser empregada de forma complementar aos mecanismos anteriores para produzir flocos resistentes e de rápido crescimento.

3.3.2 Floculação

O processo de coagulação, em algumas circunstâncias pode resultar em flocos pequenos e/ou frágeis, capazes de se romper quando submetidos a forças físicas. Para solucionar este problema e obter um efluente de boa qualidade através da otimização da sedimentação dos flocos, é necessário que haja o processo de floculação.

O processo de floculação consiste na utilização de floculantes para reunir e aglomerar os pequenos flocos de sedimentação lenta (partículas desestabilizadas) formados pelo coagulante a fim de formar flocos maiores e mais densos, facilitando assim a sua remoção por fases de sedimentação, flotação e de filtração subsequentes (LEE *et al.*, 2014).

A floculação ocorre sob condições de agitação lenta. Os gradientes que produzem tensão cisalhante nos flocos existentes são limitados para que não ultrapassem a capacidade de resistência ao cisalhamento dessas partículas (SCHOENHALS, 2006 apud SCHMITT, 2011).

Na floculação, assim como na coagulação, a dosagem do produto e o pH devem ser testados para se obter as melhores condições de reações do floculante no processo.

As principais variáveis de processo que são comumente medidos para justificar a eficiência de floculação incluem taxa de sedimentação dos sólidos, o índice de volume do lodo (IVL), porcentagem de sólidos sedimentados, turbidez, a porcentagem de remoção de poluentes ou recuperação de água, dependendo da aplicação industrial. Todas estas variáveis

de saída são, manifestações do floco ou a distribuição de sua dimensão, forma e estrutura durante o processo de floculação (LEE *et al.*, 2014).

3.3.3 Sedimentação ou Flotação

Após a floculação, segue-se a sedimentação ou flotação. A sedimentação que representa o fenômeno físico em que as partículas em suspensão apresentam movimento descendente em meio líquido devido à ação da gravidade e a flotação ocorre pela ascensão das partículas suspensas e aderência de microbolhas de ar às mesmas.

A sedimentação ou flotação das partículas suspensas proporciona a clarificação da água pela separação das fases líquida e sólida.

Segundo Neves (2011), no processo de sedimentação, quanto maior for a velocidade de sedimentação, menor será o tempo necessário para a clarificação da água. E quanto maior o tamanho dos flocos mais facilmente o fenômeno de decantação é pronunciado.

3.3.4 Filtração

A filtração consiste na remoção de partículas suspensas, coloidais e micro-organismos presentes na água através da percolação da água em meio granular.

O uso da filtração é uma etapa para melhoria das características físicas, químicas e bacteriológicas da água.

Neves (2011) cita que seus mecanismos são distintos, porém complementares: transporte e aderência em sistemas porosos. Em primeiro lugar as partículas devem se aproximar das superfícies dos grãos e, posteriormente, permanecer aderidas a estes, de modo a resistir às forças de cisalhamento ao longo do meio filtrante.

3.4 COAGULANTES E FLOCULANTES MAIS UTILIZADOS

Existem diversos produtos utilizados como coagulantes de origem química e vegetal. Segundo Vaz *et al.* (2010), os principais coagulantes químicos utilizados são: sulfato de alumínio, cloreto férrico, hidroxicloreto ou policloreto de alumínio e sulfato férrico. Já os coagulantes de origem vegetal estão sendo investigados, uns mais que outros.

A coagulação é induzida principalmente por sais de metais inorgânicos, tais como sulfato de alumínio e cloreto férrico. Em alguns casos, estes sais de metais podem ser utilizados no tratamento de esgoto, sem a assistência de floculante. Atualmente o uso de coagulantes inorgânicos foi reduzido devido à sua ineficiência no tratamento de efluentes com pequena dosagem e aplicação limitada. Na maioria dos casos, floculantes poliméricos são preferíveis para facilitar o processo de separação, quer com ou sem coagulante (LEE *et al.*, 2014).

Os coagulantes convencionais só têm eficiência se a água bruta contiver alcalinidade natural ou adicionada, caso contrário não ocorrerá a coagulação/floculação, devido ao excesso de prótons liberado pelo coagulante (BORBA, 2001 apud CARVALHO, 2008).

A escolha do tipo de coagulante é geralmente feita considerando principalmente a viabilidade econômica e a característica do esgoto, sendo realizados testes experimentais com os produtos para auxiliar a decisão.

A seguir será relatado sobre alguns coagulantes químicos e de origem vegetal comumente utilizados no tratamento físico-químico.

- Sulfato de alumínio

Os sais de alumínio são agentes inorgânicos não biodegradáveis que acrescentam elementos químicos à água ou ao lodo. Segundo Vaz (2009) apud Silva (2011), estes apresentam baixo custo, porém algumas pesquisas apontam para problemas causados pelo alumínio residual (uma grande produção de lodo e consumo da alcalinidade do meio), o que ocasiona custos adicionais ao tratamento devido a correções que devem ser feitas com outros produtos químicos para correção de pH.

Para Vaz *et al.* (2010), a principal dificuldade do processo se destaca o lodo inorgânico gerado, que é de difícil manuseio por parte das empresas em função de seu volume e do elevado teor de umidade.

- Policloreto de Alumínio (PAC)

O Policloreto de Alumínio é um composto inorgânico, completamente solúvel em água e com alta eficiência na floculação em uma grande faixa de pH, remove

eficientemente a carga orgânica/inorgânica do líquido a ser tratado. Para Pavanelli (2001), o PAC se revela como coagulante superior ao sulfato de alumínio. Para a eliminação de substâncias coloidais, sua eficácia, em média, é 2,5 vezes superior em igualdade de dosagem ao íon Al^{3+} dos outros sais de alumínio habitualmente utilizados.

O PAC apresenta algumas vantagens na floculação em relação aos demais coagulantes inorgânicos, devido seu estado prepolimerizado, sua estrutura molecular e principalmente pela maior concentração do elemento ativo (Al_2O_3).

- Cloreto férrico

A utilização de cloreto férrico diminui drasticamente a turbidez e DBO, elimina fosfatos e alguns metais pesados também são eliminados, quando a coagulação é realizada em valores elevados de pH (PAVANELLI, 2001).

Segundo Lopes (2011), o cloreto férrico também é eficiente na remoção de sólidos suspensos. Este coagulante normalmente é dosado juntamente com a cal ou hidróxido de sódio, que ajudam na produção de flocos e aumentam o pH do meio.

- Polímeros

Polieletrólitos são polímeros que atuam como auxiliares no processo de tratamento de água e efluentes, pois tem a função de transformar os coloides formados durante a etapa de coagulação em flocos de maior diâmetro e mais pesados, favorecendo o aumento da velocidade de decantação (MOREIRA, 2011).

Os polieletrólitos podem ser divididos em duas categorias: natural e sintéticos. Importantes polieletrólitos naturais incluem polímeros de origem biológica e aqueles derivados de produtos de amido, tais como derivados de celulose e alginatos. Os polieletrólitos sintéticos consistem em monômeros simples que são polimerizados em substâncias de elevado peso molecular. Dependendo se a sua carga, quando colocado em água, é negativa, positiva ou neutra, estes polieletrólitos são classificados respectivamente como: aniônico, catiônico e não iônico (METCALF & EDDY, 2003).

- Tanino

Alguns coagulantes são orgânicos biodegradáveis, como os coagulantes à base de tanino. Segundo Couto Junior *et al.* (2012), este coagulante à base de tanino é extraído da casca da planta Acácia negra ou mimosa, e tem como vantagens o menor volume de lodo produzido, além do não consumo da alcalinidade do meio.

O Tanino é um polieletrólito catiônico, de natureza fenólica, capaz de precipitar principalmente proteínas, de acordo com Mota e Von Sperling (2009). Sua adição não altera o pH do meio, sendo efetivo na faixa de pH entre 4,5 e 8,0.

Segundo Vaz (2009) apud Silva (2011), o uso de agentes coagulantes naturais, como no caso de taninos vegetais, apresenta vantagens pela menor contribuição de ânions sulfatos no lodo final, menor volume de lodo e obtenção de um lodo orgânico que pode ser disposto mais facilmente sem muita agressão ambiental.

Ainda para este autor, o coagulante natural pode ser usado de forma individual ou juntamente com outros sais coagulantes tradicionais, agindo como um auxiliar no tratamento de águas, principalmente nos casos em que as águas apresentam elevada turbidez, para as quais somente o uso de sulfato de alumínio não é indicado.

Para Mangrich *et al.* (2014), no tratamento de efluentes industriais, o tanino (acácia negra) combinado com dietanolamina, cloreto de glicidiltrimetilamônio ou cloreto de amônio produz também eficientes coagulantes.

- Hidróxido de cálcio (Cal hidratada)

A cal hidratada é considerada um auxiliar de coagulação quando promove a coagulação, ajustando o pH para um valor ótimo para a formação de polímero que retém as partículas, ou para aumentar a alcalinidade da água e favorece o aparecimento de um coágulo.

Já a utilização da cal como coagulante, vem apresentando grande eficácia no tratamento de efluentes com elevadas concentrações de compostos orgânicos e metais pesados. O princípio de remoção de matéria orgânica da cal é a precipitação química, e em menor proporção, a desestabilização de colóides. Essa precipitação se dá principalmente em compostos orgânicos de alto peso molecular, ou quando ocorre o aumento do peso molecular formando compostos que perdem a capacidade de dissolução, favorecendo a precipitação (MELLO, 2012).

As vantagens deste método é a utilização de um produto com ampla disponibilidade e baixo custo, além de não contribuir para o aumento da salinidade, como ocorre com a utilização de sais de ferro e alumínio.

As desvantagens da utilização da cal hidratada consistem no aumento do pH e alcalinidade do efluente, além da maior geração de lodo no processo.

3.5 OXIDAÇÃO

A oxidação química é utilizada nos processos de tratamento de água de abastecimento e de esgotos industriais para melhoria do processo de coagulação/floculação, podem ser utilizado antes (pré-oxidação) ou após (oxidação) o processo. Dentre esses oxidantes mais conhecidos são: cloro, permanganato de potássio e peróxido de hidrogênio.

Alguns destes produtos químicos citados são mencionados a seguir.

- Cloro

O cloro pode ser utilizado para desinfecção e para auxiliar nos processos de tratamento de esgoto. Segundo Jordão e Pessôa (2011), o cloro pode ser aplicado antes do processo de tratamento (pré-cloração) com objetivo de reduzir a carga orgânica afluente. Outro caso do cloro como auxiliar do processo, ocorre no aumento da eficiência da sedimentação, pois o cloro reduz o estado séptico do lodo evitando que o mesmo suba à superfície.

Segundo Rosalém *et al.* (2013), a oxidação química é utilizada para a remoção de matéria orgânica em estações de tratamento de água e nos tratamentos de águas residuárias industriais. Os oxidantes mais utilizados são o cloro gasoso ou seus derivados (hipoclorito de sódio ou hipoclorito de cálcio), devido seu baixo custo, fácil manuseio e alto potencial oxidante.

Para Paschoalato *et al.* (2005), o cloro é uma opção eficiente na remoção de cor e inativação de micro-organismos, antes ou depois da coagulação quando a água apresenta matéria orgânica natural. Porém é necessário que haja cuidado na possível formação de subprodutos tais como trihalometanos, ácidos aloacéticos, etc.

- Peróxido de Hidrogênio

O peróxido de hidrogênio é um dos oxidantes mais versáteis que existe, superior ao cloro, dióxido de cloro e permanganato de potássio. Pode ser utilizado de forma isolada, para controle de odores, controle de corrosão, etc, ou de forma combinada, onde este pode ser empregado em procedimentos de floculação/precipitação através do incremento do desempenho de floculantes inorgânicos, além da oxidação de alguns compostos (MATTOS *et al.*, 2003).

Ainda para este autor, o peróxido de hidrogênio tem sido utilizado para oxidação em efluentes industriais, ocasionando na redução de DQO e DBO.

- Permanganato de Potássio

O permanganato de potássio é utilizado para o controle de gosto e odor, remoção de cor, controle do crescimento biológico nas estações de tratamento de água, e na remoção de ferro e manganês (AGRIZZI, 2011).

O autor cita também que o permanganato de potássio pode substituir o cloro na oxidação, e assim reduzir as concentrações de matéria orgânica natural, que causam a cor na água.

Para Paschoalato *et al.* (2005), a aplicação de permanganato de potássio na oxidação pode levar à redução da formação de subprodutos da desinfecção.

3.6 ENSAIOS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO

Alguns autores estudaram o tratamento físico-químico de coagulação e floculação com diferentes efluentes industriais, utilizando coagulantes químicos, naturais e polímeros. A seguir serão comentados alguns ensaios experimentais sobre este tipo de tratamento.

3.6.1 Coagulantes naturais

Em estudo realizado por Couto Junior (2012) utilizando efluente de indústria têxtil. O efluente utilizado foi coletado em tanque de equalização de uma estamparia industrial. Neste tanque o pH era ajustado para neutro. O coagulante utilizado foi o tanino em

diferentes dosagens deste, e fixando a rotação da mistura rápida em 90 rpm e mistura lenta 35 rpm. Os tempos utilizados para os ensaios variaram de 2 a 5 min para mistura rápida e 20 a 30 min para mistura lenta.

O pH trabalhado foi próximo ao neutro, pois este era ajustado no tanque de equalização. As concentrações das soluções do coagulante tanino utilizadas foram de 100, 200, 400, 600 e 800 mg/L. A Tabela 4 apresenta as características do efluente bruto e a eficiência de remoção para a concentração ótima de coagulante encontrada .

Tabela 4- Características de efluente de indústria têxtil e sua eficiência de remoção utilizando tanino como coagulante.

Ensaio	Esgoto bruto			Eficiência de remoção (%)		
	DQO (mg/L)	Cor aparente (uC)	Turbidez (NTU)	DQO	Cor aparente	Turbidez
1	2659	14175	5082	93	99	98
2	1410	7392	1722	94	99	99
3	6977	31185	7902	92	99	99
4	5317	19311	4998	89	99	99
5	4301	15620	4042	95	99	99
6	4589	16667	4313	87	99	99

Fonte: Adaptado COUTO JUNIOR (2012).

Na Tabela 4, observa-se que há grande variação dos valores de DQO, cor aparente e turbidez, ao longo das coletas. Segundo o autor, as concentrações elevadas das variáveis podem ser explicadas pela grande quantidade de insumos, corantes e sujidades ao longo do processo de estampagem.

Nos ensaios realizados, foi observado que a maioria obteve bons resultados de remoção, destacando-se o ensaio “5” que teve remoção média de 95; 99 e 99% respectivamente para DQO, cor aparente e turbidez. Estes resultados foram obtidos com concentração de 400 mg/L e os melhores tempos de mistura rápida, mistura lenta e sedimentação, respectivamente 2, 20 e 30 minutos.

Verifica-se que os menores tempos de mistura rápida e lenta foram os que apresentaram melhor eficiência, o que pode ocorrer devido à fragilidade dos flocos, e mostra que não necessita de longos tempos para bons resultados.

No estudo realizado por Vaz *et al.* (2010), tratando efluentes de indústria de galvanoplastia, também foi utilizado coagulante à base de tanino.As atividades desenvolvidas

nesta indústria são: estanhagem, niquelagem, cromagem e cobreação, sendo as águas de lavagem provenientes destes tratamentos de superfícies destinados num único tanque de tratamento.

As concentrações de coagulante testadas foram 100, 200, 300, 400, 500 e 600 mg/L, sendo a melhor concentração do coagulante igual a 400 mg/L. As velocidades de mistura rápida (VMR) e lenta (VML) empregadas foram 120 rpm e 20 rpm, respectivamente. Os tempos de mistura rápida (TMR) e lenta (TML) foram 1,5 min e 15 min, respectivamente. Foram medidos os valores de turbidez e cor das amostras tratadas, após os tempos de sedimentação pré-estabelecidos (20, 30, 40 e 50 min). A Tabela 5 apresenta o melhor resultado obtido nesse estudo.

Tabela 5- Características de efluente de galvanoplastia e sua eficiência de remoção utilizando tanino como coagulante

Ensaio	Esgoto bruto		Eficiência de remoção (%)	
	Cor aparente (uC)	Turbidez (NTU)	Cor aparente	Turbidez
1	1608	264	97	99

Fonte: Adaptado VAZ *et al.* (2010)

Os resultados de remoção apresentados acima foram obtidos com o tempo de sedimentação de 50 minutos. Não houve variação significativa no tempo de sedimentação de 40 minutos (cor aparente e turbidez respectivamente, 97 e 99%).

O pH trabalhado foi o do esgoto bruto, igual a 6,45. Observa-se que o coagulante teve bom desempenho em pH próximo ao neutro, devido este coagulante ter bom desempenho entre pH 6,0 e 8,0. Não houve decaimento significativo de pH devido o tanino não alterar a alcalinidade do meio. Vale ressaltar também, que a concentração ótima de coagulação foi a mesma do estudo anterior (400 mg/L) para águas residuárias de diferentes características.

3.6.2 Coagulantes químicos

Ainda no estudo realizado por Vaz *et al.* (2010), tratando efluente de indústria de galvanoplastia, foram testados alguns coagulantes químicos como sulfato de alumínio e cloreto férrico.

As concentrações de coagulante testadas para ambos coagulantes foram 10; 20; 30; 40; 50 e 60 mg/L. As velocidades de mistura rápida (VMR) e lenta (VML) empregadas

foram 120 rpm e 20 rpm, respectivamente. Os tempos de mistura rápida (TMR) e lenta (TML) foram 1,5 min e 15 min, respectivamente. Os tempos de sedimentação pré-estabelecidos foram 20; 30; 40 e 50 minutos. A Tabela 6 apresenta os resultados dos ensaios com os coagulantes químicos.

Tabela 6- Características do efluente de galvanoplastia e sua eficiência de remoção utilizando sulfato de alumínio e cloreto férrico como coagulante

Ensaio	Esgoto bruto		Eficiência de remoção (%)	
	Cor aparente (uC)	Turbidez (NTU)	Cor aparente	Turbidez
Sulfato de Alumínio	1608	264	98	99
Cloreto Férrico			31,5	95

Fonte: Adaptado VAZ *et al.* (2010)

Para o sulfato de alumínio, a concentração de coagulante que obteve melhores resultados foi de 40 mg/L e o tempo de sedimentação de 20 minutos. A Tabela 6 mostra os resultados de remoção de cor aparente e turbidez respectivamente, 98 e 99 %. O pH de ensaio foi o do esgoto bruto (6,45), porém o autor não cita o pH após a adição do coagulante, haja visto que o sulfato de alumínio altera significativamente a alcalinidade do meio, fazendo com que o pH se torne mais ácido.

Para o cloreto férrico, a concentração de coagulante que obteve melhores resultados foi de 40 mg/L e o tempo de sedimentação de 50 minutos (respectivamente, 31,5 e 95% para cor aparente e turbidez). Porém, na concentração de 30 mg/L e tempo de sedimentação de 30 minutos, os resultados foram bem similares (32 e 95%, para cor aparente e turbidez), podendo ser uma alternativa mais viável devido menor custo com material e com remoções bem semelhantes, além de menor tempo de sedimentação. Neste caso, deve-se levar em consideração também o tipo de efluente estudado.

Song (2004) testou a utilização dos coagulantes, sulfato de alumínio e cloreto férrico em efluente de curtume. As amostras foram coletadas no tanque de armazenamento do efluente de processamento, e deixadas em descanso por 3 horas. Após isso foram realizados os ensaios. As velocidades de mistura rápida e mistura lenta foram respectivamente, 100 e 50 rpm. O tempo de mistura rápida, mistura lenta e sedimentação foram respectivamente 5; 15 e 60 minutos.

Para verificação da interferência do pH na coagulação foram testados coagulantes nas concentrações de 400 a 1200 mg/L e para verificar a melhor dosagem no processo de coagulação foi mantido pH na de faixa 4-10 e testadas concentrações de 0 a 2000 mg/L de coagulante.

A Tabela 7 apresenta as características do efluente bruto e os resultados do ensaio com melhor eficiência.

Tabela 7- Características do efluente de curtume e sua eficiência de remoção utilizando sulfato de alumínio e cloreto férrico como coagulante

Ensaio	Esgoto bruto		Eficiência de remoção (%)	
	Cor aparente (uC)	DQO (mgO ₂ /L)	Cor aparente	DQO (mgO ₂ /L)
Sulfato alumínio	—	3300	86	32
Cloreto Férrico			85	37

Fonte: Adaptado SONG (2004).

O pH trabalhado foi do efluente bruto (9,2), porém houve decaimento deste valor com a adição dos coagulantes sulfato de alumínio e cloreto férrico. A maior redução de pH foi para a faixa de 500 a 900 mg/L de ambos coagulantes, chegando a pH de 6,57 para sulfato de alumínio e 5,72 para cloreto férrico. Isso ocorre devido ao caráter ácido do Alumínio e Ferro.

A melhor remoção de DQO ocorreu na dosagem de 800 mg/L, para ambos coagulantes, que resultou numa remoção entre 32 % para o sulfato de alumínio e 37% para o cloreto férrico. Esses resultados ocorreram na faixa de pH de 6,5 a 7,5 para sulfato de alumínio e 6,5 a 8,5 para cloreto férrico.

Quanto a remoção de cor aparente, foram observados os resultados em diferentes concentrações de coagulantes, sendo um percentual de 86% para sulfato de alumínio (800 mg/L) e 85% para cloreto férrico (900 mg/L). Vale ressaltar que novamente o sulfato de alumínio se mostra pouco mais eficaz do que o cloreto férrico na remoção de cor aparente. Segundo o autor, isto pode ocorrer devido à presença de ferro, que causa problemas de cor em efluentes com quantidades de sulfetos e taninos vegetais.

Sher *et al.* (2013) estudaram a coagulação/floculação em efluente de uma fábrica de polímeros e utilizaram o sulfato de alumínio como coagulante e polímero aniônico como floculante. As amostras foram coletadas na saída do tanque de retenção em que o efluente é armazenado antes de se encaminhar para a estação de tratamento.

O pH inicial da amostra era em torno de 13,0. Para correção do pH durante os processos, foram utilizados ácido sulfúrico (coagulação) para ajustar o pH a 6,0 e solução de cal (floculação) para ajustar a 8,0. As concentrações utilizadas foram sulfato de alumínio (26%) e polímero aniônico (0,16%).

Nos ensaios foi mantida uma velocidade de 200 rpm para mistura rápida, durante 5 minutos e velocidade de mistura lenta igual a 40 rpm também durante 5 minutos, seguido de tempo de sedimentação de 30 minutos. As características do efluente e as melhores eficiências de remoção das combinações realizadas são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8- Características do efluente de fábrica de polímeros e sua eficiência de remoção utilizando sulfato de alumínio como coagulante e polímero aniônico como floculante

Esgoto bruto			Eficiência de remoção (%)		
DQO (mgO ₂ /L)	Turbidez (NTU)	SS (mgSS/L)	DQO	Turbidez	SS
20000	750	3500	98	99	86

Fonte: Adaptado SHER *et al.* (2013)

Observa-se que a melhor remoção de DQO ocorreu quando a dosagem de coagulante foi 1,5 mL e de floculante na faixa de 2,0 a 2,5 mL que alcançou a 98% de remoção. Na remoção de SS, a melhor combinação foi 2,5mL para coagulante e 2,0mL para floculante que resultou na eficiência de 86%. Para turbidez, a combinação que obteve melhores resultados foi 2,5 mL de coagulante e 1,5 mL de floculante que resultou em 99% de remoção de turbidez.

É possível perceber que as melhores eficiências nos ensaios ocorreram com o aumento das dosagens do coagulante e floculante. A partir das dosagens de 1,5 mL para os dois processos, ocorreram pequenas melhorias na remoção das variáveis físico-químicas o que deve ser analisado devido aos custos dos produtos, a fim de estabelecer uma relação custo-benefício das dosagens comparadas aos valores de eficiência.

Mello *et al.* (2012) avaliaram o uso de hidróxido de cálcio diluído em água destilada (solução de cal) como coagulante, utilizando chorume de um aterro sanitário. A coleta do lixiviado foi realizada na caixa de vazão localizada entre a lagoa de decantação e lagoa anaeróbia da estação de tratamento do lixiviado.

As concentrações da solução de leite de cal foram: 50, 125 e 200 g/L e algumas condições foram estabelecidas para os testes, como mostra a Tabela 9.

Tabela 9-Condições adotadas nos ensaios em *Jar test* com lixiviado de aterro sanitário

Ensaio	T coag. (seg)	V coag. (rpm)	T foc. (min)	V foc. (rpm)	Leite de cal (g/L)	T Sedim. (min)
1	10	80	2	20	50	30
2	30	95	4	40	125	60
3	50	110	6	60	200	120

Fonte: MELLO (2012).

Observou-se que a condição q obteve melhor resultado foi o ensaio 3, que resultou numa remoção de 52% para cor aparente e 9% para turbidez. As características do lixiviado bruto para cor aparente e turbidez foram respectivamente 5506 uC e 33,10 NTU e passaram a 2660 uC e 28 NTU após os ensaios de coagulação/floculação. A maior remoção de cor aparente pode ser devido à ação da cal preferencialmente em compostos ácidos-húmicos, através da precipitação química dessas substâncias, e não da desestabilização.

3.7 ESTATÍSTICA MULTIVARIADA

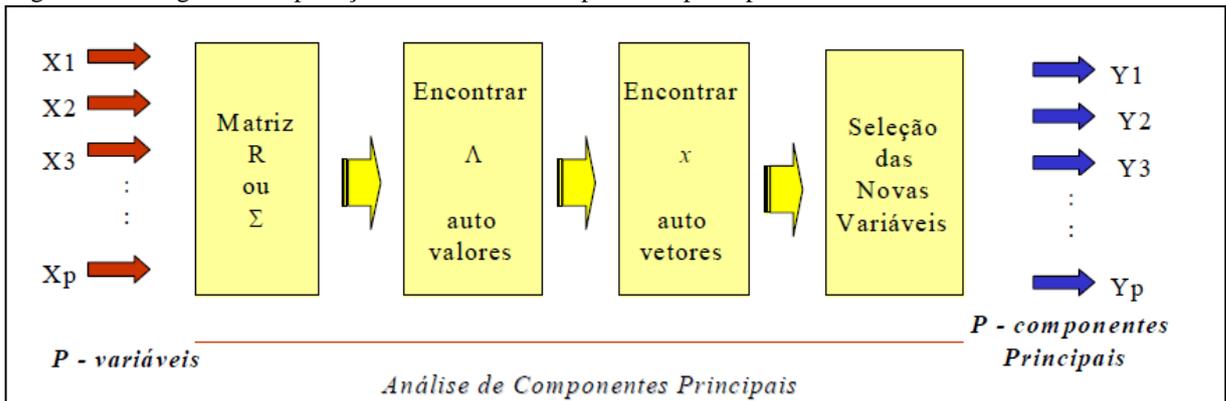
A estatística multivariada é um método estatístico utilizado em situação onde várias variáveis são medidas simultaneamente. Para Mingoti (2005), a estatística multivariada se divide em dois grupos: o primeiro que consiste em técnicas de sintetização da estrutura de variabilidade de dados e o segundo de técnicas de inferência estatística. Para esse estudo, será utilizada a *Análise dos componentes principais (ACP)* que faz parte do primeiro grupo.

Segundo Mingoti (2005), a análise de componentes principais (ACP) tem como objetivo principal explicar a estrutura de variância e covariância de um vetor aleatório, composto de p-variáveis aleatórias, através da construção de combinações lineares das variáveis originais. Estas combinações lineares são chamadas de componentes principais e não são correlacionadas entre si.

Para Hair Jr (2005), a ACP é utilizada para condensar a informação contida em um número de variáveis originais em um conjunto menor de variáveis estatísticas, com perda mínima de informação. De modo geral, este método de análise facilita a interpretação por meio da simplificação dos dados originais e possibilita a identificação das variáveis responsáveis pelas maiores variações entre os resultados.

Para a determinação das componentes principais, é necessário calcular a matriz de covariância ou a matriz de correlação, encontrar os autovalores e os autovetores e escrever as combinações lineares, que serão as novas variáveis, denominadas de componentes principais, sendo que cada componente principal é uma combinação linear de todas as variáveis originais (VICINI, 2005). A Figura 2 apresenta o esquema de aplicação da ACP.

Figura 2- Fluxograma de aplicação da análise de componentes principais



Fonte: VICINI (2005).

Na interpretação dos resultados desta análise, segundo Ayres *et al.* (2007), os primeiros índices são chamados de componentes principais, dando maior ênfase aqueles que descrevem cerca de 70% ou mais da variância total. Este método de seleção foi sugerido por Kaiser e consiste em incluir somente as componentes cujos valores sejam superiores a 1, podendo ser aceitos valores acima de 0,5.

Decidido o número de componentes, encontram-se os autovetores que irão compor as combinações lineares para formar novas variáveis. Estas novas variáveis sintetizam as informações de todas as variáveis originais que foram medidas sobre o fenômeno e podem representar medidas de qualidade ou desempenho.

4. MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados a descrição processo produtivo da indústria de açaí, delineamento do trabalho, assim como a metodologia de caracterização qualitativa e quantitativa do efluente, os ensaios de tratabilidade, procedimento de caracterização e estimativa de produção de lodo, estimativa de custos do tratamento proposto e o tratamento estatístico dos dados.

4.1 CARACTERÍSTICAS E DESCRIÇÃO DO PROCESSO PRODUTIVO DA INDÚSTRIA

A indústria de açaí estudada neste trabalho está localizada no bairro do Guamá, município de Belém-PA. A descrição de seu processo de produção é realizada a seguir.

As etapas de processamento da polpa de açaí constituem em sete, que compreendem: descarregamento, lavagem, amolecimento, despulpamento, filtragem, embalagem e congelamento cuja descrição é realizada a seguir. O processo produtivo se inicia com o **descarregamento** das caixas de açaí e sua **lavagem** em depósitos de polietileno. Após isso, os frutos ficam imersos em água em recipiente por cerca de 30 min para **amolecimento**. Posteriormente o fruto juntamente com a água é levado às máquinas de aço inoxidável que produz movimentos circulares para **despulpamento** do fruto. Após a extração da polpa, a mesma é levada para o **peneiramento** em peneiras com tela de alumínio para retirada de resíduos de maior tamanho ainda restante. A polpa então é levada para **máquinas embaladoras**, onde é depositada em embalagens de 1 kg para armazenamento e por fim levada para o **congelamento** em temperatura entre -18 °C e -25°C para evitar a degradação do produto até a exportação deste. A Figura 3 ilustra em sequência as etapas do processo produtivas ora descritas.

Figura 3- Etapas do processo produtivo. a) Descarregamento; b) Lavagem e amolecimento; c) Despolpamento; d) Peneiramento e embalagem.



Fonte: Autor (2015).

O processo tem geração de água residuária em três pontos principais: no depósito de amolecimento (Figura 3-b) e na lavagem das máquinas despolpadeiras (Figura 3-c), além do resíduo líquido que escoar dos caroços já utilizados que ficam acumulados no silo, como apresentado na Figura 4.

Figura 4- Depósito de acondicionamento dos caroços utilizados no processo



Fonte: Autor (2015).

As águas de lavagem das máquinas despulpadeiras são reutilizadas no próximo “batimento” dos frutos para extração da polpa, apenas a água do último “batimento” contribui para os despejos líquidos. Essa água residuária vai diretamente para uma caixa intermediária de passagem ligada à caixa receptora final, a qual recebe todas as contribuições do pátio de produção e do tanque de acúmulo dos caroços utilizados, mostrada na Figura 5.

Figura 5-Contribuições de água residuária para a caixa receptora final. a) caixa intermediária de esgoto. b) silo. c) caixa receptora final.

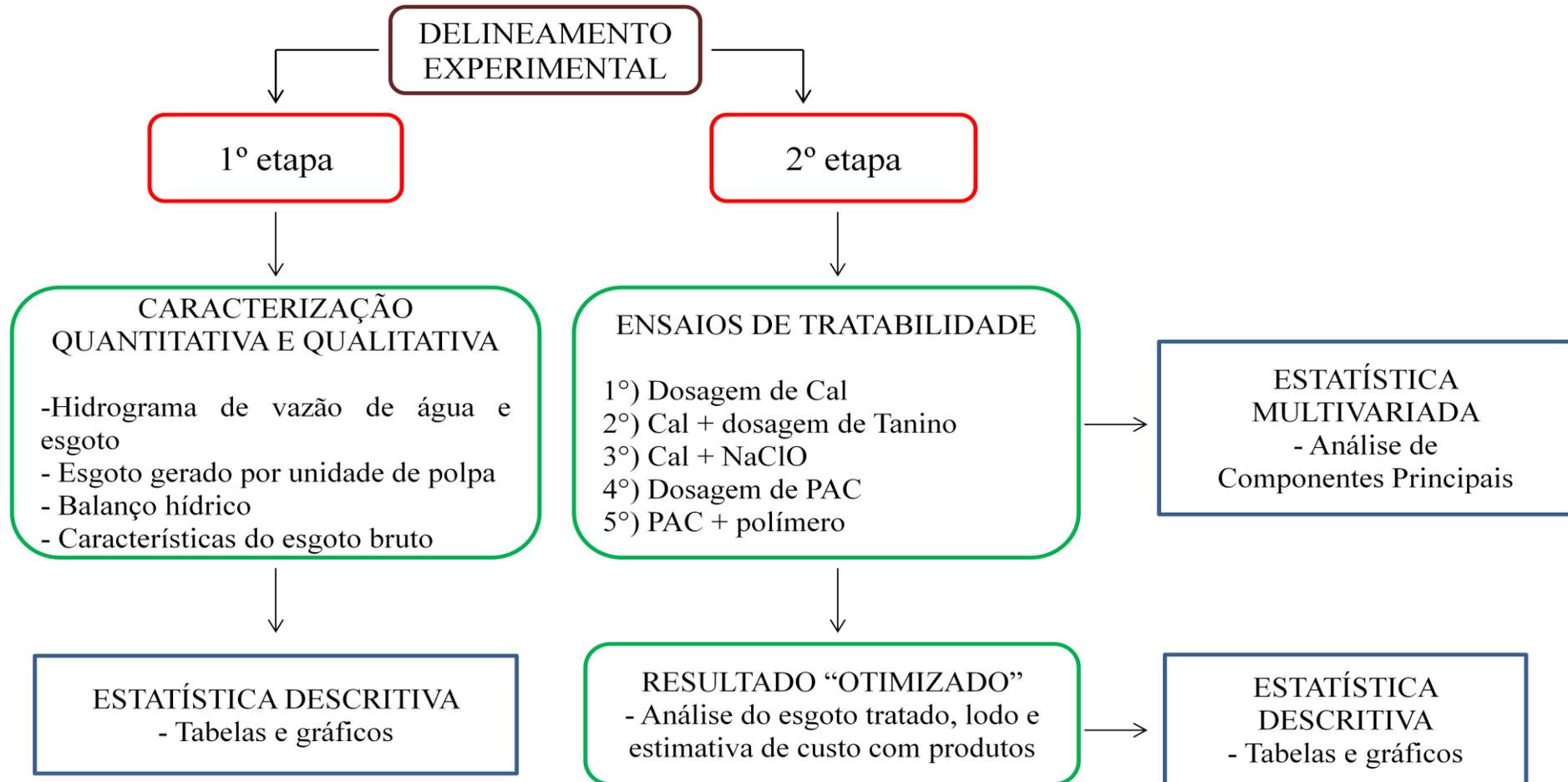


Fonte: Autor (2015).

4.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

A pesquisa foi realizada em duas etapas: na primeira etapa foi realizada a caracterização quantitativa e qualitativa da água residuária e na segunda etapa foi avaliado o desempenho de coagulantes/floculantes na tratabilidade dessa água residuária. Após isso, para o ensaio de melhor desempenho foi realizada a análise global (com caracterização do efluente tratado e lodo gerado), incluindo do tratamento estatístico dos ensaios, como apresentado no fluxograma experimental da Figura 6. Após isso, foi realizada estimativa de custos do tratamento proposto em termos de consumo de produto químico.

Figura 6: Fluxograma de delineamento experimental da pesquisa



4.3 CARACTERIZAÇÃO QUANTITATIVA E QUALITATIVA DA ÁGUA RESIDUÁRIA

A primeira fase da pesquisa consistiu na verificação da quantificação da vazão de água residuária gerada diariamente na fábrica de açaí, elaboração de hidrogramas de vazão e balanço hídrico, bem como sua caracterização qualitativa (análises físico-químicas em laboratório).

4.3.1 Estimativa de vazão de água e de água residuária

As medições foram realizadas a fim de estimar a quantidade de água utilizada para produção da polpa e a quantidade de água residuária gerada nesta produção. Para medição de água foi instalado um medidor de vazão ultrassônico Regal modelo RH 20 na tubulação de recalque (DN 50 mm) do poço artesiano utilizado para abastecimento da indústria.

As determinações de vazão de água residuária foram realizadas pelo método volumétrico, na caixa receptora de todas as contribuições, conhecendo suas dimensões e com auxílio de um cronômetro, sendo calculada pela razão entre o volume de enchimento da caixa e o tempo de enchimento da mesma. Este procedimento de medição de água e esgoto foi realizado várias vezes ao dia, com intervalo de 15 minutos entre as medições, do início ao término da produção.

A Figura 7 apresenta a caixa receptora de água residuária durante o procedimento de medição da lâmina de água para determinação de vazão.

Figura 7- Caixa receptora de água residuária



Fonte: Autor (2015)

4.3.2 Estimativa de vazão de água residuária ao longo do tempo

Para determinação da estimativa de vazão ao longo do tempo, foi levantado um histórico de produção da fábrica de três (3) anos: 2013, 2014 e 2015. Foi utilizada a vazão média por unidade de pola encontrada durante as medições de vazão de água residuária deste estudo. Com esses dados foi estimada a vazão média mensal durante este período e elaborado seu hidrograma.

4.3.3 Balanço de massa hídrico

O balanço de massa hídrico foi realizado com base na quantificação do volume de vazão de água e esgoto durante as campanhas de medição, além do teor de umidade da polpa produzida (1 kg) para quantificar a água incorporada à polpa. Com esses dados foi possível estimar a quantidade de água residuária gerada, de água incorporada à polpa, usos não computáveis e perdas no sistema de produção. O equacionamento empregado foi:

$$\text{Água consumida} = \text{efluente do açai} + \text{água na polpa} + \text{usos não computáveis e perdas no sistema} \quad (4.1)$$

A parcela de água incorporada à polpa foi determinada pelo percentual de volume de água (com base no teor de umidade), considerando a quantidade média de polpa produzida.

A parcela de usos não computáveis e perdas são referentes a contribuições que não são lançadas na caixa receptora final, pois esta caixa utilizada para medição de vazão recebe somente o efluente do processo produtivo, por isso sua quantificação foi realizada separadamente. Os usos não computáveis são os usos em atividades fora da área de produção, como: banheiros, refeitório, bebedouro, etc. e foram somadas às perdas de fato.

4.3.4 Caracterização qualitativa da água residuária bruta

Para conhecimento das características físico-químicas da água residuária bruta foram realizadas coletas compostas. As alíquotas de volume foram determinadas com base na vazão já determinadas durante o hidrograma de vazão de esgoto. Com isso as coletas foram realizadas em alíquotas de volume equivalente à vazão de hora em hora, durante o período de produção. O ponto de coleta foi na caixa receptora final de água residuária, ilustrada na Figura 8.

Figura 8- Ponto de coleta da água residuária



Fonte: Autor (2015)

As variáveis analisadas na água residuária bruta foram as seguintes: pH, cor aparente, nitrogênio amoniacal, nitrato, fósforo total, Sólidos Sedimentáveis (SS), Sólidos

Totais (ST), Sólidos Totais Fixos e Voláteis (STF e STV), Sólidos Suspensos Totais (SST), Sólidos Suspensos Fixos e Voláteis (SSF e SSV), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Metais (Alumínio, Cádmio, Cobalto, Cromo, Cobre, Ferro, Manganês, Zinco).

As variáveis analisadas obedeceram aos procedimentos do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA/AWWA/WEF, 2011) e foram realizadas no Laboratório Multiusuário de Tratabilidade em Águas (LAMAG) da Universidade Federal do Pará (UFPA) sob coordenação do Grupo de Estudos em Gerenciamento da Água e Reuso de Efluente (GESA). As amostras de metais foram realizadas no Laboratório de Toxicologia da Seção de Meio Ambiente (SAMAM) do Instituto Evandro Chagas (IEC). O Quadro 1 apresenta os métodos de análises das variáveis citadas.

Quadro 1- Metodologias de análises das variáveis físico-químicas

Variáveis	Metodologia	Nº do método (APHA)
pH	Potenciometria	4500-H+ B
Cor aparente	Espectrofotometria	2120-C
Turbidez	Espectrofotometria	2130-B
Nitrogênio Amoniacal	Titulometria	4500-NH3 B e 4500-NH3 C
Nitrato	Espectrofotometria	4500-NO3
Fósforo Total	Digestão de persulfato de potássio	4500-P E
SST	Gravimetria	2540-D
ST	Gravimetria	2540-B
DBO	Respirométrico	5210-D
DQO	Colorimetria do refluxo fechado	5220-D
Metais	Espectrofotometria	3111-3130

Fonte: Autor (2015)

4.4 ENSAIOS DE TRATABILIDADE

Para a verificação da tratabilidade das águas residuárias do processamento de açaí, foram realizados experimentos de bancada em *Jar test* utilizando coagulantes químicos e de origem vegetal. Foi utilizado um *Jar test* de bancada (*Jar test* analógico com 6 jarros de 2L, palhetas e hastes em aço inox, Marca: SP LABOR, Modelo: JT-102/6) e os

produtos químicos cal hidratada, policloreto de alumínio e polímero aniônico, além do coagulante vegetal tanino. Além destes, também foi utilizado o hipoclorito de sódio para o ensaio de oxidação.

Os ensaios de tratabilidade foram realizados no do Laboratório de Instalações Piloto do LAMAG/GESA/UFPA.

Foram fixados os tempos de mistura rápida e lenta, assim como a velocidade de agitação, com base nos estudos encontrados em literatura, como ilustrado na Tabela 10. Com isso, os resultados obtidos nos ensaios foram da diferença de dosagem dos produtos.

Tabela 10- Condições adotadas para os ensaios em *Jar test*

Processo	Tempo (min)	RPM
Coagulação	1	90
Floculação	15	20
Sedimentação	20	–

Para os ensaios de oxidação, foi fixado o tempo de mistura sendo 30 segundos, sob a velocidade de agitação rápida (90 RPM) e posterior tempo de contato de 15 minutos para reação do oxidante.

Os ensaios realizados foram:

- 1º ensaio- Dosagem de cal
- 2º ensaio- Cal + dosagem de tanino
- 3º ensaio- Cal + hipoclorito de sódio
- 4º ensaio- Dosagem de PAC
- 5º ensaio- PAC+ dosagem de polímero
- 6º ensaio- Otimização do melhor resultado

Cada ensaio foi realizado em duplicata para confirmar seu desempenho de tratabilidade. Foram analisadas as variáveis físico-químicas pH, cor aparente, turbidez e DQO no efluente clarificado ao final de cada ensaio para comparação da eficiência dos produtos utilizados. Essas variáveis foram selecionadas de modo a determinar um índice de qualidade do efluente, levando em consideração as variáveis com maiores valores no esgoto bruto, já que não seria viável realizar um número maior de determinações para cada ensaio, principalmente devido ao custo e tempo necessário.

Após a análise dos resultados dos ensaios e obtenção do índice de qualidade do efluente, foi repetido o ensaio que resultou na melhor eficiência, com dosagem e pH definidos para caracterização do efluente clarificado.

A descrição do procedimento de cada ensaio está descrita a seguir.

4.4.1 Determinação da dosagem de cal

Na determinação da dosagem de cal, foram utilizados 6 jarros de 2 L de amostra. Preparou-se uma solução padrão de cal hidratada na concentração de 100 g/L. Após isso variou-se as dosagens desta solução em cada jarro por meio da alteração de volume adicionado em cada jarro. As dosagens selecionadas foram: 1,5; 2,5; 3,5; 5,0; 7,5 e 10 g/L.

4.4.2 Determinação da dosagem de Tanino

Fixada a melhor dosagem de cal obtida no ensaio anterior, foi determinado a melhor dosagem de Tanino. Inicialmente foi adicionada a dosagem já estabelecida de cal e ajustou-se o pH para 6,0 por ser um valor de boa atuação do Tanino já verificados em pesquisas anteriores. Após isso foi utilizada uma solução padrão de 20 g/L de Tanino (TANFLOC SG) e variou-se a dosagem em cada jarro. As dosagens selecionadas foram: 30; 45; 60; 75; 90 e 105 mg/L.

4.4.3 Oxidação: determinação da dosagem de Hipoclorito de Sódio

Fixada a melhor dosagem de cal, foi determinada a melhor dosagem de Hipoclorito de Sódio. Inicialmente foi adicionada a dosagem já estabelecida de cal e ajustou-se o pH para 6,5 para melhor atuação do oxidante. Foi utilizada uma solução a 12 % de Hipoclorito de sódio e variou-se a dosagem em cada jarro. As dosagens testadas foram: 20; 40; 60; 80; 100 e 120 mg/L.

4.4.4 Determinação da dosagem de Policloreto de alumínio (PAC)

Inicialmente utilizada a solução de cal para ajustar o pH da água residuária para 8,5 devido boa atuação do PAC nessa faixa de pH. Foi utilizada uma solução a 10% de PAC – Aquafloc18 da Faxon Química LTDA e variaram-se as dosagens em cada jarro. As dosagens utilizadas foram: 9; 18; 27; 36; 45 e 54 mg/L.

4.4.5 Determinação da dosagem de Polímero

Fixadas as duas melhores dosagens de PAC, foi determinada a melhor dosagem de polímero. Foi preparada uma solução a 1% do Polímero aniônico Flonex 934 SH. Variaram-se as dosagens em cada jarro. As dosagens utilizadas foram: 10; 20 e 30 mg/L.

4.4.6 Otimização do melhor resultado

Após a obtenção do melhor resultado, variou-se o pH dos jarros para verificar uma possível melhoria na eficiência do tratamento. Essa correção de pH foi realizada com a solução de cal hidratada à dosagem de 1.000 mg/L . Os valores de pH testados foram: 6,5; 7,0; 7,5; 8,0 e 8,5.

Após a obtenção do melhor pH, realizou-se a filtração do sobrenadante com papel filtro Whatman (45 mm) para otimização do resultado.

4.5 ANÁLISE GLOBAL DE TRATABILIDADE

Após os ensaios de tratabilidade, foi realizada a caracterização do efluente tratado e foram analisadas em duplicata as mesmas variáveis físico-químicas do esgoto bruto, citados no Quadro 2, a fim de verificar a eficiência de remoção do tratamento proposto.

Além disso, foi realizada uma comparação com valores estabelecidos em Florencio *et al.* (2006), que consideram critérios da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) para reuso desta água residuária tratada para fins de irrigação.

4.6 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO LODO GERADO NO TRATAMENTO PROPOSTO

Com o lodo gerado no ensaio de melhor eficiência, foi feita uma caracterização física com o objetivo de conhecer este lodo gerado no tratamento proposto. Os parâmetros analisados foram: sólidos sedimentáveis, sólidos totais fixos e voláteis, massa específica, densidade do lodo, teor de umidade e teor de sólidos.

4.6.1 Sólidos Sedimentáveis e Sólidos Totais

Para determinação de sólidos sedimentáveis, a amostra de lodo foi despejada em Cone Imhoff de 1.000 mL, e deixada em repouso durante 1 hora para que ocorra a sedimentação. Ao término do tempo foi aferido o resultado.

Para sólidos totais foi realizado o método gravimétrico de secagem em estufa em temperatura de 103 - 105°C em estufa por 24 horas. Após esse procedimento, foi feito a separação da fração fixa e volátil, levando a amostra para mufla a $550 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 30 minutos. Os resultados são obtidos pelas seguintes expressões:

$$ST = \frac{P1 - P0}{V} \times 1000 \quad (4.2)$$

$$STF = \frac{P2 - P0}{V} \times 1000 \quad (4.3)$$

$$STV = ST - STF \quad (4.4)$$

Em que:

ST: sólidos totais (mg/L)

STF: sólidos totais fixos (mg/L)

STV: sólidos totais voláteis (mg/L)

P₀: peso da cápsula sem amostra (g)

P₁: peso da cápsula após secagem em estufa (g)

P₂: peso da cápsula após mufla (g)

V: volume da amostra (L)

4.6.2 Teor de umidade

O teor de umidade do lodo é determinado através da relação entre os sólidos secos (sólidos totais) e o volume do lodo (mistura de sólidos + água). O teor de umidade é calculado pela seguinte equação:

$$\text{Teor de umidade (\%)} = 100 - \text{sólidos secos (\%)} \quad (4.5)$$

4.6.3 Densidade do lodo (ρ_{lodo}) e Massa específica

Primeiramente calcula-se a densidade de sólidos pela seguinte equação:

$$\text{Densidade de sólidos} = \frac{1}{\left(\frac{\left(\frac{STF}{ST}\right)}{2,5} + \frac{\left(\frac{STV}{ST}\right)}{1,0}\right)} \quad (4.6)$$

Logo, a densidade do lodo (sólidos+água) pode ser estimada por:

$$\text{Densidade de lodo} = \frac{1}{\left(\frac{ST}{\text{Densidade de sólidos}} + \frac{\text{Fração de água no lodo}}{1,0}\right)} \quad (4.7)$$

Assim, determina-se a massa específica da seguinte forma:

$$\text{Massa específica} \left(\frac{kg}{m^3}\right) = \text{Densidade do lodo} \times 1000 \quad (4.8)$$

4.7 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS

Para caracterização quantitativa e qualitativa da água residuária foram realizadas três (3) campanhas de amostragem onde foi utilizada a **Estatística descritiva** para tratar estes dados.

Para a avaliação dos resultados dos ensaios de tratabilidade foi utilizado **Estatística descritiva** e **Estatística multivariada**. A estatística descritiva foi utilizada para

elaboração de tabelas e gráficos para os resultados das variáveis físico-químicas analisadas posteriores aos ensaios de tratabilidade. A estatística multivariada foi utilizada a fim de verificar qual ensaio obteve melhor eficiência de tratabilidade através da determinação de um Índice de Qualidade de Efluente Tratado (IQET) que é gerado por meio da Análise de Componentes Principais (ACP) para analisar quais as variáveis mais significativas que descrevem a qualidade do efluente tratado.

A elaboração das tabelas, gráficos e tratamento estatístico descritivo foi feito por meio Microsoft Excel 2007. Utilizou-se também o software Minitab 17 para elaboração de gráficos e tratamento estatístico multivariado dos dados.

4.7.1 Índice de Qualidade do Efluente Tratado (IQET)

O IQET é utilizado para determinar a qualidade do clarificado obtido nos ensaios de tratabilidade realizados. Este índice de qualidade foi determinado por meio dos pesos de cada variável físico-química obtido na análise de componentes principais e assim foi gerado uma equação com base na componente de maior representatividade, e utilizando a concentração das variáveis físico-químicas determinadas após cada ensaio. Este índice é determinado pela Equação 4.9.

$$IQET = a \times T + b \times CA + c \times DQO \quad (4.9)$$

Em que:

a, b e c: peso do componente mais representativo;

T: Turbidez (uT);

C.A: Cor Aparente (uC);

DQO: Demanda Química de Oxigênio (mg/L).

Após a geração da equação, foi calculado o IQET para todas as condições dos ensaios. Dessa maneira é possível ordenar em forma crescente e determinar qual ensaio resultou no melhor tratamento para essa água residuária, sendo a melhor a qualidade do clarificado representado pelo menor valor numérico do índice.

4.8 ESTIMATIVA DE CUSTO COM PRODUTOS QUÍMICOS

A partir da determinação da dosagem dos produtos utilizados no tratamento proposto (Ca(OH)_2 , PAC e polímero) e no hidrograma de vazão do efluente, foi determinado a vazão de aplicação de produtos utilizados para determinar a quantidade de produtos químicos utilizados diariamente. A determinação da vazão de dosagem de produtos químicos foi determinada pela seguinte expressão:

$$Q_{\text{produto químico}} \left(\frac{\text{L}}{\text{s}} \right) = \frac{Q_{\text{efluente}} \times \text{Dosagem}}{\text{Concentração}} \quad (4.10)$$

Em que:

$Q_{\text{produto químico}}$: vazão de aplicação do produto químico (L/s);

Q_{efluente} : vazão média do efluente (L/s);

Dosagem: melhor dosagem do produto químico determinado em *jar test* (mg/L);

Concentração: concentração do produto químico utilizado (mg/L).

Determinada a vazão de aplicação dos produtos químicos, foi calculado o volume total de solução (Ca(OH)_2 , PAC e polímero) utilizado e a quantidade de produtos químicos que será utilizado no funcionamento diário. O volume e quantidade de coagulante/polímero são determinados pelas expressões:

$$V(L) = Q_{\text{produto químico}} \times N \times 3600 \quad (4.11)$$

$$M = \frac{\text{Concentração} \times \text{Volume}}{1000} \quad (4.12)$$

Em que:

V : Volume do produto químico necessário para um dia de funcionamento (L);

$Q_{\text{produto químico}}$: vazão de aplicação do produto químico (L/s);

Concentração: concentração do produto químico utilizado (mg/L);

N: Número de horas de funcionamento da fábrica;

M: Massa do produto químico utilizado diariamente (g/dia)

Ao se obter a massa do produto utilizada foi calculado o valor gasto mensalmente por meio da cotação dos valores dos produtos com representante técnico regional da SNF do Brasil Ltda. Os valores foram referentes para o município da indústria e mês 01/2016.

.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nas duas fases da pesquisa (caracterização qualitativa e quantitativa da água residuária e os ensaios experimentais de tratabilidade), assim como o tratamento estatístico e estimativa de custo com produtos.

5.1 CARACTERÍSTICAS QUANTITATIVAS E QUALITATIVAS

5.1.1 Vazão de água

A medição da vazão de água foi realizada para determinar o consumo diário utilizado na indústria. A amostragem das diferentes campanhas depende do número de horas de produção. As campanhas de medição foram realizadas em dias de produção do açaí popular e as variáveis foram: quantidade de polpa produzida e o número de horas de produção. Os valores de vazão de água encontrados são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11- Estatística descritiva das vazões de água

Campanha	N	Funcionamento (hora)	Produção (kg/d)	Vazão máxima (L/h)	Vazão mínima (L/h)	Vazão média (L/h)	Vazão consumida/unid (L/kg.d)
1	19	7:20:00	8.475	5476	3935	4696	13,29
2	30	9:00:00	23.300	4946	4378	4716	4,86
3	18	8:30:00	21.300	4874	4248	4687	5,28
MÉDIA	–	8:16:00	17.692	5099	4187	4699	7,81
DP	–	–	–	329	228	15	4,8

N: número de medições;

Vazão consumida/unid: vazão utilizada referente à 1kg de polpa produzida.

Observou-se durante as campanhas de medição de água vazões médias diárias respectivamente 4695,8, 4716,1 e 4687 L/h, média total das campanhas de medição o valor de 4699 L/h e consumo de água por unidade de polpa igual a 7,81L/kg.d.

Essa alimentação de água é realizada por água subterrânea e foi medido no ramal de alimentação geral da fábrica, ou seja, além da água para produção é contabilizada outros usos como banheiros e refeitório.

Na campanha 2, o número de horas de produção foi maior que os demais, o que pode explicar o maior volume de água utilizado. Destaca-se na campanha 2, houve a maior produção de polpa (23.300 kg), sugerindo que os dias de maior volume de água são os dias de maior quantidade de polpa produzida e maior tempo de funcionamento da fábrica. A quantidade de polpa depende diretamente da quantidade de frutos que chega ao dia, valor não constante durante as campanhas.

Para conhecimento do comportamento da vazão bombeada pelo conjunto motor-bomba (CMB) de captação de água subterrânea e controle do processo, foram elaborados os gráficos de controle de vazão de água, que são apresentados nas Figuras 9, 10 e 11.

Figura 9- Gráfico de controle do processo da 1ª campanha de medição de água

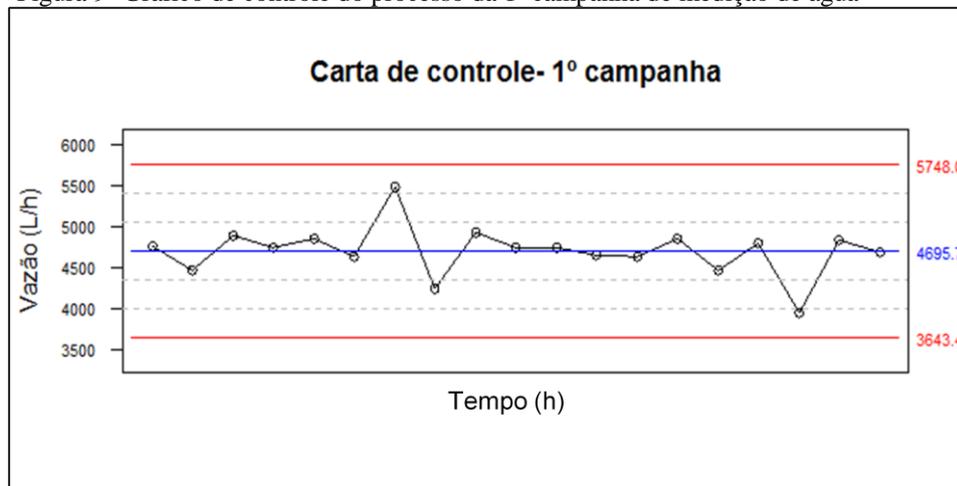


Figura 10- Gráfico de controle do processo da 2ª campanha de medição de água

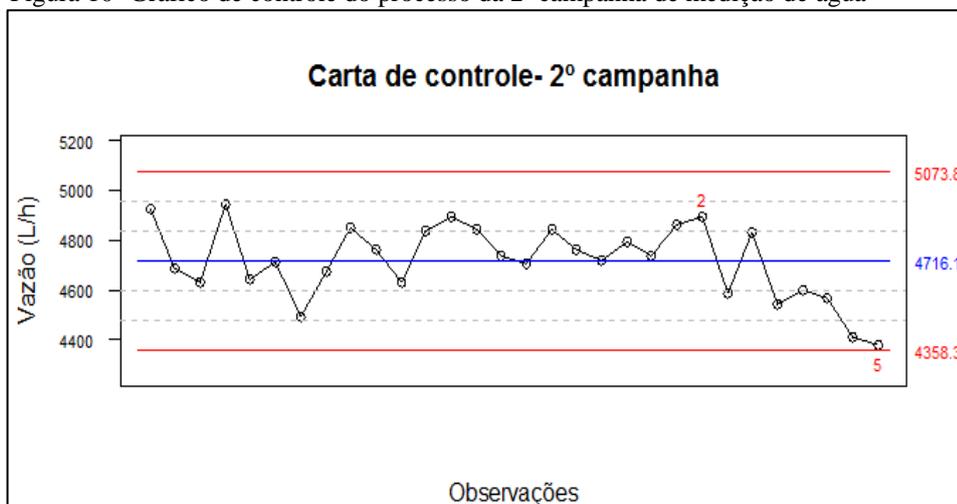
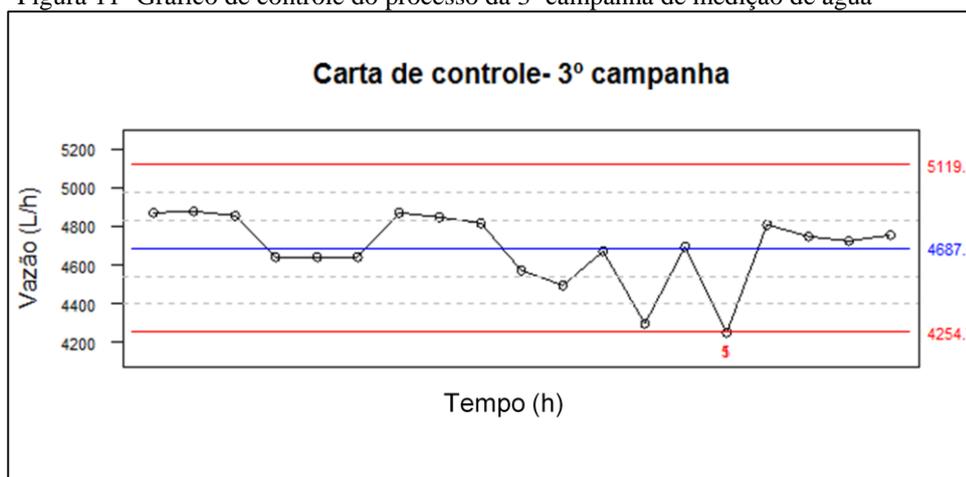


Figura 11- Gráfico de controle do processo da 3ª campanha de medição de água



É possível observar que nas Figuras 9 e 10, os gráficos podem ser considerados estatisticamente estáveis no geral, devido os pontos se localizarem entre o limite inferior e superior de controle e apresentarem uma linearidade na distribuição dos pontos, regra geral e mais simples para esta avaliação. Segundo Triola (2011), isso significa que as variações que ocorrem são comuns e causadas por variáveis aleatórias.

Já na Figura 11, o gráfico está fora do controle estatístico, pois além dos pontos estarem localizados fora dos limites de controle, há outros sinais que evidenciam este fato, como outros critérios mais específicos de avaliação. Para Triola (2011), isso significa que as variações que ocorrem nestes casos têm causas especiais de variabilidade. Essas causas que são identificáveis podem ser controladas para melhoria do processo e resultar em dados controlados estatisticamente.

5.1.2 Vazão de água residuária

Os resultados encontrados para vazão de água residuária gerada são apresentados na Tabela 12 e o comportamento das vazões de cada campanha é apresentado na Figura 12.

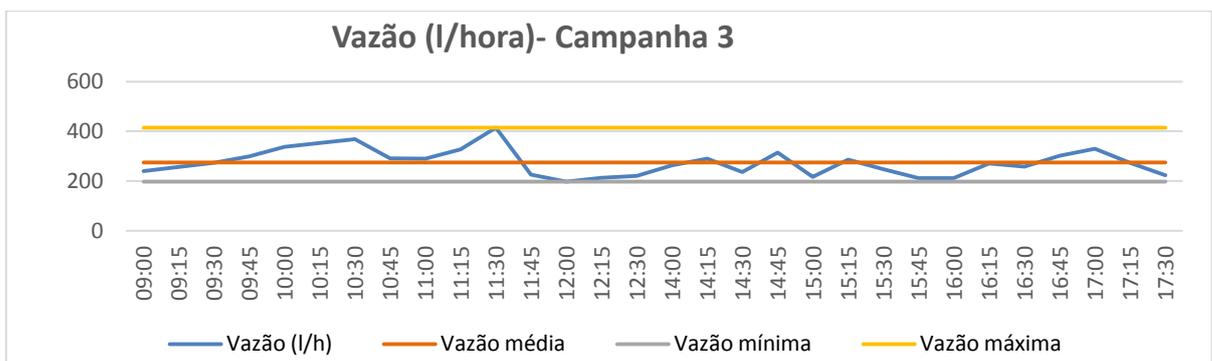
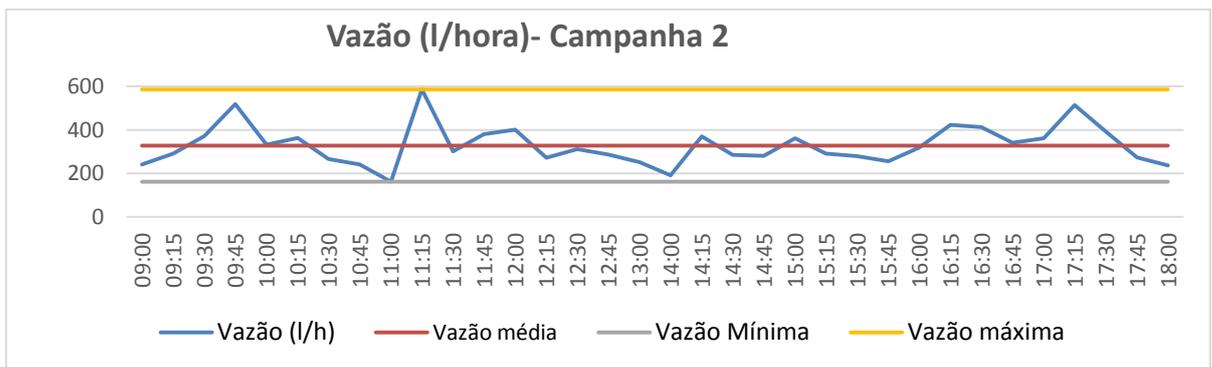
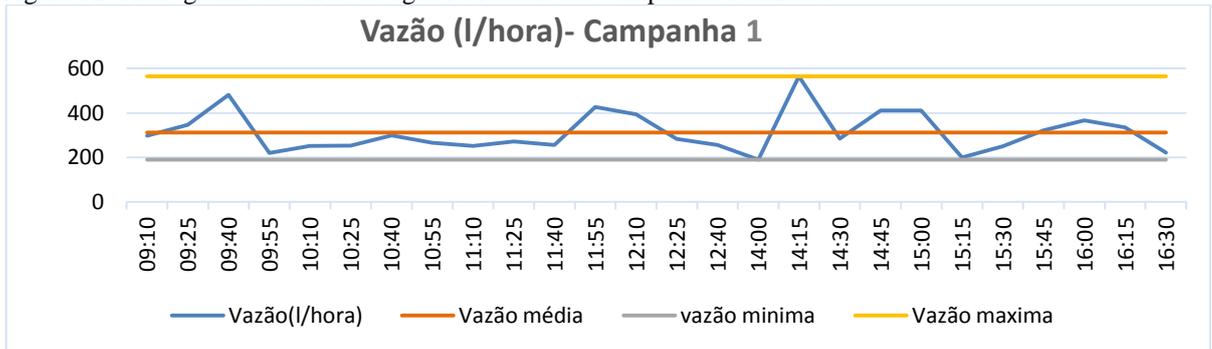
Tabela 12- Estatística descritiva das vazões de esgoto

Campanha	N	Funcionamento (h)	Produção (kg/d)	Vazão máxima (L/h)	Vazão mínima (L/h)	Vazão média (L/h)	Vazão gerada/unid (L/kg.d)
1	26	07:20:00	8.475	565	190	312	0,88
2	34	09:00:00	23.300	586	161	328	0,34
3	30	08:30:00	21.300	415	198	275	0,31
MÉDIA	-	8:16:00	17.692	522	183	305	0,51
DP	-	-	-	93	19	27	0,32

N: número de medições;

Vazão gerada/unid: vazão de esgoto gerada referente à 1kg de polpa produzida.

Figura 12- Hidrograma de vazão de água residuária das campanhas realizadas



Durante as campanhas, as vazões médias foram respectivamente os valores 312, 328 e 275. A média total das campanhas é igual a 305 L/h e a vazão gerada por unidade de polpa é igual a 0,51 L/kg.d. A variação do número de medições ocorre devido à instabilidade de quantidade de frutos que chega à fábrica para processamento, período de intervalos durante a produção e ritmo de produção.

No primeiro dia de medição, foram gerados 2,29 m³ de esgoto, no segundo dia, 2,95 m³ de esgoto e no terceiro, 2,09 m³ totalizando um volume de 7,33 m³, sendo 48% no turno matutino e 52% no turno vespertino. Isso ocorre principalmente pelo fato que no período matutino, há o transporte do fruto até a fábrica, descarregamento do mesmo e amolecimento para só então dar início à produção. Este processo inicial leva certo tempo, por isso no período vespertino há uma maior produção, pois o estoque de fruto deve ser processado no mesmo dia. Com essa maior produção pelo período vespertino, há maior geração de esgoto, além disso, deve-se considerar o volume gerado na lavagem das máquinas e área de produção no final do expediente.

Observa-se o comportamento com picos altos e baixos de vazão ao longo do dia, o que pode ser considerado comum na geração de água residuária industrial, que normalmente não há vazão constante. Alguns fatores podem ocasionar essa variação, tais como: o ritmo da produção, número de horas de produção, quantidade de polpa produzida e as atividades de limpeza que ocorrem na área de produção da fábrica.

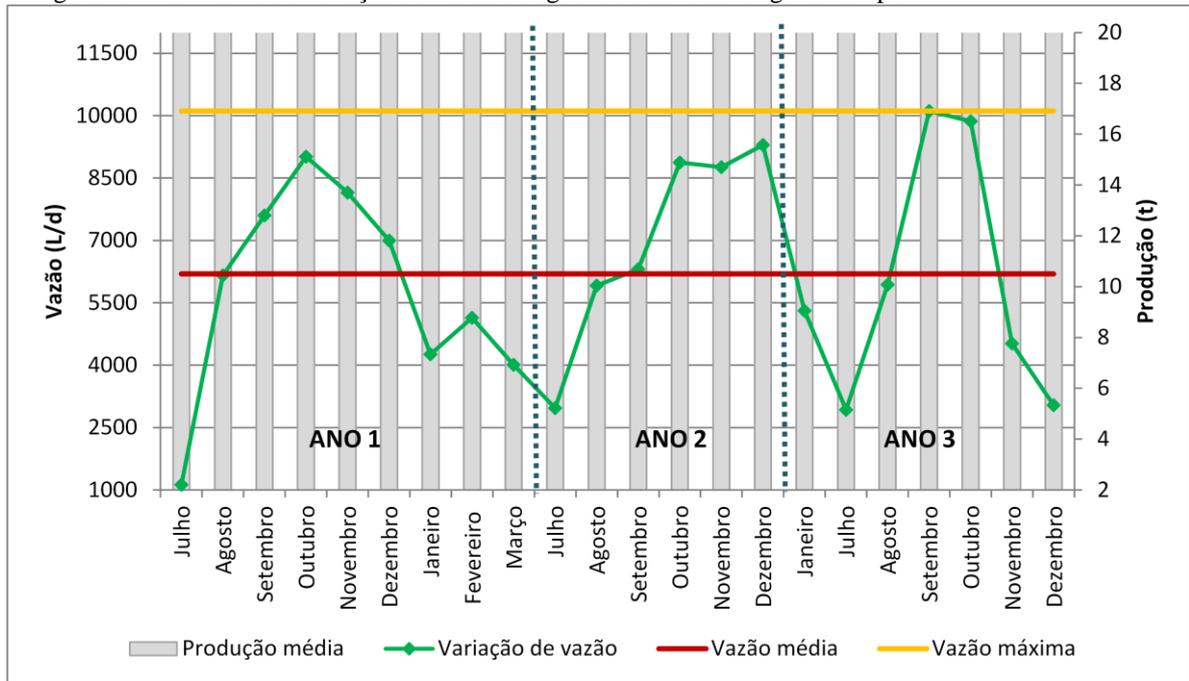
Também é possível perceber que os menores valores de vazão (abaixo da vazão média) encontram-se no final do período matutino, ou seja, a vazão vai diminuindo até chegar ao valor mínimo no horário do intervalo de produção e depois volta a aumentar no período vespertino quando a produção retorna por completo.

Para os coeficientes de vazão foram encontrados valores de 1,9 para K₁, 1,7 para K₂ e 0,5 para K₃. Quanto ao coeficiente de retorno foi determinado o valor de 0,07, o que significa que apenas 7% da água consumida retornam como esgoto. Esse pequeno coeficiente evidencia que a maior parcela da água consumida são referentes aos usos não computáveis e de perdas no sistema, além da água retida na polpa, como será comentado no balanço hídrico.

5.1.3 Estimativa de vazão de água residuária ao longo do tempo

A Figura 13 apresenta o comportamento da vazão de água residuária durante três (3) safras de produção de polpa. Vale ressaltar que foi estimada a vazão gerada por unidade de polpa produzida, obtido durante o estudo e a quantidade de polpa nos três anos analisados.

Figura 13- Estimativa da variação de vazão de água residuária ao longo do tempo



A produção em cada ano (safra) se inicia no mês de julho, indo normalmente até janeiro/fevereiro e há uma tendência crescente até atingir a produção máxima e decai novamente até encerrar a safra. Comparando os três anos, percebe-se que a cada ano há um aumento da produção mensal, com exceção de dois meses (agosto e setembro) do primeiro ano que tiveram maior produção em relação ao ano seguinte.

Durante o período analisado, houve o início do funcionamento de uma nova sede de produção no mês de outubro do ano 3. Nos dois primeiros anos, esta produção foi realizada em uma única sede (a mais antiga, que é objeto deste estudo), por isso há valores de produção maiores em alguns meses, ou seja, a produção de polpa agora é dividida entre duas sedes.

A vazão de água residuária acompanha essa crescente proporcionalmente à produção, por isso é importante destacar a importância do tratamento desta água residuária, pois a cada ano, a contribuição desta vazão é maior. A vazão média durante este período é igual a 6.196 L/d. É importante destacar que no mês de setembro do ano 3 se obteve a vazão máxima ($Q = 10.115$ L/d) durante o período analisado e, apesar de iniciar o funcionamento de uma nova sede de produção no mês seguinte, não houve uma diferença significativa de vazão, tendo o mês de outubro uma vazão média de 9.867 L/d.

Após essa divisão de produção entre as duas sedes, a partir do mês de novembro, houve um decaimento de vazão de água residuária gerada de 30 a 50% comparando com o mesmo período do ano anterior. Isso não significa uma queda na geração de água residuária, apenas está sendo gerada em duas sedes, diminuindo a carga poluidora no local deste estudo.

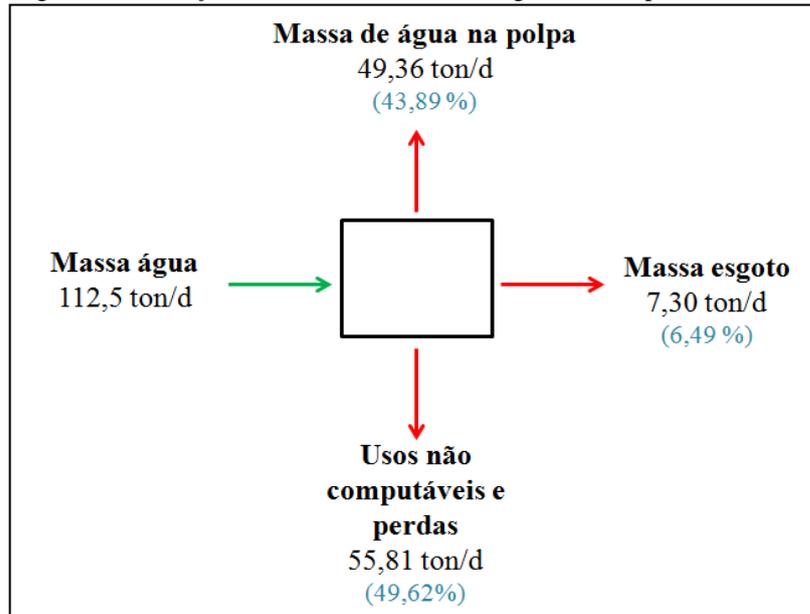
5.1.4 Balanço hídrico de massa

Com os hidrogramas de vazão de água e esgoto conhecidos, é possível realizar um balanço de massa hídrico.

É importante destacar que não há um volume constante de água utilizada. O volume médio utilizado varia devido o tipo de açaí processado, que interfere no volume de água utilizado, a quantidade de polpa produzida e o número de horas de produção.

Na Figura 14, é apresentado o balanço de massa da água, que foi realizado com os valores totais obtidos durante todas as campanhas.

Figura 14- Balanço hídrico de massa total da água das campanhas de medição



Fonte: Autor (2015)

A massa de água utilizada foi 112,4 ton/d que resultou na geração de 7,30 ton/d de esgoto, massa de água na polpa igual a 749,36 ton/d e massa de perda de água 55,81 ton/d. Observa-se que a quantidade de água incorporada à polpa é bem maior que as demais (esgoto gerado e água incorporada à polpa). Isso ocorre devido o elevado teor de umidade da polpa, o qual foi encontrado valor de 93%, ou seja, esta é constituída predominantemente de água.

Em relação aos usos não computáveis e perdas no processo produtivo, considerou-se todo volume de água utilizado, porém que não gera esgoto e nem está incorporado à polpa. Esses usos totalizam aproximadamente 50% do valor total e são causadas devido uma parcela do volume de água que é utilizado na lavagem dos pisos (e que não vai para caixa receptora de esgoto), preparo de refeição para os funcionários (refeitório), banheiros, absorção de água pelo caroço do açaí, entre outros.

5.1.5 Caracterização qualitativa da água residuária

Os resultados médios encontrados para caracterização físico-química do efluente bruto são apresentados respectivamente na Tabela 13.

Tabela 13: Características físico-químicas do efluente de processamento de açaí

Variáveis	Unidade	N	Média ± DP
pH	–	3	5,3- 5,8
Cor aparente	uC	3	13883 ± 1186
Turbidez	uT	2	7900 ± 15
Sól. Sedimentáveis	mL/L	2	4,75 ± 0,35
ST	mg/L	3	2333 ± 160
STF	mg/L	3	101 ± 7,21
STV	mg/L	3	2232 ± 154
SST	mg/L	3	372 ± 56,2
SSF	mg/L	3	299 ± 62,5
SSV	mg/L	3	73 ± 6,5
N-amoniacal	mg/L	3	12,4 ± 5,5
Nitrato	mg/L	3	8,1 ± 1,6
Fósforo Total	mg/L	3	42,8 ± 5,7
DBO	mg/L	3	3022 ± 82,24
DQO	mg/L	3	10652 ± 463,8
Alumínio	mg/L	1	49,01
Cálcio	mg/L	1	528,9
Cádmio	mg/L	1	0,024
Cobalto	mg/L	1	0,003
Cromo	mg/L	1	0,3
Cobre	mg/L	1	0,2
Ferro	mg/L	1	5,75
Manganês	mg/L	1	111,5
Zinco	mg/L	1	1,6

Observa-se um pH variando entre 5,3 e 5,8, o que caracteriza água residuária com características ácida, devido a composição da polpa, que pode ter pH de 4,0 a 6,2, segundo DOU (2000). Por isso, em alguns ensaios, esse valor foi ajustado, para melhor atuação dos produtos químicos.

Em relação à cor aparente, foi encontrado o resultado médio de 13883 uC, esse elevado valor ocorre pela presença do corante hidrossolúvel natural do açaí, a chamada antocianina.

Para a série de sólidos, foi encontrados valores igual a 2333 mg/L para ST, 372 mg/L de SST e 4,75 mL/L para sólidos sedimentáveis, sendo a maior parcela dos sólidos presentes na forma dissolvida (cerca de 84%), devido a grande quantidade de matéria orgânica dissolvida.

Os sólidos totais possuem sua maior parcela na forma volátil (STV=2232 mg/L), enquanto que os sólidos em suspensão tem sua maior parte fixa (SSF= 299 mg/L), possivelmente pela grande quantidade de “fiapos” que caracterizam uma fração inerte.

Nota-se que, como já constatado por Menezes *et al.* (2008), na composição da polpa, há uma grande quantidade de carboidratos, lipídeos, além da presença de proteínas, constituintes que agregam matéria orgânica a este efluente, sendo encontrados resultados de 3021,6 mg/L para DBO e 10652,3 mg/L para DQO.

Já para os nutrientes, foram encontrados valores igual a 12,4 mg/L para nitrogênio amoniacal, 8,1 mg/L para nitrato e 42,8 mg/L para fósforo total. O nitrogênio está presente nas proteínas e pode haver origem nesses compostos presentes na polpa de açaí como citado por Menezes *et al.* (2008). Já o elevado valor de fósforo total pode ser ocasionado pela utilização de detergente na lavagem constante da área de produção, acumulando resíduos deste na caixa receptora final do efluente.

Os metais são provenientes principalmente das características da composição do fruto do açaí e se apresentam na ordem Co<Cd<Cu<Cr<Zn<Fe<Al<Mn<Ca. Percebem-se elevadas concentrações de cálcio e manganês com proporção similar à composição desses minerais presentes na polpa de açaí estudada por Menezes *et al.* (2008). Já o alumínio se apresenta em concentração mais elevada do que se verificou no referido estudo sobre a composição da polpa e pode resultar do atrito das máquinas de transporte dos caroços ao tanque de acúmulo. Os demais minerais se apresentam em valores baixos.

Para verificar as condições sobre a biodegradabilidade do esgoto e método de tratamento é utilizada a relação DQO/DBO que resultou num valor igual a 3,53, caracterizando o limite de transição da relação intermediária para elevada. Isso significa que a fração biodegradável não é alta e a fração inerte é mais elevada, possibilitando a indicação para tratamento físico-químico.

5.2 ENSAIOS DE TRATABILIDADE EM JAR TEST

Os resultados dos ensaios experimentais são apresentados a seguir. As condições fixadas e procedimentos adotados para os ensaios em *jar test* foram descritos no Item 4.4.

5.2.1 Ensaio 1- Determinação da dosagem de cal

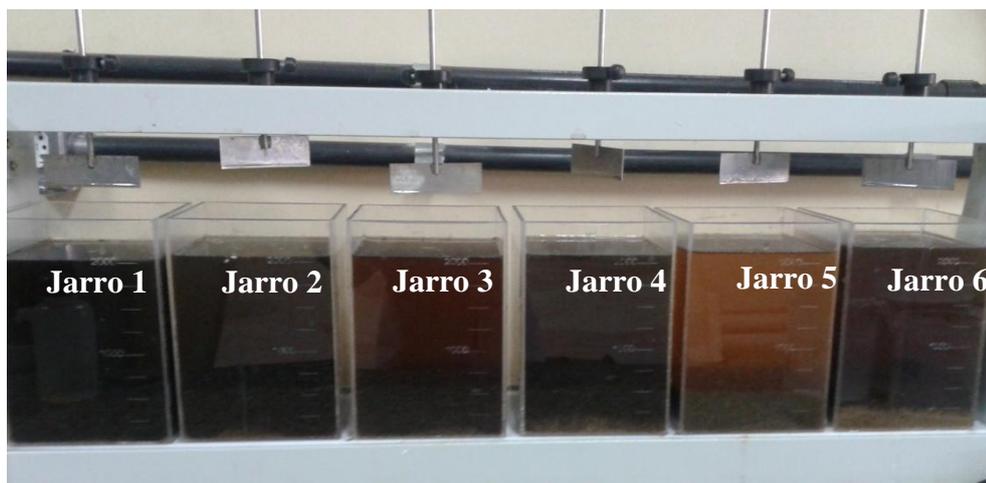
Na Tabela 14 estão sumarizados os resultados médios dos ensaios visando a obtenção de melhor dosagem desse produto químico. É importante ressaltar que nesse ensaio não fora realizado ajuste de pH para adição da cal.

Tabela 14- Resultados médios do ensaio para determinação da dosagem de cal

Jarro	Dosagem de cal	Variáveis físico-químicas			
		pH	Cor aparente (uC)	Turbidez (uT)	DQO (mg/L)
1	1,5 g/L	-	-	-	-
2	2,5 g/L	-	-	-	-
3	3,5 g/L	12,25	1900	114,5	1950
4	5,0 g/L	12,26	3100	366,5	2100
5	7,5 g/L	12,39	2500	74,0	1700
6	10 g/L	12,47	2400	79,5	1850

Neste ensaio, as duas primeiras dosagens (1,5 e 2,5 g/L) não apresentaram resultados visualmente em termos de clarificação do efluente, por isso não foram realizadas as análises físico-químicas previstas no planejamento para avaliação da tratabilidade da água residuária. Dentre as demais dosagens testadas, a que apresentou melhor resultado foi a dosagem de 7,5 g/L, com a qual houve melhor remoção dos poluentes. A eficiência de remoção para a melhor dosagem de cal foi em torno de 84 % para DQO, 99% para turbidez e 82 % para cor aparente. É importante ressaltar a devida correção de pH deste efluente no caso do seu lançamento, de modo a se adequar à legislação 430/2011 do CONAMA (pH entre 5,0 e 9,0) (BRASIL, 2011). Destaca-se que a cal foi utilizada como coagulante devido à sua ação principalmente na precipitação química em efluentes com elevada concentração de matéria orgânica como já verificado no estudo de Mello *et al.* (2012), onde foram encontrados resultados de remoção inferiores com maior dosagem, o que pode ser ocasionado pela composição diferenciada do material estudado. A Figura 15 ilustra o resultado deste ensaio.

Figura 15- Influência da variação da dosagem de cal no efluente



Fonte: Autor (2015)

5.2.2 Ensaio 2- Determinação da dosagem de Tanino

A Tabela 15 apresenta os resultados médios dos ensaios para determinação da melhor dosagem de Tanino. Neste ensaio realizou-se o ajuste no pH da água residuária para valores próximos a 6,0, para melhor atuação do coagulante.

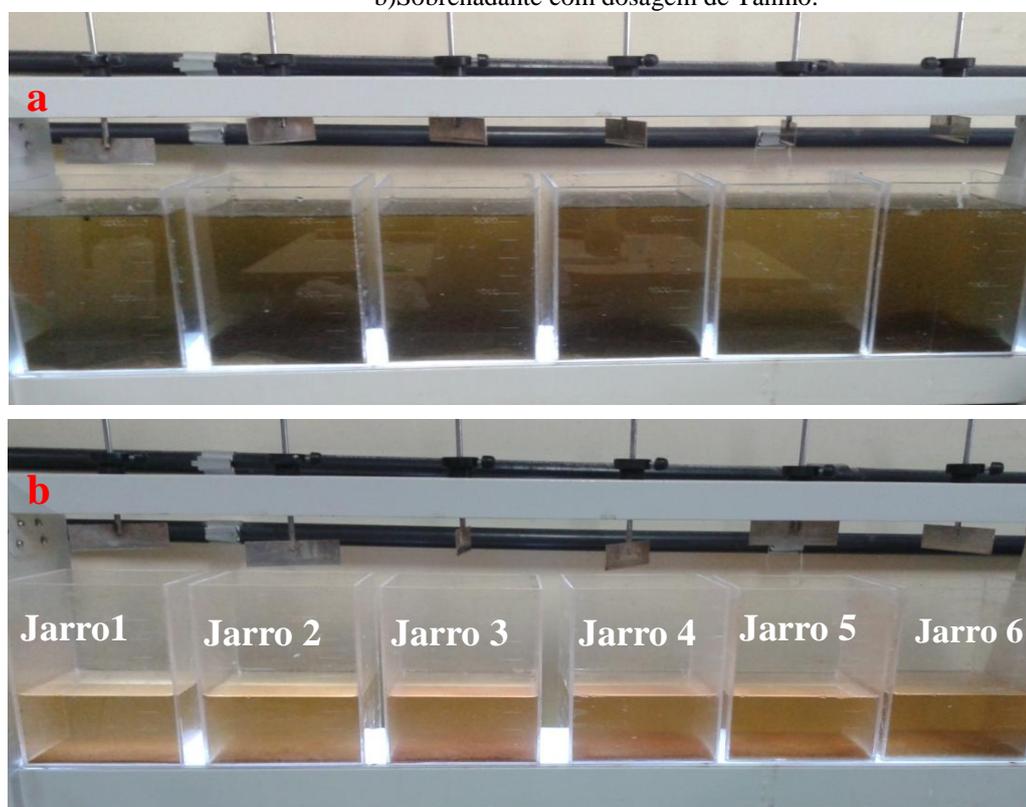
Tabela 15- Resultados médios do ensaio para determinação da dosagem de Tanino

Jarro	Dosagem de cal	Dosagem de Tanino	Variáveis físico-químicas			
			pH	Cor aparente (uC)	Turbidez (uT)	DQO (mg/L)
1	7,5 g/L	30 mg/L	6,14	400	40,75	2826
2	7,5 g/L	45 mg/L	6,28	450	85,0	3000
3	7,5 g/L	60 mg/L	6,30	350	68,75	2579
4	7,5 g/L	75 mg/L	6,27	375	50,0	2617
5	7,5 g/L	90 mg/L	6,21	450	57,75	2891
6	7,5 g/L	105 mg/L	6,30	500	81,0	3019

Neste ensaio, a dosagem de 60 mg/L de tanino resultou em uma melhor eficiência de remoção de cor aparente (97%) e turbidez (99,1%), porém DQO teve remoção razoável (76%). Neste ensaio houve uma dificuldade no ajuste de pH devido a elevada alcalinidade atribuída inicialmente pela cal. A Figura 16 ilustra o resultado deste ensaio.

No estudo de Couto Junior (2012), em água residuária de indústria têxtil, para maiores concentrações de cor aparente e turbidez, também houve um bom desempenho, porém numa dosagem seis vezes maior, o que demonstra diferentes atuações do tanino devido à composição da água residuária. No estudo de Vaz, *et al.* (2010), onde se trabalhou com efluente de galvanoplastia, com valores de cor aparente e turbidez bem inferiores ao efluente de açaí, foram obtidas boas remoções de cor aparente e turbidez também numa dosagem de 400 mg/L.

Figura 16- Influência da variação da dosagem de Tanino no efluente. a) Amostras adicionadas de cal. b) Sobrenadante com dosagem de Tanino.



Fonte: Autor (2015)

5.2.3 Ensaio 3- Oxidação: determinação da dosagem de Hipoclorito de Sódio

A Tabela 16 apresenta os resultados médios dos ensaios para determinação da melhor dosagem de hipoclorito de sódio. Neste ensaio houve o ajuste no pH da água residuária para valores próximos a 6,5 para melhor atuação do oxidante.

Tabela 16- Resultados médios do ensaio para determinação da dosagem de Hipoclorito de Sódio

Jarro	Dosagem de Cal	Dosagem de Hipoclorito de Sódio	Variáveis físico-químicas		
			Cor aparente (uC)	Turbidez (uT)	DQO (mg/L)
1	7,5 g/L	20 mg/L	790	104	2555
2	7,5 g/L	40 mg/L	440	78,9	1780
3	7,5 g/L	60 mg/L	189	70,3	1482
4	7,5 g/L	80 mg/L	176	53,5	1578
5	7,5 g/L	100 mg/L	170	65,0	1447
6	7,5 g/L	120 mg/L	209	74,7	2145

É possível observar na Figura 17 que as dosagens de 60, 80 e 100 mg/L de NaClO apresentaram visualmente melhores resultados na clarificação da água residuária, sendo a dosagem de 100 mg/L, a que obteve melhores resultados na remoção de cor aparente (98,7%), turbidez (99%) e DQO (86,4%). Destaca-se que nesse ensaio, assim como o anterior, houve uma dificuldade no ajuste de pH devido a elevada alcalinidade atribuído pelo pré-tratamento com cal. Outro ponto a ser ressaltado foi o forte odor de cloro no efluente gerado. A Figura 17 apresenta o resultado deste ensaio.

Figura 17- Influência da variação de dosagem de Hipoclorito de Sódio no efluente



Fonte: Autor (2015)

5.2.4 Ensaio 4- Determinação da dosagem de PAC

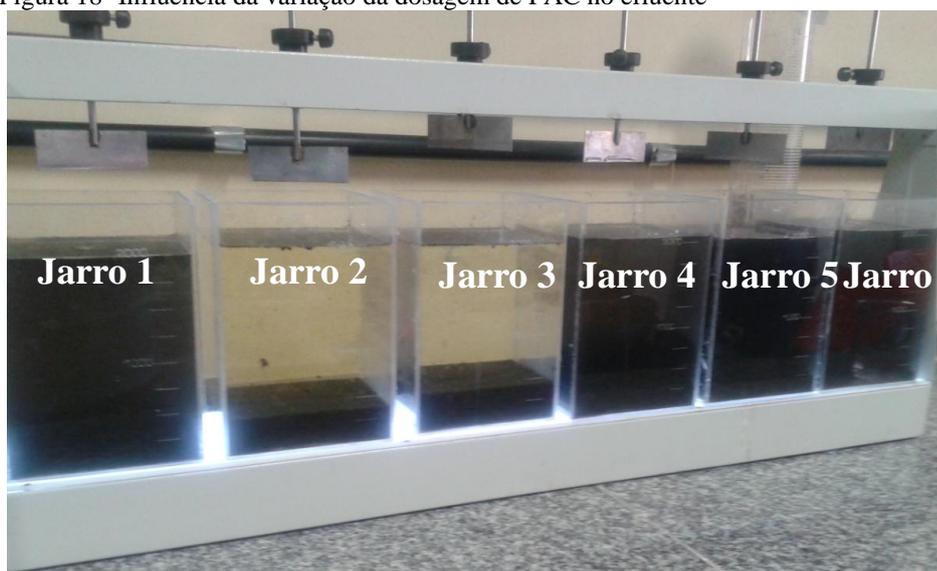
A Tabela 17 apresenta os resultados médios dos ensaios para determinação da melhor dosagem de PAC. Neste ensaio houve o ajuste no pH da água residuária para valores próximos a 8,0 para melhor atuação do coagulante.

Tabela 17- Resultados do ensaio para determinação da dosagem de PAC

Jarro	Dosagem de PAC	Variáveis físico-químicas			
		pH	Cor aparente (uC)	Turbidez (uT)	DQO (mg/L)
1	9 mg/L	-	-	-	-
2	18 mg/L	7,9	210	13,6	812
3	27 mg/L	7,6	192	12,9	880
4	36 mg/L	-	-	-	-
5	45 mg/L	-	-	-	-
6	54 mg/L	-	-	-	-

Nesse ensaio, as dosagens de 18 e 27 mg/L de PAC apresentaram visualmente resultados na clarificação da água residuária, por isso apenas essas foram analisadas. Os resultados foram semelhantes, porém a dosagem de 18 mg/L foi a que obteve melhores remoções de cor aparente (98,4%), turbidez (99,8%) e DQO (92,3%). Nesse ensaio, foi utilizado a solução de cal apenas para ajuste de pH. Nas condições de pH deste ensaio, foi possível observar a formação rápida de flocos na sedimentação, sendo o coagulante que houve melhor desempenho dos coagulantes testados. Na Figura 18 observa-se o aspecto visual das amostras submetidas as diferentes condições para tratamento da água residuária.

Figura 18- Influência da variação da dosagem de PAC no efluente



Fonte: Autor (2015).

5.2.5 Ensaio 5- Determinação da dosagem de polímero

A Tabela 18 apresenta os resultados médios dos ensaios para determinação da melhor dosagem de polímero. Neste ensaio foi utilizado a associação de PAC e polímero aniônico e ajuste de pH com cal hidratada para valores próximos a 8,0, antes da adição do PAC. Foram utilizadas as duas dosagens de PAC que obtiveram resultados semelhantes no ensaio anterior..

Tabela 18- Resultados do ensaio para determinação da dosagem de polímero

Jarro	Dosagem de PAC	Dosagem de polímero	Variáveis físico-químicas			
			pH	Cor aparente (uC)	Turbidez (uT)	DQO (mg/L)
1	18 mg/L	10 mg/L	7,3	173	8,8	847
2	18 mg/L	20 mg/L	7,1	198	8,2	833
3	18 mg/L	30 mg/L	6,9	151	8,8	826
4	27 mg/L	10 mg/L	7,1	169	10,3	888
5	27 mg /L	20 mg/L	7,35	251	25,2	886
6	27 mg/L	30 mg/L	7,0	190	12,4	813

Observando a Figura 19, percebe-se que visualmente os resultados na clarificação da água residuária foram semelhantes, porém a dosagem do jarro 3 (18 mg/L de PAC + 30 mg/L de polímero) foi a que obteve melhores resultados na remoção de cor aparente (99%), turbidez (99,8%) e DQO (92%). Nesse ensaio, foi utilizado a solução de cal apenas para ajuste de pH antes da adição do PAC. Foi possível observar a formação rápida e eficiente dos flocos, com boa consistência para sedimentação, sendo esta combinação de coagulante e polímero, a que houve melhor desempenho nos ensaios realizados. A Figura 19 apresenta o resultado deste ensaio.

Figura 19- Influência da variação da dosagem de polímero no efluente



Fonte: Autor (2015).

Nas Figuras 20, 21 e 22, são apresentadas a variação de concentração de DQO, cor aparente e turbidez em todos os ensaios, para comparação visual dos ensaios que obtiveram melhores resultados. Nos gráficos foi apresentado os valores obtidos das variáveis físico-químicas no clarificado de cada ensaio, sendo o eixo “x”, uma nomenclatura de representação para cada ensaio e dosagem.

Figura 20- Gráfico da variação de concentração de DQO no clarificado para todos os ensaios

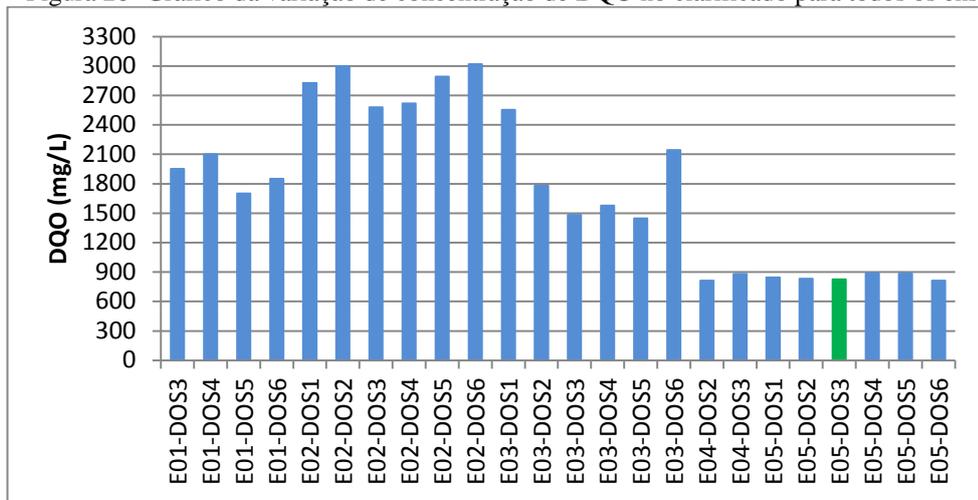


Figura 21- Gráfico da variação de concentração de cor aparente no clarificado para todos os ensaios

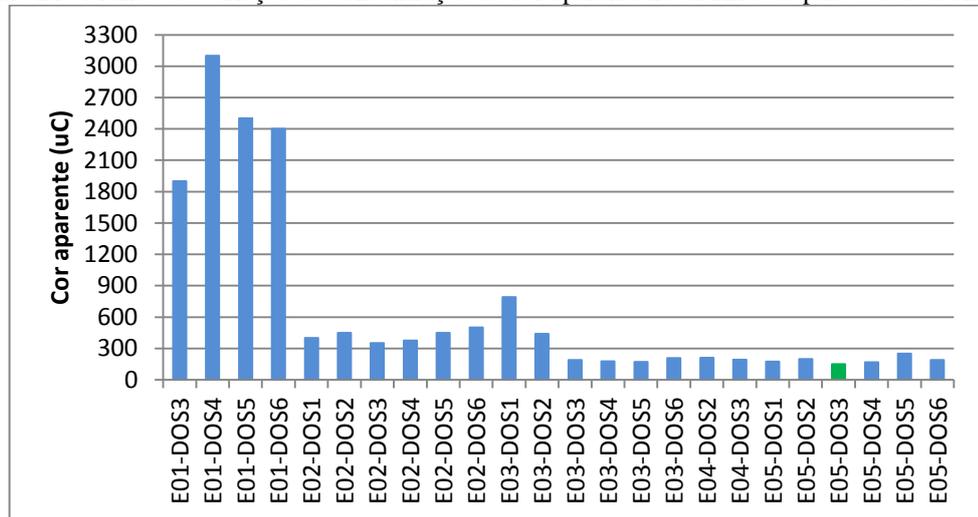
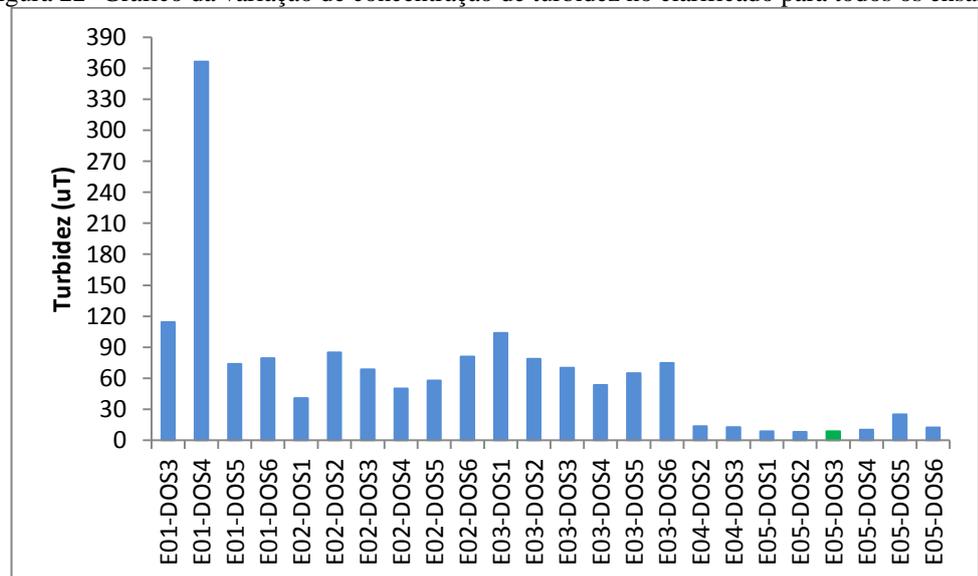


Figura 22- Gráfico da variação de concentração de turbidez no clarificado para todos os ensaios



Os gráficos sugerem uma variação de valores para os cinco ensaios, principalmente para DQO e cor aparente nos dois primeiros ensaios, havendo uma melhora nos ensaios 4 e 5. A turbidez apresenta uma melhora nos dois últimos ensaios

A partir do conhecimento dessa variação nos ensaios, escolheu-se o melhor resultado por meio do índice de qualidade que leva em consideração a interação entre as três variáveis. Logo, o resultado obtido para o ensaio 5 com dosagem 3 foi o mais satisfatório, sendo então realizada a otimização deste ensaio.

5.2.6 Ensaio 6- Otimização do melhor resultado

Após a obtenção do melhor índice de qualidade, foi realizada variação no pH a fim de verificar a influência deste no desempenho do coagulante e polímero. O ajuste de pH foi realizado com cal hidratada. A Tabela 19 apresenta os resultados deste ensaio de otimização.

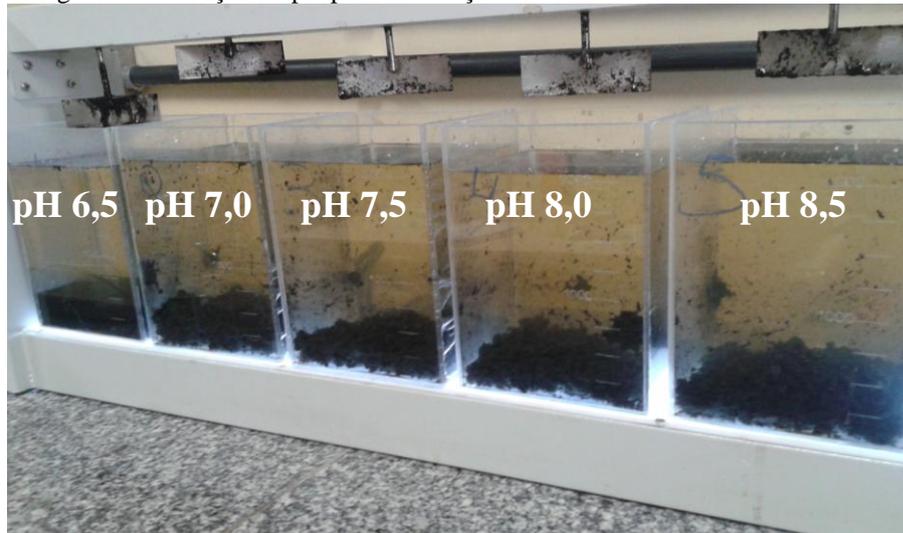
Tabela 19- Variação do pH para otimização do resultado

Jarro	Dosagem	pH	Variáveis físico-químicas			
			pH	Cor aparente (uC)	Turbidez (uT)	DQO (mg/L)
1	18 mg/L de PAC+ 30 mg/L de polímero	6,5	5,6	279	11,9	1239
2	18 mg/L de PAC+ 30 mg/L de polímero	7,0	5,9	237	9,5	1097
3	18 mg/L de PAC+ 30 mg/L de polímero	7,5	6,8	244	9,6	1107
4	18 mg/L de PAC+ 30 mg/L de polímero	8,0	7,1	213	8,7	1036
5	18 mg/L de PAC+ 30 mg/L de polímero	8,5	7,4	236	9,0	1235

Como testado previamente, o pH 8,0 propiciou melhores condições para atuação do coagulante e polímero, tendo remoção de 98,5% de cor aparente, 99,8% de

turbidez e aproximadamente 90% de DQO. Vale ressaltar que os ensaios foram realizados em dias diferentes, por isso há essa pequena diferença na remoção de poluentes, que ocorre devido à variação das concentrações da água residuária bruta nos dias dos ensaios. A Figura 23 mostra os resultados desse ensaio.

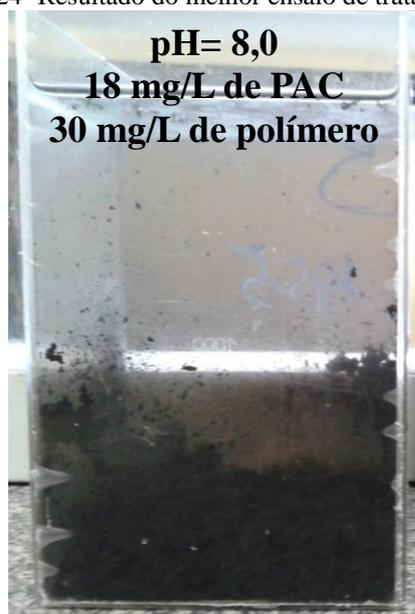
Figura 23- Variação do pH para otimização do resultado



Fonte: Autor (2015).

Após determinação de dosagem de coagulante e polímero, além da determinação do pH de atuação destes, foi realizado o experimento ideal, com todas as condições fixadas para coleta do clarificado e sua posterior caracterização físico-química. A Figura 24 mostra o resultado obtido com as condições ideais de tratabilidade.

Figura 24- Resultado do melhor ensaio de tratabilidade



Fonte: Autor (2015).

5.3 ANÁLISE GLOBAL DOS RESULTADOS

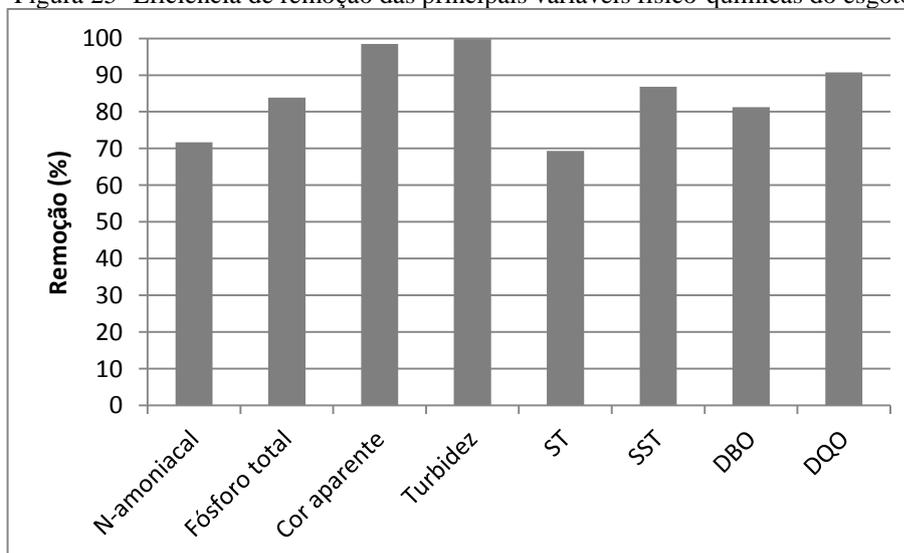
Após os ensaios foi realizada a caracterização do efluente tratado para verificar a remoção dos poluentes. A Tabela 20 apresenta esses resultados e a Figura 25 mostra a o gráfico de remoção dos principais poluente do esgoto.

Na Figura 25, é possível observar que as maiores remoções no efluente tratado foram respectivamente de turbidez, cor aparente e DQO, as mesmas variáveis selecionadas para avaliação em cada ensaio realizado, o que explica a escolha de tais variáveis para a geração do índice de qualidade do efluente tratado.

Tabela 20- Caracterização do efluente tratado

VARIÁVEL	Resultado médio do efluente	Remoção (%)
pH	6,8	–
Cor aparente (uC)	210	98,5
Turbidez (uT)	8,7	99,8
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	5,3	71,7
Fósforo total (mg/L)	6,9	83,9
Sólidos Sedimentáveis (mL/L)	3	36,8
ST (mg/L)	751	69,3
SST (mg/L)	49	86,8
DBO (mg/L)	567	81,2
DQO (mg/L)	993	90,7
Alumínio (mg/L)	0,098	99,8
Cálcio (mg/L)	2,06	99,6
Cádmio (mg/L)	0,0019	92,1
Cobalto (mg/L)	<MLD	–
Cromo (mg/L)	0,0067	97,8
Cobre (mg/L)	0,0007	99,7
Ferro (mg/L)	0,079	98,6
Manganês (mg/L)	0,029	99,9
Sódio (mg/L)	1,28	99,8
Zinco (mg/L)	0,038	97,7

Figura 25- Eficiência de remoção das principais variáveis físico-químicas do esgoto



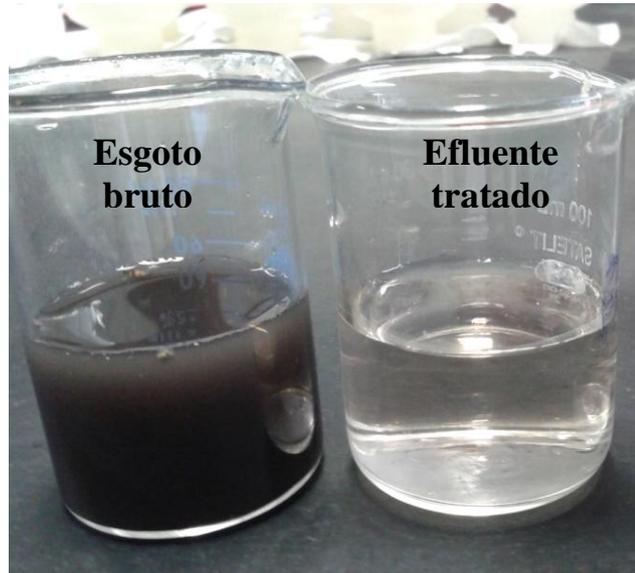
Observa-se remoção de DBO e DQO (81,2% e 90,7% respectivamente), o que demonstra que o tratamento proposto cumpre o objetivo de remoção da maior parte orgânica deste efluente e atende o critério da resolução 430 do CONAMA (BRASIL, 2011), onde prevê remoção mínima de 60% de DBO. Isso se deve principalmente pela atuação do coagulante PAC. Porém, mesmo estando de acordo com as condições da referida resolução, ainda permanece um valor elevado de DBO, acima do é encontrado em esgoto doméstico bruto. É importante que haja uma investigação dessa parcela orgânica para que haja melhoria nesta remoção. Este fato demonstra a fragilidade da referida resolução.

Quanto aos sólidos, o efluente apresentou boa remoção principalmente dos SST, mas também dos ST que eram responsáveis por elevadas concentrações de turbidez e cor do esgoto bruto. Vale destacar que ainda há um valor significativo de sólidos totais o que pode ser ocasionado pela presença de resíduos do polímero utilizado, ocasionando um aumento na fração de ST.

Em relação aos nutrientes, houve uma maior remoção de fósforo total do que nitrogênio amoniacal, provavelmente pelo fato de maior facilidade de remoção do fósforo por precipitação química com adição de cal e/ou sais metálicos de ferro ou alumínio, além da adsorção aos flocos particulados. Já o nitrogênio necessita de um processo complementar para sua remoção em processos físico-químicos, como arraste de ar ou cloração, como citado por Mota e Von Sperling (2009).

A cor aparente e turbidez tiveram excelentes resultados de remoção com a utilização de PAC+ polímero devido à grande desestabilização das partículas que agregavam elevada cor no esgoto bruto. A Figura 26 apresenta a comparação visual do esgoto bruto e o efluente resultante do ensaio de tratabilidade proposto.

Figura 26- Comparação visual entre o esgoto bruto e o efluente tratado



Fonte: Autor (2015)

Os metais analisados também apresentaram excelentes resultados de eficiência de remoção e se analisou a possibilidade de utilização deste efluente para irrigação, considerando dois itens (problemas com obstrução em sistemas de irrigação localizada e concentrações recomendáveis de oligoelementos) com base nos critérios usualmente empregados para avaliar água de irrigação e restrição de uso, como apresentado na Tabela 21.

Para a concentração de oligoelementos, há uma divisão entre as concentrações que provocam efeitos em curto prazo (até 20 anos) e em longo prazo (acima de 20 anos).

Tabela 21- Diretrizes para interpretar a qualidade de água para irrigação

PARÂMETRO	EFLUENTE	VALOR RECOMENDADO	
Problemas de obstrução em sistemas de irrigação localizada			
		Nenhuma*	Ligeira a moderada*
pH	6,8	< 7,0	7,0 – 8,0
SST (mg/L)	49	< 50	50 – 100
SDT (mg/L)	702	< 500	500 – 2.000
Ferro (mg/L)	0,079	< 0,1	0,1 – 1,5
Manganês (mg/L)	0,029	< 0,1	0,1 – 1,5
Concentrações máximas recomendáveis de oligoelementos em água de irrigação (mg/L)			
		Efeito de longo prazo	Efeito de curto prazo
Alumínio	0,098	5,0	20,0
Cádmio	0,0019	0,01	0,05
Cobalto	< MLD	0,05	5,0
Cromo	0,0067	0,1	10,0
Cobre	0,0007	0,2	5,0
Ferro	0,079	5,0	20,0
Manganês	0,029	0,2	10,0
Zinco	0,038	2,0	10,0

Fonte: Adaptado de FLORENCIO *et. al* (2006)

*: Restrição de uso.

Observa-se que o efluente resultante do tratamento proposto tem parâmetros que se enquadram na utilização de água de irrigação. Em relação a problemas de obstrução, quase todas variáveis estão dentro dos limites da água de irrigação sem nenhuma restrição, com exceção da concentração de sólidos dissolvidos (702 mg/L) que se enquadra na restrição ligeira a moderada. Essas restrições dizem respeito a problemas na seleção de culturas, no solo ou na alternativa de manejo do sistema de irrigação, portanto se o valor de SDT fosse <500 esta água de irrigação poderia ser utilizada para qualquer uso com ausência de problemas no solo e na cultura irrigada.

Em relação à concentração de oligoelementos na água de irrigação, verificou-se que todos os oligoelementos analisados atendem satisfatoriamente os valores recomendados para longo prazo. Essas recomendações são para prevenir o efeito cumulativo desses elementos no solo.

5.4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO LODO GERADO

Na Tabela 22 são apresentados os resultados da caracterização física do lodo gerado no ensaio de tratabilidade otimizado realizado em *jar test*.

Tabela 22- Características físicas do lodo gerado em *Jar test*

VARIÁVEL	RESULTADO NO LODO
Sólidos Totais (mg/L)	11217
Sólidos Totais Fixos (mg/L)	3021
Sólidos Totais Voláteis (mg/L)	8196
Densidade de sólidos	1,193
Densidade do lodo	1,002
Massa específica (kg/m ³)	1001,8
Teor de umidade (%)	98,9

O lodo analisado possui densidade de 1,002 e massa específica 1001,8 kg/m³. Segundo Jordão e Pessoa (2011), a densidade do lodo se aproxima à densidade da água (1,0), porém depende da distribuição de sólidos presentes neste lodo. A densidade de sólidos encontrada foi de 1,193, devido os sólidos terem densidade maior que a densidade do lodo como um todo.

Quanto à relação SV/ST, verifica-se 73 % do lodo é orgânico, tendo predominância de material orgânico na composição do lodo. Essa relação sugere o nível de digestão do lodo, neste caso próximo a faixa de lodo não digerido, como citado por Andreoli *et al* (2001).

O lodo possui umidade de 98,9 %, o que lhe caracteriza como lodo fluido. Esta característica tem grande influência no manuseio, transporte e disposição final. Por isso é necessário que haja em planta, etapas de tratamento principalmente para remoção umidade e estabilização deste lodo.

5.5 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS

5.5.1 Índice de qualidade de efluente tratado

Após organização dos resultados das variáveis físico-químicas (cor aparente, turbidez e DQO) de todos os ensaios foi aplicado a ACP, cujos autovalores obtidos foram $\lambda_1= 1,934$, $\lambda_2= 0,825$ e $\lambda_3= 0,240$. Na Tabela 23 são apresentadas as CPs e seus autovalores.

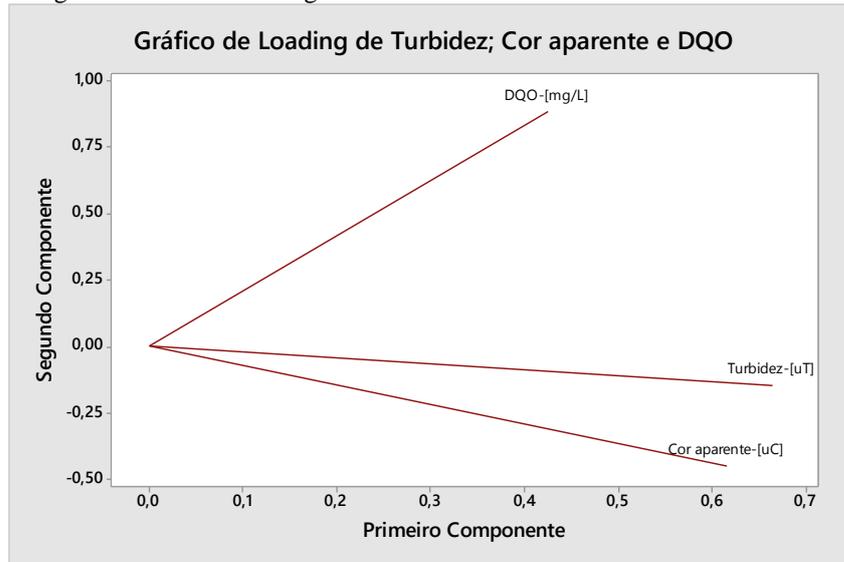
Tabela 23- Componentes obtidos para as variáveis físico-químicas

Variável	CP1	CP2	CP3
Turbidez (uT)	0,664	- 0,148	0,733
Cor aparente (uC)	0,616	- 0,449	- 0,648
DQO (mg/L)	0,425	0,881	- 0,207
Autovalor	1,934	0,825	0,240
Variância	0,645	0,275	0,08
Variância acumulada (%)	65	92	100

CP: componente principal

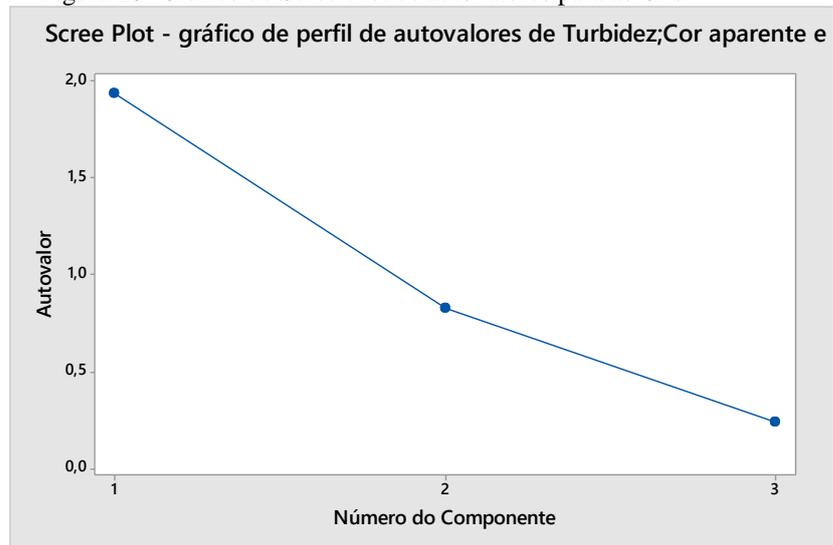
A ACP indicou a formação de três CPs para as variáveis físico-químicas analisadas em cada ensaio, sendo que a CP1 representa 64,5% da variância total indicando à variabilidade dos sólidos e a CP2 representa 27,5% da variância devido à matéria orgânica e inorgânica, juntas CP1 e CP2 totalizam 92% da variância total. A CP3 tem pouca representatividade, indicando apenas 8% da variância total. A Figura 27 ilustra a representatividade das variáveis em relação às CPs.

Figura 27- Gráfico de carga fatorial das CP1 e CP2



Para extração dos componentes pelo método de Kaiser são consideradas as componentes com valores > 1 . Neste caso foi escolhida a CP1, que representa aproximadamente 65% da variância total e indica o desempenho quanto aos poluentes, como apresenta a Figura 28.

Figura 28- Gráfico de Scree Plot de autovalores para as CPs.



Para calcular o IQET foi escolhida a CP1, pela maior representatividade de variância. Assim foi possível chegar a seguinte equação:

$$IQET = 0,664 (\text{turbidez}) + 0,616 (\text{cor aparente}) + 0,425 (DQO) \quad (5.1)$$

Na Tabela 24, são apresentados os escores obtidos para cada ensaio, sendo o escore representado pelo IQET e sua ordem de classificação do melhor ao pior.

Tabela 24- Escores (IQET) obtidos para cada ensaio e ordem de classificação

ID N° DO ENSAIO	IQET	N°
JAR-TEST01-DOS03	2.075	21
JAR-TEST01-DOS04	3.045	24
JAR-TEST01-DOS05	2.312	22
JAR-TEST01-DOS06	2.317	23
JAR-TEST02-DOS01	1.475	16
JAR-TEST02-DOS02	1.609	18
JAR-TEST02-DOS03	1.357	14
JAR-TEST02-DOS04	1.376	15
JAR-TEST02-DOS05	1.544	17
JAR-TEST02-DOS06	1.645	20
JAR-TEST03-DOS01	1.642	19
JAR-TEST03-DOS02	1.080	12
JAR-TEST03-DOS03	793	10
JAR-TEST03-DOS04	815	11
JAR-TEST03-DOS05	763	9
JAR-TEST03-DOS06	1.090	13
JAR-TEST04-DOS02	483	5
JAR-TEST04-DOS03	501	7
JAR-TEST05-DOS01	472	3
JAR-TEST05-DOS02	481	4
JAR-TEST05-DOS03	450	1
JAR-TEST05-DOS04	488	6
JAR-TEST05-DOS05	548	8
JAR-TEST05-DOS06	471	2

Os valores de IQET obtidos variaram de 450 a 3.045, sendo o melhor valor igual a 450. Este valor comprova estatisticamente a escolha do melhor ensaio e foi encontrado para o ensaio 5 (PAC+ polímero) com dosagem 3 (18mg/L de PAC e 30 mg/L de polímero) como observado no Item 5.3.6.

5.6 ESTIMATIVA DE CUSTO COM PRODUTOS UTILIZADOS NO TRATAMENTO PROPOSTO

Conhecidas as dosagens de produtos químicos utilizadas e as vazões média, máxima e mínima de esgoto gerado na fábrica de beneficiamento de açaí, foi possível estimar o volume de solução consumida diariamente e custos mensais com os produtos químicos, apresentados na Tabela 25.

Para estimativa de custos, as soluções utilizadas de cal hidratada e polímero foram as citadas no item 4.5. Para o policloreto de alumínio foi considerado a solução pura, com concentração de 180.000 mg/L.

As dosagens dos produtos utilizadas foram respectivamente 1.000 mg/L para cal hidratada; 18 mg/L para PAC e 30 mg/L para polímero.

Tabela 25- Estimativa de custo com produtos químicos para o tratamento proposto

Vazão efluente (L/s)		Concentração	Dosagem	Volume de solução	Quantidade		Custo	Unidade	Quantidade	Custo diário	Custo mensal
		mg/L	mg/L	L/dia	kg/dia	kg/mês	R\$/kg	kg	Unidade/Mês	R\$/dia	R\$
Ca(OH)2											
Q _{média}	0,085	100.000	1.000	1,05	0,105	3,2	0,5	20	0,2	0,05	1,58
Q _{mínima}	0,051	100.000	1.000	0,63	0,063	1,9	0,5	20	0,1	0,03	0,94
Q _{máxima}	0,145	100.000	1.000	1,80	0,180	5,4	0,5	20	0,3	0,09	2,70
Polímero											
Q _{média}	0,085	10.000	30	0,32	0,0032	0,09	18,99	25	0,004	0,06	1,80
Q _{mínima}	0,051	10.000	30	0,19	0,0019	0,06	18,99	25	0,002	0,04	1,08
Q _{máxima}	0,145	10.000	30	0,54	0,0054	0,16	18,99	25	0,007	0,10	3,07
PAC											
				L/dia	L/dia	L/mês	R\$/litro	Litro	Unidade/Mês	R\$/dia	R\$
Q _{média}	0,085	180.000	18	0,011	0,011	0,32	4,45	200	0,002	0,05	1,40
Q _{mínima}	0,051	180.000	18	0,006	0,006	0,18	4,45	200	0,001	0,03	0,84
Q _{máxima}	0,145	180.000	18	0,018	0,018	0,54	4,45	200	0,003	0,08	2,40
										TOTAL	4,77

Para a indústria alcançar os resultados de eficiência de remoção obtidos neste trabalho, será necessário para vazão média, um volume diário de aproximadamente 1 L de solução de cal hidratada, 11 mL de solução de PAC a 18% e 320 mL de solução de polímero a 1% para o período de funcionamento médio de 8 h e 16 min, como já verificado na elaboração do hidrograma de vazão.

É possível verificar que a estimativa de despesa mensal com produtos químicos (cal hidratada, PAC e polímero) para o resultado otimizado é igual a R\$4,77/mês, representando R\$0,022/m³ para tratar 219,5 m³ de esgoto produzido em um mês de funcionamento da fábrica. Esse custo pode chegar ao valor máximo de R\$8,17/mês.

Este valor é considerado baixo devido ao pequeno valor de vazão média determinado no local de estudo. Vale destacar que o valor unitário pode não ser representativo, mas analisando em escala global, pode-se obter uma vazão elevada, devido ao número de indústrias desse setor na Região Metropolitana de Belém (RMB) que não possuem tratamento, e também pelos pontos de vendas comerciais que representam uma contribuição em menor escala de vazão e carga poluidora, como estudado por Feio *et al.* (2014).

6- CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base no estudo realizado e nos resultados obtidos pode-se concluir:

- Durante as medições de água, foram elaborados hidrogramas diários e encontrados valores médios de vazões iguais à $Q_{\text{méd}}= 4699$ L/h; $Q_{\text{máx}}= 5099$ L/h e $Q_{\text{mín}}= 4187$ L/h, com vazão de água consumida por unidade de polpa igual a 7,81 L/kg.d.
- Durante as medições de esgoto, foram elaborados hidrogramas diários e encontrados valores médios de vazões iguais à $Q_{\text{méd}}=305$ L/h; $Q_{\text{máx}}= 521$ L/h e $Q_{\text{mín}}= 183$ L/h, com vazão de esgoto gerado por unidade de polpa igual a 0,51 L/kg.d.
- No balanço hídrico realizado foram encontrados os seguintes valores médios: massa de água utilizada igual a 112,4 ton/d, massa de esgoto gerada igual à de 7,30 ton/d, massa de água na polpa igual a 49,36 ton/d e massa de perda de água 55,81 ton/d, o que representa aproximadamente 50% de usos não computáveis e perdas de água no sistema. Esses usos não computáveis no processo produtivo são causados pelo volume de água absorvido pelo caroço, utilizado no refeitório, nos banheiros, entre outros.
- Na caracterização qualitativa do esgoto bruto, foram encontrados os valores médios: 13.883 uC para cor aparente; 7.900 uT para turbidez; 12,4 mg/L para N- amoniacal; 42,8 para fósforo total; 2.333 mg/L para ST; 372 mg/L para SST; 3.022 mg/L para DBO; 10.652 mg/L para DQO, além da presença de alguns metais. Esses resultados demonstram principalmente o alto teor de matéria orgânica de difícil degradabilidade, sólidos dissolvidos, o que destaca a importância do tratamento deste efluente antes do lançamento.
- Nos ensaios de tratabilidade, foi obtido o melhor resultado das análises físico-químicas para a combinação PAC (18 mg/L) e polímero (30 mg/L) em pH 8,0, resultando em valores de remoção cor aparente igual a 98,5%, turbidez igual a 99,8% e DQO igual a 90%.

- Na caracterização qualitativa do efluente tratado, verifica-se remoção acima de 80% para os poluentes, com exceção do nitrogênio amoniacal, sólidos sedimentáveis e ST. Isso demonstra que houve boa remoção global de poluentes no ensaio em *jar test*.
- Na caracterização física do lodo gerado foi encontrado valores de densidade igual a 1,002 e massa específica igual a 1001,8 kg/m³. Este lodo foi classificado como lodo fluido devido seu alto teor de umidade (98,9 %) e sua relação SV/ST igual a 73%, demonstrando composição predominantemente orgânica.
- O IQET comprova estatisticamente a escolha do melhor ensaio e foi obtido para o ensaio 5 (PAC+ polímero) com dosagem 3 (18mg/L de PAC e 30 mg/L de polímero), tendo valor calculado igual a 450.
- Na análise de componentes principais, verificou-se que as variáveis turbidez e cor aparente tem maior variabilidade para a qualidade do esgoto tratado.
- A estimativa de custo mensal com produtos químicos foi de R\$4,77/mês, representando um valor de R\$0,022 por m³ de efluente tratado.
- O tratamento da água residuária oriunda do efluente de açaí é possível e viável por processo físico-químico com a utilização de policloreto de alumínio e polímero, alcançando resultados aceitáveis para maioria das variáveis físico-químicas.

Com os resultados obtidos, recomenda-se que haja um estudo mais aprofundado sobre a composição dessa água residuária, a fim de alcançar a melhor qualidade do efluente, principalmente no que diz respeito à matéria orgânica na forma de DBO.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGRIZZI, Alexandre Demo. **Avaliação da Formação de Trialomitanos considerando o Uso de Cloro e Permanganato de Potássio como Pré-Oxidantes em Águas de Abastecimento**. 2011. Universidade Federal do Espírito Santo (Dissertação de Mestrado). Vitória.
- AISSE, Miguel Mansur, *et. al.* **Pós-tratamento de reatores anaeróbios por sistema de flotação**. In: Pós-tratamento de reatores anaeróbios. PROSAB/FINEP. 2001
- ANDREOLI, Cleverson V.; VON SPERLING, Marcos; FERNANDES, Fernando. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2001, 484p.
- AYRES, Manuel. *et al.* **BioEstat 5.0: Aplicações estatísticas nas áreas das ciências biológicas e médicas**. IDSM/MCT/CNPq. 2007.
- BETTO, Thaís Luciana; HEMKEMEIER, Marcelo; KOETZ, Paulo Roberto. Remoção de demanda química de oxigênio e nitrogênio total Kjeldahl de efluente de indústria de vegetais congelados por Reator em Batelada Sequencial. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**. v.18, n.3, p.235-242. Jul/Set 2013.
- BRASIL, **Resolução CONAMA nº 430**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. 2011.
- CARVALHO, Maria José Herkenhoff. **Uso de coagulantes naturais no processo de obtenção de água potável**. 2008. Universidade Estadual de Maringá (Dissertação de Mestrado). Maringá.
- COUTO JUNIOR, Osorio Moreira. *et al.* Caracterização e Otimização do Tratamento de Efluente Têxtil por Coagulação-Floculação, Utilizando Coagulante Natural Tanino. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, Vol.14, nº 1, Jan/Jun 2012.
- CRUZ, João Guilherme Heinz. **Alternativas para aplicação de coagulante vegetal à base de tanino no tratamento do efluente de uma lavanderia industrial**.2004. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Dissertação de Mestrado). Porto Alegre.
- DOU – Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 2000. Regulamento Técnico Geral para fixação dos Padrões de Identidade e Qualidade para polpa de fruta. Instrução Normativa nº 01, de 07 de janeiro de 2000. Diário Oficial de 10 de janeiro, Brasília, DF.
- EDER, Karina. **Aplicações de metodologia para análise e previsão do preço do fruto de Açaí**. 2011. Universidade Federal de São Carlos (Dissertação de mestrado em Biotecnologia). São Carlos.
- FEIO, Vanessa Farias; GIRARD, Luiza Carla; MENDONÇA, Neyson. Problemática da geração de efluentes oriundos do processamento de açaí na região metropolitana de Belém-PA. In: **Remoa**. V 14, n 3, mai-ago 2014.

FLORENCIO, Lourdinha; BASTOS, Rafael Kopschitz Xavier; AISSE, Miguel Mansur. (coord.). **Tratamento e utilização de esgotos sanitários**. Rio de Janeiro, ABES: 2006.

GORDON, André. *et al.* Chemical characterization and evaluation of antioxidant properties of Açaí fruits (*Euterpe oleraceae* Mart.) during ripening. In: **Food Chemistry**. v.133. 2012. Disponível em:< www.elsevier.com/locate/foodchem>. Acesso em: 22 abril 2014.

GUIMARÃES, Patrícia Sales. **Tratamento de águas residuárias oriundas da purificação do biodiesel por coagulação empregando sulfato de alumínio e quitosana: avaliação preliminar**. 2013. Universidade de Brasília (Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos). Brasília.

HAIR JR, J.F. *et al.* **Análise multivariada de dados**. 5ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

JORDÃO, Eduardo Pacheco; PESSOA, Constantino Arruda. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 6º edição. Rio de Janeiro: ABES, 2011.

KELLER, Jurg; GE, Huoqing, BATSTONE, Damien J. Operating aerobic wastewater treatment at very short sludge ages enables treatment and energy recovery through anaerobic sludge digestion. In: **Water Research**. v.47. 2013. Disponível em:< www.elsevier.com/locate/watres>. Acesso em: 17 abril 2014

LEE Chai Siah; ROBINSON, John; CHONG, Mei Fong. A review on application of flocculants in wastewater treatment. In: **Process Safety and Environmental Protection**. 2014.

LOPES, Marcelo Almir. **Avaliação de diferentes coagulantes para remoção de sólidos por flotação e sedimentação de água residuária de uma indústria metal-mecânica**. 2011. Universidade de São Paulo (Dissertação de Mestrado). São Carlos.

MANGRICH, A. S. *et al.* Química Verde no Tratamento de Águas: Uso de Coagulante Derivado de Tanino de *Acacia mearnsii*. **Revista Virtual de Química**. Vol 6. N 1. Jan-Fev 2014.

MATTOS, Ivanildo Luiz de. *et al.* Peróxido de hidrogênio: importância e determinação. **Revista Química Nova**. V. 6, nº 3, p.373-380, 2003.

MELLO, V. F. B., *et al.* Variáveis no processo de coagulação /floculação/decantação de lixiviados de aterros sanitários urbanos. **Revista Ambi-Agua**, Taubaté, v. 7, n. 2, p. 88-100, 2012.

MENEZES, Ellen Mayra da Silva; TORRES, Amanda Thiele; SRUR, Armando Ubirajara Sabaa. Valor nutricional da polpa de açaí (*Euterpe oleracea* Mart) liofilizada. **Acta Amazônica**. Vol. 38, n. 2, p. 311 – 316. 2008.

METCALF and EDDY. **Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse**. 4.ed., New York, McGraw-Hill, Inc, 2005.

MINGOTI, Sueli Aparecida. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.

MOREIRA, I.P. *et al.* Aplicação da poliacrilamida no tratamento de águas residuais. In: 51º Congresso Brasileiro de Química- Meio Ambiente e Energia. **Anais**. 2011.

MOTA, Francisco Suetônio Bastos; VON SPERLING, Marcos. (coordenadores). **Nutrientes de esgoto sanitário: utilização e remoção**. Rio de Janeiro: ABES, 2009.

NEVES, Thiago de Alencar. **Tratamento físico-químico dos efluentes líquidos da produção de biodiesel metílico em regime de funcionamento contínuo e batelada**. 2011. Universidade Federal de Mato Grosso (Dissertação de Mestrado em Engenharia de Edificações e Ambiental). Cuiabá.

PASCHOALATO, Cristina Filomena Pereira Rosa, *et al.* Pré-oxidação com cloro ou permanganato de potássio, coagulação e filtração de água contendo substâncias húmicas e comparação dos subprodutos formados com pós- cloração. IN: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. **Anais**. 2005.

PAVANELLI, Gerson. **Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação na água com cor ou turbidez elevada**. 2001. Universidade de São Paulo (Dissertação de mestrado). São Carlos.

ROSALÉM, Sabrina Firme, *et al.* Avaliação de Trihalometanos formados na etapa de pré-oxidação com cloro e permanganato de potássio em água de abastecimento. **Revista DAE**. nº 191. Jan-abril 2013.

SCHMITT, Dalila Maria Formentini. **Tratamento de águas residuárias da indústria de laticínios pelos processos combinados coagulação/ floculação/ adsorção/ ultrafiltração utilizando semente de *Moringa oleífera* como coagulante**. 2011. Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Dissertação de Mestrado em Engenharia Química). Toledo.

SHER, Farooq; MALIK, Atiq; LIU, Hao. Industrial polymer effluent treatment by chemical coagulation and flocculation. **Journal of Environmental Chemical Engineering**. Vol 1, 2013.

SILVA, Leandro Couto da; ZANETTI, Michele Maria Detoni; THEODORO, Joseane Debora Peruço. Estudo da remoção de cor e turbidez de efluentes através do processo de coagulação/floculação. III Encontro de divulgação científica e tecnológica. **Anais**. 2011.

SONG, Z; WILLIAMS, C.J; EDYVEAN, R.G.J. Treatment of tannery wastewater by chemical coagulation. **Desalination**. V. 164. 2004.

SOUZA, Jorge Eduardo Oliveira de; BAHIA, Pablo Queiroz. Gestão logística da cadeia de suprimentos do açaí em Belém do Pará: uma análise das práticas utilizadas na empresa Point do açaí. IN: VII SEGeT – Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia. **Anais**. 2010.

VASCONCELOS, Marcus Arthur Marçal; ALVES, Sérgio de Mello. Colheita e Pós-colheita. In: **Sistema de Produção do Açaí**. Vol. 4. EMBRAPA. Dez/2006.

VAZ, Luiz Gustavo de Lima. *et al.* Avaliação da eficiência de diferentes agentes coagulantes na remoção de cor e turbidez em efluente de galvanoplastia. **Revista Eclética Química**. Vol 35. Nº 4. 2010.

VICINI, Lorena. **Análise multivariada: da teoria à prática**. 2005. Universidade Federal de Santa Maria. CCNE: Santa Maria. 215 p.

VIEIRA, Jennyfer Silva. HENKES, Jairo Afonso. Uma análise nos impactos ambientais causados na lagoa da conceição pelo despejo de efluentes. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**. v.2 , n.2, p. 309-337, out.2013/mar.2014. Florianópolis.

XAVIER, Diogo J. C., SOUZA, Rubem C. R., SEYE, Omar *et al.* O beneficiamento do açaí no projeto modelo de negócio de energia elétrica em comunidades isoladas na Amazônia - *NERAM*.. In: **6º ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL**, 2006, Campinas. Disponível em: <<http://www.proceedings.scielo.br/scielo>>. Acesso em: 17/05/2014.