

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação Em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
PPGE3M

UTILIZAÇÃO DE LODOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA COMO
FONTE ALTERNATIVA DE ENERGIA

Beatriz Stoll Moraes

Porto Alegre
2018

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
PPGE3M

UTILIZAÇÃO DE LODOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA COMO
FONTE ALTERNATIVA DE ENERGIA

Beatriz Stoll Moraes
Engenheira Química

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia, modalidade Acadêmica.

Orientador: Prof. Dr. Ivo André Hönrich Schneider

Porto Alegre
2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**Reitor: Rui Vicente Oppermann****Vice-Reitor: Jane Fraga Tutikian****ESCOLA DE ENGENHARIA****Diretor: Luiz Carlos Pinto da Silva filho****Vice-Diretor: Carla SchwengbertenCaten****PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALURGICA E MATERIAIS****Coordenação: Carlos Pérez Bergmann****Vice-Coordenação: Afonso Reguly**

M828u Moraes, Beatriz Stoll

Utilização de lodos de Estações de Tratamento de Água como fonte alternativa de energia/ Beatriz Stoll Moraes. – 2018.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Porto Alegre, BR-RS, 2017.

Orientador: Prof. Dr. Ivo André Hömrich Schneider

1. Wartchow, Dieter; 2. Carissimi, Elvis; 3.Schwanke, Cristine Machado. I. Schneider, Ivo André Hömrich, orient. II. Título.

CDU:XXX.XX

BEATRIZ STOLL MORAES**UTILIZAÇÃO DE LODOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA COMO
FONTE ALTERNATIVA DE ENERGIA**

Esta Tese foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia com ênfase em Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia Extrativa e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M da universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Ivo André Hömrich Schneider

Prof. Coord. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Aprovado em: 11/06/2018

BANCA EXAMINADORA:

Prof^a. Dr^a. Cristine Schwanke – Unipampa Bagé

Prof. Dr. Dieter Wartchow - IPH/UFRGS

Prof. Dr. Elvis Carissimi - EAS/UFSM

Dedico este trabalho a todos àqueles que acreditaram no meu potencial e não esmoreceram em me incentivar, apoiando as minhas idéias e convicções, em especial ao meu pai Dr. Daniel Moraes (*in memoriam*) que dedicou sua vida ao Tratamento e Abastecimento de água à população de Pelotas/RS

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia – PPGE3M, pela oportunidade de realização de trabalho em minha área de pesquisa.

Ao Prof. Dr. Ivo André Hömrich Schneider pela orientação deste trabalho.

Aos colegas da Universidade Federal do Pampa – Unipampa que sempre acreditaram nesta conquista, em especial a Dr^a Luciana Borba Benetti, Dr^a Nirlene Fernandes Cechin, Dr. Victor Paulo Klöeckner Pires e ao Dr. Geraldo Crossetti.

À Reitoria da Universidade Federal do Pampa representada pelo colega e amigo Dr. Marco Antônio Fontoura Hansen que acompanhou a minha luta desde a época do Mestrado, sempre me dando apoio e estímulo para nunca desistir de meus objetivos.

Aos alunos, corpo técnico, docente e diretivo, representados na época pelo Pe. Dr. Marcos Sandrini e Pe. Décio Bona (*in memorian*) da Faculdade Dom Bosco de Porto Alegre que muito me ajudaram na minha formação como educadora, lembrando-me sempre da necessidade de aplicar *aamorevolezza* com os jovens, ensinamentos estes do grande e sábio Pe. João Melchior Bosco (Dom Bosco).

Aos meus irmãos Dr. Renan e Dr. Roberto Stoll Moraes, à minha mãe Nádia Stoll Moraes (*in memorian*) e a minha amiga especial, minha madrasta Lucila Mathias de Moraes, por sempre estarem presentes na minha vida.

Ao meu companheiro Rogério Borges que a muito acompanha na minha vida acadêmica e profissional.

A todos meu muito obrigado!

O sucesso ou insucesso da biomassa como alternativa aos combustíveis fósseis está relacionada com a força e a fragilidade das oportunidades tecnológicas e com o apoio da sociedade a cada uma dessas fontes de energia

Rossillo-Calle

RESUMO

O lodo é o principal resíduo sólido gerado no processo de Tratamento de Água para Abastecimento público (ETA). São considerados Resíduos Sólidos Não Perigosos e Não Inertes (Classe IIA) pela ABNT 10.004/2004, devendo ser tratados e dispostos em locais legalmente apropriados. Na maioria dos municípios brasileiros, estes lodos são despejados sem nenhuma forma de tratamento, contribuindo com a degradação da qualidade dos mananciais. O lodo é constituído de materiais inorgânicos como siltes e sílicas, matéria orgânica degradável, com presença de microorganismos patogênicos e metais, oriundos do próprio manancial de captação ou do coagulante utilizado durante o processo de coagulação. O objetivo principal deste trabalho foi verificar a possibilidade da utilização dos lodos das ETA como Fonte Alternativa de Energia, comparando os lodos gerados com Sulfato de Alumínio (SA), Polialumínio Cloreto (PAC) e Tanino (T) extraído de casca de *Acacia mearsii* de Wild. A metodologia utilizada contou com as seguintes análises físicas e químicas: Estereomicroscopia, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Difração de Raio X (DRX), Perda ao Fogo (PF) e Poder Calorífico Superior (PCS) e Inferior (PCI). Valores simulados de economia com a utilização dos lodos como fonte alternativa também foram levados em consideração. Os lodos ao SA e ao PAC foram coletados diretamente na planta da ETA São Gabriel Saneamento, localizada no Município de São Gabriel/RS e, o lodo ao Tanino foi gerado no Laboratório de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, na Universidade Federal do Pampa, *campus* São Gabriel. Os resultados apontaram que o lodo ao tanino apresentou uma quantidade maior de matéria orgânica, com perda ao fogo de 40,5%, maior teor de carbono (15%), hidrogênio de 2,44% e um poder calorífico de $4.347,30\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, podendo ser utilizado como bio-sólido, na reconstituição de áreas degradadas e como fonte de energia. Já o lodo ao SA, apresentou uma perda ao fogo de 23,2%, carbono de 5%, hidrogênio de 2,3%, um poder calorífico baixo de $1.384,40\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, enquanto que o lodo ao PAC apresentou uma perda ao fogo de 30,0%, carbono de 6,41%, hidrogênio de 2,05%, um poder calorífico baixo de $2.746,50\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, ficando entre ao SA e ao Tanino. A diminuição na conta de energia elétrica da estação estudada resultou em 3,22% para lodo ao PAC e 4,67% para lodo ao Tanino, correspondendo a uma economia anual com transporte para descarte e com geração de energia elétrica de US\$9.590,44 para o PAC e US\$10.615,38 para o Tanino. A fim de potencializar estes resultados foram acrescentadas porcentagens diferentes de casca de arroz (CA), técnica esta chamada de *cofiring*. Para as misturas obteve-se uma economia de consumo de energia elétrica de 6,32% (PAC+15%CA) e 8,39% (PAC+25%), correspondendo aos valores de US\$13.839,77 e US\$16.795,41 respectivamente. Os resultados mostraram que lodos de ETA possuem potencial de geração de energia, podendo ser aplicada dentro das próprias instalações de processo tornando-as mais sustentáveis em termos energéticos.

Palavras-chave: *Cofiring*. Energias Renováveis. Lodos de ETA. Sustentabilidade.

ABSTRACT

Sludge is the main solid waste generated in a Water Treatment Plant (WTP). Non-Hazardous and Non-Inert Solid Waste (Class IIA) by ABNT 10,004/2004 (Brazilian Regulation) is considered as being treated and disposed of in legally appropriate places. In most Brazilian municipalities, these sludges are dumped without any form of treatment, contributing to the degradation of the quality of the springs. The sludge is composed of inorganic materials such as silt and silica, degradable organic matter, with the presence of pathogenic microorganisms and metals, originating from the source of collection or the coagulant used during the coagulation process. The main objective of this work was to verify the possibility of using WTP sludge as an Alternative Energy Source, comparing sludge generated with Aluminum Sulphate (SA), Polyaluminium Chloride (PAC) and Tannin (T) extracted from *Acacia mearnsii* of Wild. The methodology used included the following physical and chemical analyzes: Stereomicroscopy, Scanning Electron Microscopy (SEM), X-ray Diffraction (XRD), Fire Loss (PF) and Upper Calorific Power (PCS) and Inferior (PCI). Simulated values of economy with the use of sludge as an alternative source were also taken into account. The sludge from the SA and PAC was sampled directly from the São Gabriel Saneamento WTP, located in the São Gabriel City (Southern Brazil), and the sludge from Tannin was generated at the Laboratory of Water Resources and Environmental Sanitation at the Universidade Federal do Pampa, Campus São Gabriel. The results showed that the sludge to the tannin presented a higher amount of organic matter, with a loss of 40.5%, a higher carbon content (15%), a hydrogen of 2.44% and a calorific value of 4 347.30 kJ. kg⁻¹, which can be used as biosolids, in the reconstitution of degraded areas and as an energy source. The sludge to aluminum sulphate (SA) presented a fire loss of 23.2%, carbon of 5%, hydrogen of 2.3%, a low calorific value of 1,384.40 kJ.kg⁻¹, while the sludge to Polyaluminium Chloride (PAC) presented a fire loss of 30.0%, carbon of 6.41%, hydrogen of 2.05%, a low calorific value of 2,746.50 kJ.kg⁻¹, being between SA and Tannin. The decrease in the electricity bill of the station studied resulted in 3.22% for sludge to PAC and 4.67% for sludge to Tannin, corresponding to an annual economy with transportation for disposal and with electric power generation of US\$9,590.44 for the PAC and US\$10,615.38 for Tannin. In order to potentiate these results were added different percentages of rice husk (CA), a technique called cofiring. For the mixtures, electricity consumption was 6.32% (PAC + 15% CA) and 8.39% (PAC + 25%), corresponding to the amounts of US\$13,839.77 and US\$16,795.41 respectively. Results showed that WTPA sludge has potential for energy generation, and can be applied within the process facilities themselves becoming more sustainable in terms of energy.

Keywords: Cofiring. ETA Sludge. Renewable Energy. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Mapa geográfico do Brasil mostrando a porcentagem de domicílios com coleta de esgoto (esquerda) e tratamento deste esgoto coletado em cada Estado (direita). (Fonte: GAVA et. al, 2016)	25
Figura 2- Fluxo de Energia no Brasil 2016. (Fonte: MME, 2017).....	29
Figura 3- Esquema de uma estação de tratamento de água convencional, utilizando como coagulante principal o sulfato de alumínio (Fonte: SANEP, 2018)	31
Figura 4- Fluxograma simplificado do processo Bayer para produção de hidróxido de alumínio e alumina a partir da bauxita. (Fonte: CONSTANTINO, 2002)	37
Figura 5- Fluxograma simplificado do processo Bayer para produção de Sulfato de Alumínio (SA) (Fonte: adaptado de CONSTANTINO, 2002)	38
Figura 6- Fluxograma simplificado do processo Bayer para produção de polialuminiocloreto (PAC) (Fonte: adaptado de CONSTANTINO, 2002).....	39
Figura 7- Mapa Mundi com destaque às áreas com cultivares de acácia: Continentes Africano, Australiano, Américas do Sul e Central. Fonte: (AGROSETA, 2015)	40
Figura 8- Mapa Político do Estado do Rio Grande do Sul, com destaque em verde a área com <i>Acacia mearnsii</i> e, em laranja os municípios de Montenegro, Estância Velha e Canoas (da esquerda para direita).....	42
Figura 9- Ácido Gálico (A) e Ácidos Elágicos (B) (Fonte: MANGRICH et. al, 2014).42	
Figura 10- (A) moléculas Flavan-3-ol e (B) Flavan-3,4-diol. (Fonte: MANGRICH et. al, 2014)	43
Figura 11- Exemplo de estrutura de tanino hidrolisável. Fonte: MANGRICH et. al., 2014	43
Figura 12- Exemplo de estrutura de Tanino Condensável. Fonte: MANGRICH et. al, 2014	44
Figura 13- Estrutura de um coagulante obtido a partir do tanino extraído da <i>Acacia mearnsii</i> . Fonte: MANGRICH et. al. (2014), TANAC (2016).....	45
Figura 14- Processos mais utilizados na redução de volume - desidratação (Fonte: Adaptado de Reali (1999).....	50
Figura 15- Leitões de secagem (Fonte: DEGRÉMOND,2007)	51
Figura 16- Prensa desaguadora (Fonte: DEGRÉMOND, 2007)	51
Figura 17- Conjuntos de filtros-prensa da Estação Barueri São Paulo (esquerda) e um filtro à vácuo (direita) (Fonte: DEGRÉMOND, 2007).....	52
Figura 18- Conjunto de centrífugas: Instalação da Saint-Brieuc (Côtes-du-Nord). (Fontes: DEGRÉMONT, 2007)	52
Figura 19- Bag (geotubo) confeccionado com manta geotêxtil (Fontes: SNATURAL, 2016)	53
Figura 20- Diferentes processos para produção de energia a partir de biomassa. Fonte: COUTO et al. (2004) (adaptado de STAISS & PEREIRA, 2001)	67

Figura 21- Alternativas para combustão combinada de carvão e outra biomassa (RESTREPO VICTORIA, 2012)	70
Figura 22- Mapa de distribuição de áreas de cultivo de arroz no Brasil. Fonte: Conab (2017)	71
Figura 23- Colheita de arroz em 2017 por Região do Brasil. (adaptado de Conab, 2017)	73
Figura 24- Distribuição da colheita de arroz em 2017 para a Região Sul do Brasil. (adaptado de Conab, 2017).....	73
Figura 25- Principais processos de Conversão Energética no aproveitamento energético da casca de arroz (MAYER et. al., 2006)	75
Figura 26- Usina Termelétrica Sepé Tiarajú em São Sepé/RS. Fonte: arquivo pessoal Marcos Fonseca, 2018.....	76
Figura 27- Rio Vacacaí próximo ao centro de São Gabriel/RS (Fonte: Autora, 2014)	79
Figura 28- Localização geral do ponto de abastecimento público da cidade de São Gabriel/RS (fonte: adaptado Google Earth, 2013).....	80
Figura 29- Barragem para a captação da água bruta para abastecimento público (Autora, 2014)	80
Figura 30- Coleta de lodo ao sulfato de alumínio (SA) no momento da limpeza do decantador 1 da ETA São Gabriel. (Fonte: A Autora, 2013)	82
Figura 31- (A) Lodo coletado (SA) e; (B) Após 3 dias de desidratação. (Fonte: A Autora, 2013).....	82
Figura 32- (A) Lodo coletado (PAC) e; (B) Após 3 dias de desidratação da Unipampa. (Fonte: A Autora, 2013).....	83
Figura 33- Coleta de água bruta no rio Vacacaí e; (B) Equipamento Jarrest na Unipampa. (Fonte: A Autora, 2013).....	84
Figura 34- (A) Floculação com Tanino e; (B) Após sedimentação – clarificação. (Fonte: A Autora, 2014)	85
Figura 35- Floculação em escala de 60L para obtenção do lodo ao Tanino (Fonte: A Autora, 2014).....	85
Figura 36- (A) Mesa de preparo para análise no MEV e (B) Amostras utilizadas no teste (Fonte: A AUTORA, 2014).....	87
Figura 37- Difratômetro Rigaku (Fonte: A AUTORA, 2014).....	87
Figura 38- Flocos decantados no final de um teste em Cone Imhoff (Fonte: A Autora, 2017)	91
Figura 39- Conjunto sugerido pela empresa ER-BR para ser utilizado com o lodo de ETA	94
Figura 40- Imagem do lodo ao sulfato de alumínio no Estereomicroscópio MOTIC com aumento de (A) 250X e (B) 400X (Fonte: Autora, 2014).....	97
Figura 41- Imagem do lodo ao Polialumínio Cloreto no Estereomicroscópio MOTIC com aumento de (A) 250X e (B) 400X (Fonte: Autora, 2014).....	97

Figura 42- Imagem do lodo ao Tanino no Estereomicroscópio MOTIC com aumento de (A) 250X e (B) 400X (Fonte: A AUTORA, 2014)	98
Figura 43- Comparativo de imagens obtidas por estereomicroscópio com aumento de 160 vezes: (A) Lodo ao SA; (B) Lodo ao PAC; (C) Lodo ao Tanino.....	99
Figura 44- Imagem em MEV do lodo ao Sulfato de Alumínio (SA) com aumentos de (A) 500X e (B) 1000X (Fonte: A AUTORA, 2014)	100
Figura 45- Análise qualitativa das imagens no MEV do lodo ao SA. (Fonte: A AUTORA, 2014)	100
Figura 46- Imagem em MEV do lodo ao Policloreto de Alumínio (PAC) com aumentos de (A) 500X e (B) de 1000X (Fonte: Autora, 2014).....	101
Figura 47- Análise qualitativa das imagens no MEV do lodo ao PAC. (Fonte: Autora, 2014)	101
Figura 48- Imagem em MEV do lodo ao Tanino com aumentos de (A) 500X e (B) 1000X (Fonte: Autora, 2014).....	102
Figura 49- Análise qualitativa das imagens no MEV do lodo ao Tanino. (Fonte: Autora, 2014).....	103
Figura 50- Comparação entre as imagens de MEV com 1000x de aumento de: (A) Lodo ao AS; (B) Lodo ao PAC e (C) Lodo ao Tanino.....	104
Figura 51- DRX da amostra de lodo obtido com coagulante SA	105
Figura 52- Detalhe do DRX da amostra de lodo obtido com coagulante SA.....	105
Figura 53- DRX da amostra de lodo obtido com coagulante PAC.....	106
Figura 54- Detalhe do DRX da amostra de lodo obtido com coagulante PAC.....	106
Figura 55- DRX da amostra de lodo obtido com coagulante a base de tanino.....	107
Figura 56- Detalhe do DRX da amostra de lodo obtido com coagulante Tanino....	107
Figura 57- Valores obtidos de Perda ao Fogo para as misturas de lodo + CA (casca de arroz)	115
Figura 58- Valores obtidos de Poder Calorífico Superior (kJ/kg) após mistura de lodo desidratado e casca de arroz	116

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1- Consumo anual por Fonte de Geração de Energia.....	28
Tabela 2- Vantagens e desvantagens do uso dos coagulantes sulfato de alumínio [Al ₂ (SO ₄) ₃ .18H ₂ O], polialumínio cloreto [Al _n (OH) _m Cl ₃ (n-m)] e tanino de Acacia mearnsii de Wild no tratamento de água para abastecimento público	33
Tabela 3- Alguns exemplos da utilização de coagulante orgânico à base de Tanino de Acacia mearnsii de Wild (Acácia Negra) como forma de tratamento de efluentes.	47
Tabela 4- Estudos referentes a possibilidade de substituição de coagulantes a base de alumínio pelo coagulante orgânico à base de Tanino de Acacia mearnsii de Wild como forma de tratamento de água para abastecimento urbano	48
Tabela 5- Estimativa de colheita de arroz para a safra 2016/17 no Brasil	72
Tabela 6- Características físico-químicas aproximadas dos coagulantes utilizados na geração de lodos	81
Tabela 7- Percentagem de compostos presentes em difratogramas	108
Tabela 8- Resumo das características dos lodos gerados no tratamento de água com diferentes coagulantes primários	110
Tabela 9- Potencial energético mensal gerado com o lodo de ETA São Gabriel....	112
Tabela 10- Resumo de geração e economia utilizando Lodos de ETA como fonte alternativa.....	113
Tabela 11- Resultado obtido de composição mineralógica das cinzas das misturas de lodos ao PAC e casca de arroz.	114
Tabela 12- Tabela somente de perda ao fogo das misturas de lodos ao PAC e casca de arroz	115
Tabela 13- Tabela resumo das características das misturas de lodos ao PAC e casca de arroz	116
Tabela 14- Potencial energético mensal gerado com a mescla do lodo de ETA São Gabriel e casca de arroz	117
Tabela 15- Resumo de geração e economia utilizando Lodos de ETA como fonte alternativa.....	117
Quadro 1- Vantagens e desvantagens da disposição de LETA em aterro sanitário.	54
Quadro 2- Vantagens e desvantagens da disposição dos resíduos em aterros exclusivos.....	55
Quadro 3- Classificação dos biocombustíveis:	64
Quadro 4- Resumo das etapas da elaboração da Tese	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Cinzas
ABRELPE	Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
AESSul	Empresa de Distribuição de Energia Elétrica
$Al_2(OH)_3$	Hidróxido de Alumínio
Al_2O_3	Óxido de Alumínio
$Al_n(OH)_mCl_{3(n-m)}$	Polialumínio Cloreto
$AlO_x(OH)_{3-2x}$	Bauxita
$Al_2SO_3 \cdot 14H_2O$	Hidróxido de Alumínio Hidratado
ARIP	Aterro de Resíduos Industriais Perigosos
ATD	Análise Térmica Diferencial
ATG	Análise Térmica Gravimétrica
C	Carbono
CaO	Óxido de Cálcio
CH ₄	Metano
CHNS	Análise Elementar Carbono, Hidrogênio, Nitrogênio e Enxofre
Comusa	Companhia Municipal de Saneamento
$C_{P\acute{a}gua}$	Capacidade Calorífica da água
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
CORSAN	Companhia Riograndense de Saneamento
C_{PAC}	Concentração de PAC
C_{SA}	Concentração de Sulfato de Alumínio
C_{Tanino}	Concentração de Tanino
DRX	Difração de Raio X
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgotos

FAMURS	Federação das Associações de Municípios do Rio Grande do Sul
H	Hidrogênio Elementar
H ₂	Hidrogênio
ha	Hectare
H _{ob}	Poder Calorífico do Ácido Benzóico
H _s	Horas de geração de energia
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IG	Instituto de Geociências
kg	Quilograma
L _{água}	Calor latente da água
LETA	Lodos de Estação de Tratamento de Água
m	massa
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MA	Massa de amostra após estufa 105°C
MJ	Megajoule
MO	Matéria Orgânica
MR	Massa de amostra após Mufla a 950°C
N	Nitrogênio Elementar
N ₂	Nitrogênio
NaOH	Hidróxido de Sódio
NBR	Normas Brasileiras
O	Oxigênio Elementar
P	Potência
PAC	Polialumínio Cloreto
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
PF	Perda ao Fogo
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos

PPGE3M	Programa de Pós Graduação em Minas, Metalúrgica e de Materiais
Q	Vazão
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
S	Enxofre
SA	Sulfato de Alumínio
SEMA	Secretaria Estadual do Meio Ambiente
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
t	tonelada
T	Turbidez
Unipampa	Universidade Federal do Pampa
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UNT	Unidades Nefelométricas de Turbidez
VAC	Barragens localizadas na bacia do rio Vacacaí – VAC 4, VAC 6 e VAC7
Δ	Relação entre Tanino e Sólidos
Δ_i	Relação entre Tanino e Sólidos
Δt	Variação de temperatura
ψ	Relação entre Sólidos e PAC
η	Rendimento do turbogerador

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
2. OBJETIVOS	22
2.1 Objetivo Geral	22
2.2 Objetivos Específicos	22
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
3.1. Dados sobre o Saneamento Básico no Brasil.....	23
3.2. Situação Energética Brasileira.....	26
3.3 Lodos de Estações de Tratamento de Água	30
3.3.1 Processos de tratamento de água de abastecimento público	30
3.3.2 Tipos de coagulantes.....	31
3.3.3 Processo produtivo dos coagulantes	35
3.3.3 Formas de desidratação dos lodos	49
3.3.4 Formas de destinação final	53
3.4.5. Lodos de ETA como biomassa para geração de energia alternativa	66
3.4 Processos de combustão combinada - <i>Cofiring</i>	68
3.5 Beneficiamento de arroz e reutilização dos resíduos - cascas.....	71
4. MATERIAIS E MÉTODOS	78
4.1 Obtenção dos materiais de estudo: Lodos	78
4.1.1 Lodo ao Sulfato de Alumínio (SA)	81
4.1.2 Lodo ao Polialumínio Cloreto (PAC)	83
4.1.3 Lodo ao Tanino de <i>Acacia mearsii</i> (T)	83
4.2 Análises Químicas e Físicas dos Lodos	86
4.2.1 Análise por Estereomicroscopia	86
4.2.2 Análise Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV	86
4.2.3 Análise de Difração por Raio X - DRX	87
4.2.4 Análise Elementar CNHS	88
4.2.5 Análise de Perda ao Fogo.....	88
4.2.6 Análise de Poder Calorífico Superior (PCS) e Inferior (PCI).....	89
4.3 Quantificação da Geração e Cálculo de produção de Energia.....	90
4.3.1 Determinação da quantidade de lodo gerado	90

4.3.2 Cálculo da produção de energia elétrica utilizando o lodo como matéria-prima.....	94
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	96
5.1 ANÁLISES QUÍMICAS E FÍSICAS DOS LODOS.....	96
5.1.1 Análise por Estereomicroscopia.....	96
5.1.2 Análise Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV.....	99
5.1.3 Análise de Difração por Raio X - DRX.....	104
5.1.4 Análise Elementar CHNS.....	109
5.1.5 Perda ao Fogo.....	110
5.1.6 Análise de Poder Calorífico Superior (PCS) e Inferior (PCI).....	110
5.2 QUANTIFICAÇÃO DA GERAÇÃO DE LODO E CÁLCULO DE PRODUÇÃO DE ENERGIA.....	112
5.2.1 Determinação da quantidade de lodo gerado e o potencial energético correspondente.....	112
5.3 CÁLCULO DE PRODUÇÃO DE ENERGIA POR <i>COFIRING</i>	114
6. CONCLUSÕES.....	119
REFERÊNCIAS.....	122

1 INTRODUÇÃO

A água aduzida dos mananciais superficiais passa por um conjunto de operações unitárias para se adequar ao consumo humano. Fazem parte as etapas de coagulação, floculação, sedimentação, filtração, desinfecção e fluoretação. Durante o processo, são removidos resíduos sólidos nos tanques de sedimentação e na lavagem dos filtros, resíduo estes denominados de lodo (BRATBY, 2006; DI BERNARDO E DANTAS, 2005; MACKENZIE, 2017

O lodo de ETA (LETA) é formado a partir da desestabilização das partículas em suspensão presentes na água bruta, que pode ser obtida com a utilização de um produto denominado coagulante, constituído por compostos inorgânicos contendo metais como alumínio/ferro ou por compostos orgânicos como o Tanino que é extraído da casca de *Acacia mearsii* (BRATBY, 2006; HAMEED *et. al.*, 2016).

Pesquisas realizadas por Moreira *et. al.* (2009) estimaram o despejo de 2.000 toneladas por dia de LETA no Brasil, diretamente nos cursos d'água sem qualquer tratamento. Somente a ETA Guandu (Nova Iguaçu/RJ) gera aproximadamente 900 toneladas por dia de LETA que são conduzidos por valos até Rio Capemba e rio Guandu Mirim desembocando por fim na baía de Sepetiba (OGLOBO, 2012). A empresa responsável ainda não se sabe o que fazer com esta enorme quantidade de lodo gerada ao dia. Nada é informado no site da empresa responsável pelo tratamento.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatístico - IBGE (2010) o lançamento *in natura* nos mananciais é a forma de descarte mais utilizada no Brasil (62,44%) demandando a depleção do oxigênio dissolvido, levando o manancial a

condições anaeróbicas, com a produção de odores desagradáveis, possível crescimento de algas e, conseqüentemente mortandade de peixes (MOREIRA *et. al.*, 2009). Esta “economia” da empresa com o tratamento do lodo, a curto e médio prazos provocarão um aumento dos gastos com os produtos químicos devido a piora da qualidade do manancial.

Outra forma de descarte citada por Richter (2012) é a disposição em aterros sanitários após desidratação (15 a 25% de teores de sólidos), mas este processo é muito oneroso, já que é cobrado por tonelada depositada e, nem sempre há um aterro legalizado próximo ao município, sendo necessário a realização de traslados, como é o caso da ETA São Gabriel Saneamento que dispõe seus resíduos em aterro distante 340km do município de São Gabriel/RS (SGS, 2018). O IBGE (2010) ressalta que devido aos custos de desidratação e falta de aterros licenciados próximos às estações são os fatores apontados para a baixa procura (3,44%).

O LETA é enquadrado como resíduo sólido pela NBR 10004/2004 (Norma Brasileira de Classificação de Resíduos Sólidos), devendo seguir a Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS (Lei Federal 12.305/2010) baseada na Lei 11.445/2007 das Diretrizes Nacionais de Saneamento Básico e do Decreto 7.217/2010 que faz cumprir esta Lei; abre-se um leque de oportunidades de estudos de destino deste resíduo, como a incorporação em materiais cerâmicos (WOLFF *et. al.*, 2015; KIZINIEVIČ *et. al.*, 2016; MEDEIROS *et. al.*, 2010), incorporação em cimentos e concretos (SUKSIRIPATTANAPONG *et. al.*, 2015; SALES *et. al.*, 2015), e como coagulante em Estações de Tratamento de Esgotos Urbanos (ETE) (RICHTER, 2012).

Uma outra alternativa possível para o LETA seria utilizá-lo como fonte alternativa na geração de energia elétrica (RIBEIRO *et. al.*, 2014), aproveitando a necessidade de novas fontes após crise energética brasileira em 2001, de destinação final dos LETA.

Neste contexto, o objetivo principal deste trabalho foi investigar a possibilidade da utilização dos LETA como fonte alternativa na geração de energia, minimizando os custos com transporte e disposição final, os custos com energia elétrica das companhias de abastecimento e, principalmente contribuindo com a melhoria da qualidade dos mananciais.

Para este trabalho, analisou-se três LETA obtidos com coagulantes diferentes utilizando a mesma fonte hídrica de abastecimento, captada no Rio Vacacaí no município de São Gabriel/RS. Os LETA sofreram o mesmo preparo para análises, sendo estas realizadas parte na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e parte na Universidade Federal do Pampa (Unipampa).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Investigar a possibilidade da utilização dos lodos gerados em Estações de Tratamento de Água de abastecimento público como fonte alternativa na geração de energia elétrica.

2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos tem-se:

1. Caracterizar os lodos gerados no tratamento de água de abastecimento público, a partir da utilização de três diferentes coagulantes primários - Sulfato de Alumínio (SA), Polialumínio Cloreto (PAC) e Coagulante Orgânico (Tanino);
2. Estimar e traçar um paralelo quanto a geração de lodo, geração de energia e economia para o coagulante PAC e Tanino aplicados às condições de trabalho da ETA São Gabriel Saneamento que utiliza o rio Vacacaí como fonte de abastecimento;
3. Investigar a possibilidade da aplicação de *cofiring* utilizando cascas de arroz no lodo ao PAC, a fim de elevar o seu poder energético, tornando-o mais atrativo para aplicação futura.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na revisão bibliográfica são discutidos temas que fundamentam o trabalho, como o saneamento ambiental e a situação energética no Brasil, fundamentais para justificar a necessidade desta pesquisa.

3.1. Dados sobre o Saneamento Básico no Brasil

O Saneamento básico ainda é um grande problema no Brasil. Apesar de ser um direito assegurado pela Constituição e definido pela Lei nº 11.445/2007 que fornece as Diretrizes Básicas de Saneamento, os dados comprovam que o país ainda está muito atrasado. A carência de abastecimento de água e tratamento e coleta de esgoto são fatores que contribuem para o baixo nível no índice de desenvolvimento humano brasileiro (SARTORI, 2016).

Segundo o Instituto Trata Brasil (SARTORI, 2016), que utiliza dados oficiais fornecidos pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), ligado ao Ministério das Cidades, o número de brasileiros que não tem acesso a água tratada chega a 35 milhões; para cada 100 litros de água tratada fornecida, 35 litros são perdidos em vazamentos, roubos e ligações clandestinas, falta de hidrômetros ou equipamentos ultrapassados, resultando em um prejuízo da ordem de 8 bilhões que poderiam ser aplicados em melhorias no sistema de distribuição.

O mesmo Instituto relata que aproximadamente 100 milhões de pessoas não têm as suas casas ligadas a redes de esgoto no Brasil e apenas 40% dos esgotos coletados são tratados. A região em piores condições é a Norte com apenas 14% de tratamento. Levando em consideração volumes, as capitais lançaram 1,2 bilhões de metros cúbicos de esgoto *in natura* no ano de 2013. Estima-se que o país necessitaria

aproximadamente 20 a 30 anos para universalizar o saneamento básico, com despesas estimas em valores próximos a 500 bilhões de Reais.

O Diagnóstico dos Serviços de água e Esgoto de 2015, lançados em fevereiro de 2017 (SNIS, 2016), fornecem os seguintes dados para o abastecimento de água no Brasil: em média 83,3% dos municípios são abastecidos com água tratada, mas a distribuição entre Regiões é desigual: Norte com 56,9%, Nordeste com 73,9%; Centro-Oeste com 89,6%; Sudeste com 91,2% e Sul com 89,4%. Estes valores, quando comparados aos do ano de 2014, tiveram um aumento de 0,3%.

Quanto à coleta e tratamento de esgoto a situação é pior: com média nacional de 50,3% de coleta, sendo que 91% dos esgotos gerados em ocupações irregulares não são nem coletados, correndo a céu aberto, proporcionando contato direto entre crianças e animais, favorecendo a transmissão de doenças de veiculação hídrica, como verminoses, hepatite e leptospirose.

Em termos de tratamento do que são coletados os números são alarmantes: no Norte são coletados 8,66% e destes somente 16,42% são tratados; Nordeste 32,11%; Centro-Oeste 50,22%; Sudeste 47,39% e Sul com 41,43% de esgotos tratados. O aumento de 2014 para 2015 foi de 0,4%, muito pequeno frente às necessidades urgentes.

A Figura 1 confronta os valores entre coleta (mapa à esquerda) e tratamento do que são coletados (mapa à direita).

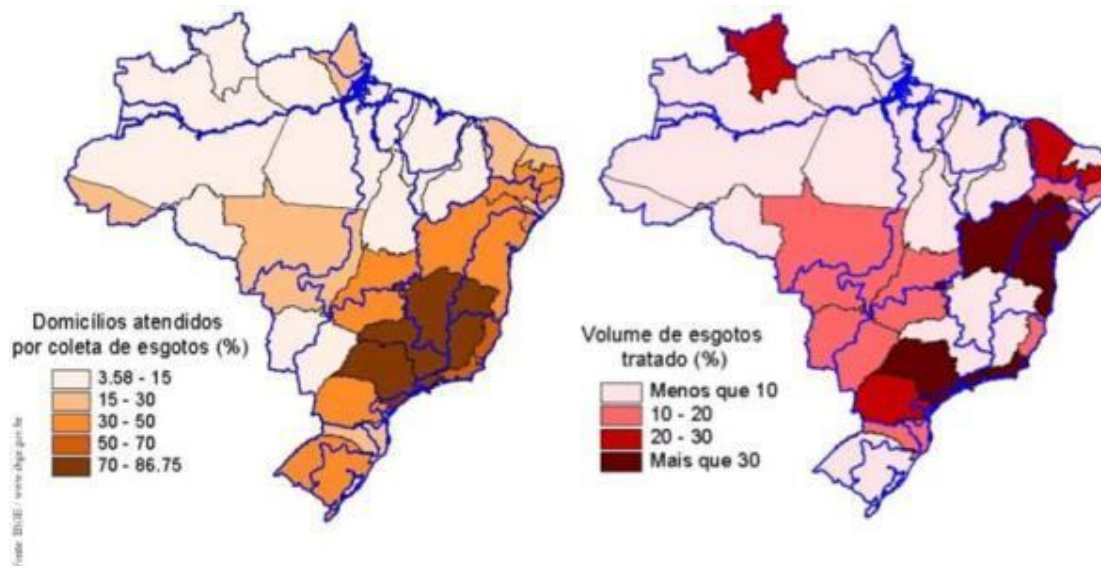


Figura 1- Mapa geográfico do Brasil mostrando a porcentagem de domicílios com coleta de esgoto (esquerda) e tratamento deste esgoto coletado em cada Estado (direita). (Fonte: GAVA *et. al*, 2016)

Os Resíduos Sólidos são coletados em sua grande maioria no país, mas o grande problema é o tratamento (se existente) e o destino final, normalmente não adequado. A região com maior porcentagem de recolhimento de RSU é a região Sudeste com 52,6%, enquanto que a que menos contribui é a Norte com 6,4%. As demais: centro-oeste com 8,2%, sul com 10,7% e nordeste com 22,1%.

A Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE (2016) informa que, dos resíduos coletados 17,2% em Lixões e 24,1% são dispostos em Aterros Controlados. A disposição de 57,2% em Aterros Sanitários dá uma imagem errônea da real situação, já que a grande maioria dos municípios brasileiros não possui e não tem condições de construir um aterro sanitário próprio, necessitando transportar seus resíduos a longas distâncias, o que onera em muito os custos com disposição. Existem relatos de municípios que percorrem distâncias acima de 300km para disposição adequada (locais com licenciamento ambiental).

3.2. Situação Energética Brasileira

Em 2001, a população brasileira foi obrigada a mudar seus hábitos de consumo de energia devido ao fenômeno chamado de “o grande apagão”. A crise energética foi relacionada principalmente à falta de planejamento no setor e à ausência de investimentos em geração e distribuição de energia, entre os anos de 1990 e 2000. Na época, o crescimento do consumo de energia foi de 49% enquanto que a produção não acompanhou a demanda, crescendo em 35% (TOMASQUIM, 2000).

Uma solução provisória de geração de energia foi a assinatura do contrato de fornecimento de gás natural da Bolívia (1996). O país investiu na construção de 49 termelétricas (1999), sendo 42 a gás natural, que deveriam estar em funcionamento até 2003, solucionando em parte a crise (TORRES FILHO, 2002).

Com períodos de seca maiores e consecutivos, os reservatórios chegaram a níveis muito baixos, dificultando na geração de energia pela matriz hidráulica, entrando em colapso em maio de 2001, quando o governo anunciou a interrupção temporária e regionais do fornecimento de energia como medida de racionamento, pois que as termelétricas ainda não haviam sido concluídas (GALVÃO; BERGMANN, 2015).

A partir de 1º de julho de 2001, os consumidores deveriam economizar em 20% do consumo de eletricidade, caso contrário, teriam um acréscimo no valor da energia cobrados na forma de multa; surgiram as lâmpadas compactas fluorescentes, mais econômicas que as incandescentes, selos de economia foram criados para os eletrodomésticos e houve uma corrida para otimização e geração de energia alternativas. Em 2009 o Governo faz o seu primeiro Leilão de Energia Eólica (EFE, 2009) e em 2014, o primeiro de Energia Solar (BLOOMBERG, 2014).

A partir de 2014, o Brasil sofreu uma nova crise hídrica, ocasionados por longos períodos de estiagem e esvaziamento de barragens, influenciando diretamente na produção de energia, já que a matriz energética brasileira é hídrica. De lá para cá, periodicamente as termelétricas são acionadas para compensar o que não é produzido, ocasionando um aumento das tarifas de energia em até 54,22% para o Norte (maior valor) e 43,78% para o Sudeste (menor valor) (LIS, 2018).

O país se deparou com uma nova realidade, com a instalação de fontes alternativas nas residências, com a vantagem de que toda energia gerada excedente poder ser injetada na malha geral de distribuição de energia, barateando ou zerando as contas com a concessionária. Neste momento de crise toda e qualquer fonte de energia alternativa é bem-vinda (GALVÃO; BERGMANN, 2015).

A preocupante dependência do Petróleo é destaque da Tabela 1 que mostra o aumento do consumo de gasolina e óleo diesel ao longo do período de 2007 a 2016, enquanto se observa a diminuição da utilização de lenha e carvão vegetal como fonte de energia. Em contrapartida nota-se discreto aumento em outras fontes primárias, ligadas à Biomassa de 2013 em diante.

Tabela 1- Consumo anual por Fonte de Geração de Energia

FONTES	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	SOURCES
GÁS NATURAL	7,2	7,4	6,9	7,0	7,3	7,2	7,1	7,1	7,2	7,4	NATURAL GAS
CARVÃO MINERAL	1,4	1,4	1,1	1,3	1,5	1,4	1,4	1,5	1,5	1,3	COAL COKE
LENHA	7,6	7,5	7,5	7,1	6,7	6,5	6,2	6,3	6,4	6,3	FIREWOOD
BAGAÇO DE CANA	12,4	12,7	12,9	12,5	11,1	11,2	11,3	10,8	11,0	11,7	SUGAR CANE BAGASSE
OUTRAS FONTES PRIMÁRIAS	2,3	2,3	2,5	2,5	2,5	2,3	2,4	2,5	2,7	2,9	OTHER PRIMARY SOURCES
GÁS DE COQUERIA	0,6	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	COKE OVEN GAS
COQUE DE CARVÃO MINERAL	3,1	3,0	2,4	3,1	3,3	3,2	3,0	2,9	3,0	2,8	COAL COKE
ELETRICIDADE	16,5	16,3	16,6	16,6	16,8	16,9	17,1	17,2	17,3	17,5	ELECTRICITY
CARVÃO VEGETAL	2,9	2,7	1,8	1,9	2,0	1,8	1,6	1,6	1,6	1,4	CHARCOAL
ÁLCOOL ETÍLICO	4,2	5,2	5,7	5,2	4,6	4,2	4,8	5,1	6,1	5,6	ETHYL ALCOHOL
ALCATRÃO	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	TAR
SUBTOTAL DERIVADOS DE PETRÓLEO	41,7	41,0	41,9	42,1	43,6	44,6	44,4	44,4	42,7	42,6	OIL PRODUCTS
ÓLEO DIESEL	16,4	16,7	16,9	17,2	17,7	18,3	18,8	18,8	18,4	18,1	DIESEL OIL
ÓLEO COMBUSTÍVEL	3,0	2,8	2,7	2,0	1,8	1,6	1,6	1,5	1,2	1,2	FUEL OIL
GASOLINA	6,7	6,4	6,7	7,3	8,5	9,7	9,4	9,7	8,9	9,5	GASOLINE
GÁS LIQUEFEITO DE PETRÓLEO	3,5	3,4	3,4	3,2	3,3	3,2	3,2	3,1	3,2	3,2	LIQUEFIED PETROLEUM GAS
NAFTA	3,6	3,0	3,3	3,2	3,0	2,9	2,5	2,3	2,7	2,4	NAPHTHA
QUEROSENE	1,2	1,3	1,3	1,3	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,3	KEROSENE
GÁS CANALIZADO	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	GASWORKS GAS
OUTRAS SECUNDÁRIAS DE PETRÓLEO	5,0	4,7	5,0	4,6	4,8	4,5	4,6	4,6	4,4	4,1	OTHER OIL SECONDARIES
GÁS DE REFINARIA	1,8	1,7	1,8	1,6	1,6	1,5	1,6	1,7	1,7	1,6	REFINERY GAS
COQUE PETRÓLEO	2,2	2,2	2,3	2,2	2,4	2,3	2,3	2,3	2,1	1,9	PETROLEUM COKE
OUT.EN.PETRÓLEO	1,1	0,8	0,9	0,9	0,8	0,7	0,7	0,6	0,7	0,6	OTHER ENERGY OIL PRODUCTS
PRODUTOS NÃO-ENERGÉTICOS DE PETRÓLEO	2,3	2,7	2,6	3,2	3,1	3,0	3,0	3,0	2,6	2,7	NON-ENERGY OIL PRODUCTS

Fonte: MME, 2017

A Matriz Energética e sua distribuição em 2016 foram resumidas pelo Ministério de Minas e Energia (MME, 2017) no gráfico apresentado na Figura 2.

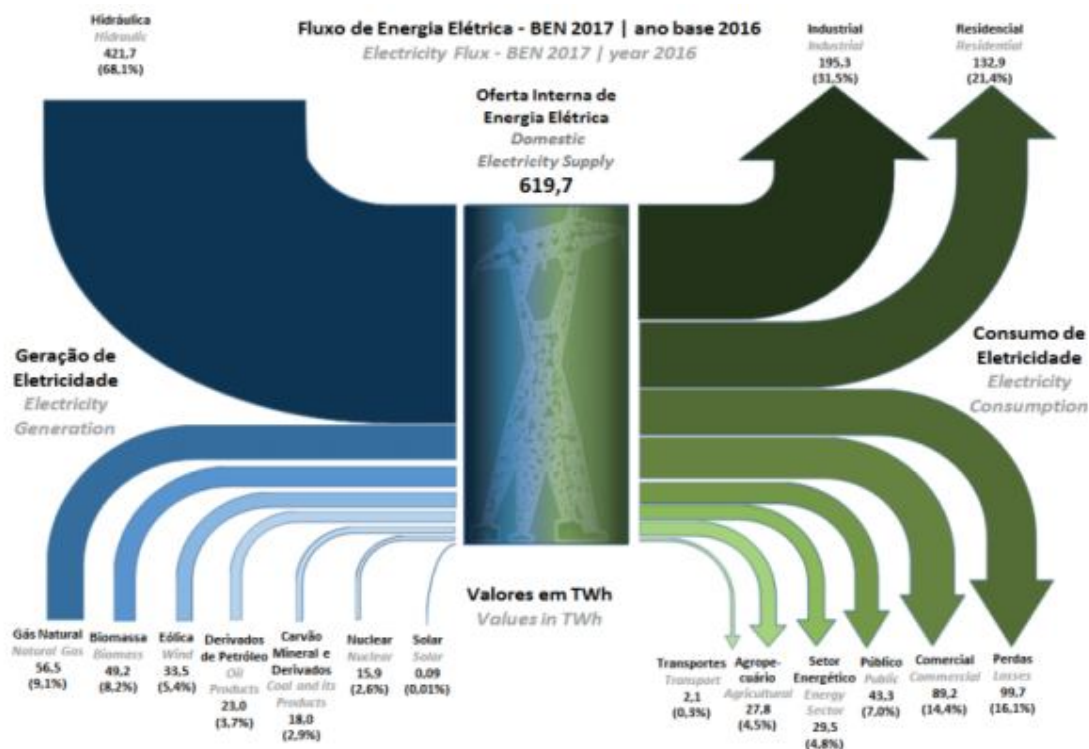


Figura 2-Fluxo de Energia no Brasil 2016. (Fonte: MME, 2017)

No Estado do Rio Grande do Sul, a capacidade instalada de geração de energia elétrica cresceu consideravelmente nos últimos anos, passando de 1.893,8MW em 1998 para 9.565,8MW em 2016. Este aumento permitiu a ampliação dos níveis de consumo, não só no estado, como também no país, pois o parque gerador opera através do Sistema Interligado Nacional de Geração e Transmissão - SIN. De acordo com a ANEEL, a capacidade instalada do Estado representa cerca de 6% da capacidade instalada total do Brasil.

Da matriz de geração de energia elétrica do estado, 57,3% corresponde a hidreletricidade (UHEs – Usinas Hidreletricas, PCHs – Pequenas Centrais Hidrelétricas e CGHs – Centrais Geradoras Hidrelétricas); 24,0% corresponde a termelétricidade (UTES – Usinas Termelétricas movidas a combustível fóssil ou a biomassa); 18,5% a energia eólica (EOLs) e 0,0005% de energia solar (UFVs –

Usinas Fotovoltaicas), demonstrando o avanço da diversificação com a utilização de fontes alternativas de energia. Esta diversificação teve início com a ampliação da utilização de gás natural e de biomassa como fontes de energia e está baseada, mais recentemente, na expansão da energia eólica e na instalação de novos projetos de aproveitamento de energia solar; o que tem assegurado melhorias na relação entre produção, importação e consumo no Estado com o acréscimo dos chamados Consumidores Livres e Produtores Independentes (SPGG, 2017).

3.3 Lodos de Estações de Tratamento de Água

Os lodos gerados nas Estações de Tratamento de Água (ETA) são produzidos durante o processo de tratamento nas unidades de sedimentação ou flotação, e, em menor quantidade, nos filtros, devendo ser tratados ou desidratados antes de serem reaproveitados como matéria-prima em outras indústrias ou enviados para um destino final adequado (RICHTER, 2012). Contudo, em muitos locais do Brasil, ainda são descartados no corpo receptor. Um detalhamento sobre os processos envolvidos no tratamento de água, os reagentes empregados como coagulantes e sua destinação é detalhada a seguir.

3.3.1 Processos de tratamento de água de abastecimento público

No processo de tratamento de água são utilizados coagulantes que são substâncias com a capacidade de promover a remoção dos sólidos suspensos presentes na água bruta, através da desestabilização das forças elétricas destes. Esta etapa do processo é chamada de coagulação/floculação.

Os mecanismos envolvidos estão ligados a diminuição das forças repulsivas entre as partículas e/ou a formação hidróxidos metálicos a partir da hidrólise de metais bivalentes ou trivalentes (alteração do Potencial Zeta) (RICHTER, 2012).

O contato da água com o coagulante ocorre em compartimentos de mistura rápida e a formação dos coágulos se dá à medida que o gradiente de velocidade diminui, em chicanas ou em câmaras de mistura lenta. Independente do processo utilizado (mecânico ou hidráulico), os coágulos (géis) são encaminhados para unidades de separação sólido-líquido como a sedimentação (unidades decantadoras) ou flotação (unidades de flotação), e após filtração em filtros lentos ou sob pressão, deixando a água clarificada (BRATBY, 2006).

A Figura 3 mostra uma ilustração com o Tratamento convencional realizado na estação do município de Pelotas/RS.

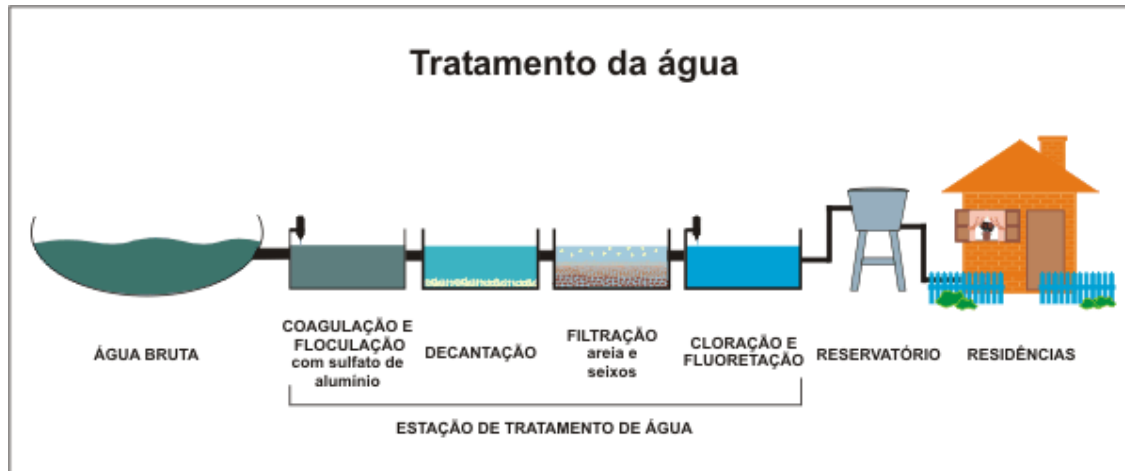


Figura 3- Esquema de uma estação de tratamento de água convencional, utilizando como coagulante principal o sulfato de alumínio (Fonte: SANEP, 2018)

3.3.2 Tipos de coagulantes

Os coagulantes aplicados ao tratamento de águas e efluentes podem ser divididos em dois grupos:

- I. *Inorgânicos ou metálicos*: São substâncias químicas formadas por sais de cloretos ou sulfatos contendo metais, na maioria das vezes de alumínio e/ou ferro. Exemplos: sulfato de alumínio $[Al_2SO_3 \cdot 14H_2O]$, Polialumínio Cloreto-PAC $[Al_n(OH)_mCl_{3(n-m)}]$ e Cloreto de Ferro III $[FeCl_3 \cdot 6H_2O]$ (DI BERNARDO e DANTAS, 2005; BRATBY, 2006).
- II. *Orgânicos*: são substâncias naturais, extraídas na maioria das vezes de vegetais. São exemplos: fécula de batata, quitosana, sementes de *Moringa olifeira Lam*, mesocarpo de Babaçu (*Orbygnia Martiana*), raspa do Juá (*Zizyphus joazeiros*), quebracho colorado (*Schinopsis balansae*); casca de *Eucalyptus tereticornis* (KLUMB e FARIAS, 2012) e taninos extraídos de casca de *Acacia mearnsii* (KLUMB e FARIAS, 2012; MARTINS *et al*, 2014).

A escolha do coagulante depende da qualidade da água do manancial de abastecimento que influencia na dosagem definida em testes de jarros (*Jartest*). A Tabela 2 apresenta as vantagens e desvantagens de três coagulantes comumente utilizados em estações de tratamento no Brasil.

Tabela 2- Vantagens e desvantagens do uso dos coagulantes sulfato de alumínio [Al₂(SO₄)₃.18H₂O], polialumínio cloreto [Al_n(OH)_mCl_{3(n-m)}] e tanino de Acacia mearnsii de Wild no tratamento de água para abastecimento público

Coagulante	Vantagens	Desvantagens
Sulfato de Alumínio [Al ₂ (SO ₄) ₃ .18H ₂ O]	<ul style="list-style-type: none"> – Elevada eficiência na remoção de materiais suspensos; – Menor custo no mercado. 	<ul style="list-style-type: none"> – Gera lodo com alta concentração de alumínio, podendo conter contaminação por outros metais, como ferro e manganês; – Possível presença de alumínio residual na água tratada; – Solução de trabalho altamente corrosiva;
Polialumínio Cloreto-PAC [Al _n (OH) _m Cl _{3(n-m)}]	<ul style="list-style-type: none"> – Elevada eficiência na remoção de materiais suspensos; – Não apresenta contaminantes; – Menor diminuição de pH da água tratada comparado ao Sulfato de Alumínio diminuindo custos com alcalinizantes; – Remove grande parte do fósforo, sulfetos, fluoretos, ferro e manganês. 	<ul style="list-style-type: none"> – Gera lodo com alta concentração de alumínio – Solução de trabalho corrosiva.
Tanino de A. <i>Mearnsii</i>	<ul style="list-style-type: none"> – Não altera o pH da água bruta; – Não acrescenta sais, cloretos, sulfatos e carbonatos no processo; – Ausência de alumínio; – Sua estrutura atua como quelante, removendo metais presentes na água; – Gera 20% a menos de lodo, apresentando características orgânicas, podendo ser utilizado como substrato em adubo orgânico ou na geração de energia.. 	<ul style="list-style-type: none"> – Necessidade de troca da granulometria da areia dos filtros de 0.6 mm para 1.0 mm, a fim de evitar a colmatação do meio; – Instalação de um soprador de ar para auxiliar na limpeza dos filtros, já que o tanino forma uma goma ao redor dos grãos de areia, de difícil remoção somente com água; – Necessidade de limpeza oxidativa com frequência de uma vez por ano dos filtros de areia

Adaptado de Moraes *et. al.* (2004a; 2014b, 2014c); Vanacôr (2005); Di Bernardo e Dantas (2005); Barradas (2006); Machado (2011); Farias *et al* (2014); Takur *et al.* (2014).

No Brasil, os sais de alumínio são os mais utilizados no tratamento de água de abastecimento. Contudo, este metal é acumulativo no organismo, está relacionado a redução de neurotransmissores e tem sido apontado como um dos precursores do Mal de Alzheimer (MARTINS *et. al.*, 2014; FERREIRA *et. al.*, 2008). Por exemplo, Ferreira *et. al.* (2008) conduziram um estudo onde evidenciaram os seguintes dados: uma relação de 68,0% entre sais de alumínio e Doença de Alzheimer, 23,5% não

apresentaram relação conclusiva e 8,5% não apresentaram nenhuma relação entre eles. Estima-se que cerca de 1,2 milhões de pacientes no Brasil possuam a doença, com o aparecimento de 100 mil novos casos por ano (IBGE, 2012).

Segundo o Anexo 10 do Anexo XX da portaria de consolidação nº5 de 28 de setembro de 2017, baseada na Portaria 2914 de 12 de dezembro de 2011 do Ministério da Saúde determina que a água potável pode conter no máximo 0,2 mg/L de alumínio na forma de residual para poder ser fornecida à população.

Faz-se necessário um alto controle operacional para evitar o arraste de coágulos de hidróxidos de alumínio residual na rede de abastecimento. Ainda se deve evitar o despejo dos lodos nos mananciais, que contaminam o leito e todos os seres vivos que de alguma forma entram em contato com ele. A dificuldade e o custo de descarte dos lodos oriundos do uso de sais de alumínio é a grande responsável pela prática de descarte em corpos hídricos. (SARTORI, 2016)

A destinação de lodos de estações de tratamento de água a partir de sais de alumínio como o sulfato de alumínio ou polialumínio cloreto é complicada, comumente destinada a aterros ou, muitas vezes, simplesmente lançada novamente no corpo hídrico (AHMAD *et. al.*, 2016). Esse tema tem sido alvo de investigação, onde aparecem possibilidades como o reaproveitamento ácido do alumínio pelo processo Fulton (SYED, 2016), incorporação em materiais cerâmicos (WOLFF *et. al.*, 2015; KIZINIEVIČ *et. al.*, 2016), incorporação de geopolímeros em cimentos *Portland* (SUKSIRIPATTANAPONG *et. al.*, 2015) ou mesmo o aproveitamento em leiras de biodigestão (HAYNES e ZHOU, 2015) com outros materiais. Contudo, esses processos encontram dificuldades em função de questões econômicas, de escala pelo caráter tóxico do alumínio.

O uso de coagulantes orgânicos tem sido apontado como uma alternativa aos tradicionais coagulantes inorgânicos (BRATBY, 2006; DI BERNARDO e DANTAS, 2005; HAMEED *et. al.*, 2016) comumente utilizados no tratamento de água para abastecimento público. Entre estes, destaca-se o tanino produzido a partir de casca de *Acacia mearnsii* de Wild e modificado pela Reação de *Mannich* (TAKUR e CHOUBEY, 2014; ALLOCHIO F^o *et. al.*, 2013).

Aplicações destes coagulantes têm sido reportadas para efluentes de lavagem de tecidos (CRUZ *et. al.*, 2005; STRÖHER, 2013), de pintura (ABOULHASSAN *et. al.*, 2016), de efluentes de indústria açucareira (MARTINS, 2014) e águas de abastecimento público (HAMEED *et. al.*, 2016).

Um benefício do uso do tanino é a geração de lodos com um caráter mais orgânico, sem a incorporação de metais, com maior possibilidade de reaproveitamento, evitando custos com transporte e armazenamento apropriado que oneram os custos operacionais. Esse caráter orgânico decorrente do lodo do tanino permite uma maior eficiência em compostagem e na produção de energia (CORNWALL, 2000).

3.3.3 Processo produtivo dos coagulantes

3.3.3.1 Produção do coagulante inorgânico Sulfato de Alumínio [$Al_2SO_3 \cdot 14H_2O$] e Polialumínio Cloreto (PAC) [$Al_n(OH)_mCl_{3(n-m)}$]

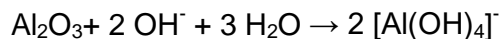
Na natureza, o Alumínio não é encontrado na forma elementar, mas combinado com oxigênio, sílica e/ou outros elementos; compondo, por exemplo, feldspatos (aluminossilicatos tridimensionais) e as micas (silicatos lamelares).

O processo de produção do coagulante mais comum utiliza a bauxita como matéria prima (CONSTANTINO *et. al.*, 2002).

A Bauxita foi formada em regiões tropicais e subtropicais pela ação do intemperismo sobre aluminossilicatos. Apesar de ser frequentemente descrita como o minério de alumínio, a bauxita não é uma espécie mineral propriamente dita, mas um material heterogêneo formado de uma mistura de hidróxidos de alumínio hidratados ($[AlO_x(OH)_{3-2x}]$, $0 < x < 1$) (CONSTANTINO *et. al.*, 2002). Pode conter impurezas como os óxidos de ferro (hematita, magnetita e goetita), sílica, óxido de titânio e aluminossilicatos, em quantidades que variam com a região de origem. As maiores reservas brasileiras estão em Trombetas no Pará e no Estado de Minas Gerais.

O processo de purificação da bauxita mais utilizado no mundo (90%) é o chamado *Bayer*, onde primeiro são produzidos hidróxidos para depois óxidos de alumínio, que são a matéria-prima para a produção de Sulfato de Alumínio e de Polialumínio cloreto (PAC).

Pelo processo Bayer a bauxita é lavada com uma solução quente de hidróxido de sódio (NaOH), a 175°C. Isto converte a bauxita em hidróxido de alumínio, $Al(OH)_3$, de acordo com a Equação Química



Este processo é chamado de digestão, por ocorre uma lixiviação da alumina durante a reação. Nesta etapa é adicionado óxido de cálcio (CaO) para que ocorra a precipitação dos íons carbonato e fosfato dissolvidos no meio. Após é feita a clarificação, que consiste na separação do resíduo sólido rico em óxido de ferro (lama vermelha) da solução de aluminato de sódio, $Na[Al(OH)_4]$. O filtrado é resfriado e o $Al(OH)_3$ é precipitado pela adição de partículas (germes de cristalização) do mesmo composto que se deseja.

Após a remoção do Al(OH)_3 , o filtrado alcalino é concentrado por evaporação e retornado à etapa de digestão. A maior parte do hidróxido de alumínio é calcinada para produzir óxido de alumínio, ou seja, a alumina - Al_2O_3 . Este processo está representado na Figura 4.

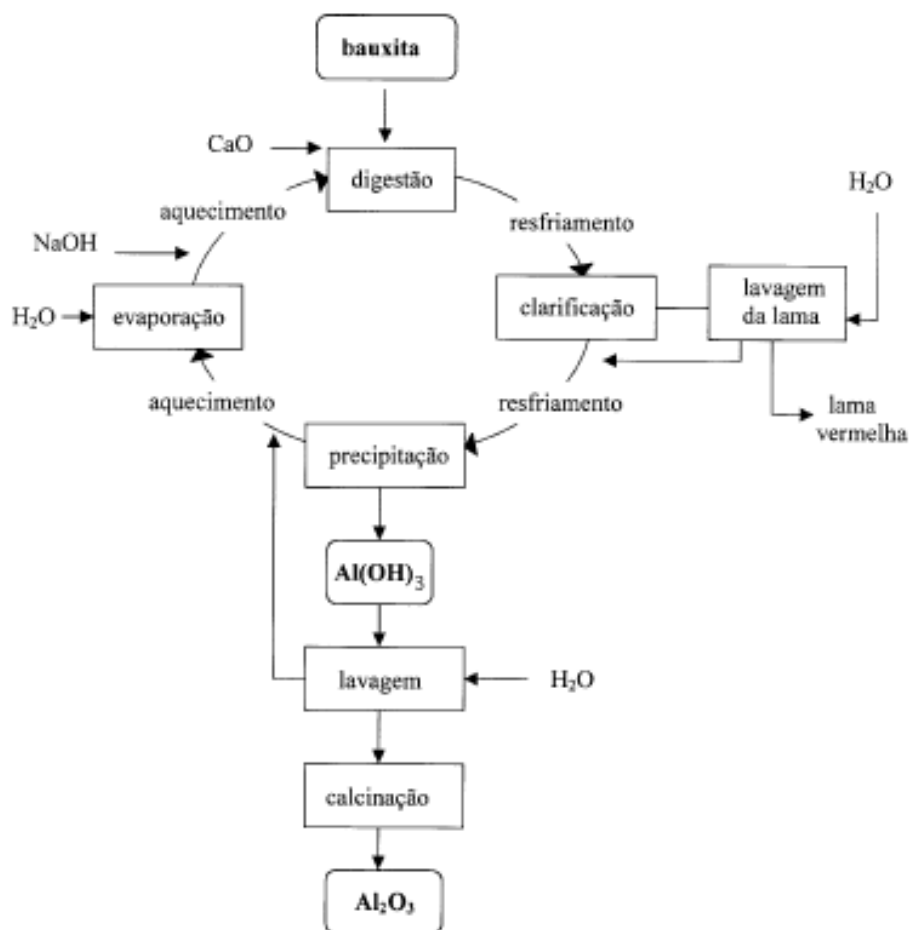


Figura 4- Fluxograma simplificado do processo Bayer para produção de hidróxido de alumínio e alumina a partir da bauxita. (Fonte: CONSTANTINO, 2002)

O sulfato de alumínio é obtido pela reação entre a Bauxita juntamente com o óxido de Alumínio (Al_2O_3) e o hidróxido de alumínio [Al(OH)_3] é obtido pelo método

Bayer e o ácido sulfúrico [H₂SO₄] (Figura 5). A equação química que representa o processo é a descrita a seguir:

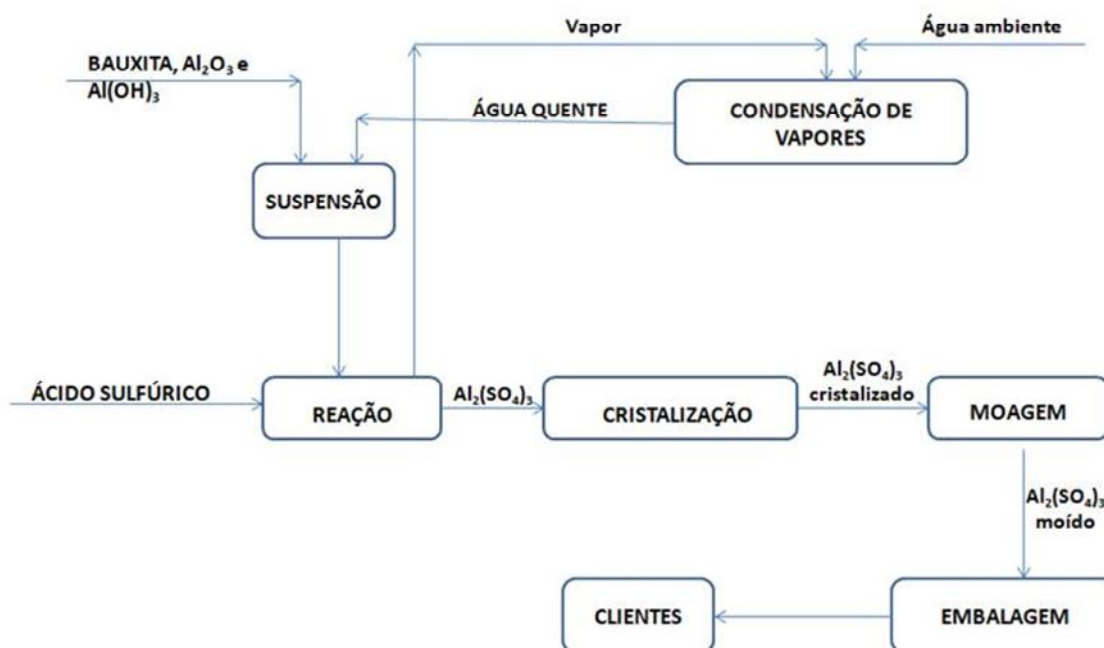
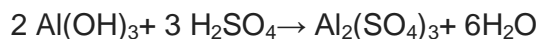


Figura 5- Fluxograma simplificado do processo Bayer para produção de Sulfato de Alumínio (SA) (Fonte: adaptado de CONSTANTINO, 2002)

O Sulfato de Alumínio é considerado o coagulante inorgânico mais antigo que se tem registro: Grécia 2000 a. C. (AZEVEDO NETO, 1987) e era utilizado como moeda de troca no comércio da época. Registros mais recentes datam de 1881 a cidade de Bolton (Inglaterra) como a primeira a empregar este sal como coagulante para o tratamento de água de abastecimento público. Ainda no Brasil é considerado o coagulante mais utilizado, devido ao menor valor de aquisição (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

O polialumínio cloreto (PAC) é o segundo coagulante mais utilizado no Brasil. É o substituto natural do Sulfato de Alumínio e é considerado um coagulante moderno, por ter alta eficiência em remoção de materiais suspensos (DI BERNARDO e DANTAS, 2005). É um composto inorgânico, completamente solúvel em água e com ampla faixa de atuação de pH, inclusive em baixas temperaturas, problema enfrentado no rigor dos invernos na região sul do Brasil. Sua fórmula química é $Al_n(OH)_m.Cl_{3n-m}$. O processo de produção do PAC está simplificado na Figura 6.

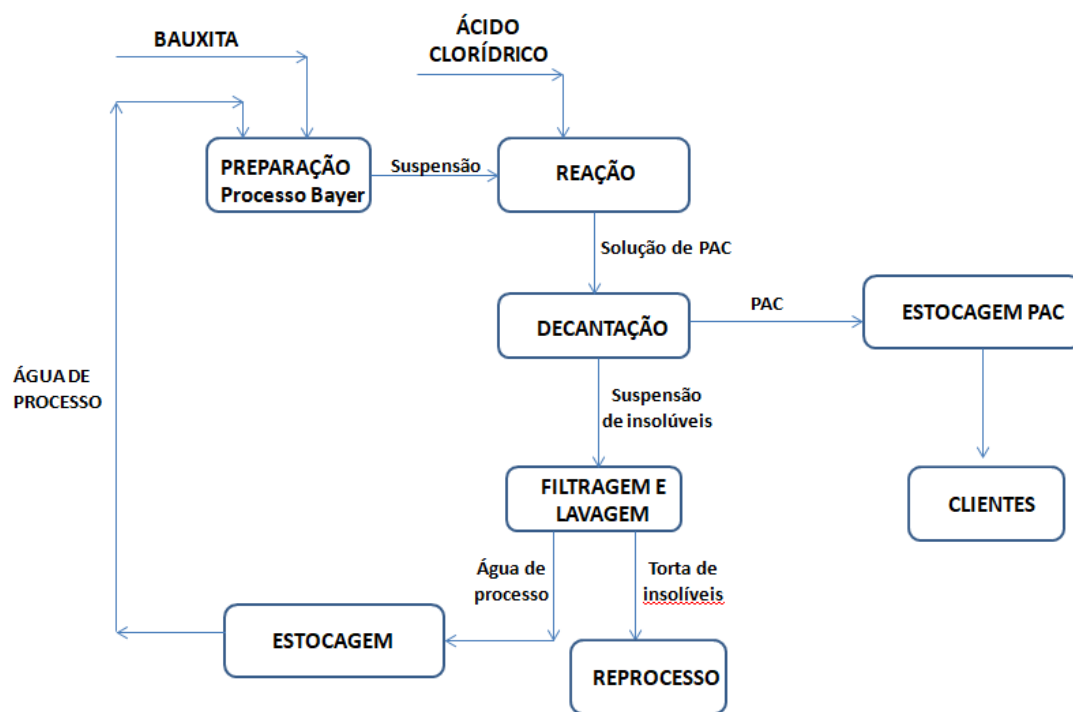


Figura 6- Fluxograma simplificado do processo Bayer para produção de polialumínio cloreto (PAC) (Fonte: adaptado de CONSTANTINO, 2002)

3.3.3.2 Produção do coagulante orgânico Tanino de *Acacia mearnsii*

A espécie *Acacia mearnsii* de Wild é originária do sudeste do continente Australiano e cultivada em grande escala na África do Sul desde 1864. Foi introduzida em 1918 no Estado do Rio Grande do Sul, no município de São Leopoldo (AGROSETA, 2015). Entre 1928 e 1930 passou a ser cultivada em escala comercial

no município de Estrela, com a aquisição de 30 kg de sementes da África do Sul e, em 1941 deram início ao processamento destas (EMBRAPA FLORESTAS, 2003).

A escolha do Estado do Rio Grande do Sul foi a sua localização (Figura 7) no paralelo 30º, o mesmo dos países originários (TANAC, 2016; SETA, 2016; HIGA *et. al.* snd). e a adaptação das mudas às condições climáticas e às características físico-químicas do solo foi rápida . Dados atualizados fornecidos por Agroseta (2015) mostram que cerca de 40.000 famílias são beneficiadas pelo plantio desta espécie no Estado do Rio Grande do Sul em uma área de 160 mil hectares.



Figura 7- Mapa Mundi com destaque às áreas com cultivares de acácia: Continentes Africano, Australiano, Américas do Sul e Central. Fonte: (AGROSETA, 2015)

Das 1.200 espécies do gênero *Acacia* provenientes da Austrália, três foram selecionadas para o cultivo comercial no Estado, sendo elas: *A. mearnsii*, *A. decurrens* e *A. dealbata*. São planta de crescimento rápido, atingindo a maturidade para corte entre 5,5 e 7 anos de cultivo (RIEGEL *et al.*, 2008; HIGA *et. al.*, snd). Possuem a vantagem de fixar nitrogênio no solo por associação com *Rhizobium*, podendo ser utilizada em recuperação de áreas degradadas e em consórcios agrosilvipastoris (CIFLORESTAS, 2016; AGROSETA, 2015).

O cultivo de acácia no Brasil visou a extração do tanino contido na casca para curtimento de peles e, os cavacos da parte lenhosa para fornecimento de energia às indústrias e, posteriormente como matéria-prima para produção de papel. Nos anos 70, o extrato modificado começou a ser produzido e utilizado no tratamento de efluentes e águas de abastecimento público como um coagulante considerado orgânico e sustentável (HIGA *et al*, *snd*; FARIAS *et al.*, 2008).

O Centro de Inteligência em Florestas (CIFLORESTAS, 2016) relata que a produtividade da Acácia varia de 10 a 25 m³/ha.ano, sendo a produção média de casca em torno de 15 m³/ha.ano. Geralmente comercializadas em toras de aproximadamente 60 kg, sendo 10% deste valor correspondem à casca e o restante ao material lenhoso.

As empresas produtoras de coagulantes orgânicos relatam que somente 15% de sua produção geral é destinada ao tratamento de água/efluentes. O restante da produção continua sendo utilizada no curtimento de peles, na geração de energia e na produção de papel (SETA, 2016; TANAC, 2016)

O cultivo propriamente dito das acácias é realizado predominantemente na metade sul do Estado (Figura 8), que possui vastas áreas de campo aberto. A instalação das fábricas na região metropolitana da capital Porto Alegre é estratégica pela facilidade de comercialização de seus produtos por rodovias e portos. Estas indústrias fornecem matéria-prima para curtumes que, em sua grande maioria, estão instalados nesta região.

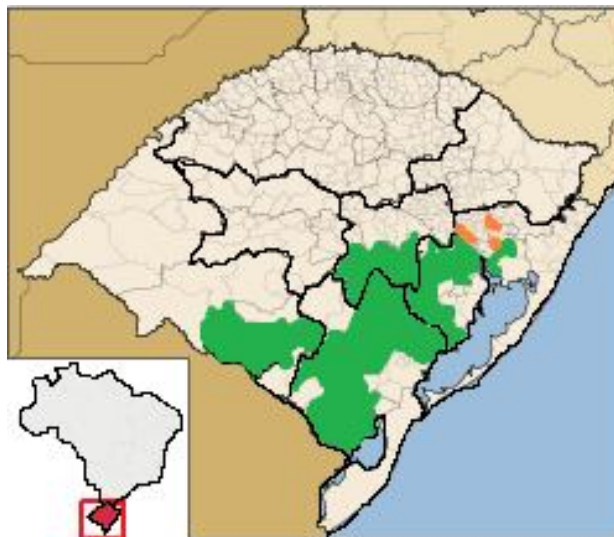


Figura 8- Mapa Político do Estado do Rio Grande do Sul, com destaque em verde a área com *Acacia mearnsii* e, em laranja os municípios de Montenegro, Estância Velha e Canoas (da esquerda para direita)

Quanto a produção, os Taninos são sintetizados a partir de aminoácidos (CRUZ *et. al.*, 2005) e podem ser divididos em dois grandes grupos:

- a) *Pirogálicos (hidrolisáveis)* formados de ésteres de glicose ou misturas de fenóis simples, como o ácido gálico e elágico (Figura 9); possuem facilidade de quebra de ligações para a formação de ésteres, resultando em moléculas pequenas e de baixo peso molecular;

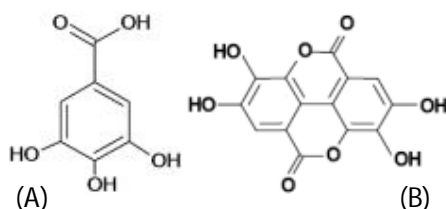


Figura 9- Ácido Gálico (A) e Ácidos Elágicos (B) (Fonte: MANGRICH *et. al.*, 2014)

- b) *Catequímicos (condensados)*: oligômeros encontrado em maior porcentagem no extrato da casca da *A. mearnsii*, formados pela condensação de duas ou mais unidades de flavan-3-ol flavan-3,4-diol (Figura 10) que dão origem a

moléculas de alto peso molecular; os anéis hidroxilados conferem propriedades complexantes (quelantes) de substâncias orgânicas e de metais.

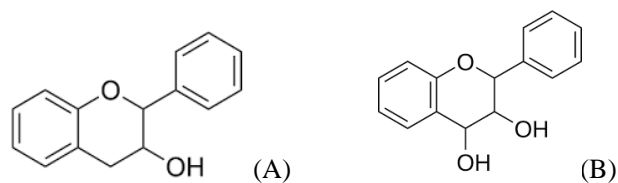


Figura 10- (A) moléculas Flavan-3-ol e (B) Flavan-3,4-diol. (Fonte: MANGRICH *et. al*, 2014)

Exemplos destes dois tipos de estruturas formadas são apresentadas nas Figuras 11 para Taninos hidrolisáveis e Figura 12 Tanino Condensável.

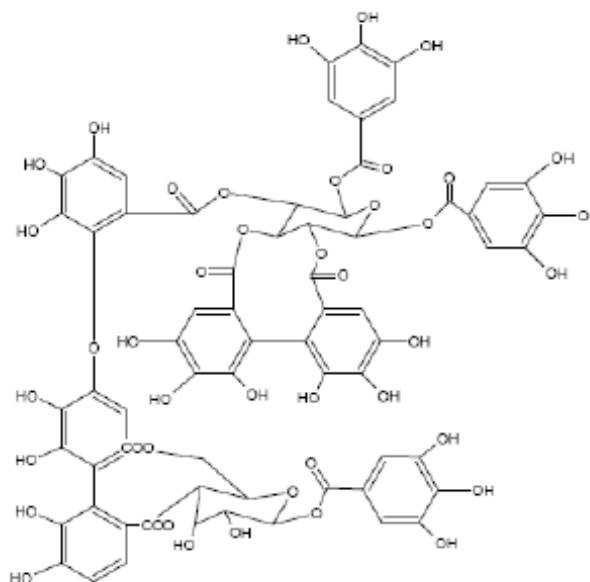


Figura 11- Exemplo de estrutura de tanino hidrolisável. Fonte: MANGRICH *et. al.*, 2014

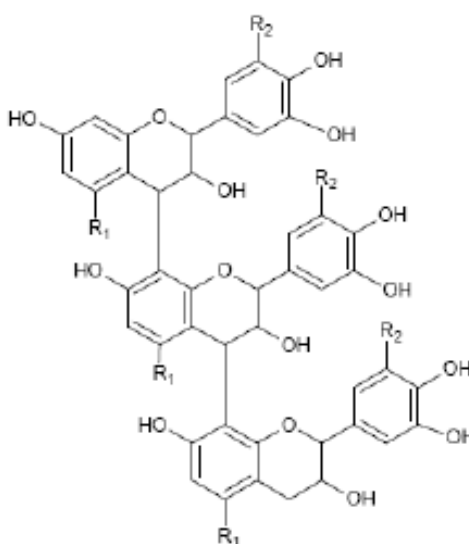


Figura 12- Exemplo de estrutura de Tanino Condensável. Fonte: MANGRICH *et. al.*, 2014

Os monômeros são extraídos da casca de Acácia até seu esgotamento, em autoclaves a vapor em alta temperatura e pressão, que corresponde 20 a 30% em massa. Esses compostos passam por uma ativação através da reação de *Mannich*, formando um polímero catiônico orgânico de alto peso molecular. Os resíduos sólidos da extração (casca esgotada) são enviados para compostagem e transformados em substrato para adubo orgânico ou encaminhados para queima e geração de vapor e eletricidade (RIBEIRO *et al.*, 2014).

A reação de *Mannich* é uma metodologia clássica na preparação de compostos β -aminocarbonilados, denominados como bases de *Mannich*. São obtidos através da condensação de um composto contendo aldeídos ou cetonas aromáticas ou alifáticas (compostos enolizáveis) com aminas primárias, secundárias ou amônia e um aldeído ou cetona não-enolizável (não formam enolatos) (ALLOCHIO F^o *et. al.*, 2013).

De acordo com a patente US 6.478.986 B1 registrada nos Estados Unidos da América por Lamb & Decusati (2002), o preparo do coagulante à base extrato aquoso de tanino de acácia compreende em:

- misturar um aldeído, um sal de amônio e um catalisador mineral ácido em um reator a temperatura menor que 45°C em meio aquoso;
- reagir durante 5 a 9h em temperatura entre 60 e 75°C, até obter um líquido incolor;
- após, mantendo temperaturas entre 45 e 90°C e pressão atmosférica, deixar reagir por mais 5h até obter líquido viscoso, tal que leve 30 segundos para passar no copo Ford nº4;
- o líquido viscoso pode ser atomizado em temperaturas entre 170 e 240°C, para se ter na forma pulverizada.

A estrutura geral obtida da extração e, logo após ativação está representada na

Figura 13

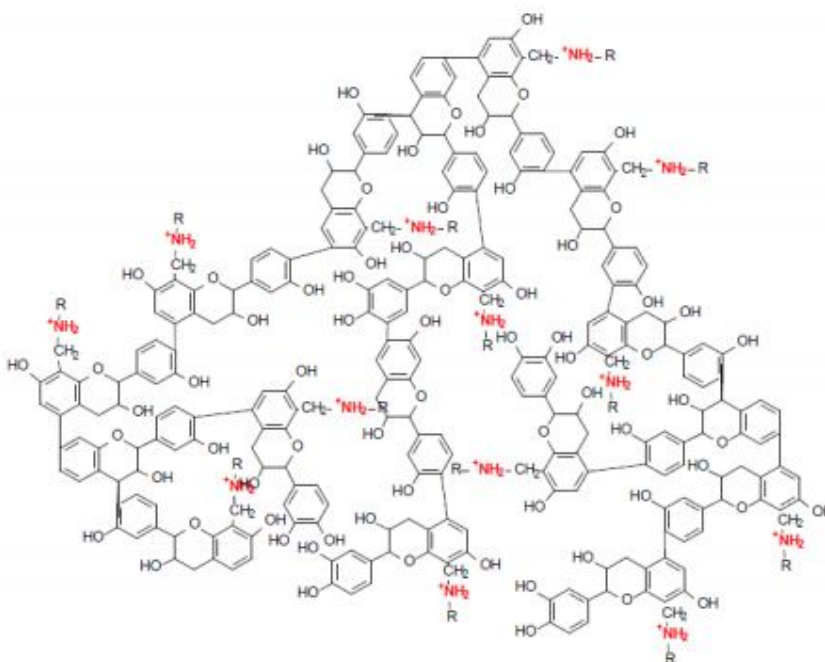


Figura 13- Estrutura de um coagulante obtido a partir do tanino extraído da *Acacia mearnsii*. Fonte: MANGRICH et. al. (2014), TANAC (2016)

O polímero brasileiro foi patentado nos Estados Unidos por não existir legislação brasileira que preveja a utilização deste tipo de coagulantes para tratamento de água.

Novas formulações contendo tanino foram elaboradas, sendo uma apresentada por Beltrán-Heredia *et. al.* (2012), onde o extrato da acácia foi submetido adietanolamina, além do formaldeído. Resultou em um composto orgânico com maior potencial de remoção de corantes e surfactantes (praticamente 100% de remoção). Recebeu a denominação de CDF e está sendo utilizado no tratamento de efluentes industriais.

A experiência brasileira da utilização do extrato de *A. mearnsii* como coagulante primário em estações de tratamento de água é muito pequena frente a utilização dos coagulantes metálicos à base de alumínio. No Brasil, uma única estação utilizou o tanino como coagulante principal. É a estação da COMUSA - Serviços de Água e Esgoto de Novo Hamburgo/RS. Esta tecnologia foi adotada desde agosto de 2001, tratando aproximadamente 60.000m³/d de água, suficiente para abastecer 98% de uma população de 239.000 habitantes. Anteriormente era utilizado sulfato de alumínio na forma de solução líquida (COMUSA, 2016) e em 2018, esta ETA passou a utilizar o PAC como principal e o Tanino como um auxiliar de coagulação, por motivos de questões de economia.

Além de água para abastecimento público, outros exemplos de aplicações dos coagulantes derivado da *A. mearnsii* são elencados na Tabela 3.

Tabela 3-Alguns exemplos da utilização de coagulante orgânico à base de Tanino de Acacia mearnsii de Wild (Acácia Negra) como forma de tratamento de efluentes.

Aplicação	Resultados	Referência
Abatedouro de aves	Remoção de cor em 84.7%; turbidez em 94.3%	LUCYK <i>et. al.</i> (2015)
Tratamento de esgotos domésticos	Remoção de 90% de turbidez e 60% de DBO e CTO. Este resultado é semelhante ao PAC, com vantagem de não gerar lodo com alumínio.	HAMEED <i>et al</i> (2016)
Galvanoplastia	Melhor remoção de cor em 96.7%; turbidez em 98.7% para concentração de 100 ppm tanino	VAZ <i>et. al.</i> (2010)
Lavanderia Industrial	Qualidade do efluente semelhante ao tratamento com sulfato de alumínio; custo menor em 25.2%, uso de uma matéria prima renovável, menor contribuição de ânions sulfatos ao efluente final, menor geração de massa de lodo, e obtenção de um lodo orgânico	CRUZ <i>et. al.</i> (2005)
Laticínio (queijo)	Carga orgânica muito alta. Redução de turbidez de 69.4%, mas reduziu menos de 3.0% COT e DQO	FARIAS <i>et. al.</i> (2014)
Cianobactérias em águas eutrofizadas -	Remoção próxima a 90.0% das cianobactérias, da cor e da turbidez	CAMACHO <i>et. al.</i> (2012)
Tinturaria de Jeans	Remoção de 95.2% de cor, 98.4% de turbidez e de 60.5% de matéria orgânica	STRÖHER <i>et. al.</i> (2013)
Usina canavieira - vinhaça	Remoção de 90.0% de cor e de 98.0% de turbidez	MARTINS <i>et al.</i> (2014); SOUZA <i>et. al.</i> (2013)

Os estudos encontrados a respeito da utilização do tanino em testes ou em estações de tratamento de água destacam as vantagens ambientais de lodos orgânicos livres ou com baixa concentração de metais, possibilitando um descarte mais adequado do que hoje é feito no curso d'água. A Tabela 4 apresenta as conclusões a respeito de alguns estudos.

Tabela 4-Estudos referentes a possibilidade de substituição de coagulantes a base de alumínio pelo coagulante orgânico à base de Tanino de *Acacia mearnsii* de Wild como forma de tratamento de água para abastecimento urbano

Referência	Resultados
ALTMANN (2002)	Comparou os lodos gerados em dois momentos distintos da Comusa: com sulfato de alumínio (até agosto de 2001) e depois com a troca do coagulante para o tanino, destacando as vantagens ambientais desta substituição.
MORAES <i>et al.</i> (2004a)	Destacaram os pontos positivos e negativos da utilização do tanino na planta da Comusa
VANACÔR (2005)	Relatou as vantagens da substituição do sulfato de alumínio pelo tanino na planta da Comusa, bem como as alterações necessárias para sua utilização.
SETA (2016); TANAC (2016)	Realizaram testes de toxicidade, resultando que o coagulante é atóxico, estando de acordo com a Resolução 129/2006 da CONSEMA em três níveis tróficos: ameba, crustáceos e peixes.
RÄDER (2009)	Apresentou dados reais mensais de processo da Comusa, através do acompanhamento de análises de rotina da água bruta e tratada, referente aos anos de 2006, 2007 e 2008.
CURI <i>et al.</i> (2013)	Destacaram que o Tanino não altera a acidez do meio, evitando gastos com alcalinizantes ao final do processo e produção menor de volume de lodo orgânico comparado ao gerado com PAC
SKORONSKI <i>et al.</i> (2014)	Realizaram testes para verificar a possibilidade de substituição do sulfato de alumínio pelo tanino para as condições do rio Tubarão, região litorânea no Estado de Santa Catarina. Os resultados foram favoráveis.
MOREIRA <i>et al.</i> (2014)	Sugerem a troca de tecnologia, visando obter lodo orgânico, livre de metais, evitando que o mesmo retorne ao manancial de captação da água bruta.
THAKUR e CHOUBEY (2014)	Remoção de 91% da turbidez em Jarrest e 57,3% de sólidos dissolvidos, utilizando água bruta de Raipur na Índia.
(ZHCLICRBS, 2015)	O coagulante orgânico foi utilizado no tratamento de água captada do rio Doce à população de Governador Valadares em Minas Gerais e Colatina no Espírito Santo, após o rompimento da barragem de rejeitos da mineradora SAMARCO em Fundão e Santarém, que provocou o maior desastre ambiental mundial em barragem, localizado no Município de Mariana, no Estado de Minas Gerais (Brasil), atingindo vários outros municípios e Estados até desaguar no mar.

Como no exemplo atual da Comusa, os coagulantes a base de taninos também podem ser empregados como auxiliar de floculação no tratamento de água em substituição aos polímeros inorgânicos. Esta técnica é amplamente difundida no país, podendo-se citar outras estações: SABESP - São Paulo/SP, SAAE – Guarulhos/SP, SAAEDOCO – Dois Córregos/SP, SANEP – Pelotas/RS, SAAEB – Bebedouro/SP, DAAE – Araraquara/SP e CESAN - Santa Teresa/ES.

Algumas vantagens são indiscutíveis em relação a utilização do tanino no processo de tratamento de água, como a geração de lodo orgânico que pode ser utilizado como substrato em adubos ou na geração de energia após desidratação (RIBEIRO *et al.*, 2014). Contudo questões relacionadas ao processo e aos custos devem ser observadas.

3.3.3 Formas de desidratação dos lodos

Todas as formas de remoção da parcela de água do lodo (desidratação) estão baseadas em processos físicos, podendo ser natural ou forçado (mecânico), através de equipamentos que aceleram este processo. O percentual de umidade final dependerá do seu destino final deste (DEGRÉMOND, 2007). Na figura 14 estão apresentados os processos mais utilizados por Reali (1999) e assim considerado também por Richter (2001).

A definição do tipo de sistema a ser utilizado depende de vários fatores, podendo-se citar: área necessária para implantação, custo desta área, distância da estação até o destino final, condições climáticas, custos dos equipamentos, operação, preparo de técnicos para operação e manutenção (REALI, 1999).

O objetivo final desta desidratação é diminuição do volume para transporte, barateando os custos com deslocamento até o destino final, que poderá ser: aterros com licença apropriada, cimenteiras, olarias e a disposição em solos.



Figura 14- Processos mais utilizados na redução de volume - desidratação (Fonte: Adaptado de Reali (1999))

Richter (2001) resume os processos de desidratação da seguinte forma:

- a) *Leito de secagem e lagoa de deságüe de lodo* – são adequados em regiões onde a taxa de evaporação é maior que a de precipitação. Quando utilizados nas regiões sul e sudeste deve-se prever telhados para diminuir a incidência da chuva e coletores da água drenada para posterior tratamento ou retorno ao início do processo. O processo total de desidratação do lodo pode levar até 3 meses no inverno (Figura 15);



Figura 15- Leitos de secagem (Fonte: DEGRÉMOND,2007)

- b) *Prensa desaguadora ou filtro prensa de esteira*- o lodo a ser desaguado entra numa câmara onde recebe a solução de polímero auxiliar de filtração; após o lodo é espalhado por uma esteira porosa, onde a água livre é drenada. A concentração final de sólidos da torta pós-drenagem é de 17% a 20% (massa/massa) (Figura 16);



Figura 16- Prensa desaguadora (Fonte: DEGRÉMOND, 2007)

- c) *Filtro à vácuo ou sob pressão*- para lodos ao alumínio este tipo de filtros não são adequados, já que os géis obstruem rapidamente os poros de desague.. ex: filtro-prensa (Figura 17).



Figura 17- Conjuntos de filtros-prensa da Estação Barueri São Paulo (esquerda) e um filtro à vácuo (direita) (Fonte: DEGRÉMOND, 2007).

- d) *Centrífuga*- o lodo adensado armazenado em um tanque é bombeado para a câmara de entrada, recebendo polímero pela tubulação de recalque (antes da centrífuga). A porcentagem de saída de sólidos na torta é de 30% a 35% (massa/massa)(Figura 18);



Figura 18- Conjunto de centrífugas: Instalação da *Saint-Brieuc (Côtes-du-Nord)*. (Fontes: DEGRÉMONT, 2007)

- e) *Bags ou geotubos*- São bolsas confeccionadas de uma membrana geotêxtil, capaz de permitir a passagem da água a ser drenada. O material sólido fica retido dentro da bolsa para posterior descarte ou reutilização. A concentração final de sólidos da torta pós-drenagem é de aproximadamente 20% (massa/massa) (Figura 19).



Figura 19- Bag (geotubo) confeccionado com manta geotêxtil (Fontes: SNATURAL, 2016)

3.3.4 Formas de destinação final

Para os LETA são sugeridas as seguintes formas de tratamento e disposição final:

3.4.3.1. *Disposição em Aterros Sanitários e Industriais Perigosos*

Conforme Siqueira (2004, *apud* DI BERNARDO & DANTAS, 2005) a disposição em aterros é considerado um método seguro para a saúde pública e ambiental. É um método econômico para descarte dos lodos desaguados, desde que estes estejam bem desidratados.

As vantagens para aplicação em um aterro industrial ou sanitário (com licença para isto) são:

- Segregação de resíduos específicos, sem a mistura dos chamados urbanos, facilitando o monitoramento hídrico;
- Possibilidade de reaproveitamento dos resíduos caso surja tecnologia para isto;

- Controle ambiental;
- Minimização dos custos de transporte.

Fatores importantes são ressaltados por Di Bernardo & Dantas (2005) sobre a disposição final dos LETA em aterros e são resumidos em dois quadros: Quadro 1 sobre disposição em aterro sanitário e Quadro 2 em aterros exclusivos para LETA.

Quadro 1- Vantagens e desvantagens da disposição de LETA em aterro sanitário

Vantagens	Desvantagens
Aterro Sanitário	
- o gerenciamento dos impactos dos resíduos gerados nas ETA passa à administração do aterro.	- a estação de tratamento dos resíduos da ETA precisa de adensamento e desaguamento para atingir a concentração de sólidos necessária para disposição; - os custos de transporte e disposição em aterro sanitário podem ser elevados; - o lodo pode gerar graves impactos ambientais, associados principalmente à contaminação do lençol freático e do solo, pela lixiviação de substâncias orgânicas e inorgânicas de interesse à saúde pública.
Disposição no solo	
- é uma técnica simples e possivelmente econômica, embora ambientalmente desfavorável.	- pode gerar graves impactos ambientais, associados principalmente à contaminação do lençol freático, do solo e do ar (pelo pó muito leve)

(Fonte: Di BERNARDO & DANTAS, 2005)

Quadro 2- Vantagens e desvantagens da disposição dos resíduos em aterros exclusivos

Vantagens	Desvantagens
Aterro Industrial classe II exclusivo da ETA	
<ul style="list-style-type: none"> - um aterro exclusivo pode ser um método viável, quando a concentração de sólidos for maior que 25% e existe a possibilidade física de área, na ETA ou em local para a implantação; - segregação de resíduos (sem mistura com outros resíduos sólidos) e monitoramento constante das características das tortas para formar um histórico das características dos resíduos; - controle ambiental; - minimização de custos de transporte; - obtenção de dados para otimização de futuros projetos. 	<ul style="list-style-type: none"> - aplica-se a primeira desvantagem do aterro sanitário; - o gerenciamento da disposição dos resíduos passa à administração da ETA.
Aterro industrial classe II fora da área da ETA	
<ul style="list-style-type: none"> - pode ser uma técnica favorável quando a concentração de sólidos no resíduo for superior a 25% e os custos do transporte resultarem econômica e tecnicamente viáveis; - aplica-se a primeira vantagem do aterro sanitário. 	<ul style="list-style-type: none"> - aplicam-se as duas primeiras desvantagens do aterro sanitário.

(Fonte: Di BERNARDO & DANTAS, 2005)

3.4.3.2. *Disposição em Estações de Tratamento de Esgotos (ETE) Recuperação do alumínio presente nos lodos*

A disposição dos resíduos gerados nas ETA em Estações de Tratamento de Esgotos (ETE) via rede coletora de esgotos ou por caminhão-pipa para serem tratados juntamente com os efluentes urbanos, são aplicados em alguns países da Europa e Estados Unidos e são descrito por Reali (1999). A maioria das cidades brasileiras não tem ou tem parcialmente redes coletoras de esgoto separadas das

pluviais e, conseqüentemente estações que tratem estes resíduos. A presença de metais pesados advindos dos LETA podem interferir negativamente no processo de tratamento dos efluentes. Isto deve ser levado em consideração na hora de escolher esta opção (RICHTER, 2001). A responsabilidade do gerenciamento da disposição do lodo será da administração da ETE.

A disposição em Estações de Tratamento de Esgoto é uma sugestão de disposição e tratamento para os lodos de ETA. A grande dificuldade é existir uma ETE para ser aplicado este lodo.

3.4.3.3. *Recuperação do alumínio presente nos lodos*

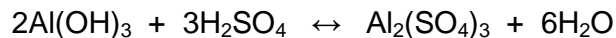
A conversão do lodo em coagulante é uma das práticas consideradas racionais para minimizar o impacto ambiental de destinação do lodo. A solubilização dos coagulantes e sua reciclagem permitem minimizar os custos e os problemas associados à disposição final dos lodos gerados em ETA.

Segundo Schneider & Dandolini (2011) cerca de 35% a 50% dos sólidos presentes no lodo são hidróxidos, que facilitam a recuperação dos agentes coagulantes, além de diminuir o volume de lodo a ser descartado, promovendo o reciclo dos produtos químicos dosados no tratamento.

Os processos de recuperação dos coagulantes podem ser realizados por via ácida, via alcalina, via extração com solventes orgânicos por complexação/quelação. Entretanto, a recuperação por via ácida (Processo *Fulton*) é que tem se demonstrado a mais viável, tanto técnica como economicamente. O volume de lodo excedente após a recuperação por via ácida pode ser reduzida a de 45%.

Em suas pesquisas, Freitas *et al.* (2005) utilizou o processo *Fulton* para a recuperação do alumínio. Esta recuperação pode ser feita através da acidificação com

ácido sulfúrico dos lodos já desidratado, solubilizando os hidróxidos na forma de flocos (géis), sendo baseada na seguinte reação:



O sobrenadante, que consiste em uma solução de sulfato de alumínio a um pH 2,5 ou menor, pode ser separado para reuso e os sólidos descontaminados, descartados em local adequado.

3.4.3.4. *Incorporação de lodo de ETA em materiais cerâmicos*

Outra forma de reutilização aplicada, inclusive na região metropolitana de Porto Alegre, é a utilização do lodo ao alumínio como carga na produção de tijolos e telhas, cerâmicas em geral (BERNARDES, 2005); (TEIXEIRA, 2006).

O LETA é composto de argila, silte, areia, precipitados de ferro e alumínio (caso utilizado coagulante metálico). A relação percentual entre eles depende das condições climáticas, das estações do ano e da região de onde a água bruta é aduzida. Estes materiais citados também estão presentes na composição da cerâmica, o que viabiliza o estudo de sua adição na forma de carga no processo, diminuindo a quantidade de materiais extraídos para este fim. A presença de cal nestes lodos podem comprometer as propriedades mecânicas da cerâmica.

Como a matéria orgânica também está presente na composição do lodo, esta é considerada o fator limitante, já que é volátil e, quando da queima durante o cozimento das peças nos fornos, origina espaços vazios que podem tornar a peça frágil.

Outros compostos que prejudicam o produto final são a presença de umidade acima de 20% e a presença de carvão, que provocam rachaduras após o cozimento (DI BERNARDO & DANTAS, 2005)

Teixeira *et al.* (2006) observou que as cerâmicas acrescidas de lodo ao ferro são mais resistentes que as acrescidas de lodo ao alumínio quando incorporados em diferentes porcentagens em tijolos maciços. Foram testados valores entre 0% e 30% e, pelos resultados dos ensaios tecnológicos de absorção de água, porosidade, massa específica aparente, perda de massa em diferentes temperaturas, retração linear, resistência mecânica à flexão, as porcentagens máximas de incorporação foram: 10% de lodo ao alumínio e 20% de lodo ao ferro.

3.4.3.5. Incorporação de LETA em materiais pozolâmicos

O calcário utilizado na fabricação de cimento *portland* pode apresentar baixos teores de sílica, ferro e alumínio. Para estes casos os LETA podem suprir parte destas necessidades, reduzindo a adição de materiais *in natura* (DI BERNARDO & DANTAS, 2005).

Outra constatação, a presença de óxidos de potássio e de sódio no lodo contribui para a diminuição de álcali no cimento, pois altas concentrações de álcalis causam expansão e fissuras em estruturas de concreto. Altas concentrações de matéria orgânica, antracito ou carvão ativado, permanganato de potássio e metais pesados comprometem a qualidade do cimento produzido. Por isto há limites na porcentagem de utilização de LETA como carga.

Em pesquisa desenvolvida por Hoppen *et al.* (2005) também sugeriu a incorporação do lodo metálico em matrizes de concreto na porcentagem de 3% com 83% de umidade. Até este limite, não foram observados nenhum problema nos corpos de prova, mas sugeriram que esta mistura seja utilizada na fabricação de artefatos, estruturas pré-moldadas e construção de pavimentos em concreto.

A presença de matéria orgânica não é interessante pode influenciar na resistência das peças acabadas, dificultando na liga, pois mantém a umidade natural.

Em suas pesquisas, Ferranti (2005) concluiu que o lodo metálico, quando desidratado com cal, pode ser utilizado, substituindo parte da matéria prima, minimizando o impacto na natureza com a diminuição de retirada de materiais nobres.

3.4.3.6. Incorporação de LETA ao solo

O tratamento e a disposição benéfica de LETA ao solo vêm sendo tratado como oportunidade de aumento de receita e, principalmente de redução de custos e de impactos ambientais em empresas de saneamento básico de todo o mundo (TSUTIYA & HIRATA, 2001).

A aplicação direta do LETA ao solo (*Landfarming*) pode ser utilizada em pequenas comunidades, mas somente com permissão do órgão ambiental local (CONSEMA 375, 2006). A aplicação máxima deverá ser de 10t/ha.ano. As vantagens da aplicação é que estes biossólidos contêm macro e micronutrientes importantes para as plantas, como nitrogênio, fósforo, boro, cromo, ferro, manganês, molibdênio e zinco, melhorando as condições físicas do solo, com a melhor mobilidade de gases e umidade (MEURER, 2000).

As desvantagens apontadas com a aplicação do lodo estão relacionadas com a toxicidez e com a patogenicidade do lodo. Podem aparecer insetos e fortes odores. Isto pode ser amenizado com o auxílio de um trator, que revira o solo e incorpora o lodo de forma homogênea (VIESSMANN, 1998) (GUERRA, 2005).

Levando em conta as propriedades da matéria orgânica presente (MEURER, 2000), espera-se obter um composto com características favoráveis a sua utilização como substrato na obtenção de adubo orgânico, sem prejuízo ao meio ambiente.

Di Bernardo & Dantas (2005) citam alguns benefícios associados à aplicação de LETA no solo:

- ✓ Melhoria estrutural do solo;

- ✓ Ajuste do pH;
- ✓ Aumento de traços de minerais;
- ✓ Aumento da capacidade de retenção da água; e
- ✓ Recuperação de áreas degradadas em razão da presença de nutrientes, embora seja necessário o monitoramento da mobilidade dos metais presentes.

São dois os principais problemas relatados da disposição de LETA em solo: reações de metais com o fósforo disponível no solo, tornando-o indisponível para as plantas e a fitotoxicidade ao alumínio em solos com pH acima de 6,5.

3.4.3.7. Biomassa como fonte de energia

No século XX a madeira era a principal biomassa utilizada como combustível, sendo removida das florestas nativas, provocando uma série de desequilíbrios ambientais. Estava associada à países pobres e subdesenvolvidos, enquanto que os combustíveis fósseis e os de energia hidráulica e nuclear, eram os utilizados somente nos países industrializados (HODGE, 2011).

Ainda hoje, a madeira é utilizada na produção de energia em 90% de países como Etiópia, Uganda, Ruanda, Nepal e Tanzânia; no Brasil, na China e na Índia, a biomassa (madeira, cana, biodiesel) gera acima de 30% de energia e na Finlândia e na Suécia, aproximadamente 20% (ROSILLO-CALLE *et al*, 2008).

Goldemberg (2010) afirma que a energia da biomassa traz inúmeros benefícios ambientais, econômicos e sociais em comparação com os combustíveis fósseis. Os benefícios citados são:

- Melhor manejo das terras;
- Criação de empregos;
- Fornecimento de energia em comunidades rurais ou em áreas de difícil acesso;

- Redução de níveis de emissão de CO₂;
- Contribuição para a independência energética;
- Diminuição da dependência da energia vinda dos recursos hídricos.

Os estudos e aplicações da biomassa no Brasil mostra que o país está preocupado em encontrar fontes alternativas aos combustíveis tradicionais, como exemplo o programa pró-álcool.

A biomassa é qualquer material orgânico que pode ser utilizado na geração de calor e energia (HODGE, 2011). São exemplos: culturas e produtos florestais, gordura animal e resíduos de processamento de alimentos. Goldemberg (2010) sugere uma diferenciação entre os tipos de biomassas existentes em:

- ✓ *Tradicional* – utilizada com tecnologias primitivas para cocção e aquecimento residencial em nas áreas rurais. Ex: resíduos de florestas, dejetos de animais e remoção de matas nativas;
- ✓ *Moderna* – são combustíveis gerados de algum processo, como o biogás (degradação de uma matéria orgânica com digestão anaeróbia) e os biocombustíveis (biodiesel).

O interesse pela biomassa como fonte de energia objetivou inicialmente:

- ✓ A produção de álcool combustível a partir de cana-de-açúcar;
- ✓ O uso de biomassa como fonte de energia na indústria de papel e celulose; e
- ✓ O uso de carvão vegetal como agente térmico e redutor na indústria de ferro-gusa e aço.

A procura de fontes naturais e alternativas de energia surgiu da necessidade da não dependência total dos combustíveis fósseis ou de combustíveis vindos de países em conflito (GOLDEMBERG, 2010).

Com a biomassa crescendo em países industrializados (ROSILLO-CALLE *et al*, 2008), tornou-se necessária a modernização dos processos utilizados, a fim de minimizar os danos ambientais (ex. queimadas). Desta forma, justifica-se pesquisas na área de energias limpas e renováveis.

O álcool foi o primeiro combustível alternativo que foi utilizado nas frotas automobilísticas no Brasil. A utilização comercial abriu as portas das pesquisas com outros tipos de fontes, como a elétrica, solar e a eólica.

Questões são levantadas a respeito da produtividade das culturas direcionadas à biomassa:

- a) as mudanças climáticas;
- b) a área disponível – considerado o maior fator;
- c) a não competitividade com a alimentação;
- d) a constância na escala de produção.

Rosillo-Calle (2008) comentou que, em estudo feito na América Latina, somente 15% do potencial das terras produtivas estão sendo utilizados para fontes alternativas. Até 2025 este valor deve atingir 23%.

Nos países que a utilização da biomassa vem crescendo, existem subsídios por parte do governo (ex. PROALCOOL na década de 80) e política socioambiental. O sucesso de um programa depende efetivamente da política pública e do apoio da sociedade.

De acordo com Hodge (2011), uma biomassa para ser utilizada como combustível deve sofrer uma transformação para forma líquida ou gasosa, podendo ser utilizados diretamente em alguns motores de combustão interna.

Os produtos primários de interesse provenientes do processamento da biomassa são:

❖ *Combustíveis líquidos:*

- *Etanol – pode ser obtido da cana-de-açúcar, beterraba, milho;*
- *Metanol – produzido como subproduto dos combustíveis gasosos;*
- *Biodiesel – de óleos vegetais modificados para características similares do óleo diesel, e óleos usados processados (ex. óleo de fritadeiras de restaurantes);*
- *Óleo vegetal – óleos obtidos de grãos e sementes (soja, girassol); de 17-20 MJ/kg*
- *Óleo de pirólise – combustível líquido com um valor de aquecimento.*

❖ *Combustíveis gasosos:*

- *Biogás – é uma mistura de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), com 55 a 70% de metano em volume;*
- *Gás de produtor – uma mistura de gases inflamáveis contendo monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H_2), metano (CH_4), nitrogênio (N_2), dióxidos de carbono (CO_2) e hidratos superiores;*
- *Gás de síntese – uma mistura de monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H_2).*

Os combustíveis derivados da biomassa são chamados de biocombustíveis (REIS, 2011) e são classificados de acordo com o Quadro 3.

A criação dos créditos de carbono vem contraposta à questão das estratégias de substituição dos combustíveis fósseis, embora estimule a diminuição da liberação de gases efeito estufa para a atmosfera (GOLDEMBERG, 2010). A questão é que, os países que deveriam diminuir esta liberação compram os créditos daqueles que teoricamente necessitariam menos, mas estão preocupados em economia e com o meio ambiente.

Quadro 3- Classificação dos biocombustíveis:

Biomassa oriunda das florestas nativas e plantadas	Lenha, carvão vegetal, brinquete, cavacos e resíduos sólidos oriundos do aproveitamento não energético da madeira
	Biocombustíveis líquidos e gasosos, subprodutos dos processos de conversão da madeira. Ex: metanol, gás de gaseificação
Biocombustíveis não Florestais - Agroindústria	Combustíveis sólidos e líquidos produzidos a partir de plantações energéticas. Ex; álcool de cana-de-açúcar
	Resíduos de plantações energéticas. Ex palhas, folhas e pontas da plantação de cana-de-açúcar
	Resíduos da agroindústria: casca de arroz, palha de milho
	Subprodutos animais que são transformados em biogás: esterco de aves, bovinos, suínos e caprinos
	Combustíveis obtidos do processamento de oleaginosas (biodiesel), tais como: soja, milho, mamona, girassol, babaçu, dendê
Resíduos Urbanos	Resíduos sólidos, líquidos e gasosos provenientes do processamento dos esgotos e lixos industriais, comerciais e domésticos.

Fonte: REIS (2011)

No Rio Grande do Sul, os programas de culturas bioenergéticas estão ligadas as da mamona, soja e do eucalipto. A cultura da mamona foi iniciada, mas não foi muito aceita devido a dificuldade de colheita, por tratar de fruto espinhoso. A geração de óleo para biodiesel não foi tão bom quanto da soja, que pode ser colhida totalmente por máquinas, enquanto que da mamona é manual.

Uma pequena área experimental com cana-de-açúcar, na região de Santa Rosa/RS a adaptou-se bem em 2005, encorajando produtores a aumentarem a área plantada, chegando a 8 mil hectares no ano de 2013 (PROGRAMAREDELEITE, 2013).

No Brasil, as plantações de eucalipto vêm crescendo desde a década de 60, mas teve uma impulsão considerável depois de 2000, tanto para a fabricação de papel, como a geração de energia.

No Brasil, tem-se registros em Minas Gerais, no século XVI, mas a produção industrial é datada após 1960, de carvão com 35% de eficiência energética, considerado o carvão vegetal mais eficiente do mundo. A produção de carvão utilizando florestas plantadas e não nativas passou de 19,3% (1987) para 71,6% (2000).

Durante séculos as florestas nativas eram a única fonte de carvão vegetal, o que proporcionou desmatamento e degradação ambiental.

O maior desafio é o de mudar a visão de produção de carvão vegetal com desmatamento, degradação ambiental, trabalho infantil, trabalho desumano e, muitas vezes escravo. Há necessidade de conciliar modernização com responsabilidade socioeconômica e ambiental.

Encontra-se facilmente bibliografias relacionando biomassa à cana-de-açúcar, palhas em geral, casca de arroz. Mas resíduos de outros tipos de atividades industriais, quase não são comentados: é o caso dos lodos de estações de tratamento de água e de esgoto, possivelmente por possuírem metais considerados pesados (tóxicos), ou pela presença de agentes patogênicos que podem contaminar um trabalhador.

O processo mais comum conversão da biomassa sólida em energia é a combustão, tanto para a produção de calor, como para a produção de energia elétrica, através da conversão termoquímica, mais comumente em sistemas de cogeração (PORTALBIOMASSABR, 2013).

Para determinar se um resíduo é passível de ser utilizado como combustível é necessário uma série de análises termoquímicas. A mais importante delas é o poder calorífico, mas não pode ser considerada como única. São elas: sua composição química (elementar e imediata); teor de umidade; poder calorífico superior, inferior e líquido e; teor de cinzas.

A biomassa é um exemplo na qual as propriedades químicas e físicas têm influência direta sobre a viabilidade de uso do material como combustível (BRAND, 2010). A melhoria destas propriedades pode tornar a biomassa mais atrativa para sistemas de geração de energia, tornando-se competitiva com os outros combustíveis que possuem maior qualidade energética.

3.4.5. Lodos de ETA como biomassa para geração de energia alternativa

Nogueira e Lora (2003) comentam que a biomassa moderna está inserida nas energias renováveis para a geração de calor e eletricidade, incluindo o uso sustentável de resíduos agrícolas, florestais, urbanos e rurais. Couto *et. al.* (2004) resumem as fontes de biomassa na Figura 20.

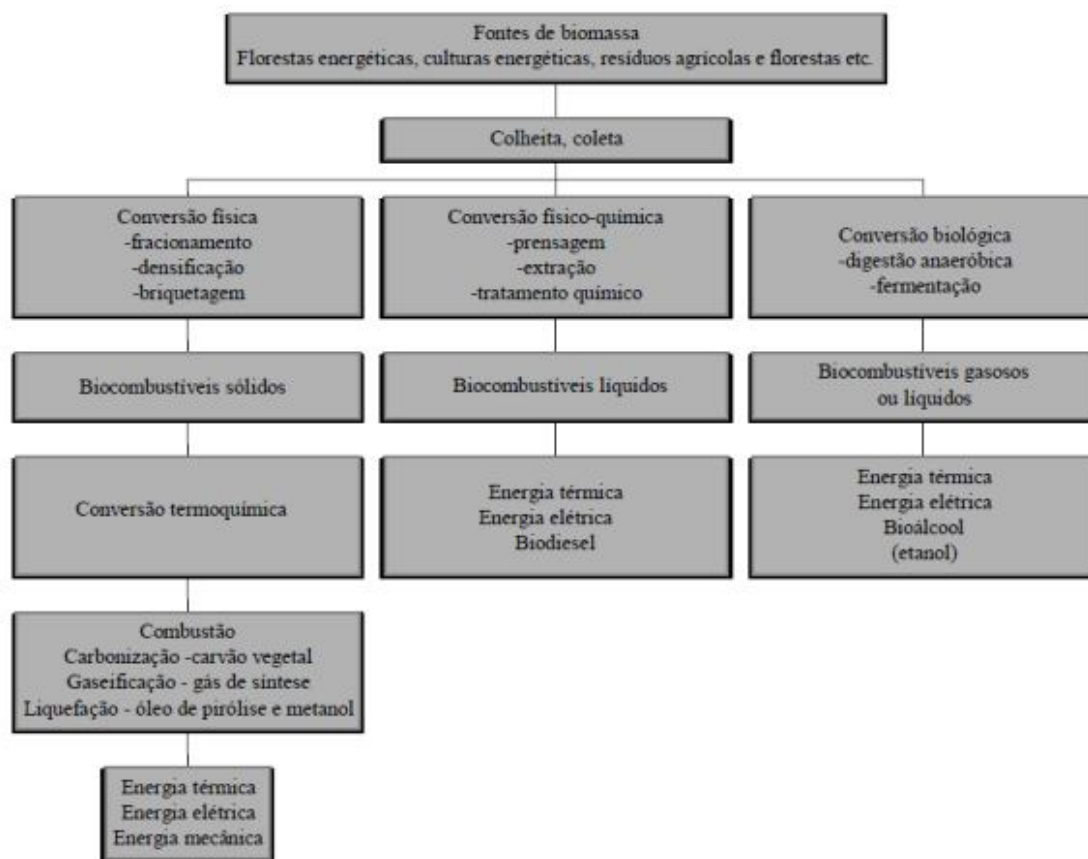


Figura 20- Diferentes processos para produção de energia a partir de biomassa. Fonte: COUTO *et al.* (2004) (adaptado de STAISS & PEREIRA, 2001)

Os lodos de ETE e ETA encontram-se dentro dos biocombustíveis sólidos. É relativamente fácil encontrar artigos relacionados na produção de energia com o lodo de ETE, mas nada a respeito de lodos de ETA.

Um exemplo é dado por Lee e Santos (2011) que afirmam que o lodo de ETE seco é um ótimo biocombustível por ter o poder calorífico inferior de 17,80 MJ/kg, aproximado ao da madeira (18 MJ/kg), e suas cinzas podem ser incorporadas em blocos de cimento e em cerâmicas.

A aplicação de resíduos sólidos como biomassa e como combustível alternativo está intimamente ligada às suas características físicas e químicas e ao seu comportamento frente a condições de combustão. Borges, Sellin e Medeiros (2008)

caracterizaram e avaliaram os lodos de efluentes sanitários e da indústria têxtil como biomassa na geração de energia através de análise térmica diferencial (ATD) e análise termogravimétrica (ATG), poder calorífico, teores de carbono (C), nitrogênio (N), hidrogênio (H) e enxofre (S). Suas conclusões foram que o lodo de celulose e papel foi mais estável termicamente que os demais lodos, com liberação de energia ainda acima de 600°C e, mesmo com algumas características físicas e químicas diferenciadas, as amostras de lodo apresentaram alto poder calorífico, em torno de 19MJ/kg, demonstrando capacidade para liberação de energia muito próxima a de outras biomassas já empregadas como combustível na geração de energia.

3.4 Processos de combustão combinada - *Cofiring*

Os Processos de Combustão Combinada, chamados de *Cofiring* é a combustão de dois ou mais tipos diferentes de materiais em um mesmo sistema de combustão, com o objetivo de melhorar o potencial energético de um deles, formando um novo combustível. Também pode ser utilizado para a diminuição de emissão de poluentes, como por exemplo a queima de biomassa com carvão.

O termo surgiu na década de 80 nos Estados Unidos e na Europa, mas relacionando à queima de Resíduos Sólidos, como papéis, plásticos, solventes, alcatrão, em sistemas projetados para utilização de carvão como combustível (COUTO *et. al.*, 2004).

Este tipo de processo permite produzir, simultaneamente, energia elétrica e calor útil, configurando uma das tecnologias mais racionais para a utilização de combustíveis (NOGUEIRA e LORA, 2003). A partir do ano de 2000, países como EUA, Finlândia, Dinamarca, Alemanha, Bélgica, Holanda, Polônia, apresentaram um

importante progresso tecnológico e com novas experiências relacionadas a esta técnica (SULLIVAN e MEIJER, 2009).

Dependendo da composição do resíduo a ser queimado, pode ocorrer a diminuição de emissão de gases de efeito estufa, pela queima em conjunto do combustível de origem fóssil com um de origem renovável. Há também uma redução da extração de carvão, que é muito agressiva ao meio ambiente. Segundo Couto et. al (2004), é menos oneroso utilizar uma planta existente de carvão com as devidas adaptações para demais resíduos, do que projetar uma nova planta para a queima exclusiva dos resíduos.

Existem dois tipos de tecnologia de *cofiring*: uma direta e outra indireta. Na primeira, os combustíveis são queimados juntos, com os devidos ajustes de processo; no segundo, os combustíveis são queimados em fornos separados, podendo os gases serem liberados conjuntamente (RESTREPO VICTORIA, 2012).

Os sistemas diretos são simples e econômicos, mas são sensíveis às variações de qualidades e quantidade dos combustíveis, pois dependem dos ajustes realizados para o funcionamento do equipamento.

Na Figura 21 Restrepo Victoria (2012) apresenta três possibilidades de adaptação tecnológica para queima direta de carvão e biomassa:

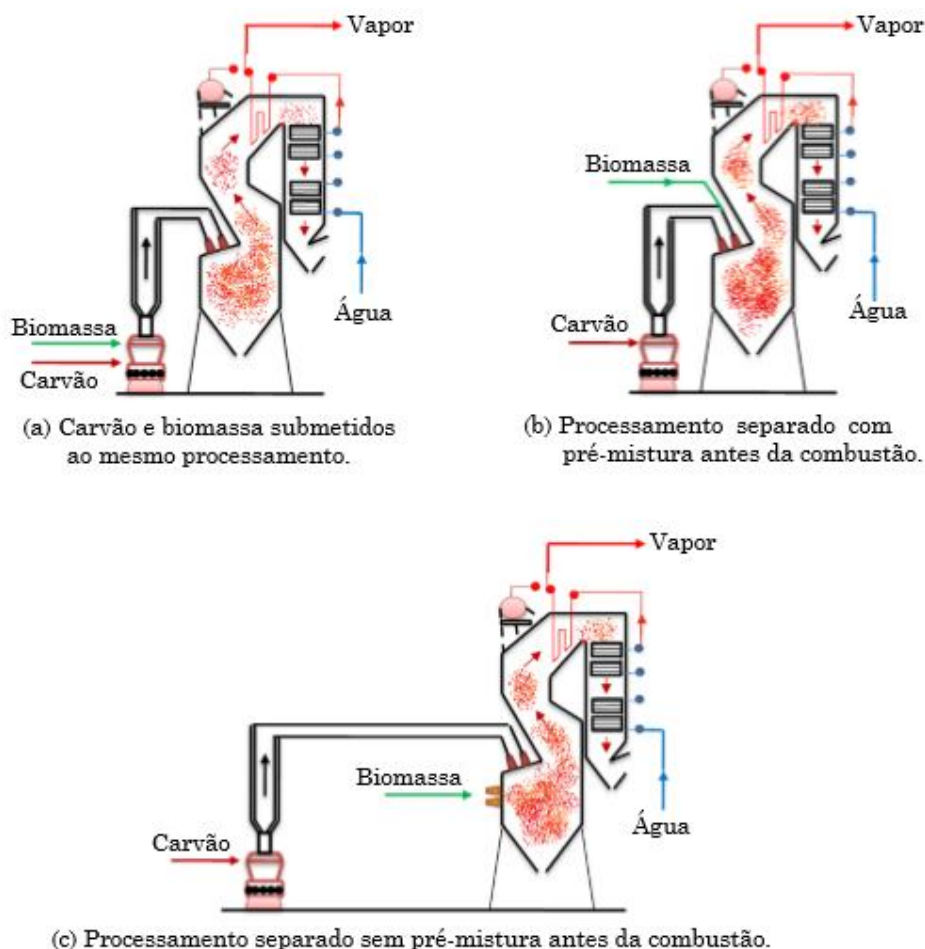


Figura 21- Alternativas para combustão combinada de carvão e outra biomassa (RESTREPO VICTORIA, 2012)

Um problema do carvão é que o teor de enxofre e de cinzas do carvão empregado em muitas termoelétricas pode ser alto. Além disto, a devastação ambiental da área explorada e a poluição aérea são vistos negativamente (SEELIG *et al.*, 2011). Mas a abundância de matéria-prima e a oferta constante justificam a sua utilização como combustível (CEEE, 2010). Mesmo com esta fonte abundante, a busca por combustíveis alternativos cresce, no esforço de minimizar impactos ambientais com a exploração do minério e na tentativa de consumir com resíduos que possuam algum poder energético.

3.5 Beneficiamento de arroz e reutilização dos resíduos - cascas

O Rio Grande do Sul é considerado o maior produtor nacional de arroz, com previsão de 8,3 milhões de toneladas em 2017, segundo o IBGE (2016) e o CONAB(2017), em um total previsto de 11,3 milhões de toneladas. A região sul é responsável por cerca de 81,6% da produção nacional, com rendimento médio de 7.700 kg/ha.

A Figura 22 destaca os locais que cultivam arroz, sendo os estados de RS, SC e TO os responsáveis pelas maiores produtividades.

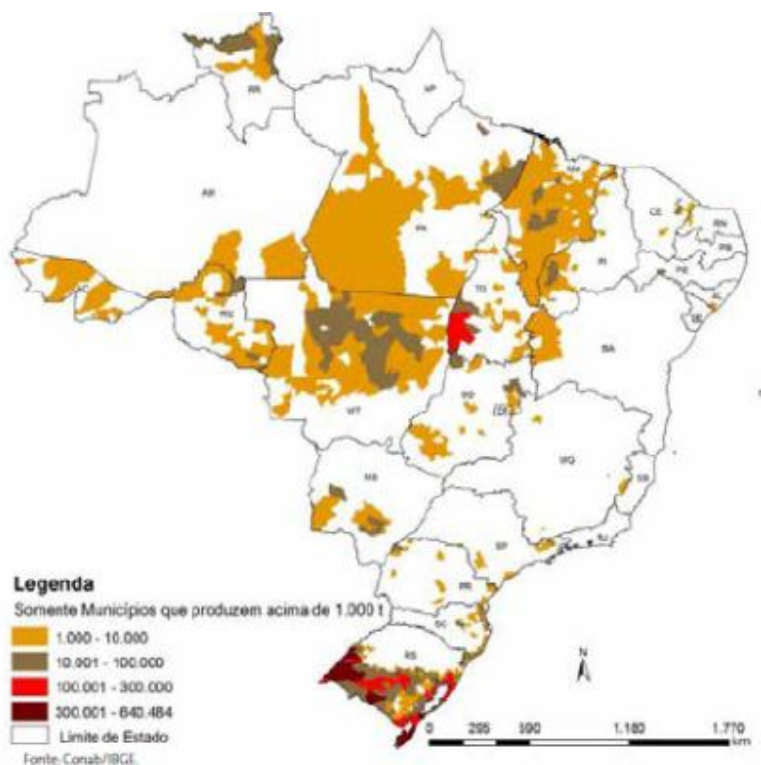


Figura 22- Mapa de distribuição de áreas de cultivo de arroz no Brasil.Fonte: Conab (2017)

No Brasil a estimativa de colheita de arroz para a safra 2016/17, para as cinco regiões estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5- Estimativa de colheita de arroz para a safra 2016/17 no Brasil

Região	Previsão de colheita safra 2017 (mil toneladas)	Porcentagem (%)
Norte	1139,9	9,50 %
RR	83,3	7,31
RO	121,8	10,70
AC	5,6	0,49
AM	4,4	0,39
AP	1,8	0,16
PA	187,6	16,46
TO	735,4	64,51
Nordeste	411,8	3,43 %
MA	222,4	54,00
PI	119,0	28,90
CE	5,0	1,21
RN	2,9	0,22
PB	0,7	0,17
PE	1,6	0,39
AL	17,5	4,25
SE	35,0	0,50
BA	7,7	1,87
Centro-oeste	636,2	5,30 %
MT	457,8	71,96
MS	95,3	14,98
GO	83,1	13,06
Sudeste	55,4	0,46 %
MG	15,1	27,26
ES	0,3	0,54
RJ	1,1	1,98
SP	38,9	70,22
Sul	9.722,7	81,05 %
PR	159,6	1,64
SC	1087,7	11,19
RS	8475,4	87,17
Total	11.996	100,00 %

Fonte: Adaptado IBGE (2017) e IRGA (2017)

Baseando-se também nos dados da Tabela 5 foram gerados os gráficos apresentados na Figura 23, detalhado nas Figuras 24 para a Região Sul.

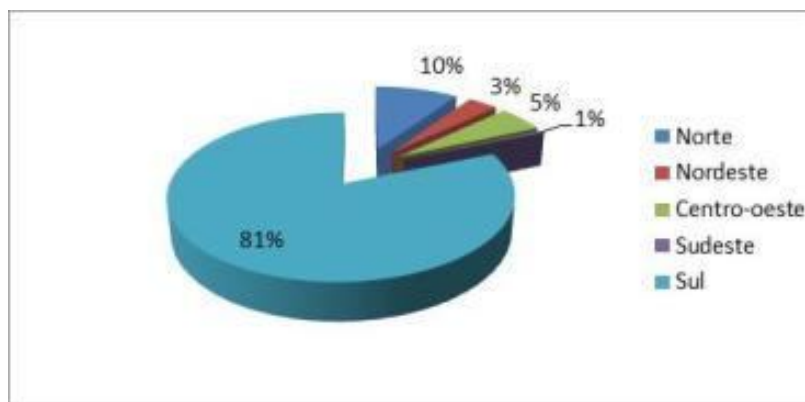


Figura 23- Colheita de arroz em 2017 por Região do Brasil. (adaptado de Conab, 2017)

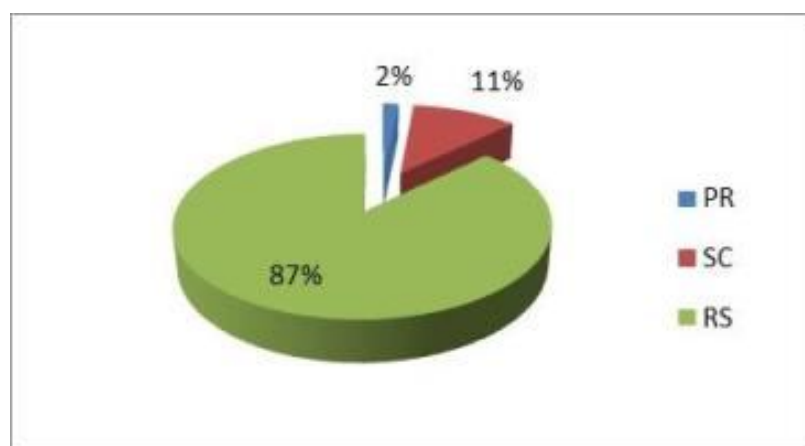


Figura 24- Distribuição da colheita de arroz em 2017 para a Região Sul do Brasil. (adaptado de Conab, 2017)

O município de São Gabriel, pertencente a Região 2 da Campanha, possui área produtiva de 34.187 ha para a safra 2016/17, com produtividade média de 7.542kg/ha e total estimado a ser colhido de 257.917,4 t, o que corresponde a 23% da produção no Rio Grande do Sul (IRGA, 2017). Toda esta produção é beneficiada na própria região, gerando quantidade expressiva de resíduos, como a casca de arroz que representa 22% do total beneficiado.

Este resíduo pode ser utilizado como cama de animais (frangos e animais de grande porte), como condicionador de solo, por melhorar as condições físicas, mesmo

apresentando degradação lenta de aproximadamente 5 a 9 anos. Pode ser também utilizado como fonte de geração de energia, que é considerado o destino final mais adequado. Infelizmente, ainda existem empresas que descartam os resíduos em locais inadequados como beira de estradas, banhados ou em áreas desocupadas.

Como apresentam óleo na composição, podem sofrer autoignição devido a atuação de bactérias termófilas durante a fermentação, podendo atingir temperaturas acima de 75°C. Combinada a altas temperaturas e baixa umidade do ar no verão, podem ocorrer incêndios de grandes proporções e de difícil extinção. Alguns incêndios são criminosos, com a intenção real de eliminação do resíduo.

A casca de arroz apresenta um Poder Calorífico Inferior (PCI) médio de 3.200 kcal/kg e vem sendo utilizada na cogeração, principalmente em grandes engenhos de beneficiamento de arroz. A casca produzida é utilizada na geração de vapor para a secagem e no processo de parboilização do arroz. As cinzas restantes do processo de queima controlada podem ser utilizadas em vários ramos industriais, como na indústria eletrônica, na construção civil, em olarias, em indústria química, na fabricação de células fotovoltaicas, entre outros (MAYER *et al*, 2006).

Em São Gabriel/RS, a maior empresa de beneficiamento do município gera toda a energia utilizada no processo com a queima da casca, mas mantém o seu contrato com a concessionária para situações de emergência ou em períodos de entressafras. Outras empresas de municípios da região também aproveitam estes resíduos na geração de energia. Mayer *et. al.* (2006) enumera os diversos processos de reutilização do resíduo como fonte de energia, na forma de um fluxograma (Figura 25).

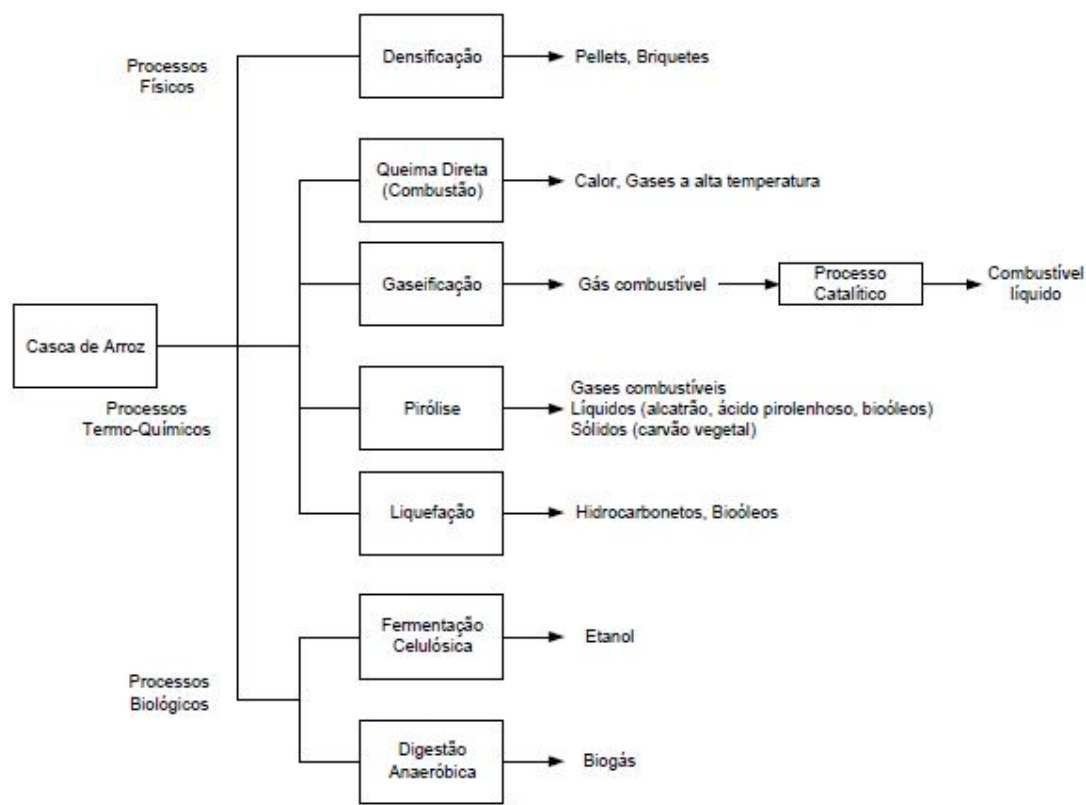


Figura 25- Principais processos de Conversão Energética no aproveitamento energético da casca de arroz (MAYER et. al., 2006)

Levando-se em consideração que toda a casca gerada no beneficiamento do arroz em São Gabriel seja utilizada para geração de energia (2.138.994 t casca/ano), é possível gerar até 44,6MW de Potência, ou seja 3,71MW/mês; que é capaz de fornecer energia suficiente para abastecer uma comunidade com aproximadamente 24.600 habitantes.

A Usina Termelétrica de São Borja/RS entrou em funcionamento em maio de 2012, com capacidade de operar na capacidade plena, 85 mil MWh/ano e consumo de 96 mil toneladas anuais de cascas de arroz. Os 20% das cinzas geradas na queima são destinadas a indústrias de cimento e o restante são encaminhados para o setores de fertilizantes e borracha (REVISTADIGITAL, 2012). Da energia gerada em

São Borja, 10% é destinada aos gastos da própria usina e os 90% restantes são comercializados para a rede pública de energia.

Em 2016 foi iniciada a construção de uma termelétrica de médio porte no município de São Sepé/RS, próximo ao pólo de produção da Região Central no Rio Grande do Sul, mas devido a crise econômica, foi posta em segundo plano em 2017 e sua construção será mais lenta do que o previsto (ESTADÃO, 2017).

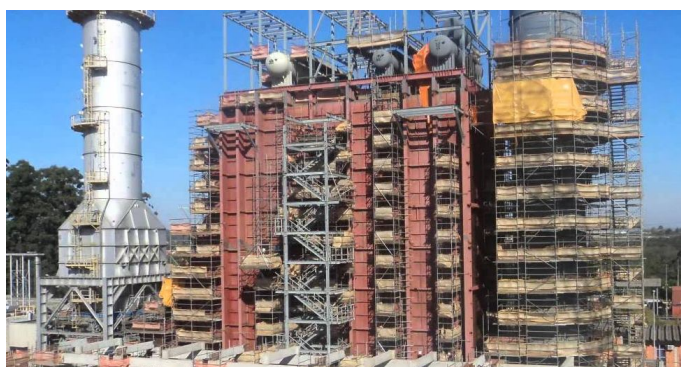


Figura 26- Usina Termelétrica Sepé Tiarajú em São Sepé/RS. Fonte: arquivo pessoal Marcos Fonseca, 2018

Embora a Termelétrica São Sepé (Figura 26) tenha participado dos leilões de energia da Aneel para vender eletricidade para distribuidoras de todo o país, na prática a energia produzida pela unidade deve ser consumida na própria região. Ela deverá abastecer São Sepé e municípios vizinhos, como Formigueiro e Caçapava do Sul, ampliando a oferta de energia no Centro do Estado. Paralelamente, a RGE Sul está investindo R\$ 16 milhões na ampliação da subestação de São Sepé, para poder receber a maior oferta de energia elétrica. Está orçada em R\$ 48,6 milhões e potência instalada de 8,0 megawatts (MW), suficiente para atender 4 vezes a população local do município que é cerca de 30.726 domicílios. Está prevista entrar em funcionamento no segundo semestre de 2018 (DIARIOSM, 2018).

Com relação ao Município de São Gabriel/RS a empresa Urbano utiliza desde 2005 a queima das cascas de arroz geradas durante o processamento de grãos e em 2016 firmou contrato com a concessionária de energia, gerando toda a sua energia necessária ainda abastecendo o sistema global com pó excedente de sua produção diária. Em 2017 a empresa economizou aproximadamente R\$ 1.000.000,00 com o processo. Estes dados foram obtidos diretamente com a direção da empresa em março de 2018.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A fim de cumprir com os objetivos propostos, esta Tese foi estruturada em quatro etapas representadas no Quadro 4 que estão detalhadas nos próximos subitens.

Quadro 4- Resumo das etapas da elaboração da Tese

TESE			
ETAPA 1– obtenção dos lodos	ETAPA 2- Análises dos lodos	ETAPA 3- Cálculos relativos aos lodos	ETAPA 4- Cálculos relativos ao <i>cofiring</i>
Em número de três, obtidos a partir dos coagulantes: - Sulfato de Alumínio (SA); - Polialumínio Cloreto (PAC); - Tanino extraído da casca de <i>Acacia mearsii</i>	Análises previstas: - Poder Caloríficos Superior (PCS) e Inferior (PCI); - Perda ao Fogo; - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Estereomicroscopia; - Difração de raio X (DRX); - Análise Elementar de Carbono, Hidrogênio, Nitrogênio e Enxofre - CHNS	Quantificação da produção de lodo (<i>in loco</i>) com cada coagulante e cálculo da correspondente geração de energia elétrica.	Simulação do cálculo da geração de energia com diferentes misturas de lodos ao PAC e Casca de Arroz.

4.1 Obtenção dos materiais de estudo: Lodos

A água bruta utilizada na geração dos lodos foi coletada do Rio Vacacaí (Figura 27) que se caracteriza por ser um manancial de baixa cor e turbidez, considerada pelo CONAMA 357 de 2005 como Classe 2 (CONAMA, 2005).



Figura 27- Rio Vacacaí próximo ao centro de São Gabriel/RS (Fonte: Autora, 2014)

Como mencionado anteriormente, é considerado Classe 2 (baixo nível de poluição) na área rural e Classe 3 (poluído) na área urbana, uma vez que recebe os esgotos domésticos praticamente sem tratamento. É formado por 5 nascentes localizadas do município de São Gabriel/RS e, pertence à Bacia do Vacacaí-Vacacaí Mirim (SEMA, 2010).

De acordo com SEMA (2010):

“A Bacia Hidrográfica do **Vacacaí-Vacacaí Mirim** está localizada na porção centro-ocidental do Estado, entre as coordenadas geográficas 29°35' a 30°45' de latitude Sul e 53°04' a 54°34' de longitude Oeste. Abrange as Províncias Geomorfológicas Depressão Central e Escudo Sul Rio-Grandense. Possui área de 11.077,34 km². A população total é de 384.657 habitantes, abrangendo municípios como Caçapava do Sul, Júlio de Castilhos, Santa Maria e **São Gabriel**. Os principais cursos de água são os arroios Igá, Acangupa e Arenal e os rios **Vacacaí**, dos Corvos, São Sepé e Vacacaí Mirim. Os principais usos de água se destinam a irrigação, dessedentação de animais e abastecimento público.”

O município de São Gabriel/RS possui uma Estação de Tratamento de Água (São Gabriel Saneamento S/A) onde seu ponto de captação está apontado na Figura

28. O ponto de captação está em uma barragem construída (Figura 29) pouco após a ponte da BR 290, no sentido bairro/centro do município

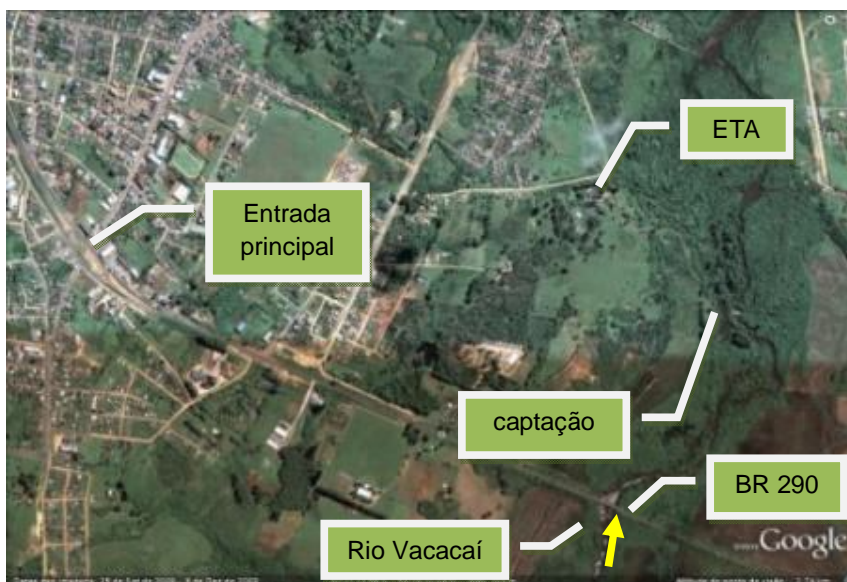


Figura 28- Localização geral do ponto de abastecimento público da cidade de São Gabriel/RS (fonte: adaptado Google Earth, 2013)



Figura 29- Barragem para a captação da água bruta para abastecimento público (Autora, 2014)

O município também possui uma pequena Estação de Tratamento de Esgotos (ETE), com capacidade de tratar 12% do esgoto gerado e, uma outra em processo de Licenciamento Ambiental que terá capacidade de elevar de 12% para 90% de tratamento do esgoto. Para a geração dos lodos, foram utilizados os coagulantes: Sulfato de Alumínio hidratado (SA), Polialumínio Cloreto (PAC) e Tanino de *Acacia mearsii* (Tanino). A Tabela 6 fornece as características gerais destes coagulantes, elaborada a partir dos catálogos dos fabricantes.

Tabela 6- Características físico-químicas aproximadas dos coagulantes utilizados na geração de lodos

	Sulfato de Alumínio	Polialumínio Cloreto 18%	Tanino 18%
Fórmula química	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 14 H_2O$	$Al_n(OH)_m(Cl)_{n-m}$	-
pH (20% v/v)	2,0 – 4,0	3,0-5,0	2,0-3,0
Concentração (%)	10-15	17-20	18-19
Viscosidade (cP)	-	-	7,0-7,3
Massa específica (g/cm ³)	1,300- 1,350	1,320-1,420	1,10-1,20

Fonte: dados fornecidos pelos fabricantes

4.1.1 Lodo ao Sulfato de Alumínio (SA)

O lodo ao Sulfato de Alumínio (SA) foi coletado no momento da primeira limpeza do decantador 1 na planta da São Gabriel Saneamento (Figura 30) em maio de 2012. A coleta foi feita com auxílio de baldes comuns (Figura 31A), filtrada em pano de tecido (Figura 31B) e, posteriormente desidratada naturalmente em bandejas com exposição ao meio ambiente.



Figura 30- Coleta de lodo ao sulfato de alumínio (SA) no momento da limpeza do decantador 1 da ETA São Gabriel. (Fonte: A Autora, 2013)



Figura 31- (A) Lodo coletado (SA) e; (B) Após 3 dias de desidratação. (Fonte: A Autora, 2013)

Após a coleta e limpeza do decantador, a empresa substituiu o coagulante primário Sulfato de Alumínio (SA) pelo Polialumínio Cloreto (PAC), considerado mais eficiente e moderno que o anterior, por não ter contaminantes como o ferro presente na maioria dos sulfatos de alumínio comerciais.

4.1.2 Lodo ao Polialumínio Cloreto (PAC)

O lodo ao Polialumínio Cloreto (PAC) foi coletado em bombona de 50L (Figura 32A), do mesmo local que o lodo ao sulfato de alumínio (SA), ou seja no durante a limpeza do decantador 1 da ETA São Gabriel Saneamento, após 6 meses da substituição do SA pelo PAC.

Após a coleta, a bombona foi lacrada e transportada até as estufas da Unipampa *campus* São Gabriel (Figura 32B), onde o lodo permaneceu por 3 dias espalhado sobre uma manta plástica preta em uma mesa até total desidratação. Após, o lodo foi recolhido em frascos de polietileno e transportado para o laboratório de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Este tempo foi suficiente devido as condições climáticas da época da coleta. A temperatura estava elevada e o ar seco.



Figura 32- (A) Lodo coletado (PAC) e; (B) Após 3 dias de desidratação da Unipampa. (Fonte: A Autora, 2013)

4.1.3 Lodo ao Tanino de *Acacia mearsii* (T)

Para obter lodo ao tanino, foram feitos vários testes para a obtenção da melhor dosagem com o coagulante à base de Tanino de *Acacia mearsii*. Esta dosagem foi definida como aquela que reduziu maior porcentagem de cor e turbidez com menor dosagem e no menor tempo admissível (RICHTER, 2009).

Para isto, foi utilizado o equipamento de Teste de Jarros (*Jartest*), com 6 recipientes de 2L cada (Figura 33B). A água foi coletada no ponto mais próximo da captação da ETA São Gabriel Saneamento, no rio Vacacaí, ponto conhecido como Estátua de Iemanjá. (Figuras 33A).

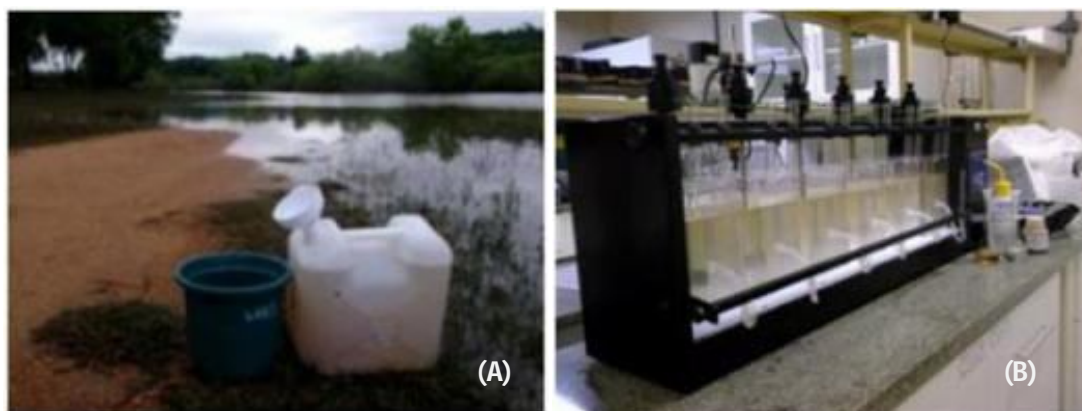


Figura 33- Coleta de água bruta no rio Vacacaí e; (B) Equipamento Jarrest na Unipampa. (Fonte: A Autora, 2013)

As condições do ensaio no equipamento foram:

- 1) adição do coagulante em dosagens estipuladas;
- 2) 3 minutos de mistura rápida (200 rpm);
- 3) 20 minutos de contato (80 rpm);
- 4) 10 minutos para acondicionamento do floco (40 rpm) (Figura 34A);
- 5) 30 minutos de sedimentação, observando a velocidade de formação e sedimentação do floco, bem como a clarificação da amostra (Figura 34B).

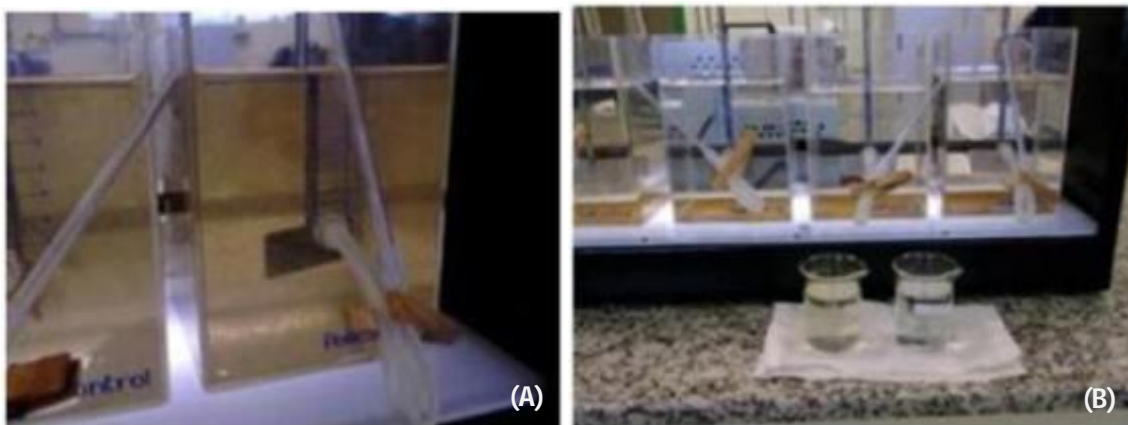


Figura 34- (A) Floculação com Tanino e; (B) Após sedimentação – clarificação. (Fonte: A Autora, 2014)

A dosagem da melhor condição escolhida foi aplicada em escala de bancada com bombona de 60L e agitador com velocidade regulavel (rpm regulável) para produção de lodo ao Tanino e repetida várias vezes até a obtenção de uma quantidade significativa de lodo desidratado (Figura 35). Esta melhor dosagem era a que utilizava menor quantidade de coagulante, obtendo a menor cor e turbidez. Por isto a importância da realização do *jartest*.



Figura 35- Floculação em escala de 60L para obtenção do lodo ao Tanino (Fonte: A Autora, 2014)

Os três lodos desidratados (SA, PAC e Tanino) passaram pelos mesmos tratamentos posteriores, ou seja foram levados à estufa a 105°C para remoção da umidade ainda existente e após, desagregados à pó em grau de porcelana. As amostras foram acondicionadas em frascos de polietileno e encaminhadas às análises físico-químicas nos laboratórios da UFRGS e Unipampa *campus* Bagé.

4.2 Análises Químicas e Físicas dos Lodos

4.2.1 Análise por Estereomicroscopia

Para estas imagens utilizou-se um Estereomicroscópio, binocular, marca MOTIC, com aumentos de 64, 160, 250 e 400 vezes, onde foi possível observar diferenças significativas de morfologia. As imagens digitais foram obtidas com câmara fotográfica digital *HP Photosmart M54*, instalados no Laboratório da Engenharia Química da Unipampa *campus* Bagé.

4.2.2 Análise Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV

As imagens obtidas por Microscopia de Varredura Eletrônica (MEV) foram realizadas no laboratório de mesmo nome no Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IG/UFRGS), no equipamento modelo JSM-5800LV JEOL.

As amostras foram desagregadas em grau de ágata até pó para a possível realização da análise. Não foi necessária a metalização das amostras, já que as primeiras imagens foram nítidas, sendo elas acomodadas diretamente em uma fita de carbono (Figura 36A) e, após nas “painéis de alumínio” denominadas de *tubs*. As amostras (Figura 36B) foram submetidas ao vácuo e após saturamento do filamento,

os elétrons foram retroespalhados na superfície da amostra, gerando uma imagem que foi percebida e registrada.



Figura 36- (A) Mesa de preparo para análise no MEV e (B) Amostras utilizadas no teste (Fonte: A AUTORA, 2014)

4.2.3 Análise de Difração por Raio X - DRX

A composição mineralógica foi realizada em equipamento *X-Ray Diffractometer* (Figura 37), marca *Rigaku*, nos laboratórios de Física da Unipampa *campus* Bagé e Laboratório de Estudos Ambientais para Metalurgia – LEAmet, Com condição inicial de 2000° e final de 72.000° , passo de $0,020^\circ$ em 1s.

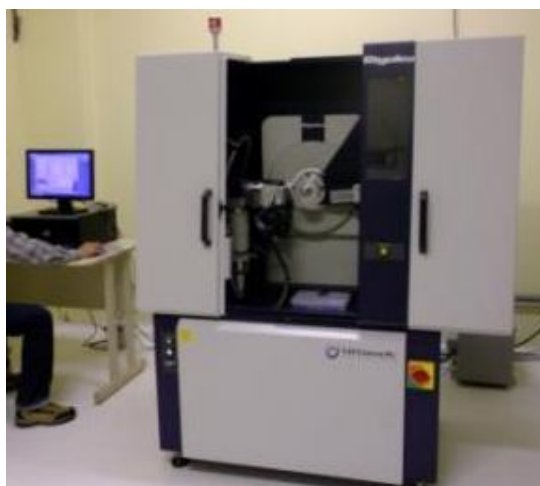


Figura 37- Difratorômetro Rigaku (Fonte: A AUTORA, 2014)

4.2.4 Análise Elementar CNHS

Os elementos Carbono, Hidrogênio, Nitrogênio e Enxofre presentes na amostra foram determinados por Análise Elementar Instrumental, por combustão da amostra e detecção por infravermelho no equipamento *Analyser Organic Elementar, Flash 2000* da *Thermo Scientific*, segundo a metodologia especificada na ASTM D 5373-93 (1997). Essas análises foram realizadas no Laboratório de Análise de Carvão e de Rochas Geradoras de Petróleo (IG/UFRGS).

4.2.5 Análise de Perda ao Fogo

As análises de perda ao fogo oportunizaram quantificar o teor de materiais inorgânicos como óxidos e silicatos, após remoção da umidade (água de cristalização), da matéria orgânica e do dióxido de carbono, utilizando-se temperatura elevada (950°C), realizadas de acordo com CEMP 120/2015, que descreve a seguinte técnica:

- Pesar 2g de amostra;
- Desidratar por 1h em estufa a 105°C;
- Esfriar em dessecar e pesar. Este será a amostra após a estufa (MA);
- Levar ao forno Mufla a 950°C por 1h;
- Resfriar no dessecador até peso constante. Pesa-se novamente e este valor encontrado será a massa após mufla (MR)

O resultado é expresso em porcentagem com precisão de 0,01 e é obtido através da seguinte equação:

$$PF = \frac{(MA - MR)}{MA} \times 100 \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

PF = perda ao fogo, em %;

MA = massa da amostra, em g; após estufa a 105°C

MR = massa do resíduo final, em g, após mufla a 950°C

4.2.6 Análise de Poder Calorífico Superior (PCS) e Inferior (PCI)

O Poder Calorífico Superior foi determinado por Bomba Calorimétrica, seguindo a metodologia ASTM D-2015-91 (ASTM, 1991), nos Laboratório de Estudos Ambientais para Metalurgia – LEAmet e Laboratório de Análises de Carvão e de Rochas Geradoras de Petróleo (IG/UFRGS). A Bomba Calorimétrica utilizada foi da marca *IKAWERKE C2000 basic/control*.

Este método determina o calor produzido pela combustão de uma amostra sob atmosfera de oxigênio puro (99,95%) e pressão de 30 bar em uma Bomba Adiabática Calorimétrica. O acréscimo da temperatura da água existente na amostra causada pela combustão é comparado com uma amostra de referência o ácido benzóico.

O valor do Poder Calorífico da amostra é calculado pela equação:

$$PCS = \frac{H_{ob} \cdot m}{\Delta T} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

PCS = Poder Calorífico Superior (cal/g)

H_{ob} = Poder Calorífico do Ácido Benzóico (referência)

m = massa da amostra (g)

ΔT = Aumento de temperatura durante a combustão (°C)

O Poder Calorífico Inferior (PCI) foi calculado, conforme a equação:

$$\text{PCI} = \text{PCS} - m_{\text{água}} \cdot (c_{p\text{água}} \times \Delta t + L) \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

PCI = Poder Calorífico Inferior (cal/g)

$m_{\text{água}}$ - cada g de H gera 9g de água (depende do resultado do CHNS)

Δt = diferença da temperatura ambiente até temperatura de ebulição da água

$c_{p\text{água}}$ = capacidade calorífica da água (1kcal/kg)

L água = calor latente da água (540kcal/kg)

4.3 Quantificação da Geração e Cálculo de produção de Energia

4.3.1 Determinação da quantidade de lodo gerado

Para a quantificação do lodo gerado de uma ETA pode-se utilizar dois Métodos: determinação do lodo gerado depositado em Cone *Imhoff* e por estequiometria química.

4.3.1.1 Determinação pelo Método de *Imhoff*

Para a determinação da quantidade de sólidos sedimentáveis produzidos em uma ETA, o método mais prático utilizado (se ETA em pleno funcionamento) é o de Cone de *Imhoff* (Figura 38), onde são despejados 1000mL de água retirada do flocculador; aguarda-se a sedimentação dos flocos por 45 minutos; gira-se 360° suavemente para desprender das paredes do Cone e; espera-se mais 15 minutos para a completa deposição. O volume de lodo observado na escala contida no cone é anotado para posterior cálculo final (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

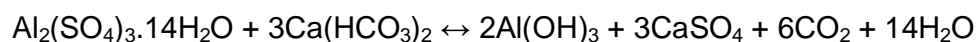


Figura 38- Flocos decantados no final de um teste em Cone *Imhoff* (Fonte: A Autora, 2017)

O cálculo final é simples, considerando que a sedimentação ocorre em 1 hora. Este valor é corrigido para 24 horas (um dia). Para o cálculo dos valores mensais deve-se considerar uma média, já que esta quantidade de lodo depende das condições meteorológicas, como chuvas e estiagens.

4.3.1.2 Determinação por cálculos estequiométricos

Para o cálculo da quantidade de lodo gerado em uma estação, utiliza-se a reação estequiométrica do coagulante sulfato de alumínio.



Pela estequiometria cada 594g de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$ formam 156g de $\text{Al}(\text{OH})_3$. Então 1g de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$ produz 0,26g de $\text{Al}(\text{OH})_3$. Este dado é importante para o cálculo da quantidade de lodo gerado na ETA com Sulfato de Alumínio. Outro dado importante é a relação entre a turbidez e os sólidos removidos, que aceita valores entre 0.5 e 2.0mg/UNT. Para efeito de cálculo é adotado o valor de 0.75mg/UNT.

De acordo com Viessman e Hammer (1998) a Equação 4 é a utilizada no cálculo da produção de lodo com a utilização do Sulfato de Alumínio:

$$LP_{SA} = [T \times 0.75] + [C_{SA} \times 0.44] \times Q \quad \text{Eq. 4}$$

Onde:

LP_{SA} = Quantidade de Lodo Produzido com Sulfato de Alumínio

T = Turbidez da água bruta

C_{SA} = concentração do sulfato de alumínio (mg $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O/L$)

0.75 = relação entre sólidos e turbidez = 0.75mg/UNT

0.44 = relação entre sulfato de alumínio e produção de $Al(OH)_3$

Q = vazão de água tratada (L/d)

Vanacôr (2005) adaptou a Equação 4 para coagulantes a base de Tanino, utilizando dados reais da ETA Novo Hamburgo, relacionando a concentração de sólidos que entram no decantador com a Turbidez da água bruta:

$$LP_{Tanino} = [T \times 0.75] + [C_{Tanino} \times \Delta_i] \times Q \quad \text{Eq. 5}$$

Onde:

LP_{Tanino} = Quantidade de Lodo Produzido com a utilização de Tanino (kg)

T = Turbidez da água bruta

C_{Tanino} = concentração do Tanino (mg Tanino/L)

0.75 = relação entre sólidos e turbidez = 0.75mg/UNT

Δ_i = relação entre Tanino e Sólidos = mg Sólidos/mg Tanino

Q = vazão de água tratada (L/d)

A relação Δ é dado por:

$$\Delta_i = C_{Tanino} / Q \times T \quad \text{Eq. 6}$$

Sendo que:

C_{Tanino} = concentração média utilizada do coagulante em g/m^3

Q = vazão da água tratada em m^3/d

T = turbidez em UNT

E, por fim, utilizando a mesma idéia de Vanacôr (2005) adaptou a Equação 4 para coagulantes a base de Polialumínio Cloreto, utilizando dados reais da ETA São Gabriel Saneamento, relacionando a concentração de sólidos que entram no decantador com a Turbidez da água bruta:

$$LP_{\text{PAC}} = [T \times 0,75] + [C_{\text{PAC}} \times \Psi] \times Q \quad \text{Eq. 7}$$

Sendo:

LP_{PAC} = Quantidade de Lodo Produzido com Policloreto de Alumínio (kg)

T = Turbidez da água bruta

C_{PAC} = concentração do Polialumínio Cloreto (mg PAC/L)

0.75 = relação entre sólidos e turbidez = 0.75mg/UNT

Ψ = relação entre Sólidos e PAC = mg Sólidos/mg PAC

Q = vazão de água tratada (L/d)

A relação Ψ é dado por:

$$\Psi = C_{\text{PAC}} / Q \times T \quad \text{Eq. 8}$$

Onde:

C_{PAC} = concentração média utilizada do coagulante em g/m^3

T = turbidez em UNT

Q = vazão da água tratada em m^3/d

4.3.2 Cálculo da produção de energia elétrica utilizando o lodo como matéria-prima

Para o cálculo da energia que pode ser gerada a partir da quantidade de lodo produzida, é necessário o cálculo do Poder Calorífico Inferior, que leva em consideração o calor latente de vaporização da água presente. Seu cálculo é dado pela equação 3 apresentada no item 4.2.6.

Para a combustão direta de biomassa em caldeiras, nos chamados ciclo a vapor, são utilizados o conjunto motor estacionário modelo SGI-12A fabricado pela SCANIA (Figura 39), com eficiência de transformação de 70% (ERBR, 2018). A porcentagem presente de matéria orgânica é dada pela análise de Perda ao Fogo. Para o tanino o valor médio obtido foi de 35% e para o PAC de 30%.



Figura 39- Conjunto sugerido pela empresa ER-BR para ser utilizado com o lodo de ETA

A Potência gerada ao mês é dada pela equação 9.

$$P \text{ (MW/mês)} = [LP \times MO \times PCI \times \eta] / 860. H_s \quad \text{Eq. 9}$$

Onde:

P = Potência gerada (MW/mês)

LP = Quantidade de Lodo Produzido

MO = Matéria Orgânica presente no resíduo

PCI = Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)

η = Rendimento do turbogerador

860 = fator de conversão de kcal/kg para kWh/kg

H_s = Horas de geração de energia trabalhadas ao mês

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após coleta, desidratação e desagregação, os lodos foram armazenados e transportados aos respectivos laboratórios para as análises propostas. Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos para cada item elencado neste trabalho.

5.1 ANÁLISES QUÍMICAS E FÍSICAS DOS LODOS

Para conhecer as peculiaridades de cada lodo gerado, são necessárias análises químicas e físicas dos lodos coletados. A seguir serão apresentados os resultados obtidos.

5.1.1 Análise por Estereomicroscopia

Esta análise foi realizada para comparar lodos quanto a estrutura física após a desidratação e pequena desagregação. A comparação foi visual, utilizando aumentos de 64, 160, 250 e 400 vezes. As imagens de melhor visualização para comparação foram as de 250 e 400 vezes.

5.1.1.1 Sulfato de Alumínio (SA)

As imagens obtidas para o lodo ao SA mostraram grãos de morfologia homogênea, em placas, resistente, de difícil maceração. No aumento de 250 vezes e 400 vezes (Figura 40) pode-se observar pontos amarelados referentes possivelmente a presença de ferro, contaminante muito comum neste coagulante e também presente no rio Vacacaí. É um contaminante preocupante porque combinado ao cloro da água tratada, produz manchas amareladas em roupas e louças brancas, além de fornecer sabor desagradável à água.

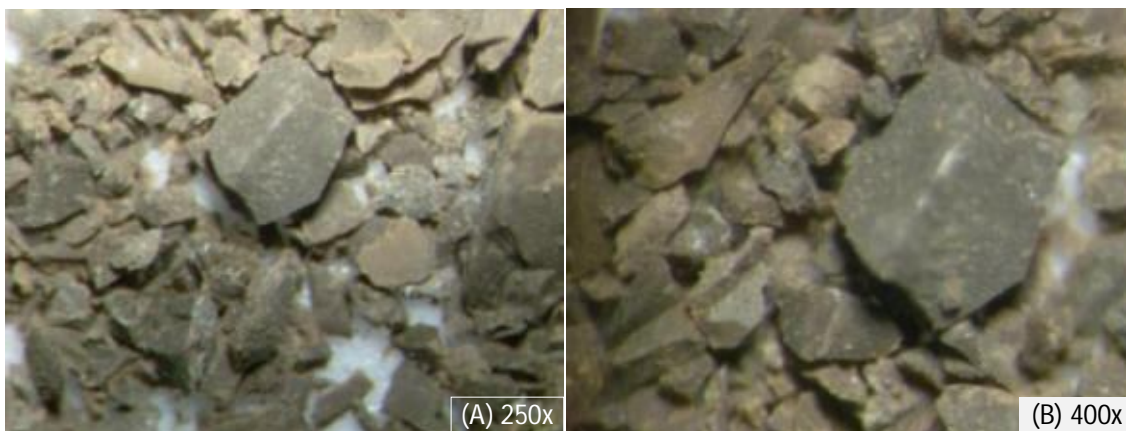


Figura 40- Imagem do lodo ao sulfato de alumínio no Estereomicroscópio MOTIC com aumento de (A) 250X e (B) 400X (Fonte: Autora, 2014).

5.1.1.2 Polialumínio Cloreto (PAC)

As imagens obtidas para o lodo ao PAC mostraram-se diferentes ao lodo ao SA, com grãos de morfologia homogênea, de coloração marrom acinzentado, com relativa facilidade ao macerar. No aumento de 250X e 400X (Figura 41) pode-se observar poucas manchas amareladas referentes a presença de ferro, desta vez oriundo somente do manancial.

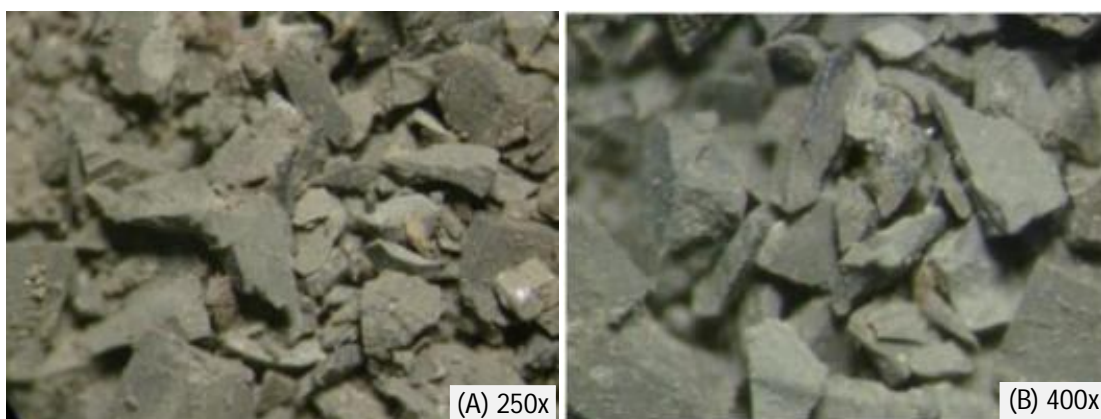


Figura 41- Imagem do lodo ao Polialumínio Cloreto no Estereomicroscópio MOTIC com aumento de (A) 250X e (B) 400X (Fonte: Autora, 2014).

5.1.1.3 Tanino de *Acacia mearsii* (T)

As imagens obtidas para o lodo ao Tanino mostraram-se completamente diferente dos lodos anteriores, com grãos de morfologia heterogênea, em tons de marrom e de fácil maceração. Pode-se observar pontos brilhantes de sílica e presença de pequenos filamentos vegetais na Figura 42. Estes filamentos são oriundos do coagulante utilizado a base de casca de Acácia.

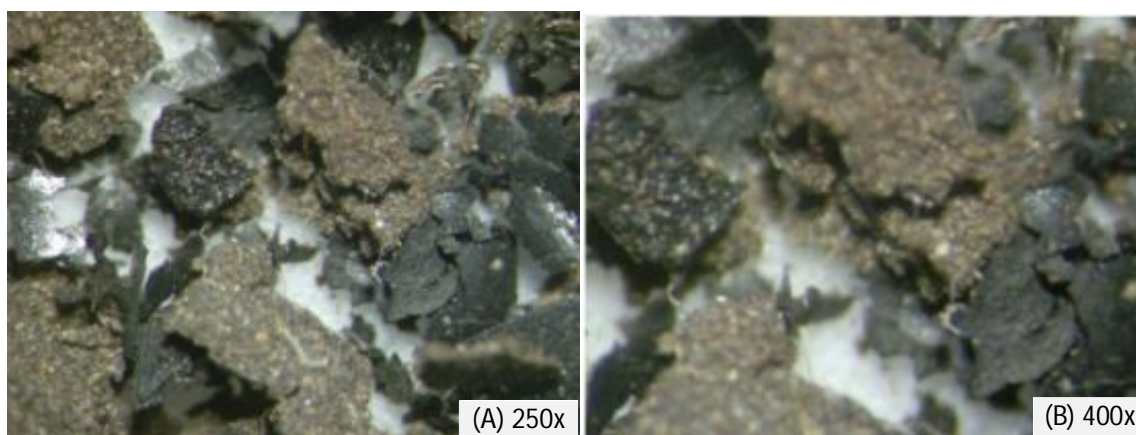


Figura 42- Imagem do lodo ao Tanino no Estereomicroscópio MOTIC com aumento de (A) 250X e (B) 400X (Fonte: A AUTORA, 2014)

A diferença de tonalidade de marrom é devida a quantidade de coagulante utilizada, que depende diretamente da cor e da turbidez do rio do dia em que foi feita a coleta. Por isto a importância da moagem e mistura completa antes das análises químicas.

Torna-se mais fácil perceber as diferenças comparando-se os três lodos conjuntamente (Figura 43). Utilizando-se as imagens com 160 vezes, pode-se perceber a semelhança da estrutura do grão do lodo ao SA (A) e a do lodo ao PAC (B) e a diferença notória do lodo ao Tanino (C). Este último com aparência de fácil desagregação enquanto os outros dois, com aparência rígida.

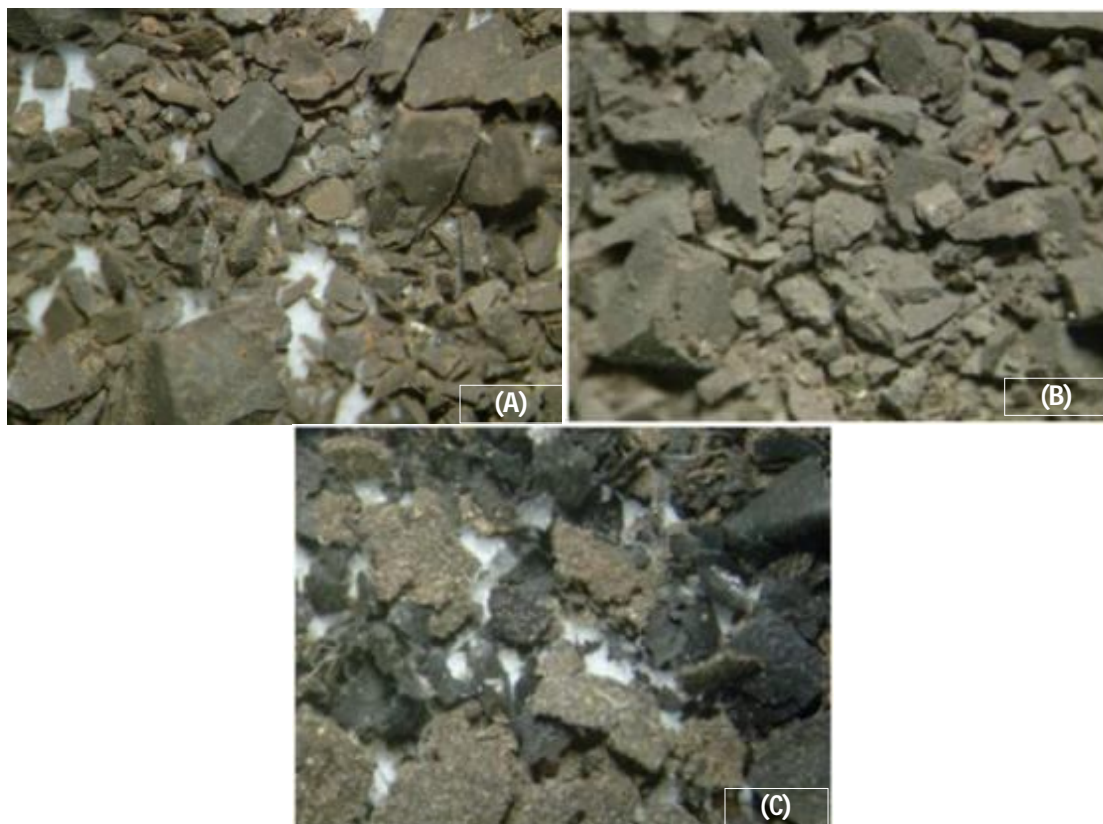


Figura 43- Comparativo de imagens obtidas por estereomicroscópio com aumento de 160 vezes: (A) Lodo ao SA; (B) Lodo ao PAC; (C) Lodo ao Tanino

5.1.2 Análise Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV

Com os lodos desidratados e moídos à pó em grau de porcelana e ágata, foram feitas imagens, em microscópio de varredura eletrônica (MEV), utilizando aumentos de 100, 500 e 1000 vezes. As melhores imagens podem ser observadas nos próximos subitens.

5.1.2.1 Sulfato de Alumínio (SA)

Nas imagens apresentadas na Figura 44, observou-se grãos brancos e opacos, apontados pelo equipamento como alumínio. O ferro, por sua vez foi encontrado em pequena quantidade, não se destacando na imagem.

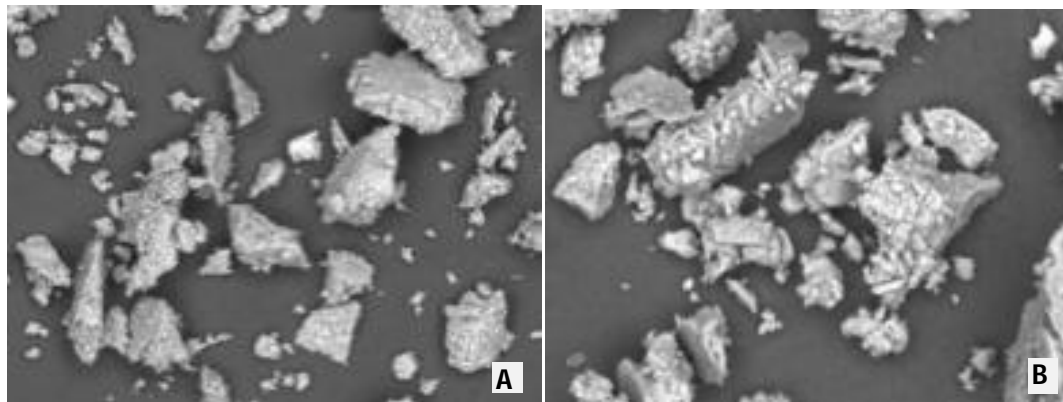


Figura 44- Imagem em MEV do lodo ao Sulfato de Alumínio (SA) com aumentos de (A) 500X e (B) 1000X (Fonte: A AUTORA, 2014)

O estereograma correspondente (Figura 45) indica a presença em maior quantidade de alumínio e ferro, possivelmente óxidos de ferro, carbonatos de cálcio e silicatos.

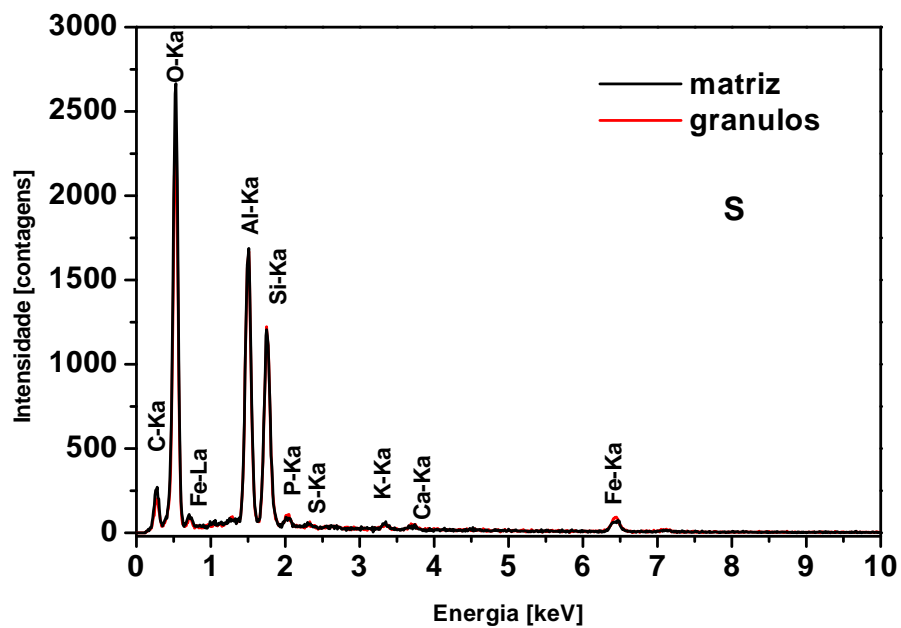


Figura 45- Análise qualitativa das imagens no MEV do lodo ao SA. (Fonte: A AUTORA, 2014)

5.1.2.2 Polialumínio Cloreto (PAC)

Nas imagens da Figura 46 e seu respectivo estereograma (Figura 47) registrou-se a presença em maior quantidade de silício nos grânulos e um pouco menos de alumínio. Comparando-se com o encontrado para o sulfato de alumínio, a quantidade presente de carbono e oxigênio indica maior quantidade de carbonatos e silicatos.

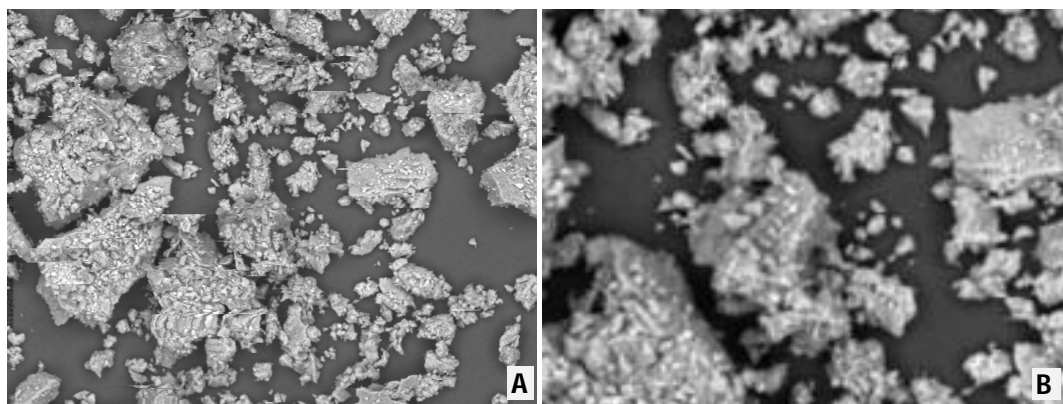


Figura 46- Imagem em MEV do lodo ao Policloreto de Alumínio (PAC) com aumentos de (A) 500X e (B) de 1000X (Fonte: Autora, 2014)

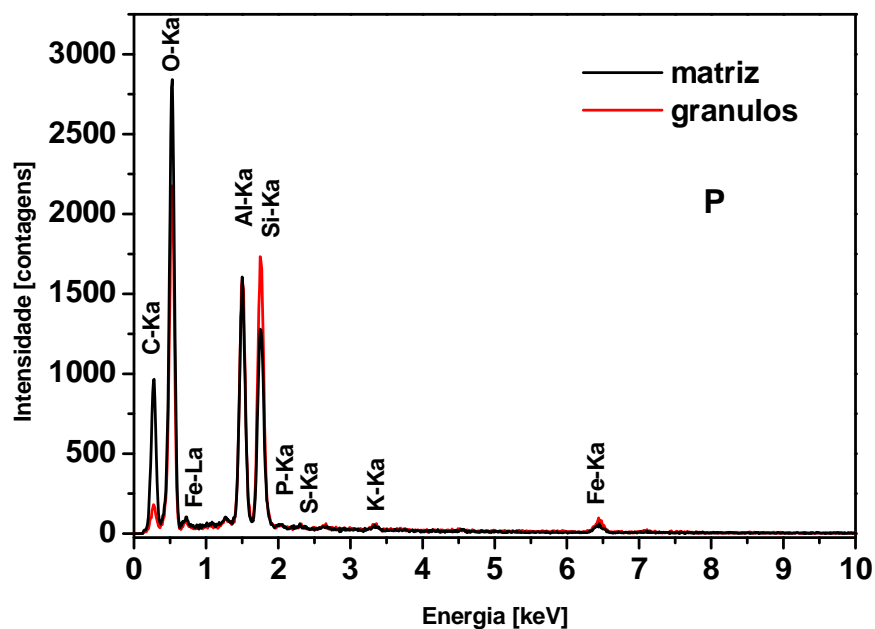


Figura 47- Análise qualitativa das imagens no MEV do lodo ao PAC. (Fonte: Autora, 2014)

5.1.2.3 *Tanino de Acacia mearsii* (T)

As características visuais do lodo ao Tanino são bem diferentes dos lodos anteriores (ao alumínio). Os pontos brilhantes destacados na Figura 48 foram identificados como potássio.

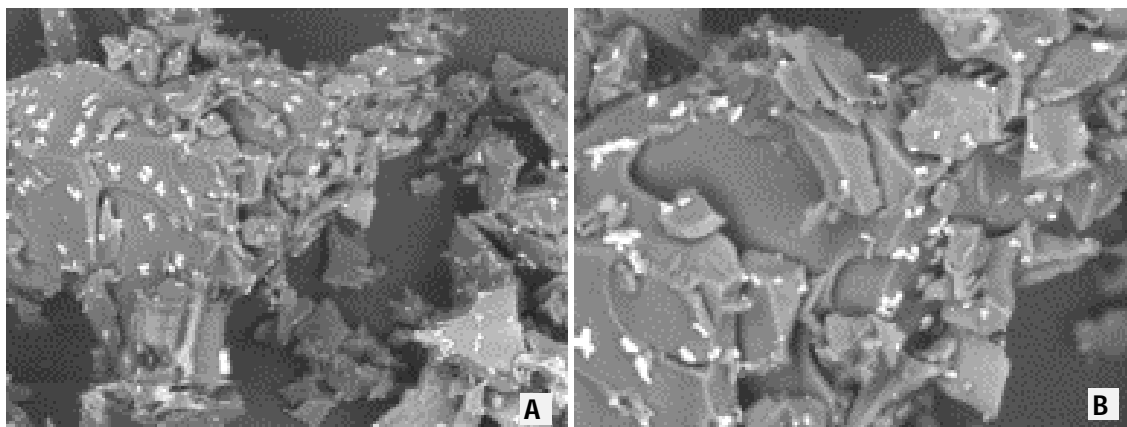


Figura 48- Imagem em MEV do lodo ao Tanino com aumentos de (A) 500X e (B) 1000X (Fonte: Autora, 2014)

Por fim, a imagem gerada do lodo ao Tanino apresentado na Figura 49 registrou a presença em quantidade sílcio nos grânulos e pouco alumínio. Comparando-se com o encontrado para o sulfato de alumínio, a quantidade presente de carbono e oxigênio indica maior quantidade de carbonatos e silicatos.

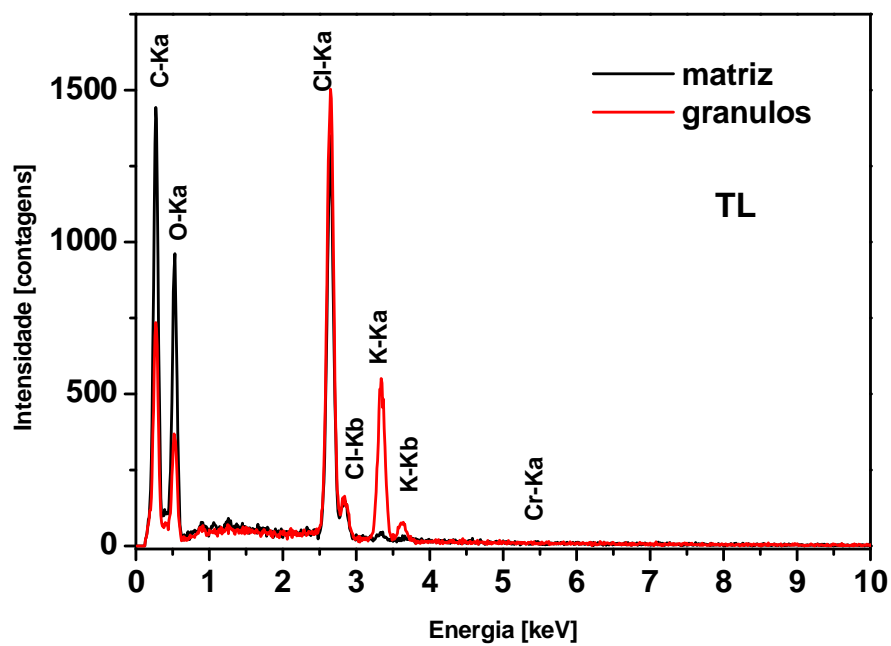


Figura 49- Análise qualitativa das imagens no MEV do lodo ao Tanino. (Fonte: Autora, 2014)

Colocando-se lado a lado as imagens obtidas pelo MEV com aumento de 1000 vezes (Figura 50), é fácil de novamente observar a semelhança estrutural entre os lodos ao SA e ao PAC, parecendo inclusive ser o mesmo. As diferenças de estrutura entre estes e o lodo ao lodo ao Tanino é notória.

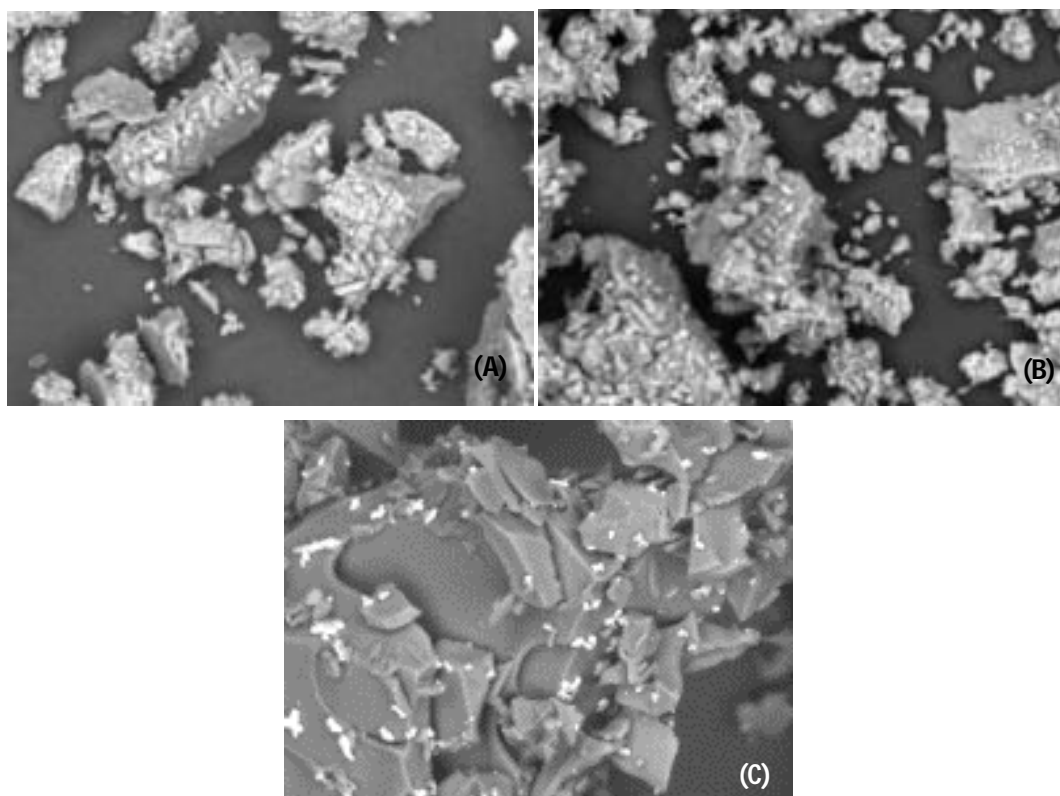


Figura 50- Comparação entre as imagens de MEV com 1000x de aumento de: (A) Lodo ao AS; (B) Lodo ao PAC e (C) Lodo ao Tanino

5.1.3 Análise de Difração por Raio X - DRX

A composição mineralógica realizada por Difração de Raio X dos lodos são apresentadas nas Figuras 51 para Sulfato de Alumínio, Figura 53 para o Polialumínio Cloreto e Figura 55 para o Tanino.

Como os dados dos difratogramas ficaram ilegíveis, novas figuras foram geradas (Figuras 52, 54 e 56), com a ampliação dos mesmos e, estes valores agora nítidos foram utilizados para elaborar a Tabela 5.

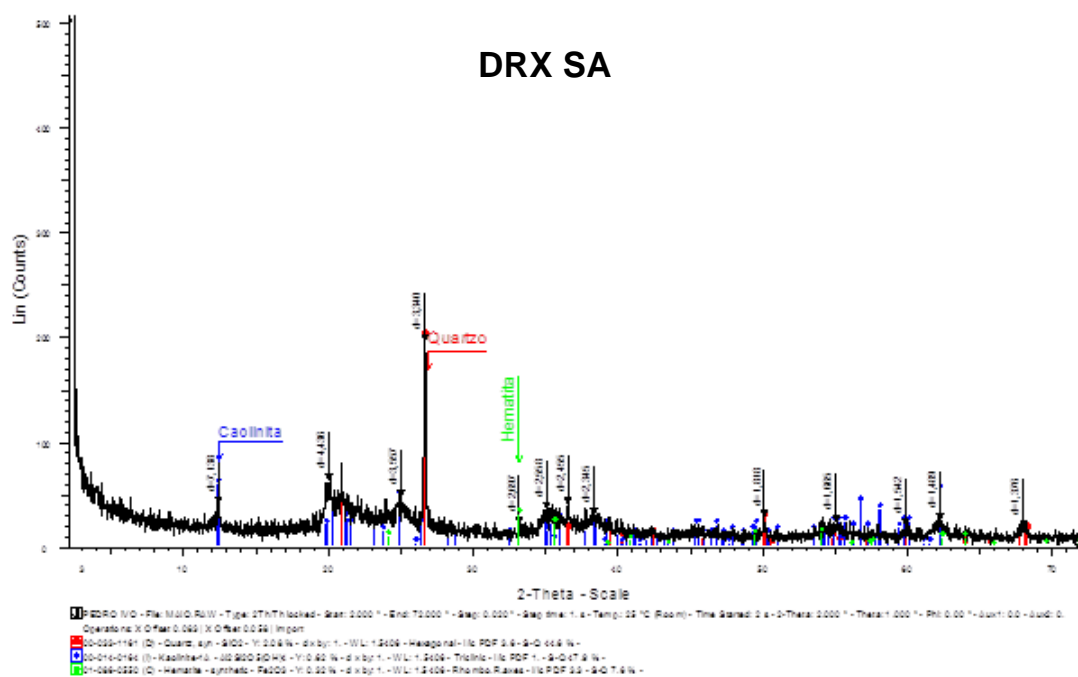


Figura 51- DRX da amostra de lodo obtido com coagulante SA

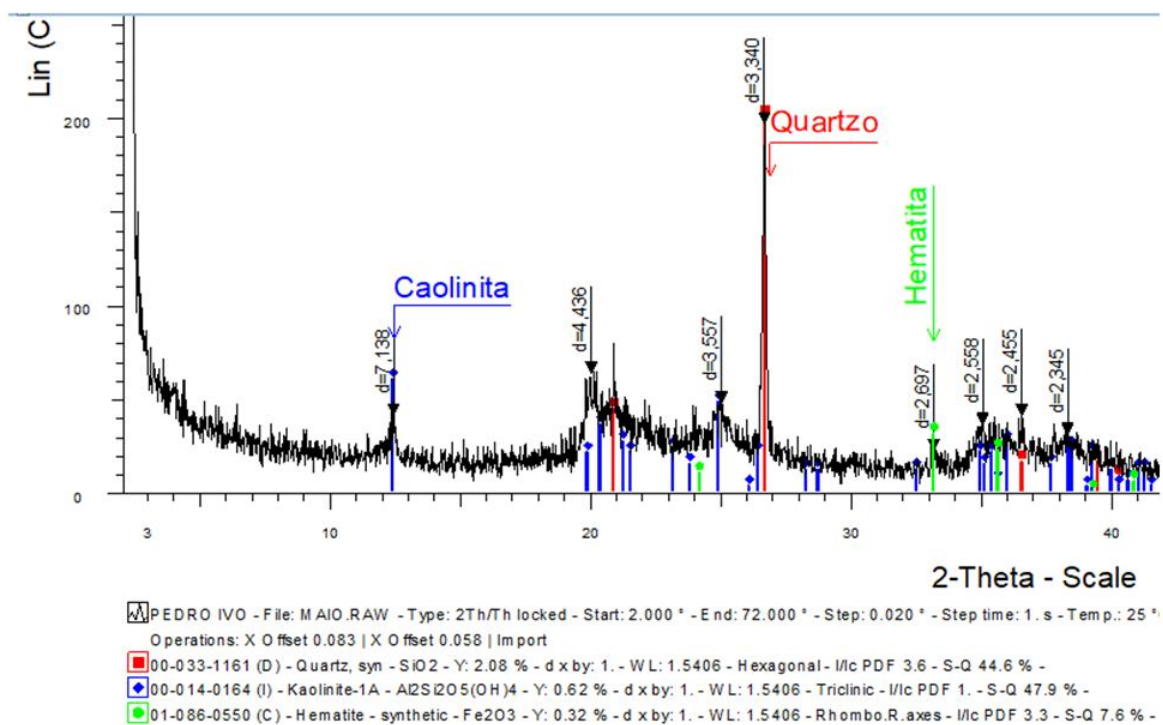


Figura 52- Detalhe do DRX da amostra de lodo obtido com coagulante SA

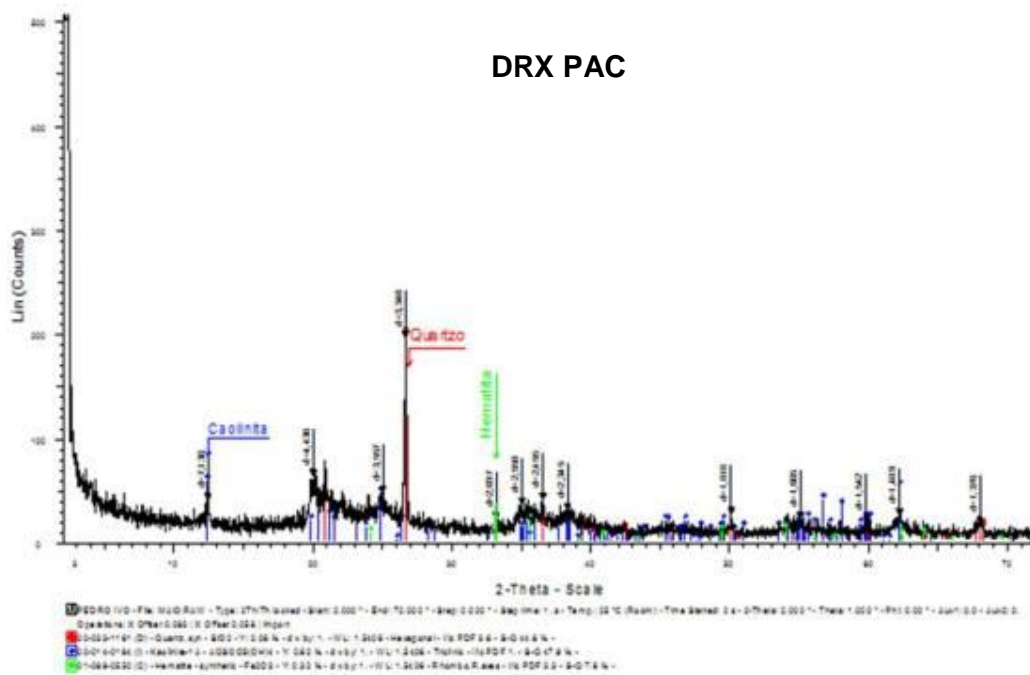


Figura 53- DRX da amostra de lodo obtido com coagulante PAC

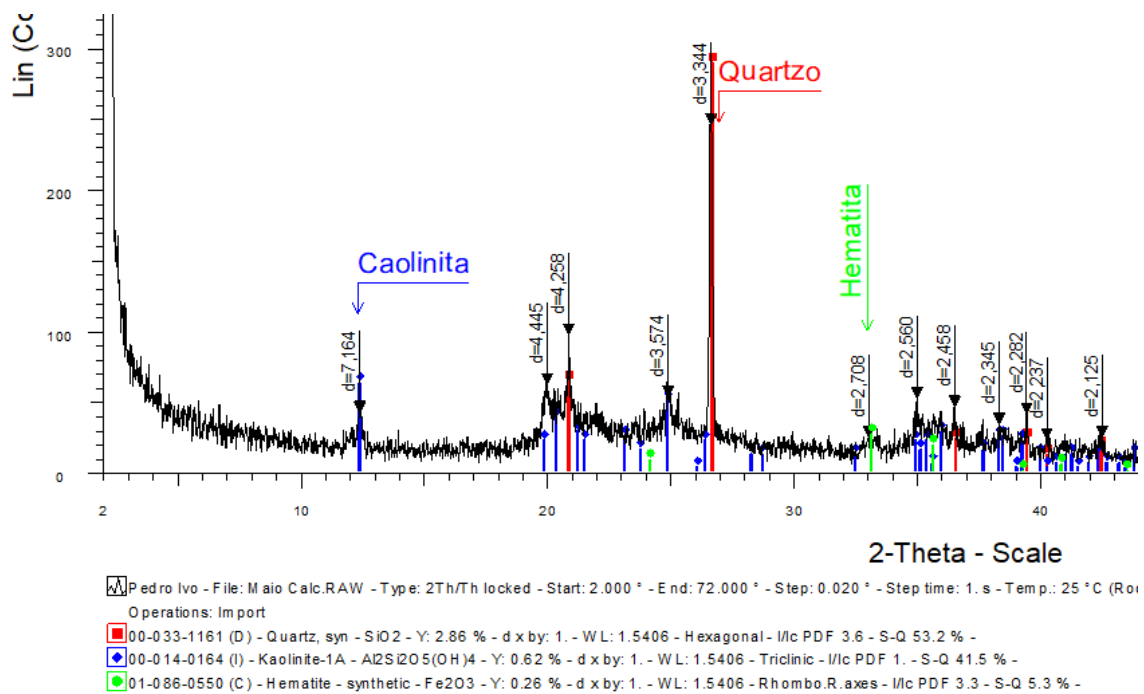


Figura 54- Detalhe do DRX da amostra de lodo obtido com coagulante PAC

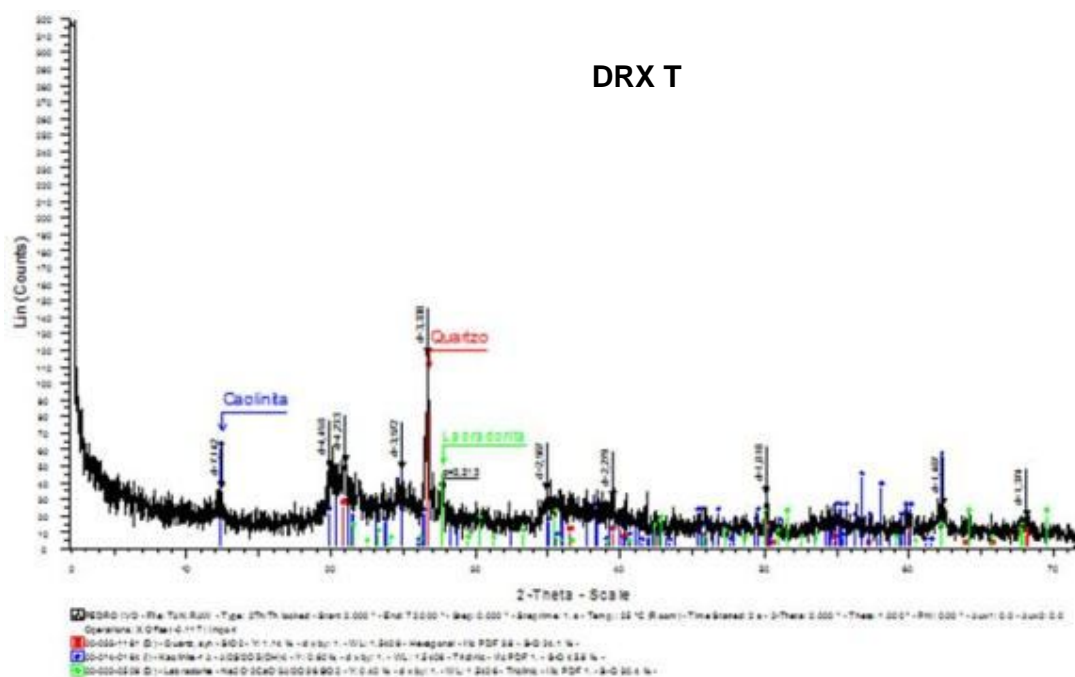


Figura 55- DRX da amostra de lodo obtido com coagulante a base de tanino

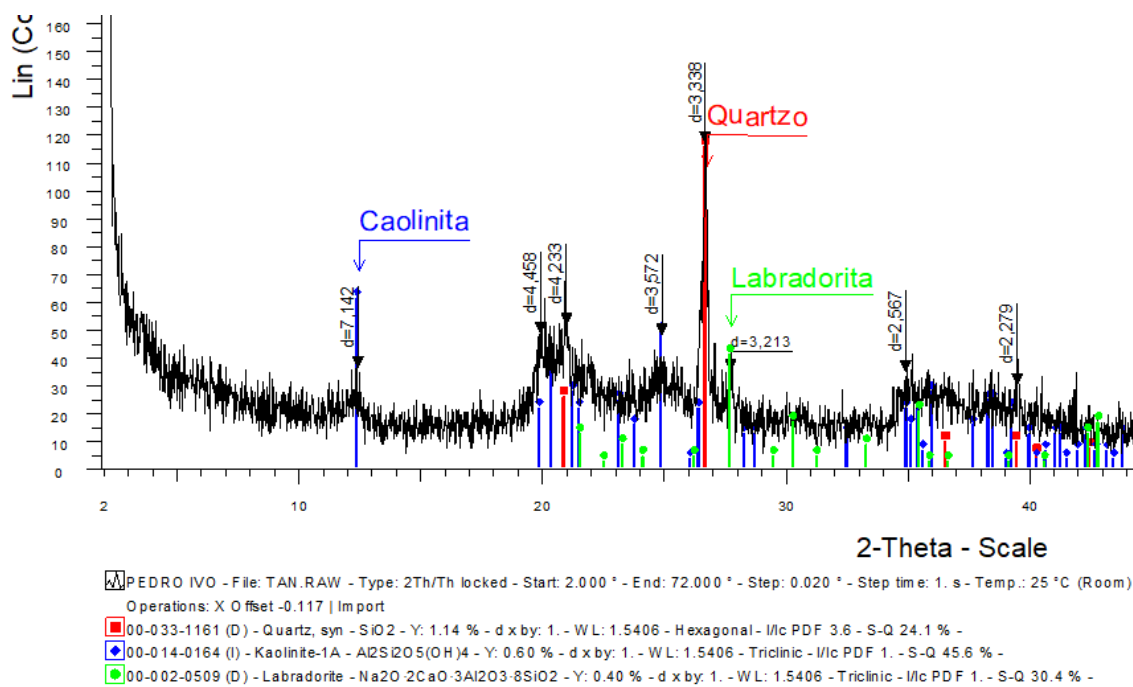


Figura 56- Detalhe do DRX da amostra de lodo obtido com coagulante Tanino

Comparando os difratogramas do lodo ao SA e ao PAC vê-se semelhança muito grande entre as amostras com relação a formação mineralógica (Figuras 51 a 56).

As percentagens dos compostos encontrados nos difratogramas estão reunidos na Tabela 7:

Tabela 7- Percentagem de compostos presentes em difratogramas

Composto	SA	PAC	TANINO
Quartzo (SiO ₂)	44,6%	53,2%	24,1%
Caulinita [Si ₂ Al ₂ O ₅ (OH) ₄]	47,4%	41,5%	45,6%
Hematita (Fe ₂ O ₃)	7,6%	5,3%	xx
Labradorita ([Ca,Na](Al,Si) ₄ O ₈)	xx	xx	30,4%
Hematita (Fe ₂ O ₃)	Traços	Traços	xx

Como se pode observar na Tabela 7, nos lodos metálicos foram encontrados traços de hematita (Fe₂O₃), enquanto que no lodo do tanino foi encontrado um percentual de 30% de labradorita ([Ca,Na](Al,Si)₄O₈).

Os minerais cristalinos presentes de forma marcante em ambas as amostras foram o quartzo (SiO₂) e a caulinita [Si₂Al₂O₅(OH)₄]. A presença de hematita pode ser justificada pelas impurezas contendo ferro que o sulfato de alumínio comumente utilizado pode conter.

A existência destes materiais no difratograma dos lodos é interessante para indústria cerâmica e cimenteira, já que fazem parte da formulação das porcelanas, porcelanatos, cerâmicas vermelhas e cimentos *Portland* (BERNARDES, 2005; HOPPEN *et. al.*, 2005; KYNCL, 2008; MEDEIROS *et. al.*, 2010; SUKSIRIPATTANAPONG *et. al.*, 2015; WOLFF *et. al.*, 2015).

O alumínio confere maior resistência, a caulinita maior plasticidade e a labradorita importante na vitrificação das porcelanas. Além destas características, a

diminuição da extração de argilas pela substituição de parte desta matéria-prima pelo lodo é importante para minimização dos impactos ambientais.

5.1.4 Análise Elementar CHNS

Para a análise elementar CHNS, o lodo ao tanino apresentou uma quantidade de Carbono de aproximadamente 14,54%, enquanto que o Sulfato de Alumínio apresentou aproximadamente 5,0% e o Polialumínio Cloreto 6,41%. Quanto ao Hidrogênio, o Tanino apresentou aproximadamente 2,44%, não muito diferente dos 2,31% para o PAC e 2,05% para o SA, este sim pouco menor.

Estes valores (Tabela 5) são muito importantes para a determinação da “potencialidade” de um material ser ou não gerador de energia. Quanto maior as porcentagens de carbono e hidrogênio, melhor será a sua capacidade de liberar energia (REIS, 2001; NOGUEIRA, 2003; RIEGEL *et. al.*, 2008; ROSILLO-CALLE *et. al.*, 2008

O nitrogênio acompanhou as proporções do carbono, apresentando 0,5% para o SA, 0,67% para o PAC e 1,37% para o Tanino. Este valor maior é justificado pelo Tanino apresentar em sua estrutura aminas (Figura 13) que agregam nitrogênio durante a reação de *Mannich*. Os teores de enxofre que variaram entre 0,22% e 0,25% foram considerados próximos para os três lodos.

Viletti *et. al.* (2012) analisou lodo ao Tanino produzido na ETA do Serviço Municipal de Águas e Esgoto de Novo Hamburgo (COMUSA), localizada na região metropolitana de Porto Alegre/RS, tendo como manancial o Rio dos Sinos considerado extremamente poluído. Os valores por eles obtidos foram de 15% para carbono, 2,90% para hidrogênio, 1,62% para nitrogênio e 0,25% para enxofre, próximos ao encontrado deste estudo.

Tabela 8- Resumo das características dos lodos gerados no tratamento de água com diferentes coagulantes primários

Propriedades	Sulfato de Alumínio	Polialumínio cloreto	Tanino
Análise elementar			
C (%)	5,00±0,71	6,41±0,32	14,54±0,65
H (%)	2,30±0,53	2,05±0,43	2,44±0,66
N (%)	0,50±0,22	0,62±0,22	1,37±0,35
S (%)	0,25±0,02	0,26±0,02	0,22±0,04
Perda ao fogo (%)	23,30±1,32	30,00±1,25	38,00±0,04
Poder Calorífico Inferior (kJ kg ⁻¹) (MJ.kg ⁻¹)	1.257,10±134,80 1,26±0,13	2.633,03±113,40 2,63±0,11	4.413,15±3,90 4,41±0,004
Poder Calorífico Superior (kJ.kg ⁻¹) (MJ.kg ⁻¹)	1.384,40±134,80 1,38±0,134	2.746,50±113,40 2,75±0,113	4.548,20±3,90 4,55±0,004

C-Carbono; H-Hidrogênio; N-Nitrogênio; S-Enxofre

5.1.5 Perda ao Fogo

O lodo ao Tanino foi que apresentou maior perda ao fogo (38%), ou seja, maior quantidade de matéria orgânica, indo de acordo com Mackenzie (2017) que afirma que o percentual de material orgânico presente em lodos de ETA varia entre 20 e 40%. Os demais apresentaram 23,3% para o SA e 30,0% para o PAC e estão apresentados na Tabela 8.

Valores de perda ao fogo encontrado por Viletti *et. al.* (2012) para o Tanino foi de 40,5%, um pouco acima do encontrado neste estudo.

5.1.6 Análise de Poder Calorífico Superior (PCS) e Inferior (PCI)

O Poder Calorífico Superior fornece resultados com a água presente na forma líquida enquanto que o Inferior a água encontra-se em estado gasoso. Os valores não devem ser relacionados diretamente à geração de energia porque ocorrem muitas

perdas durante o processo. Por isto, fórmulas adaptadas são utilizadas para esta determinação.

Da mesma forma que os resultados de CHNS e poder de queima, o lodo ao Tanino foi o que apresentou maior valor de PCS com $4,59\text{MJ.kg}^{-1}$, enquanto SA forneceu $1,38\text{MJ.kg}^{-1}$ e $2,75\text{MJ.kg}^{-1}$ para o PAC.

O conjunto de valores obtidos para poderes de queima, CHNS e PCS são primordiais para indicar a possibilidade de utilização de um material como fonte alternativa de energia.

Os poderes caloríficos determinados para os lodos estudados foram de $1,26\text{MJ.kg}^{-1}$ (PCI) e $1,38\text{MJ.kg}^{-1}$ (PCS) para o lodo ao SA; $2,63\text{MJ.kg}^{-1}$ (PCI) e $2,75\text{MJ.kg}^{-1}$ (PCS) para o lodo ao PAC e; $4,41\text{MJ.kg}^{-1}$ (PCI) e $4,55\text{MJ.kg}^{-1}$ (PCS), valores considerados baixos se comparados aos de madeira de descarte de $12,60\text{MJ.kg}^{-1}$ (PCI) e 13MJ.kg^{-1} (PCS) e para briquetes de bagaço de cana de $14,05\text{MJ.kg}^{-1}$ (PCI) e $14,5\text{MJ.kg}^{-1}$ (PCS) fornecidos por Lee e Santos (2011). Já Almeida (2007, *apud* BORGES, SELLIN, MEDEIROS, 2008) encontrou valores entre 12,5 e 15 MJ/kg de PCS para lodos secos de ETE.

Os valores do PCI são necessários para o cálculo da produção de energia e foram obtidos utilizando-se a equação 3.

5.2 QUANTIFICAÇÃO DA GERAÇÃO DE LODO E CÁLCULO DE PRODUÇÃO DE ENERGIA

5.2.1 Determinação da quantidade de lodo gerado e o potencial energético correspondente

Calculou-se o potencial energético com o lodo aplicando-se o coagulante polialumínio cloreto e o tanino modificado, ou seja, o coagulante atualmente utilizado na estação e um orgânico alternativo, neste caso o tanino modificado. A Tabela 9 apresenta dados relativos a quantidade de lodo gerado e o potencial energético da estação de tratamento de água. A ETA possui com vazão média de operação de 137 L.s⁻¹, podendo atingir a vazão máxima de 220 L.s⁻¹. Os valores obtidos na tabela 8 utilizaram a vazão (Q) de 140 L.s⁻¹ (média anual).

Tabela 9- Potencial energético mensal gerado com o lodo de ETA São Gabriel

Dados (valores médios)	Polialumínio cloreto	Tanino modificado
Q (m ³ .mês ⁻¹)	362.880,00	362.880,00
Ψ(g/m ³ .UNT)	0,96	0,70
LP (kg)	6.688,60	4.574,83
PCI (kJ.kg ⁻¹)	2.633,03	4.415,00
P (kW.mês ⁻¹)	4.592,90	6.672,13

Q= vazão; ψ = Relação entre Sólidos e PAC; LP= lodo produzido; PCI= Poder Calorífico Inferior; P= Potência gerada

Então, utilizando as equações de 4 a 7 obteve-se a quantidade de lodo mensal gerada para o PAC e para o Tanino, usando como base dado real de vazão da ETA São Gabriel. A massa de água é calculada pela percentagem de hidrogênio determinada pelo CHSN e a relação é para cada grama de hidrogênio presente são gerados 9 gramas de água. Neste caso para o PAC a porcentagem de hidrogênio foi de 2,05%, ou seja 184,5g de água, enquanto que para o Tanino foi de 2,44%,

correspondendo a 219,6g de água. O valor para PCI para PAC e Tanino está apresentado na Tabela 8.

Supondo que o gerador funcione 8 horas por dia e todos os dias do mês, será gerada a potência também apresentada na Tabela 8. O valor médio mensal de consumo de energia elétrica na ETA São Gabriel é de 142.784,50kW; então os valores apresentados na Tabela 6 representam 3,22% (PAC) e 4,67% (Tanino). São valores aparentemente baixos, mas é importante lembrar que o volume gerado de cinzas será bem menor que o volume gerado de lodo *in natura* e, que este deverá ser encaminhado um destino final adequado, envolvendo custos com transporte e armazenamento de aproximadamente US\$60,00 a tonelada, totalizando US\$4.815,79/ano de gastos com transporte para o PAC e US\$ 3.293,88 para o Tanino.

Na Tabela 10 encontram-se resumidamente os valores de lodos gerados, custos com transporte, valores economizados com a geração de energia no próprio local e a economia total anual. Os valores foram apresentados em dólares.

Tabela 10- Resumo de geração e economia utilizando Lodos de ETA como fonte alternativa

	Lodo gerado ao mês (kg)	Lodo gerado ao ano (kg)	Custos com transporte para Aterro US\$/ano	Economia com geração eletricidade* US\$/ano	Economia Total anual Transp + energia U\$/ano
PAC	6.688,60	80263,20	4815,79	4.774,65	9590,44
TANINO	4.574,83	54897,96	3293,88	7.321,50	10615,38

*tarifa R\$ 0,324/kWh

** US\$1.00 = R\$3,74

Em tempos de crise todo o valor economizado é bem vindo e o investimento é amortizada em poucos meses, com a aquisição do equipamento motor estacionário SGI-12 - Scania da empresa ER-BR (sugerido para cálculo).

5.3 CÁLCULO DE PRODUÇÃO DE ENERGIA POR COFIRING

Para o cálculo da produção de energia utilizando-se *cofiring* (lodo PAC + casca de arroz), foram realizadas novas análises de CHNS, Perda ao Fogo, Poder Calorífico Superior e Inferior, que foram reunidas na Tabela 10, devendo ressaltar que o lodo utilizado foi somente o lodo ao PAC, que é o atualmente gerado na ETA São Gabriel.

Iniciando pelos valores da composição mineralógica que também foi realizada para se saber da composição do material após a mistura de lodo e casca de arroz (Tabela 11).

Tabela 11- Resultado obtido de composição mineralógica das cinzas das misturas de lodos ao PAC e casca de arroz.

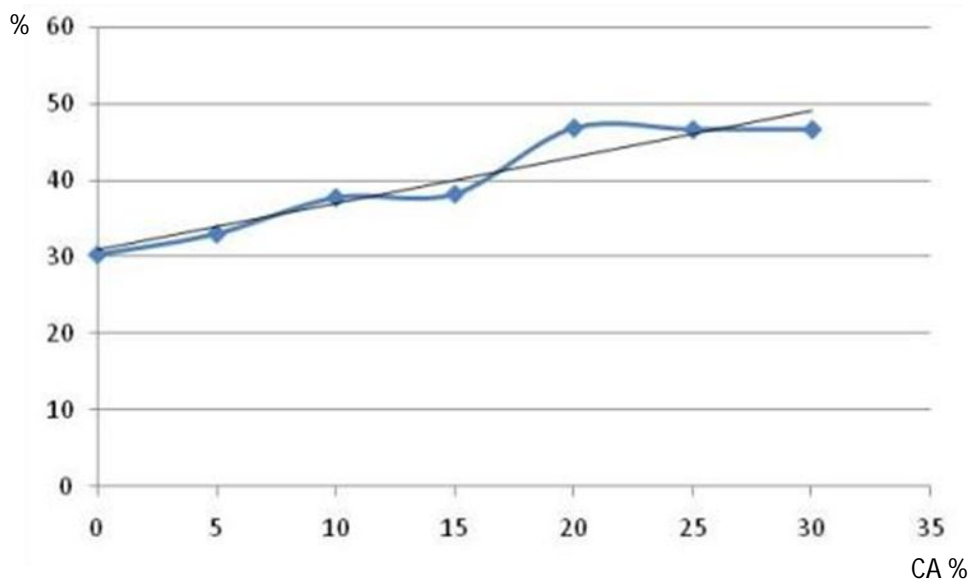
	0%	15%	25%	100%
SiO ₂	45,339	48,372	51,538	46,531
Al ₂ O ₃	44,408	43,647	39,946	40,935
Fe ₂ O ₂	5,110	5,179	5,713	5,279
P ₂ O ₅	2,103	0,246	0,335	3,015
K ₂ O	1,334	1,014	0,870	1,499
MgO	- x -	0,573	- x -	0,080
MnO	0,075	0,060	0,102	- x -
CaO	0,286	0,194	0,300	- x -
Cr ₂ O ₃	0,041	0,027	0,025	0,045
CuO	0,012	- x -	0,011	0,010
NbO	-x-	0,001	- x -	- x -
ZrO ₂	0,008	0,011	0,008	0,010
ZnO	0,008	0,007	0,006	0,008
SrO	0,002	0,002	0,003	0,003
Rb ₂ O	0,006	0,006	0,004	- x -
TiO ₂	0,639	0,660	0,538	- x -
Cl	0,615	0,573	0,588	- x -
Y ₂ O ₃	0,003	- x -	- x -	- x -
Ga ₂ O ₃	- x -	- x -	0,003	- x -

As análises de Perda ao Fogo com as misturas de casca de arroz foram detalhados na Tabela 12.

Tabela 12-Tabela somente de perda ao fogo das misturas de lodos ao PAC e casca de arroz

Propriedades	Perda ao Fogo (%)
100% Lodo ao PAC	30,41
95% PAC + 5% casca de arroz	33,12
90% PAC + 10% casca de arroz	37,81
85% PAC + 15% casca de arroz	38,28
80% PAC + 20% casca de arroz	46,86
75% PAC + 25% casca de arroz	46,66
70% PAC + 30% casca de arroz	46,67

Os valores de perda ao fogo aumentaram até a mescla de 20%; após os resultados permaneceram constantes como podem ser observadas na Figura 57.

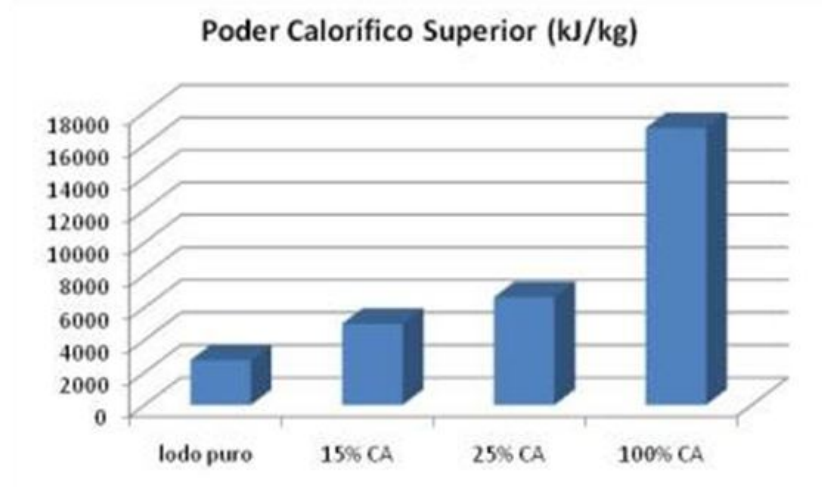
**Figura 57-** Valores obtidos de Perda ao Fogo para as misturas de lodo + CA (casca de arroz)

Já o Poder Calorífico Superior aumentou consideravelmente à medida que a porcentagem da mistura de casca de arroz era sendo feita, permanecendo em valores intermediários entre o lodo ao PAC e a casca de arroz propriamente dita, o que é interessante ao processo de potencialização de geração de energia do lodo ao PAC. Estes valores estão elencados na Tabela 13 e representados na Figura 58. Nesta tabela também são apresentados os valores obtidos para carbono e nitrogênio.

Tabela 13-Tabela resumo das características das misturas de lodos ao PAC e casca de arroz

Propriedades	100% LODO	15% CA	25% CA	100% CA
Análise elementar				
C (%)	45,63	9,55	12,60	38,23
H (%)				
N (%)	0,94	0,42	0,57	1,05
S (%)				
Perda ao fogo (%)	30,41	38,28	46,66	
PCI (kJ/kg)	2.633,03±113,40	4.530,12±56,04	6.012,24±72,90	15.466,04±58,04
PCS (kJ/kg)	2.746,50±113,40	4.989,02±56,04	6.621,29±72,90	17.032,75±58,04

C-Carbono; H-Hidrogênio; N-Nitrogênio; S-Enxofre Ca-Casca de Arroz

**Figura 58-** Valores obtidos de Poder Calorífico Superior (kJ/kg) após mistura de lodo desidratado e casca de arroz

Os valores para o Potencial Energético por *cofiring* foram calculados da mesma maneira que para os lodos sem mesclas, resultando na Tabela 14:

Tabela 14- Potencial energético mensal gerado com a mescla do lodo de ETA São Gabriel e casca de arroz

Dados (valores médios)	PAC	PAC + 15%CA	PAC + 25%CA
Q (m ³ .mês ⁻¹)	362.880,00	362.880,00	362.880,00
Ψ(g/m ³ .UNT)	0,96	0,96	0,96
LP (kg)	6.688,60	6.688,60	6.688,60
PCI (kJ.kg ⁻¹)	2.633,03	4.530,12	6.012,24
P (kW.mês ⁻¹)	4.592,90	9.030,96	11.985,61
Economia (%)	3,22	6,32	8,39

Q= vazão; Ψ= Relação entre Sólidos e PAC; LP= lodo produzido; PCI= Poder Calorífico Inferior; P= Potência gerada

Da mesma maneira que para os lodos puros, supondo que o gerador funcione 8 horas por dia e todos os dias do mês, será gerada a potência também apresentada na Tabela 14. O valor médio mensal de consumo de energia elétrica na ETA São Gabriel é de 142.784,50kW, representando uma economia direta de 6,32% para a mistura com 15% e 8,39% para a mistura de 25% na conta de luz, lembrando que este lodo não necessitará mais ser enviado e depositado em aterro especial, gerando uma economia de US\$ 4.815,79/ano somente com o transporte.

Repetindo os cálculos apresentados na Tabela 14 para geração de energia obteve-se a Tabela 15.

Tabela 15- Resumo de geração e economia utilizando Lodos de ETA como fonte alternativa

	Lodo gerado ao mês (kg)	Lodo gerado ao ano (kg)	Custos com transporte para Aterro US\$/ano	Economia com geração eletricidade* US\$/ano	Economia Total anual Transp + energia US\$/ano
PAC+0%CA	6.688,60	80263,20	4815,79	4.774,65	9590,44
PAC+15%CA	6.688,60	80263,20	4815,79	9902,25	13839,77
PAC+25%CA	6.688,60	80263,20	4815,79	13145,55	16795,41

*tarifa R\$ 0,324/kWh

** US\$1.00 = R\$3,74

Caso a empresa optasse por trocar de coagulante primário PAC pelo tanino, os valores em termos de economia seriam maiores, exemplificando o lodo sem casca de arroz da Tabela 10.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram comparados os coagulantes primários Sulfato de Alumínio (SA), o Polialumínio Cloreto (PAC) e o Tanino (T) utilizados no tratamento de água para abastecimento pública, levando-se em conta características física e químicas, bem como sua capacidade de que seus lodos possam ser aproveitados para geração de energia elétrica, chegou-se as seguintes conclusões:

1. Os lodos ao Sulfato de Alumínio (SA) e Polialimínio Cloreto (PAC) apresentam características físicas muito próximas, com grãos apresentando morfologia homogênea, resistentes, sendo o PAC mais maleável que o SA. O lodo ao Tanino (T) apresentou estrutura totalmente diferente, e grãos de morfologia heterogênea, em tons de marrom e de fácil maceração. Na Microscopia Eletrônica (MEV) as imagens de SA e PAC pareciam idênticas entre si, enquanto que no Tanino, apresentou estrutura em camadas, com pontos brilhantes de potássio.
2. As características químicas obtidas por análise de Difração de Raio X (DRX) mostraram que o SA apresentou maior quantidade caulinita (47,4%); Quartzo (53,2%) e caulinita (45,3%) para PAC, enquanto que ao Tanino foram encontrados 30,4% de labradonita, inexistente nas anteriores. Levando-se em consideração a análise elementar CHNS, o lodo ao tanino apresentou uma quantidade de Carbono 2,9 vezes maior que o SA e 2,3 maior que o PAC, enquanto que os valores encontrados para Hidrogênio não foram significativamente diferentes entre si. Quanto a Perda ao Fogo o Tanino também obteve valores acima dos obtidos com PAC e com SA,

concluindo-se que o lodo ao Tanino possui maior potencial de queima e utilização como fonte alternativa de que os lodos ao SA e ao PAC.

3. Com relação a quantidade de lodo gerada, o Tanino gerou menor quantidade de lodo que utilizando-se o SA, isto devido as propriedades físicas que o lodo apresenta. Em contrapartida o lodo ao Tanino apresentou melhor capacidade de queima e geração de energia, fornecendo valores finais de economia na ordem de US\$9.590,44 para o PAC e de US\$10.615,38, levando-se em consideração o desconto na conta de energia acrescido dos valores que não seriam mais necessários com toda a logística de transporte dos lodos.
4. A agregação de outro resíduos (*Cofiring*) como a casca de arroz abundante na região em estudo, melhorou o Poder Calorífico Superior (PCS), resultando em um aumento significativo na economia de energia com a queima do lodo, passando de US\$9.590,44 para US\$16.795,41 quando da adição de 25% de CA.

Toda e qualquer forma de baratear custos e diminuir a dependência do fornecimento estatal de energia é válida. Mesmo apresentando valores menores que os biocombustíveis tradicionais como a lenha, ressalta-se a importância de um destino final aos lodos das Estações de Tratamento de Água, que não o manancial mais próximo, colaborando com a qualidade do recurso hídrico, com a diminuição de materiais extraídos da natureza e podendo ser incorporado como carga em materiais pozolâmicos e cerâmicos, ressaltando a importância da remoção ou diminuição da utilização do metal alumínio considerado precursor do Mal de Alzheimer como

coagulante principal, com a substituição por coagulantes orgânicos como este a base de tanino.

Com este trabalho pode-se verificar que é viável a utilização de lodos de ETA inorgânicos e orgânicos como fonte alternativa de energia e sua geração pode ser utilizada dentro da própria estação, a fim de acelerar a desidratação do lodo, que melhora o rendimento do conjunto gerador, além de uma economia substancial para a empresa que optar por este processo.

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Norma Técnicas. **Determinação do Teor de Cinza**; NBR 8.289; Rio de Janeiro, RJ, 1983.

ABOULHASSAN, M.A.; SOUABI, S.; YAACOUBI, A.; BAUDU, M. Coagulation efficacy of a tannin coagulant agent compared to metal salts for paint manufacturing wastewater treatment, **Desalination and Water Treatment**. 2016.

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2015**. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2015.pdf>. Acesso em: 28 fev. 2016.

AGROSETA. **Plano de manejo florestal – resumo público**. (2015). Estância Velha, Brasil. Disponível em: http://www.setaonline.com/uploads/imagens/Resumo_Publico_do_Plano_de_Manejo_2015_2.pdf. Acesso em 12 jul. 2016.

AHMAD, T.; AHMAD, K.; ALAM, M. Sustainable management of water treatment sludge through 3'R' concept. **Journal of Cleaner Production**, 124, 1-13, 2016.

ALLOCHIO Fº, J. F.; FIOROT, R. G.; DELARMELENA, M.; LACERDA Jr, V; SANTOS, R. B.; GRECO, S. J. Reação de *Mannich*: Metodologia Clássica na Formação de Ligação Carbono-Carbono. **Orbital**, 5 (2), 96-142. 2013.

ALTMANN, D. **Avaliação do impacto ambiental causado pelo descarte de lodo da estação de tratamento de água de Novo Hamburgo**. 2002. 74 p. Trabalho de Conclusão (Monografia) - Universidade Luterana do Brasil. Programa de Pós Graduação em Gerenciamento Ambiental. 2002.

ASTM - American Society for Testing and Material. **Standard Test Method for Instrumental Determination of Carbon, Hydrogen and Nitrogen in laboratory samples of coal and coke**. ASTM D 5373-93, Philadelphia, United States, 1997.

ASTM - American Society for Testing and Material. **Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke by the Adiabatic Bomb Calorimetric**. ASTM 2015-91, Philadelphia, United States, 1991.

AZEVEDO NETTO (coord.) (1987) **Técnicas de abastecimento e tratamento de água**. São Paulo:CETESB, 1987. 320p.

BARRADAS, J. L.D. Tecnologia mais limpa: a vez dos floculantes orgânicos.

Aguaonline. 2006. Disponível em:

<<http://perfuradores.com.br/index.php?CAT=pocosagua&SPG=noticias&TEMA=Meio%20Ambiente&NID=0000003472>> Acesso em 24mai.2016

BATTESTIN, V.; MATSUDA, L. K.; MACEDO, G.A. Fontes e aplicações de taninos e tanases em alimentos. **Alimentos Nutr.** 15 (1), 63-72. 2004.

BELTRÁN-HEREDIA, J.; SÁNCHEZ-MARTÍN, J.; MARTÍN-SÁNCHEZ, L. Multiparameter Quantitative Optimization in the Synthesis of a Novel Coagulant Derived from Tannin Extracts for Water Treatment. **Water Air SoilPollution**, 223, 2277–2286, 2002.

BERNARDES, J. **Lodos de estações de tratamento de água pode ser usado na produção de cerâmica**. Agência USP de Notícias. São Paulo, 28 set. 2005. Disponível em: www.usp.br/agen/repgs/2005/imprs/214.htm. Acesso em: 4 maio 2006.

BLOOMBERG. Primeiro leilão de Energia Solar do Brasil realiza contratação a preço record. **Ambiente Energia**. Rio de janeiro, 14 nov. 2014. Disponível em: <<https://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2014/11/primeiro-leilao-de-energia-solar-brasil-reliza-contratacao-preco-recorde/24752>>. Acesso em: 13 Ago. 2017.

BORGES, F.; SELLIN, N.; MEDEIROS, S. H. W. Caracterização e avaliação de lodos de efluentes sanitário e Industrial como biomassa na geração de energia. **Ciência & Engenharia**, 17, (1,2), 27–32, 2008.

BRASIL. Decreto 7.217, de 21 de junho de 2010. Regulamenta a Lei no 11.445, de 5 de janeiro de 2007, que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 22 jun. 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/decreto/d7217.htm. Acesso em: 13 abr. 2016. 2010a.

BRASIL. Lei 11.445, de 05 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa**

do Brasil, Brasília, DF, 08 jan. 2007. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm. Acesso em 13 abr. 2016.

BRASIL. Lei 12.305, de 12 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 03 ago. 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 13 abr. 2016.(2010b)

BRATBY, J. **Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment**. 2.ed. London: IWA Publishing, 2006.

CAMACHO, F. P.; STROHER, A. P. BONGIOVANI, M. C.; NISHI, L.; BERGAMASCO, R. Avaliação do processo de coagulação/floculação utilizando coagulantes naturais na remoção de cianobactérias. **e-xacta**, 5 (2), 73-81. 2012.

CEEE. **Balanco energético do Rio Grande do Sul-2010**. Porto Alegre, 2010.

Disponível em:

<<http://www.ceee.com.br/pportal/ceee/archives/BERS2012/8%20Balanco%20EnEnergeti%20do%20Rio%20Grande%20do%20Sul%202010%20-%20ano%20base%202009.pdf>>. Acesso em: 23 abr. 2014.

CENTRO DE INTELIGÊNCIA EM FLORESTAS - Ciflorestas. **Acácia Negra**. 2016. Disponível em: http://www.ciflorestas.com.br/texto.php?p=acacia_negra. Acesso em: 14 mai. 2016.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO–CONAB. Acompanhamento da safra brasileira: grãos. Safra 2016/17-Sexto levantamento. V.4. Brasília, DF. 176p. 2017.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução 357 de 2005.

CONSTANTINO, V. R. L; ARAKI, K.; SILVA, D. O; OLIVEIRA, W. Preparação de compostos de alumínio a partir da bauxita: considerações sobre alguns aspectos envolvidos em um experimento didático. **Química Nova**, 25 (3), 490 – 498. 2002

CORNWELL, D. A. MUTTER, R. N. VANDERMEYDEN, C. **Commercial Application and Marketing of Water Plant Residuals**. American Water Works Association: Denver. 2000.

COUTO, L. C.; COUTO, L.; WATZLAWICK, L. F.; CÂMARA, D. Vias de Valorização Energética da Biomassa. **Biomassa & Energia**, 1 (1), 71-92. 2004.

CRUZ, J.G.H; MENEZES, J.C.S.S.; RÚBIO, J; SCHNEIDER, I. A. H. Aplicação de coagulante vegetal à base de Tanino no tratamento por coagulação/floculação e adsorção/coagulação/floculação do efluente de uma lavanderia industrial. In: **XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Campo Grande, Brasil. 2005.

CURI, M. B.; MORAES, B. S.; BENETTI, L. B.; AUGUSTI, E. S.; LOPES, A. C. AZEVEDO, V. B. Testes de Viabilização da Utilização de Coagulantes Orgânicos na Estação de águas do Município de São Gabriel/RS. In: **V Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, Bagé, Brasil. 2013.

DIARIOSM. **Termelétrica que usará casca do arroz para gerar energia começa testes em março**. Publicado em 28 jan. 2018. Disponível em: <<http://diariosm.com.br/regi%C3%A3o/termel%C3%A9trica-que-usar%C3%A1-casca-do-arroz-para-gerar-energia-come%C3%A7a-testes-em-mar%C3%A7o-1.2039593>>. Acesso em: 20 mai. 2018.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. B. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. 2. Ed.; São Carlos, SP:RIMA. 2005. 2V.

EFE. Anel aprova edital do primeiro Leilão de Energia Eólica. **G1**. São Paulo, 14 Dez. 2009. Disponível em: <<http://g1.globo.com/Noticias/Ciencia/0,,MUL1415078-5603,00-BRASIL+CONCLUI+PRIMEIRO+LEILAO+DE+ENERGIA+EOLICA.html>>. Acesso: 13 ago. 2017.

EMBRAPA FLORESTAS. **Sistemas de produção**. 2003. Disponível em: <https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/AcaciaNegra/CultivodaAcaciaNegra/02_especies_de_acacia_para_plantio.htm>. Acesso em 14 mai. 2016.

ERBR. 2018. ER-BR Recursos Energéticos. Site institucional. Disponível em: <<http://www.erbr.com.br>>. Acesso em: 14 mar 2018. 2018

ESTADÃO (2017). **BNDES aprova financiamento para usina térmica movida a casca de arroz: O financiamento será de R\$ 35,3 milhões; o empreendimento da Usina de São Sepé é orçado em R\$ 48,6 milhões.** Disponível em: <<http://economia.estadao.com.br/noticias/geral,bndes-aprova-financiamento-para-usina-termica-movida-a-casca-de-arroz,70001878050>> Acesso em: 23 ago. 2017.

FARIAS, L. F. F.; MORAES, E., J., C.; MENDES, P. R. A. Tratamento de efluentes oriundos da produção de queijos utilizando coagulantes naturais. In: **XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química**. Florianópolis, Brasil. 2014.

FERRANTI, E. M.. **Desidratação de lodos de estação de tratamento de água.** 2005. 116p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS), Porto Alegre, 2005.

FERREIRA, P. C.; PIAI, K. A.; TAKAYANAGUI, A. M. M.; SEGURA-MUÑOZ, S. I. 2008. Alumínio como fator de risco para doença de Alzheimer. **Latino-americana de Enfermagem, 16** (1). Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rlae/v16n1/pt_22.pdf>. Acesso em: 2 abr. 2016.

FREITAS, J. G. de; FERREIRA F^o, S. S.; PIVELI, R. P.. Viabilidade técnica e econômica da regeneração de coagulantes a partir de lodos de estação de tratamento de água. **Engenharia Ambiental e Sanitária**. V. 10 (2), p.137-145, 2005.

GALVÃO, J.; BERMANN, C. Crise hídrica e energia: conflito no uso múltiplo das águas. **Estudos Avançados**, 29 (84), 43-68. 2015.

GAVA, G. J. C.; PALMESAN; H.; REZENDE, J. H.; BAGNATO, V. S.; CHICRALA, K. J. S. Educando sobre as águas: Educação Ambiental em Recursos Hídricos. Movimento de Amparo Ecológico Mãe Natureza. 2016. Disponível em: http://www.maenatureza.org.br/projetoeducando/folders/poster7_brasil_aguas_esg/. Acesso em: 28 fev.2017.

GUERRA, R. C. **Caracterização e Biodegradação de lodo de Estações de Tratamento de Água para descarte em Aterro Sanitário**. 2005. 88p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, 2005.

GOLDEMBERG, J. (coord). **Energia e Desenvolvimento Sustentável**. Série Sustentabilidade, V.4. São Paulo: Blücher, 2010.

HAMEED, Y. T.; IDRIS, A; HUSSAIN, S. A.; ABDULLAH, N. A tannin-based agent for coagulation and flocculation of municipal wastewater: Chemical composition, performance assessment compared to Polyaluminum chloride, and application in a pilot plant. **Journal of Environmental Management**, 184, 494-503. 2016.

HAYNES, R. J.; ZHOU, Y. –F. Use of alum water treatment sludge to stabilize C and immobilize P and metals in composts. **Environmental Science and Pollution Research International**, 22 (18), 13903–13914. 2015.

HIGA, A. R.; MORA, A. L.; STEIN, P. P.; SIMON, A. A. (snd) **Resultados preliminares de vinte espécies do gênero Acacia no Rio Grande do Sul**. disponível em: <<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/303290>>. Acesso em: 13 abr. 2016.

HODGE, B. K. **Sistemas e aplicações de energia alternativa**. Rio de Janeiro:LTC, 2011.

HOPPEN, C.; PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A.; BARON, O.; FRANCK, R.; SALES, A.; ANDREOLI, C. V.; PAULON, V. A. Co-disposição de lodo centrifugado de Estação de Tratamento de Água (ETA) em matriz de concreto: método alternativo de preservação ambiental. **Cerâmica**, 51, 85–95, 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE (2016). **Síntese de Indicadores Sociais Uma Análise das Condições de Vida da População Brasileira 2015**. Disponível em: <<http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv95011.pdf>> Acesso em 13 abr. 2016.

INSTITUTO RIO-GRANDENSE DE ARROZ–IRGA - safra 2016/17. Disponível em: <www.irga.rs.gov.br/conteudo/6911/safras>. Acesso em: 23 abr. 2017.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Ranking do Saneamento 2018**. Disponível em: <<http://www.tratabrasil.org.br/images/estudos/itb/ranking-2018/realatorio-completo.pdf>>. Acesso em .17 mai. 2018.

JORGE, F. C.; BRITO, P.; PEPINO, L.; PORTUGAL, A.; GIL, H.; COSTA, R. P. Aplicações para as Cascas de Árvores e para os Extractos Taninosos: Uma Revisão. **Silva Lusitana**, 9 (2), 225–236. 2001.

KIZINIEVIČ, O.; ŽURAIŠKIENĖ, V.; KIZINIEVIČ, V.; YAKOVLEV, G.; BUR'YANOV, A. Use of sludge from drinking water purification in the production of effective ceramic articles. **Glass and Ceramics**, 73, 58-61, 2016.

KLUMB, A. K.; FARIAS, O. L. V. Produção de coagulante vegetal catiônico a partir de cascas de Eucalipto (*Eucalyptus tereticornis*). **Vetor**, 22 (1), 71-80, 2002.

KYNCL, M. Opportunities for water treatment sludge reuse. **GeoScience Engineering**. 54 (1), 11 – 22, 2008.

LAMB, L. H., DECUSATI, O. G. **Manufacturing process for Quaternary Ammonium Tannate, a vegetable coagulating/flocculating agent**. 2002. US6478986B1, 18 ago. 2000, 12 nov. 2002. United States of America

LEE, E. S. H.; SANTOS, F. Caracterização do lodo proveniente de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) e estudo sobre seu potencial energético. **In: II Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**. Londrina, 2011. Disponível em: <<http://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2011/X-001.pdf>>. Acesso em 20 de abril de 2014.

LIS, L. Conta de luz acumula alta média de 31,5% entre 2014 e 2017, diz estudo. **G1**, São Paulo, 10 mar. 2018. Disponível em: <<https://g1.globo.com/economia/noticia/conta-de-luz-acumula-alta-media-de-315-entre-2014-e-2017-diz-estudo.ghtml>>. Acesso em: 06 ago. 2018.

LUCYK, N.; HERMES, E.; SILVA, R. P.; PUJARRA, S.; SIMIONI, R. J.; ZENATTI, D. C. Uso de coagulantes naturais no tratamento de coagulação/floculação de efluente proveniente de abatedouro de aves. **Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, 4, 576-587. 2015.

MACKENZIE, L. D. **Tratamento de águas para abastecimento e residuárias: princípios e práticas**. Tradução: Sabine A. Holler. Rio de Janeiro:Elsevier: 2017.

MANGRICH, A. S.; DOUMER, M.E.; MALMANN, A.S.; WOLF, C. R. Química Verde no Tratamento de Águas: Uso de coagulante derivado de Tanino de *Acacia mearnsii*. **Revista Virtual Química**, 6 (1), 2-15, 2014.

MARTINS, A. A.; OLIVEIRA, R. M. S.; GUARDA, E. A. Potencial de uso de compostos orgânicos como coagulantes, floculantes e adsorventes no tratamento de água e efluentes. **X Fórum Ambiental da Alta Paulista**, 10 (12), 168-183, 2014.

MARTINS, H. C. **Estudo Sobre os Processos de Coagulação, Floculação e Decantação em Efluentes Oriundos de Usina Canavieira**. 2014. Trabalho de Conclusão (Graduação). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curso de Engenharia Ambiental, Londrina, 2014.

MEURER, E. J. **Fundamentos de Química do Solo**. Departamento de Solos - Agronomia UFRGS. Porto Alegre, 2000. 174 p.

MAYER, F. D; HOFFMANN, R.; RUPPENTHAL, J. E. Gestão Energética, Econômica e Ambiental do Resíduo Casca de Arroz em Pequenas e Médias Agroindústrias de Arroz. In: **XIII SIMPEP**. Bauru. 2006.

MEDEIROS, E. N. M.; SPOSTO, R. M.; NEVES, G. A.; MENEZES, R. R. Incorporação de cinza de lenha, lodo de estação de tratamento de água e cinza de casca de arroz em massa cerâmica. Utilização da técnica de planejamento. **Cerâmica**, 56, 399-404, 2010.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. Portaria da Consolidação 05, de 28 de setembro 2017. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema único de Saúde. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 03 out.

2017. Disponível em: <http://www.normasbrasil.com.br/norma/portaria-de-consolidacao-5-2017_356387.html>. Acesso em: 12 jun. 2018.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MME) 2017. **Balço Energético Nacional – ano base 2016**. Disponível em:

<<http://www.mme.gov.br/documents/10584/1143895/2.1+-+BEN+2017+-+Documento+Completo+em+Portugu%C3%AAs+-+Ingl%C3%AAs+%28PDF%29/22602d8c-a366-4d16-a15f-f29933e816ff?version=1.2>>. Acesso em: 20 out. 2017.

MONTEIRO, W. R.; GOMES, M. A. L.; SCHNEIDER, I. A. H.; MORAES, B. S. Utilização de lodos desidratados de estações de tratamento de água como fonte de energia alternativa. **In: VI Simpósio de Energia e Meio Ambiente**. Bagé, RS. 23 e 24/07. 2014.

MORAES, B. S.; BARRADAS, J. L. D.; BIRCK, L. R. Avaliação do uso de coagulante primário orgânico no tratamento de água para abastecimento público – estudo de caso. **XXXV ASSEMAE**, Caxias do Sul, Brasil. 2004a

MORAES, B. S.; SAIDELLES, A. P. F.; COPETTI, A. C. C.; GOMES, M. A. L.; Silveira, P. E. S. A influencia da qualidade da água bruta captada no custo com coagulante convencional e alternativo para tratamento de água para abastecimento publico. **III Fórum Internacional Ecoinnovar**, Santa Maria, Brasil. 2014b.

MORAES, B. S.; SCHNEIDER, I. A. H.; RIBEIRO, W. M.; GOMES, M. A. L. Utilização de lodo de ETA como fonte alternativa de energia. **VI Simpósio de Energia e Meio Ambiente**, Bagé, Brasil. 2014c.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. **Dendroenergias: Fundamentos e Aplicações**. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

Portal Biomassa BR – Energias Renováveis. **Teor da umidade na biomassa**.

Disponível em: <<http://www.biomassabr.com/bio/resultadonoticias.asp?id=2039>>

Publicado em 2013. Acesso: 23 de abril de 2014.

Portal das Energias Renováveis. Conversão: biomassa sólida, publicado em 22 de abril de 2014. Disponível em :

http://www.energiasrenovaveis.com/DetalheConceitos.asp?ID_conteudo=2&ID_area=2&ID_sub_area=2. Acesso em: 23 de abril de 2014.

RÄDER, A. S. Uso de coagulante orgânico à base de Tanino no tratamento de água para consumo humano – um estudo de caso. In: **XXV Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Recife, Brasil. 2009.

RESTREPO VICTORIA, A. H. Metodologia de análise e avaliação exergoambiental de plantas termoelétricas operando em combustão combinada carvão – biomassa. 2012. 177p. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

REALI, M. **Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água**. Rio de Janeiro:ABES, 1999.

REIS, L. B. **Matrizes energéticas: conceitos e usos em gestão e planejamento**. (Série Sustentabilidade). Barueri:Manole, 2001.

REVISTADIGITAL. 2012. **São Borja inaugura usina que utiliza casca de arroz como combustível**. Disponível em: <<http://www.revistadigital.com.br/2012/05/sao-borja-inaugura-usina-com-casca-de-arroz-como-combustivel/>>. Acesso em: 02 jun. 2017.

RIBEIRO, E. M.; CURE, M. B.; AUGUSTI, E. S.; AZEVEDO, V. B.; MEDINA, N. MORAES, B. S.; BENETTI, L. B. Alternativas de Destinação do Lodo Orgânicos Gerado em Estações de Tratamento de Água. In: **V Simpósio de Energia e Meio Ambiente**, Bagé, Brasil. 2014.

RICHTER, C. **Tratamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água**. São Paulo: Edgard Blücher, 2001.

RIEGEL, I; MOURA, A. B. D.; MORISSO, F. D. P.; MELLO, F. S. Análise termogravimétrica da pirólise da Acácia-Negra (*Acaciamearnsii* de Wild) cultivada no Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Árvore**, 32 (3), 533-543. 2008.

ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H. **Uso da biomassa para produção de energia na indústria brasileira**. Campinas:UNICAMP, 2008.

SERVIÇO AUTÔNOMO DE SANEAMENTO DE PELOTAS – SANEP. Site institucional. Disponível em: <<http://server.pelotas.com.br/sanep/tratamento/>>. Acesso em: 06 ago. 2018.

SÃO GABRIEL SANEAMENTO S/A – SGS. Site institucional 2018. Disponível em: <www2.sgssa.com.br/>. Acesso em: 17 mar. 2017.

SARTORI, H. 2016. **O Saneamento Básico no Brasil**. Disponível em: <https://www.saneamentobasico.com.br/portal/index.php/destaque_do_dia/o-saneamento-basico-no-brasil-por-hiram-sartori/>. Acesso em: 17 mar. 2017.

SCHNEIDER, I. A. H.; DANDOLINI, I. **Reciclagem do Lodo de Estações de Tratamento de Água: Reaproveitamento como Coagulante e Produção de Alumina**. Relatório Técnico CORSAN, 2011.

SECRETARIA DE PLANEJAMENTO, GOVERNANÇA E GESTÃO (SPGG) 2017. **Geração e Transmissão de Energia Elétrica**. Disponível em: <http://www.atlassocioeconomico.rs.gov.br/geracao-e-transmissao-de-energia>>. Acesso em: 27 mai. 2018.

SELLIG, M. F.; SCHNEIDER, P. S.; SAFFER, M. Coqueima de Carvão e resíduos Sólidos Urbanos: será o lixo o futuro do carvão? 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/265882843_COQUEIMA_DE_CARVAO_E_RESIDUOS_SOLIDOS_URBANOS_SERA_O_LIXO_O_FUTURO_DO_CARVAO. Acesso em 06 out. 2017.

SERVIÇO DE ÁGUA E ESGOTOS DE NOVO HAMBURGO - COMUSA Site Institucional. (2016). Disponível em: <www.comusa.com.br>. Acesso em: 14 mai. 2016.

SETA. Site Institucional. 2016. Disponível em: <<http://www.setaonline.com.br>>. Acesso em 20 abr. 2016.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). **Diagnóstico do Serviços de Água e Esgoto – 2015**. (2016) Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/component/content/article?id=140>>. Acesso em: 17 mar. 2017.

SKORONSKI, E.;NIERO, B.; FERNANDES, M.; ALVES, M. V.; TREVISAN, V. Estudo da aplicação de tanino no tratamento de água para abastecimento captada no rio Tubarão, na cidade de Tubarão, SC. **Revista Ambiente e Água**.9 (4), 679-687. 2014.

SNATURAL. Site institucional. 2016. Disponível em: <<http://www.snatural.com.br>>. Acesso em: 22/02/16.

SOUZA, R. P.; GIRARDI, F.; SANTANA, V. S.; FERNANDES-MACHADO, N. R. C.; GIMENES, M. L. Vinasse treatment using a vegetable-tannin coagulant anphotocatalysis. **Acta Scientiarum technology**. **35** (1), 89-95. 2013.

STRÖHER, A. P., MENEZES, M. L., PEREIRA, N. C., BERGAMASCO, R. Utilização de coagulantes naturais no tratamento de efluente proveniente de lavagem de jeans. **Engevista**, 15 (3), 255-260. 2013.

SUKSIRIPATTANAPONG, C.; HORPIBULSUK, S.; CHANPRASERT, P.; SUKMAK, P.; ARULRAJAH, A. Compressive strength development in fly ash geopolymers masonry units manufactured from water treatment sludge. **Construction and Building Materials**, 82, 20–30, 2015.

SYED, S. Silver recovery aqueous techniques from diverse sources: Hydrometallurgy in recycling. **Waste Management**, 50, 234 -256. 2016.

TAKUR, S. S., CHOUBEY, S. Use of Tannin based natural coagulants for water treatment: an alternative to inorganic chemicals. **International Journal of Chem Tech Research**, 6 (7), 3628-3634. 2014.

TANAC. Site Institucional. 2016. Disponível em: <<http://www.tanac.com.br/>>. Acesso em: 20 abri. 2016.

TEIXEIRA, S. R.; SOUZA, S. A.; SOUZA, N. R.; ALÉSSIO, P.; SANTOS, G. T. A. Efeito da adição de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades de material cerâmico estrutural. **Revista cerâmica**, 52, 215–220, 2006.

TORRES FILHO, E. T.. O Gasoduto Brasil-Bolívia: impactos econômicos e desafios de mercado. **Revista do BNDES**, 9 (17) , 99-116, 2002.

TSUTIYA, M. T.; HIRATA, A. Y. Aproveitamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água do Estado de São Paulo. In: **21 Congresso Brasileiro de Engenharia Ambiental e Sanitária**. Salvador, 2001.

TOMASQUIM, M. As Origens da Crise Energética Brasileira. **Ambiente & Sociedade**, 3 (6), 179-183, 2000.

VANÂCOR, R. N. **Avaliação do coagulante orgânico *Veta Organic* utilizado em uma estação de tratamento de água para abastecimento público**. 2005. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, 2005.

VAZ, L. G. L., KLEN, M. R. F., VEIT, M. T., SILVA, E. A., BARBIERO, T. A., BERGAMASCO, R. Avaliação da eficiência de diferentes agentes coagulantes na remoção de cor e turbidez em efluente de galvanoplastia. **Eclética Química**, 35 (4), 45-54. 2010.

VISSMANN Jr, W.; HAMMER, M. J. **Water supply and pollution control**. 6. ed. Addison Wesley Longman:California. 1998.

VILLETTI, P. I. C.; DANDOLINI, I.; MORAES, B. S.; SCHNEIDER, I. A. H. Caracterização dos lodos gerados em estações de tratamento de água: estudo comparativo entre os coagulantes sulfato de alumínio e tanino. **VIII Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental**. Porto Alegre. 2012.

WOLFF, E.; SCHWABE, W. K.; CONCEIÇÃO, S. V. Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics. **Journal of Cleaner Production**, 96, 282-289, 2015.

ZHCLICRBS (2015) Produto desenvolvido no RS acelera limpeza da água do Rio Doce. Reportagem em 17/11/2015. Disponível em:
<<http://zh.clicrbs.com.br/rs/noticias/noticia/2015/11/produto-desenvolvido-no-rs-acelera-limpeza-da-agua-do-rio-doce-4905728.html>> Acesso em: 10 abr. 2016.