

UNIVERSIDADE DA REGIÃO DE JOINVILLE - UNIVILLE
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS

SERGIO ODILON FISCHER

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE USO DE LODO TÊXTIL COMO BIOMASSA
COMBUSTÍVEL PARA GERAÇÃO DE ENERGIA

JOINVILLE - SC
2015

SERGIO ODILON FISCHER

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE USO DE LODO TÊXTIL COMO BIOMASSA
COMBUSTÍVEL PARA GERAÇÃO DE ENERGIA**

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos, na Universidade da Região de Joinville.

Orientadora: Dra. Sandra Helena Westrupp Medeiros
Co-orientadora: Dra. Therezinha Maria Novais de Oliveira

JOINVILLE - SC

2015

Catálogo na publicação pela Biblioteca Universitária da Univille

F529a Fischer, Sergio Odilon
Avaliação do potencial de uso de lodo têxtil como biomassa combustível para geração de energia/ Sergio Odilon Fischer; orientadora Dra. Sandra Helena Westrupp Medeiros, co-orientadora Dra. Therezinha Maria Novais de Oliveira – Joinville: UNIVILLE, 2015.

68 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia dos Processos – Universidade da Região de Joinville)

1. Resíduos industriais - Reaproveitamento. 2. Biomassa – Combustível. 3. Lodo têxtil. I. Medeiros, Sandra Helena Westrupp (orient.). II. Oliveira, Therezinha Maria Novais de (co-orient.). III. Título.

CDD 628.4

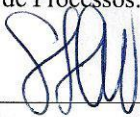
Termo de Aprovação

“Avaliação do potencial de uso de lodo têxtil como biomassa combustível para geração de energia”

por

Sergio Odilon Fischer

Dissertação julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos, área de concentração Engenharia de Processos e Tecnologias Limpas e aprovada em sua forma final pelo Programa de Mestrado em Engenharia de Processos.



Prof. Dra. Sandra Helena Westrupp Medeiros
Orientadora (UNIVILLE)



Prof. Dra. Therezinha Maria Novais de Oliveira
Coorientadora (UNIVILLE)



Prof. Dra. Ana Paula Testa Pezzin
Coordenadora do Programa de Mestrado em Engenharia de Processos (UNIVILLE)


Banca Examinadora:



Prof. Dra. Sandra Helena Westrupp Medeiros
Orientadora (UNIVILLE)



Prof. Dra. Therezinha Maria Novais de Oliveira
Coorientadora (UNIVILLE)



Prof. Dr. Sivaldo Leite Correia
(UDESC)



Prof. Dra. Noeli Sellin
(UNIVILLE)

Joinville, 30 de março de 2015.

Dedico este trabalho à minha esposa Elaine
e ao meu filho Gustavo.

AGRADECIMENTOS

À DEUS, por tudo que nos é proporcionado na vida.

À minha esposa Elaine Cristine Scheunemann Fischer, pelo amor, apoio e carinho. Ao meu filho Gustavo Scheunemann Fischer pelos momentos de alegria e descontração.

Aos meus avós e pais Affonso Fischer e Tusnelda Fischer (*in memoriam*) responsáveis pela minha criação e educação.

À professora orientadora Dra. Sandra Helena Westrupp Medeiros, pela orientação, sempre com paciência e compreensão, não medindo esforços na condução de forma eficaz para a realização deste trabalho.

À professora co-orientadora Dra. Therezinha Maria Novais de Oliveira pelo suporte ao longo do Mestrado, pela orientação nos momentos difíceis, que proporcionou subsídios para seguir em frente e chegar até aqui.

Ao Sr. José Mário Gomes Ribeiro, Gerson Dressel, Erolde Krueger, Luciano Wiggers, Sr. Ângelo da Cruz, pelo conhecimento, disponibilidade e colaboração para execução deste trabalho.

À UNIVILLE - Universidade da Região de Joinville, aos professores Dra Ana Paula Testa Pezzin, Dr. Ozair Souza, Dra Noeli Sellin e demais professores do programa de Mestrado em Engenharia de Processos, a Carolina Pinheiro Barbosa pela disponibilidade e suporte na secretaria.

Aos colegas da turma VII do Mestrado em Engenharia de Processos, que proporcionaram momentos inesquecíveis durante as aulas e trabalhos, em especial ao Ítalo Salomão Ribas pelo companheirismo e amizade.

Enfim, a todos que colaboraram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho!

RESUMO

A indústria têxtil produz alta quantidade de resíduos (lodo) gerados no tratamento dos efluentes oriundos das etapas do processo de fabricação. Estes resíduos possuem composição variável, formada, basicamente, por água, óxidos minerais e matéria orgânica, sendo descartados em aterro industrial. Neste contexto, o presente trabalho teve por objetivo avaliar o potencial de um lodo têxtil ser usado como biomassa combustível para geração de energia em caldeira. Para isso, foram realizadas análises físicas e químicas tanto deste resíduo como das biomassas utilizadas na empresa geradora desse lodo, cavaco e serragem de madeira, para fins de comparação. Desta forma, essas “três” biomassas foram caracterizadas física e quimicamente (análise aproximada e elementar), bem como seus comportamento térmico e poder calorífico. A análise química aproximada foi realizada no Laboratório de Química Inorgânica da Univille, enquanto a elementar pela Central de Química Analítica da USP. Os valores do poder calorífico das biomassas e do lodo, bem como a composição química deste, foram disponibilizados pela empresa. O comportamento térmico foi estudado por análise termogravimétrica (TGA e DTG), realizada pelo Laboratório de Materiais da Univille. Também foram medidas as emissões gasosas provenientes da operação do analisador de TGA e empregando-se o analisador de gases de combustão OPTIMA 7 (da Confor). Os resultados obtidos mostraram, tanto pela análise química aproximada quanto a elementar, que o lodo têxtil apresentou menor teor de sólidos voláteis, de carbono (C) e hidrogênio (H) e maior de umidade e cinzas em relação às outras duas biomassas. Quanto aos resultados do TGA e DTG, o lodo apresentou menor perda de massa (55,5%) em relação ao cavaco (~100%) e à serragem (92,7%), fato evidenciado pelo maior teor de cinzas e menor teor de sólidos voláteis do primeiro. Contudo, quanto ao poder calorífico, o inferior (PCI) foi de 2.100 kcal/kg e o superior (PCS) foi de 2.275 kcal/kg para o lodo, valores equivalentes aos das biomassas usadas atualmente na empresa, conforme laudos técnicos de laboratório terceirizado e disponibilizados por essa. Uma análise econômica simplificada demonstrou que os custos com o descarte do lodo é de, aproximadamente, três vezes superior aos de aquisição das biomassas, apontando para redução de custos tanto do descarte do lodo como aquisição das biomassas atuais. E em relação às emissões atmosféricas, os valores da concentração dos gases medidos não apresentaram diferença significativa entre os três compostos em questão. Portanto, considerando todos os resultados acima apresentados, pode-se dizer que há potencial de uso do lodo como biomassa, porém, sugere-se a realização de um monitoramento quanto à variação anual da composição química do lodo em função da produção e de alterações do sistema de tratamento de efluentes, o que pode alterar mais significativamente os dados aqui discutidos, bem como um estudo quanto à utilização de uma mistura de biomassa entre as três estudadas neste trabalho.

Palavras-chave: biomassa combustível, lodo têxtil, reutilização de resíduos.

ABSTRACT

The textile industry produces high quantity of waste (sludge) generated in the treatment of effluents derived of stages from the manufacturing process. These residues possess variable composition, consisting mainly of water, mineral oxides and organic material, which are disposed in industrial landfills. In this context, this paper has the purpose of estimate the potential of the textile sludge to be used as biomass fuel to provide energy on boiler. In this way, were realized physical and chemical analysis for this residue and for the biomass used on the generating company of this sludge, wood chips and sawdust to comparison. This way this "three" biomass were characterized physical and chemical (aproximate and elementary analysis) as well as their thermal behavior and calorific power. The approach chemical analysis, was done at the Inorganic Chemistry Laboratory of UNIVILLE, and the elementary for the Central of Analytics Chemistry of USP. The calorific rate of the sludge and biomass and chemical composition, was giving by the company. The study of thermal behavior by thermogravimetry (TGA) and (DTG), realized by the Material Laboratory of UNIVILLE. It was measure gas emissions provide by the operation analyzer of TGA and using the gas analyzer combustion OPTIMA 7 (of confor). The results shows, both by chemical analysis as approximate elemental, that the textile sludge presents lower content of volatile solids, of carbon (C) and hidrogen (H) and higher moisture and ash in relation the other two biomass. On the results of TGA and DTG, the sludge showed less weight loss (55,5%), in comparison of wood chips (~100%) and the sawdust (92,7%) fact evidenced by the biggest ash and smaller volatile solids content of the first. However, as the calorific power, the lower (PCI) was 2.100 kcal/kg and the higher (PCS) was 2.275 kcal/kg for the sludge, equivalent values to the biomass currently used actually in the company, according to technical reports outsourced laboratory and available for this. An economic analysis simplified demonstrated that costs with disposal of the sludge, approximatly, three times higher than the acquisiton of biomass, pointing to reduction of costs both disposal of the sludge as the acquisition from the current biomass. And in relation atmospheric emissions, the values of concentration of the measured gases they showed no significant difference among the three compounds in question. Therefore, considering all of results listed above, can say that there is potential for use of the textile sludge as biomass, however, it suggests the realization a monitoring as the early variation of chemistry composition of the sludge as a function of production and changes the processing system effluents, this may change more significantly the data discussed here and a measure as the user a mixture of biomass among the three studied in this work.

Keywords: biomass fuel, textile sludge, waste reuse.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Cadeia têxtil.	20
Figura 2 - Fluxograma dos efluentes do processamento de tecidos sintéticos e de algodão	21
Figura 3 - Lodo têxtil.....	22
Figura 4 - Processos de conversão de biomassa em energia.....	27
Figura 5 - Cavaco de madeira (a), serragem de madeira (b) e lodo têxtil (c).	32
Figura 6 - Especificação das análises realizadas com as biomassas.	33
Figura 7 - Fluxo do processo industrial têxtil	34
Figura 8 - Fluxograma da ETE da indústria têxtil	35
Figura 9 - Primeira trincheira ocupada parcialmente (a) e impermeabilização da segunda trincheira (b).	36
Figura 10 - Termoanalisador TA Instrument, modelo Q50	40
Figura 11 - Analisador portátil de gases.....	42
Figura 12 - Sistema utilizado na coleta dos gases gerados durante a queima das biomassas.....	42
Figura 13 - Curvas TG e DTG obtidas por análise termogravimétrica para o cavaco de madeira.	48
Figura 14 - Curvas TG e DTG obtidas por análise termogravimétrica para a serragem de madeira.	49
Figura 15 - Curvas TG e DTG obtidas por análise termogravimétrica para o lodo têxtil.....	50
Figura 16 - Emissões de CO geradas durante as queimas das biomassas.	56
Figura 17 - Emissões de NO geradas durante as queimas das biomassas.	57
Figura 18 - Emissões de NOx geradas durante as queimas das biomassas.	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Reações básicas de combustão.	24
Tabela 2 - Metodologias de análise da fração orgânica (MB - massa bruta) e da matéria orgânica (S - solubilizado; L - lixiviado) presentes no lodo têxtil em estudo. *Ensaio acreditado pela ISO/IEC 17025.	43
Tabela 3 - Análise do poder calorífico.	44
Tabela 4 - Análise comparativa entre os resultados das biomassas analisadas.	45
Tabela 5 - Resultados comparativos da análise elementar entre as biomassas deste estudo e outras da literatura*.	46
Tabela 6 - Resultados das análises termogravimétricas das biomassas estudadas.	51
Tabela 7 - Composição química de lodos têxteis. (MB) massa bruta, em mg/kg; (L) lixiviado, em mg/L; (S) solubilizado, em mg/L.	53
Tabela 8 - Resultados da análise do poder calorífico para o lodo têxtil atual e o lodo têxtil de outros estudos.	54
Tabela 9 - Resultados da análise do poder calorífico para o cavaco de madeira e a serragem de madeira. *Base úmida: 50 %,	54
Tabela 10 - Resultados comparativos entre o poder calorífico inferior de algumas biomassas comuns empregadas como combustíveis e o lodo têxtil deste estudo.	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas;

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica;

APHA - *American Public Health Association*;

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente;

COV - Compostos Orgânicos Voláteis;

ETE - Estação de Tratamento de Efluentes;

FIESC - Federação das Indústrias do Estado de Santa Catarina;

HC - Hidrocarbonetos;

HPAs - Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos;

IEA - *International Energy Agency*;

IEMI - Instituto de Estudos e Marketing Industrial;

IPCC - *Intergovernmental Panel of Climate Change*;

MMA - Ministério do Meio Ambiente;

MP - Material Particulado;

MS - Ministério da Saúde;

PCI - Poder Calorífico Inferior;

PCS - Poder Calorífico Superior;

SINDITÊXTIL - Sindicato das Indústrias Têxteis do Estado de São Paulo;

SO₂ – Dióxido de Enxofre;

UNIVILLE - Universidade da Região de Joinville.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	6
RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	11
SUMÁRIO	12
INTRODUÇÃO	14
1 OBJETIVOS	17
1.1 Objetivo geral	17
1.2 Objetivos específicos	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 O setor têxtil e a problemática ambiental	18
2.2 O processo produtivo e os resíduos do setor têxtil	19
2.2.1 Processo têxtil	19
2.2.2 Lodo de ETE do setor têxtil	22
2.3 Processo de combustão.....	23
2.4 Biomassa e seu uso como combustível.....	25
2.5 O impacto ambiental dos processos de combustão industrial	29
3 METODOLOGIA	32
3.1 Análise química aproximada	37
3.1.1 Teor de umidade	37
3.1.2 Teor de sólidos totais	37

3.1.3	Teor de sólidos fixos e sólidos voláteis	38
3.1.4	Teor de cinzas.....	39
3.1.5	Teor de carbono fixo	39
3.2	Análise química elementar.....	39
3.3	Estudo do comportamento térmico	40
3.4	Medição das emissões provenientes da queima das biomassas.....	41
3.5	Caracterização do lodo têxtil quanto à composição química	42
3.6	Determinação do poder calorífico	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1	Análise química aproximada	45
4.2	Análise química elementar.....	46
4.3	Estudo do comportamento térmico	47
4.4	Lodo têxtil - composição química.....	52
4.5	Determinação do poder calorífico	54
4.6	Emissões provenientes da queima das biomassas	56
4.7	Considerações sobre viabilidade econômica do uso do lodo têxtil como biomassa combustível	58
	CONCLUSÃO	60
	REFERÊNCIAS.....	62

INTRODUÇÃO

A primeira fonte energética utilizada pelo homem foi a lenha para obtenção do fogo. Esta, por sua vez, passou a ser utilizada para aquecer e iluminar o ambiente e cozer alimentos. As técnicas de combustão desenvolvidas a partir deste combustível tornaram-se a base energética da civilização antiga.

Antes da Revolução Industrial, as atividades de produção e prestação de serviços se fundamentavam no trabalho dos homens complementado pela tração animal, pela utilização direta da força da água e do vento, e pela queima da lenha e do carvão vegetal. Conforme Leite (2007), o desenvolvimento industrial do século XIX esteve ligado, de forma íntima, ao progresso tecnológico e às invenções no domínio da transformação e da utilização da energia.

A Revolução Industrial trouxe consigo crescente demanda de energia e matérias-primas que o mundo nunca tinha visto; e o fantástico ritmo de expansão continuou através do século XX. Foi estimado, por exemplo, que nas primeiras duas décadas do século XX, a humanidade consumiu mais energia do que havia feito em todos os séculos anteriores de sua existência (LEITE, 2007).

No entanto, a questão energética continua sendo um dos principais problemas a serem superados pela sociedade nas próximas décadas.

Segundo a International Energy Agency (IEA, 2014), o consumo global de energia vai aumentar 56% até 2040. Ela prevê, também, que os combustíveis fósseis vão continuar a fornecer cerca de 80 % da demanda mundial por energia nas próximas três décadas, apesar da expansão das fontes de energias renováveis e nuclear.

Paralelamente a essa questão, a IEA (2014) também faz um alerta quanto às emissões de carbono associadas à geração e consumo de energia global, que devem aumentar 46% nos próximos 30 anos em comparação com as emissões de 2010, ressaltando, ainda, que o setor industrial representa a maior parcela do consumo de energia, tornando-se um sério problema à saúde e ao meio ambiente.

De acordo com a IEA (2014), o setor industrial respondeu por 42,3 % do consumo global de energia em 2012.

Segundo Goldemberg (2009), o desenvolvimento de equipamentos e processos utilizados nos setores industrial, de transporte e residencial foi realizado numa época de energia abundante e barata com o consumo elevado de combustíveis fósseis. Junta-se a este fato, a necessidade mundial de energia, que está crescendo paralelamente à rápida diminuição das reservas desses combustíveis (ASIF e MUNEER, 2007; DAGDOUGUI, 2012).

Carvalho e Mcquay (2007), já apresentavam a combustão como a primeira fonte em fornecimento de energia. Este processo é simples e prático, porém, ainda utiliza, principalmente, os combustíveis fósseis.

Com o exposto até aqui, percebe-se porque a busca por fontes alternativas de geração de energia tem se tornado cada vez mais intensa.

Assim, dentre essas fontes alternativas, a biomassa tem sido uma das com maior potencial de crescimento nos próximos anos, sendo considerada, também, um dos principais meios para a diversificação da matriz energética e a consequente redução da dependência dos combustíveis fósseis (VIRMOND, 2007; MAIA, 2013; TAVARES e SANTOS, 2013).

As projeções para o futuro indicam que a importância da biomassa aumentará muito, chegando a representar, no fim do século 21, de 10 a 20% de toda a energia usada pela humanidade (GOLDEMBERG, 2009).

As fontes de biomassas mais comuns em uso são os vegetais lenhosos e não lenhosos, os resíduos orgânicos e os biofluidos (ANEEL, 2014).

Ainda no contexto de fontes alternativas, o aproveitamento de resíduos industriais como matéria-prima para a combustão vem se mostrando uma alternativa atrativa por utilizar materiais renováveis e de menor impacto ambiental quando comparados aos combustíveis fósseis.

Somado ao aumento da quantidade gerada, os resíduos sólidos têm sido descartados, diariamente, com composições das mais diversas, em um ambiente natural cada vez mais limitado em termos da sua assimilação. Agrega-se aos impactos ambientais causados pela disposição incorreta, o fato de que a geração de resíduos representa, também, um grande desperdício de matéria-prima e energia.

Nesse sentido, como exemplo, pode-se citar o emprego de lodos provenientes de estações de tratamento de efluentes industriais como biomassa combustível, que vem sendo estudado por diversos autores (BORGES, 2008;

AVELAR, 2012; VASQUES, 2012, PASQUINI, 2014), muito embora este uso ainda não esteja bem difundido.

Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo avaliar o potencial do uso do lodo de ETE de uma indústria têxtil como biomassa combustível para geração de energia em caldeira da própria empresa, que emprega atualmente cavaco e serragem de madeira. Desta forma, teria-se a possibilidade de reduzir a disposição final desse lodo em aterros industriais, que além de serem dispendiosos do ponto de vista de gestão e manutenção, ainda oferecem riscos ao meio ambiente.

1 OBJETIVOS

1.1 Objetivo geral

Avaliar a potencialidade energética e a viabilidade de se empregar um lodo de indústria têxtil como biomassa combustível para geração de energia através de estudo técnico e ambiental.

1.2 Objetivos específicos

- Avaliar a composição por análise químicas elementar, aproximada e teor de matéria orgânica e metais das biomassas empregadas: cavaco e serragem de madeira, por uma indústria têxtil e do lodo têxtil gerado;
- Avaliar o comportamento térmico por análise termogravimétrica (TGA) e poder calorífico das biomassas;
- Analisar as emissões geradas pela combustão das biomassas;
- Avaliar a análise econômica simplificada da substituição das biomassas pelo lodo gerado;
- Estabelecer, a partir dos resultados alcançados, a capacidade de substituição das biomassas atualmente empregadas como combustível pelo lodo industrial avaliado neste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O setor têxtil e a problemática ambiental

As primeiras fábricas têxteis no Brasil eram de pequeno porte e foram estabelecidas no século XIX. Desde então, vêm se difundindo em todo o território brasileiro num processo gradual de evolução tecnológica.

Conforme Ueda (2006), a indústria têxtil teve uma grande ampliação a partir de 1950, devido ao emprego de novos componentes químicos, novas tecnologias e métodos nos processos, além do aumento competitivo entre as empresas no âmbito comercial.

No Brasil, a sua importância não é menor, tendo desempenhado um papel de grande relevância no processo de desenvolvimento econômico e social do país (MELO *et al.*, 2007).

A indústria têxtil possui amplo rebatimento em diversas cadeias produtivas como a cotonicultura, máquinas, petroquímica e de confecções. A atividade contempla quatro segmentos de atuação que são: fiação, tecelagem, malharia e acabamento. Para tanto, existem diversas etapas de transformação, sendo elas: fiação, tecelagem, beneficiamento, acabamento e confecção (VIANA, 2008).

O estado de Santa Catarina possui 9.853 empresas têxteis e de vestuário e se destaca nacionalmente com uma representatividade de 20,04 % (FIESC, 2014). A industrialização de artigos têxteis consiste em um conjunto de processos que transformam as matérias-primas como fibras naturais ou químicas em fios, tecidos, etc.

De acordo com o Brasil Têxtil (2013), a produção mundial de artigos têxteis, medida pelo consumo industrial de fibras e filamentos, cresceu a uma taxa média anual de 3,6 % nos últimos 20 anos, enquanto a população mundial aumentou uma

taxa média anual de 1,3 %, o que representa um importante crescimento do consumo mundial *per capita* de produtos têxteis nesse período.

Conforme Dantas (2005), as plantas variam desde pequenas instalações artesanais até unidades totalmente automatizadas. Essas unidades são caracterizadas por requererem grandes quantidades de água, corantes e diversificados produtos químicos utilizados ao longo de uma complexa cadeia produtiva. Esta grande quantidade de água é utilizada como meio de transporte para os produtos químicos que entram no processo de beneficiamento, bem como para a remoção dos excessos que são considerados indesejáveis para o produto.

Conforme Hassemer (2002), os efluentes gerados pelas unidades industriais, normalmente, são tratados por processos físico-químicos e biológicos convencionais (coagulação química e lodos ativados), os quais apresentam bons resultados na redução carbonácea, mas têm como inconveniente a alta produção de lodo e a necessidade de disponibilização de grandes áreas para implantação do processo de tratamento e de aterros sanitário-industriais para disposição do lodo, pois é um material não inerte.

Para Barbieri (2009), a preocupação da empresa não deve estar somente direcionada ao atendimento dos requisitos legais aos quais está sujeita, mas também aos objetivos econômicos compatíveis com padrões sustentáveis de desenvolvimento.

2.2 O processo produtivo e os resíduos do setor têxtil

2.2.1 Processo têxtil

De acordo com o Sinditêxtil (2009), as etapas de fiação, beneficiamento, tecelagem e/ou malharia, enobrecimento e confecção caracterizam uma cadeia têxtil simplificada (Figura 1) e estão descritas a seguir.

- Fiação: etapa de obtenção do fio a partir das fibras têxteis.

- Beneficiamento: etapa de preração dos fios para uso final.
- Tecelagem e/ou Malharia: etapas de elaboração do tecido a partir dos fios têxteis.
- Enobrecimento: etapa de preparação, tingimento, estamparia e acabamento de tecidos, malhas ou artigos confeccionados.
- Confeções: nesta etapa o setor tem aplicação diversificada de tecnologias para os produtos têxteis, acrescida de acessórios incorporados nas peças.

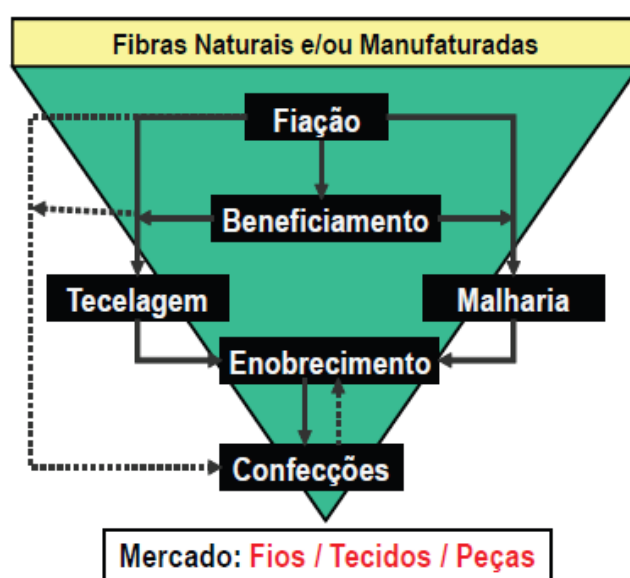


Figura 1 - Cadeia têxtil.
Fonte: Sinditêxtil, 2009.

De acordo com Vieira (2010), os efluentes têxteis são altamente coloridos, pois os corantes não são completamente fixados na fibra durante a etapa de tingimento.

O tratamento destes efluentes vem ganhando cada vez mais expressão no Brasil, em função do aumento do número de ETEs instaladas e também da necessidade de atendimento às exigências ambientais.

Na Figura 2 estão representados os efluentes gerados pelo processamento de tecidos sintéticos e de algodão.

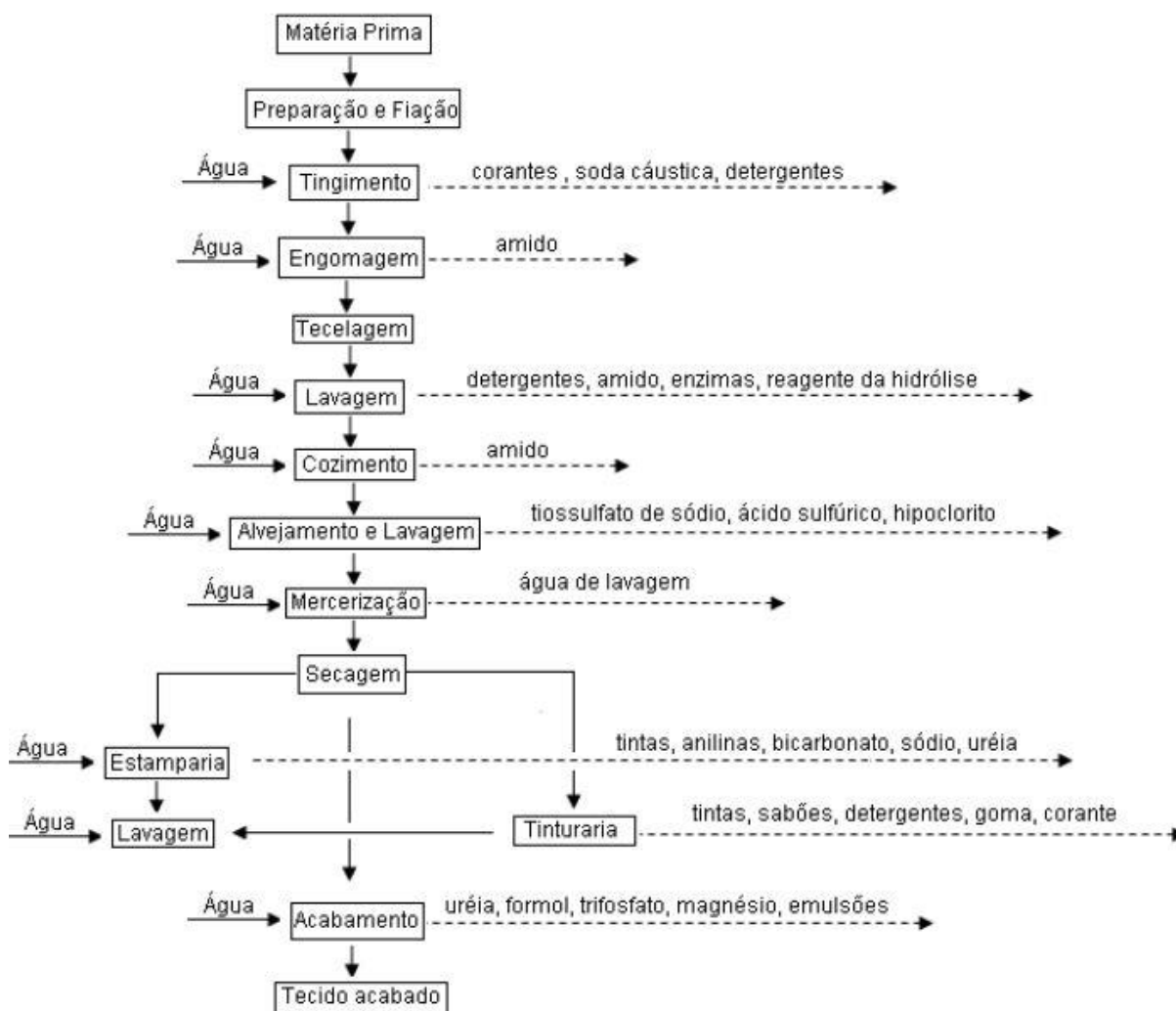


Figura 2 - Fluxograma dos efluentes do processamento de tecidos sintéticos e de algodão
Fonte: Souza, 2009.

Segundo Ribeiro (2011), as primeiras etapas do processo de tratamento do efluente têxtil são gradeamento, filtro rotativo e peneira hidrostática, que servem para separar os sólidos grosseiros evitando danos nos processos seguintes.

A fim de garantir a funcionalidade do processo biológico, ocorrem o ajuste do pH, a precipitação química e a oxirredução nos tanques de homogeneização, equalização e neutralização.

O processo biológico ocorre no tanque de mistura e digestores aeróbios, a fim de obter a estabilização e redução da DBO (demanda bioquímica de oxigênio), DQO (demanda química de oxigênio) e das formas de nitrogênio (RIBEIRO, 2011). A remoção do fósforo ocorre nos processos de decantação e flotação.

Com isso, pode-se dizer que as características do lodo gerado em um processo industrial variam de acordo com a natureza bruta da água, dos reagentes usados, das etapas do processo têxtil, dos processos unitários e dos produtos químicos aplicados no tratamento de efluentes.

2.2.2 Lodo de ETE do setor têxtil

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos – Lei Nº 12.305 (2010), resíduo sólido é todo material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas. Toda atividade industrial gera resíduos como subprodutos que causam impactos ambientais consideráveis, independentemente de sua destinação final.

Segundo o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2009), é considerado resíduo sólido industrial todo material proveniente de atividades industriais nos estados sólido, semissólido, gasoso ou líquido. É o caso do lodo têxtil, resultado do tratamento de efluentes da indústria têxtil, oriundo da prensagem do material decantado nas estações de tratamento (Figura 3).



Figura 3 - Lodo têxtil
Fonte: Oliveira, 2014.

Como resultado do processo industrial, o lodo têxtil é um resíduo que varia em sua composição, contendo, normalmente, carbono (C), nitrogênio (N), fósforo (P) e micronutrientes (ARAÚJO *et. al.*, 2005).

O lodo têxtil é essencialmente composto por água, óxidos de minerais e matéria orgânica. A água é proveniente do processo de produção, os óxidos minerais vêm das máquinas e a matéria orgânica provém das fibras e bactérias usadas nas estações de tratamento de efluentes (GUEDES, 2012).

O lodo têxtil é classificado, conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004) como resíduo classe II A – não inertes, que são os resíduos sólidos ou mistura de resíduos sólidos que não se enquadram na classe I – perigosos ou na classe II B – inertes. Estes resíduos podem ter propriedades tais como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos – Lei Nº 12.305 (2010), determina que as empresas de qualquer segmento produtivo façam a destinação correta dos resíduos gerados durante o processo de produção.

Contudo, conforme Richter (2011), sua disposição final adequada é uma tarefa difícil, sendo a utilização do lodo ou da torta em outras aplicações tem sido estudada. A aplicação específica diferencia-se pelas características da torta produzida.

2.3 Processo de combustão

De acordo com Carvalho e Mcquay (2007), a maior parte da energia consumida no mundo, em transporte e aquecimento, é fornecida através do processo de combustão.

Segundo Potter e Scott (2006), a queima de um combustível com oxigênio, bem como a queima de uma substância contendo oxigênio é chamada de combustão, ou seja, é o processo de transformação da energia química em calor.

Este processo ocorre na presença de oxigênio, porém, segundo Bizzo (2014), quando o oxigênio é pouco ou escasso, a combustão ocorre de maneira incompleta e ocasiona a redução da eficiência energética e aumento na geração de

gases altamente tóxicos como o monóxido de carbono. O processo de combustão é simples e prático, tendo como objetivo a geração de energia.

A Tabela 1 resume as reações elementares de combustão, correspondentes à oxidação completa e incompleta do carbono, à oxidação do hidrogênio e do enxofre. O calor liberado em cada reação também está representado nesta tabela, por unidade de massa do combustível.

REAGENTES		PRODUTOS	ENERGIA LIBERADA
$C + O_2$	\longrightarrow	CO_2	+ 8.100 kcal/kg C
$C + \frac{1}{2} O_2$	\longrightarrow	CO	+ 2.400 kcal/kg C
$2 H_2 + O_2$	\longrightarrow	$2 H_2O (L)$	+ 34.100 kcal/kg H_2
$S + O_2$	\longrightarrow	SO_2	+ 2.200 kcal/kg S

Tabela 1 - Reações básicas de combustão.

Fonte: Centrais Elétricas Brasileiras, FUPAI/EFFICIENTIA, 2005.

A capacidade de produção de energia pela combustão de um combustível é quantificado pelo seu poder calorífico, que pode ser definido, ainda, como a quantidade de energia na forma de calor liberada pela combustão de uma unidade de massa da biomassa (MORAN e SHAPIRO, 2006).

O poder calorífico é classificado sob duas formas: Poder Calorífico Superior (PCS) e Poder Calorífico Inferior (PCI). Quando a quantidade de calor é medida com os produtos de combustão na fase gasosa, denomina-se Poder Calorífico Inferior. Caso a água dos produtos de combustão for considerada na fase líquida, ou seja, com os produtos de combustão à temperatura ambiente, o calor liberado é denominado Poder Calorífico Superior (BORGES, 2008).

De acordo com as Centrais Elétricas Brasileiras, FUPAI/EFFICIENTIA (2005), é essencial a utilização de calor em diversos setores industriais nos principais processos de fabricação. O uso de vapor da água como meio de transporte de energia térmica traz grandes vantagens, pois é uma substância pouco agressiva quimicamente, facilmente disponível e com grande capacidade de transportar energia. Em média, segundo a mesma fonte, cerca de 15 kg de vapor contém a energia de 1 kg de óleo combustível ou 3 kg de lenha.

Para a realização de processos de combustão, são necessários equipamentos capazes de proporcionar a mistura do ar e do combustível em condições seguras e controladas, sem perdas (CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS, FUPAI/EFFICIENTIA, 2005). Dentre esses equipamentos, encontram-se os chamados de caldeiras ou geradores de vapor.

De acordo com Balestieri (2002), caldeiras ou geradores de vapor são equipamentos que permitem a geração de formas de energia térmica: vapor e água quente, que podem ser utilizados em aplicações industriais, comerciais e domésticas. Ainda segundo esse mesmo autor, podem ser utilizadas para secagem, geração de energia, aquecimento ambiental, dentre outros. Para tanto, pode-se dispor de equipamentos geradores de vapor convencionais e de recuperação.

Uma caldeira é um recipiente no qual a água é introduzida e pela aplicação de calor continuamente evaporada (TORREIRA, 1995).

Segundo Torreira (1995), um gerador de vapor é um trocador de calor complexo que produz vapor de água sob pressões superiores à atmosférica, utilizando a energia térmica de um combustível juntamente com um elemento comburente (oxigênio). Na indústria, o vapor, geralmente, é empregado para aquecimento e para a produção de trabalho mecânico.

2.4 Biomassa e seu uso como combustível

Biomassa pode ser definida como todo material orgânico que tenha conteúdo de energia química no seu interior, o que inclui a vegetação, os resíduos de agricultura, o lixo orgânico e os resíduos industriais (VIDAL *et. al.*, 2011).

A utilização de madeira de florestas como fonte de energia é tão antiga quanto a história da humanidade. Desde os primórdios da história da civilização, a vegetação se constituiu como uma fonte energética, sendo utilizada em atividades domésticas e, posteriormente, em atividades manufatureiras e industriais (TAVARES e SANTOS, 2013).

Como biomassa combustível, a mais utilizada é a madeira. Esta é um material higroscópico, sendo capaz de absorver ou perder água para o meio

ambiente. Essa característica é explicada pela sua constituição química, composta pelos polímeros de celulose, hemicelulose e lignina (SILVA, 2009). Dentre essas substâncias, a hemicelulose é a mais hidrófila, contribuindo para a variação dimensional da madeira em função da troca de água com o meio.

O volume de resíduos gerados na indústria madeireira é expresso pela diferença entre o volume de madeira em toras que entra e o volume de madeira serrada produzida. Os resíduos gerados pelo processo produtivo são as cascas, aparas, cavacos e serragem. Estes resíduos são considerados rejeitos no processo, porém, podem ser utilizados como matéria-prima para a produção de pasta e celulose e promover eficiência energética da indústria através do uso como biomassa (SILVA, 2009).

A fim de melhorar a qualidade do material e gerar energia de forma eficiente, a biomassa precisa receber o tratamento adequado. Uma das etapas do tratamento da biomassa que contribui de forma significativa para a melhoria da qualidade do combustível é o armazenamento (BRAND *et al.*, 2014).

Nesse contexto, o tamanho das partículas tem grande influência sobre a velocidade e intensidade das alterações ocorridas nas propriedades físicas, químicas e energéticas da biomassa ao longo do tempo de estocagem. Essas variações são mais intensas e rápidas em partículas menores (cavacos), em comparação com a biomassa de maiores dimensões (toras e árvores inteiras) (BRAND *et al.*, 2014).

Quanto aos lodos industriais, sua denominação de biomassa é dependente da sua composição orgânica, apesar de não serem constituídos estritamente por componentes naturais. Este é o caso do lodo gerado pelas indústrias têxteis após o tratamento de efluente, que por sua vez é prensado, formando as “tortas” de lodo (PRONOBIS, 2006).

A quantidade de biomassa existente na Terra é de 2 trilhões de toneladas, segundo dados da ANEEL (2014). Embora grande parte da biomassa não seja contabilizada, devido ao uso não comercial, estima-se que ela possa representar até 14% de todo o consumo mundial de energia primária.

Segundo Fernandes (2012), a partir da biomassa podem ser produzidos combustíveis sólidos, líquidos e gasosos, mas para sua transformação em energia e, conseqüentemente, em combustível, são necessárias tecnologias de conversão

termoquímicas, destacando-se a combustão, pirólise, a liquefação e a gaseificação, representados na Figura 4.

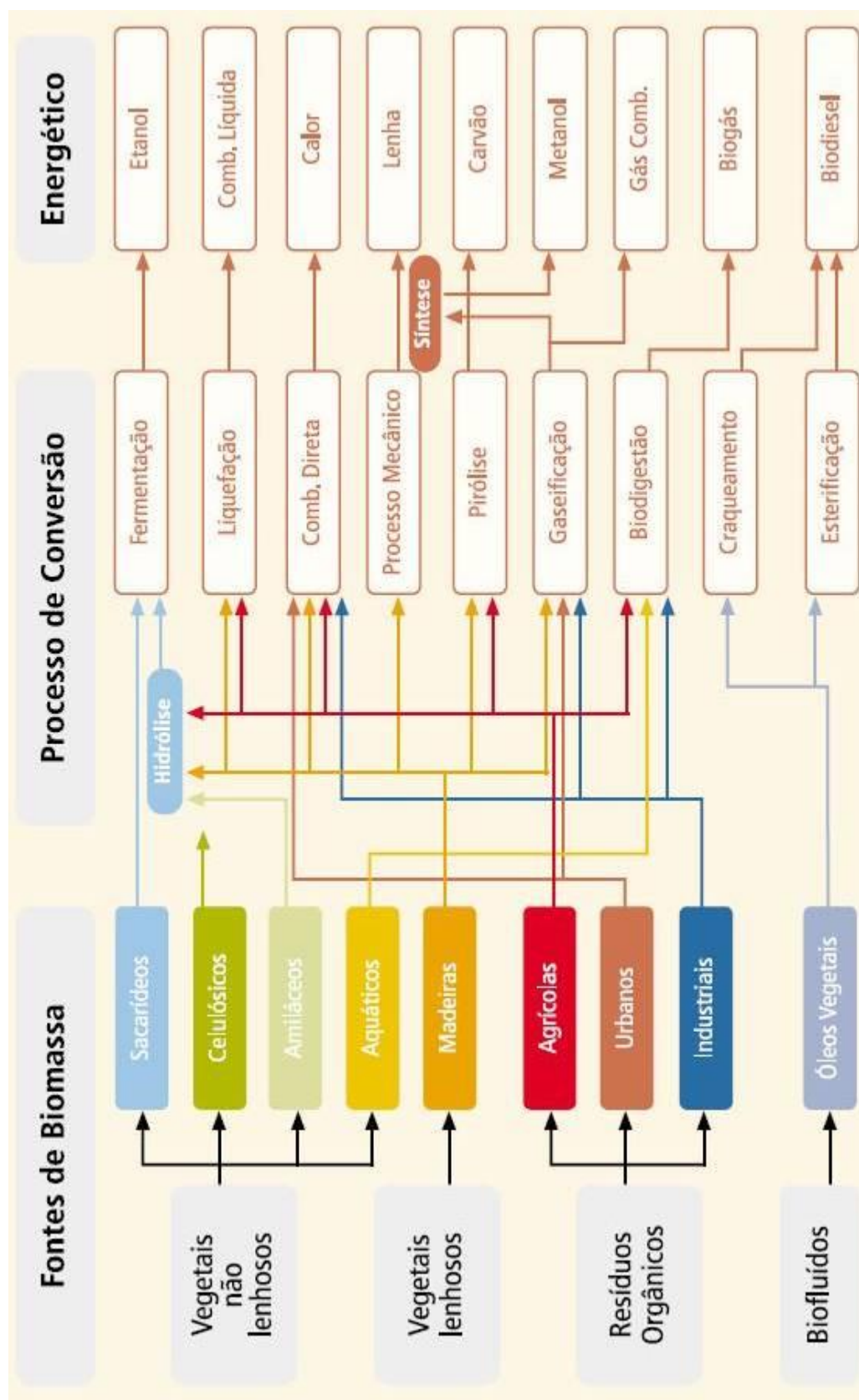


Figura 4 - Processos de conversão de biomassa em energia
Fonte: ANEEL, 2014

Atualmente, a biomassa vem sendo cada vez mais utilizada na geração de energia, principalmente em sistemas de cogeração e no suprimento de eletricidade para demandas isoladas da rede elétrica.

No setor industrial catarinense, a biomassa se destaca com 64,5 % da energia consumida, apresentando-se como principal fonte energética nos setores mais intensivos de energia da indústria catarinense: têxtil, papel e celulose, cerâmica, alimentos e bebidas (BAZZO *et. al.*, 2014).

Ainda segundo Bazzo *et. al.* (2014), no setor têxtil catarinense, a biomassa foi a segunda fonte de energia mais utilizada em 2012, com 36 %, sendo a principal fonte a eletricidade, com 41 %.

Um combustível deve possuir uma elevada quantidade de carbono e materiais voláteis além de alto poder calorífico, segundo De Sena (2005). Ou seja, quanto maiores forem estas quantidades, maior será a eficiência da combustão para a liberação da energia. Ainda, ao se avaliar as fontes energéticas disponíveis, seus poderes caloríficos e suas interferências no meio ambiente devem ser analisados.

A exaustão de fontes não renováveis e as pressões ambientalistas, portanto, irão acarretar num maior aproveitamento energético da biomassa.

As biomassas mais comuns em uso para cogeração de energia são os resíduos agrícolas, contudo, o emprego de lodos provenientes de estações de tratamento de efluentes como biomassa vem sendo estudado por diversos autores, conforme apresentado a seguir.

Virmond (2007) realizou o estudo do aproveitamento do lodo de tratamento primário de efluentes de um frigorífico como fonte de energia. A incorporação de 10 % em massa de lodo à alimentação da caldeira, resultou em aumento da potência térmica nominal do sistema em aproximadamente 2 % e economia no consumo anual de cavaco.

Borges (2008) realizou a caracterização e o estudo da potencialidade de lodos de efluentes doméstico e industrial como combustível na geração de energia. Através deste estudo, foi analisada a possibilidade de utilização de lodo têxtil, de indústria de papel e celulose e de lodo doméstico. Os resultados indicaram viabilidade de uso dos três tipos de lodo como biomassa combustível.

Avelar (2012) avaliou o potencial de uso de resíduos sólidos da indústria têxtil para fins energéticos. Com base nos resultados obtidos, tanto o lodo biológico

quanto o resíduo de algodão podem ser utilizados como material combustível nos processos de combustão.

Vasques (2012) comenta que os resultados de seu estudo indicaram a possibilidade do uso do lodo têxtil como biomassa combustível, principalmente em função da potencialidade energética verificada.

Pasquini (2014) avaliou o uso potencial de lodo industrial e de esgoto doméstico como fonte de energia. O estudo mostrou que o lodo tem as características necessárias para geração de energia a partir de sua queima, o que propiciaria uma redução dos impactos ambientais de sua disposição final.

Estas pesquisas comumente permeiam o uso de resíduos com grande disponibilidade nas regiões em que foram realizadas.

2.5 O impacto ambiental dos processos de combustão industrial

A poluição do ar pode ser definida, em linhas gerais, como sendo a presença ou o lançamento à atmosfera de substâncias em concentrações suficientes para interferir na saúde e bem estar do Homem (DERÍSIO, 2002).

Decorrente da aceleração do crescimento econômico-social nos últimos séculos, a poluição atmosférica no ambiente urbano-industrial é um problema ocasionado, principalmente, pela queima de combustíveis fósseis e descargas industriais. O crescimento exponencial do uso de veículos automotores e da implantação de indústrias aumentou consideravelmente a concentração de poluentes nestas áreas, contribuindo para a degradação ambiental e ocasionando impactos significativos à qualidade de vida.

Perto de 3000 diferentes compostos provenientes da ação humana já foram identificados na atmosfera, sendo a maior parte deles orgânicos. Essa mistura complexa de poluentes causa preocupação devido ao impacto que pode causar à saúde e ao ambiente.

Dessa forma, a determinação sistemática da qualidade do ar deve ser, por questões de ordem prática, limitada a um restrito número de poluentes, definidos em função de sua importância e dos recursos materiais e humanos disponíveis para

determiná-los. De um modo geral, a escolha recai sempre sobre um grupo de poluentes que servem como indicadores de qualidade do ar, pela quantidade e maior número de fontes de emissão (GUARIEIRO *et al.*, 2011).

As fontes ou emissores de poluentes atmosféricos podem ser tanto naturais quanto antropogênicas. Dentre as antropogênicas, no contexto do presente trabalho, são destacados os principais poluentes gasosos gerados a partir dos processos de combustão, tanto dos combustíveis fósseis como dos diversos tipos de biomassa, quais sejam: o dióxido de enxofre (SO₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x), material particulado (MP), hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), (FORNARO e GUTZ, 2006; MARTINS *et al.*, 2008).

A poluição do ar também é uma das grandes responsáveis pelas alterações climáticas, o que vem sendo constatado através de estudos científicos, especialmente do *Intergovernmental Panel of Climate Change* (IPCC). A composição da atmosfera, portanto, tem sido alterada com o aumento da emissão dos gases intensificadores do efeito estufa, influenciando não somente na alteração da temperatura média da Terra, como em maior ocorrência de tempestades e elevação do nível dos oceanos, entre outros fatores (IPCC, 2014).

Dos gases de efeito estufa, o dióxido de carbono (CO₂) é o principal gás associado ao aquecimento global. Demirbas (2004), estimou que a contribuição do CO₂ é de 50% em relação aos outros gases com efeito semelhante (clorofluorcarbono - CFC; metano - CH₄; e óxido nitroso - NO).

Quanto aos efeitos devidos aos outros gases de combustão, pode-se dizer que o dióxido de enxofre é mais frequentemente associado a mortes e internações por doenças cardiovasculares.

Quanto ao monóxido de carbono, este é comumente associado à intoxicações, focando seus efeitos principalmente sobre o coração (ESTEVES, 2011). Além disso, o CO indica falta de ar, excesso de combustível, funcionamento inadequado ou combustão incompleta do combustível orgânico.

Já os óxidos de nitrogênio, quando inalados, atingem as porções mais periféricas do pulmão devido sua baixa solubilidade, e seu efeito tóxico tem relação com o fato de ser um agente oxidante (LEITE, 2007).

Além disso, os gases de exaustão podem conter, ainda, compostos orgânicos voláteis (COVs) e, se houver a presença de cloro, dioxinas e furanos, ou

seja, gases poluentes cujo impacto sobre a saúde ambiental pode ser altamente nocivo (ASSUNÇÃO e PESQUERO, 1999).

A sociedade vem cobrando posturas cada vez mais adequadas dos países no que se refere as suas matrizes energéticas, afetando diretamente os processos industriais e oportunizando estudos que permitam o uso de fontes alternativas de energia que ocasionem problemas menores que os atuais.

3 METODOLOGIA

O primeiro passo para a realização deste trabalho, foi a definição das biomassas a serem utilizadas neste estudo: cavaco de madeira, serragem de madeira e lodo têxtil.

As duas primeiras, cavaco e serragem de madeira (Figuras 5a e 5b, respectivamente) foram utilizadas por serem, atualmente, empregadas pela empresa para a geração de energia através da queima em caldeira.

O lodo têxtil gerado na ETE da empresa também foi denominado como biomassa neste trabalho (Figura 5c).



Figura 5 - Cavaco de madeira (a), serragem de madeira (b) e lodo têxtil (c).

Essas três biomassas foram caracterizadas por diferentes análises, conforme mostrado na Figura 6.

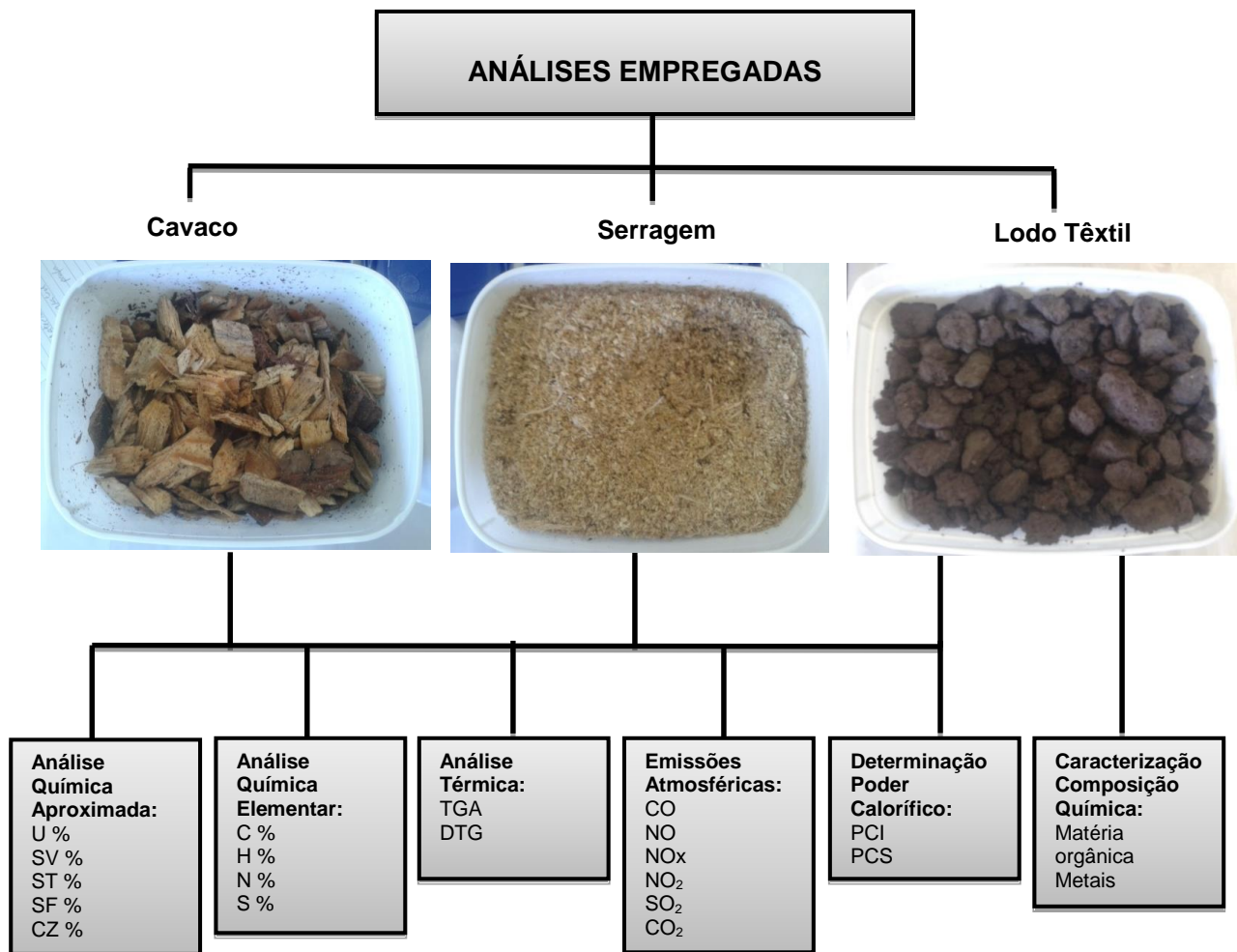
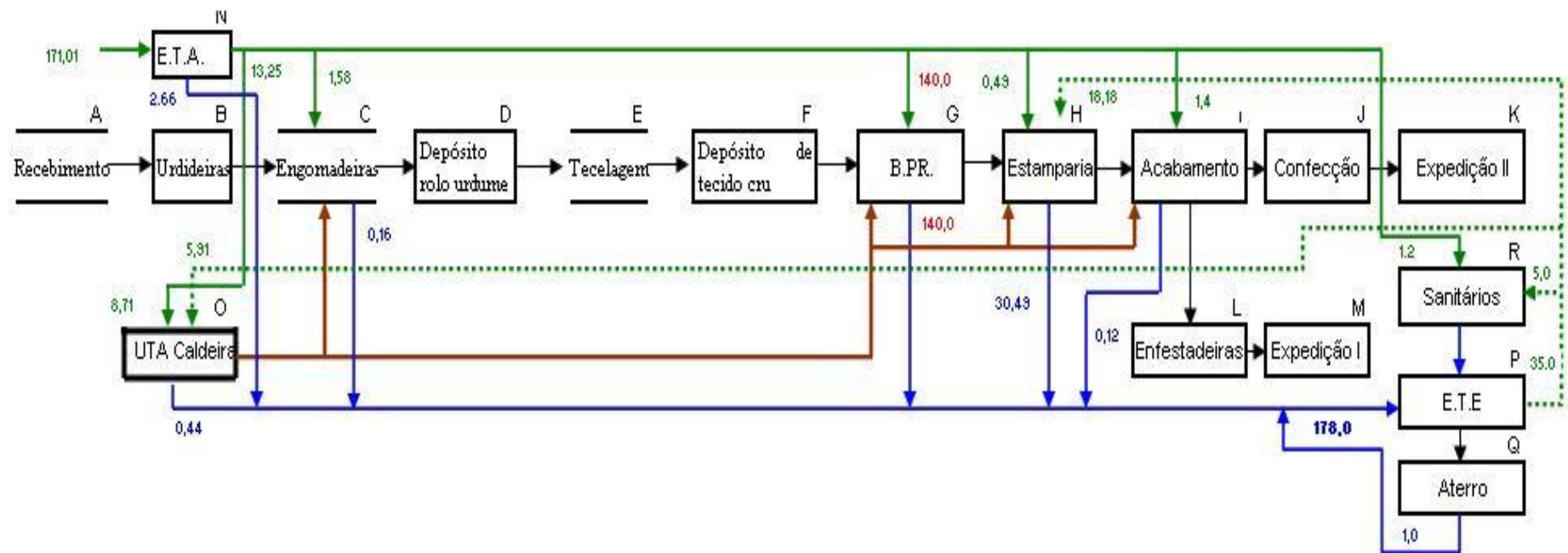


Figura 6 - Especificação das análises realizadas com as biomassas.

A Figura 7 mostra o fluxo do processo industrial têxtil.



LEGENDA	
* ÁGUA	—
* Água recuperada	—
* VAPOR	—
* EFLUENTE	—

Figura 7 - Fluxo do processo industrial têxtil
 Fonte: Ribeiro, 2011

A Figura 8 mostra o fluxograma das da estação de tratamento de efluentes (ETE), a partir das quais foi gerado o lodo avaliado no presente estudo.

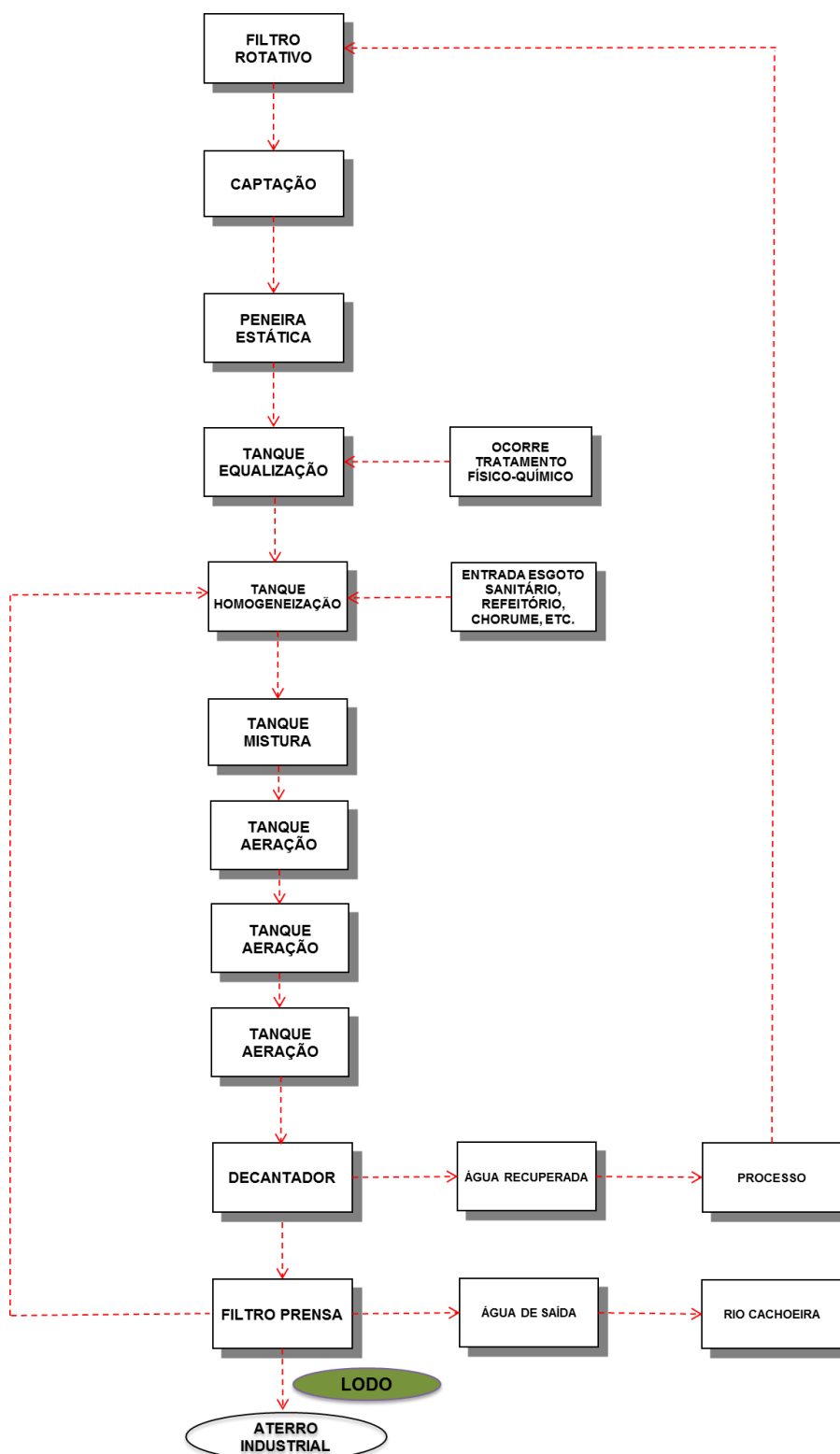


Figura 8 - Fluxograma da ETE da indústria têxtil
Fonte: Adaptado de Ribeiro, 2011.

Antes de ser bombeado para os filtros prensa para desaguamento, são adicionados 451 g de cal por m^3 de lodo e ácido clorídrico a 199,62 g/m^3 ao lodo retirado na parte superior das unidades de flotação. A cal hidratada é um material modificador utilizado para aumentar a adesão entre o ligante a superfície dos agregados (ALENCAR *et al.*, 2006). O ácido clorídrico é utilizado com o objetivo de auxiliar na filtração.

Após adição de cal e ácido clorídrico, o lodo é bombeado para os filtros prensa para desaguamento. Ao ser retirado dos filtros prensa, o lodo é acondicionado em caçambas e encaminhado para aterro industrial da empresa.

O aterro industrial da empresa foi construído em 1996, com padrões de acondicionamento de lodo classe II A (GANSKE, 2008). Ainda segundo este autor, o acondicionamento do lodo é realizado em trincheiras com aproximadamente 3.000 m^2 e 20 m de profundidade, impermeabilizadas no fundo e nas laterais. Nas Figuras 9a e 9b pode-se ver a primeira trincheira ocupada parcialmente e parte do processo de impermeabilização da segunda trincheira, respectivamente.



(a)



(b)

Figura 9 - Primeira trincheira ocupada parcialmente (a) e impermeabilização da segunda trincheira (b).

Fonte: Ganske, 2008.

3.1 Análise química aproximada

Pela análise química aproximada foram determinados os teores de umidade (U%), sólidos totais (ST%), sólidos fixos (SF%), sólidos voláteis (SV%), cinzas (CZ%) e carbono fixo (CF%), por termogravimetria, ou seja, secagem em estufa e queima em mufla. Essas medições foram realizadas em triplicata.

O conteúdo de voláteis expressa a facilidade de se queimar o material e o carbono fixo o tempo de queima. A biomassa com maior teor de voláteis e menor teor de cinzas apresenta, normalmente, maior poder calorífico (TAVARES e SANTOS, 2013).

3.1.1 Teor de umidade

Para a determinação da umidade, foi utilizado o procedimento descrito na norma E871 - 82 (ASTM, 2013). Para as amostras de cavaco de madeira, serragem de madeira e lodo têxtil, a preparação foi realizada utilizando cadinho limpo, seco e previamente tarado. Mediu-se 5 gramas de cada amostra *in natura* (P_u) em balança analítica (Sartorius, Pat 0366), e obteve-se o peso do cadinho juntamente com a amostra *in natura* (P_i), colocando-a para secar a 105 °C em estufa (Quimis, modelo Q317B252, Pat 0650) por 3 horas. Em seguida, deixou-se em dessecador até atingir a temperatura ambiente, quando então foi medida a massa final (peso final) (P_f). Com os valores encontrados e a Equação 1, determinou-se o teor de umidade. Essas medições foram feitas em triplicata.

$$\text{Umidade (\%)} = \frac{(P_i - P_f)}{P_u} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

3.1.2 Teor de sólidos totais

Para a determinação do teor de sólidos totais foi utilizado o procedimento descrito na norma E1756 - 08 (ASTM, 2008). Utilizando cadinho limpo (P_i), seco e previamente tarado, mediu-se 5 g das amostras de cavaco de madeira, serragem de madeira e lodo têxtil, *in natura* (P_u), em balança analítica (Sartorius, Pat 0366),

colocando-as para secar a 105 °C em estufa (Quimis, modelo Q317B252, Pat 0650) por 3 horas. Em seguida, deixou-se em dessecador até atingir a temperatura ambiente, quando então foi medida a massa final (peso final) (P_f). Com os valores encontrados e a Equação 2, determinou-se a quantidade de massa seca em relação à massa úmida. Essas medições foram feitas em triplicata.

$$\text{Sólidos Totais (\%)} = \frac{(P_u - P_i) \times 100}{(P_f - P_i)} \quad (\text{Equação 2})$$

3.1.3 Teor de sólidos fixos e sólidos voláteis

Para a determinação do teor de sólidos fixos foi utilizado o procedimento descrito na norma E872 – 82 (ASTM, 2006). Nesta análise, foram utilizadas 1,5 g das amostras secas de cavaco de madeira, serragem de madeira e lodo têxtil, (P_t) em cadinho seco (P_s), sendo levado ao forno mufla (Quimis, RA 195 GMF) a 575 °C por 3 horas. Depois deste período, colocou-se em dessecador até temperatura ambiente e pesou-se para obtenção da massa calcinada (P_c). Empregando-se a Equação 3 foi determinado o teor de sólidos fixos das biomassas. As análises foram realizadas em triplicata.

$$\text{Sólidos Fixos (\%)} = \frac{P_c \times 100}{P_t} \quad (\text{Equação 3})$$

A partir dos resultados obtidos, empregou-se a Equação 4 para determinar o teor de sólidos voláteis.

$$\text{Sólidos Voláteis (\%)} = \frac{(P_t + P_s) - P_c \times 100}{(P_t + P_s) - P_s} \quad (\text{Equação 4})$$

Os materiais voláteis compreendem a parte do combustível que se desprende na forma de gases, quando o material é degradado em determinadas temperaturas (AVELAR, 2012).

3.1.4 Teor de cinzas

De acordo com Avelar (2012) o teor de cinzas é caracterizado através dos resíduos resultantes da combustão dos componentes orgânicos e oxidações do inorgânicos contidos na biomassa.

O teor de cinzas foi obtido pela Equação 5, após queima em mufla a 575 °C durante 3 horas, conforme E1755 - 01 (ASTM, 2007).

$$\text{Cinzas (\%)} = \frac{(P_c - P_s)}{(P_t - P_s)} \times 100 \quad (\text{Equação 5})$$

3.1.5 Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo foi determinado utilizando a Equação 6 por meio dos valores de sólidos voláteis e cinzas, anteriormente determinados pelas Equações 4 e 5, respectivamente (GARCIA *et al.*, 2012).

$$\text{Carbono Fixo (\%)} = 100 - (\text{Cinzas \%} + \text{SV \%}) \quad (\text{Equação 6})$$

3.2 Análise química elementar

A análise elementar permite quantificar o potencial de geração de energia da biomassa (FERNANDES *et al.*, 2013). A análise química elementar foi realizada para verificar os teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio existente em cada tipo de biomassa, pois são os principais participantes nas reações de oxidação durante a queima das amostras.

O método consiste na queima das amostras em atmosfera oxidante, com combustão completa desenvolvida. As amostras são reduzidas a um grupo de

gases, tais como CO₂, H₂O, N₂ e SO₂, os quais são continuamente medidos e a partir destes, são calculados os percentuais dos elementos C, H, N e S (GARCIA *et al.*, 2012).

Foram encaminhadas três amostras de 50 gramas cada, previamente secas de cavaco de madeira, serragem de madeira e lodo têxtil, para o laboratório de Química da USP (SP), onde foi utilizado o analisador CHN Perkin-Elmer para determinar as porcentagens dos elementos acima citados em cada tipo de biomassa. As análises foram realizadas em duplicata.

O enxofre não pôde ser analisado, em função de problemas técnicos do equipamento durante o período de realização das análises.

3.3 Estudo do comportamento térmico

A termogravimetria (TG) ou análise termogravimétrica fornece informações sobre a composição e estabilidade térmica. É utilizada para medir as variações de massa da amostra em função da temperatura ou do tempo (MIRANDA, 2009). Para auxiliar na interpretação da curva TG é utilizada a derivada da curva de termogravimetria (DTG), na qual os picos indicam a temperatura de decomposição máxima.

As análises termogravimétricas foram realizadas pelo Laboratório de Materiais da Univille, utilizando o termoanalisador TA Instrument, modelo Q50 (Figura 10).



Figura 10 - Termoanalisador TA Instrument, modelo Q50

Amostras das três biomassas, cavaco de madeira, serragem de madeira e lodo têxtil, foram submetidas ao analisador térmico sob atmosfera em meio oxidante, usando ar sintético com 79 % de N₂ e 21 % de O₂, para avaliar a combustão. As demais condições foram: taxa de aquecimento de 10 °C por minuto, faixa de aquecimento da temperatura ambiente à 1000 °C e fluxo de gás de 60 mL/min.

3.4 Medição das emissões provenientes da queima das biomassas

As amostras previamente secas dos três tipos de biomassa cavaco de madeira, serragem de madeira e lodo têxtil, foram queimadas no termoanalisador TA Instrument Q50 do laboratório de materiais da Univille. As condições utilizadas foram atmosfera em meio oxidante, usando ar sintético com 79 % de N₂ e 21 % de O₂, para avaliar a combustão.

As demais condições foram: taxa de aquecimento de 10 °C por minuto, faixa de aquecimento da temperatura ambiente à 1000 °C e fluxo de gás de 60 mL/min.

A sonda do analisador portátil de gases combustíveis (Figura 11) foi introduzida na saída de gases do termoanalisador (Figura 12), sendo realizada a medição da concentração dos gases: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NO, NO₂, NO_x), e dióxido de enxofre (SO₂), gerados a cada 50 °C.

No Brasil, não existem normas específicas para a queima de biomassa. A principal norma reguladora nacional é a Resolução Conama nº 382 de 2006 para os níveis de emissões atmosféricas de alguns processos industriais (MAIA, 2013).



Figura 11 - Analisador portátil de gases combustíveis Optima 7.



Figura 12 - Sistema utilizado na coleta dos gases gerados durante a queima das biomassas.

3.5 Caracterização do lodo têxtil quanto à composição química

Para a caracterização química do lodo têxtil foram realizadas análises relativas à determinação da presença de matéria orgânica e de metais, bem como a análise aproximada para obtenção dos teores de sólidos totais, sólidos fixos e sólidos voláteis (neste caso, com as três biomassas), conforme descrita anteriormente.

Na Tabela 2 encontram-se os métodos analíticos empregados na determinação da fração orgânica (massa bruta) e da matéria orgânica (solubilizada e lixiviada) presentes no lodo têxtil.

Parâmetro	Equipamento	Método
Benzeno (MB)		EPA 5021:1996
Etilbenzeno (MB)		EPA 5021:1996
Fenóis Totais (MB)	Cromatógrafo a Gás Agilent - 655	Standard Methods 22 ^a Edição - 5530 - reagem com 4 aminopiridina
Tolueno (MB)		EPA 5021:1996
Xileno (MB)		EPA 5021:1996
Óleos e Graxas (MB)	Balança Analítica	Standard Methods 22 ^a Edição – 5520 D
Sólidos Suspensos	- 540	Standard Methods 22 ^a Edição – 2540 B,C,D e NBR 10.004
Matéria orgânica (S)	—	Titulométrico com permanganato* de potássio/LANARV – diferença
Matéria orgânica (L)		de cinzas

Tabela 2 - Metodologias de análise da fração orgânica (MB - massa bruta) e da matéria orgânica (S - solubilizado; L - lixiviado) presentes no lodo têxtil em estudo. *Ensaio acreditado pela ISO/IEC 17025.

Fonte: Acquaplant, 2014

A concentração de metais e outros elementos como cloretos, fluoretos, cianeto total, nitrato, sulfato e tensoativos também foi determinada para massa bruta (MB) de lodo, bem como no solubilizado (NBR 10006/2004) quanto no lixiviado (NBR 10005/2004) deste. Essas análises foram realizadas pela Acquaplant Soluções Ambientais, segundo o método de amostragem NBR 10007/2004. Como metodologias de análise, foram empregadas as estabelecidas nas normas relativas do Standard Methods (APHA, 2012).

3.6 Determinação do poder calorífico

O método utilizado para as análises do poder calorífico inferior e poder calorífico superior foi baseado na ASTM 240 - 87 e foi realizada pelo Laboratório de Ensaio BIOAGRI acreditado de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CRL 0172. Os equipamentos e os métodos utilizados estão na Tabela 3.

ANÁLISE	EQUIPAMENTO	MÉTODO
Poder Calorífico Inferior	Calorímetro - 043	ASTM 240 – 87
Poder Calorífico Superior	Calorímetro - 043	ASTM 240 – 87

Tabela 3 - Análise do poder calorífico.
Fonte: Acquaplant, 2013

Para o cálculo do poder calorífico inferior das biomassas cavaco e serragem de madeira foi empregada a Equação 7, conforme Avelar (2012), sendo que o valor do poder calorífico superior de cada biomassa foi fornecido pela empresa geradora do lodo deste estudo, cavaco e serragem de madeira

$$PCI = PCS - [600 (9.H/100)] \quad (\text{Equação 7})$$

Onde H é o teor de hidrogênio.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise química aproximada

Os resultados da análise aproximada, teor de sólidos totais, sólidos voláteis totais e umidade, são apresentados na Tabela 4 para as três biomassas avaliadas.

Amostra	Umidade (%)	Sólidos Totais (%)	Sólidos Fixos (%)	Sólidos Voláteis (%)	Cinzas (%)	Carbono Fixo (%)
Cavaco	41,29 ± 1,36	58,71 ± 1,36	2,41 ± 0,07	56,31 ± 1,39	4,10 ± 0,14	39,59 ± 1,29
Serragem	36,21 ± 0,81	63,79 ± 0,81	3,67 ± 0,39	60,12 ± 0,92	5,76 ± 0,62	34,12 ± 0,75
Lodo têxtil	52,11 ± 1,22	47,89 ± 1,66	11,93 ± 1,27	35,97 ± 1,72	25,13 ± 1,31	38,90 ± 1,92

Tabela 4 - Análise comparativa entre os resultados das biomassas analisadas.

Os materiais voláteis compreendem a parte do combustível que se desprende na forma de gases, quando o material é degradado em determinadas temperaturas, ou seja, são os responsáveis pela maior parte na geração de energia (AVELAR, 2012).

De acordo com a Tabela 4, comparando-se os resultados entre o lodo têxtil e as biomassas atualmente utilizadas pela empresa (cavaco e serragem de madeira), a umidade do lodo foi maior (52,11 %) em relação ao cavaco de madeira (41,29 %) e a serragem de madeira (36,21 %), respectivamente. Esta umidade influencia diretamente na queima

Porém, os teores de sólidos totais foram menores para o lodo têxtil (47,89 %) em relação ao cavaco de madeira (58,71 %) e a serragem de madeira (63,79 %). Os teores de sólidos voláteis também foram menores para o lodo têxtil (35,97 %) em

relação ao cavaco de madeira (56,31 %) e serragem de madeira (60,12 %), indicando assim menor geração de energia do lodo em relação as outras biomassas.

O teor de cinzas foi maior para o lodo têxtil (25,13 %) em relação ao cavaco de madeira (4,10 %) e serragem de madeira (5,76 %). Este elevado teor de cinzas é originado através do tratamento físico-químico e dos produtos utilizados, como o cal e o sulfato. O elevado teor de cinzas é desvantajoso, pois diminui a transferência de calor do combustível e aumenta a corrosão dos equipamentos utilizados no processo, uma vez que os minerais não participam da combustão da biomassa (LEITE, 2014).

O teor de cinzas é o material inerte que não produz calor, pois as cinzas não contribuem para o calor total liberado pela combustão (AVELAR, 2012).

4.2 Análise química elementar

Na Tabela 5 estão os resultados da análise elementar das biomassas estudadas juntamente com outras da literatura.

Biomassa	Carbono	Hidrogênio	Nitrogênio	Enxofre	Referência
	Média (%)				
Cavaco de madeira	41,86 ± 1,275	5,86 ± 0,065	0,10 ± 0,040	-	Autor (2015)
Serragem de madeira	36,87 ± 0,025	6,36 ± 0,345	0 ± 0,020	-	Autor (2015)
Lodo têxtil	6,62 ± 0,090	6,55 ± 0,535	0,79 ± 0,020	-	Autor (2015)
Pinus*	49,25	5,99	0,06	0,03	Menezes (2013)
Eucalipto*	49,00	5,87	0,30	0,01	Menezes (2013)
Casca de arroz*	38,24	4,40	0,80	0,06	Vieira (2012)
Pinheiro*	59,00	7,20	-	-	Vieira (2012)
Caroço de açaí*	46,00	6,00	0,80	-	Vieira (2012)
Lodo têxtil*	27,20	4,00	2,86	0,04	Borges (2008)
Serragem de Pinus*	52,00	6,07	0,28	-	Schurhaus (2007)

Tabela 5 - Resultados comparativos da análise elementar entre as biomassas deste estudo e outras da literatura*.

A análise comparativa dos resultados apresentados na Tabela 6 mostra que o lodo deste estudo apresentou teor de carbono muito baixo quando comparado aos valores das demais biomassas.

Essa menor quantidade de carbono no lodo têxtil em estudo é sustentada pelos dados que serão apresentados na Tabela 7 (baixo conteúdo de matéria orgânica) bem como pelos resultados da análise aproximada (Tabela 5), além de ser indicador de que esse resíduo apresente menor poder calorífico. A diferença encontrada entre o teor de carbono encontrado atualmente, muito menor em relação ao obtido por Borges (2008) reflete a alteração realizada no sistema de tratamento de efluentes da empresa em questão.

Contudo, o maior valor de hidrogênio do lodo têxtil, maior que todos as demais biomassas da Tabela 6, poderá compensar esse baixo percentual de carbono encontrado.

Quanto ao valor de nitrogênio, o teor apresentado pelo lodo têxtil só foi menor em relação ao do lodo de Borges (2008). Esse fato poderá influenciar nas emissões de óxidos de nitrogênio quando de sua combustão.

4.3 Estudo do comportamento térmico

A Figura 13 apresenta as curvas termogravimétrica (TG) e primeira derivada (DTG) obtidas para o cavaco de madeira sob condições de atmosfera oxidante - combustão.

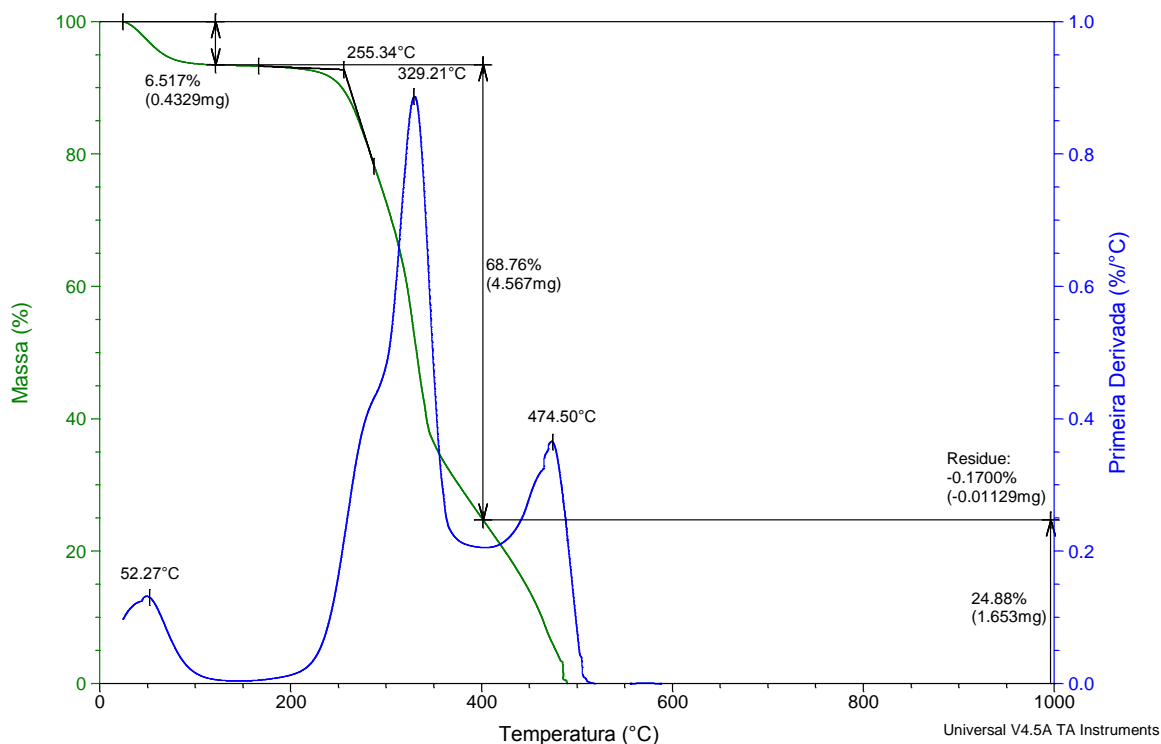


Figura 13 - Curvas TG e DTG obtidas por análise termogravimétrica para o cavaco de madeira.

Pode-se visualizar na Figura 13 três estágios de perda de massa. O primeiro estágio, com 6,5 % e T_{\max} igual a 52 °C, é atribuído a umidade presente no cavaco. O segundo estágio, mais pronunciado, de 68,8 %, com temperatura de degradação (T_{onset}) em 255 °C e T_{\max} igual a 329 °C. O terceiro estágio de 24,9 %, T_{\max} igual a 474 °C. O segundo e terceiros estágio estão relacionados a decomposição térmica de materiais voláteis e lignocelulósicos do cavaco. Observa-se que não houve resíduo ao final da análise, indicando que todo o material foi degradado até a temperatura de análise testada (1000 °C).

A Figura 14 apresenta o resultado da análise termogravimétrica da serragem de madeira sob condições de atmosfera oxidante - combustão.

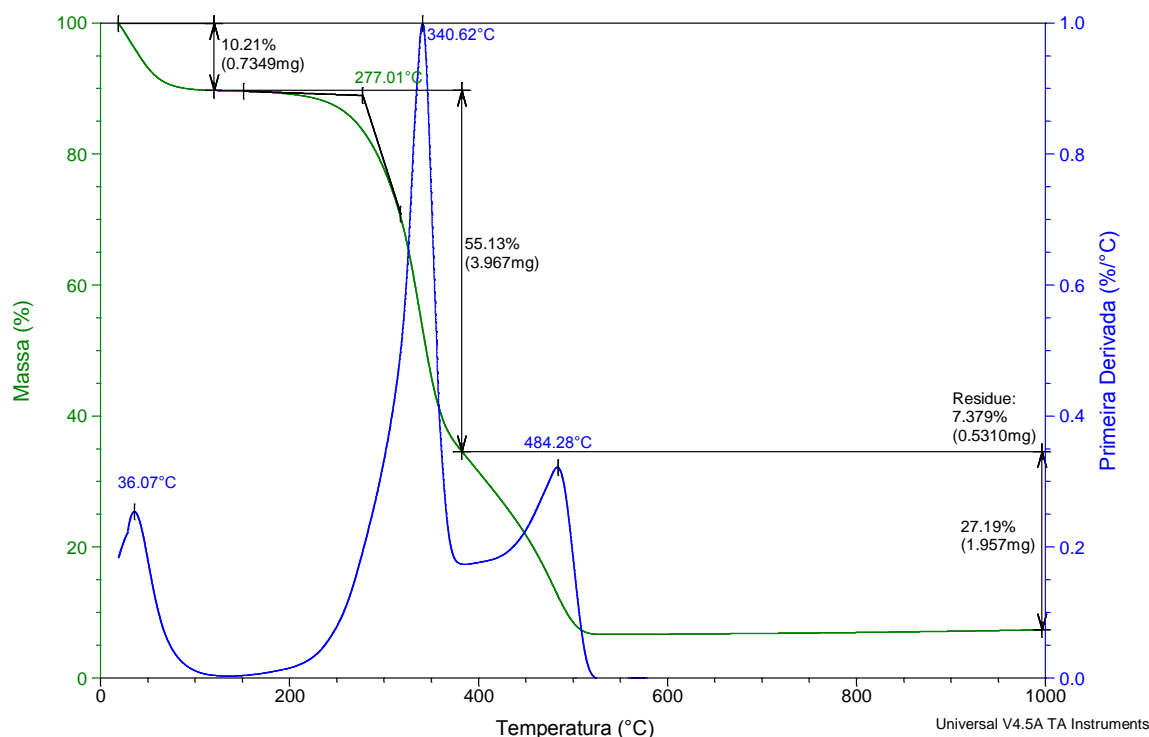


Figura 14 - Curvas TG e DTG obtidas por análise termogravimétrica para a serragem de madeira.

O perfil de decomposição da serragem (Figura 14) é semelhante ao do cavaco de madeira. Observa-se três estágios de perda de massa, sendo o primeiro, com 10,2 % e T_{\max} igual a 36 °C, atribuído a umidade presente na serragem, mostrando que a serragem possui um percentual de absorção de água bem superior ao cavaco, provavelmente devido à sua maior área superficial. No segundo estágio, mais pronunciado, de 55,1 %, quando houve a decomposição térmica de materiais voláteis e lignocelulósicos da serragem, com T_{onset} em 277 °C e T_{\max} igual a 341 °C. Observa-se que T_{\max} determinada para a serragem nesta região, foi 12 °C superior à T_{\max} observada para o cavaco, mostrando que a serragem é termicamente mais estável que o cavaco. O terceiro estágio, de 27,2 %, apresentou T_{\max} igual a 484 °C, sendo 10 °C superior à T_{\max} do cavaco, indicando maior estabilidade térmica que o cavaco. O teor de resíduo de cinzas determinado ao final da análise foi de 7,4 %, bem superior ao encontrado para o cavaco, indicando que uma parte do material não sofreu volatilização até a temperatura de análise testada (1000 °C).

A Figura 15 apresenta o resultado da análise termogravimétrica do lodo do têxtil sob condições de atmosfera oxidante - combustão.

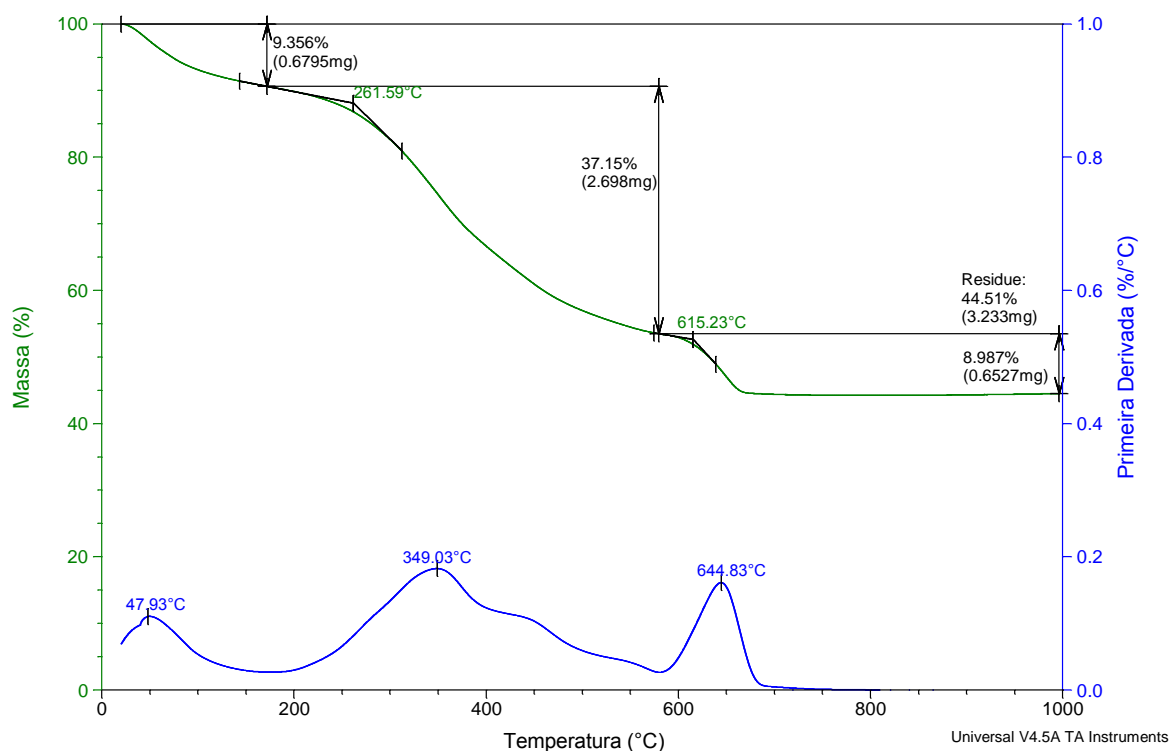


Figura 15 - Curvas TG e DTG obtidas por análise termogravimétrica para o lodo têxtil.

Pode-se observar três estágios de perda de massa, sendo o primeiro, de 9,4 % e T_{max} igual a 48 °C, atribuído a umidade presente no lodo. O segundo estágio de 37,2 %, com T_{onset} em 262 °C e T_{max} igual a 349 °C, a qual pode ser atribuído à presença de matéria orgânica, sendo menor do que para as demais biomassas, corroborando com a análise aproximada. O terceiro e último estágio de 8,9 %, com T_{onset} em 615 °C e T_{max} igual a 645 °C. O teor de resíduo determinado ao final da análise foi de 44,5 %, indicando um teor maior de material inorgânico presente na amostra, assim como verificado na análise aproximada.

Segundo Oliveira (2014), o lodo seco à 110 °C teve uma grande perda de massa (44,3 %), provavelmente relacionada ao excesso de água presente no lodo. O autor verificou que até 100 °C a perda de massa é equivalente a água livre contida no lodo, após essa temperatura, é relacionada à perda de água de constituição e presença de matéria orgânica.

Guedes (2012) realizou análises termogravimétricas de resíduos de lodos da indústria têxtil a fim de incorporá-los na fabricação de argamassas. Os estudos mostram três etapas importantes. Na primeira etapa, ocorre uma perda de massa de 44,3 % numa faixa de temperatura entre 28 °C e 76 °C, devido ao excesso de água presente no lodo. Na segunda etapa, ocorre uma perda de massa de 16 % na faixa

de temperatura entre 236 °C e 307 °C, a qual pode ser atribuída à presença de matéria orgânica e água de constituição. Finalmente, na terceira etapa, aconteceu uma estabilização da perda de massa numa temperatura superior a 500 °C, fato que pode ser atribuído à eliminação da matéria orgânica.

A Tabela 6 mostra os percentuais de perda de massa das biomassas e faixa de temperatura em que ocorrem, obtidos dos termogramas.

Biomassa	50 °C	350 °C	500 °C	650 °C	Resíduo
Perda de massa (%)					
Cavaco	6,5	68,8	24,9	-	0
Serragem	10,2	55,1	27,2	-	7,3
Lodo têxtil	9,4	37,2	-	8,9	44,5

Tabela 6 - Resultados das análises termogravimétricas das biomassas estudadas

De acordo com a Tabela 6, o lodo têxtil teve perda de massa maior (9,4 %) que o cavaco de madeira (6,5 %) na faixa de temperatura inicial (50 °C) e similar a serragem de madeira (10,2 %), devido ao teor de umidade presente na amostra e suas características higroscópicas.

No segundo estágio, em 350 °C, a perda de massa do lodo têxtil, foi menor (37,2 %) em relação ao cavaco (68,8 %) e serragem de madeira (55,1 %).

No terceiro estágio, em 500 °C, o lodo têxtil não apresentou perda de massa, enquanto o cavaco e a serragem de madeira tiveram perdas significativas (24,9 % e 27,2 %).

O lodo têxtil ainda apresentou um perda de massa de 8,9 % em 650 °C, diferente das outras biomassas analisadas (cavaco e serragem de madeira).

O resíduo do lodo têxtil (44,5 %) foi bem maior em relação ao cavaco de madeira, que não apresentou resíduo e a serragem de madeira (7,3 %).

A perda de massa total do lodo têxtil foi de 55,5%, o mesmo valor encontrado por Lucena (2012), de 55 %, e pouco abaixo do encontrado por Martinez (2014), que foi de 65 %.

4.4 Lodo têxtil - composição química

De acordo com Borges (2008), o lodo têxtil possui composição variável e, normalmente, contém teores elevados de matéria orgânica, nitrogênio (N), fósforo (P), micronutrientes, além de corantes com metais pesados e agentes patogênicos.

Quanto à composição química do lodo têxtil, foi realizada uma comparação dos valores do lodo têxtil deste trabalho, com as características de lodo têxtil descritas por diversos autores (ver Tabela 7).

A diferença nos processos produtivos têxteis proporciona a discrepância entre alguns resultados encontrados na Tabela 7. Os dados corroboram a informação de que os despejos desse tipo de indústria é extremamente dependente da diversidade existente entre as etapas de fabricação, insumos empregados, técnicas de tratamento de efluentes usadas, entre outros (BELTRAME, 2000).

O extrato lixiviado do lodo têxtil apresentou teores de ferro (0,009 mg/L) e manganês (0,051 mg/L), que não foram obtidos nos demais estudos descritos na Tabela 7.

Ainda no extrato lixiviado, o teor de mercúrio (0,0023 mg/L) foi maior que o encontrado por Fernandes (2007), ou seja, de 0,0001 mg/L. Os demais constituintes apresentaram concentrações inferiores aos limites do Anexo F estabelecidos pela NBR 10004 (ABNT, 2004) para análise de extratos lixiviados.

Nos extratos solubilizados, apenas o teor de fenol total (1,22 mg/L) foi maior que o obtido por Fernandes (2007), que foi de 0,36 mg/L. Os teores obtidos na composição química do lodo têxtil, abaixo do limite legal, também sugerem a possibilidade de uso como biomassa combustível em caldeira para geração de energia.

Parâmetros	Lodo têxtil	Oliveira (2014)	Leloup (2013)	Fernandes <i>et. al.</i> , (2007)	Rosa (2004)
Arsênio	L – < 0,005	—	—	L – 0,01	—
	S – < 0,005	—	—	S – 0,01	—
Alumínio	S – 0,595	—	—	—	—
Bário	L – 0,173	—	L – 1,077	L – 0,882	—
	S – 0,048	—	S – 0,301	S – 1,1	—
Benzeno	MB – 11,2	—	—	—	—
Cádmio	L – 0,001	L – 0,012	L – 0,003	L – 0,001	—
	S – < 0,001	S – 0,012	S – 0,007	S – 0,001	—
Chumbo	L – 0,011	L – 0,089	—	L – 0,01	MB – 20,96
	S – < 0,005	S – 0,092	—	S – 0,01	—
Cianeto	—	—	—	—	—
	S – < 0,005	—	—	S – 0,058	—
Cobre	S – 0,015	—	L – 0,017	—	MB – 40,14
	—	S – 0,023	S – 0,001	S – 0,005	—
Cromo	L – < 0,005	L – 0,071	L – 0,05	L – 0,01	MB – 6,01
	S – < 0,005	S – 0,084	S – 0,026	S – 1,2696	—
Fenol Total	MB – 9,3	—	—	—	—
	S – 1,22	—	—	S – 0,36	—
Ferro	MB – < 500	—	—	—	—
	L – 0,009	—	—	—	MB – 3942,87
	S – 0,007	S – 0,050	—	S – 1,62	—
Fluoreto	L – 0,21	—	—	—	MB – 5,84
	—	—	—	S – 1,25	—
Manganês	MB – 37,89	—	—	—	MB – 30,64
	L – 0,051	—	—	—	—
	S – 0,023	S – 0,024	—	S – 1,6	—
Molibdênio	MB – 0,696	—	—	—	—
Matéria Orgânica	L – 21 - 25	—	—	—	—
	S – 5	—	—	—	—
Mercúrio	L – 0,0023	—	—	L – 0,0001	MB – 0,082
	—	—	—	S – 0,0001	—
Níquel	—	—	L – 0,118	—	MB – 7,56
	—	S – 0,062	S – 0,055	—	—
Prata	L – < 0,005	—	L – 0,777	L – 0,005	—
	S – < 0,005	—	S – 0,009	S – 0,005	—
Selênio	L – < 0,005	—	—	L – 0,008	—
	S – < 0,005	—	—	—	—
Tolueno	MB – < 0,1	—	—	—	—
Xileno	MB – 12,6	—	—	—	—
Zinco	—	—	L – 4,402	—	MB – 937,7
	S – 0,058	S – 0,015	S – 0,123	S – 0,041	—

Tabela 7 - Composição química de lodos têxteis. (MB) massa bruta, em mg/kg; (L) lixiviado, em mg/L; (S) solubilizado, em mg/L.

4.5 Determinação do poder calorífico

Os resultados obtidos na determinação do poder calorífico inferior e poder calorífico superior para o lodo têxtil bem como para o do estudo de Borges (2008) e Pasquini (2014) encontram-se na Tabela 8.

Análise	Lodo têxtil* kcal/kg (MJ/kg)	Borges (2008) kcal/kg (MJ/kg)	Pasquini (2014) kcal/kg (MJ/kg)
Poder Calorífico Inferior	2.100 (~8,80)	3.675 (~15,4)	4.418 (~18,5)
Poder Calorífico Superior	2.275 (~9,53)	4.057 (~17,0)	4.920 (~20,6)

Tabela 8 - Resultados da análise do poder calorífico para o lodo têxtil atual e o lodo têxtil de outros estudos.

*Fonte: Acquaplant, 2013

Verificando-se os valores de PCI e PCS do lodo têxtil mostrados na Tabela 8, pode-se constatar que são menores do que os encontrados por Borges (2008) e Pasquini (2014). Segundo Campreguer (2005), a aplicação industrial para o lodo é considerada crítica quando a ênfase assumida é o seu baixo poder calorífico, devido principalmente à umidade do material *in natura*, requerendo preliminarmente deságue ou secagem, para atingir um teor de sólidos da ordem de 30 a 35 %, para a possibilidade de uma combustão autosustentável.

A Tabela 9 mostra os valores de PCI encontrados para as biomassas cavaco e serragem de madeira, com base nos valores de PCS fornecidos pela empresa e calculados conforme Avelar (2012).

Análise	Cavaco de madeira* kcal/kg (MJ/kg)	Serragem de madeira* kcal/kg (MJ/kg)
Poder Calorífico Inferior	1.922 (~8,04)	1.421 (~5,95)
Poder Calorífico Superior	2.239 (~9,37)	1.765 (~7,39)

Tabela 9 - Resultados da análise do poder calorífico para o cavaco de madeira e a serragem de madeira. *Base úmida: 50 %,

Para completar essa discussão, a Tabela 10 apresenta valores de PCI de algumas das biomassas mais comuns empregadas no mercado industrial como combustível.

Combustível	Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)
Lenha (40 % água)*	2.400
Bagaço de cana (40 % água)*	2.130
Cavaco de eucalipto (20 % água)*	4.300
Cavaco de pinus (40 % água)*	2.500
Serragem de pinho (40 % água)*	2.000
Serragem seca (20 % água)*	3.500
Lodo têxtil (40 % água)	2.100

Tabela 10 - Resultados comparativos entre o poder calorífico inferior de algumas biomassas comuns empregadas como combustíveis e o lodo têxtil deste estudo.

Fonte: *Centrais Elétricas Brasileiras (FUPAI/EFFICIENTIA, 2005).

Comparando os valores de PCI e PCS do lodo têxtil deste estudo com os valores das biomassas cavaco e serragem de madeira (Tabela 10), estes são similares.

Considerando os valores apresentados na Tabela 10, o lodo têxtil em estudo apresenta potencial de geração de energia similar às biomassas comumente empregadas no mercado.

A empresa têxtil geradora do lodo analisado, utiliza as biomassas cavaco e serragem de madeira (separados ou em mistura) com teor de umidade entre 40 e 50 %, em suas caldeiras para produção de vapor. Desse modo, tecnicamente, os resultados aqui apresentados indicam a possibilidade de se utilizar o lodo têxtil sob investigação, contanto que seu teor de umidade seja igual ou inferior ao das biomassas já usadas.

4.6 Emissões provenientes da queima das biomassas

Não ocorreram emissões significativas de NO_2 , SO_2 e CO_2 durante a queima das biomassas.

Os resultados das medições de gases de combustão (CO , NO e NO_x) gerados na queima das três biomassas, apresentados nas Figuras 16, 17 e 18, respectivamente, podem ser comparados de modo a indicar se o lodo teria maior impacto ambiental devido à emissão atmosférica em relação às outras duas biomassas de madeira.

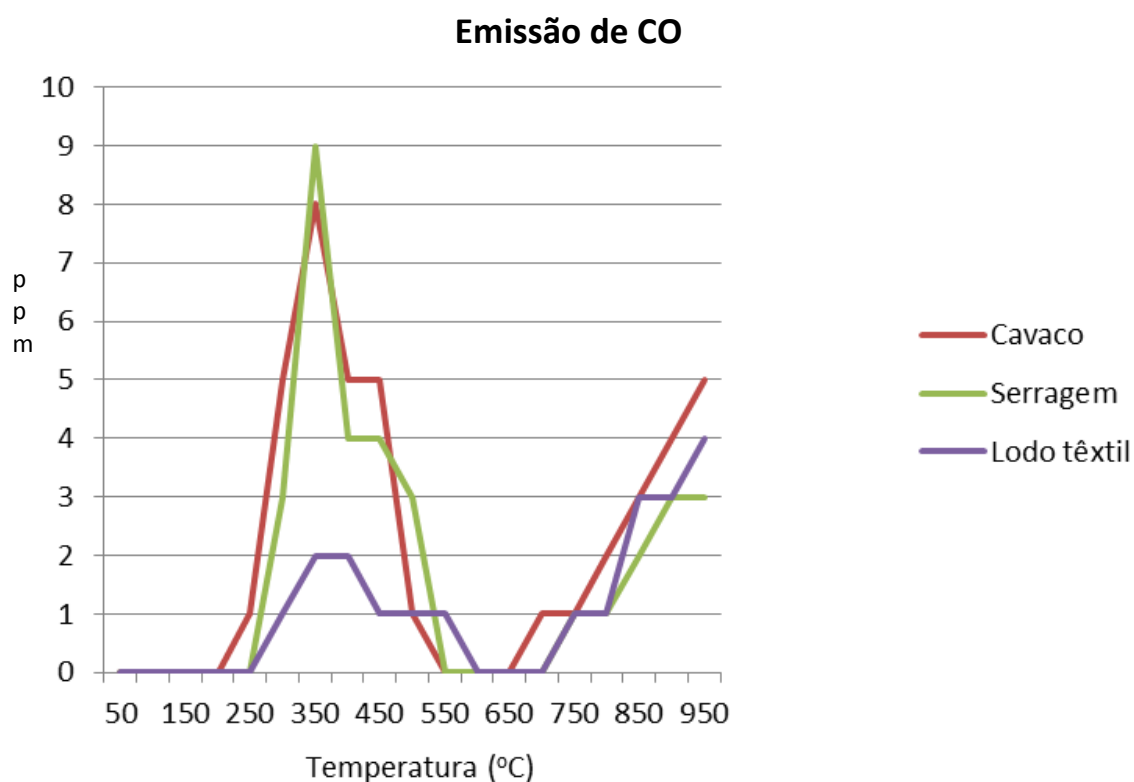


Figura 16 - Emissões de CO geradas durante as queimas das biomassas.

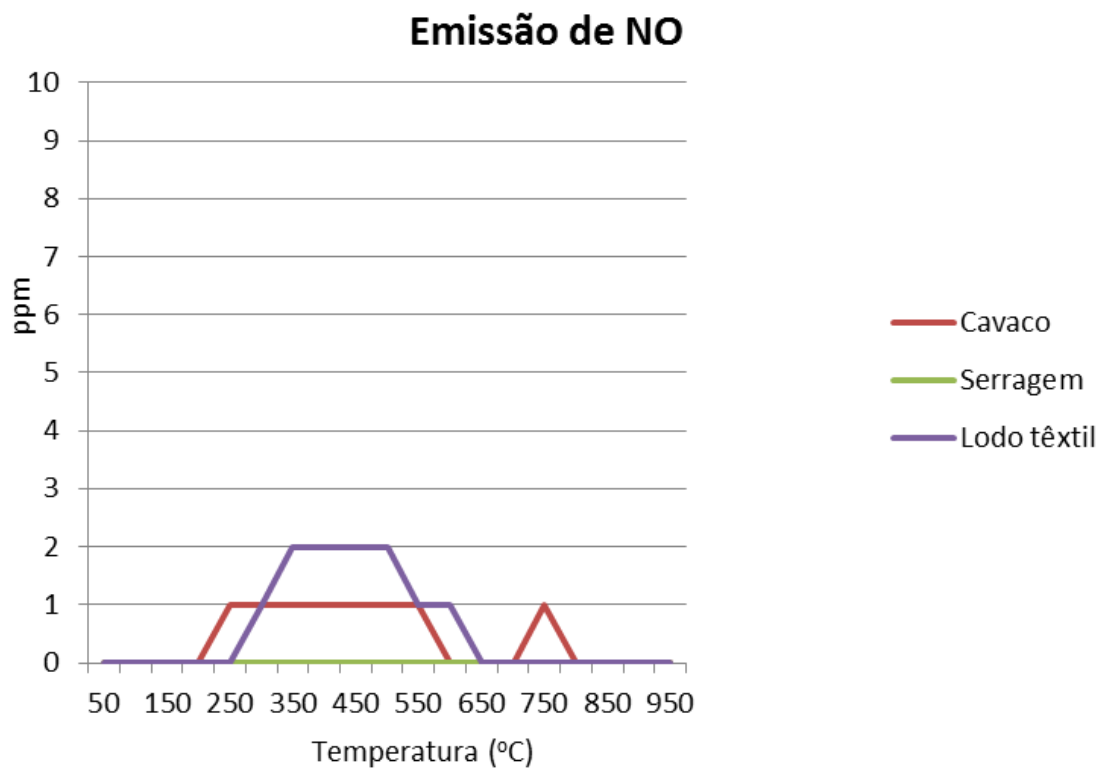


Figura 17 - Emissões de NO geradas durante as queimas das biomassas.

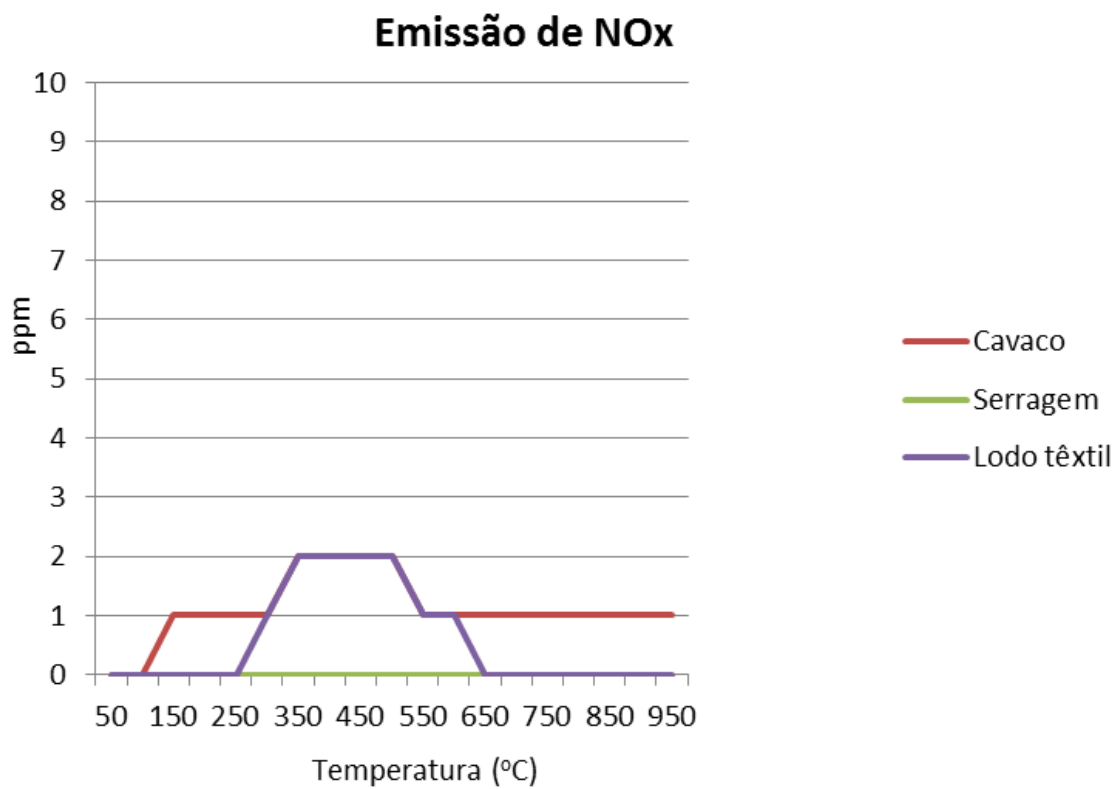


Figura 18 - Emissões de NOx geradas durante as queimas das biomassas.

Avaliando-se conjuntamente as concentrações dos gases de combustão emitidos pelas três biomassas analisadas, cavaco de madeira, serragem de madeira e lodo têxtil (Figuras 16, 17 e 18), pode-se observar que o teor de CO foi maior para as biomassas cavaco e serragem de madeira, atualmente empregadas pela empresa. Já em relação aos gases NO e NO_x, a concentração emitida pelo lodo têxtil foi maior, o que pode estar ligado a um conteúdo maior de nitrogênio presente neste, conforme apresentado na Tabela 5.

De modo geral, pode-se dizer que quanto às emissões gasosas, o uso do lodo seria melhor, visto que as emissões de NO/NO_x podem ser controladas por um melhor ajuste da caldeira quanto às condições operacionais da combustão bem como ao uso de queimadores mais eficientes.

Entretanto, análise de emissão de material particulado (MP), hidrocarbonetos (HC) e compostos orgânicos voláteis (COV) pela queima desses materiais deve ser efetuada, de modo a melhor estabelecer seu impacto sobre a qualidade do ar e o atendimento aos padrões de emissão definidos em legislação pertinente.

4.7 Considerações sobre viabilidade econômica do uso do lodo têxtil como biomassa combustível

Além dos resultados obtidos, apresentados e discutidos nos itens anteriores, e apesar de não ter sido tratada como um objetivo específico deste trabalho devido às dificuldades de obtenção da totalidade de informações necessárias para realização de um estudo econômico de viabilidade, considerou-se adequado apresentar, uma estimativa das implicações econômicas da utilização do lodo têxtil como combustível.

Assim, considerando o custo de R\$ 25,00 por metro cúbico, tanto de cavaco como de serragem de madeira, e o consumo mensal de 8.237 metros cúbicos de biomassa, seja individualmente ou misturadas, dependendo da disponibilidade e

condição de estocagem pela empresa, o gasto com esse consumo é de R\$ 208.175,00 ao mês.

Quanto ao lodo têxtil, de acordo com as informações fornecidas pelas empresas proprietárias de aterros industriais e empresas responsáveis pelo transporte dos resíduos (frete), considerou-se como base os custos de destinação e transporte de R\$ 213,00 por tonelada. Considerando este custo de R\$ 213,00 por tonelada vezes a quantidade mensal de lodo têxtil gerado, tem-se o custo total de R\$ 74.788,00 mensais para disposição final.

Comparando os valores supracitados, verifica-se que o custo da aquisição das biomassas chega a ser quase o triplo dos gastos com a destinação do lodo.

Contudo, o teor de umidade do lodo analisado, variando de 52 % (neste trabalho) a 70 % (laudo de laboratório externo), mais a necessidade de adequação da sua alimentação na caldeira e estocagem, não podem ser desprezados. Com isso, a inicial desvantagem financeira do consumo de biomassas frente ao decarte do lodo, pode ser invertida drasticamente, dependendo do que seria necessário para realizar a adequação do uso do lodo como combustível.

CONCLUSÃO

A geração de lodo e a consequente necessidade de seu descarte final tem sido um dos problemas que tem exigido das indústrias maneiras de reduzir essa geração ou, não sendo possível, de valorizar esse resíduo.

Neste contexto, especificamente quanto ao lodo têxtil, a grande diversidade de composição química, função dos diversos tipos de processos de beneficiamento e da grande variedade de substâncias químicas necessárias, os corantes, por exemplo, aliados ao sistema de tratamento de efluente adotado, há a necessidade de se realizar estudos personalizados para alternativas de reúso.

Essa realidade demonstra que definir um meio de reutilizar o lodo têxtil não é simples e exige estudos aprofundados frente às aplicações citadas na literatura científica como para novas propostas.

A utilização como biomassa combustível tem sido uma das mais estudadas até o presente momento, não apenas por conta do problema acima apresentado, como pela necessidade de se obter alternativas renováveis para geração de energia frente à escassez dos combustíveis fósseis.

Mas, para uma substância poder ser considerada um combustível, esta deve apresentar determinadas características, mais especificamente seu poder calorífico, que deve ser o maior possível para que esse uso seja viável.

Esse caráter de combustibilidade é dependente da composição do material, a qual deve ser constituída pelos elementos carbono e hidrogênio e, por conseguinte, como matéria orgânica em maior proporção às demais possibilidades químicas.

O lodo aqui avaliado como biomassa combustível, apesar de não apresentar composição química e comportamento térmico esperados das biomassas mais empregadas pela indústria, apresentou poder calorífico similar ao das duas biomassas usadas pela empresa têxtil que disponibilizou o lodo para este estudo.

Esse fato, mais a possibilidade de redução de custos com disposição final do resíduo e de aquisição de matéria-prima para a combustão, permitir considerar que há viabilidade de se empregar o lodo têxtil como biomassa combustível.

Contudo, para que essa conclusão possa passar de viabilidade para efetivo emprego, faz-se necessário a continuação de estudo para que as seguintes questões encontradas no presente trabalho, citando-se, principalmente, a variação da composição química, a alta umidade que o lodo final apresenta, sua estocagem e forma de alimentação na caldeira, a possibilidade de mistura do lodo com as biomassas utilizadas pela empresa, possam ser respondidas.

As questões supracitadas se tornam, portanto, sugestões para a continuidade dos trabalhos realizados neste trabalho.

Finalmente, apesar da importância dessa busca por alternativas de fontes energéticas renováveis, a principal maneira de se conduzir o problema da geração de resíduos deve ser, se eliminar não for possível, reduzir a geração do lodo na fonte, ou seja, atuar de forma preventiva e não somente reativa como se vem fazendo por muitas décadas no Brasil, diferentemente do que acontece nos países melhor industrializados como os europeus.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Resíduos sólidos: classificações**. NBR 10004, 2ª Ed., 2004.

ALENCAR, A. E.; BRINGER, R. M.; SOARES, J. B.; DE SOARES, S. **Efeito da presença de aditivos nas propriedades reológicas do ligante aAsfáltico modificado por EVA**. 18 Encontro de Afalto, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás IBP, Rio de Janeiro, Brasil, 1:1- 6, 2006.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Biomassa**, Capítulo 5. Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa\(2\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa(2).pdf). Acesso em: Fevereiro de 2014.

APHA - American Public Health Association. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22nd Ed., Washington, DC, USA, 2012.

ARAÚJO, A. S. F; MONTEIRO, R. T. R; CARDOSO, P. F. **Composto de lodo têxtil em plântulas de soja e trigo**. Pesq. agropec. bras., Brasília, v. 40, n. 6, p. 549-554, 2005.

ASIF, M.; MUNEEER, T. **Energy supply, its demand and security issues for developed and emerging economies**. School of Engineering, Renewable and Sustainable Energy Reviews 11, Elsevier, 2007.

ASTM. E 871 - 82. **Standard test method moisture analysis of particulate wood fuels**, 2013.

_____. E 872 - 82. **Standard test method for volatile matter in the analysis of particulate wood fuels**, 2006.

_____. E 1755-01. **Standard test method for ash in biomass**, 2007

_____. E 1756-08. **Standard test method for determination of total solids in biomass**, 2008.

ASSUNÇÃO, J. V.; PESQUERO, C. R. **Dioxinas e furanos: origens e riscos**. Caderno de Saúde Pública. v. 33, p. 523 - 530, 1999.

AVELAR, N. V. **Potencial dos resíduos sólidos da indústria têxtil para fins energéticos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, 2012.

BALESTIERI, J. A. P. **Cogeração - geração combinada de eletricidade e calor**. Editora da UFSC. Florianópolis, 2002.

BARBIERI, J. C. **Desenvolvimento e meio ambiente: as estratégias de mudança da Agenda 21**. Editora Vozes, Petrópolis, 2009.

BAZZO, E.; HILA, F.; OBA, R.; POSSAMAI, T. S. **Balanço energético de Santa Catarina: setor industrial, ano base 2006-2012**. UFSC, Lab: CET. Florianópolis, 2014.

BELTRAME, L. T. C. **Caracterização de efluente têxtil e proposta de tratamento**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2000.

BIZZO, A. W. **Geração, distribuição e utilização de calor**. Livro combustão (Cap. 1). UNICAMP. Disponível em <http://www.fem.unicamp.br/~em672/GERVAP1.pdf>. Acesso em: Abril de 2014.

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, n. 17, v. 27, 2008.

BRAND, M. A.; MUNIZ, G. I. B.; BRITO, J. O.; QUIRINO, W. F. **Influência das dimensões da biomassa estocada de pinus taeda l. e eucalyptus dunnii maiden na qualidade do combustível para geração de energia**. Revista Árvore, v. 38, n. 1, p. 175-183, Viçosa, 2014.

Brasil Têxtil. **Relatório Setorial da Indústria Brasileira**. IEMI - Instituto de Estudos e Marketing Industrial Ltda. São Paulo, 2013.

CARVALHO, J. A.; MCQUAY, M. Q. **Princípios de combustão aplicada**. Editora da UFSC, Florianópolis, 2007.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS, FUPAI/EFFICIENTIA. **Eficiência energética no uso de vapor**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução Nº 258** de 26 de Agosto de 2009.

DAGDOUGUI, H. **Models, methods and approaches for the planning and design of the future hydrogen supply chain**. Int. J. Hydrogen Energy 37, 5318, 2012.

DANTAS, T. L. P. **Decomposição de peróxido de hidrogênio em um catalisador híbrido e oxidação avançada de efluente têxtil por reagente fenton modificado**. Dissertação. Pós- graduação em Engenharia Química do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, 2005.

DEMIRBAS, A. **Combustion characteristics of different biomass fuels**. Progress in Energy and Combustion Science, v. 30, p. 219 - 230, 2004.

DERÍSIO, J. C. **Introdução ao controle da poluição ambiental**. 2ª Ed., CETESB, São Paulo, 2002.

DE SENA, R. F. **Avaliação da biomassa obtida pela otimização da flotação de efluentes da indústria de carnes para geração de energia**. Dissertação de Mestrado. EQA/UFSC, Florianópolis, 2005.

ESTEVES, G. R. T. **Estimativa dos efeitos da poluição atmosférica sobre a Saúde Humana: algumas possibilidades metodológicas e teóricas para a cidade de São Paulo**. 2011. Disponível em <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd25/estimativa.pdf>. Acesso em: Abril de 2014.

FERNANDES, A. K. S.; SILVA, L. A. P.; ARAÚJO, A. L. C. **Avaliação de desempenho e caracterização de resíduos sólido gerado em uma estação de tratamento de efluente têxtil**. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Anais Eletrônicos. ABES, Belo Horizonte, 2007.

FERNANDES, E. R. K. **Valorização de resíduos gerados na bananicultura por conversão termoquímica por pirólise**. Dissertação de Mestrado, Engenharia de Processos, Universidade da Região de Joinville, Univille, 2012.

FERNANDES, E. R. K.; MARANGONI, C.; SOUZA, O.; SELLIN, N. **Thermochemical characterization of banana leaves as a potential energy source**. Energy Conversion and Management, v. 75, p. 603-608, 2013.

FIESC - Federação das Indústrias do Estado de Santa Catarina. **Indústria têxtil e do vestuário de Santa Catarina**. Disponível em http://www2.fiescnet.com.br/web/pt/site_topo/pei/info/textil-e-vestuario. Acesso em: Setembro de 2014.

FORNARO, A.; GUTZ, I. G. R. **Wet deposition and related atmospheric chemistry in the São Paulo metropolis, Brazil: Part 3**. Trends in precipitation chemistry during 1983 - 2003 period, Atmos. Environ. 40, 5893-5901, 2006.

GANSKE, C. C. F. **Análise do desempenho da estação de tratamento de efluente têxtil e a viabilidade de utilização do lodo na agricultura**. Dissertação de Mestrado, Engenharia de Processos, Universidade da Região de Joinville, Univille, 2008.

GARCIA, R.; PIZZARO, C.; LAVÍN, A. G.; BUENO, J. L. **Characterization of Spanish biomass wastes for energy use**. Bioresource Technology. v. 103, p. 249-258, 2012.

GOLDEMBERG, J. **Biomassa e energia**. Quím. Nova, São Paulo , v. 32, n. 3, 2009.

GUARIEIRO, L. L. N.; VASCONCELLOS P. C.; SOLCI, M.C. **“Poluentes atmosféricos provenientes da queima de combustíveis fósseis e biocombustíveis: uma breve revisão”**. São Paulo. Rev. Virtual Quim. 2011. Disponível em: <http://www.uff.br/RVQ/index.php/rvq/article/viewFile/188/198>. Acesso em: Outubro de 2012.

GUEDES, B. F. R. **Desenvolvimento de argamassa com incorporação de lodo de indústria têxtil visando a aplicação sustentável na construção civil**.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, 2012.

HASSEMER, M. E. N.; SENS, M. L. **Tratamento do efluente de uma indústria têxtil. Processo físico-químico com ozônio e coagulação/floculação.** Revista engenharia sanitária e ambiental, v. 7, n. 1, p. 30-36, Rio de Janeiro, 2002.

IEA - International Energy Agency. **2014 IEA Annual Report.** Disponível em: <http://www.iea.org/publications/freepublications>. Acesso em: Fevereiro de 2015.

_____. **Key World Energy Statistics, Edition 2014.** Disponível em: <http://www.iea.org/publications/freepublications>. Acesso em: Fevereiro de 2015.

IPCC – Intergovernmental Panel of Climate Change. **Climate Change 2014: Synthesis Report.** Disponível em: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full.pdf. Acesso em: Fevereiro de 2015.

LEITE, A. D. **A Energia do Brasil.** Elsevier, 2ª Ed., Rio de Janeiro, 2007.

LEITE, E. R. S.; PROTÁSIO, T. P.; ROSADO, S. C. S.; TRUGILHO, P. F.; TONOLIS, G. H. D.; BUFALINO, L. **Avaliação da qualidade da madeira de *coffea arábica* L. como fonte de energia.** CERNE, v. 20 n. 4, p. 541-549, 2014.

LELOUP, W. A. **Efeito da adição de lodo têxtil e cinzas de lenha gerados no APL de confecções pernambucano em argamassas de cimento Portland.** Dissertação de Mestrado, Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, 2013.

LUCENA, L. C. F. L. **Estudo da aplicação da mistura solo-lodo em base e sub-base de pavimentos.** Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

MAIA, B. G. O. **Valorização de resíduos na bananicultura e rizicultura na produção de briquetes.** Dissertação de Mestrado, Engenharia de Processos, Universidade da Região de Joinville, Univille. 2013.

MARTINEZ, J. G. **Avaliação de desempenho de misturas betuminosas com adição de lodos de ETA e de ETE.** Dissertação de Mestrado, Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2014.

MARTINS, S. M. A.; KÄFFER, M. I.; LEMOS, A. **Líquens como bioindicadores da qualidade do ar numa área de termelétrica, Rio Grande do Sul, Brasil.** Hoehnea 35 (3): 425 - 433, 2008.

MELO, M. O. B. C.; CAVALCANTI, G. A.; GONÇALVES, L. S.; DUARTE, S. T. **Inovações tecnológicas na cadeia produtiva têxtil: análise e estudo de caso em indústria no nordeste do Brasil.** Revista Produção, v. 7, n. 2, p. 99-117, Florianópolis, 2007.

MENEZES, M. J. S. **Poder calorífico e análise imediata da maravalha de pinus (*pinus sp*) e araucária (*araucaria angustifolia*) de reflorestamento como resíduos de madeira.** Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2013.

MIRANDA, I. C. **Aproveitamento energético a partir de resíduos de biomassa: bagaço e palha de cana-de-açúcar.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Princípios de termodinâmica para engenharia.** Rio de Janeiro: Editora LTC, 4ª Ed., 2006.

OLIVEIRA, A. G. **Estudo das propriedades mecânicas do lodo textil para fins de utilização em pavimentos rodoviários.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, 2014.

PASQUINI, N. C. **Uso potencial como fonte de energia de lodo proveniente de esgoto doméstico e industrial.** Revista Ciências Exatas e Naturais, v. 16, n. 1, 2014.

Política Nacional de Resíduos Sólidos - Lei Nº 12.305. 2 de agosto de 2010, Brasília, 2010.

POTTER, M. C.; SCOTT, E. P. **Termodinâmica.** Thomson Learning, São Paulo, 2006.

PRONOBIS, M. **The influence of biomass co-combustion on boiler fouling and efficiency.** Fuel 85, p. 474-480, 2006.

RIBEIRO, A. J. **Modificação de um processo de lodos ativados para tratamento de efluentes têxteis com ênfase no controle de formas de nitrogênio.** Dissertação de Mestrado, Engenharia de Processos, Universidade da Região de Joinville, Univille. 2011.

RICHTER, C. A. **Tratamento de lodos de estações de tratamento de água.** Editora Edgard Blücher Ltda. São Paulo, 2011.

ROSA, E. V. C. **Reaproveitamento de lodo têxtil em solo florestal: estudos dos aspectos físico-químicos, agrônômicos e ecotoxicológicos.** Tese. Pós-Graduação em Química . UFSC, Florianópolis, 2004.

SCHURHAUS, P. **Produtos e propriedades energéticas da madeira.** Centro Universitário de União da Vitória, UNIUV, 2007.

SILVA, V. **Desenvolvimento de biocompósitos de poli (3-hidroxi-butirato-CO-3-hidroxi-valerato) (PHBV) com resíduo de madeira.** Dissertação de Mestrado, Engenharia de Processos, Universidade da Região de Joinville, Univille. 2009.

SINDITÊXTIL. **Guia técnico ambiental da indústria têxtil - série P+L.** São Paulo, 2009.

SOUZA, F. A. D. **Gestão de estoques em indústrias de fios têxteis.** Dissertação de Mestrado, Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2009.

TAVARES, S. R. L.; SANTOS, T. E. **Uso de diferentes fontes de biomassa vegetal para produção de biocombustíveis sólidos.** Artigo. Holos, ano 29, v. 5, p. 19-27, 2013.

TORREIRA, R. P. **Geradores de vapor.** Companhia Melhoramentos. São Paulo, 1995.

UEDA, A. C. **Aplicação de micelas reservas na remoção de corantes.** Dissertação. Programa de Pós Graduação em Engenharia Química do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Estado de Santa Catarina, UFSC, 2006.

VASQUES, A. R. **Caracterização de adsorventes obtidos por combustão e pirólise de lodo residual e aplicação no tratamento de efluentes têxteis.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.

VIANA, F. L. E. **A indústria têxtil e de confecções do nordeste: características, desafios e oportunidades.** Fortaleza, 2008.

VIDAL, A. C. F.; DA HORA, A. B. **Perspectivas do setor de biomassa de madeira para a geração de energia.** BNDES Setorial 33, Papel e Celulose, p. 261-314, 03/2011. Disponível em: http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Institucional/Publicacoes/Consulta_Expressa/Setor/Energia/201103_08.html. Acesso em: Agosto de 2014.

VIEIRA, A. C. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas.** Dissertação de Mestrado, Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Unioeste, 2012.

VIEIRA, G. **Estudo das propriedades física, química e estrutural da cerâmica vermelha como substituição de parte dos agregados por lodo proveniente da indústria têxtil.** Dissertação de Mestrado, Engenharia de Processos, Universidade da Região de Joinville, Univille. 2010.

VIRMOND, E. **Aproveitamento do lodo de tratamento primário de efluentes de um frigorífico como fonte de energia.** Dissertação de Mestrado, Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, 2007.