



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
DE RECURSOS NATURAIS DA AMAZÔNIA

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA COMPUTACIONAL PARA
AVALIAÇÃO DE LODO DE ESGOTO SANITÁRIO COMO
BIOMASSA NA GERAÇÃO DE ENERGIA**

YVELYNE BIANCA IUNES SANTOS

Belém
2012



Programa de Pós-Graduação em Engenharia
de Recursos Naturais da Amazônia

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA COMPUTACIONAL PARA
AVALIAÇÃO DE LODO DE ESGOTO SANITÁRIO COMO
BIOMASSA NA GERAÇÃO DE ENERGIA**

Yvelyne Bianca Iunes Santos

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Recursos Naturais.

Orientador: José Almir Rodrigues Pereira

Belém

Junho de 2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Instituto de Tecnologia/Programa de Pós-graduação em
Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia

Santos, Yvelyne Bianca lunes

Desenvolvimento de sistema computacional para avaliação de lodo de esgoto sanitário como biomassa na geração de energia/ Yvelyne Bianca lunes Santos; orientador, José Almir Rodrigues Pereira . _ Belém - 2012

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, 2012

1 Lodo de esgoto 2 . Biomassa 3. Energia I. Título

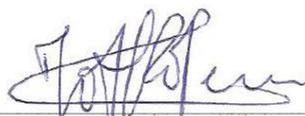
CDD 22.ed. 628.3

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DE LODO DE ESGOTO SANITÁRIO COMO BIOMASSA NA GERAÇÃO DE ENERGIA

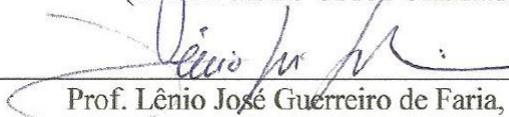
Yvelyne Bianca Iunes Santos

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS DA AMAZÔNIA (PRODERNA/ITEC) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS.

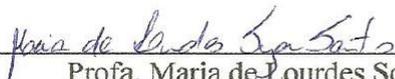
Aprovada por:



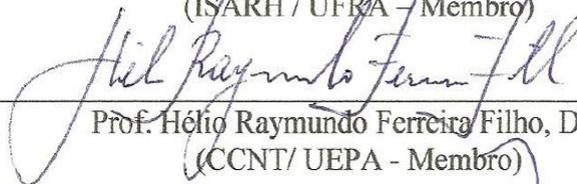
Prof. José Almir Rodrigues Pereira, D.Sc.
(PRODERNA/ UFPA-Orientador)



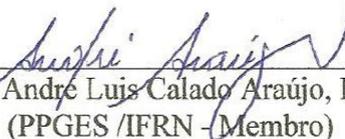
Prof. Lênio José Guerreiro de Faria, D.Eng.
(FEQ / UFPA-Membro)



Profa. Maria de Lourdes Souza Santos, D.Sc.
(ISARH / UFPA - Membro)



Prof. Hélio Raymundo Ferreira Filho, D.Sc.
(CCNT/ UEPA - Membro)



Prof. André Luis Calado Araújo, D.Sc.
(PPGES /IFRN - Membro)

BELÉM, PA - BRASIL
JUNHO DE 2012

*O problema perde força quando encontra amor.
Ao meu esposo André Clementino e minhas
filhas Ana Carolina e Maria Fernanda, luzes na
minha vida.*

AGRADECIMENTOS

À Deus e à N.Sra. de Nazaré, pela inspiração e iluminação sempre concedidas nos momentos mais difíceis.

Ao meu marido André, pela compreensão, paciência, apoio e amor que sempre me dedicou em todos os momentos, e às minhas princesinhas Ana Carolina e Maria Fernanda que, mesmo sem entenderem minha ausência em alguns momentos, souberam, dos seus jeitinhos, contornar a saudade e aceitar que todo sofrimento é passageiro.

Aos meus pais Bichara e Bena, por toda a ajuda com as minhas filhas, incentivo, apoio incondicional em todos os momentos e pela educação moral e religiosa que sempre me conduziram na escolha de meus caminhos e atitudes.

Aos meus sogros João e Sheila, pela imensurável ajuda e amor para com minhas filhas sem os quais não seria possível a realização deste trabalho, por todo seu apoio e carinho a mim concedidos, e pelo valioso exemplo de vida que nos inspira todos os dias na fé e na superação de nossos próprios limites.

Ao meu orientador José Almir Rodrigues Pereira, por ter acreditado na realização deste trabalho, pela sua orientação segura, ensinamentos, apoio e amizade desenvolvida ao longo deste trabalho.

Ao primo Ricardo, pela ajuda no decorrer do trabalho; e ao amigo Gilson, pelo incansável auxílio no desenvolvimento do sistema computacional.

À professora Maria Brasil, pelo especial auxílio na solicitação de patente para o método e sistema desenvolvido neste trabalho.

Aos professores Evaristo Resende, André Montenegro, Norma Ely, Hélio Ferreira e Renata Melo, pelo incentivo na realização deste trabalho.

Ao professor André Mesquita, por acreditar em meu potencial de pesquisa e ter orientado meu ingresso no PRODERNA; e aos professores Augusto Brasil, Lênio Faria, Maria de Lourdes e Eloi Favero, por contribuírem com seus conhecimentos para melhorar e enriquecer este trabalho.

À UEPA, pelo financiamento de meu estudo através da concessão de bolsa de pós-graduação.

A todos os demais familiares, professores, amigos e instituições, que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Resumo da Tese apresentada ao PRODERNA/UFGA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Recursos Naturais (D.Eng.)

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DE LODO DE ESGOTO SANITÁRIO COMO BIOMASSA NA GERAÇÃO DE ENERGIA

Yvelyne Bianca Iunes Santos

Junho/2012

Orientador: José Almir Rodrigues Pereira

Área de Concentração: Uso de Recursos Naturais

Desenvolvimento de sistema computacional para avaliação de lodo de esgoto sanitário como biomassa na geração de energia em processos de combustão, considerando normas técnicas e ambientais brasileiras. No sistema foram criadas e implementadas classes para avaliação do potencial energético do lodo e considerados limites estabelecidos nas normas NBR 10004/04, NBR 10004/87 e Resolução nº 316/2002 do CONAMA para impactos ambientais adversos, danos ou riscos à saúde pública, identificando a viabilidade de aplicação desse resíduo como biomassa na geração de energia em processos de combustão. O sistema foi desenvolvido com padrão de arquitetura de software *Model-View-Controller* (MVC), com método representado por regras de lógica, tendo como dados de entrada os resultados de determinações laboratoriais de amostras de lodo de esgoto, processamento em testes e encadeamentos lógicos das regras e relatórios para possibilitar a tomada de decisão do usuário. Para a validação do sistema foram utilizados resultados de trabalhos técnicos de aplicação de lodo de esgoto como biomassa na geração de energia em escala experimental, sendo constatado como adequados os parâmetros adotados no sistema para avaliar o potencial energético do lodo amostrado, a toxicidade e a poluição atmosférica; que as mensagens de alerta e explicativas foram claramente emitidas; que o encadeamento lógico das regras foi executado progressivamente; e que os valores obtidos no sistema foram compatíveis com os dos trabalhos utilizados para validação. Finalizando, foi concluído que o sistema desenvolvido pode ser aplicado para agilizar a tomada de decisão, especialmente em estações de tratamento de esgoto com grande volume de lodo.

Palavras-chave: potencial energético; combustão; biomassa; lodo de esgoto; sistema computacional.

Abstract of Thesis presented to PRODERNA/UFPA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Natural Resources Engineering (D.Eng.)

DEVELOPMENT OF COMPUTATIONAL SYSTEM TO ASSESS SEWAGE SLUDGE SANITARY AS BIOMASS TO GENERATE ENERGY

Yvelyne Bianca Iunes Santos

June/2012

Advisor: José Almir Rodrigues Pereira

Research Area: Use of Natural Resources

Development of a computational system to assess sewage sludge sanitary as biomass to generate energy in combustion processes, taking into account Brazilian technical and environmental norms. Classes were created and implemented in the system to assess sewage sludge as energy potential and considered limits established in the norms NBR 10004/04, NBR 10004/87 and CONAMA Resolution nº 316/2002 for adverse environmental impacts, damages or risks to public health, identifying the feasibility of use of this residual as biomass to generate energy in combustion processes. The system was developed using a *Model-View-Controller* (MVC) software considered an architectural pattern, with method represented by logical rules, whose input data were the results from laboratory determination of sewage sludge samples, test processing and logical sequence of rules, and reports to enable the user to make a decision. To validate the system it was used results from technical work on the use of sewage sludge as biomass to generate energy in experimental scale, observing that the limits adopted in the system were appropriate as parameters to evaluate the energy potential of the sampled sludge, its toxicity and air pollution; that the explanatory and alert messages have been clearly sent; that the logical sequence of rules had been progressively implemented; and that the values obtained in the system had been compatible with the validation works. Finally, it was concluded that the system developed may be used to expedite decision-making, mainly, in waste treatment plant with large quantities of sludge.

Keywords: energy potential; combustion; biomass; sewage sludge; computational system

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1. MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	19
1.2. OBJETIVOS E HIPÓTESE.....	27
1.2.1. Objetivos	27
1.2.2. Hipótese	27
1.3. CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA.....	28
1.4. ESTRUTURAÇÃO DO TEXTO.....	28
2. BIOMASSA COMO FONTE DE ENERGIA ALTERNATIVA	30
2.1. PANORAMA E PERSPECTIVAS DA ENERGIA NO BRASIL.....	30
2.2. FONTES RENOVÁVEIS DE ENERGIA.....	34
2.2.1. Energia alternativa	34
2.2.2. Vantagens e desvantagens das fontes de energia renovável	36
2.3. BIOMASSA PARA ENERGIA.....	39
2.3.1. Classificação da biomassa	40
2.3.2. Vantagens e desvantagens da biomassa como fonte renovável de energia	41
2.3.3. Caracterização da biomassa	42
2.3.3.1. Composição química elementar.....	43
2.3.3.2. Composição química imediata.....	43
2.3.3.3. Poder calorífico.....	46
2.3.4. Tecnologias de aproveitamento da biomassa	49
2.3.4.1. Combustão direta	51
2.3.4.2. Pirólise.....	55
2.3.4.3. Gaseificação.....	57
2.3.4.4. Biodigestão.....	58
2.3.5. Poluentes atmosféricos	64
2.3.6. Legislações ambientais	67
2.3.6.1. Legislação Federal.....	67
2.3.6.2. Legislação no Paraná.....	73
2.3.6.4. Legislação em São Paulo.....	74
2.3.6.5. Legislação em Minas Gerais.....	75

2.3.6.6. Legislação no Pará.....	75
3. LODO DE ESGOTO COMO BIOMASSA NA GERAÇÃO DE ENERGIA.....	76
3.1. ORIGEM E CLASSIFICAÇÃO.....	76
3.1.1. Origem.....	76
3.1.2. Classificação.....	77
3.2. PRINCIPAIS CONTAMINANTES.....	79
3.2.1. Metais pesados.....	80
3.2.2. Agentes patogênicos.....	81
3.2.3. Contaminantes orgânicos.....	81
3.3. GERENCIAMENTO E DISPOSIÇÃO FINAL.....	82
3.4. LODO DE ESGOTO COMO BIOMASSA NA GERAÇÃO DE ENERGIA EM PROCESSOS DE COMBUSTÃO.....	85
3.4.1. Avaliação do potencial energético.....	87
3.4.1.1. Composição química elementar do lodo.....	87
3.4.1.2. Poder calorífico do lodo.....	93
3.4.1.3. Composição química imediata do lodo.....	93
3.4.2. Avaliação da toxicidade	95
3.4.3. Avaliação de emissões gasosas e material particulado.....	97
3.5. LODO DE ESGOTO COMO BIOMASSA NA GERAÇÃO DE ENERGIA EM PROCESSOS DE GASEIFICAÇÃO E PIRÓLISE.....	100
3.5.1. Gaseificação do lodo de esgoto.....	100
3.5.3. Pirólise do lodo de esgoto.....	101
4. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA COMPUTACIONAL.....	103
4.1. ASPECTOS TÉCNICOS, AMBIENTAIS E NORMATIVOS CONSIDERADOS	105
4.2. DESENVOLVIMENTO DE CLASSIFICAÇÃO PARA O LODO QUANTO AO POTENCIAL ENERGÉTICO.....	105
4.2.1. Cálculo do poder calorífico inferior do lodo.....	106
4.2.2. Classificação para o lodo quanto ao potencial energético.....	108
4.2.2.1. Lodos Classe I.....	108
4.2.2.2. Lodos Classe II.....	110
4.2.2.3. Lodos Classe III e IV.....	110

4.3. DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO PARA AVALIAR LODO DE ESGOTO SANITÁRIO COMO BIOMASSA NA GERAÇÃO DE ENERGIA EM PROCESSOS DE COMBUSTÃO.....	111
4.4. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA COMPUTACIONAL.....	117
4.4.1. Padrão de arquitetura <i>Model-View-Controller</i> (MVC).....	117
4.4.2. Ferramentas computacionais utilizadas para desenvolvimento do sistema...	119
4.4.3. Componentes do sistema computacional desenvolvido.....	119
4.4.3.1. Interface de aquisição e base de conhecimento.....	119
4.4.3.1. Interface de usuário e motor lógico.....	133
5. TESTE E VALIDAÇÃO DO SISTEMA COMPUTACIONAL.....	137
5.1. TESTE E VALIDAÇÃO UTILIZANDO O TRABALHO DE MACEDO (2006)..	138
5.2. TESTE E VALIDAÇÃO UTILIZANDO O TRABALHO DE BORGES (2008)....	145
5.3. TESTE E VALIDAÇÃO UTILIZANDO O TRABALHO MORAES (2006).....	151
5.4. TESTE E VALIDAÇÃO UTILIZANDO O TRABALHO VIRMOND (2007).....	156
5.5. RESUMO DOS RESULTADOS DOS TESTES E VALIDAÇÃO DO SISTEMA COMPUTACIONAL.....	164
6. CONCLUSÕES.....	171
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	173
REFERÊNCIAS.....	174
APÊNDICE A- LISTAGEM EMITIDA PELO SISTEMA DAS VARIÁVEIS PARA AVALIAÇÃO DE LODO DE ESGOTO SANITÁRIO COMO BIOMASSA NA GERAÇÃO DE ENERGIA.....	184
APÊNDICE B- LISTAGEM EMITIDA PELO SISTEMA DAS REGRAS DE LÓGICA CADASTRADAS NA BASE DE CONHECIMENTO PARA AVALIAÇÃO DE LODO DE ESGOTO SANITÁRIO COMO BIOMASSA NA GERAÇÃO DE ENERGIA	187

APÊNDICE C- RELATÓRIOS DE RESULTADOS E DE LÓGICA EMITIDOS PELO SISTEMA NOS TESTES REALIZADOS.....	200
C.1- RELATÓRIO DE RESULTADOS E DE LÓGICA DO TRABALHO DE MACEDO (2006).....	201
C.2- RELATÓRIO DE RESULTADOS E DE LÓGICA DO TRABALHO DE BORGES (2008).....	208
C.3- RELATÓRIO DE RESULTADOS E DE LÓGICA DO TRABALHO DE MORAES (2006).....	214
C.4- RELATÓRIO DE RESULTADOS E DE LÓGICA DO TRABALHO DE VIRMOND (2007).....	220
ANEXO A - ANEXO F DA NBR 10004/2004 - CONCENTRAÇÃO – LIMITE MÁXIMO NO EXTRATO OBTIDO NO ENSAIO DE LIXIVIAÇÃO.....	226

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-	Cadeia da energia.....	35
Figura 2-	Diagrama esquemático dos processos de conversão energética da biomassa.....	50
Figura 3-	Diagrama esquemático dos processos de conversão energética da biomassa (lodo de esgoto) até o produto final (calor e eletricidade).....	51
Figura 4-	Matriz que define o conteúdo de sólidos de um resíduo.....	59
Figura 5-	Fluxograma da etapa 1 do método para avaliar lodo de esgoto sanitário como biomassa para gerar energia em processos de combustão.....	112
Figura 6-	Fluxograma da etapa 2 do método para avaliar lodo de esgoto sanitário como biomassa para gerar energia em processos de combustão.....	113
Figura 7-	Fluxograma da etapa 3 do método para avaliar lodo de esgoto sanitário como biomassa para gerar energia em processos de combustão.....	113
Figura 8-	Fluxograma da etapa 4 do método para avaliar lodo de esgoto sanitário como biomassa para gerar energia em processos de combustão.....	114
Figura 9-	Fluxograma das etapas 5 do método para avaliar lodo de esgoto sanitário como biomassa para gerar energia em processos de combustão.....	115
Figura 10-	Fluxograma da etapa 6 do método para avaliar lodo de esgoto sanitário como biomassa para gerar energia em processos de combustão.....	116
Figura 11-	Fluxograma geral do método desenvolvido para avaliar lodo de esgoto sanitário como biomassa para gerar energia em processos de combustão.	116
Figura 12-	Relação entre <i>Model</i> , <i>View</i> e <i>Controller</i>	118
Figura 13-	Modelo MVC para o sistema computacional desenvolvido.....	119
Figura 14-	Tela inicial do sistema computacional: acesso a interface de aquisição do sistema.....	121
Figura 15-	Funcionamento da interface de aquisição.....	121
Figura 16-	Resumo das dez primeiras regras de lógica cadastradas no sistema.....	128
Figura 17-	Interface de aquisição do sistema computacional.....	132
Figura 18-	Tela inicial do sistema computacional: acesso a interface de usuário do sistema.....	133
Figura 19-	Interface de usuário do sistema computacional.....	134
Figura 20-	Funcionamento da interface de usuário e do motor lógico.....	135
Figura 21-	Arquitetura do sistema computacional.....	136
Figura 22-	Tela de entrada de dados do sistema computacional.....	170

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-	Consumo final de energia no Brasil.....	30
Tabela 2-	Relação entre as diversas bases.....	44
Tabela 3-	Composição elementar da biomassa (base seca).....	45
Tabela 4-	Composição imediata da biomassa (base seca).....	45
Tabela 5-	Poder calorífico superior (base seca).....	48
Tabela 6-	Caracterização padrão de combustíveis.....	49
Tabela 7-	Limites de inflamabilidade de alguns combustíveis em ar.....	54
Tabela 8-	Comparação entre o poder calorífico do biogás e outros gases.....	61
Tabela 9-	Consumo e pressão do biogás para algumas de suas utilizações.....	62
Tabela 10-	Relação de consumo de biogás em equipamentos para uma residência com cinco pessoas.....	63
Tabela 11-	Limites de contaminantes para amostras brutas de resíduos sólidos....	68
Tabela 12-	Padrões de qualidade do ar no Brasil.....	69
Tabela 13-	Limites máximos de emissão para o co-processamento de resíduos em fornos de clínquer.....	71
Tabela 14-	Limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos em sistemas de tratamento térmico.....	72
Tabela 15-	Concentrações médias de alguns metais pesados do lodo de ETE no Brasil	81
Tabela 16-	Relação entre teor de sólidos secos, umidade e as propriedades mecânicas no lodo.....	90
Tabela 17-	Relação da umidade do lodo com o poder calorífico.....	91
Tabela 18 -	Limite máximo no lixiviado.....	97
Tabela 19 -	Limites de contaminantes para amostras brutas de resíduos sólidos.....	97
Tabela 20-	Parâmetros de emissões gasosas (mg/m ³).....	99
Tabela 21-	Limites do poder calorífico inferior do lodo de esgoto para suas possíveis aplicações em processos de combustão.....	109
Tabela 22-	Tabela de classificação do lodo quanto ao potencial energético.....	111
Tabela 23-	Dados de entrada do trabalho de Macedo (2006): composição elementar	138
Tabela 24-	Dados de entrada do trabalho de Macedo (2006): poder calorífico.....	138
Tabela 25-	Dados de entrada do trabalho de Macedo (2006):toxicidade no lixiviado	139

Tabela 26-	Dados de entrada do trabalho de Macedo (2006): toxicidade na amostra bruta	139
Tabela 27-	Dados de entrada do trabalho de Macedo (2006): poluição atmosférica...	139
Tabela 28-	Resumo comparativo dos resultados da avaliação do potencial energético obtidos por Macedo (2006) e pelo sistema computacional.....	143
Tabela 29-	Resumo comparativo dos resultados da avaliação de corrosão e incrustações em equipamentos obtidos por Macedo (2006) e pelo sistema computacional.....	144
Tabela 30-	Resumo comparativo dos resultados da avaliação de toxicidade obtidos por Macedo (2006) e pelo sistema computacional.....	144
Tabela 31-	Resumo comparativo dos resultados da avaliação da poluição atmosférica obtidos por Macedo (2006) e pelo sistema computacional.....	145
Tabela 32-	Dados de entrada do trabalho de Borges (2008): composição elementar	145
Tabela 33-	Dados de entrada do trabalho de Borges (2008): composição imediata.	146
Tabela 34-	Dados de entrada do trabalho de Borges (2008): poder calorífico.....	146
Tabela 35-	Dados de entrada do trabalho de Borges (2008): poluição atmosférica.....	146
Tabela 36-	Resumo comparativo dos resultados da avaliação do potencial energético obtidos por Borges (2008) e pelo sistema computacional.....	150
Tabela 37-	Resumo comparativo dos resultados da avaliação de corrosão e incrustações em equipamentos obtidos por Borges (2008) e pelo sistema computacional	150
Tabela 38-	Resumo comparativo dos resultados da avaliação da poluição atmosférica obtidos por Borges (2008) e pelo sistema computacional.....	150
Tabela 39-	Dados de entrada do trabalho de Moraes (2006): composição elementar..	151
Tabela 40-	Dados de entrada do trabalho de Moraes (2006): poder calorífico.....	151
Tabela 41-	Dados de entrada do trabalho de Moraes (2006): toxicidade no lixiviado.	152
Tabela 42-	Dados de entrada do trabalho de Moraes (2006): toxicidade na amostra bruta	152
Tabela 43-	Resumo comparativo dos resultados da avaliação do potencial energético obtidos por Moraes (2006) e pelo sistema computacional.....	154
Tabela 44-	Resumo comparativo dos resultados da avaliação de corrosão e incrustações em equipamentos obtidos por Moraes (2006) e pelo sistema computacional	155
Tabela 45-	Resumo comparativo dos resultados da avaliação de toxicidade obtidos por Moraes (2006) e pelo sistema computacional	155
Tabela 46-	Resumo comparativo dos resultados da avaliação da poluição atmosférica obtidos por Moraes (2006) e pelo sistema computacional.....	156
Tabela 47-	Dados de entrada do trabalho de Virmond (2007): composição elementar	157

Tabela 48-	Dados de entrada do trabalho de Virmond (2007): poder calorífico.....	157
Tabela 49-	Dados de entrada do trabalho de Virmond(2007): toxicidade na amostra bruta	157
Tabela 50-	Dados de entrada do trabalho de Virmond (2007): poluição atmosférica..	158
Tabela 51-	Resumo comparativo dos resultados da avaliação do potencial energético obtidos por Virmond (2007) e pelo sistema computacional.....	162
Tabela 52-	Resumo comparativo dos resultados da avaliação de corrosão e incrustações em equipamentos obtidos por Virmond (2007) e pelo sistema computacional.....	163
Tabela 53-	Resumo comparativo dos resultados da avaliação de toxicidade obtidos por Virmond (2007) e pelo sistema computacional.....	163
Tabela 54-	Resumo comparativo dos resultados da avaliação da poluição atmosférica obtidos por Virmond (2007) e pelo sistema computacional...	164
Tabela 55-	Resumo dos resultados da avaliação do potencial energético.....	165
Tabela 56-	Resumo dos resultados da avaliação de corrosão e incrustações em equipamentos	166
Tabela 57-	Resumo dos resultados da avaliação da toxicidade.....	167
Tabela 58-	Resumo dos resultados da avaliação da poluição atmosférica.....	168

LISTA DE QUADROS

Quadro 1-	Consumo de eletricidade na rede- consumo por classe (TWh).....	33
Quadro 2-	Principais vantagens e desvantagens das fontes de energia renovável.....	36
Quadro 3-	Composição média da mistura gasosa do biogás.....	60
Quadro 4-	Exemplo mostrando valores calculados de poder calorífico por tonelada de lodo úmido.....	92
Quadro 5-	Operadores lógicos e matemáticos aceitos pelo sistema para criação de regras de lógica.....	120
Quadro 6-	Opções para entrada de dados da composição elementar, composição imediata e poder calorífico.....	124

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1-	Oferta interna de energia elétrica por fonte no Brasil– 2009	31
Gráfico 2-	Consumo final energético no Brasil, por setor	32
Gráfico 3-	Oferta Interna de Energia no Brasil.....	34

NOMENCLATURA

LISTA DE ABREVIATURAS

BEN	Balanco Energético Nacional
BC	Base de Conhecimento
b.s.	Base Seca
ETE	Estações de Tratamento de Esgotos
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
HAB	Habitantes
HTML	<i>HyperText Markup Language</i> (Linguagem de Marcação de Hipertexto)
IDE	Ambiente Integrado de Desenvolvimento
MPT	Material Particulado Total
MVC	<i>Model-View-Controller</i> (Modelo- Visão- Controle)
MS	Massa Seca
NBR	Norma Brasileira
OIE	Oferta Interna de Energia
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
PNE	Plano Nacional de Energia
PND	Parâmetro Não Determinado
RMB	Região Metropolitana de Belém
TEP	Toneladas Equivalente de Petróleo

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIE	Agência Internacional de Energia
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CCME	<i>Canadian Council of Minister of the Environment</i> (Conselho de Ministros de Meio Ambiente do Canadá)

CEDAE-RJ	Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
IPPC	<i>European Commission Integrated Pollution Prevention and Control</i> (Comissão Europeia de Controle e Prevenção Integrado de Poluição)
MME	Ministério de Minas e Energia
PRONAR	Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar
PROSAB	Programa de Pesquisas em Saneamento
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SAMAE	Agência Municipal de Água e Esgoto de São Bento do Sul- SBS
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Paraná
SEMA	Secretaria de Estado de Meio Ambiente
SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SNVS	Sistema Nacional de Vigilância Sanitária
SUASA	Sistema Unificado de Atenção à Sanidade Agropecuária
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i> (Agência Americana de Proteção Ambiental)

1. INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

A demanda total por energia apresenta-se em constante crescimento no mundo, impulsionada, principalmente pelo crescimento acelerado dos países em desenvolvimento e pela modernização tecnológica ao alcance da população, comércio e indústrias. Segundo o Ministério de Minas e Energia- MME, a demanda total de energia no Brasil (OIE)¹ atingiu 251,5 milhões de tep (toneladas equivalentes de petróleo) em 2008, correspondente ao consumo per capita de 1,34 tep/hab/ano, montante 5,3% superior ao verificado em 2007 e equivalente a cerca de 2% da energia mundial (MME- RESENHA ENERGÉTICA BRASILEIRA, 2009).

Ricupero (2004) previu que o consumo mundial de energia passará de menos de 9 bilhões de tep, para 25 a 30 bilhões de tep no ano 2050. Somando a esse cenário, observam-se as instabilidades políticas e sociais dos países produtores de petróleo, cujas reservas, dentro de algumas décadas, entrarão em depleção (GOLDEMBERG, 2004). Nesse contexto, a produção de energia a partir de fontes renováveis constitui preocupação cada vez mais crescente e urgente.

A Agência Internacional de Energia (AIE) calcula que, em aproximadamente 20 anos, cerca de 30% do total da energia consumida pela humanidade será proveniente das fontes renováveis, que hoje representam 14% da energia produzida no mundo (CORTEZ *et al.*, 2008). Entre as fontes renováveis de energia destaca-se a biomassa que, atualmente, é responsável por 31,5% da oferta interna de energia no Brasil e 9,73% no mundo (MME-BEN, 2009).

A produção de energias elétrica e térmica, a partir de biomassas, atualmente é muito defendida como alternativa importante para países em desenvolvimento e, segundo Goldemberg (2009), as projeções para o futuro indicam que a importância da biomassa tende a aumentar, chegando a representar no fim do século 21 de 10 a 20% de toda a energia usada pela humanidade.

¹A energia que movimenta a indústria, o transporte, o comércio e demais setores econômicos do país recebe a denominação de Consumo Final no BEN (Balanço Energético Nacional). No BEN, assim como nos balanços energéticos de outros países, a soma do consumo final de energia, das perdas na distribuição e armazenagem e das perdas nos processos de transformação recebe a denominação de Oferta Interna de Energia – OIE, também, denominada de demanda total de energia. A estrutura da OIE por energético é comumente chamada de Matriz Energética (MME, 2010).

No Brasil, cerca de 30% das necessidades energéticas é suprida pela biomassa sob a forma de lenha para queima direta em padarias e cerâmicas; carvão vegetal para redução de ferro gusa em fornos siderúrgicos e combustíveis alternativos nas fábricas de cimento; bagaço de cana nas usinas de açúcar e álcool; e lixívia negra nas indústrias de celulose e papel para geração de vapor para produção de eletricidade (AMBIENTE BRASIL, 2005 *apud* BORGES, 2008)

Dentre as biomassas que podem gerar, simultaneamente, energia elétrica e calor útil, o lodo proveniente de sistemas de tratamento de esgoto, denominado genericamente de lodo de esgoto, tem chamado atenção de pesquisadores². De acordo com a NBR nº 10.004/2004, o lodo de esgoto é classificado como resíduo sólido.

Essa norma define resíduos sólidos como resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição, e coloca ainda que, ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT, 2004).

A mesma norma ainda classifica o lodo de esgoto como, resíduo Classe IIA, não perigosos e não inertes, mas caso sejam muito contaminados por efluentes industriais, podem ter características de Classe I, perigosos. Para Andreoli (2008), os lodos são sólidos biológicos compostos principalmente de células de bactérias que se alimentam da matéria orgânica, proveniente do esgoto onde se concentram os principais agentes patogênicos e metais pesados do esgoto-biossólidos.

De uma maneira geral, o lodo de esgoto pode ser caracterizado como material bastante rico em matéria orgânica, com alto teor de umidade e com concentração relativamente elevada de minerais. Segundo Silva *et al.*(2001), os principais contaminantes do lodo são

² Pesquisadores de diversas regiões do país vêm dedicando atenção ao estudo do lodo como biomassa na geração de energia como exemplo têm-se Vieira (2004), que ganhou o prêmio Mercosul de Ciência e Tecnologia 2004 com o trabalho “ Fontes alternativas de energia - Processo aperfeiçoado de conversão térmica”; Cassini (2003), coordenador do livro “Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás” resultante de projeto financiado pelo Programa de Pesquisas em Saneamento –Prosab; além de diversas teses e dissertações disponíveis nas principais instituições de ensino superior do país e artigos publicados em eventos de grande projeção nacional e internacional disponíveis em meio eletrônico.

agrupados, de forma genérica, em metais pesados, poluentes orgânicos variados e microrganismos patogênicos. A presença desses poluentes/ contaminantes no lodo é muito variável e depende das características do esgoto bruto e do sistema de tratamento.

Os lodos que se acumulam no sistema, devem ser periodicamente ou continuamente descartados, de acordo com o processo de tratamento utilizado na fase líquida, sendo que a qualidade e a quantidade do lodo produzido em uma estação de tratamento de esgoto estão relacionadas com a vazão e as características do esgoto, com o tipo de tratamento e com as condições operacionais da ETE (FERREIRA *et al.*, 1999).

O tratamento e a adequada disposição final deste resíduo representam problema complexo, que pode ter reflexos negativos sobre o solo, a água, o ar, a fauna, a flora e a saúde humana. Gutierrez e Machado (2002) afirmam que, na maioria das ETEs projetadas ou em construção na Região Metropolitana de Belém (RMB), o gerenciamento do lodo consiste no desaguamento em leitos de secagem e disposição final em aterro sanitário. Essas autoras citam ainda que há nesta região um grande número de tanques sépticos instalados em propriedades particulares e que o custo de transporte e as dificuldades de fiscalização das atividades de remoção e disposição final, contribuem para que o lodo removido dessas unidades de tratamento primário seja, em muitos casos, lançados diretamente no ambiente (em especial nos cursos d'água), o que ocasiona poluição/contaminação do meio físico e prejuízos para a biota e para o homem.

Cunha (2009) estima que, na RMB, no ano de 2009, foram gerados 73.183 m³ e 8.294 m³ de lodo desaguado proveniente de tanques sépticos e de ETEs, respectivamente, e que de 2010 a 2030, ter-se-á na RMB um volume total em torno de 1.163.417 m³ provenientes de ETEs e 536.444 m³ de tanques sépticos, concluindo que a partir de 2011 faltará espaço disponível para disposição final de resíduos sólidos no Aterro Sanitário do Aurá.

Segundo Macedo (2008), com a conclusão da ampliação do sistema de esgotamento sanitário da Baía de Guanabara, a Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro (CEDAE-RJ) terá produção de lodo da ordem de 300 t/dia em base seca. Semura (2008) estimou que, com o término da segunda etapa do Projeto Tietê, em 2010, o volume na produção de lodos de ETEs do Sistema Principal da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo - SABESP na Região Metropolitana de São Paulo, seria de 475 t/dia e Moraes (2006) colocou que, para o ano de 2015, esta mesma região produzirá cerca de 785 t/dia em base seca deste resíduo.

Segundo Andreoli e Pinto (2001), a produção de lodo no Brasil está estimada entre 150 mil e 220 mil toneladas de matéria seca por ano. Devido aos baixos índices de coleta e

tratamento de esgoto ainda existentes no país e à pressão da sociedade por melhores condições ambientais, há uma potencial tendência de ocorrer um incremento substancial na quantidade de lodo a ser disposto na próxima década. Estes mesmos autores citam que a população urbana brasileira está estimada em 116 milhões de habitantes, porém apenas 32 milhões têm seu esgoto coletado, o qual se fosse integralmente tratado, acarretaria uma produção de 325 mil a 473 mil toneladas por ano de lodo.

Como a geração de lodo vem aumentando de ano para ano e as atividades de remoção e disposição final adequada deste resíduo, com a devida fiscalização não vem acompanhando este crescimento, muitas vezes esse resíduo é lançado de forma indiscriminada na natureza, transformando córregos e rios em verdadeiros esgotos a céu aberto (MELO e MARQUES, 2000).

A crescente quantidade de produção de lodo e os impactos ambientais negativos ressaltam a grande dimensão e complexidade da problemática do gerenciamento do lodo. A importância desta prática foi reconhecida pela Agenda 21, que inclui o tema “Manejo ambientalmente saudável dos resíduos sólidos e questões relacionadas com esgotamentos”, definindo as seguintes orientações para sua gestão: a redução da produção, o aumento máximo da reutilização e da reciclagem e a promoção de depósitos e tratamento ambientalmente saudáveis.

Embora a gestão do resíduo seja bastante complexa e os custos com gerenciamento do lodo estejam entre 20% a 60% do total gasto com a operação de uma estação de tratamento de esgoto (ANDREOLI *et al.*, 2001), o planejamento e a execução do destino final têm sido frequentemente negligenciados nos países em desenvolvimento, incluindo o Brasil. Muitas vezes, os projetos de estações de tratamento simplesmente ignoram a forma de destino desse material, que acaba sendo gerenciado em situação emergencial, com altos custos financeiros e ambientais, comprometendo, em alguns casos, os benefícios de todo o sistema de coleta e tratamento de esgotos (ANDREOLI e PINTO, 2001).

O destino final do lodo é, portanto, uma atividade de grande importância e que extrapola os limites das estações de tratamento, exigindo a integração com outros setores da sociedade. Segundo a legislação de diversos países, e mesmo a brasileira, a responsabilidade pelos problemas que podem ser causados pelo destino inadequado é dos produtores do resíduo, que podem ser enquadrados na lei de crimes ambientais (BRASIL, 2010).

As exigências crescentes da sociedade e das agências ambientais por melhores padrões de qualidade ambiental tem se refletido nos gestores públicos e privados dos serviços de

saneamento. Os órgãos ambientais de alguns estados, por exemplo, passaram a exigir a definição técnica da disposição final do lodo nos processos de licenciamento das ETEs.

Dentre as formas de disposição final do lodo de esgoto, Lara *et al.* (2001) citam que, dependendo de suas características e do tratamento específico, este resíduo pode ser reciclado na agricultura, utilizado na recuperação de áreas degradadas, para produção de substratos, dispostos em aterros, em *landfarming*, serem incinerados, usados como fonte de energia e como material de construção (fabricação de tijolos, telhas e lajotas).

No entanto, Andreoli e Teixeira (2001) citam que, mais de 90% do lodo produzido no mundo tem sua disposição final por meio de incineração, disposição em aterros e uso agrícola, e que a quantidade de lodos lançados em aterro sanitário tende a se reduzir devido às exigências ambientais crescentes para utilização desta alternativa.

A escolha da prática adotada para sua disposição final deve considerar, além das características do lodo, os aspectos técnicos, econômicos, operacionais e ambientais, e, qualquer que seja esta escolha, é essencial que haja operação adequada e monitoramento constante a fim de se evitar potenciais impactos ambientais negativos.

Segundo Pereira *et al* (2009), a gestão adequada do lodo é uma necessidade dos municípios brasileiros que, por apresentarem grande diversidade de características, acabam exigindo diferentes alternativas para que esse resíduo não venha a prejudicar o meio ambiente e a qualidade de vida da população.

A tendência à formação de grandes aglomerações urbanas pela população e as atuais questões ambientais e normativas, limitam o número de possibilidades para disposição final de lodos de esgoto (LUE-HING *et al*, 1996). As limitações enfrentadas por aterros sanitários (reduzidas áreas e alto custo de transporte), *landfarming*, reciclagem agrícola e as questões ambientais e normativas que envolvem a disposição do resíduo no mar, aumentam o importante papel da combustão no futuro (WERTHER e OGADA, 1999)

Dessa forma, pode-se considerar o lodo de esgoto, tanto um produto perigoso, quanto um recurso com potencial que pode ser aproveitado. Atualmente, o lodo precisa ser visto sob uma ótica ambiental na sua totalidade.

Tendo em vista o exposto, é latente a necessidade de se pesquisar e desenvolver ferramentas tecnológicas para a tomada de decisão gerencial no que tange a destinação final do lodo de esgoto, buscando alternativas adequadas, racionais e ambientalmente corretas para o gerenciamento desse resíduo.

A Lei nº 12.305 de 2010, que institui a política Nacional de Resíduos Sólidos define, entre as destinações finais ambientalmente adequadas³ dos resíduos sólidos, “a recuperação e o aproveitamento energético do resíduo, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos” (BRASIL, 2010).

Segundo Van Haandel (2008), pode-se utilizar o lodo na combustão total para produzir energia elétrica, ou parcial, agregado a carvão ou óleos ou em co-combustão (produção de cimento, por exemplo). Segundo Andreoli e Pegorini (2006) o poder calorífico da fração sólida volátil do lodo de esgoto pode chegar a 3,3 kWh/kg (11,87MJ/kg), semelhante ao da lenha, possibilitando seu uso como combustível.

Apesar das técnicas disponíveis atualmente para controlar emissões gasosas e dos custos de combustão serem muito mais competitivos em relação a outras opções de disposição (OTERO, 2002), é necessária a caracterização laboratorial de uma amostra do material, que forneça informações sobre suas propriedades determinantes a essa utilização, e a avaliação dessas informações, para decidir se o resíduo pode ou não ser tecnicamente utilizado para este fim, sem causar impactos ambientais adversos, danos ou riscos à saúde pública.

Segundo Almeida (2008), a energia não aproveitada contida no lodo seco da ETE pode chegar a 4,0 kWh/kg. O mesmo autor coloca de uma forma breve que, tomando-se por base uma população de 100 mil habitantes com vazão média de esgoto igual a 0,173 m³/s, tem-se uma produção média de 6.000 kg/dia de lodo seco obtendo-se um aproveitamento de energia de 24.000 kWh/dia do lodo seco. Tendo em vista que a necessidade média normal de uma pessoa é de 2,10 kWh/dia de energia elétrica, e considerando 50% de rendimento na transformação para energia elétrica, há energia para atender 5,7% desta população (demanda doméstica). O que exemplifica como se poderia aproveitar o potencial de geração de energia de uma ETE.

O lodo de esgoto possui características e propriedades físicas, químicas e térmicas variadas dependendo de sua qualidade. Lodos de estações de tratamento que recebem apenas efluentes domésticos, por exemplo, contem pequena quantidade de metais pesados provenientes da própria natureza dos resíduos e das canalizações. Porém, podem ocorrer

³ A Lei nº 12.305 de 2010, define destinação final ambientalmente adequada como sendo a destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sisnama, do SNVS e do Suasa, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos (BRASIL, 2010).

descargas permitidas de efluentes industriais ou de ligações clandestinas na rede, aumentando a carga poluidora (ANDREOLI *et al*, 1997).

A correta avaliação das características e propriedades do lodo de esgoto é fundamental para garantir a viabilidade técnica, ambiental e normativa para seu uso como biomassa para gerar energia em processos de combustão evitando impactos negativos nos ecossistemas e à saúde das pessoas. As avaliações típicas a serem realizadas no lodo são definidas em função de seu destino ou uso, com base na sua caracterização e propriedades. Essas avaliações ou são exigidas pelos órgãos de controle, pelas partes interessadas da sociedade, ou demandadas pela própria empresa geradora dos lodos em função de sua responsabilidade ambiental e social corporativa.

Para avaliação do lodo de esgoto como biomassa na geração de energia em processos de combustão é fundamental o conhecimento do seu potencial energético, da sua toxicidade e dos poluentes atmosféricos que podem ser liberados para o meio ambiente. O potencial energético do lodo depende de seu poder calorífico; a toxicidade depende da quantidade de metais pesados presentes na amostra bruta e no lixiviado do material; e a poluição atmosférica depende das quantidades de materiais particulados e emissões gasosas liberadas para o meio ambiente durante o processo de combustão.

Dependendo do resultado da avaliação do lodo de esgoto como biomassa na geração de energia em processos de combustão, este resíduo pode ser usado como combustível em caldeiras; geradores de vapor; fornos, fornalhas, estufas e secadores para a geração e uso de energia térmica; centrais para a geração de energia elétrica; gaseificadores; co-processamento em fornos rotativos de clínquer para a fabricação de cimento; ou simplesmente para uso doméstico, contribuindo principalmente para o aumento da matriz energética do país e para redução da poluição e degradação ambiental.

Baseado no exposto, observa-se o grande potencial de utilização do lodo como biomassa para gerar energia, mas ao mesmo tempo a necessidade de conhecimento especializado para a realização das avaliações que auxiliarão a tomada de decisão. Esses conhecimentos demandam tempo e estudo por parte dos gestores, que muitas vezes não tem a oportunidade de obtê-los, terminando por gerenciar o problema da disposição final do lodo de forma emergencial, adotando alternativas que envolvem altos custos, dificuldades operacionais e muitas vezes gerando impactos ambientais que podem comprometer os benefícios do sistema de coleta e tratamento de esgotos.

Nesse contexto, na presente tese é desenvolvido sistema computacional para avaliar o potencial de lodos de esgoto sanitário como biomassa na geração de energia em processos de

combustão, considerando resultados laboratoriais de amostras de lodo e normas técnicas e ambientais brasileiras, com a finalidade de agilizar a tomada de decisão no gerenciamento do lodo de esgoto. No sistema computacional são criadas e implementadas classes para avaliação do potencial energético do lodo e identificada a viabilidade de aplicação deste como biomassa para gerar energia em processos de combustão sem causar impactos ambientais adversos, danos ou riscos à saúde pública.

Para desenvolvimento do sistema computacional foi utilizado padrão de arquitetura de software *Model-View-Controller* (MVC) e criado um método sistemático para avaliação de lodos de esgoto como biomassa na geração de energia em processos de combustão que considera aspectos técnicos (composição química elementar, imediata e poder calorífico) para avaliar e classificar o potencial energético do lodo e, aspectos ambientais (emissões de poluentes atmosféricos) e normativos (toxicidade), para identificar a viabilidade de aplicação do lodo de esgoto amostrado como biomassa para gerar energia em processos de combustão sem causar impactos ambientais adversos, danos ou riscos à saúde pública.

O método desenvolvido foi automatizado através de sua representação por regras de lógica, as quais foram inseridas no sistema por interface de aquisição e armazenadas automaticamente em banco de dados. As informações resultantes de ensaios laboratoriais de amostras de lodo de esgoto são fornecidas pelo usuário e processadas no sistema, sendo realizados testes e encadeamentos lógicos das regras, para obtenção de conclusões e explicações resultantes que irão agilizar a tomada de decisão. As conclusões e explicações resultantes constam em dois relatórios fornecidos pelo sistema, sendo estes:

- Relatório de Resultados, no qual são apresentados os resultados finais da avaliação quanto ao potencial energético do lodo (potencial alto, médio, baixo ou sem potencial), aplicações recomendadas e não recomendadas para o lodo avaliado, energia bruta prevista em kWh/kg do lodo, receita bruta prevista com a venda da energia gerada para distribuidoras de energia elétrica, mensagens de alerta e explicativas quanto às emissões de poluentes atmosféricos e à toxicidade do lodo, bem como as normas e limites utilizados como parâmetro pelo sistema.
- Relatório de Lógica, no qual é apresentada a sequência lógica das regras executadas pelo sistema para chegar às conclusões finais da avaliação do lodo, permitindo que o usuário tenha fácil acesso aos conhecimentos especializados;

Para testar o sistema computacional e validar seus resultados, foram utilizados quatro trabalhos de aplicação do lodo de esgoto como biomassa na geração de energia em escala experimental, disponíveis em bibliografias, tendo em vista a dificuldade de encontrar tais

exemplos em escala real. Os dados de entrada do sistema computacional foram àqueles apresentados nos trabalhos utilizados e os resultados finais comparados entre si.

1.2. OBJETIVOS E HIPÓTESE

1.2.1. Objetivos

Esta tese tem como objetivo geral desenvolver sistema computacional para avaliação do potencial de lodos de esgoto sanitário como biomassa na geração de energia em processos de combustão, considerando resultados laboratoriais de amostras de lodo em função das normas técnicas e ambientais brasileiras, para agilizar a tomada de decisão no gerenciamento do lodo de esgoto sanitário.

Como objetivos específicos são propostos:

- Desenvolver método para avaliação lodo de esgoto como biomassa na geração de energia em processos de combustão baseado em normas técnicas e ambientais brasileiras e resultados de determinações laboratoriais de amostras de lodo;
- Implementar sistema computacional para automatizar o método criado, constituindo uma ferramenta tecnológica para agilizar a tomada de decisão na questão do gerenciamento de lodos de esgoto;
- Testar o sistema computacional e validar seus resultados, utilizando dados de trabalhos de aplicação do lodo de esgoto sanitário como biomassa na geração de energia em escala experimental, disponíveis em bibliografias, e comparando resultados.

1.2.2. Hipótese

No presente trabalho é considerada a seguinte hipótese:

É possível criar um sistema computacional para avaliar lodos de esgoto como biomassa na geração de energia em processos de combustão, considerando resultados laboratoriais de amostras de lodo, normas técnicas e as normas ambientais brasileiras, com a finalidade de constituir uma ferramenta tecnológica para agilizar a tomada de decisão no setor de saneamento básico.

1.3. CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Quanto sua natureza, a presente pesquisa classifica-se como aplicada, por gerar conhecimentos práticos destinados à solução de problema específico. Quanto a forma de abordagem do problema, a tese é quantitativa, pois utiliza parâmetros que precisam ser quantificados; e qualitativa, ao utilizar interpretações de dados para atribuições de significados.

Quanto aos seus objetivos, é uma pesquisa exploratória, pois é necessário grande familiarização do pesquisador com o problema e envolve levantamento bibliográfico para adquirir o conhecimento de outros autores que tiveram experiências com o problema pesquisado.

1.4. ESTRUTURAÇÃO DO TEXTO

A tese está estruturada em seis capítulos. No primeiro capítulo, é apresentada a introdução do trabalho desenvolvido, com a motivação, justificativa, objetivos, hipóteses, classificação da pesquisa e estruturação do texto.

No segundo capítulo, tem-se a revisão bibliográfica da biomassa como fonte de energia alternativa na qual, apresenta-se o panorama e perspectivas da energia no Brasil, aborda-se os diversos tipos de fontes renováveis de energia, e dá-se ênfase para a biomassa como fonte de energia. Citam-se as vantagens e desvantagens da biomassa como fonte de energia, sua classificação, caracterização, explicam-se suas tecnologias para o processamento e transformação em energia bem como, são apresentados os poluentes atmosféricos emitidos, a partir do uso dessas tecnologias com as principais legislações ambientais relacionadas aos resíduos sólidos.

No terceiro capítulo, aborda-se o lodo de esgoto como biomassa na geração de energia onde, apresenta-se sua origem e classificação conforme a Norma Brasileira NBR 10004/2004, seus principais contaminantes, discute-se o atual gerenciamento e disposição final deste resíduo, mostra-se o conhecimento técnico, ambiental e normativo que baseia a criação do método sistemático para avaliar lodos de esgoto como biomassa para gerar energia em processos de combustão e apresentam-se ainda os principais tipos de tecnologia de aproveitamento do lodo para geração de energia.

No quarto capítulo, é descrita a metodologia utilizada e como foi desenvolvido o método sistemático e o sistema computacional para avaliação do lodo de esgoto como

biomassa na geração de energia em processos de combustão. Neste capítulo, apresentam-se as interfaces criadas no sistema para interagir com os usuários e descreve-se como o sistema obtém as conclusões e explicações resultantes a partir das informações que foram fornecidas pelo usuário e armazenadas em bancos de dados.

No quinto capítulo é validado o sistema computacional desenvolvido, utilizando-se quatro trabalhos de pesquisa de diferentes autores para comparar seus resultados com aqueles apresentados pelo sistema computacional permitindo seu uso como ferramenta para agilizar a tomada de decisão no gerenciamento do lodo de esgoto.

No sexto capítulo são apresentadas as conclusões finais da pesquisa e, finalmente, no sétimo capítulos as sugestões para trabalhos futuros.

2. BIOMASSA COMO FONTE DE ENERGIA ALTERNATIVA

Uma das mais importantes fontes de energia alternativa para o Brasil é a Biomassa. O Plano Nacional de Energia 2030 coloca que as condições naturais e geográficas favoráveis do nosso país justificam o entendimento de que o país reúne vantagens comparativas expressivas para assumir posição de destaque, no plano mundial, na produção e uso da biomassa como recurso energético. Entre elas destacam-se a grande quantidade de terra agricultável, a perspectiva de incorporação de novas áreas onde os impactos ambientais estão circunscritos ao socialmente aceito, além da possibilidade de múltiplos cultivos dentro do ano calendário (MME- PNE 2030).

Segundo Cortez *et al.* (2008), analisando as tecnologias das fontes energéticas alternativas renováveis, já suficientemente maduras para serem empregadas comercialmente, somente a biomassa, utilizada em processos modernos com elevada eficiência tecnológica, possui a flexibilidade de suprir energéticos tanto para a produção de energia elétrica quanto para mover o setor de transporte.

2.1. PANORAMA E PERSPECTIVAS DA ENERGIA NO BRASIL

A oferta per capita de energia de 2007 para 2008 cresceu de 1,261 para 1,314 tep/hab enquanto que o consumo per capita de eletricidade evoluiu de 2.177 para 2.234 kWh/hab (MME- BEN 2009). A Tabela 1, mostra como o Brasil, ao longo dos anos, apresentou aumento considerável no consumo final de energia, passando de $62,11 \times 10^6$ tep, em 1970, para $171,949 \times 10^6$ tep, em 2000 e para 228×10^6 tep, em 2010.

Tabela 1- Consumo final de energia no Brasil

Ano	1970	1980	1990	2000	2001	2002	2003
Consumo Final 10^6 tep	62,11	104,38	127,60	171,949	172,186	178,160	182,114
Ano	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Consumo Final 10^6 tep	191,197	195,909	202,898	215,494	226,393	221,334	228

Fonte: Adaptado MME- BEN(2010)

A geração de energia elétrica no Brasil em centrais de serviço público e autoprodutores atingiu 466,2 TWh em 2009, resultado 0,7% superior ao de 2008, com as centrais de serviço público contribuindo com 87,8% da geração total. Nestas, a principal fonte

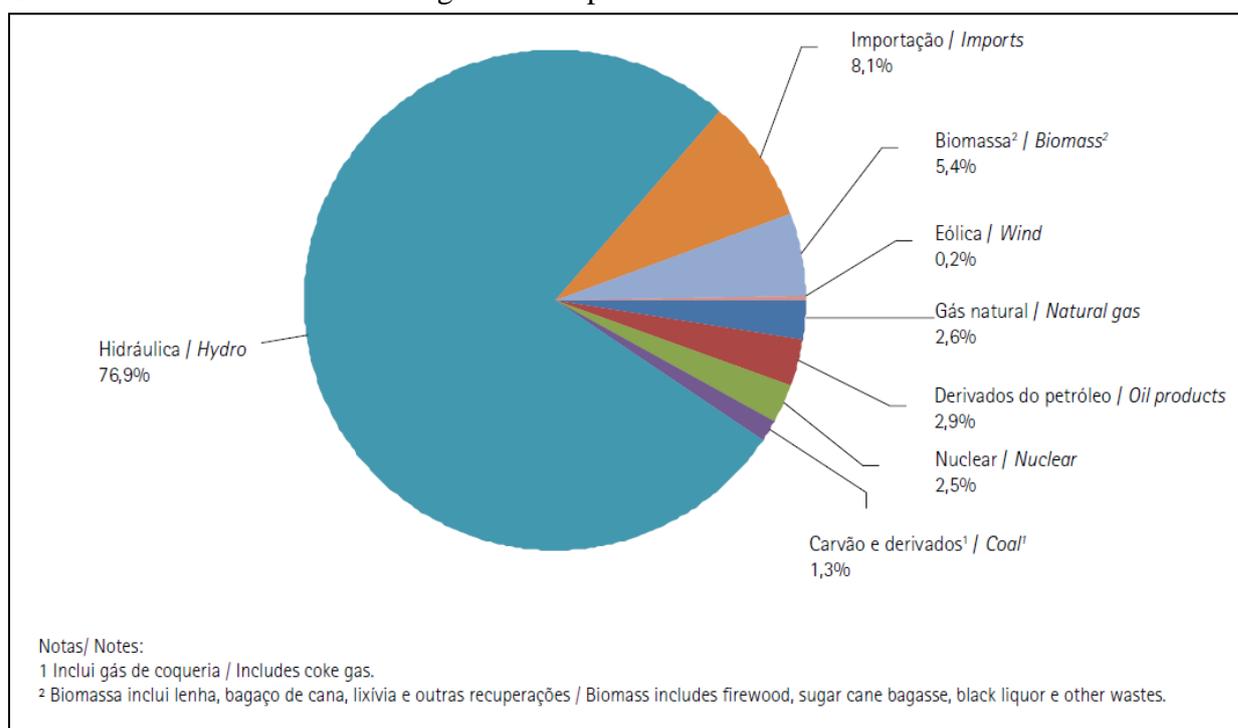
é a energia hidráulica, que apresentou elevação de 4,9% na comparação com 2008, em função do regime hidrológico favorável observado no período (MME- BEN, 2010).

É visível a preocupação nacional em utilizar cada vez mais fontes de energia renováveis em detrimento das não-renováveis, não só pelo problema da disponibilidade como também por fatos políticos marcantes, que envolvem principalmente os países produtores de petróleo. Braga *et al.*(2005) coloca que um dos maiores desafios da humanidade é, sem dúvida, alterar o quadro da crescente demanda energética associada ao emprego de fontes finitas e sujeitas a instabilidades políticas.

De fato, observam-se que diversas iniciativas, públicas e privadas, vêm sendo tomadas no sentido de cumprir este desafio, tendo em vista que de 2008 para 2009 a geração pública a partir de combustíveis fósseis caiu 35,1%, com redução expressiva na geração a partir do gás natural (65,2%) e do óleo combustível (33,3%) e a geração de autoprodutores apresentou expressivo crescimento de 11,5%, considerando o agregado de todas as fontes utilizadas (MME- BEN 2010).

Importações líquidas de 40,0 TWh, somadas a geração interna, permitiram uma oferta interna de energia elétrica de 506,1 TWh, montante 0,2% superior a 2008. O consumo final foi de 426,0 TWh, uma redução de 0,5% em comparação com 2008. O Gráfico 1 apresenta a estrutura da oferta interna de eletricidade no Brasil em 2009.

Gráfico 1- Oferta interna de energia elétrica por fonte no Brasil – 2009



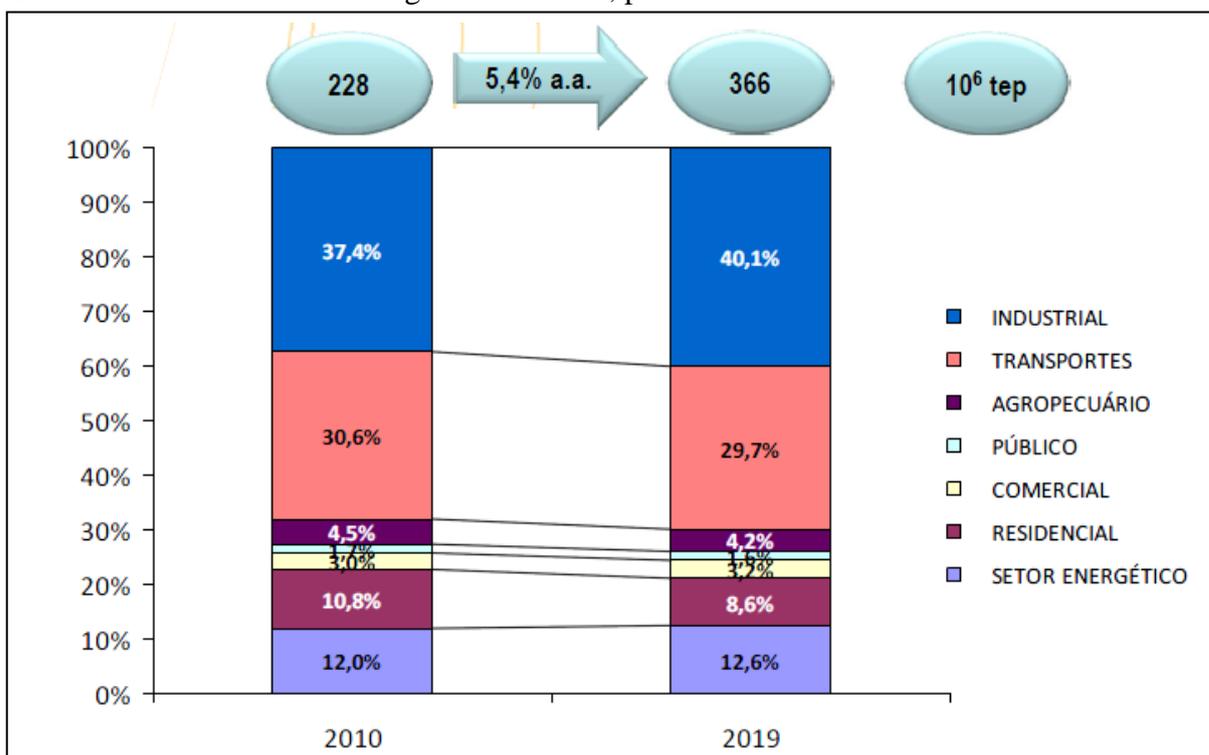
Fonte: MME- BEN(2010)

Pode-se observar que o Brasil apresenta uma matriz de geração elétrica de origem predominantemente renovável, sendo que a geração interna hidráulica responde por montante superior a 76% da oferta. Somando as importações, que essencialmente também são de origem renovável, pode-se afirmar que aproximadamente 85% da eletricidade no Brasil é originada de fontes renováveis – sem considerar que parte da geração térmica é originada de biomassa (5,4 %, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica- Aneel).

Do lado do consumo, de acordo com o Ministério de Minas e Energia 2010, ano base 2009, o setor residencial apresentou crescimento de 6,5% devido, principalmente, às políticas de redução de impostos para alguns bens de consumo durante a crise econômica, além do aumento de renda per capita. O setor industrial apresentou queda de 5,5% no consumo elétrico no biênio 2009- 2008, explicado pela redução da produção física em algumas atividades energo-intensivas. Os demais setores – comercial, agropecuário, público e transportes – quando analisados em bloco apresentaram variação positiva de 1,8% em relação ao ano anterior. O setor energético apresentou crescimento de 2,0%.

O novo PDE- Plano Decenal de Expansão de Energia 2019 prevê aumento de 5,4% a.a no período 2010-2019 no consumo final energético, onde o setor industrial promete ser o maior contribuinte desse crescimento, conforme mostra o Gráfico 2.

Gráfico 2- Consumo final energético no Brasil, por setor



Fonte: MME- PDE 2019 (2010)

Atualmente, o consumo de eletricidade na rede é maior na classe industrial, contudo o PDE 2019 mostra que a tendência é diminuir a variação anual no consumo desta classe e aumentar na comercial, no entanto a liderança no consumo de eletricidade na rede até 2019 promete ainda permanecer com a classe industrial conforme apresenta o Quadro 1.

Quadro 1- Consumo de eletricidade na rede- consumo por classe (TWh)

Classe	2009	2010	2019	Variação (% ao ano)	
				2009-2010	2010-2019
Residencial	100,3	105,5	156,5	5,3	4,5
Industrial	166,5	182,3	274,8	9,5	4,7
Comercial	65,0	69,2	118,4	6,6	6,1
Outras	56,3	58,8	83,3	4,4	4,0

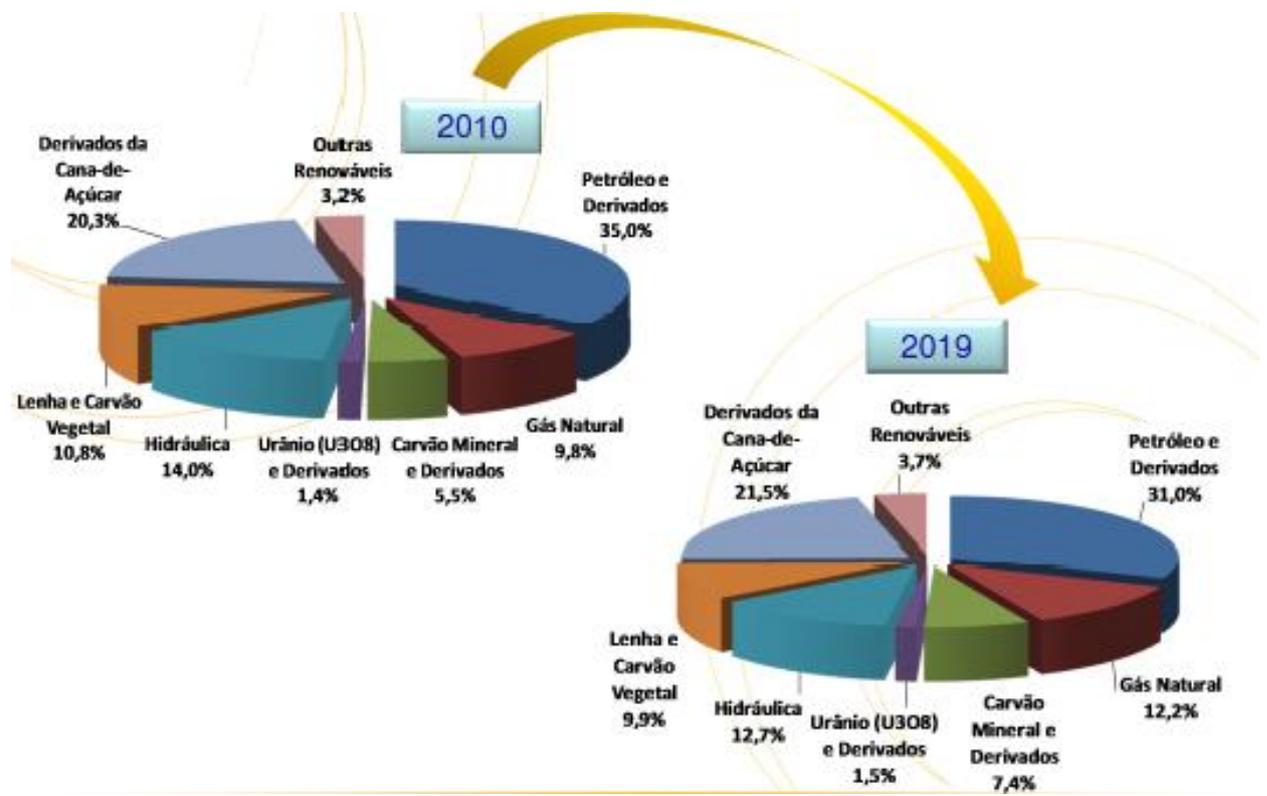
Fonte: MME- PDE 2019 (2010)

Em 2009, com acréscimo de aproximadamente 2 GW, a capacidade instalada das centrais de geração de energia elétrica do Brasil alcançou 106.215 MW, na soma das centrais de serviço público e autoprodutoras. Deste total, o acréscimo em centrais hidráulicas correspondeu a 67,4%, ao passo que centrais térmicas responderam por 23,6% da capacidade adicionada. Por fim, as usinas eólicas foram responsáveis pelos 8,9% restantes de aumento do *grid* nacional (MME- BEN 2010).

No Brasil a maior quantidade de energia elétrica produzida provém de usinas hidrelétricas. Em regiões rurais e mais distantes das hidrelétricas centrais, têm-se utilizado energia produzida em usinas termoelétricas e em pequena escala, a energia elétrica gerada da energia eólica.

O Gráfico 3 apresenta como está atualmente a oferta interna de energia no país e as previsões para 2019. Neste gráfico observa-se que, apesar dos atuais investimentos na produção de energia a partir de fontes renováveis, praticamente não haverá mudança em relação à porcentagem de oferta interna de energia a partir de fontes renováveis até o ano de 2019 tendo em vista que, tanto em 2010 como em 2019 esta porcentagem é em torno de 48%.

Gráfico 3- Oferta Interna de Energia no Brasil



Fonte: MME- PDE 2019 (2010)

2.2. FONTES RENOVÁVEIS DE ENERGIA

2.2.1. Energia alternativa

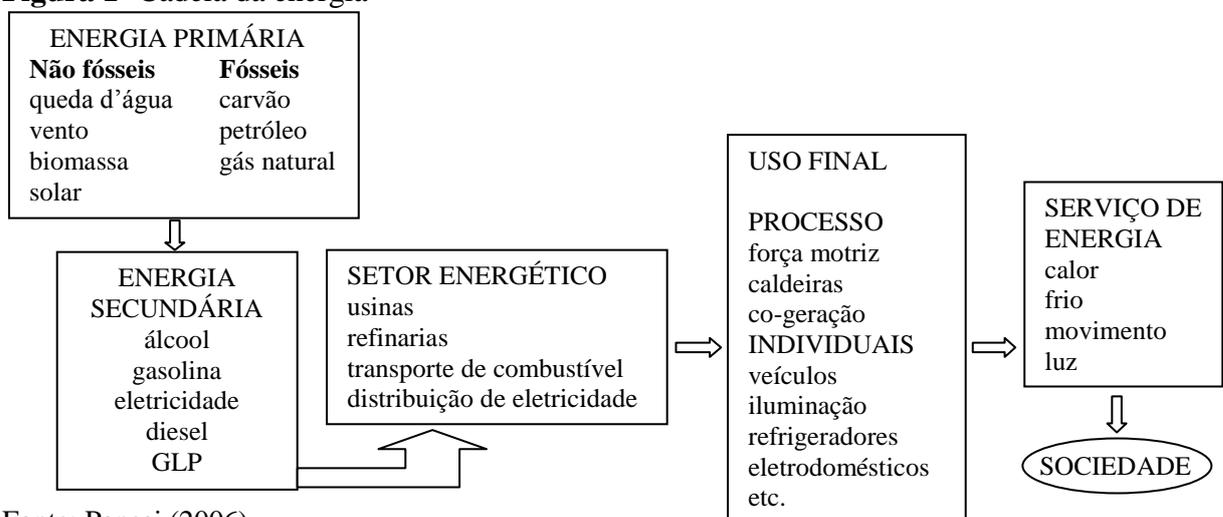
A energia alternativa é uma energia sustentável que deriva do meio ambiente natural. Algumas fontes de energia são “renováveis” na medida em que são mantidas ou substituídas pela natureza. Estas incluem energia do vento (eólica), solar, biomassa, geotérmica, hidráulica (queda d’água), marés, ondas e correntezas. A energia alternativa é obtida através de fontes que são essencialmente inesgotáveis. Ao contrário, as fontes de energia “não-renováveis”, também chamadas combustíveis fósseis, se formaram na Era Paleozóica e possuem uma provisão finita, ou seja, não podem ser repostas pela natureza. Dentre elas, destacam-se o carvão, o petróleo e o gás natural.

Segundo Braga *et al.*(2005), as radiações provenientes do sol constituem a principal fonte de energia da Terra. Cerca de 99% da energia térmica utilizada pelos ecossistemas

provem desse enorme “gerador”. O restante da energia consumida pela ecosfera (1%) é obtida a partir de outras fontes primárias de energia.

As fontes primárias de energia podem ser convertidas em outras formas de energia, são elas energia elétrica, energia química, energia térmica e energia mecânica. A Figura 1 ilustra o caminho traçado pela energia, partindo da energia primária até o momento que é usado para os serviços energéticos. Neste percurso, a energia primária sofre várias transformações e apresenta-se de diversas formas que podem se medidas com somente uma unidade (tonelada equivalente de petróleo ou tep = 45,2 GJ) (PANESI, 2006).

Figura 1- Cadeia da energia



Fonte: Panesi (2006)

Atualmente, em maior ou menor intensidade, a maioria dos países, sejam eles desenvolvidos ou não, está promovendo ações para que as energias alternativas renováveis tenham participação significativa em suas matrizes energéticas. As fontes renováveis de energia estão ganhando espaço não apenas pela necessidade de preservação ambiental e redução da dependência do uso de derivados do petróleo, mas também como forma de gerar recursos para a manutenção da atividade econômica e a criação de novos empregos.

A reportagem “Sopro verde na indústria de energia”, da revista Mundo Corporativo, coloca que a edição 2010 do estudo *Energy Predictions*, publicado pela Deloitte ao final de 2009, estimou que o Reino Unido, por exemplo, poderia gerar mais de US\$ 110 bilhões para a economia e criar cerca de 250 mil empregos somente a partir de atividades ligadas aos seguimentos de energia eólica *offshore* (desenvolvida e/ou produzida em outros países) e energia das ondas. Esses mesmos tipos de energia poderiam ser responsáveis por, pelo menos,

15% do total de redução de emissões que o país deve atingir até 2050, segundo a organização não governamental *Carbon Trust*, citada no estudo.

Cortez *et al.* (2008) citam que, no Brasil, nos 357 municípios com destilarias de etanol, são proporcionados de 15% a 28% do total de empregos. Já na reportagem “Energia a partir do metano de ETEs” é colocado que na Estação Ouro Verde, em Foz do Iguaçu, a Companhia de Saneamento do Paraná- Sanepar testa um sistema para transformar gás metano em energia e já provou que, com isso, evita o lançamento de 13 toneladas de gás metano por ano na atmosfera (ENERGIA..., 2010).

2.2.2. Vantagens e desvantagens das fontes de energia renovável

As energias renováveis têm o potencial técnico de atender parte da demanda de energia do mundo, independente da sua origem (eletricidade, aquecimento ou transporte) e contribuir para a economia de importantes recursos naturais não-renováveis. Contudo, há três aspectos importantes a salientar: a viabilidade econômica, a sustentabilidade de cada fonte e a disponibilidade de recursos renováveis para geração de energia, que variam entre as diferentes regiões do globo (CAIXETA, 2009).

As regiões tropicais, por exemplo, possuem forte incidência de radiação solar, enquanto as áreas planas, em especial as costeiras, apresentam maior potencial eólico. Já a energia geotérmica é mais abundante nas regiões com atividade vulcânica intensa. O lixo está disponível em qualquer lugar e tanto seu volume quanto o grau de concentração, aumentam com a urbanização. A principal discrepância ocorre na biomassa, onde poucos países dispõem de condições de ampliar a área de agricultura energética, sem competir com outros usos da terra, como alimentação, lazer, moradia, vias de transporte, reservas de proteção ambiental, etc (ENERGIAS...,2011).

A seguir, no Quadro 2, apresenta-se as principais vantagens e desvantagens das fontes de energia renovável.

Quadro 2- Principais vantagens e desvantagens das fontes de energia renovável

Fonte	Vantagens	Desvantagens
Biomassa	<ul style="list-style-type: none"> - Recurso renovável; -Reduz a probabilidade de corrosão dos equipamentos (caldeiras, fornos); - Os resíduos emitidos pela queima são menos poluentes que os emitidos a partir de combustíveis fósseis; 	<ul style="list-style-type: none"> - Gera conflito do uso da terra para agricultura, a poluição do solo; - Possui grande umidade, diminuindo a eficiência em termos de energia útil; -Possui um menor poder calorífico quando comparado com outros combustíveis;

	<ul style="list-style-type: none"> - As cinzas são menos agressivas ao meio ambiente que as provenientes de combustíveis fósseis; - Participa na redução da dependência de petróleo por parte de países sub-desenvolvidos; - Diminui o resíduo industrial (já que ele pode ser útil na produção de biomassa); - A biomassa sólida é extremamente barata; <p>Fontes: (PEREIRA, 2009) e Portal Brasileiro de Energias Renováveis (www.energiarenovavel.org)</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Maior possibilidade de geração de material particulado para a atmosfera. Isto significa maior custo de investimento para a caldeira e os equipamentos para remoção de material particulado; - As cinzas podem conter metais como o cádmio e chumbo; -Dificuldades no transporte e no armazenamento de biomassa sólida. <p>Fontes: (PEREIRA, 2009) e (BRAGA <i>et al.</i>,2005)</p>
Correntezas	<ul style="list-style-type: none"> - Fonte disponível na natureza; - Necessário uma corrente marítima de menor velocidade que o vento para gerar uma mesma quantidade de energia (vantagem em relação à energia eólica); - As turbinas para obtenção de energia podem ser colocadas mais próximas umas das outras, necessitando-se de menos espaço; - Por estarem submersas, as turbinas não causam impacto visual; - As correntes oceânicas são relativamente constantes em relação à direção e velocidade. <p>Fonte: LAF AE- Laboratório de Fontes Alternativas de Energias. (www.dee.ufrj.br/lafae/txt_correntes.html)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Impactos ambientais potenciais precisam ser estudados no desenvolvimento e na utilização desta tecnologia; - O planejamento do projeto necessita levar em consideração a proteção da vida marinha; - É necessária a monitoração da temperatura e da salinidade da água, pois elas podem ser influenciadas. <p>Fonte: LAF AE- Laboratório de Fontes Alternativas de Energias. (www.dee.ufrj.br/lafae/txt_correntes.html)</p>
Eólica	<ul style="list-style-type: none"> - Fonte disponível na natureza; - É a fonte mais limpa que existe, não emite gases nem geram resíduos; - Maior potência dos ventos, no nordeste do Brasil, ocorre no segundo semestre, que é o período de seca das principais bacias hidrográficas do país podendo complementar as usinas hidroelétricas; - Os aerogeradores não necessitam de abastecimento de combustível e requerem escassa manutenção, uma vez que só se procede à sua revisão em cada seis meses; - Excelente rentabilidade do investimento. Em menos de seis meses, o aerogerador recupera a energia gasta com o seu fabrico, instalação e manutenção; - Os parque eólicos são compatíveis com outros usos e utilizações do terreno como a agricultura e a criação de gado; - Criação de emprego; - Geração de investimento em zonas desfavorecidas. <p>Fontes: (PEREIRA, 2009), Portal São Francisco (www.portalsaofrancisco.com.br/alfa/meio-ambiente-fontes-alternativas-de-energia/index.php) e Portal Energia</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Altamente dependente do clima, fazendo com que os centros de demanda necessitem de sistemas alternativos de produção para os períodos de calmaria; - As turbinas eólicas podem interferir na migração de pássaros, na transmissão de sinais de rádio e TV e na paisagem; - O vento não é tão forte como outras fontes, fazendo o processo de produção ficar mais lento; - Limitado a poucas áreas, não é todo lugar que apresenta ventos constantes e intensos; - O vento tem que atingir uma velocidade superior a 20 km/h para girar a turbina suficientemente rápida; - O equipamento é caro de se manter; - Necessita de armazenamento de energia de alto custo; -Impacto sonoro: o som do vento bate nas pás produzindo um ruído constante. As habitações mais próximas deverão estar, no mínimo a 200 m de distância. <p>Fontes: (PEREIRA, 2009), (BRAGA <i>et al.</i>,2005) e Portal São Francisco (www.portalsaofrancisco.com.br/alfa/meio-ambiente-fontes-alternativas-de-</p>

	(www.portal-energia.com/vantagens-desvantagens-da-energia-eolica/)	energia/index.php) e Portal Energia (www.portal-energia.com/vantagens-desvantagens-da-energia-eolica/)
Solar	<p>-A energia solar não polui durante seu uso; -As centrais necessitam de manutenção mínima; -Os painéis solares são a cada dia mais potentes ao mesmo tempo que seu custo vem decaindo; -A energia solar é excelente em lugares remotos ou de difícil acesso, pois sua instalação em pequena escala não obriga a enormes investimentos em linhas de transmissão; -Em países tropicais, como o Brasil, a utilização da energia solar é viável em praticamente todo o território, e, em locais longe dos centros de produção energética sua utilização ajuda a diminuir a procura energética nestes e consequentemente a perda de energia que ocorreria na transmissão.</p> <p>Fonte: Portal Energia (www.portal-energia.com/vantagens-e-desvantagens-da-energia-solar/)</p>	<p>- Existe variação nas quantidades produzidas de acordo com a situação climática (chuvas, neve), além de que durante a noite não existe produção alguma, o que obriga a que existam meios de armazenamento da energia produzida durante o dia em locais onde os painéis solares não estejam ligados à rede de transmissão de energia; - Locais em latitudes médias e altas (Ex: Finlândia, Islândia, Nova Zelândia e Sul da Argentina e Chile) sofrem quedas bruscas de produção durante os meses de inverno devido à menor disponibilidade diária de energia solar. Locais com frequente cobertura de nuvens (Londres), tendem a ter variações diárias de produção de acordo com o grau de nebulosidade; -As formas de armazenamento da energia solar são pouco eficientes quando comparadas por exemplo aos combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás), e a energia hidroelétrica (água); -Os painéis solares têm um rendimento de apenas 25%.</p> <p>Fonte: Portal Energia (www.portal-energia.com/vantagens-e-desvantagens-da-energia-solar/)</p>
Geotérmica	<p>- Energia limpa. As centrais geotérmicas não têm de queimar combustíveis para manufacturar o vapor para mover as turbinas; -Não há nenhum ar fumegante à volta de centrais geotérmicas, podendo partilhar terreno com o gado e vida selvagem local; -As centrais geotérmicas são projetadas para funcionar 24 horas por dia, durante todo o ano; - Uma central geotérmica situa-se diretamente por cima da sua fonte de combustível. É resistente a interrupções de geração de energia devido a condições atmosféricas, catástrofes naturais ou condições políticas que podem interromper o transporte de combustíveis; - As instalações em localizações remotas podem levantar o nível e qualidade de vida trazendo eletricidade a pessoas longe dos centros demográficos “eletrificados”. - Eficiência no seu uso;</p> <p>Fontes: (BRAGA <i>et al</i>,2005) e Portal Energia (www.portal-energia.com/vantagens-e-desvantagens-da-energia-geotermica/)</p>	<p>- Poucas fontes de energia; - Se não for usado em pequenas zonas onde o calor do interior da Terra vem à superfície através de géiseres e vulcões, então a perfuração dos solos para a introdução de canos é dispendiosa; - Os anti-gelificantes usados nas zonas mais frias são poluentes; - Este sistema tem um custo inicial elevado, e a barata manutenção da bomba de sucção de calor é contrabalançada pelo elevado custo de manutenção dos canos;</p> <p>Fontes: (BRAGA <i>et al</i>,2005) e Portal Energia(www.portal-energia.com/vantagens-e-desvantagens-da-energia-geotermica/)</p>
Hidráulica	<p>- Alto rendimento (em torno de 96%); - A sua confiabilidade e a resposta às variações</p>	<p>- Reservatório provoca impactos ambientais tanto na fase de construção como na fase de</p>

	<p>de procura são elevadas;</p> <ul style="list-style-type: none"> - O seu custo de produção de eletricidade é baixo; - Não polui o ambiente; - Proporciona desenvolvimento local (estabelecimento de vias fluviais, construção de vias de comunicação, fomento de atividades de lazer e de turismo, etc). <p>Fontes: (BRAGA <i>et al</i>,2005) e Portal Energia (www.portal-energia.com/energia-hidrica-vantagens-e-desvantagens/)</p>	<p>operação. A sua construção exige a formação de grandes reservatórios de água que acabam por provocar profundas alterações nos ecossistemas;</p> <ul style="list-style-type: none"> - Provoca a erosão de solos, os quais consequentemente afetam a vegetação local; - Pode provocar o deslocamento de populações ribeirinhas e o alargamento de terra (dependendo, do tipo de relevo e da região onde se localiza o empreendimento); - Elevados custos de instalação e de desativação. <p>Fontes: (BRAGA <i>et al</i>,2005) e Portal Energia (www.portal-energia.com/energia-hidrica-vantagens-e-desvantagens/)</p>
Ondas e Marés	<ul style="list-style-type: none"> - A constância e previsibilidade da ocorrência das marés; - O fato de as marés serem uma fonte inesgotável de energia; - A sua confiabilidade; - O fato de serem uma fonte de energia não poluente. <p>Fonte: Portal Energia (www.portal-energia.com/energia-ondas-e-mares-vantagens-e-desvantagens/)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Poucos locais onde é viável o aproveitamento econômico; - Os custos de instalação são bastante elevados; - O fornecimento de energia não é contínuo e apresenta baixo rendimento; - Só podem ser instaladas centrais para a produção de eletricidade a partir desta energia em locais que respondam às necessidades geomorfológicas necessárias e que possuam um desnível entre marés bastante elevado (cerca de 5,5m); <p>Fontes: (BRAGA <i>et al</i>,2005) e Portal Energia (www.portal-energia.com/energia-ondas-e-mares-vantagens-e-desvantagens/) e Portal Brasileiro de Energias Renováveis (www.energiarenovavel.org)</p>

Fonte: Diversos autores⁴

Apresentadas as principais vantagens e desvantagens das fontes de energia renovável, enfatiza-se que, ao analisar a possibilidade de aproveitamento de uma nova fonte de energia, segundo Braga *et al.*(2005), deve-se primeiro tomar a decisão referente ao quanto de energia se quer obter e qual a qualidade exigida. Necessita-se de calor a baixa temperatura, de calor a alta temperatura, de eletricidade, de combustível para transporte? Isso envolve decidir o tipo e a qualidade de energia requerida para melhor desempenho, em face de uma ou várias necessidades.

2.3. BIOMASSA PARA ENERGIA

⁴ Ver em cada fonte específica do Quadro 2.

A biomassa, assim como a energia hidráulica e outras fontes renováveis, é uma forma indireta de energia solar. A energia solar é convertida em energia química, através da fotossíntese, base dos processos biológicos de todos os seres vivos. Braga *et al.* (2005) resume biomassa como sendo a matéria vegetal produzida pelo sol por meio da fotossíntese.

Do ponto de vista energético, biomassa é todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizada na produção de energia (ANEEL, 2005). De forma mais completa, o Plano Nacional de Energia 2030, coloca que o termo biomassa compreende a matéria vegetal gerada pela fotossíntese e seus diversos produtos e subprodutos derivados, tais como florestas, culturas e resíduos agrícolas, dejetos animais e matéria orgânica, contida nos rejeitos industrial e urbano (MME- PNE 2030). Cortez *et al.* (2008) concordam que a biomassa tem origem em resíduos sólidos urbanos — animais, vegetais, industriais e florestais — e, voltada para fins energéticos, abrange a utilização desses vários resíduos para a geração de fontes alternativas de energia.

Embora grande parte do planeta esteja desprovida de florestas, a quantidade de biomassa existente na terra é da ordem de dois trilhões de toneladas; o que significa cerca de 400 toneladas *per capita*. Em termos energéticos, isso corresponde a mais ou menos 3.000 EJ por ano, ou seja, oito vezes o consumo mundial de energia primária (da ordem de 400 EJ por ano) (RAMAGE; SCURLOCK, 1996 *apud* ANEEL, 2005).

De acordo com o Plano Nacional de Energia 2030 (PNE), tomando por base apenas os principais produtos agrícolas, que compreendem cerca de 90% da área plantada atual e 85% da produção física, pode-se estimar que a produção e oferta de resíduos de biomassa como fonte de energia primária, em 2005, foi de 558 milhões de toneladas em base seca. Esse valor significa uma expressiva quantidade de energia primária renovável produzida no país e potencialmente aplicável para fins energéticos. De fato, feita a conversão para barris equivalentes de petróleo, tem-se que o conteúdo energético do resíduo produzido nesse ano foi da ordem de 4,2 milhões bep/dia, valor quase 2,5 vezes maior que a produção média brasileira de petróleo no mesmo ano (1,7 milhões de barris por dia).

2.3.1. Classificação da biomassa

Segundo Vianna *et al.* (2000) *apud* Fava(2009), a Biomassa pode ser classificada de acordo com sua origem como:

- Biomassa natural: São produzidas pela natureza sem que exista intervenção humana, como as florestas.

- Biomassa residual: São geradas por qualquer tipo de atividade humana, principalmente nos processos produtivos dos setores agrícolas, florestal, assim como as produzidas nos núcleos urbanos.
- Biomassa produzida em plantações energéticas: Neste caso os cultivos energéticos são realizados com a finalidade de produzir biomassa capaz de ser transformada em combustível.

Nos trabalhos mais recentes, segundo Karekesi *et al* (2005) *apud* Guardabassi (2006) a biomassa tem sido classificada em três categorias, de acordo com a tecnologia empregada na sua utilização energética. São elas:

- Tecnologias tradicionais de uso da biomassa (ou biomassa tradicional): combustão direta de madeira, lenha, carvão vegetal, resíduos agrícolas, resíduos de animais e urbanos, para cocção, secagem e produção de carvão.
- Tecnologias “aperfeiçoadas” de uso da biomassa (ou biomassa “aperfeiçoada”): tecnologias aperfeiçoadas e mais eficientes de combustão direta de biomassa, tais como fogões e fornos. Uma tecnologia aperfeiçoada é a pirólise que é um processo de conversão térmica onde a biomassa é submetida a altas temperaturas (cerca de 500°C) na ausência de oxigênio. É utilizado na produção de carvão vegetal e na produção de combustíveis líquidos semelhantes aos hidrocarbonetos (BRÁS, 2005 *apud* FAVA, 2009).
- Tecnologias modernas de uso da biomassa (ou biomassa moderna): tecnologias avançadas de conversão de biomassa em eletricidade e o uso de biocombustíveis. Elas incluem gaseificação, métodos de produção de calor e eletricidade (cogeração), recuperação de energia de resíduos sólidos urbanos e gás de aterros sanitários além dos biocombustíveis para o setor de transportes (GOLDEMBERG, 2009).

2.3.2. Vantagens e desvantagens da biomassa como fonte renovável de energia

As vantagens e desvantagens da biomassa como fonte renovável de energia dependem essencialmente do tipo de biomassa empregada e dos processos tecnológicos utilizados para obtenção dos energéticos.

Para o controle do processo de combustão, por exemplo, devem ser monitorados o excesso de ar, CO e, para instalações de grande porte, também, deve existir o monitoramento da densidade colorimétrica da fumaça por um sistema on-line instalado na chaminé. Esses

controles do processo de combustão são medidas para impedir a geração de poluentes e, assim chamadas indiretas (AMBIENTE..., 2001).

As medidas indiretas visam reduzir a geração e o impacto de poluentes sem aplicação de equipamentos de remoção. O uso de equipamentos de remoção é uma medida direta que visa remover aquela parte de poluentes impossíveis de remover com as medidas indiretas. Portanto, deve-se, sempre que possível, tentar implantar as medidas indiretas antes de aplicar as diretas. Grauer e Kawano (2001) apresentam as seguintes medidas indiretas e diretas no controle de poluição do ar:

- Medidas indiretas: Impedir a geração de poluente; Diminuir a quantidade gerada; Diluição através de chaminé alta; Adequada localização da fonte.
- Medidas diretas: Ciclones e multiciclones; Lavadoras; Lavador Venturi; Filtro de tecido; Precipitadores eletrostáticos; Adsorvedores; Incineradores de gases; Condensadores.

2.3.3. Caracterização da biomassa

A utilização de combustíveis provenientes da biomassa seja por motivos ambientais (conversão de biomassa em produtos energéticos com impacto ambiental aceitável) ou econômicos (alternativa aos combustíveis fósseis), exige cuidado em relação à caracterização da biomassa.

Cortez *et al.* (2008) colocam que para se obter um aproveitamento mais eficiente de qualquer material sólido polidisperso⁵ em suas mais diversas aplicações, é necessário primeiramente realizar a seleção prévia das frações mais apropriadas de acordo com cada aplicação em particular. A partir dessa seleção específica será possível estudar as características físico-geométricas, químicas, térmicas, e aerodinâmicas das partículas.

Segundo Sánchez (2010), a caracterização da biomassa deve ser baseada em sua utilização, fornecendo informações sobre as propriedades determinantes, particulares a cada aplicação. Desta forma, apresentam-se, a seguir três classes de informações que são importantes para o estudo e análise do uso da biomassa em processos de combustão: composição química elementar, composição química imediata e poder calorífico.

⁵ Os materiais sólidos porosos, especificamente aqueles obtidos a partir da biomassa pré-tratada ou industrializada, são compostos por uma grande quantidade de partículas, que podem ser de diferentes formas e tamanhos (geometricamente diferentes) e ter características físico-químicas específicas. Diz-se que o material nessa condição se encontra na forma polidispersa, ou seja, é formado por um conglomerado de partículas fisicamente diferentes (CORTEZ, LORA e GÓMEZ, 2008).

2.3.3.1. Composição química elementar

Segundo Cortez *et al.* (2008) a composição química elementar de uma amostra é o conteúdo em porcentagem de massa de carbono (C), hidrogênio (H), enxofre (S), oxigênio (O), nitrogênio (N), umidade (W) e material residual (cinzas) (A). Determina-se utilizando a norma *ASTM Standard Methods for the Ultimate Analysis of Coal and Coke*, D 3176-74 (ASTM, 1983). É a característica técnica mais importante do combustível e constitui a base para análise dos processos de combustão, tais como cálculo dos volumes de ar, gases e entalpia, determinando o poder calorífico do combustível.

2.3.3.2. Composição química imediata

A composição imediata de uma amostra é o conteúdo em porcentagem de massa de carbono fixo (F), voláteis (V), umidade (W) e cinzas (A). Determina-se utilizando as normas *ASTM Standard Methods for Proximate Analysis of Coal and Coke*, D 3172-73 a D 3175-73 (ASTM, 1983) (CORTEZ *et al.*, 2008).

Tanto no caso da composição elementar como no da composição imediata deve-se determinar o teor de umidade da amostra antes das respectivas análises. Nesta análise, coloca-se amostra até atingir peso constante em uma estufa estabilizada para 105 ± 4 °C, segundo o método ASTM D 3173-73 (ASTM, 1983).

Os dados da composição elementar e imediata dos diferentes tipos de biomassa podem ser expressos das seguintes maneiras:

- Base de trabalho (tal como se utiliza: úmido, com cinzas etc.):

$$C^t + H^t + O^t + N^t + S^t + A^t + W^t = 100\%$$

$$V^t + F^t + A^t + W^t = 100\%$$

- Base analítica (tal como o combustível é analisado, sem umidade externa W^{ext}):

$$C^a + H^a + O^a + N^a + S^a + A^a + W^a = 100\%$$

$$V^a + F^a + A^a + W^a = 100\% \quad \text{e} \quad W^t = W^{ext} + W^a$$

Umidade externa W^{ext} é aquela que a amostra perde no trajeto até o laboratório.

- Base seca (sem umidade):

$$C^s + H^s + O^s + N^s + S^s + A^s = 100\%$$

$$V^s + F^s + A^s = 100\%$$

Após ter sido colocado em uma estufa de acordo com o descrito anteriormente.

- Base combustível (sem umidade e sem cinzas):

$$C^c + H^c + O^c + N^c + S^c = 100\%$$

$$V^c + F^c = 100\%$$

Considerando-se apenas os principais componentes a serem oxidados.

Para a devida conversão das bases, Soler e Lora (1991) *apud* Cortez *et al.*(2008) apresentam as relações conforme Tabela 2.

Tabela 2- Relação entre as diversas bases.

Base de trabalho que se tem como dada	Base do combustível que se deseja obter		
	trabalho	seca	combustível
trabalho	1	$(100 - W^t)/100$	$(100 - W^t - A^t)/100$
seca	$(100 - W^t)/100$	1	$(100 - A^s)/100$
combustível	$(100 - W^t - A^t)/100$	$(100 - A^s)/100$	1

Fonte: Soler e Lora (1991) *apud* Cortez *et al.*(2008)
(A) cinzas, (W) umidade, (t) trabalho, (s) seco

Neste trabalho, será adotada sempre a base seca como referência para avaliar lodos de esgoto como biomassa na geração de energia tendo em vista que, na maioria da literatura, trabalhos de teses, dissertações, artigos técnicos e normas vigentes predominam informações tomando-se como parâmetro esta base, além de que, a maioria das correlações empíricas para cálculo analítico do poder calorífico superior, que é um dado imprescindível para cálculo do poder calorífico inferior e avaliação do potencial energético do lodo, são formuladas com seus parâmetros em base seca.

A umidade de um sólido na base seca (W^s) é definida como o quociente entre a massa de água contida na amostra (M_a) e a massa do sólido seco (M_s) conforme Equação 1.

$$W^s = M_a / M_s \quad (1)$$

Onde W^s é comumente expresso em kg de água/kg de material seco.

A seguir, apresentam-se nas Tabelas 3 e 4, respectivamente, alguns dados referentes à análise elementar e imediata para diferentes tipos de biomassa.

Tabela 3- Composição elementar da biomassa (base seca).

Tipo de Biomassa	Composição Elementar (%)					
	C	H	O	N	S	A
Pínus	49,25	5,99	44,36	0,06	0,03	0,3
Eucalipto	49,00	5,87	43,97	0,30	0,01	0,72
Casca de arroz	40,96	4,30	35,86	0,40	0,02	18,34
Bagaço de cana	44,88	5,35	39,55	0,38	0,01	9,79
Casca de coco	48,23	5,23	33,19	2,98	0,12	10,25
Sabugo de Milho	46,58	5,87	45,46	0,47	0,01	1,40
Ramas de Algodão	47,05	5,35	40,77	0,65	0,21	5,89
*Serragem	48,9	5,80	43,30	0,30	0,10	1,6

Fontes: Jenkins(1990). *Sánchez (2010)

Tabela 4- Composição imediata da biomassa (base seca).

Tipo de Biomassa	Composição Imediata (%)		
	V	A	F
Pínus	82,54	0,29	17,70
Eucalipto	81,42	0,79	17,82
Casca de arroz	65,47	17,89	16,67
Bagaço de cana	73,78	11,27	14,95
Casca de coco	67,95	8,25	23,80
Sabugo de Milho	80,10	1,36	18,54
Ramas de Algodão	73,29	5,51	21,20
*Serragem	81,60	1,10	17,30

Fontes: Jenkins(1990). *Sánchez (2010)

Cortez *et al.* (2008) observam que, em sua maior parte, a biomassa é composta de carbono e oxigênio (cerca de 80%) e que o teor de carbono da biomassa é muito menor que o do carvão mineral e do petróleo, enquanto o teor de oxigênio é muito maior.

Virmond (2007) cita que a biomassa é altamente oxigenada comparada a combustíveis fósseis convencionais incluindo hidrocarbonetos líquidos e carvões. O mesmo autor comenta que o constituinte majoritário da biomassa é o carbono (30 a 60% em base seca) dependendo do teor de cinzas; seguido do hidrogênio (5 a 6% em base seca), de nitrogênio, enxofre e cloro, esses usualmente presentes em teores inferiores a 1% em base seca.

Na Tabela 4, é mostrado que o conteúdo de voláteis (V) da biomassa é muito alto (entre 65% e 83%), fator a ser considerado durante a queima total e gaseificação desses combustíveis tendo em vista que os voláteis têm um papel importante durante a ignição e as etapas iniciais de combustão de biomassa.

2.3.3.3. Poder calorífico

Segundo Cortez *et al.* (2008), o poder calorífico (PC) de um energético qualquer pode ser definido como a quantidade de energia liberada na forma de calor durante a combustão completa da unidade de massa do combustível e o valor depende da sua composição, podendo ser medido em kJ/kg no caso de combustíveis sólidos.

Garcia (2002) coloca que, caso essa quantidade de calor seja medida com a água, gerada na queima, na fase gasosa, o poder calorífico é chamado de Poder Calorífico Inferior (PCI) e caso a água gerada na combustão seja considerada na fase líquida, tem-se o Poder Calorífico Superior (PCS). A diferença entre eles é, portanto a energia requerida para evaporar a água já contida no combustível como umidade do mesmo e a água formada pela queima do hidrogênio contido no combustível.

As determinações do PCS e PCI podem ser teóricas, através do conhecimento da análise elementar e imediata do combustível ou dada de forma experimental com o uso de uma bomba calorimétrica. Parikh *et al.* (2005) estimam o PCS através de uma correlação empírica utilizando 100 tipos de combustíveis sólidos e uma base de dados com 450 pontos, usando como parâmetros a composição química imediata (Equação 2). Channiwala e Parikh (2002) estimam o PCS através de uma correlação empírica utilizando, pelo menos, 77 tipos de combustíveis, entre sólidos, líquidos e gasosos, e uma base de dados com 225 pontos, usando como parâmetro a composição química elementar (Equação 3), e Garcia (2002) apresenta a relação matemática entre PCS e PCI (Equação 4).

$$PCS = 0,3536F + 0,1559V - 0,0078A \quad (2)$$

Onde:

PCS = poder calorífico superior em MJ/kg;

F = % carbono fixo no material, em base seca;

V = % carbono volátil contido no material, em base seca;

A = % cinzas no material, em base seca.

$$PCS = 0,3491 C + 1,1783 H + 0,1005 S - 0,1034 O - 0,0151 N - 0,0211A \quad (3)$$

Onde:

PCS = poder calorífico superior em MJ/kg;

C = % de carbono no material, em base seca;

H = % de hidrogênio no material, em base seca;

S = % de enxofre no material, em base seca;

O = % de oxigênio no material, em base seca;

N = % de nitrogênio no material, em base seca;

A = % cinzas no material, em base seca.

$$PCI = PCS - 2440 (9H + W) \quad (4)$$

Onde:

PCI = poder calorífico inferior, kJ/kg em base seca;

PCS = poder calorífico superior, kJ/kg;

H = teor de hidrogênio do material, kg/kg em base seca;

W= teor de umidade do material, kg de água/kg de material seco.

Garcia (2002) observa que, normalmente, o que mais se usa é exatamente o poder calorífico inferior, uma vez que, na maioria dos processos industriais, os gases de combustão são liberados a temperaturas altas onde a água neles contida se encontra na fase gasosa.

Khan *et al.* (2009) citam que os conteúdos de C e H contribuem positivamente para o poder calorífico, e o conteúdo de O negativamente. Virmond (2007) coloca que o aumento do teor de cinzas diminui o valor do poder calorífico, pois cinzas não contribuem para o calor total liberado pela combustão. Já maior proporção de O e de H, comparado ao C, reduz o valor energético de dado combustível devido à menor quantidade de energia contida nas ligações C-O e C-H em relação às ligações C-C (MCKENDRY, 2002).

A umidade do combustível é fator limitante na combustão de biomassa devido ao seu efeito sobre o PC. Elevado teor de umidade no combustível, podem resultar em ignição pobre, redução da temperatura de combustão e dificultar a combustão dos produtos de reação e, conseqüentemente, afetar a qualidade da combustão, dificultando também a liberação da matéria volátil. O limite autotérmico para a maioria das biomassas combustíveis é próximo a 65% de umidade (massa de água por massa de combustível úmido). Acima desse ponto,

energia insuficiente é liberada pela combustão para satisfazer a evaporação e a produção de calor (VIRMOND, 2007).

Na prática, a maioria dos combustores requer um combustível suplementar, tal como gás natural, quando da queima de biomassa com teor de umidade de 50 a 55%, e CO e outros produtos da combustão incompleta podem ser emitidos em quantidades maiores, dependendo do tipo de combustor (JENKINS *et al.*, 1998).

Sánchez (2010) observa ainda que, um extenso trabalho de caracterização foi realizado por Jenkins e Ebeling, na Universidade da Califórnia. Foram caracterizados 62 tipos de biomassas, com análise imediata e elementar e poder calorífico.

Na Tabela 5 apresentam-se alguns dados referentes ao poder calorífico superior para diferentes tipos de biomassa.

Tabela 5- Poder calorífico superior (base seca).

Tipo de Biomassa (PCS)	Poder calorífico superior
	(MJ/kg)
Pínus	20,02
Eucalipto	19,42
Casca de arroz	16,14
Bagaço de cana	17,33
Casca de coco	19,04
Sabugo de milho	18,77
Ramos de algodão	18,26
Resíduos sólidos urbanos	19,87
Excrementos de gado	17,33
*Serragem	18,00

Fontes: Jenkins(1990). *Sánchez (2010)

Virmond (2007) cita que Heikkinen *et al.* (2004) investigaram as características pirolíticas de diversas biomassas de diferentes origens. A identificação e a caracterização em termos de análise imediata, análise elementar e poder caloríficos dessas biomassas são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6- Caracterização padrão de combustíveis.

Umidade [% , b.c.r.] ¹	Análise imediata ²				Análise Elementar						PCI ³ [MJ.kg ⁻¹ , b.c.r.]
	[% , b.s.]				[% , b.s.] ²						
	M.V. ⁴	C.F. ⁵	Cinzas		C	H	N	S	O	Cl	
<i>Orgânicos</i>											
Pão	9,48	79,68	17,37	2,96	45,75	7,12	2,86	0,17	39,76	1,38	15,31
Semente	7,79	78,18	15,95	5,86	50,47	7,36	2,70	0,02	33,60	0,00	15,01
Amido	16,76	90,41	9,59	0,00	44,26	6,82	0,00	0,00	48,93	0,00	12,81
<i>Lignocelulósicos</i>											
Papelão	5,40	79,07	10,04	10,89	37,95	4,61	0,25	0,34	45,63	0,33	13,69
Celulose	5,11	90,00	9,90	0,10	44,63	7,06	0,02	0,00	48,19	0,00	14,98
Papel liso	6,50	65,40	6,87	27,73	26,52	3,40	0,00	0,04	42,25	0,04	11,94
Miscanthus	7,17	77,18	19,83	2,99	48,82	5,86	0,36	n.d.	41,86	0,11	16,38
Casca de oliva	9,48	67,50	26,98	5,52	49,37	7,84	1,28	0,11	35,72	0,15	16,05
Lodo de papel seco	2,47	53,05	1,23	45,74	23,80	3,34	0,09	0,16	26,81	0,06	6,17
Lodo de esgoto ⁶	4,30	59,30	9,70	31,00	38,10	5,20	4,51	0,91	n.d.	n.d.	16,77 ⁷
Resíduos de madeira	6,50	64,71	20,86	14,44	36,11	4,27	2,72	0,49	41,85	0,13	13,36
Pinheiro	8,38	81,50	18,37	0,13	51,62	6,05	0,11	0,11	41,99	0,00	17,22
Girassol	8,59	76,80	16,40	6,82	46,89	6,71	5,98	0,29	33,24	0,08	14,24
Resíduos	8,40	76,23	19,98	3,97	47,86	8,59	1,12	0,01	37,46	0,98	15,85
Xilose	9,63	66,31	23,04	10,62	40,30	6,10	0,03	0,00	42,96	n.d.	n.d.

Fonte: Heikkinen *et al.* (2004) (modificada) *apud* Virmond (2007)

1 LECO TGA 501; b.c.r.: base como recebida;

2 Vario EL (Elementar); b.s.: base seca;

3 Bomba calorimétrica IKA C 4000, com base na DIN 51900;

4 Matéria voátil;

5 Carbono fixo;

6 Fonte: Otero *et al.* (2002);

7 Valor correspondente ao PCS em b.s.

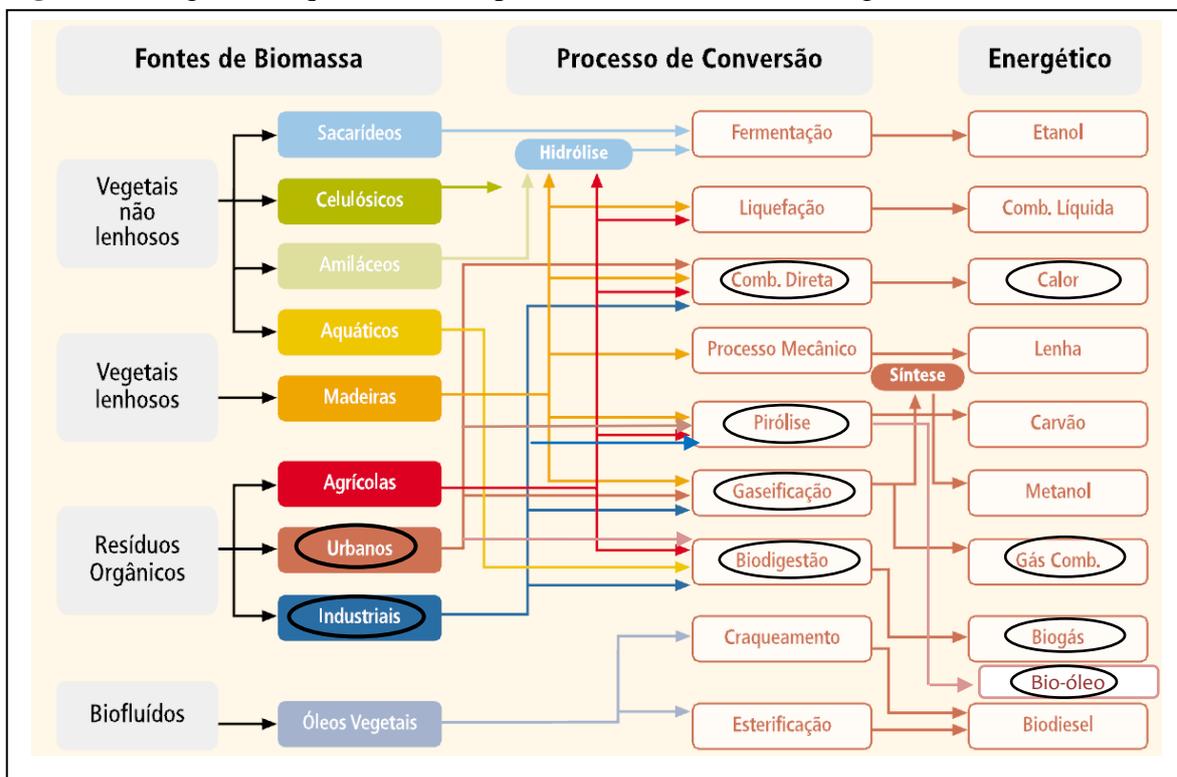
2.3.4. Tecnologias de aproveitamento da biomassa

A biomassa pode ser queimada no estado sólido ou convertida para o estado líquido ou gasoso. Ela apresenta diferentes tecnologias para o processamento e transformação de energia, mas segundo Cortez *et al.* (2008), todas as tecnologias de biomassa atualmente usadas no mundo possuem dois problemas cruciais: o custo da biomassa, que podem envolver desde custos com coleta, transportes e condicionamentos, até custos com programas de reflorestamento; e a eficiência energética de sua cadeia produtiva, pois a energia produzida, a partir da biomassa, utilizando as tecnologias de conversão tecnológica disponíveis, tem que

compensar a energia consumida na cadeia produtiva que podem envolver energia com transportes, estocagens, pré-secagem do material, processamento e transformação da biomassa, refinamento do produto final, etc.

O aproveitamento da biomassa pode ser feito por meio da combustão direta (com ou sem processos físicos de secagem, classificação, compressão, corte/quebra etc.), de processos termoquímicos (gaseificação, pirólise, liquefação e transesterificação) ou de processos biológicos (digestão anaeróbia e fermentação) (ANEEL,2005). A Figura 2 apresenta os principais processos de conversão tecnológica da biomassa em energéticos.

Figura 2- Diagrama esquemático dos processos de conversão energética da biomassa



Fonte: Atlas de energia elétrica do Brasil (ANEEL,2005) adaptado

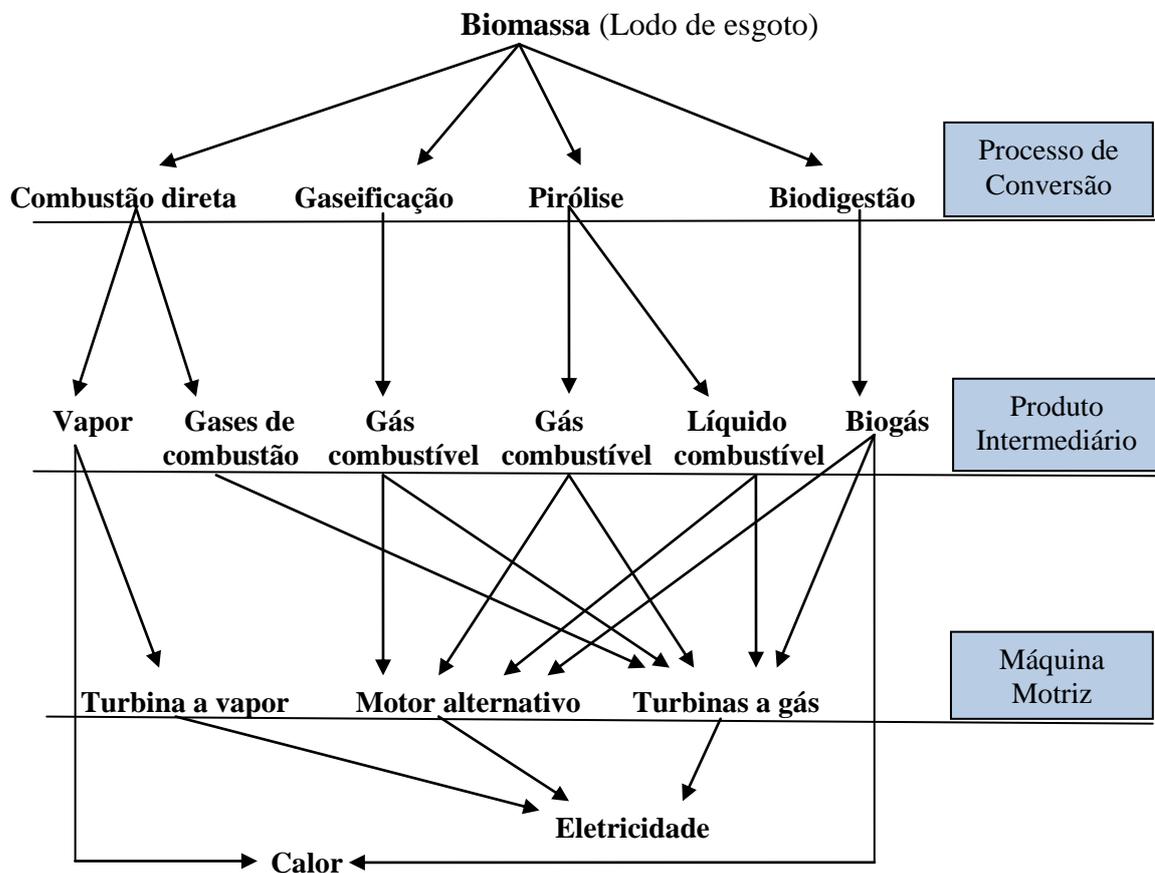
Os derivados obtidos dependem tanto da matéria-prima utilizada (cujo potencial energético varia de tipo para tipo) quanto da tecnologia de processamento para obtenção dos energéticos. A conversão tecnológica da biomassa em energéticos é feita basicamente para produção de calor, eletricidade e combustíveis para sistemas de transporte.

São as características da fonte de biomassa que determinam a escolha do processo de conversão e as dificuldades subsequentes de processamento que podem surgir. Assim, o conhecimento de suas propriedades físico-químicas é importante para se determinar o uso da mesma como fonte de energia.

No presente estudo, a biomassa utilizada será o lodo de esgoto cujos principais processos de conversão utilizados são a combustão direta, pirólise, gaseificação e biodigestão, que produzem como produto final calor e eletricidade conforme demonstra-se na Figura 3.

Observa-se na Figura 3 que todas as rotas tecnológicas para obtenção da energia elétrica a partir da biomassa preveem a conversão da matéria-prima em um produto intermediário que será utilizado em uma máquina motriz. Essa máquina produzirá a energia mecânica que acionará o gerador de energia elétrica.

Figura 3- Diagrama esquemático dos processos de conversão energética da biomassa (lodo de esgoto) até o produto final (calor e eletricidade)



Fonte: Produção da autora

2.3.4.1. Combustão direta

Combustão de biomassa é o método mais antigo para produção de energia que o ser humano já usou. Até mesmo hoje em dia, processos de combustão contribuem com quase 85% na produção de energia (VAMVOUKA e ZOGRAFOS, 2004).

Segundo Carvalho e Mcquay (2007), o processo de combustão caracteriza-se por uma reação exotérmica muito rápida entre combustível e oxidante, acompanhada por liberação de calor. Em geral, os elementos químicos nos combustíveis responsáveis pela liberação de calor são: carbono, hidrogênio e enxofre. O termo combustão completa é usado para descrever a reação ideal de combustão, quando todo carbono no combustível é oxidado para dióxido de carbono (CO_2), todo hidrogênio para água (H_2O) e todo enxofre para dióxido de enxofre (SO_2), ou seja, em condições ideais, a combustão representa a oxidação completa da fração orgânica do combustível a gases.

Essa conversão ocorre em três etapas: secagem do combustível, pirólise do sólido (formação de compostos voláteis e sólido rico em carbono) e queima de compostos voláteis e do resíduo sólido final (VIRMOND, 2007). O principal tipo de reator utilizado para a combustão de biomassa é o reator de leito fixo, dado que apresenta como vantagens a necessidade de pré-tratamento mínimo do combustível, tecnologia relativamente dominada e baixos custos de construção e operação (YANG *et al.*, 2005 *apud* VIRMOND, 2007). Porém, entre as desvantagens está a baixa eficiência.

Um combustível pode conter uma porção incombustível, que não fornece calor durante a combustão. Esta porção é composta de umidade e cinzas. Assim, o combustível será de melhor qualidade quanto menor forem seus teores de umidade e cinzas. De Sena (2005) *apud* Borges (2008) cita que para uma boa combustão, o combustível deve possuir elevado teor de carbono fixo e material volátil, além de alto poder calorífico superior. Quanto maior o teor de carbono e hidrogênio, melhor será a combustão, enquanto altos teores de nitrogênio e enxofre poderão resultar em altos índices de emissões de NO_x e SO_2 . O conhecimento da composição química de um combustível é essencial porque permite a estimativa da quantidade de energia liberada pelo processo de combustão do mesmo.

Carvalho e Mcquay (2007) citam que, para que uma dada substância seja considerada um combustível industrial, ela precisa: (a) existir em grande quantidade, (b) possuir baixo custo, e (c) ser aplicável no processo industrial em consideração. O mesmo autor coloca que, além desses três fatores, diversos outros fatores devem ser considerados na seleção de um combustível tais como a eficiência do processo, as características de formação de poluentes, a facilidade de controle, a presença de impurezas como cinzas e a facilidade de transporte.

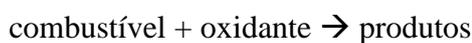
Na maior parte das aplicações de combustão, o oxidante é o ar atmosférico, cuja composição volumétrica aproximada é 78,08% de nitrogênio, 20,95% de oxigênio, 0,93% de argônio, 0,03% de dióxido de carbono e 0,01% de outros gases (neônio, hélio, metano, etc) (PERRY e CHILTON, 1973 *apud* CARVALHO e MCQUAY, 2007).

A quantidade mínima teórica de oxidante requerida para a ocorrência de combustão completa é chamada quantidade estequiométrica. A quantidade de oxidante fornecida a um processo de combustão é, em geral, maior que a estequiométrica (CARVALHO e MCQUAY, 2007).

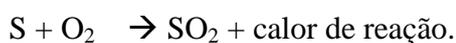
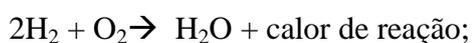
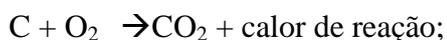
Após a etapa de secagem do combustível, o principal parâmetro de controle do processo de combustão é a razão entre a quantidade de ar real e a quantidade de ar necessária para a combustão completa do combustível sólido (λ). Valores de λ inferiores a 1 ocasionam combustão incompleta do combustível e apenas parte dele é convertida em energia térmica. Excesso de ar resfria o sistema, conduzindo a combustão incompleta e perdas térmicas (VIRMOND, 2007).

A combustão estequiométrica ($\lambda = 1$) é dificilmente alcançada devido à dificuldade de obter uma mistura homogênea entre o combustível, os gases de exaustão e o ar adicionado ao sistema. Dependendo da tecnologia de combustão utilizada, valores de λ comumente aplicados de forma a favorecer a combustão completa de biomassas são 1,1 a 1,8 para sistemas de grande escala e 1,5 a 2,0 para pequena escala (OBERNBERGER *et al.*, 2006).

Assumindo que o processo de combustão possa ser descrito por uma reação química simples, podemos representá-lo por:



Dessa forma, tem-se que na combustão completa os elementos químicos combustíveis (C, H e S) reagem com o oxigênio do ar formando os produtos de combustão seguintes:



A relação entre o combustível e o oxidante em uma mistura determina se a mesma é ou não inflamável. Uma mistura somente queimará se a concentração do combustível estiver entre o limite inferior e superior de inflamabilidade, que chamaremos de LI e LS, respectivamente. A medição dos limites de inflamabilidade envolve experimentos repetidos com diferentes valores de variáveis como razão combustível/oxidante, porcentagem de diluentes, temperatura inicial e pressão inicial. A seguir, listam-se na Tabela 7 os limites de inflamabilidade de alguns combustíveis em ar.

Tabela 7- Limites de inflamabilidade de alguns combustíveis em ar.

Combustível	Fórmula	LI(%)	LS(%)
Hidrogênio	H ₂	4	74,2
Monóxido de Carbono	CO	12,5	74,2
Metano	CH ₄	5	15
Etano	C ₂ H ₆	3	12,4
Etileno	C ₂ H ₄	3,1	32
Acetileno	C ₂ H ₂	2,5	80
Propano	C ₃ H ₈	2,1	9,5
Propileno	C ₃ H ₆	2,4	11
n-Butano	C ₄ H ₁₀	1,6	8,4
Isobutano	C ₄ H ₁₀	1,6	8,4
Isopentano	C ₅ H ₁₂	1,4	8,3
Éter dimetílico	CH ₃ -O-CH ₃	3,4	27

Fonte: Glassman (1996) *apud* Carvalho e Mcquay (2007)

A razão ar/combustível estequiométrica para hidrocarbonetos combustíveis típica está entre 14 e 17. Para biomassas, esta relação está entre 4 e 7, devido ao maior conteúdo de oxigênio nas biomassas.

Segundo Sánchez (2010), a energia liberada no processo de combustão normalmente é quantificada pelo poder calorífico de um combustível. A eficiência do processo de combustão pode ser avaliada com base na temperatura da chama, que depende não apenas do poder calorífico, mas também da composição, uma vez que essa determina a quantidade de ar teórico para a combustão. Quanto menor a quantidade de ar requerida, menor quantidade de diluente na forma de nitrogênio atmosférico precisará ser aquecida com os produtos de combustão para alcançar a temperatura adiabática da chama.

A eficiência do processo de combustão pode ser avaliada, ainda, pela composição das cinzas. Elevados teores de carbono não queimado nas cinzas indica não apenas baixa eficiência na queima do combustível, como também reduz a estabilização das cinzas (temperatura química) e aumenta o volume de cinzas. Isso, por sua vez, aumenta os custos de manipulação, transporte e disposição desses resíduos.

2.3.4.2. Pirólise

A pirólise é o mais simples e mais antigo processo de conversão de um combustível (normalmente lenha) em outro de melhor qualidade e conteúdo energético (carvão, essencialmente). O processo consiste em aquecer o material original, na “quase-ausência” de ar, até que o material volátil seja retirado. O principal produto final (carvão) tem uma densidade energética duas vezes maior que aquela do material de origem e queima em temperaturas muito mais elevadas (ANEEL,2005). Virmond (2007) define de forma sintetizada que o processo de pirólise é a decomposição térmica da matéria orgânica na ausência de oxigênio.

A principal biomassa atualmente pirolisada é a biomassa lignocelulósica, que é uma mistura complexa de polímeros naturais de carboidratos conhecidos, como celulose, hemicelulose e lignina, além de pequenas quantidades de outras substâncias, como extrativos e cinzas. A composição da biomassa apresenta papel importante na distribuição dos produtos de pirólise. Cada material exibe uma característica particular quando é pirolisado, devido à proporção dos componentes que o constituem (GÓMEZ *et al*,2008).

Segundo Gómez *et al* (2008), no conceito mais amplo, a pirólise pode ser teoricamente considerada o aquecimento do material sólido numa atmosfera isenta de oxigênio e à temperatura média da ordem dos 500°C. Esse processo, dependendo das condições que se realiza, leva à formação de três produtos básicos nas fases sólida, líquida e gasosa.

O sólido é um carvão (carvão vegetal de biomassa), cujo rendimento gravimétrico é maximizado quando se trabalha o processo a baixas taxas e tempos de aquecimento do insumo sólido sendo pirolisado, aumentando seu tempo de residência nessas condições, e a elevadas pressões.

O líquido é conhecido como líquido da pirólise, líquido pirolenhoso ou licor pirolenhoso, constituído basicamente por uma fase aquosa ácida (ácido pirolenhoso), no qual se verificam, entre outros, os seguintes compostos: ácido acético, ácido fórmico, metanol, acetona, álcoois superiores, acetato de etila, acetaldeídos, alcatrão/bioóleo solúvel, água, etc. A fase oleosa é constituída pelo alcatrão/bioóleo insolúvel, óleo pesado de elevada viscosidade (dependendo do processo de pirólise), formado por uma cadeia de moléculas maiores.

O gás é constituído por uma mistura de gases, alguns dos quais são combustíveis, entre os quais se destacam o CO, H₂ e CH₄ (monóxido de carbono, hidrogênio e metano, respectivamente). De modo geral, Gómez *et al* (2008) coloca que o rendimento em produtos

da pirólise dos sólidos orgânicos é função de variáveis operacionais, tais como taxa de aquecimento do insumo, temperatura e pressão do processo e tempos de aquecimento e residência das fases no reator, tipo de tecnologia utilizada, características físico-químicas e geométricas do insumo, entre outras variáveis.

A gaseificação, a pirólise e a carbonização, esta última conhecida como um processo de pirólise lenta, podem ser consideradas variações de um mesmo processo. Segundo Gómez *et al* (2008), a carbonização e a pirólise rápida são tecnicamente identificados como processos de pirólise propriamente ditos, o primeiro como sendo do tipo de pirólise lenta ou pirólise convencional, e o segundo sendo considerado um processo avançado e moderno de pirólise.

Cada um dos três modos de pirólise visa maximizar um só produto, a carbonização maximiza o carvão, a pirólise rápida maximiza os líquidos (bioóleo) e a gaseificação, os gases combustíveis, cada um com suas imediatas aplicações. O principal objetivo da pirólise hoje é a obtenção de biocombustíveis tecnicamente mais avançados de forma econômica e ambientalmente competitiva e sustentável.

Gómez *et al* (2008) coloca que embora o bioóleo tenha natureza química diferente do petróleo, pode ser considerado petróleo de origem vegetal obtido pelo processo de pirólise rápida de biomassa. Atualmente o maior interesse dos países desenvolvidos em relação à pirólise está direcionado à obtenção de produtos líquidos, devido à elevada densidade energética e potencial para substituir combustíveis líquidos derivados do petróleo (FERNANDES, 2010). O bioóleo possui, aproximadamente, metade do valor da capacidade calorífica de um óleo combustível convencional proveniente do petróleo que está na faixa de 42 a 44 MJ/kg (BRIDGWATER; PEACOCKE, 2000 *apud* SÁNCHEZ, 2010).

Assim, têm-se como grande objetivo hoje, nesta área de pirólise rápida de biomassa implementação das chamadas biorrefinarias (GÓMEZ *et al*, 2008). No entanto, o mesmo autor coloca que o interesse atual pelo desenvolvimento de opções tecnológicas e economicamente viáveis de produzir e usar de forma expressiva os óleos da pirólise rápida de resíduos lignocelulósicos, exigem mais pesquisas, básicas e aplicadas, teóricas e experimentais, de forma que possam ser identificadas as necessidades de novos protótipos de sistemas mais eficientes quantitativamente e qualitativamente.

Dentre as diferentes aplicações dos produtos obtidos a partir da pirólise pode-se citar geração de calor e energia e utilização como combustíveis aplicados a sistemas de transporte. Ainda, compostos químicos de alto valor agregado podem ser extraídos, tais como adesivos e conservantes para madeira, corantes e flavorizantes para alimentos (VIRMOND, 2007).

2.3.4.3. Gaseificação

Em termos gerais, segundo Virmond (2007), a gaseificação de biomassa consiste em uma tecnologia de conversão térmica onde combustíveis sólidos são convertidos em gases combustíveis na presença de quantidades limitadas de oxigênio, ar, vapor de água ou uma combinação desses (agentes oxidantes).

Lora *et al* (2008) colocam que este processo de conversão ocorre a temperaturas intermediárias, isto é, temperaturas acima das recomendadas nos processos de pirólise rápida e abaixo das recomendadas nos processos de combustão. Behainne e Sánchez (2010), afirmam que essa temperatura está entre 800 e 1000°C.

Quando a gaseificação é realizada só com ar, resulta desse processo uma mistura gasosa constituída de CO, CO₂, N₂, H₂ e CH₄ (monóxido de carbono, dióxido de carbono, nitrogênio, hidrogênio e metano, respectivamente), um gás pobre, de baixo poder calorífico (aproximadamente 5MJ/Nm³), e contendo ao redor de 50% em volume de nitrogênio na mistura gasosa de saída do reator (base seca) (LORA *et al*, 2008). Deste gás, utilizando-se catalisadores, pode-se obter adicionalmente metano, metanol, hidrogênio e amônia.

O material carbonoso sólido pode também ser gaseificado na presença de quantidades relativas de vapor de água superaquecido sendo incorporadas ao agente de gaseificação (oxigênio ou ar), com o objetivo principal de produzir uma mistura gasosa especial, conhecida como gás de síntese, basicamente rica em hidrogênio (H₂) e monóxido de carbono (CO₂) (LORA *et al*, 2008).

Os processos de gaseificação, em geral, se desenvolvem em cinco estágios (HAYKIRI-ACMA e YAMAN, 2007 *apud* VIRMOND, 2007): devolatilização inicial ou pirólise; combustão de voláteis; combustão do resíduo sólido; gaseificação do resíduo sólido; reações em fase gasosa.

Behainne e Sánchez (2010) citam que os gaseificadores podem ser classificados de acordo com o Poder Calorífico do gás produzido: gás de baixo poder calorífico (até 5MJ/Nm³), gás de médio poder calorífico (de 5 a 10 MJ/Nm³) e gás de alto poder calorífico (maior que 10 MJ/Nm³); pelo tipo de agente gaseificador: ar, vapor de água, oxigênio ou hidrogênio, também conhecido como hidrogaseificação; de acordo com a pressão de trabalho: baixa pressão (pressão atmosférica) e pressurizados (até 2000kPa); e com o tipo e forma de biomassa utilizada: resíduos agrícolas, resíduos industriais, resíduos sólidos urbanos (lixo doméstico), biomassa em natura, biomassa peletizada e biomassa pulverizada.

Entretanto, o mesmo autor coloca que a classificação mais utilizada é pela Direção do Movimento Relativo da Biomassa e do Agente de Gaseificação (contrafluxo ou contracorrente, fluxo direto ou paralelo, fluxo cruzado e leito fluidizado). Lora *et al* (2008) aponta que entre os vários tipos de tecnologia para gaseificação, a mais difundida, conhecida e dominada operacionalmente é a baseada em reatores de leito fixo, seguida da baseada em reatores de leito fluidizado.

O gás produzido a partir da gaseificação tem muitas aplicações práticas, desde a combustão em motores alternativos de combustão interna (MACI) e turbinas a gás para a geração de energia mecânica e elétrica (acionamento de máquinas de fluxo etc.), para a geração direta de calor, ou como matéria-prima na obtenção de combustíveis líquidos, tais como diesel e gasolina, metanol, etanol, amônia, hidrogênio, e outros produtos químicos, através de processos de síntese química catalítica.

2.3.4.4. Biodigestão

Segundo Cortez *et al* (2008), a biodigestão anaeróbica consiste em um processo de conversão bioquímica na qual ocorre a degradação biológica da matéria orgânica através da ação de diversos microrganismos em ausência de oxigênio. Esse processo oferece, como um dos produtos finais, uma mistura de gases, denominada biogás (aproximadamente 78%), composta basicamente de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), podendo apresentar quantidades menores de gás sulfídrico (H_2S), nitrogênio (N_2) e hidrogênio (H_2), entre outros. Andreoli *et al* (2003) citam que a proporção dos gases que compõem o biogás varia em função da composição do resíduo a ser tratado e das condições do reator.

Uma vez que a produção do biogás é toda feita por bactérias, fatores que afetam a sobrevivência das mesmas afetarão diretamente a formação do biogás. Alguns dos fatores mais importantes e que devem ser controlados nos biodigestores são (ANDREÓLI *et al*, 2003): temperatura, alcalinidade e pH, teor de água e nutrientes.

Uma série de parâmetros físicos, químicos e bioquímicos é importante na caracterização dos resíduos a fim de avaliar o potencial de produção de biogás e o nível tecnológico necessário para o processo ser economicamente viável (CORTEZ *et al*, 2008). Os resíduos podem ser classificados de acordo com características físicas (densidade, tamanho, viscosidade, conteúdo de sólidos), bioquímicas (demanda bioquímica de oxigênio e demanda química de oxigênio), químicas (presença de metais, nutrientes, etc.) e bacteriológicas

(presença de coliformes fecais, total de bactérias e agentes patogênicos) (TAIGANIDES, 1977 *apud* CORTEZ *et al*, 2008).

Os fatores mais importantes em processos de biodigestão são a quantidade de resíduos a ser produzida e o seu conteúdo de sólidos.

- Quantidade de resíduos produzida em determinado processo: fundamental no planejamento de sistemas de biodigestão assim como na avaliação do potencial de produção do biogás.
- Conteúdo de sólidos: importante para a determinação da maior ou menor presença de compostos de origem orgânica (sólidos voláteis) e pode ser definido pela matriz representada na Figura 4.

Figura 4- Matriz que define o conteúdo de sólidos de um resíduo

$$\begin{array}{rcc}
 \boxed{\text{ST}} & = & \boxed{\text{STV}} + \boxed{\text{STF}} \\
 \parallel & & \parallel \\
 \boxed{\text{STS}} & = & \boxed{\text{SSV}} + \boxed{\text{SSF}} \\
 + & & + \\
 \boxed{\text{STD}} & & \boxed{\text{SDV}} \quad \boxed{\text{SDF}}
 \end{array}$$

Onde:
 ST = sólidos totais;
 STV= sólidos totais voláteis;
 STF= sólidos totais fixos;
 STS= sólidos totais suspensos;
 SSV= sólidos suspensos voláteis;
 SSF= sólidos suspensos fixos;
 STD= sólidos totais dissolvidos;
 SDV= sólidos dissolvidos voláteis;
 SDF= sólidos dissolvidos fixos.

ST			
STS		STD	
SSV	SSF		

ST			
STV		STF	
SSV	SDV	SSF	SDF

Fonte: Cortez *et al* (2008) adaptado

Basicamente, ST é o peso seco resultante da evaporação da água a 103°C até a obtenção de peso constante da amostra e usualmente é expresso em % em relação ao peso úmido da amostra. O conteúdo de umidade da amostra é dado pela Equação 5.

$$W\% = 100 - ST\% \quad (5)$$

O valor de STF é determinado pelo peso das cinzas resultantes da combustão dos ST acima de 550°C (combustão completa). Portanto, STV é a diferença entre ST e STF. O valor de STV corresponde, de maneira aproximada, à quantidade de matéria orgânica contida no resíduo. Os sólidos voláteis e fixos, por sua vez, podem ser encontrados em suspensão ou

diluídos (CORTEZ *et al*, 2008). Tendo-se conhecimento dos sólidos totais (ST) ou dos sólidos voláteis (STV) do material disponível, é possível fazer uma previsão do gás gerado e do volume necessário do biodigestor.

A característica bioquímica DBO (demanda bioquímica de oxigênio) é importante na avaliação do potencial de produção de biogás, assim como do potencial de poluição de um resíduo.

A demanda bioquímica de oxigênio (DBO) é definida como a quantidade de oxigênio requerida para se estabilizar bioquimicamente um composto orgânico em condições aeróbicas. A demanda de oxigênio total é dividida em três estágios: a demanda inicial exercida pela presença de certos elementos químicos redutores; a demanda relativa à decomposição de compostos carbonáceos; e, finalmente, a demanda exercida pela presença de proteínas, uréia e outras formas redutoras de nitrogênio.

A demanda química de oxigênio (DQO) normalmente não é considerada um parâmetro de processos de tratamento biológico. Os valores de DQO são mais altos do que os de DBO e ambos são expressos em mg/L ou mg/g de ST.

A degradação anaeróbia converte os compostos orgânicos em novas células bacterianas e em vários compostos que, juntos, formam o biogás. O biogás é um gás incolor, geralmente inodoro (se não contiver demasiadas impurezas), insolúvel, leve e de baixa densidade, constituído principalmente de metano, gás carbônico e outros gases em pequenas concentrações conforme apresentado no Quadro 3 (ANDREÓLI *et al*, 2003).

Quadro 3- Composição média da mistura gasosa do biogás

Metano (CH ₄)	50% a 75%
Dióxido de Carbono (CO ₂)	25% a 40%
Hidrogênio (H ₂)	1% a 3%
Nitrogênio (N ₂)	0,5% a 2,5%
Oxigênio (O ₂)	0,1% a 1%
Sulfureto de Hidrogênio (H ₂ S)	0,1% a 0,5%
Amônio (NH ₃)	0,1% a 0,5%
Monóxido de Carbono (CO)	0% a 0,1%
Água (H ₂ O)	Variável

Fonte: Pires (2000) *apud* Andreóli *et al* (2003)

Em condições normais de produção, o biogás não é tóxico graças a seu baixo teor de monóxido de carbono (inferior a 0,1%). Para teores elevados, da ordem de 1% (excepcionais nas condições normais de produção do biogás), torna-se tóxico e mortal.

O gás sulfídrico é muito corrosivo e ataca além de outros materiais, o cobre, o latão e o aço, dependendo de sua concentração. Esse gás é ainda responsável pelo odor pútrido característico do biogás e ele pode constituir um problema a partir do momento em que haja combustão do gás e que sejam inalados os produtos dessa combustão, pois a formação do dióxido de enxofre (SO₂) é extremamente nociva, causando perturbações pulmonares (ANDREÓLI *et al*, 2003).

Outros gases contidos no biogás não causam problemas em termos de toxicidade ou nocividade. O gás carbônico, em proporção significativa (25% a 40%), ocupa boa parte do volume útil e obriga, quando não suprimido, a aumento das capacidades de armazenamento. O vapor de água pode ser corrosivo para as canalizações depois de condensado.

Por apresentar maior teor de metano em sua composição, o biogás pode ser aplicado como combustível, possibilitando a produção de energia elétrica e térmica. Ele será mais puro quanto maior for seu teor de metano, estando seu poder calorífico diretamente relacionado com a quantidade existente na mistura gasosa.

O poder calorífico inferior (PCI) do biogás é cerca de 5.500 kcal/m³ ou 23.027,4 kJ/m³, quando a percentagem de metano é aproximadamente de 60% (ANDREÓLI, 2003). O mesmo autor cita que com um percentual de cerca de 70% de metano, o PCI é de aproximadamente 23.380 kJ/m³, ou 6,5 kW/m³. Já a Enciclopédia Agrícola Brasileira (1995) cita que esse poder calorífico, com aproximadamente 58% de metano, é de 5.075 kcal/m³ ou 21.248 kJ/m³. Gaspar (2003) coloca que o PCI do biogás pode variar de 5.000 a 7.000 kcal/m³ e que submetido a um alto índice de purificação, pode gerar um índice de até 12.000 kcal/m³.

Na Tabela 8 tem-se uma comparação entre o poder calorífico do biogás e outros gases.

Tabela 8- Comparação entre o poder calorífico do biogás e outros gases.

Combustível	PC (kJ/m ³)
Biogás	22.300
Gás de rua (canalizado)	18.600
Gás Natural	38.425
Metano	37.017
Propano	92.260

Fonte: Meynell (1976) *apud* Cortez *et al* (2008)

Segundo Coelho *et al* (2006), para que o biogás possa ser utilizado como combustível, seja em motores, turbinas a gás ou microturbinas, é necessário identificar sua vazão, composição química e poder calorífico, parâmetros que determinam o real potencial de geração de energia elétrica, além de permitir dimensionar os processos de pré-tratamento do biogás, como a remoção de H₂S (ácido sulfídrico) e da umidade, com o propósito de evitar danos aos equipamentos da instalação e aumentar seu poder calorífico.

Segundo Andreoli *et al* (2003), pode ser considerado uma das fontes energéticas mais econômicas e de fácil aquisição pelas pequenas propriedades rurais além de apresentar vantagem diante de outros combustíveis, pois é produzido pela degradação de resíduos orgânicos, sendo uma fonte de energia renovável.

O biogás pode ser usado em fogões, lâmpadas, geladeiras a gás, aquecimento, caldeiras, acionamento de motores a explosão e aqueles usados para irrigação e geração de energia elétrica. Dessa forma, observa-se que o biogás tanto pode ser usado na queima direta, gerando calor como convertido em eletricidade.

A Tabela 9 apresenta o consumo de biogás para algumas dessas utilizações.

Tabela 9- Consumo e pressão do biogás para algumas de suas utilizações.

Tipo	Pressão de utilização (MCA)	Consumo
Cocção	6,0 a 15,0	0,034 m ³ /pessoa.d
Iluminação	5,0 a 10,0	0,07 m ³ / camisa de 100W.h
Geladeira (absorção)	10,0	3,10 m ³ /dia
Forno de assar	10,0	0,42 m ³ /h
Aquecedor de ambiente	10,0	0,23 m ³ /h
Chuveiro a gás	10,0	0,15 m ³ /pessoa
Motor a explosão	15,0 (mínimo)	0,37 m ³ /HP.h

Fonte: Craveiro (1982) *apud* Cortez *et al* (2008)

A Enciclopédia Agrícola Brasileira (1995) cita que, em média, uma família de 6 a 7 pessoas na zona rural necessita de cerca de 10 m³/dia de biogás com 40 a 60% de CH₄, para refrigeração, iluminação, aquecimento, TV e mais o uso de um motor estacionário por 2 a 3 horas/dia. Gaspar (2003) também apresenta uma tabela onde as vantagens do biogás podem ser visualizadas (Tabela 10), cujos dados foram calculados para uma residência com cinco pessoas.

Tabela 10- Relação de consumo de biogás em equipamentos para uma residência com cinco pessoas.

Equipamentos	Unidade	Consumo
Lampião (cada)	m ³ /h	0,14
Cozimento (5 pessoas x 0,23 m ³)	m ³ /h	1,15
Fogão	m ³ /dia/pessoa	0,34
Motor	m ³ /hp/h	0,45
Chuveiro	m ³ /banho de 15 minutos	0,80
Campânula para aquecer pintos	m ³ /h para 1500 kcal	0,162
Geladeira	m ³ /dia	2,0
Incubadora	m ³ /h/100l de capacidade	0,05
Geração de Eletricidade	m ³ /kW/h	0,62
Total de consumo/dia	m ³	5.712

Fonte: CETEC, 1982 *apud* Gaspar (2003)

Em termos ambientais, a utilização do biogás reduz, quando não acaba, com a necessidade de retirar lenha das matas próximas à residência rural. Com isso, não ocorrem velhos problemas muito comuns nas regiões rurais, como a erosão do solo, a proliferação de pragas da lavoura em virtude da extinção de predadores naturais que vivem nas matas, descontrole do nível de chuvas devido à maior evaporação de água proveniente da retirada das matas que atuam como "cobertor térmico" para o solo, destruição da fauna e flora dessas matas, entre outros (USP, 2001 *apud* GASPAR, 2003).

O desenvolvimento de um programa de biogás também representa um recurso eficiente para tratar os excrementos e melhorar a higiene e o padrão sanitário do meio rural. Os lançamentos de dejetos humanos e animais num digestor de biogás soluciona o problema de dar fins aos ovos dos esquistossomos e ancilóstomos, bem como de bactérias patogênicas e demais parasitas. O número de ovos de parasitas encontrados no efluente diminui em 99%, após a fermentação (USP, 2001 *apud* GASPAR, 2003).

Segundo Andreoli *et al* (2003), em 2001, a emissão global de metano estava estimada em 500 milhões de toneladas por ano, sendo que os sistemas anaeróbios de tratamento de esgoto contribuíam com cerca de 5% deste total, ou seja, cerca de 25 milhões de toneladas. A queima desse biogás, portanto, além de ser estritamente necessária para amenizar os impactos ambientais advindos do metano, uma vez que este contribui cerca de trinta vezes mais que o gás carbônico para o aumento do efeito estufa, poderá reintegrar, de maneira rápida, o carbono a seu ciclo natural, propiciando ainda seu aproveitamento como fonte de energia calorífica.

Em vários países o biogás produzido em aterros sanitários é aplicado como fonte energética em processos sanitários, e em alguns casos há até a comercialização do biogás para uso nas indústrias. Na Estação Ouro Verde, em Foz do Iguaçu, a Companhia de Saneamento do Paraná- Sanepar testa um sistema para transformar gás metano em energia. Nesta ETE são produzidos 1,5 mil kW/h por mês de energia, o suficiente para abastecer cinco residências durante um mês, segundo a diretora de meio ambiente e ação social da Sanepar, Maria Arlete Rosa (ENERGIA..., 2010).

2.3.5. Poluentes atmosféricos

O conceito de desenvolvimento sustentável amplamente utilizado foi oficializado no Relatório *Nosso Futuro Comum* como: “Desenvolvimento que permite à geração presente satisfazer as suas necessidades sem comprometer que as gerações futuras satisfaçam suas próprias” (CMMAD, 1991).

Um sistema sustentável de produção e do uso da biomassa para geração de energia, independente da tecnologia de aproveitamento da biomassa que esteja sendo utilizada, depende de cuidados adotados em todas as etapas do processo a fim de evitar impactos ambientais negativos comprometendo os benefícios gerados.

Os principais impactos ambientais negativos relacionados ao uso das tecnologias de aproveitamento da biomassa para geração de energia apresentadas, estão relacionados à poluição atmosférica através das emissões gasosas geradas pela queima da biomassa nos processos de combustão, pirólise e gaseificação.

Podemos dizer que existe poluição do ar quando ele contém uma ou mais substâncias químicas em concentrações suficientes para causar danos em seres humanos, em animais, em vegetais ou em materiais. Os poluentes são classificados em primários e secundários.

Os primários são aqueles lançados diretamente no ar, como por exemplo, o dióxido de enxofre (SO_2), os óxidos de nitrogênio (NO_x), o monóxido de carbono (CO) e alguns particulados, como a poeira. Os secundários formam-se na atmosfera por meio de reações que ocorrem em razão da presença de certas substâncias químicas e de determinadas condições físicas, como por exemplo, o SO_3 (formado pelo SO_2 e O_2 no ar) reage com o vapor de água para produzir o ácido sulfúrico (H_2SO_4), que precipita originando a chamada “chuva ácida” (BRAGA *et al*, 2005).

Segundo Virmond (2007), poluentes atmosféricos, quando presentes na atmosfera, podem causar efeitos adversos à saúde humana e ao meio ambiente através de inalação ou

outras rotas de exposição, estando esses correlacionados à sua concentração ambiente, bioacumulação, deposição, entre outros.

Alguns poluentes atmosféricos são potencialmente responsáveis pelo efeito estufa e aquecimento global do nosso planeta e devem ser especialmente considerados em estudos tecnológicos que envolvam sua geração. Os gases que provocam efeito estufa, quando distribuídos na atmosfera, permitem a passagem dos raios ultravioletas (ondas curtas) emitidos pelo sol, mas evitam a passagem completa de volta à atmosfera dos raios infravermelhos (ondas longas) emitida pela Terra sendo então re-emitidos para a mesma, causando o efeito. Com vistas ao equilíbrio térmico, a Terra emite para o espaço a mesma proporção de energia que recebe de radiação solar.

Contudo, as atividades antrópicas (causadas pelo homem), somadas ao processo natural, estão resultando em contribuições adicionais de gases de efeito estufa acentuando a concentração dos mesmos na atmosfera e, conseqüentemente, ampliando o efeito estufa natural e perturbando a forma com que o clima mantém seu equilíbrio entre a energia que entra e sai da Terra e, portanto, gerando seu aquecimento (PAIVA, 2008).

Os principais gases responsáveis pelo fenômeno de efeito estufa são dióxido de carbono (CO_2), emitido principalmente da queima de combustíveis fósseis; ozônio (O_3); metano (CH_4), liberado na atmosfera pela decomposição de matéria orgânica, sendo a agricultura, desmatamento e decomposição de lixo e esgotos suas maiores fontes geradoras; óxido nitroso (N_2O), cuja principal fonte são os processos de combustão; clorofluorcarbonos (CFs); hidrofluorcarbonos (HFCs); perfluorcarbonos (PFCs); e hexafluoreto de enxofre (SF_6).

A biomassa pode ser considerada a melhor opção para substituição sustentável dos combustíveis fósseis no setor energético no futuro, mas por outro lado, a produção de energia a partir de biomassa apresenta ainda diversos impactos ambientais que deverão ser consideradas para que esta transição possa ocorrer de forma sustentável.

As emissões poluentes originadas do processo de combustão da biomassa estão fortemente relacionadas às suas propriedades. Os poluentes possíveis de serem formados durante a queima de qualquer combustível orgânico, segundo Garcia (2002), são:

- **Materiais Particulados:**

Materiais particulados é a denominação genérica que engloba fumaça, fuligem e cinzas. Fuligem são pequenas partículas de carbono e material carbonoso, parcialmente oxidado, isoladas ou impregnadas com as cinzas resultantes da combustão completa do restante do combustível. A fuligem é o que podemos chamar de fumaça preta.

A fumaça propriamente dita, ou “fumaça branca”, é constituída por gotículas de hidrocarbonetos ou outros produtos químicos voláteis não queimados. As cinzas são formadas pelos resíduos inorgânicos deixados na queima completa do combustível.

Segundo Pereira (2001), o material particulado pode causar redução da capacidade respiratória e visual, corrosão e sujeira em superfícies (edifícios, tecidos e materiais); e carrear poluentes tóxicos para o pulmão.

- Óxidos de enxofre (SO_2 e SO_3):

É um dos piores poluentes existentes, devido à corrosão que causa, à formação de chuvas ácidas e aos problemas respiratórios que causa na população. Com a combustão o enxofre é rapidamente convertido a SO_2 , que pode ser lançado desta forma na atmosfera ou ser transformado em SO_3 que, por sua vez, ao encontrar a água, resultante da combustão do hidrogênio ou a água contida na atmosfera, reage formando ácido sulfúrico.

A concentração de SO_3 será tanto maior quanto maior for o excesso de ar usado na combustão. Geralmente o teor de SO_3 nos gases de combustão é de cerca de 0,2 a 3% do total dos óxidos de enxofre produzidos e raramente ultrapassa o valor de 50 ppm (cm^3/m^3 de gases). Já o teor de SO_2 presentes nos gases de combustão (em ppm) é dado por aproximadamente 510 x % enxofre no combustível, o que fornece valores de emissão na faixa de 200 a 2800 ppm em volume.

Já se observou que, em algumas áreas metropolitanas, a concentração de SO_2 é da ordem de 1 ppm (Bailie, 1978 *apud* Carvalho e Lacava, 2003), e a exposição a esses níveis de concentração acarreta constrição das vias no pulmão. Na presença de partículas, a irritação é muito maior. A exposição contínua (cerca de 24 horas) ao nível de SO_2 acima de $500 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ afeta agudamente as pessoas que sofrem de asma ou bronquite se o nível de fuligem estiver em torno de $250 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Valores acima de $750 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, tanto para o SO_2 como para fuligem, podem levar o ser humano à morte (CARVALHO JR. e LACAVA, 2003).

- Monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO_2):

O monóxido de carbono é um gás inodoro e sem cor, formado na combustão incompleta de qualquer material carbonoso. É um gás altamente venenoso pois reage com a hemoglobina das hemácias do sangue formando carboxihemoglobina, que torna a hemoglobina incapaz de capturar o oxigênio e realizar assim a troca gasosa oxigênio x gás carbônico nos pulmões. Segundo Pereira (2001), a exposição a esse gás pode causar danos respiratórios e diminuição da capacidade visual. O seu limite de tolerância é de apenas $39 \text{ cm}^3/\text{m}^3$ de ar.

A concentração de CO nos gases de combustão vai depender muito da temperatura dos gases e do excesso de ar na combustão.

- Óxidos de nitrogênio (NO, N₂O e NO₂)

Os óxidos de nitrogênio, denominados genericamente de NO_x, são os seguintes: NO, N₂O, NO₂, N₂O₄, NO₃, N₂O₆, N₃O₄, N₂O₇.

Os óxidos de nitrogênio são formados na queima de combustíveis a partir do nitrogênio do ar usado na queima e a partir do nitrogênio contido eventualmente no combustível.

As quantidades destes poluentes dependerão dos combustíveis usados, dos modelos dos equipamentos de queima, do seu estado de conservação e também das condições de operação destes equipamentos (GARCIA, 2002).

Segundo Pereira (2001), a exposição a esse gás pode causar irritação das mucosas e carcinogênicos, danos às plantas; reage com hidrocarbonetos produzindo oxidantes fotoquímicos e chuvas ácidas.

2.3.6. Legislações ambientais

2.3.6.1. Legislação Federal

A NBR 10004/04 (ABNT, 2004) é a norma brasileira que classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente.

Nesta norma, os resíduos sólidos são conceituados como:

Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT, 2004).

Dada a necessidade de classificação ambiental de um resíduo com vistas à sua destinação final, as análises indicadas pela NBR 10004/04 quanto à toxicidade⁶ são as mais comumente encontradas nas empresas geradoras de resíduo, segundo Santos (2003), e serão consideradas neste trabalho. Esta norma coloca que um resíduo é caracterizado como tóxico

⁶ Toxicidade: Propriedade potencial que o agente tóxico possui de provocar, em maior ou menor grau, um efeito adverso em consequência de sua interação com o organismo (ABNT, 2004)

se uma amostra representativa dele, obtida segundo a ABNT NBR 10007, apresentar, dentre outras, a seguinte propriedade:

Quando o extrato obtido desta amostra, segundo a ABNT NBR 10005, contiver qualquer um dos contaminantes em concentrações superiores aos valores constantes no anexo F. Neste caso, o resíduo deve ser caracterizado como tóxico com base no ensaio de lixiviação, com código de identificação constante no anexo F (ABNT, 2004).

O anexo F em questão é apresentado no Anexo A deste trabalho.

A NBR 10004/87 (ABNT, 1987) apresenta ainda os seguintes limites para amostras brutas de resíduos sólidos (Tabela 11):

Tabela 11- Limites de contaminantes para amostras brutas de resíduos sólidos.

Parâmetro	Amostra bruta Limites (mg/kg)
Arsênio (As)	1000
Berílio (Be)	100
Chumbo (Pb)	1000
Cianeto (CN)	1000
Cromo VI	100
Índice de Fenóis	10
Mercúrio (Hg)	100
Selênio (Se)	100
Vanádio (V)	1000

Fonte: NBR 10004/87 (ABNT, 1987)

A Resolução nº 5/1989 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 1989), institui o Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar - PRONAR, como um dos instrumentos básicos da gestão ambiental para proteção da saúde e bem-estar das populações e melhoria da qualidade de vida, cuja estratégia básica é limitar, a nível nacional, as emissões por tipologia de fontes e poluentes prioritários.

Nesta Resolução, entende-se por limite máximo de emissão a quantidade de poluentes permissível de ser lançada por fontes poluidoras para a atmosfera. Os limites máximos de emissão são diferenciados em função da classificação de usos pretendidos para as diversas áreas e são mais rígidos para as fontes novas de poluição.

A Resolução nº 03/1990 (CONAMA, 1990- 28 de junho de 1990) dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR, complementando a Resolução nº 5/1989.

Esta Resolução define padrões de qualidade do ar e conceitos sobre esses padrões, em seus artigos 1º e 2º conforme segue:

Art. 1º São padrões de qualidade do ar as concentrações de poluentes atmosféricos que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde, a segurança e o bem-estar da população, bem como ocasionar danos à flora e à fauna, aos materiais e ao meio ambiente em geral.

Art. 2º Para os efeitos desta Resolução ficam estabelecidos os seguintes conceitos:

I - Padrões Primários de Qualidade do Ar são as concentrações de poluentes que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde da população.

II - Padrões Secundários de Qualidade do Ar são as concentrações de poluentes abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem-estar da população, assim como o mínimo dano à fauna, à flora, aos materiais e ao meio ambiente em geral.

Parágrafo único. Os padrões de qualidade do ar serão o objetivo a ser atingido mediante a estratégia de controle fixada pelos padrões de emissão e deverão orientar a elaboração de Planos Regionais de Controle de Poluição do Ar.

No Art. 3º desta Resolução são estabelecidos os padrões de qualidade do ar apresentados na Tabela 12 a seguir.

Tabela 12- Padrões de qualidade do ar no Brasil.

Poluente Tempo médio		Padrões	
		Primário	Secundário
Material particulado (MP)	24 h (*)	240 µg/m ³	150 µg/m ³
	MG anual	80 µg/m ³	60 µg/m ³
SO ₂	24 h (*)	365 µg/m ³	100 µg/m ³
	MA anual	80 µg/m ³	40 µg/m ³
CO	1 h (*)	40000 µg/m ³	40000 µg/m ³ (35ppm)
	8 h (*)	10000 µg/m ³	10000 µg/m ³ (9 ppm)
O ₃	1 h (*)	160 µg/m ³	160 µg/m ³
Fumaça	24 h	150 µg/m ³	100 µg/m ³
	MA anual	60 µg/m ³	40 µg/m ³
Partículas inaláveis (<10 µm)	24 h	150 µg/m ³	150 µg/m ³
	MA anual	50 µg/m ³	50 µg/m ³
NO ₂	1 h (*)	320 µg/m ³	190 µg/m ³
	MA anual	100 µg/m ³	100 µg/m ³
(*) Não pode ser excedido mais que uma vez ao ano MG – média geométrica; MA – Média aritmética			

Fonte: Resolução nº 03/1990 (CONAMA, 1990)

A Resolução nº 008/ 1990 (CONAMA, 1990- 06 de dez 1990) estabelece, em nível nacional, limites máximos de emissão de poluentes do ar (padrões de emissão) para processos de combustão externa em fontes novas fixas de poluição com potências nominais totais até 70 MW (setenta megawatts) e superiores.

Nesta resolução, entende-se por processo de combustão externa em fontes fixas toda a queima de substâncias combustíveis realizada nos seguintes equipamentos: caldeiras; geradores de vapor; centrais para a geração de energia elétrica; fornos, fornalhas, estufas e secadores para a geração e uso de energia térmica incineradores e gaseificadores.

Os limites estabelecidos são os seguintes:

- Para novas fontes fixas com potência nominal total igual ou inferior a 70 MW (setenta megawatts):

- Áreas Classe I (áreas a serem atmosféricamente conservadas - lazer, turismo, estâncias climáticas, hidrominerais e hidrotermais)

Material particulado: 0,120 kg/Gcal, o que equivale a cerca de 50 mg/Nm³ de gás de combustão com 3% de excesso de oxigênio)

Dióxido de Enxofre (SO₂): 2,0 kg/Gcal.

- Áreas Classe II e III

Material particulado: 0,350 kg/Gcal (para óleo combustível)

Dióxido de Enxofre (SO₂): 5,0 kg/Gcal (para óleo combustível e carvão mineral).

- Para novas fontes fixas com potência nominal total superior a 70MW (setenta megawatts).

- Áreas Classe I (áreas a serem atmosféricamente conservadas - lazer, turismo, estâncias climáticas, hidrominerais e hidrotermais)

Nestas áreas não será permitida a instalação de novas fontes fixas com este porte.

- Áreas Classe II e III

Material particulado: 0,120 kg/Gcal (para óleo combustível)

Dióxido de Enxofre (SO₂): 2,0 kg/Gcal (para óleo combustível e carvão mineral).

Para os demais combustíveis cabe aos órgãos estaduais de meio ambiente o estabelecimento de limites máximos de emissão, inclusive para outros poluentes.

A resolução nº 264/1999 (CONAMA, 1999) define procedimentos, critérios e aspectos técnicos específicos de licenciamento ambiental para o co-processamento de resíduos em fornos rotativos de clínquer para a fabricação de cimento. No seu Art. 28º são especificados os seguintes limites máximos de emissão atmosférica para o co-processamento de resíduos em fornos de clínquer (Tabela 13):

Tabela 13- Limites máximos de emissão para o co-processamento de resíduos em fornos de clínquer.

Poluente	Limites Máximos de Emissão
HCL	1,8 kg/h ou 99% de redução
HF	5 mg/Nm ³ , corrigido a 7% de O ₂ (base seca)
CO*	100 ppmv, corrigido a 7% de O ₂ (base seca)
MP	70 mg/Nm ³ farinha seca, corrigido a 11% de O ₂ (base seca)
THC (expresso como propano)	20 ppmv, corrigido a 7% de O ₂ (base seca)
Mercúrio (Hg)	0,05 mg/Nm ³ , corrigido a 7% de O ₂ (base seca)
Chumbo (Pb)	0,35 mg/Nm ³ , corrigido a 7% de O ₂ (base seca)
Cádmio (Cd)	0,10 mg/Nm ³ , corrigido a 7% de O ₂ (base seca)
Tálio (Tl)	0,10 mg/Nm ³ , corrigido a 7% de O ₂ (base seca)
(As+Be+Co+Ni+Se+Te)	1,4 mg/Nm ³ , corrigido a 7% de O ₂ (base seca)
(As+Be+Co+Cr+Cu+Mn+Ni+Pb+Sb+Se+Sn+Te+Zn)	7,0 mg/Nm ³ , corrigido a 7% de O ₂ (base seca)

Fonte: Resolução nº 264/1999 (CONAMA, 1999)

* As concentrações de CO na chaminé não poderão exceder a 100 ppmv em termo de média horária.

A Resolução nº 316/2002 (CONAMA, 2002), dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos.

No seu Art. 1º, é colocado que esta resolução disciplina os processos de tratamento térmico de resíduos e cadáveres, estabelecendo procedimentos operacionais, limites de emissão e critérios de desempenho, controle, tratamento e disposição final de efluentes, de modo a minimizar os impactos ao meio ambiente e à saúde pública, resultante desta atividade.

Em seu Art. 2º, item I, entende-se por resíduos os materiais ou substâncias, que sejam inservíveis ou não passíveis de aproveitamento econômico, resultantes de atividades de origem industrial, urbana, serviços de saúde, agrícola e comercial dentre os quais incluem-se aqueles provenientes de portos, aeroportos e fronteiras, e outras, além dos contaminados por agrotóxicos; no item III, por sua vez, é definido o conceito de tratamento térmico para fins desta regulamentação como sendo, todo e qualquer processo cuja operação seja realizada acima da temperatura mínima de 800 °C (oitocentos graus Celsius).

Nos Artigo 22 a 24 desta Resolução, são tratados especificamente os resíduos de origem urbana quanto às questões de seu recebimento pelo sistema de tratamento térmico, condicionamento e exigências legais para a implantação do sistema de tratamento térmico.

No Art. 38º fica estabelecido que todo e qualquer sistema de tratamento térmico não deve ultrapassar os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos apresentados na Tabela 14.

Tabela 14- Limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos em sistemas de tratamento térmico.

Poluente		Limites Máximos
Material Particulado (MP) total		70 mg/Nm ³
Substâncias inorgânicas na forma particulada, agrupadas em conjunto como:	Classe I: limite máximo incluindo:cádmio (Cd), mercúrio (Hg), tálio (Tl).	0,28 mg/Nm ³
	Classe II: limite máximo incluindo: arsênio (As), cobalto (Co), níquel (Ni), telúrio (Te), selênio(Se).	1,4 mg/Nm ³
	Classe III: limite máximo incluindo: cobre (Cu), estanho (Sn), flúor (F), manganês (Mn), platina (Pt), paládio (Pd), ródio (Rh), vanádio (V).	7 mg/Nm ³
Gases	Dióxido de Enxofre (SO ₂)	280 mg/Nm ³
	Dióxido de Nitrogênio (NO ₂)	560 mg/Nm ³
	Monóxido de Carbono (CO)	100 ppm/ Nm ³
	Cloreto de Hidrogênio (HCl)	80 mg/Nm ³ até 1,8g/h
	Fluoreto de Hidrogênio (HF)	5 mg/Nm ³
	Dioxinas e Furanos: dibenzo-p-dioxinas e dibenzo-p-furanos, expressos em TEQ (total de toxicidade equivalente) da 2,3,7,8 TCDD (tetracloro-dibenzo-para-dioxina)	0,50 ng/Nm ³
<p>§ 2o Os parâmetros medidos devem ser corrigidos pelo teor de oxigênio, na mistura de gases de combustão, do ponto de descarga, para sete por cento em base seca.</p> <p>§ 3o O órgão ambiental competente pode restringir os limites estabelecidos, dependendo das condições de localização e dos padrões de qualidade do ar da região.</p>		

Fonte: Resolução nº 316/2002 (CONAMA, 2002)

A partir de 2006, através da Resolução 382/2006 do CONAMA, ficou estabelecido limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas em algumas atividades industriais especificamente, como também a normatização da metodologia para determinação de limites de emissão para cada planta geradora. Esta Resolução, no seu parágrafo único do Art 1º, estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos por poluente e por tipologia de fonte.

Os limites máximos de emissão para poluentes atmosféricos provenientes de processo de geração de calor a partir da combustão externa abrange apenas os seguintes combustíveis como fonte: Óleo combustível, gás natural, bagaço de cana-de-açúcar e derivados da madeira, não sendo, portanto aplicável a resíduos sólidos provenientes de efluentes.

Quanto aos limites a partir da tipologia de fonte, esta resolução abrange turbina a gás movidas a gás natural ou combustíveis líquidos, processos de refinarias de petróleo, processos

de fabricação de celulose (combustível licor preto), processos de fusão secundária de chumbo, processos da indústria de alumínio, produção de fertilizantes, ácido fosfórico, ácido sulfúrico e ácido nítrico, indústrias siderúrgicas integradas e semi-Integradas, usinas de pelotização de minério de ferro e indústria de cimento Portland (neste último caso, é colocado que os limites de emissão de poluentes decorrentes do coprocessamento de resíduos em forno clínquer serão objeto de resolução específica, onde esta resolução refere-se a Resolução 264/1999-CONAMA, cujos limites estabelecidos são iguais aos da Resolução 316/2002).

Neste contexto, observa-se que, apesar da Resolução 382/2006 (CONAMA) ser mais recente que a Resolução nº 316/2002 (CONAMA), os limites estabelecidos para emissão de poluentes atmosféricos não se aplicam a processos de combustão de resíduos provenientes de efluentes que é objeto deste trabalho de pesquisa.

2.3.6.2. Legislação no Paraná

A Resolução 71/2009 (CEMA, 2009), do Conselho Estadual do Meio Ambiente do Estado do Paraná, estabelece a exigência e os critérios na solicitação e emissão de Autorizações Ambientais para coprocessamento de resíduos em fornos de cimento, com fins de substituição de matéria prima ou aproveitamento energético.

Dentre outras exigências e critérios estabelecidos nesta Resolução tem-se:

Art. 3º. Não será permitido o coprocessamento dos seguintes resíduos sólidos gerados ou não no Estado do Paraná:

I. Lodos de estações de tratamento, físico-químico ou biológico, de efluentes líquidos industriais, com exceção dos resíduos com Poder Calorífico Superior (PCS) de acordo com o estabelecido nos Incisos I e II do Artigo 4º;

II. Lodos de estações de tratamento de efluentes gerados em processos de tratamento de superfície (lodo galvânico);

III. Lodos de fossas sépticas ou de estações de tratamento de esgotos sanitários “in natura”; ...

XI. Resíduos que contenham concentrações superiores de:

a) Cádmio (Cd) + Mercúrio (Hg) + Tálho (Tl) até 200 mg/kg, sendo Hg menor ou igual a 10 mg/kg.

b) Arsênio (As) + Cobalto (Co) + Níquel (Ni) + Selênio (Se) + Telúrio (Te) até 5.000 mg/kg, sendo Selênio (Se) até 100 mg/kg.

c) Cromo (Cr) até 5.000 mg/kg e Chumbo (Pb) até 5.000 mg/kg.

Art. 4º. Serão aceitos para a avaliação as solicitações para co-processamento dos seguintes resíduos sólidos gerados no Estado do Paraná ou em outros Estados da federação:

I. Resíduos energéticos ou mistura de resíduos, substitutos de combustível, com poder calorífico superior (PCS) acima de 1.500 kcal/kg;

II. Resíduos com poder calorífico superior (PCS) acima de 1.000 kcal/kg, quando destinados à mistura, dentro ou fora do estado, com resíduos de maior poder calorífico ou para pontos de alimentação específicos que necessitem entradas com menor poder calorífico, desde que não ultrapassem as concentrações estabelecidas no Inciso XI do Art.3º ; ...

A Resolução 054/2006 (SEMA, 2006), da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado do Paraná, defini critérios para o Controle da Qualidade do Ar como um dos instrumentos básicos da gestão ambiental para proteção da saúde e bem estar da população e melhoria da qualidade de vida, com o objetivo de permitir o desenvolvimento econômico e social do Estado de forma ambientalmente segura.

Esta Resolução coloca em seu Art 3º que a utilização da atmosfera para o lançamento de qualquer tipo de matéria ou energia somente poderá ocorrer com a observância, dentre outras, dos limites e padrões de emissões estabelecidos.

No capítulo dois desta Resolução são definidos padrões de emissão atmosférica para fontes estacionárias conforme segue:

Artigo 16 - Constituem *Padrões de Emissão* os limites máximos de emissão permissíveis de serem lançados na atmosfera por fontes estacionárias potencialmente poluidoras.

Artigo 17 - Os padrões de emissão para fontes estacionárias estão fixados por poluente ou por tipologia de fonte potencial de poluição do ar, considerando-se o estado de conhecimento dos métodos de prevenção, as tecnologias de controle de poluição e a viabilidade econômica de sua implementação.

Para os padrões de emissão atmosférica para fontes estacionárias por poluentes tem-se:

- Material Particulado Total (MPT)

Artigo 59 - A concentração de MPT contido nas emissões não deve ultrapassar os seguintes padrões:

- a) para a emissão de MPT com taxa de emissão até 0,5 kg/h: 250 mg/Nm³
- b) para a emissão de MPT com taxa de emissão acima de 0,5kg/h: 150 mg/Nm³

- Substâncias gasosas orgânicas

Artigo 63 - A concentração de substâncias gasosas orgânicas, medida através de dutos e chaminés, deve atender os seguintes padrões:

a) Para uma taxa de emissão no ponto de emissão acima de 3 kg/h de carbono total, não deve ultrapassar 150 mg/Nm³ na soma, expresso como carbono total.

Destaca-se ainda que na Resolução nº 042/08, da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado do Paraná (SEMA, 2008), que estabelece critérios para a queima de resíduos em caldeiras, fica proibida a queima em caldeiras de lodos de estações de tratamento físico-químico de efluentes e lodos de fossas sépticas.

2.3.6.4. Legislação em São Paulo

Em São Paulo, os limites existentes para material particulado e SO₂ são os estabelecidos pela Lei Estadual 1.817 de 27/10/78 e pelo Decreto 13.095 de 05/01/79 e são os seguintes:

- Material particulado: 70 mg/m³ a 25 °C em base seca e a 7% de O₂ em volume para equipamentos novos; 90 mg/m³ a 25 °C em base seca e a 7% de O₂ em volume para equipamentos existentes.
- SO₂: 20g de SO₂ / t de óleo equivalente na região da Grande São Paulo.

2.3.6.5. Legislação em Minas Gerais

O Estado de Minas Gerais foi o primeiro a estabelecer padrões de emissão no Brasil (Garcia, 2002). O Conselho Estadual de Política Ambiental- COPAM, através da deliberação normativa 001/92 de 06/03/1992, estabeleceu os padrões de emissão de poluentes atmosféricos por atividade industrial⁷.

2.3.6.5. Legislação no Pará

No âmbito do Estado do Pará, a Lei Estadual nº 5887 de 09/05/1995, que dispõe sobre a política estadual do meio ambiente, cita em seu artigo 18 que, o Poder Público, visando ao controle da poluição do ar, por fontes fixas ou móveis, estabelecerá os limites máximos permissíveis de emissão de poluentes atmosféricos e os padrões de qualidade do ar, através de normas específicas em consonância com a legislação federal em vigor. E em seu artigo 19, coloca que, as fontes de poluição atmosférica, para as quais não forem estabelecidos os limites máximos de emissão, deverão adotar sistemas de controle e tratamento de poluentes, baseados no uso de tecnologias comprovadamente eficientes para cada caso (PARÁ, 1995). Assim, neste Estado, adotam-se os mesmos limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos e os padrões de qualidade do ar adotado na legislação federal em vigor.

⁷ Tabela 8.3 em Garcia, 2002 p. 186

3. LODO DE ESGOTO COMO BIOMASSA NA GERAÇÃO DE ENERGIA

O termo “lodo de esgoto” tem sido utilizado genericamente para designar os subprodutos sólidos provenientes de sistemas de tratamento de esgotos. O material sedimentável no esgoto bruto, gerado nos processos de tratamento primários são chamados lodo primário. Já nos processos biológicos de tratamento, parte da matéria orgânica é absorvida e convertida, fazendo parte da biomassa microbiana, denominada genericamente de lodo biológico ou secundário, composto principalmente de sólidos biológicos, e por esta razão também denominado de biossólido (ANDREOLI *et al.*, 2001).

Para que o termo “biossólido” possa ser adotado é necessário ainda, que suas características químicas e biológicas sejam compatíveis com uma utilização produtiva, como por exemplo, na agricultura ou para gerar energia (ANDREOLI *et al.*, 2001). A utilização deste termo é uma forma de ressaltar os seus aspectos benéficos, valorizando a utilização produtiva, em comparação com a mera disposição final improdutivo, por meio de aterros, disposição superficial no solo ou incineração.

3.1. ORIGEM E CLASSIFICAÇÃO

3.1.1. Origem

De acordo com Sperling *et al.* (1995), os esgotos que são produzidos em uma cidade e chegam à estação de tratamento de esgotos são basicamente originados de três fontes distintas:

- esgotos domésticos (incluindo residências, instituições e comércio);
- esgotos industriais (diversos tipos de indústrias);
- águas de infiltração.

Estes esgotos são denominados esgotos sanitários. Segundo definição da norma brasileira NBR 9648, esgoto sanitário é o “despejo líquido constituído de esgoto doméstico e industrial, água de infiltração e a contribuição pluvial parasitária” (ABNT, 1986). Essa norma define ainda:

- esgoto doméstico é o “despejo líquido resultante do uso da água para higiene e necessidades fisiológicas humanas”;
- esgoto industrial é o “despejo líquido resultante dos processos industriais, respeitados os padrões de lançamento estabelecidos”;

- água de infiltração é “toda água proveniente do subsolo, indesejável ao sistema separador e que penetra nas canalizações”;

- contribuição pluvial parasitária é “a parcela do deflúvio superficial inevitavelmente absorvida pela rede de esgoto sanitário”.

Segundo Nuvolari *et al* (2003), por elas mesmas, essas definições já estabelecem a origem do esgoto sanitário que, dadas tais parcelas, pode ser designado simplesmente como esgoto.

Pereira e Silva (2010) citam que, normalmente, o esgoto doméstico representa o maior volume do esgoto sanitário e é formado por material fecal e águas servidas provenientes de banheiros, cozinhas, outras instalações hidro-sanitárias de residências, prédios, comerciais, instalações públicas, além de contribuições especiais de estabelecimento de serviço de saúde (hospitais, postos de saúde, ambulatórios etc.). Os mesmos autores descrevem que o esgoto industrial é formado por efluentes de processos produtivos e de águas de lavagem de indústrias, apresentando, geralmente, grande vazão e elevada carga poluidora/contaminante.

Para as águas de infiltração, Pereira e Silva (2010) colocam que são constituídas por águas subterrâneas e por águas pluviais que, ao escoar ou infiltrar no terreno, penetram nos coletores de esgoto, seja por juntas mal executadas ou por aberturas nos componentes da rede coletora de esgoto, como no poço de visita sem o tampão de fechamento.

A composição do esgoto sanitário, em média, é de 99,9% de água e apenas 0,1% de sólidos, sendo que, cerca de 75% desses sólidos são constituídos de matéria orgânica em processo de decomposição (SPERLING *et al.*, 1995). Nesses sólidos, denominados lodos de esgoto, proliferam microorganismos, podendo ocorrer organismos patogênicos, dependendo da saúde da população contribuinte. Esses microorganismos são oriundos das fezes humanas.

A qualidade e a quantidade do lodo produzido em uma estação de tratamento de esgoto estão relacionadas com a vazão e as características do esgoto, com o tipo de tratamento e com as condições operacionais da ETE (FERREIRA *et al.*, 1999). Para cada processo adotado na estação de tratamento de esgoto, o lodo pode ser submetido a diferentes tipos de adensamento, estabilização, condicionamento e desidratação antes de uma disposição final ou uma outra aplicação.

3.1.2. Classificação

De acordo com a ABNT NBR 10004/2004 os resíduos sólidos são classificados em:

- Resíduos Classe I – resíduos perigosos: aqueles que, em função das suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, podem apresentar risco à saúde pública e ao meio ambiente ou apresentem características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade;
- Resíduos Classe II A – resíduos não perigosos e não inertes: são aqueles que não apresentam periculosidade, mas apresentam características tais como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água;
- Resíduos Classe II B – resíduos não perigosos e inertes: são aqueles que, submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, executando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

A classificação dos resíduos é realizada de acordo com as características do mesmo. Para determinação da classificação do resíduo é necessária a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem. Contudo se o resíduo apresentar uma das características a seguir, obrigatoriamente, será considerado resíduo Classe I, perigoso:

- 1) Inflamabilidade
- 2) Corrosividade
- 3) Reatividade
- 4) Toxicidade
- 5) Patogenicidade

Caso o resíduo não esteja enquadrado em nenhuma das características anteriores devem ser realizados ensaios laboratoriais, para avaliar se os mesmos apresentam concentrações de substâncias, que conferem periculosidade ao resíduo. As substâncias investigadas deverão ser comparadas com as substâncias listadas em anexo na mesma norma. Para realização dos ensaios devem ser consultadas as seguintes normas:

- a) ABNT 10005 – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos: estabelece os critérios para realização do ensaio de lixiviação, que consiste na extração de certas substâncias contidas nos resíduos industriais por meio de percolação.
- b) ABNT 10006 – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos: estabelece os critérios para a realização do ensaio de solubilização, visando solubilizar uma amostra do resíduo, no período de 7 (sete) dias e avaliar a concentração dos elementos contidos no extrato.
- c) ABNT 10007 – Amostragem de resíduos sólidos: estabelece os critérios de coleta e amostragem dos resíduos.

Se as concentrações das substâncias contidas no extrato do lixiviado estiverem acima dos valores estabelecidos no anexo F da norma ABNT 10004, são considerados perigosos, caso contrário deve ser feito o ensaio de solubilização para determinar se os resíduos são inertes ou não-inertes. Se nesse ensaio as amostras apresentarem concentrações abaixo daquelas contidas no anexo G da referida norma, são considerados inertes e acima não – inertes.

O lodo de esgotos, de acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004), são resíduos sólidos que enquadram-se como Classe IIA, não perigosos e não inertes, e de fato análises de lixiviação pela norma NBR 10.005 (ABNT, 1997), de solubilização pela NBR 10.006 (ABNT, 1997) e de massa bruta pela NBR 10.007 (ABNT, 1997) de vários lodos mostraram que os lodos de forma genérica não são resíduos perigosos. Porém caso seja muito contaminado por efluentes industriais, o lodo pode ter características de Classe I (SANTOS, 2003).

3.2. PRINCIPAIS CONTAMINANTES

O lodo de esgoto apresenta concentrações variadas de alguns componentes das águas residuárias que passam pelo sistema de tratamento. Vários componentes orgânicos e minerais conferem ao lodo de esgoto características fertilizantes, energéticas ou de insumos que podem ser usados na fabricação de matérias de construção como tijolos e telhas. Da mesma forma, outros componentes são indesejáveis, pelo seu risco sanitário e ambiental. Estes componentes indesejáveis, de acordo com Silva *et al.* (2001), podem ser genericamente agrupados em: metais pesados, poluentes orgânicos variados e microrganismos patogênicos.

A presença desses contaminantes no lodo é muito variável, pois está ligada às características do esgoto bruto e do sistema de tratamento. O esgoto apenas residencial apresenta baixos teores de metais pesados, o que não ocorre, em geral, nos esgotos que recebem efluentes líquidos industriais cuja presença de contaminantes químicos é mais comum, exigindo o atendimento a critérios estabelecidos na NBR 9800 (ABNT, 1987) para seu lançamento no sistema coletor público de esgoto.

Segundo Santos (2003), as fontes principais de metais pesados nas ETEs são pontualmente as indústrias e de forma mais difusa as residências e as atividades superficiais de solo, como corrosão e erosão, tudo transportado pelo sistema de esgoto.

3.2.1. Metais pesados

Do ponto de vista ambiental, o metal pesado pode ser entendido como aquele que, em determinadas concentrações e tempo de exposição, oferece risco à saúde humana e ao ambiente, prejudicando a atividade dos organismos vivos (SILVA *et al*, 2001). Os principais elementos químicos enquadrados neste conceito são: argônio (Ag), arsênio (As), cádmio (Cd), cobalto (Co), cromo (Cr), cobre (Cu), mercúrio (Hg), níquel (Ni), chumbo (Pb), antimônio (Sb), selênio (Se), e zinco (Zn). Dentre eles, As, Co, Cr, Cu, Se e Zn são essenciais aos organismos em certas quantidades, enquanto outros não desempenham qualquer função no metabolismo, sendo tóxicos às plantas e animais.

Segundo Silva *et al* (2001), a maioria dos organismos vivos só precisa de alguns poucos metais, e em doses muito pequenas, caracterizando o conceito de micronutrientes, como é o caso do zinco, do magnésio, do cobalto e do ferro. Esses metais tornam-se tóxicos e perigosos para a saúde humana quando ultrapassam determinadas concentrações-limite. Já o chumbo, o mercúrio, o cádmio são metais que não existem naturalmente em nenhum organismo. Tampouco desempenham funções nutricionais ou bioquímicas em microrganismos, plantas ou animais. Ou seja, a presença destes metais em organismos vivos é prejudicial em qualquer concentração.

No esgoto, a presença de metais pesados está associada, principalmente, aos despejos das seguintes indústrias, lançados nas redes coletoras de esgotos urbanos, em ordem decrescente (SILVA *et al*, 2001):

- galvanoplastias;
- indústrias químicas (formulação de compostos orgânicos, curtumes, indústrias farmacêuticas);
- indústrias metálicas (fundições);
- indústrias químicas (formulação de compostos inorgânicos, lavanderias, indústrias de petróleo, formulação de corantes e pigmentos).

Os principais metais pesados encontrados em lodos de esgoto, segundo Silva *et al* (2001), são: o cádmio, cobre, zinco, níquel, mercúrio, cromo, chumbo, arsênio e selênio. Na Tabela 15, apresentam-se concentrações médias de alguns metais pesados do lodo de ETE no Brasil.

Tabela 15- Concentrações médias de alguns metais pesados do lodo de ETE no Brasil.

Elemento	Valor Médio no Brasil* (mg/kg MS)
Cádmio	0,57
Zinco	28,99
Cobre	73,73
Cromo	28,11
Mercúrio	0,52
Níquel	18,06

Fonte: Andreoli *et al* (2001) *apud* Borges (2008). * Tratamento Aeróbio

3.2.2. Agentes patogênicos

Os microrganismos encontrados no lodo podem ser saprófitas, comensais, simbiontes ou parasitos. Apenas a última categoria é patogênica e capaz de causar doenças no homem e nos animais. Dentre os organismos patogênicos, cinco grupos podem estar presentes no lodo: helmintos, protozoários, fungos, vírus e bactérias (SILVA *et al*, 2001).

A origem destes agentes patogênicos pode ser de procedência humana, animal ou então pela presença de animais na rede de esgoto, principalmente roedores. Em relação aos patógenos presentes no lodo, estudos epidemiológicos têm mostrado que bactérias, vírus, ovos de helmintos e cistos de protozoários representam riscos para a saúde humana e animal. No entanto, como para processos de combustão, as presenças desses agentes patogênicos no lodo de esgoto não apresentam relevância em função da eliminação das características de patogenicidade (capacidade de transmissão de doenças) quando o resíduo é sujeito a altas temperaturas, não serão comentados aqui maiores detalhes.

3.2.3. Contaminantes orgânicos

Segundo Silva *et al* (2001), até recentemente, pouca importância era dada à presença de compostos orgânicos perigosos em sistemas de esgotamento sanitário. Em geral, no Brasil, as análises destes compostos muitas vezes não fazem parte da rotina de monitoramento, as metodologias analíticas não estão plenamente estabelecidas e tem-se a idéia de que estas substâncias estão presentes somente em cidades extremamente industrializadas. No entanto, inúmeros são os problemas em áreas urbanas de vários portes, advindos de fontes pequenas como, postos de gasolina.

As principais fontes de compostos orgânicos são: indústria química, de plásticos, produtos mecânicos, indústrias farmacêuticas, de formulação de pesticidas, ferro e aço, indústria de petróleo, lavanderias e indústrias da madeira.

Os poluentes orgânicos mais comuns são: cianeto, fenol, cloreto de metileno, 1,1,1-tricloroetano, tolueno, etil benzeno, tricloroetileno, tetracloroetileno, clorofórmio, naftaleno, ftalato butil de benzila, acroleína, xileno, cresóis, acetofenona, metil sobutil acetona, difenilamina, anilina e acetato de etila (SILVA *et al*, 2001). A NBR 10004/2004 lista, em seu Anexo C, poluentes orgânicos tóxicos e estabelece limites para o lixiviado em seu anexo F (ver Anexo A).

3.3. GERENCIAMENTO E DISPOSIÇÃO FINAL

Segundo Andreoli e Pinto (2001), a produção de lodo no Brasil está estimada entre 150 mil e 220 mil toneladas de matéria seca por ano. Devido aos baixos índices de coleta e tratamento de esgoto ainda existentes no país, o crescimento dos grandes centros urbanos, o desenvolvimento das regiões, para onde se instalam algumas indústrias, e à pressão da sociedade por melhores condições ambientais, é possível prever aumento considerável nos próximos anos na quantidade de lodo a ser disposto.

Considerando que os lodos de esgoto correspondem a uma fonte potencial de riscos à saúde pública e ao ambiente e potencializam a proliferação de vetores de moléstias e organismos nocivos, além de que serem resíduos que podem conter metais pesados, compostos orgânicos persistentes e patógenos em concentrações nocivas à saúde e ao meio ambiente, torna-se necessário sua disposição final de forma adequada à proteção do meio ambiente e da saúde da população.

A Lei nº 12.305/ 2010 que institui a política nacional de resíduos sólidos estabelece que na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

Em se tratando de lodos de esgoto, sua produção é uma característica intrínseca dos processos de tratamento de esgotos e tende a um crescimento no mínimo proporcional ao crescimento da população humana e a solução para sua disposição final ambientalmente adequada é medida que se impõe com urgência.

A destinação final ambientalmente adequada, segundo a Lei nº 12.305/ 2010 (Brasil, 2010), inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sisnama (Sistema Nacional do Meio Ambiente), do SNVS (Sistema Nacional de Vigilância Sanitária) e do Suasa (Sistema Unificado de Atenção à Sanidade Agropecuária), entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos.

O lodo de esgoto possui composição bastante variável, em função de peculiaridades regionais e dos processos em que são gerados e condicionados, em geral apresentam em sua constituição elementos de grande valor, possibilitando seu uso benéfico como, por exemplo, na agricultura, para aproveitamento energético ou como matéria prima para fabricação de produtos da construção civil, em detrimento a mera disposição em aterros sanitários ou incineração. A destinação final deve ser definida em função das características do lodo, levando em consideração aspectos técnicos, econômicos, operacionais e ambientais. Dessa forma, o lodo deve ser caracterizado fornecendo informações sobre as propriedades determinantes, particulares a sua utilização.

A seguir é descrito, de forma breve, as principais utilizações para o lodo (FOELKEL,2010):

- Como biomassas combustíveis
 - Como combustível direto para queima: o lodo pode ser usado como combustível direto para queima apesar do alto teor de umidade e de cinzas minerais, pois existirá energia líquida positiva em lodos com consistência (teor de sólido seco) acima de 40% e teor de cinzas menor que 30%. Esse valor está na ordem de 4MJ/kg a 10 MJ/kg de lodo como tal, dependendo do tipo de lodo. Entretanto, para lodos com consistências baixas, por volta de 20% e teor de cinzas a 30% ou mais, a geração de energia líquida é desprezível, entre 0,5 a 1,5 MJ/kg na umidade em que se encontra o lodo.
 - Como participante ou coadjuvante na composição de péletes e/ou briquetes combustíveis, conjuntamente com serragem residual de madeira de serrarias e industrialização de móveis, cavacos de madeira de demolição, restos de podas de árvores urbanas, etc.
- Na agricultura

- Pela aplicação direta no solo florestal ou agrícola de lodo cru na forma líquida, granulada, pastosa, pelotizada, semi-seca ou seca. Essa operação é conhecida como *landspreading* e pode ser feita no sulco, na terra arada, sobre o solo sem preparo algum, etc. Muitas vezes o *landspreading* é feito colocando uma mistura de lodo e cinzas de caldeira de biomassa por dois motivos: facilitar a aplicação de um material mais seco e introdução de sais minerais nutrientes disponíveis nessas cinzas, ricas em cálcio, potássio, magnésio, etc.
- Incorporação de compostos orgânicos ou organominerais derivados dos lodos, materiais mais estabilizados e de melhor qualidade agrícola;
- Uso de lodo da fabricação do papel, rico em carbonato de cálcio, como fonte de cálcio e como corretivo da acidez do solo. Etc.
- Na construção e obras de engenharia civil
 - Uso do lodo do papel, do papel reciclado e das ETA.s para fabricação de blocos de cimento, tijolos, materiais cerâmicos (cerâmicas vermelhas, tipo grés, etc.);
 - Uso de lodo primário da fabricação de celulose e de papel de fibras longas como coadjuvante fibroso na fabricação de compósitos de cimento tais como telhas, caixas-d.água, etc.;
 - Uso de lodo do papel rico em minerais para estabilização de terrenos, pavimentação de caminhos de terra (estradas rurais, etc.), material para capeamento de aterros e áreas degradadas, etc.
- Na geração de biogás
 - A digestão anaeróbia de lodos orgânicos em biodigestores especiais conduz à geração e recolhimento de metano, um biogás combustível alternativo aos combustíveis fósseis e de rico poder calorífico ($\text{CH}_4 = 75\%$ de carbono orgânico).
- Para compósitos e produtos de enchimento
 - Uso de lodos para compósitos com plásticos, organominerais, fibrocimento, etc.
 - Uso em materiais de isolamento acústico, térmico, etc.

As alternativas ambientais para a gestão de resíduos constituem um investimento na qualidade de vida e na futura sustentabilidade ambiental das cidades. Os gerenciamentos impróprios dos resíduos acarretam aos seus responsáveis ao pagamento de multas e a sanções penais e administrativas previstas em lei, em especial às fixadas na Lei nº 9.605, de 12 de

fevereiro de 1998, que “dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências”; e o dano causado ao meio ambiente, como poluição de corpos hídricos, contaminação de lençol freático e danos à saúde, devem ser reparados pelos responsáveis geradores destes resíduos.

Diante deste cenário, vem sendo feita a elaboração e implantação de políticas públicas de proteção ambiental em relação aos resíduos sólidos. No Estado do Paraná, por exemplo, quando da solicitação de licenciamento ambiental ou de sua renovação junto ao Instituto Ambiental do Paraná – IAP, deverá a atividade geradora de resíduos sólidos apresentar Plano de Gerenciamento, contemplando as atividades de geração, acondicionamento, armazenamento, coleta, transporte, reutilização, reciclagem, tratamento e/ou destinação final dos resíduos sólidos.

3.4. LODO DE ESGOTO COMO BIOMASSA NA GERAÇÃO DE ENERGIA EM PROCESSOS DE COMBUSTÃO

O lodo de esgoto pode ser caracterizado de uma maneira geral como um material bastante rico em matéria orgânica, com alto teor de umidade e com concentração relativamente elevada de nitrogênio e outros minerais. Segundo *Journal of the Institution of Water Environmental Management* (1989) apud Borges (2008), o lodo de esgoto apresenta-se tipicamente com 98 % de água. Dos sólidos contidos, 70 a 80 % é matéria orgânica incluindo óleos e graxas.

Segundo Pereira e Silva (2010), o esgoto doméstico é formado por material fecal e águas servidas provenientes de banheiros, cozinhas, outras instalações hidro-sanitárias de residências, prédios, comerciais, instalações públicas, além de contribuições especiais de estabelecimento de serviço de saúde (hospitais, postos de saúde, ambulatórios etc.). O lodo gerado do tratamento de esgoto doméstico é considerado contaminado dependendo da concentração de organismos patogênicos e teor de metais pesados. Os organismos patogênicos são inerentes aos esgotos, e conseqüentemente aos lodos provenientes das ETEs.

Os lodos de estações de tratamento que recebem predominantemente efluentes domésticos contêm pequena quantidade de metais pesados provenientes da própria natureza dos resíduos e das canalizações. Porém, podem ocorrer descargas permitidas de efluentes industriais ou de ligações clandestinas na rede, aumentando a carga poluidora, concentrando maior quantidade de metais pesados no lodo (ANDREOLI *et al*, 1997).

A correta e abrangente avaliação das características e propriedades dos lodos são fundamentais por diversas razões:

- Classificação dos lodos para perfeito enquadramento nas classes de resíduos sólidos das normas e nas legislações pertinentes de controle ambiental;
- Identificação das propriedades mais relevantes dos lodos que ofereçam informações ou garantias para seu uso em processos de reciclagem ou reuso;
- Identificação de características ambientais e de toxicidade relevantes, capazes de infligir impactos nos ecossistemas, à saúde das pessoas e nos seus usos potenciais;

Levando isso em consideração, são inúmeros os tipos de avaliações analíticas a que os lodos são submetidos. Essas avaliações vão desde os simples testes de pH e de consistência/teor de umidade, passa por análises um pouco mais complicadas como teor de cinzas, e chega a características de muito difícil medição, como teores de dioxinas e furanos, e de outros poluentes orgânicos persistentes ou de poluentes prioritários, conforme sugeridos pela EPA .U.S. *Environmental Protection Agency*.

Para cada tipo de lodo, e em função de seu destino ou uso, são selecionadas avaliações típicas. Essas avaliações ou são exigidas pelos órgãos de controle, pelas partes interessadas da sociedade, ou demandadas pela própria empresa geradora dos lodos em função de suas responsabilidades ambiental e social corporativa.

Para avaliação do lodo de esgoto como biomassa na geração de energia em processos de combustão, sob o ponto de vista técnico, legal e ambiental, avalia-se seu potencial energético, sua toxicidade (presença de metais pesados) e os poluentes atmosféricos (materiais particulados e emissões gasosas) que podem ser liberados para o meio ambiente.

Para avaliar o potencial energético é necessário o conhecimento das seguintes propriedades do lodo: composição química elementar, composição química imediata e poder calorífico. Apesar de um combustível sólido costumar ser identificado também pelas propriedades de densidade, granulometria e temperatura de fusão das cinzas, estas não são consideradas tendo em vista que: a densidade é mais importante para dimensionar sistemas de armazenamento (silos, área aberta, etc), sistema de transporte (esteira, pneumático), sistemas de combustão (tamanho da grelha, velocidade em grelha móvel),etc; a granulometria tem mais importância no transporte, armazenagem e dimensionamento de sistemas de alimentação; e o ponto de fusão das cinzas constituem fatores importantes na escolha do tipo de fornalha.

Para avaliar a toxicidade (presença de metais pesados) as normas brasileiras estabelecem valor limite máximo no extrato (Anexo A) obtido no ensaio de lixiviação pela norma NBR 10.005 (ABNT, 1997) e de massa bruta (Tabela 11) pela NBR 10.007 (ABNT,

1987). Para avaliar os poluentes atmosféricos (materiais particulados e emissões gasosas) as normas brasileiras estabelecem limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos em sistemas de tratamento térmico (Tabela 14).

3.4.1. Avaliação do potencial energético

3.4.1.1. Composição química elementar do lodo

A análise química elementar é um dos mais importantes fatores quando se estuda as propriedades combustíveis da biomassa. Ela define o conteúdo em porcentagem de massa dos elementos Nitrogênio (N), Enxofre (S) e Cloro (Cl), para o estudo dos impactos ambientais, e o conteúdo em porcentagem dos elementos Carbono (C), Hidrogênio (H) e Oxigênio (O), para estimar o poder calorífico da biomassa como combustível (SAIDUR *et al*, 2011) . Além disso, ajuda a calcular a Umidade (W), Cinzas (A) e outros componentes de menor importância. A avaliação do potencial energético do lodo vai depender do teor de seus componentes químicos que influenciam no seu poder combustível.

Os principais elementos químicos presentes na composição da maioria dos combustíveis comerciais são: carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N) e enxofre (S). O carbono, hidrogênio e enxofre são elementos que oxidam na presença de oxigênio e são responsáveis diretos da qualidade do combustível. O enxofre, embora seja um elemento combustível, a sua presença é indesejada devido a que contribui na formação de substâncias tóxicas e corrosivas. Da mesma forma, a presença de nitrogênio contribui para a formação de óxidos de nitrogênio que é um elemento altamente poluente. O oxigênio presente no combustível faz com que haja necessidade de menos ar para combustão.

- Carbono (C)

Dentre os elementos químicos combustíveis (C, H, S) o carbono é o elemento principal, tem poder calorífico alto (34 MJ/kg) e apresenta uma fração percentual da ordem de 50 a 75% na composição de combustíveis sólidos, e da ordem de 83 a 85% em óleos combustíveis. Cortez *et al*. (2008) observam que, o teor de carbono da biomassa é muito menor que o do carvão mineral e do petróleo, enquanto o teor de oxigênio é muito maior. Virmond (2007) cita que o constituinte majoritário da biomassa é o carbono (30 a 60% em base seca) dependendo do teor de cinzas (%A). Quanto maior o %C menor o %A.

A literatura apresenta diversos valores para teores de carbono presentes no lodo. Malta(2001) *apud* Andreoli *et al*.(2001) citam teor médio de 12,56% de carbono total em

lodo de ETE no Brasil. Berton *et al.* (1989) cita este valor em 15,7%C. Já a Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR, 1997), cita uma média de 32,1%C (lodo aeróbico ETE-BELÉM) e 20,1%C (lodo anaeróbico RALF) sendo o percentual em relação ao peso seco nos dois principais tipos de lodo do Paraná.

Borges (2008) encontrou valores médios de 27,2%C e 44,83%C para lodos de estações de efluentes têxtil e celulose/papel, respectivamente. Virmond (2007) determinou um teor de carbono de 50,9%C em amostras de lodo de tratamento primário de efluentes de um frigorífico já seco, com teor de cinzas de 12,30% e 15% de umidade.

Dessa forma, dependendo da origem, tratamento e do teor de cinzas do lodo de esgoto, temos uma variação do %C que vai desde 11% a 40%, chegando, em alguns casos, a 50% aproximadamente.

- Hidrogênio (H)

O hidrogênio tem poder calorífico maior (120 MJ/kg), mas a sua fração percentual na composição de combustíveis sólidos é muito pequena, da ordem de 2 a 4%. Virmond (2007) cita que o teor de hidrogênio na biomassa é em torno de 5 a 6% em base seca, mas para lodos têm-se publicações com %H no lodo que vai desde 2% a 5%, chegando, em alguns casos, a 7% aproximadamente.

- Enxofre (S)

O enxofre por sua vez, tem um poder calorífico baixo (9,3 MJ/kg) e a sua participação na composição do combustível sólido é relativamente baixa (0 a 5%). Virmond (2007) cita que o teor de nitrogênio, enxofre e cloro na biomassa usualmente são inferiores a 1% em base seca. Para lodos têm-se publicações com %S que, vai desde 0,03% a 0,4%, chegando, em alguns casos, a 1,7% aproximadamente. Segundo Obernberger *et al.* (2006), problemas de emissão de SO_x podem ser esperados para concentrações de S no combustível acima de 0,2% (em massa, b.s.).

- Oxigênio (O)

O teor de oxigênio da biomassa é muito maior que o do carvão mineral e do petróleo. O teor de oxigênio é um parâmetro fundamental para o controle de processos de combustão, pois quantidades de ar maiores que o necessário para a combustão completa do combustível sólido resfria o sistema, conduzindo a combustão incompleta e perdas térmicas, e quantidades menores ocasionam combustão incompleta do combustível e apenas parte dele é convertida em energia térmica.

A proporção de oxigênio em relação ao H e C também é importante, pois a maior proporção de O e de H, comparado ao C, reduz o valor energético de dado combustível

devido à menor quantidade de energia contida nas ligações C-O e C-H em relação às ligações C-C (MCKENDRY, 2002).

- Nitrogênio (N)

Para lodos domésticos gerados a partir de digestão aeróbica o %N varia no Brasil de 0,5% a 7,6% (BORGES, 2008). Segundo Virmond (2007), durante a combustão, o N do combustível é quase completamente convertido a N_2O e NO_x (NO e NO_2). A quantidade de N_2O é bastante reduzida em fornalhas modernas para queima de biocombustíveis sólidos e quantidade insignificante de N é incorporada às cinzas.

Os óxidos de nitrogênio não têm influência direta sobre o processo, nem afetam a sua eficiência, mas assumem grande significância por seus efeitos poluentes quando liberados pelas chaminés e espalhados na atmosfera. As emissões de NO_x aumentam com o aumento da concentração de N na biomassa. Além disso, a quantidade de ar de combustão, a geometria da fornalha, a temperatura de combustão e o tipo de tecnologia de combustão aplicada são variáveis de grande influência sobre a formação de NO_x (VAN LOO e KOPPEJAN *apud* OBERNBERGER *et al.*, 2006).

A razão C/N (Carbono-Nitrogênio) também é importante. Segundo Skoulu e Zabaniotou (2007), biomassas com razão C/N > 30 podem ser usadas em processos de combustão, pirólise e gaseificação, caso isso não ocorra, é melhor usá-las em processos bioquímicos.

- Cloro (Cl)

É importante a avaliação do cloro por ele contribuir fortemente para corrosão induzida em equipamentos e problemas de emissão de Cloreto de Hidrogênio (HCl) que, por sua vez, contribui para formação de chuvas ácidas. Segundo Obernberger *et al.* (2006), corrosão induzida e problemas de emissão de HCl podem ser esperados para concentrações de Cl no combustível acima de 0,1% (em massa, b.s.). Medidas contra corrosão incluem sistema automático de limpeza das superfícies de troca de calor, revestimento das tubulações de caldeiras, seleção de material apropriado bem como otimização do processo de combustão e das tecnologias de controle de processo.

- Umidade (W)

A umidade do combustível é fator limitante na combustão de biomassa devido ao seu efeito sobre o PC. Elevado teor de umidade no combustível, pode resultar em ignição pobre, redução da temperatura de combustão e dificultar a combustão dos produtos de reação e, conseqüentemente, afetar a qualidade da combustão, dificultando também a liberação da matéria volátil.

Segundo Gullichsen et al. (1999) *apud* Pinheiro (2008), a umidade é uma das principais características que influenciam na capacidade de aquecimento dos combustíveis. Um alto teor de umidade irá resultar na geração de um grande volume de vapor e aumentar o tempo para o aquecimento do combustível. Umidades de aproximadamente de 62 a 65% em base seca tornam difícil a manutenção de uma combustão estável e a queima é mantida através da inclusão de combustível fóssil.

Virmond (2007) cita que o limite autotérmico para a maioria das biomassas combustíveis é próximo a 65% de umidade (massa de água por massa de material úmido). Acima desse ponto, energia insuficiente é liberada pela combustão para satisfazer a evaporação e a produção de calor (VIRMOND, 2007). Já Skoulu e Zabaniotou (2007), citam que biomassas que contenham menos que 50% de umidade (massa de água por massa de material úmido) podem ser usadas em processos de combustão direta.

Na prática, a maioria dos combustores requer um combustível suplementar, tal como gás natural, quando da queima de biomassa com teor de umidade de 50 a 55%, e CO e outros produtos da combustão incompleta podem ser emitidos em quantidades maiores, dependendo do tipo de combustor (JENKINS *et al*, 1998).

A umidade tem relação direta com o teor de sólidos secos, conforme apresentado na Equação 5. Esta umidade influi nas propriedades mecânicas do lodo, sendo que estas influenciam no tipo de manuseio e de disposição final do lodo. A relação entre teor de sólidos secos, umidade e as propriedades mecânicas se dá conforme apresentado na Tabela 16 (VAN HAANDEL E LETTINGA, 1994 *apud* SPERLING e GONÇALVES, 2001).

Tabela 16-Relação entre teor de sólidos secos, umidade e as propriedades mecânicas no lodo.

Teor de sólidos secos (%)	Umidade (%)	Consistência do lodo
0 a 25	75 a 100	Lodo fluido
25 a 35	65 a 75	Torta semi-sólida
35 a 60	40 a 65	Sólido duro
60 a 85	15 a 40	Lodo em grânulos
85 a 100	0 a 15	Lodo desintegrado em pó fino

Fonte: Van Haandel e Lettinga, 1994 *apud* Sperling e Gonçalves, 2001

Segundo Foelkel (2010), o lodo pode ser usado como combustível direto para queima apesar do alto teor de umidade e de cinzas minerais, pois existirá energia líquida positiva em lodos com consistência (teor de sólido seco) acima de 40% e teor de cinzas menor que 30%.

Esse valor está na ordem de 4MJ/kg a 10 MJ/kg de lodo como tal, dependendo do tipo de lodo. Entretanto, para lodos com consistências baixas, por volta de 20% e teor de cinzas a 30% ou mais, a geração de energia líquida é desprezível, entre 0,5 a 1,5 MJ/kg na umidade em que se encontra o lodo.

Há situações em que a energia líquida chega a ser negativa, trazendo problemas de instabilidade de queima e demanda de combustíveis auxiliares para manutenção da chama nas fornalhas das caldeiras. Isso ocorre quando se necessita de mais energia do que o lodo possui para se promover a secagem e queima completa do mesmo. Quanto mais instável a qualidade do lodo, maiores os problemas de emissões de gases poluentes nessas caldeiras, pois eles desestabilizarão a queima nas fornalhas, promovendo aumento na formação de gases como SO_x, NO_x, monóxido de carbono, etc.

Segundo Foelkel (2010), por exemplo, a demanda mínima de consistência do lodo para novos projetos de fábricas de celulose e papel tem sido de 50% para que possa causar estímulos aos potenciais clientes, inclusive as próprias áreas internas de geração de energia.

Gullichsen *et al.* (1999) *apud* Pinheiro (2008) apresentaram a Tabela 17 mostrando o efeito da umidade na capacidade calorífica do lodo.

Tabela 17 - Relação da umidade do lodo com o poder calorífico.

Umidade (% em b.s.)	Poder calorífico (MJ/kg)
0	20,4
20	16,3
40	12,2
50	10,2
60	8,1
70	6,1
80	4,1
90	2,0

Fonte: Gullichsen et al. (1999) *apud* Pinheiro (2008)

Já Foelkel (2010) apresentou alguns exemplos simples de lodos que podem ser eventualmente gerados em fábricas de celulose e/ou papel e comparou seu potencial energético conforme Quadro 4. Fica claro do quadro mostrado que os teores de cinzas e umidade têm direta ação sobre o teor energético dos lodos.

Quadro 4- Exemplo mostrando valores calculados de poder calorífico por tonelada de lodo úmido

Tipo de Lodo →	Lodo biológico secundário			Lodo terciário químico flocculação com $Al_2(SO_4)$			Lodo de destintamento papel reciclado		
Teor de cinzas, %	12			35			50		
Teor de matéria orgânica, %	88			65			50		
Teor carbono orgânico, % base seca	53			39			30		
Consistência, %	30	50	85	30	50	85	30	50	85
Umidade, %	70	50	15	70	50	15	70	50	15
Poder calorífico superior do lodo base seca, GJ/t seca	16	16	16	12	12	12	9	9	9
Poder calorífico inferior, GJ/tonelada úmida	2,8	6,7	13,1	1,5	4,5	9,7	0,6	3,0	7,1

Fonte: Foelkel (2010) modificado.

- Cinzas (A)

A queima de lodos muito ricos em cinzas (acima de 50%) gerará baixa energia térmica e problemas de incrustações nas caldeiras, só sendo recomendável quando a empresa for obrigada pelo legislador/controlador ambiental, ou quando quiser eliminar o lodo para evitar aterrá-lo. Caso contrário, é tecnicamente desaconselhado (FOELKEL, 2010).

O alto teor de cinzas no lodo de esgoto diminui o valor do poder calorífico, pois cinzas não contribuem para o calor total liberado pela combustão (VIRMOND, 2007), além de poder levar a altas concentrações de material particulado junto com os gases emitidos através de chaminé (SANTOS, 2003). Dessa forma, o combustível será de melhor qualidade quanto menor for seu teor de cinzas.

A cinza é determinada pela combustão completa do combustível e engloba todos os constituintes minerais do combustível. Estes constituintes aparecem praticamente apenas nos combustíveis sólidos e compreendem compostos de Óxido de alumínio (Al_2O_3); Óxido férrico (Fe_2O_3); Óxido de silício (SiO_2); Óxido de Potássio (K_2O); Óxido de Calcio (CaO); Óxido de Magnésio (MgO); etc.

Segundo Virmond (2007), o elevado conteúdo de óxidos básicos de fósforo presente nas cinzas do lodo, bem como de óxidos de ferro, ocasionam forte tendência à formação de depósitos em caldeiras. O mesmo autor coloca que a utilização do lodo é recomendada em pequenas proporções, não superiores a 15% (em massa) da mistura, quando a composição das suas cinzas favorece e agrava a ocorrência de formação de depósitos e incrustação no interior da fornalha.

3.4.1.2. Poder calorífico do lodo

O poder calorífico (PC) representa a quantidade de energia liberada por unidade de massa ou volume do combustível. Do ponto de vista energético, o lodo do tratamento de esgoto é classificado como um resíduo de baixo poder energético, porém pode se manter em combustão pois possui Poder Calorífico Inferior (PCI) maior que 2500 kcal/kg (10,467 MJ/kg) (CHAO e IEISS, 2004).

Segundo Andreoli e Pegorini (2006), o poder calorífico da fração sólida volátil do lodo de esgoto pode chegar a 3,3 kWh/kg (11,87MJ/kg), semelhante ao da lenha, possibilitando seu uso como combustível. Segundo Almeida (2008) o poder calorífico previsto para lodo seco de estações de tratamento de efluentes estão entre 12,5 a 15,0 MJ/kg. No entanto, o lodo pode possui PC muito baixo (entre 4 e 10 MJ/kg) tornando-se necessário queimá-lo junto a outros combustíveis mais energéticos, tais como lenha, gás, óleo, etc.

O valor do PC depende da sua composição conforme visto na seção 2.3.3.3. Os lodos provenientes de estações de tratamento de efluentes da indústria de celulose e papel, por exemplo, são ricos em material orgânico, entre cerca de 40 a 90%, e geralmente com baixos níveis de metais pesados, possuindo interessante potencial combustível a ser aproveitado. Entretanto, eles tem muita umidade, o que pode inclusive levar a valores negativos de poder calorífico.

Os lodos de indústria têxtil também possuem, em geral, elevados teores de matéria orgânica com um bom potencial energético, mas possuem metais pesados e outros componentes tóxicos, uma vez que, nos processos têxteis e no tratamento de efluentes, são usados produtos tais como: soda, corantes, sais ácidos, gomas, sulfato de ferro e cal, dentre outros.

O lodo pode apresentar, dependendo de seu poder calorífico, potencial para ser usado como combustível em caldeiras; geradores de vapor; fornos, fornalhas, estufas e secadores para a geração e uso de energia térmica; centrais para a geração de energia elétrica; gaseificadores; co-processamento em fornos rotativos de clínquer para a fabricação de cimento; ou simplesmente para uso doméstico.

3.4.1.3. Composição química imediata do lodo

A análise imediata de uma amostra de lodo define seu conteúdo, em porcentagem de massa, de carbono fixo (F), voláteis (V), umidade (W) e cinzas (A).

Estes parâmetros estão relacionados diretamente com a utilização do combustível e podem ser utilizados para o cálculo do PCS da biomassa conforme Equação 2 (PARIKH *et al.*, 2005). Estes parâmetros são também importantes para o cálculo do projeto da fornalha, das quantidades necessárias de ar em função da porcentagem de voláteis presentes no combustível e tem um papel relevante durante a ignição e as etapas iniciais da combustão de combustíveis sólidos.

- Voláteis (V)

Os voláteis são teoricamente a carga orgânica das biomassas. É a parte do combustível que se separa na forma de gases quando o combustível é submetido a um teste padrão de aquecimento, e se compõe de gases combustíveis (como metano, monóxido de carbono, hidrogênio) e de gases não combustíveis (oxigênio e nitrogênio). Quanto maior os voláteis, maior a eficiência energética e menor geração de resíduos sólidos a serem dispostos posteriormente.

Segundo Rendeiro *et al* (2008), o teor de voláteis é quantificado medindo-se a fração de massa da biomassa que volatiliza durante o aquecimento de uma amostra padronizada e previamente seca, em atmosfera inerte, até temperaturas de aproximadamente 850°C num forno mufla por 7 (sete) minutos. Após a extração dos voláteis, fica como resíduo o carbono fixo e as cinzas. O teor de voláteis é então determinado pela Equação 6.

$$V = \frac{(m_1 - m_2)}{m_1} \times 100 \quad (\% \text{b.s.}) \quad (6)$$

Necessariamente, o teor de voláteis é expresso em base seca. Onde V é o teor de voláteis, m_1 é a massa da amostra antes do experimento e m_2 é a massa residual após o experimento, ambos em g.

De Sena (2005) *apud* Borges (2008), cita que para uma boa combustão, o combustível deve possuir elevado teor de material volátil. O conteúdo de voláteis (V) da biomassa é muito alto (entre 65% e 83%) comparado ao de outros tipos de combustíveis, fator a ser considerado durante a queima total e gaseificação desses combustíveis tendo em vista que os voláteis têm um papel importante durante a ignição e as etapas iniciais de combustão de biomassa.

- Carbono fixo (F)

É o resíduo combustível deixado após a liberação da umidade e matéria volátil, e consiste principalmente de carbono, embora contenha ainda alguns elementos voláteis não liberados (O_2 , H_2 , N_2 , S).

Segundo Rendeiro *et al* (2008), após a determinação dos teores de matéria volátil em base seca (V) e de cinzas em base seca (A) da amostra, o teor de carbono fixo (F) é obtido por diferença conforme Equação 7.

$$F= 100 - (V + A) \quad (7)$$

- Sólidos totais secos (STS)

Na secagem térmica ou incineração, o lodo deve apresentar no mínimo 35% de sólidos secos, porém a eficiência do processo aumenta bastante se a concentração for maior (FERNANDES *et al*, 2001). O produto da secagem térmica com concentração de sólidos secos variando de 65% a 95% (umidade de 5% a 35%) pode ser usado como combustível em caldeiras, aquecedores industriais, fornos de cimento, etc (LUDUVICE e FERNANDES, 2001).

3.4.2. Avaliação da toxicidade

A toxicidade do lodo que deve ser avaliada para viabilizar seu uso em processos de combustão está em geral relacionada à presença de metais pesados em sua composição. Os metais apresentam-se no lodo sob a forma de hidróxidos, carbonatos, fosfatos, silicatos e sulfatos. Incorporam-se na matéria sólida do lodo e permanecem com o lodo durante todo o tratamento do esgoto. Em escala de laboratório algumas reduções de metais no lodo são conseguidas através do uso de ácidos, porém em escala real, o único método de redução é a restrição nas fontes, antes de serem descarregadas no sistema de coleta (WERTHER e OGADA, 1999 apud SANTOS, 2003).

Sob as altas temperaturas de combustão nos incineradores, a maioria dos metais pesados é vaporizada, mas depois eles condensam-se na superfície das partículas de cinza, numa parte mais fria do evaporador e são removidos com as cinzas. Cerca de 78 a 98% do Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn são retirados na cinzas, enquanto que mais de 98% do mercúrio pode ser liberado para a atmosfera junto com os gases de saída (WERTHER e OGADA, 1999 apud SANTOS, 2003).

Sendo assim, a técnica de controle de emissão de metais pesados na atmosfera é o emprego de um dispositivo eficiente de captura das cinzas nos gases de saída da chaminé, como lavadores venturi, precipitadores eletrostáticos, entre outros. Com a limitação na

emissão de partículas, o problema de metais pesados é transferido de poluição do ar para a manipulação das cinzas contaminadas. No caso dos incineradores, o problema com a lixiviação dos metais pesados pode ser resolvido durante a incineração com o uso de temperaturas mais altas, que levem a fusão das cinzas. Na forma fundida, os metais pesados ficam fortemente encapsulados, tem baixa tendência a lixiviação, e as cinzas podem ser reutilizadas, por exemplo, na construção civil. Mesmo para aqueles fornos que operam a temperaturas mais baixas, a cinza gerada pode ser fundida (WERTHER e OGADA, 1999 apud SANTOS, 2003).

Durante o uso do lodo de esgoto na co-combustão na fabricação de cimento, emissões de metais pesados não são um problema, visto que durante a produção de cimento os metais pesados do lodo são adsorvidos nas partículas e retornam para o forno depois da separação no precipitador eletrostático (WERTHER e OGADA, 1999 apud SANTOS, 2003).

No entanto o lodo pode ter diversas outras aplicações em termos de combustão que não sejam as acima citadas, como em caldeiras, fornos diversos, fornalhas, estufas e secadores, centrais para a geração de energia elétrica, gaseificadores, etc. e em escala industrial, comercial ou doméstica, sendo submetido a diferentes temperaturas e condições operacionais.

Para que os resíduos sólidos, dentre os quais o lodo de esgoto, possam ser gerenciados sem riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, as Normas Brasileiras estabelecem diversas recomendações que devem ser atendidas pelas pessoas e/ou entidades responsáveis pelo resíduo sob pena de sanções previstas em lei.

Assim, a NBR 10004/04 (ABNT, 2004) coloca que um resíduo é caracterizado como tóxico se, dentre outras coisas, o seu extrato obtido de uma amostra representativa do resíduo, contiver qualquer um dos contaminantes em concentrações superiores aos valores constantes no anexo F desta norma (ANEXO A). Neste caso, o resíduo deve ser caracterizado como tóxico com base no ensaio de lixiviação (ABNT, 2004). E, complementando a verificação de toxicidade, a NBR 10004/87 (ABNT, 1987) apresenta limites de contaminantes para amostras brutas de resíduos sólidos.

Dessa forma, é preciso considerar na avaliação da toxicidade do lodo, os limites máximos no lixiviado definidos pela NBR 10004/04 (ABNT, 2004) constantes na Tabela 18, e os limites de contaminantes para amostras brutas de resíduos sólidos definidos na NBR 10004/87 (ABNT, 1987) constantes na Tabela 19.

Tabela 18 - Limite máximo no lixiviado.

Parâmetro	Limite máximo no lixiviado (mg/L)
Arsênio (As)	1,0
Bário (Ba)	70,0
Cádmio (Cd)	0,5
Chumbo (Pb)	1,0
Cromo Total (Cr)	5,0
Fluoreto	150,0
Mercúrio (Hg)	0,1
Prata (Ag)	5,0
Selênio (Se)	1,0

Fonte: Anexo F da NBR 10004/2004(ver ANEXO A)

Tabela 19 - Limites de contaminantes para amostras brutas de resíduos sólidos.

Parâmetro	Amostra bruta limites (mg/kg)
Arsênio (As)	1000
Berílio (Be)	100
Chumbo (Pb)	1000
Cianeto (CN)	1000
Cromo VI	100
Índice de Fenóis	10
Mercúrio (Hg)	100
Selênio (Se)	100
Vanádio (V)	1000

Fonte: NBR 10004/87 (ABNT, 1987)

Atualmente, algumas indústrias brasileiras estão investindo em programas internos para reduzir a quantidade de poluentes presentes em seus resíduos e em pesquisas que desenvolvam alternativas para seu aproveitamento na própria indústria com a finalidade principal de contribuir para o aumento de suas receitas e proporcionar a destinação final ambientalmente correta para os resíduos evitando penalidades previstas nas leis ambientais, em especial na Lei nº 9.605 (BRASIL, 1998) e na Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010).

3.4.3. Avaliação de emissões gasosas e material particulado

A maior preocupação durante a combustão do lodo de esgoto é a liberação de poluentes gasosos e sólidos na atmosfera. As emissões de mercúrio, dioxinas e furanos são atualmente controláveis, e muitos equipamentos para queima de lodo de grande porte são

capazes de limitar emissões com altos níveis de restrição usando tecnologias atuais (EDULJEE;CAINS, 1997; HYLANDER, 2003 *apud* SANTOS, 2003).

Os óxidos de nitrogênio (NO_x) são poluentes gasosos formados nos processos de combustão e se constituem-se em uma família de sete compostos. Durante o processo de combustão, 95% do NO_x se apresenta na forma de óxido nítrico (NO). Quando liberados para a atmosfera a maior parte é convertida a NO_2 que é confirmadamente a forma mais predominante de óxidos de nitrogênio (NO_x) na atmosfera, e a mais abundante nas áreas urbanas gerada por atividades antropogênicas (CHAO e IEISS, 2004).

Uma observação interessante é que apesar do alto teor de nitrogênio, a combustão do lodo de esgoto é caracterizada por baixas emissões finais de NO_x , com a taxa de conversão de nitrogênio combustível para NO_x sendo menor que 5%. Tal dado é ratificado em instalações de grande porte (WERTHER e OGADA,1999 *apud* SANTOS, 2003).

Chao e Iess (2004) colocam que o lodo de tratamento de esgoto possui potencial de utilização como redutor de poluentes atmosféricos na indústria cimenteira. Estes autores citam que, no co-processamento, estes resíduos se transformam em recursos, pela reutilização dos mesmos como insumo adicionado ao clínquer, e conseqüentemente recai na potencial redução de custos energéticos e de matéria prima para a indústria, e podem propiciar ainda redução de poluentes atmosféricos na fabricação de cimento *portland*. O princípio básico, é a reação química que ocorre, devido ao ambiente óxido do forno, em contato com a amônia do lodo alterando a forma NO_x para a forma de nitrogênio gasoso N_2 , que é um gás inerte, não poluente.

Diante destas informações, parece que a imagem pública ruim da queima do lodo de esgoto, pode ser revertida com a concepção de processos de co-processamento, e mostrar-se adequada ambientalmente, desde que tomados todos os cuidados adequados em relação a emissões atmosféricas e temperaturas de operação.

No entanto, no Brasil, ainda se tem poucos dados sobre co-processamento de lodo de esgoto. Assim, atenção especial é recomendada para os processos de reciclagem do lodo no que tange às emissões de gases num ciclo de queima, os quais podem envolver diferentes temperaturas, e conseqüentemente liberar gases tóxicos em alguma dessas temperaturas. Ressaltando-se que apenas a temperatura máxima do processo não é parâmetro suficiente para esta análise (SANTOS, 2003). Não se pode esquecer ainda que, o lodo de esgoto tem composição variada e que, além dos produtos químicos adicionados no tratamento também podem conter contaminantes residuais.

Hipotéticas simulações de queima, associadas a temperaturas e tempos de residência nos fornos, tem probabilidade mínima de detecção de gases tóxicos em escala de laboratório, devido seus baixos valores de concentração. Dessa forma, o monitoramento de emissões gasosas é uma etapa de extrema importância e deve ser feito em escala real, tão logo seja desenvolvido o processo de reciclagem (SANTOS, 2003).

Durante a queima, é muito importante se monitorar os gases de exaustão da combustão para monóxido de carbono, gás carbônico e oxigênio residual, bem como o teor de carbono orgânico nas cinzas volantes. Tudo isso com a finalidade de otimizar a queima do lodo na caldeira. Toda vez que tivermos altos teores de monóxido de carbono temos indicações de queima incompleta e de temperaturas possivelmente inadequadas na fornalha (FOELKEL,2010).

Essas situações anormais favorecem a formação de dioxinas e furanos. As dioxinas e furanos também podem estar presentes nas cinzas volantes e nas cinzas de fundo de fornalha. As tecnologias de última geração dão emissões muito baixas de PCDD/PCDF: entre 0,4 a 4 microgramas de equivalentes tóxicos totais por tonelada de lodo seco queimado. Entretanto, para caldeiras mais antigas e de qualidade tecnológica ultrapassada, bem como operando sobrecarregadas, os valores poderão ser muito maiores, pois não possuem queima regular e estabilizada (FOELKEL,2010).

As emissões poluentes possíveis de serem formadas no processo de combustão do lodo são: materiais particulados, monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NO, N₂O e NO₂), óxidos de enxofre (SO₂ e SO₃), Cloreto de Hidrogênio (HCl), dioxinas e furanos.

Os principais parâmetros controlados pelas agências internacionais de proteção do meio ambiente, bem como os parâmetros nacionais de emissões gasosas, estão listados na Tabela 20 (MACEDO, 2006).

Tabela 20- Parâmetros de emissões gasosas (mg/m³).

	EPA	IPPC	CCME	CONAMA	CETESB
Óxidos de Nitrogênio	201,0	200,0	400,0	560	375
Óxidos de enxofre	56,0	50,0	260,0	280	262
Material Particulado	17,0	10,0	20,0	70,0	60
Monóxido de Carbono	41,0	50,0	57,0	100,0	50
Dioxinas (ng TQE/Nm ³)	0,623	0,1	0,5	0,50	----
O ₂ Livre (base seca) %	11	11	11	7	7

Fonte: USEPA, 2001, IPPCEU, 2001, CCME, 2002, CONAMA, 2002, CETESB, 2006 *apud* MACEDO (2006)

Nessa Tese são adotados os parâmetros de emissões gasosas do CONAMA (2002), apresentados na Tabela 14, para avaliar as emissões atmosféricas originadas da combustão do lodo.

3.5. LODOS DE ESGOTO COMO BIOMASSA NA GERAÇÃO DE ENERGIA EM PROCESSOS DE GASEIFICAÇÃO E PIRÓLISE

3.5.1. Gaseificação do lodo de esgoto

A Gaseificação é a oxidação parcial da biomassa pela quantidade estequiométrica de oxigênio, normalmente na presença de vapor, para fornecer energia para conversão térmica da biomassa em gases e vapores orgânicos, para produção de energia. Estes gases serão alimentados diretamente na caldeira ou para turbinas a gás. Em ciclos de gaseificação indireta e outras fontes de calor externas, além de oxigênio, são usadas para prover a energia, vapor de alta temperatura gaseificam as frações orgânicas da biomassa em vapor ou gases (MACEDO, 2006).

O lodo de esgoto, em comparação com outras biomassas, apresenta características físico-químicas muito particulares, que certamente influem significativamente na eficiência de combustão e gaseificação deste material. As principais tecnologias de tratamento térmico do lodo e demais resíduos orgânicos, em particular a gaseificação, envolvem etapas ou processos preliminares como a desumidificação e a secagem. Estes métodos são necessários ao pré-condicionamento físico do lodo para que o processo de destruição do material possa realizar-se sem problemas (PARODI e SANCHEZ, 2002).

A gaseificação, entretanto oferece uma perspectiva inteiramente diferente. Os resíduos enquanto fontes de energia, precisam ser avaliados em termos do teor de matéria orgânica como componente de principal interesse. A umidade e as cinzas desempenham papéis negativos no processo de gaseificação, pois uma porção considerável da energia do combustível é consumida para a sua evaporação, e na geração do carbono residual presente nos partículas em suspensão, e nas cinzas produzidas (PARODI e SANCHEZ, 2002).

A umidade, principalmente no caso do lodo, pode atingir volumes consideráveis, influencia não apenas no desempenho e na eficiência do processo de gaseificação, mas também nos parâmetros físicos de projeto dos equipamentos. Deste modo recomenda-se a adoção de pré-processamento dos resíduos para que sejam condicionados antes de sua introdução no gaseificador (PARODI e SANCHEZ, 2002).

Com relação ao processo de secagem, é recomendada a manutenção da temperatura de secagem tão baixa quanto o possível, entre 110°C e 165°C, para minimizar as perdas de voláteis, os quais são responsáveis pela produção do gás combustível em estágio posterior (FURNESS *et al.*, 2000 *apud* PARODI e SANCHEZ, 2002). Uma das principais vantagens da pirólise e da gaseificação sobre os tradicionais processos de incineração, é que estes processos empregam sistemas para limpeza de gases com equipamentos de dimensões menores, e com operações mais simples, devido à emissão menor de resíduos.

O teor de cinza, principalmente o do lodo de esgoto, depende não apenas de sua fonte, mas também de como ele foi manejado ao longo do processo de tratamento dos efluentes. Para efeitos de disposição de resíduos, é importante destacar que as cinzas geradas através do processo de gaseificação deixam o gaseificador em uma forma relativamente inerte, embora a quantidade a ser disposta possa ser significativa. (HAMILTON, 2000 *apud* PARODI e SANCHEZ, 2002).

Os metais pesados são provavelmente o segundo aspecto mais importante dos possíveis impactos ambientais a serem considerados na gaseificação de materiais residuais como o lixo e o lodo. A explicação está no fato de que a qualidade do lodo varia em função de sua fonte (residencial, comercial, institucional, industrial), e época do ano.

3.5.3. Pirólise do lodo de esgoto

O processo de Pirólise, é também usado para converter a biomassa em uma mistura de gases e vapores orgânicos. Pirólise é definida como a destruição térmica de materiais orgânicos na ausência de oxigênio. Tecnicamente, gaseificação indireta é um processo de pirólise. Se o produto primário da pirólise é um gás, o processo é considerado gaseificação. Se os produtos primários são vapores condensáveis, o processo é considerado pirólise. Vapor não é usualmente adicionado ao processo de pirólise.

O lodo de esgoto doméstico geralmente possui 18% de lipídios, destes 7% são triglicerídeos, também constituídos por ácidos carboxílicos de cadeia longa e hidrocarbonetos (Boocook *et al.*, 1992 *apud* Fernandes, 2010), então pode ser pirolisado. Não somente os hidrocarbonetos presentes no lodo podem ser pirolisados, mas também os lipídios podem ser pirolisados para a produção de combustíveis líquidos ricos em hidrocarbonetos e com potencial para substituir os derivados de petróleo (FERNANDES, 2010).

Segundo Vieira (2004) as características físico-químicas do lodo são determinantes no rendimento e na composição química do biocombustível produzido através de processo

térmico. Lodos ativados resultantes do tratamento de efluentes líquidos domésticos apresentam maior concentração de matéria orgânica e quando submetidos a um processo térmico apresentam maior rendimento em bio-óleo, do que os lodos digeridos, como os gerados do tratamento anaeróbio de efluentes com reatores UASB. Desta forma, uma análise físico-química prévia do lodo a ser usado como matéria-prima, pode apontar para o possível rendimento das frações a serem obtidas na pirólise.

Apesar de diversos trabalhos com pirólise de lodo estarem sendo desenvolvidos em escala experimental, muitos estudos ainda precisam ser feitos para que esta tecnologia possa ser vantajosa, comercialmente, considerando custos *versus* benefícios.

4. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA COMPUTACIONAL

O sistema computacional desenvolvido avalia lodo de esgoto sanitário como biomassa na geração de energia em processos de combustão, sob o ponto de vista técnico, legal e ambiental, constituindo uma ferramenta para agilizar a tomada de decisão na questão do gerenciamento do lodo de esgoto.

A partir do estudo das propriedades do lodo de esgoto, obtidas com a análise química elementar e imediata de uma amostra do material, do poder calorífico e das normas técnicas e ambientais brasileiras, foi desenvolvido um método, sistematizado em seis etapas, para avaliação de lodo de esgoto sanitário como biomassa na geração de energia em processos de combustão, que pôde ser transformado em regras de lógica para então ser automatizado.

A automatização do método se deu através do desenvolvimento de um sistema computacional, em plataforma JAVA, capaz de: cadastrar e armazenar variáveis e regras de lógica relacionadas a um conhecimento específico que solucione problemas reais; armazenar dados de entrada; substituir os dados de entrada nas regras; realizar teste e encadeamento lógico progressivo das regras cadastradas até chegar a um resultado final para o problema em questão; e emitir relatório com resultados.

O desenvolvimento do sistema computacional foi dividido em quatro componentes a fim de facilitar atualizações e visualizações, sendo estas:

- Interface de aquisição, que é utilizada por um usuário especialista, e permite o cadastro, edição, exclusão e visualização, de variáveis e regras de lógica, no sistema computacional;

- Base de conhecimento, que é o banco de dados interno do sistema computacional onde ficam armazenadas todas as variáveis e regras de lógica cadastradas;

- Interface de usuário, que é utilizada pelo usuário tomador da decisão, e permite a entrada de dados no sistema computacional e a solicitação do relatório de resultado;

- Motor lógico, que é a parte interna do sistema que tem a função de substituir os dados de entrada nas regras de lógica, realizar teste e encadeamento lógico progressivo das regras até chegar a um resultado final para o problema em questão e emitir relatório de resultado solicitado pelo usuário tomador da decisão.

As variáveis e regras de lógica, cadastradas no sistema computacional para avaliação do lodo de esgoto sanitário como biomassa na geração de energia em processos de combustão, permitem que este forneça relatório de resultado com as seguintes avaliações:

- Potencial energético do lodo, baseado no seu poder calorífico inferior;

- Problemas de corrosão e incrustações em equipamentos, baseado no teor de cloro e cinzas do lodo;

- Toxicidade, baseada nos limites máximos de metais pesados no lixiviado do material definidos na NBR 10004/04 (ABNT, 2004) e nos limites máximos de metais pesados na massa bruta definidos na NBR 10004/87 (ABNT, 1987).

- Poluição atmosférica, baseada nos limites máximos de emissões atmosféricas (gases e materiais particulados) definidos na Resolução nº 316/2002 (CONAMA, 2002).

Os dados de entrada do sistema computacional corresponderam aos resultados laboratoriais de amostras de lodo de esgoto sendo estes: composição química elementar (%C, %H, %S, %O, %N, %Cl e %W em base seca), composição química imediata (%F, %V em base seca), teor de cinzas (%A), toxicidade no lixiviado do lodo (Arsênio- AsLx, Bário- BaLx, Cadmio- CdLx, Chumbo- PbLx, Cromo total- CrLx, Fluoreto- FluoretoLx, Mercúrio- HgLx, Prata- PrataLx, Selênio- SeLx), toxicidade na amostra bruta do lodo (Arsênio-As, Berílio- Be, Chumbo- Pb, Cianeto- CN, Cromo VI- Cr, Índice de fenóis- IFenóis, Mercúrio- Hg, Selênio- Se, Vanádio- V), emissões gasosas e material particulado (Dióxido de enxofre - SO₂, Cloreto de hidrogênio- HCl, Dióxido de nitrogênio- NO₂, Monóxido de carbono- CO, Fluoreto de hidrogênio- HFl, Dioxinas e furanos- DF, Material particulado- MP, Material particulado com agrupamento de cádmio, mercúrio, tálio- MPI, Material particulado com agrupamento de arsênio, cobalto, níquel, telúrio, selênio- MPII, Material particulado com agrupamento de cobre, estanho, flúor, manganês, platina, paládio, ródio, vanádio- MPIII) e poder calorífico (PCS e PCI). Sendo que a entrada de dados correspondentes à composição química elementar, composição química imediata e poder calorífico podem ser feitas de maneira flexível, dependendo dos dados disponíveis.

Como resultado final, o sistema apresenta dois relatórios, o relatório de resultados, no qual é apresentado o potencial energético do lodo (potencial alto, médio, baixo ou sem potencial), aplicações recomendadas e não recomendadas para o lodo avaliado, energia bruta prevista em kWh/kg do lodo, mensagens de alerta e explicativas quanto às emissões de poluentes atmosféricos, à toxicidade do lodo, a problemas de corrosão e incrustação em equipamento, bem como as normas e limites utilizados como parâmetro pelo sistema; e o relatório de lógica, no qual é apresentado o encadeamento lógico progressivo das regras realizado pelo sistema para chegar às conclusões finais das avaliações do lodo.

4.1. ASPECTOS TÉCNICOS, AMBIENTAIS E NORMATIVOS CONSIDERADOS

Na revisão bibliográfica foi identificado o estado da arte que envolve o tema e adquiridos os conhecimentos embasadores da pesquisa, descrita nos capítulos 2 e 3, permitindo analisar quais aspectos técnicos, ambientais e normativos deveriam ser considerados na avaliação do lodo como biomassa para gerar energia de forma segura e ambientalmente adequada, sendo estes:

- O poder calorífico do lodo, responsável pela identificação de seu potencial energético e pelo tipo de processo de combustão que o resíduo pode ser usado de forma viável tecnicamente (produzindo energia). Este parâmetro pode ser obtido de forma experimental com o uso de bomba calorimétrica ou calculado teoricamente, através do conhecimento da análise elementar e imediata do material (dados resultantes de ensaios laboratoriais de uma amostra do lodo seguindo normas específicas);

- O Teor de Cloro (%Cl) e Cinzas (%A), responsáveis respectivamente, por problemas de corrosão e incrustações em equipamentos, que complementam a avaliação da viabilidade técnica do uso do lodo. Estes parâmetros são resultantes da análise elementar do material feita em ensaios laboratoriais com uma amostra do lodo seguindo normas específicas;

- A presença de metais pesados na amostra do lodo, responsável pela avaliação da toxicidade e verificação da viabilidade ambiental e normativa (uso do lodo em processos de combustão sem oferecer riscos à população e ao meio ambiente). A quantidade de metais pesados no lodo é fornecida por ensaios laboratoriais de uma amostra bruta do material e de uma amostra de seu lixiviado seguindo normas específicas;

- As emissões gasosas e materiais particulados liberados para o meio ambiente durante a combustão do material, responsáveis pela avaliação das emissões de poluentes atmosféricos e que complementa a verificação da viabilidade ambiental e normativa (uso do lodo em processos de combustão sem oferecer riscos à população e ao meio ambiente). Essas emissões gasosas e materiais particulados liberados são estimados através de ensaios de queima, com monitoramento, de uma amostra do material seguindo normas específicas;

4.2. DESENVOLVIMENTO DE CLASSIFICAÇÃO PARA O LODO QUANTO AO POTENCIAL ENERGÉTICO

Neste trabalho, foi criada classificação para o lodo, em função de seu poder calorífico inferior, a fim de avaliar o potencial energético deste material.

4.2.1. Cálculo do poder calorífico inferior do lodo

Segundo Garcia (2002), o poder calorífico inferior (PCI) é a quantidade de energia liberada na forma de calor durante a combustão completa da unidade de massa do combustível medida com a água, gerada na queima, na fase gasosa, enquanto que, o poder calorífico superior (PCS) é a quantidade de energia medida com a água, gerada na queima, na fase líquida. A diferença entre eles é a energia requerida para evaporar a água já contida no combustível como umidade do mesmo e a água formada pela queima do hidrogênio contido no combustível.

Neste trabalho, considera-se o poder calorífico inferior (PCI) para classificar o potencial energético do lodo, em detrimento do poder calorífico superior (PCS), em função de que, segundo Nogueira e Lora (2003), o PCI refere-se ao calor efetivamente possível de ser utilizado nos combustíveis. Além disso, Cortez *et al.* (2008) afirmam que normalmente, o que se usa na maioria dos processos industriais é o PCI, sendo este de maior aplicação. Garcia (2002) observa também que, o mais usado é exatamente o poder calorífico inferior, uma vez que, na maioria dos processos industriais, os gases de combustão são liberados a temperaturas onde a água neles contida se encontra na fase gasosa. Ressalta-se ainda que, na maioria da literatura, trabalhos de teses, dissertações, artigos técnicos e normas vigentes predominam informações tomando-se como parâmetro o poder calorífico inferior.

O PCI é calculado teoricamente a partir do PCS. As diversas fórmulas disponíveis para cálculo teórico do PCS são correlações empíricas com a análise elementar ou imediata do material, desenvolvidas a partir do estudo com diversos tipos de materiais combustíveis. Essas fórmulas fornecem resultados aproximados do PCS, pois este não depende, na realidade, somente da composição elementar ou imediata do material, mas também da natureza de sua constituição molecular (para que um átomo seja queimado é necessário inicialmente um trabalho de desintegração molecular o qual influencia no poder calorífico do conjunto).

As duas fórmulas utilizadas neste trabalho para cálculo do PCS foram selecionadas entre seis correlações pesquisadas conforme segue: Selvig e Gibson (1945), sua formulação considerou apenas o carvão; Abe (1988), considerou apenas biomassa florestal; RITE Tokyo Central Laboratory (2005), considerou carvão e biomassa vegetal; Jenkins (1990) considerou 62 tipos de biomassa; Parikh *et al.* (2005) consideraram 100 tipos de combustíveis sólidos, inclusive biomassa; e Channiwala e Parikh (2002), que consideraram, pelo menos, 77 tipos de combustíveis, envolvendo combustíveis sólidos líquidos e gasosos, incluindo a biomassa. Em

Uemura *et al* (2010) apresenta-se um estudo comparativo de diversas correlações de PCS com análise elementar.

As correlações de Parikh *et al.* (2005) (Equação 2) e de Channiwala e Parikh (2002) (Equação 3), foram selecionadas para o cálculo do PCS neste trabalho por serem correlações empíricas desenvolvidas por pesquisadores que consideraram maior quantidade de tipos de biomassa e pontos de dados no estudo, aumentando a probabilidade do valor encontrado ser mais próximo da realidade para lodo de esgoto.

Channiwala e Parikh (2002) introduziram correlação geral baseada em resultados da análise elementar de combustíveis sólidos, líquidos e gasosos, considerando no estudo uma base de dados com 225 pontos de dados, entre os quais 133 pontos de dados eram de combustíveis sólidos, sendo 21 desses pontos correspondentes a biomassas provenientes de desperdícios industriais, resíduos sólidos municipais, refugo e lodo. Este estudo foi validado com 50 pontos de dados adicionais, onde 34 eram de combustíveis sólidos, sendo 16 desses pontos correspondentes a biomassas, e com combustíveis que tem extensa variedade de composição elementar e teor de cinza, isto é, C—0,00–92,25%, H—0,43–25,15%, O—0,00–50,00%, N—0,00–5,60%, S—0,00–94,08% e Cinza—0,00–71,4% (em base seca). A correlação desenvolvida oferece um erro absoluto comum de 1,45%.

Parikh *et al.* (2005), introduziram correlação geral baseada em resultados da análise imediata de combustíveis sólidos. Neste estudo, dos 100 tipos de combustíveis utilizados, 87 foram biomassas e foi considerada uma base de dados com 450 pontos de dados. A validação foi feita com 100 pontos de dados adicionais e com combustíveis que tem extensa variedade de composição imediata e teor de cinzas, isto é, carbono fixo—1,0–91,5%, voláteis—0,92–90,6% e Cinza—0,12–77,7% (em base seca). A correlação desenvolvida oferece um erro absoluto comum de 3,74%, que segundo o autor, é um valor muito menor que muitas correlações desse tipo introduzidas anteriormente por outros autores.

Parikh *et al.* (2005) colocam que a principal vantagem da correlação apresentada por eles é poder calcular o PCS de qualquer combustível sólido simplesmente com a análise imediata, que requer equipamento de laboratório padrão e analistas menos especializados, ao contrário da análise elementar, cujos equipamentos são muito caros e requer analistas altamente treinados. Os mesmos autores colocam ainda que, as correlações de PCS para combustível sólido, com análise imediata, que aparecem na literatura anteriormente por outros autores, focalizam em apenas um combustível específico. Dessa forma, ele conclui que seu trabalho provê uma ferramenta útil para modelar processos de combustão.

Com o PCS calculado utiliza-se a equação geral apresentada por Garcia (2002) (Equação 4) para calcular o valor do PCI.

4.2.2. Classificação para o lodo quanto ao potencial energético

A classificação para o lodo quanto ao potencial energético foi criada em função de seu poder calorífico inferior. Para a criação dos intervalos numéricos, que associam o valor do poder calorífico inferior a cada classe, foi feita pesquisa em normas técnicas e materiais científicos, a fim de reunir informações que fornecessem parâmetros para definir o potencial energético do lodo de esgoto. A seguir apresentam-se as informações fundamentais que embasaram os parâmetros utilizados na classificação desenvolvida.

4.2.2.1. Lodos Classe I

O lodo Classe I é considerado aquele com alto potencial energético para gerar energia em processos de combustão. Com a finalidade de criar um parâmetro limite para o poder calorífico inferior do lodo Classe I, foi pesquisado o PCI que o lodo deveria ter a fim de ser utilizado como biomassa para gerar energia, em cada uma das suas possíveis aplicações úteis. Este PCI foi estabelecido baseado na ideia de que o lodo deveria possuir, pelo menos, o PCI correspondente ao menor dos PCIs dentre aqueles dos biocombustíveis tradicionalmente utilizados em cada uma das aplicações para que seja viável seu uso do ponto de vista energético. Assim, foi criada a Tabela 21 com as informações resultantes da pesquisa.

Na última coluna da Tabela 21, apresenta-se o PCI que o lodo deve atingir para cada aplicação em processos de combustão. Comparando os valores apresentados, identifica-se que a aplicação para lodos de esgoto em processos de combustão que exige maior potencial energético é em fornos de cimento. Assim, adota-se o poder calorífico inferior do lodo necessário a essa utilização como parâmetro para definir o lodo de esgoto com alto potencial energético (Classe I). Portanto, são considerados lodos Classe I aqueles que se enquadram no intervalo: $PCI_{\text{LODO}} \geq 18,08 \text{ MJ/kg}$.

Tabela 21- Limites do poder calorífico inferior do lodo de esgoto para suas possíveis aplicações em processos de combustão.

Aplicação	Biocombustíveis tradicionalmente utilizados	PCI dos Combustíveis tradicionalmente utilizados (base seca)	Limite que o PCI do lodo deve atingir para a aplicação (base seca).
Caldeiras, geradores de vapor, fornos, fornalhas, estufas e secadores para a geração e uso de energia térmica, gaseificadores.	Lenha seca em toras	10,88-12,56 MJ/kg	PCI ≥ 10,88 MJ/kg
	Madeira de Eucaliptos seca	14,78 MJ/kg	
	Madeira/serragem/cavaco de Pinus seca	13,81-16,26 MJ/kg	
	Casca de arroz	12,94-13,8 MJ/kg	
	Carvão vegetal	32,57 MJ/kg	
Centrais à biomassa para a geração de energia elétrica	Casca de arroz	12,94-13,8 MJ/kg	PCI ≥ 10,467 MJ/kg**
	Bagaço de cana	7,08- 17,5 MJ/kg	
	Resíduos madeireiros	13,36 MJ/kg	
	Carvão vegetal	32,57 MJ/kg	
	Licor negro	8,94 MJ/kg	
Fornos de cimento	Carvão vegetal	32,57 MJ/kg	PCI ≥ 18,08 MJ/kg
	Combustível Sólido Recuperado (SRF)	18,08 - 24 MJ/kg	
Co-processamento em fornos rotativos de clínquer para a fabricação de cimento			PCI ≥ 11,618 MJ/kg*
Uso doméstico			PCI ≥ 10,467 MJ/kg**
Co-processamento em geral			PCI ≥ 4 MJ/kg***

Fonte: Produção da autora

*A norma para utilização de resíduos em fornos de produção de clínquer, considera a utilização desta tecnologia para resíduos que atendam ao seguinte critério para reaproveitamento de energia: "...seu poder calorífico inferior na base seca deverá ser superior a 2.775kcal/kg...(11,618 MJ/kg)" (SMA/CETESB, 2003).

** Limite de PC para o lodo se manter em combustão (CHAO e IESS, 2004).

*** O Conselho Estadual do Meio Ambiente do Estado do Paraná dispõe que serão aceitos para a avaliação as solicitações para co-processamento de resíduos sólidos gerados no Estado do Paraná ou em outros Estados da federação com poder calorífico superior (PCS) acima de 1.000 kcal/kg (4,186 MJ/kg), quando destinados à mistura com resíduos de maior poder calorífico ou para pontos de alimentação específicos que necessitem de entradas com menor poder calorífico (CEMA,2009). Tendo em vista que o PCI é de 5% a 20% menor que o PCS, tem-se um PCI equivalente em torno de 4 MJ/kg a 3,4 MJ/kg.

4.2.2.2. Lodos Classe II

O lodo Classe II é considerado aquele com potencial médio para gerar energia em processos de combustão. Segundo Chao e Iess (2004), o lodo do tratamento de esgoto pode manter-se em combustão se possuir poder calorífico inferior maior que 2500 kcal/kg (10,467 MJ/kg). Ao encontro desta afirmativa, a norma para utilização de resíduos em fornos de produção de clínquer da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (SMA/CETESB, 2003), considera a utilização desta tecnologia para resíduos que atendam ao seguinte critério para reaproveitamento de energia: “...seu poder calorífico inferior na base seca deverá ser superior a 2.775kcal/kg...(11,618 MJ/kg)”, o que demonstra a necessidade do lodo ter que apresentar poder calorífico inferior acima de 10,467 MJ/kg para manter-se em combustão e ser utilizado como combustível principal em processos de queima.

Assim, adota-se neste trabalho, que lodos com poder calorífico inferior maior que 10,467 MJ/kg e menor que 18,08 MJ/kg podem ser usados em processos de combustão, pois possuem limite autotérmico para manter-se em combustão. Portanto, são considerados lodos Classe II aqueles que se enquadram no intervalo: $10,467 \text{ MJ/kg} \leq \text{PCI}_{\text{LODO}} < 18,08 \text{ MJ/kg}$.

4.2.2.3. Lodos Classe III e IV

O lodo Classe III é considerado aquele com potencial baixo para gerar energia em processos de combustão e o lodo Classe IV é considerado aquele que não apresenta potencial para gerar energia em processos de combustão.

O Conselho Estadual do Meio Ambiente do Estado do Paraná dispõem que, serão aceitos para a avaliação, as solicitações para co-processamento de resíduos sólidos gerados no Estado do Paraná ou em outros Estados da federação com poder calorífico superior (PCS) acima de 1.000 kcal/kg (4,186 MJ/kg), quando destinados à mistura com resíduos de maior poder calorífico ou para pontos de alimentação específicos que necessitem de entradas com menor poder calorífico (CEMA,2009). Tendo em vista que o PCI é de 5% a 20% menor que o PCS, tem-se um PCI equivalente em torno de 4 MJ/kg a 3,4 MJ/kg.

Almeida (2008), ratifica a informação colocando que o lodo com poder calorífico entre 4 e 10 MJ/kg é necessário queimá-lo junto a outros combustíveis mais energéticos, tais como lenha, gás, óleo, etc.

Assim, adota-se neste trabalho que o lodo com poder calorífico inferior menor que 4 MJ/kg não deve ser usado em processos de combustão, sob o ponto de vista técnico, pois não pode ser usado nem para co-processamento misturado com resíduos de maior poder calorífico

e, menos ainda, ser usado como combustível principal. Portanto, são considerados lodos Classe III aqueles que se enquadram no intervalo: $4 \text{ MJ/kg} \leq \text{PCI}_{\text{LODO}} < 10,467 \text{ MJ/kg}$; e lodos Classe IV aqueles que se enquadram no intervalo: $\text{PCI}_{\text{LODO}} < 4 \text{ MJ/kg}$.

A Tabela 22 apresenta resumidamente os intervalos numéricos que associam o valor do poder calorífico inferior a cada classe.

Tabela 22- Tabela de classificação do lodo quanto ao potencial energético

PCI	Classificação do lodo quanto ao Potencial Energético
$\text{PCI}_{\text{LODO}} \geq 18,08 \text{ MJ/kg}$	Lodo Classe I: Apresenta potencial alto para gerar energia em processos de combustão.
$10,467 \leq \text{PCI}_{\text{LODO}} < 18,08 \text{ MJ/kg}$	Lodo Classe II: Apresenta potencial médio para gerar energia em processos de combustão
$4 \leq \text{PCI}_{\text{LODO}} < 10,467 \text{ MJ/kg}$	Lodo Classe III: Apresenta potencial baixo para gerar energia em processos de combustão
$\text{PCI}_{\text{LODO}} < 4 \text{ MJ/kg}$	Lodo Classe IV: Não apresenta potencial para gerar energia em processos de combustão

Fonte: Produção da autora

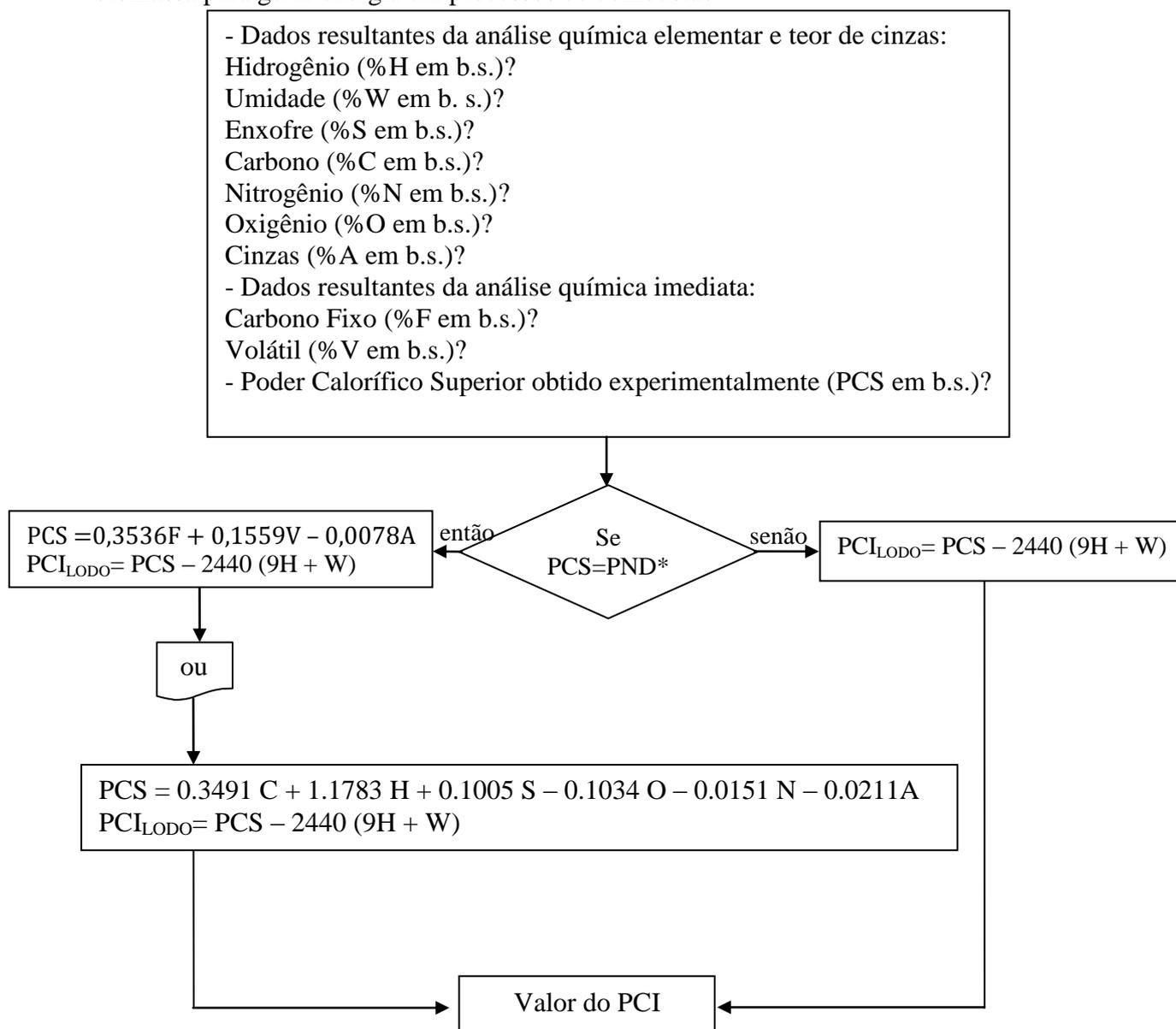
4.3. DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO PARA AVALIAR LODO DE ESGOTO SANITÁRIO COMO BIOMASSA NA GERAÇÃO DE ENERGIA EM PROCESSOS DE COMBUSTÃO

Para desenvolver o sistema computacional proposto foi criado um método sistematizado em seis etapas para avaliar lodo de esgoto sanitário como biomassa na geração de energia em processos de combustão, considerando os aspectos técnicos, ambientais e normativos descritos no item 4.1, bem como a classificação apresentada no item 4.2, e que pudesse ser automatizado através de codificação em linguagem de máquina. Assim, o método criado é descrito em seis etapas conforme segue.

Etapa 1: Cálculo do poder calorífico inferior (PCI) do lodo utilizando as Equações 2 e 4, caso se tenha disponível os resultados laboratoriais da análise química elementar e teor de cinzas (%C, %H, %S, %O, %N, %A e %W em base seca), ou as Equações 3 e 4, caso se tenha

disponível os resultados laboratoriais da análise química imediata, teor de cinzas e hidrogênio (%F, %V, %W, %A, %H em base seca). No caso de se ter disponível diretamente o valor do PCS, obtido experimentalmente, este pode ser usado diretamente na Equação 4 para o cálculo do PCI. O fluxograma da Figura 5 representa esta etapa.

Figura 5- Fluxograma da etapa 1 do método para avaliar lodo de esgoto sanitário como biomassa para gerar energia em processos de combustão.

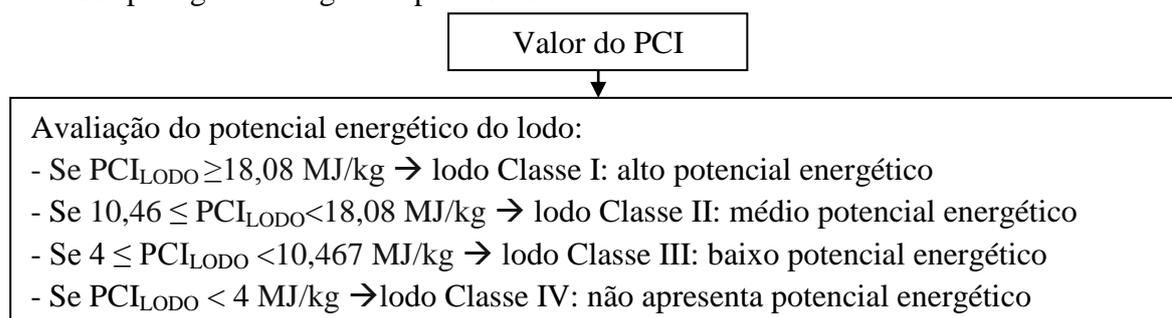


Fonte: Produção da autora

* A sigla PND significa parâmetro não determinado e representa situação em que não se tem disponível a informação solicitada.

Etapa 2: Enquadramento do poder calorífico inferior calculado dentro de um dos intervalos de classe criados para avaliação do potencial energético do lodo, conforme Tabela 22. O fluxograma da Figura 6 representa esta etapa.

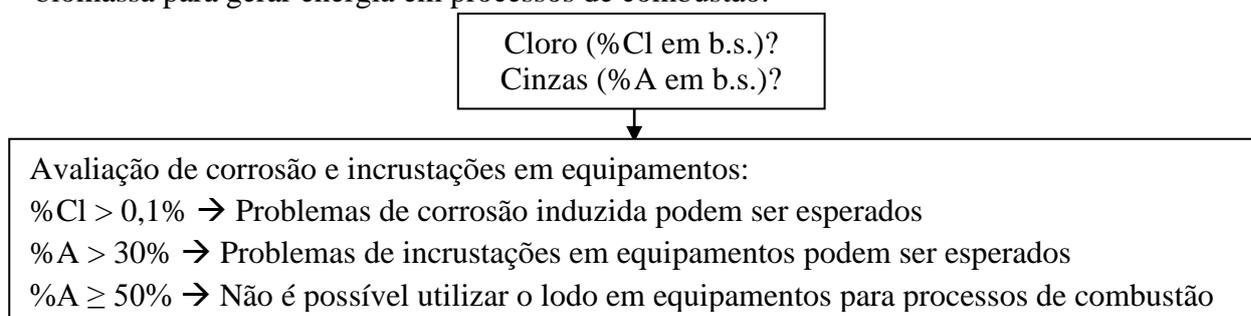
Figura 6- Fluxograma da etapa 2 do método para avaliar lodo de esgoto sanitário como biomassa para gerar energia em processos de combustão.



Fonte: Produção da autora

Etapa 3: Enquadramento do teor de Cloro e Cinzas (em base seca), presentes no lodo em estudo, em intervalos pré-definidos para avaliação de corrosão induzida e problemas de incrustações em equipamentos. O limite máximo de teor de cloro adotado para avaliar problemas de corrosão induzida é 0,1% (em base seca) (OBERNBERGER *et al.*, 2006). Enquanto que o limite máximo de cinzas adotado para avaliar problemas de incrustações é de 30%, sendo que, teor de cinzas acima de 50% inviabiliza a utilização do lodo em equipamentos para processos de combustão (FOELKEL, 2010). O fluxograma da Figura 7 representa esta etapa.

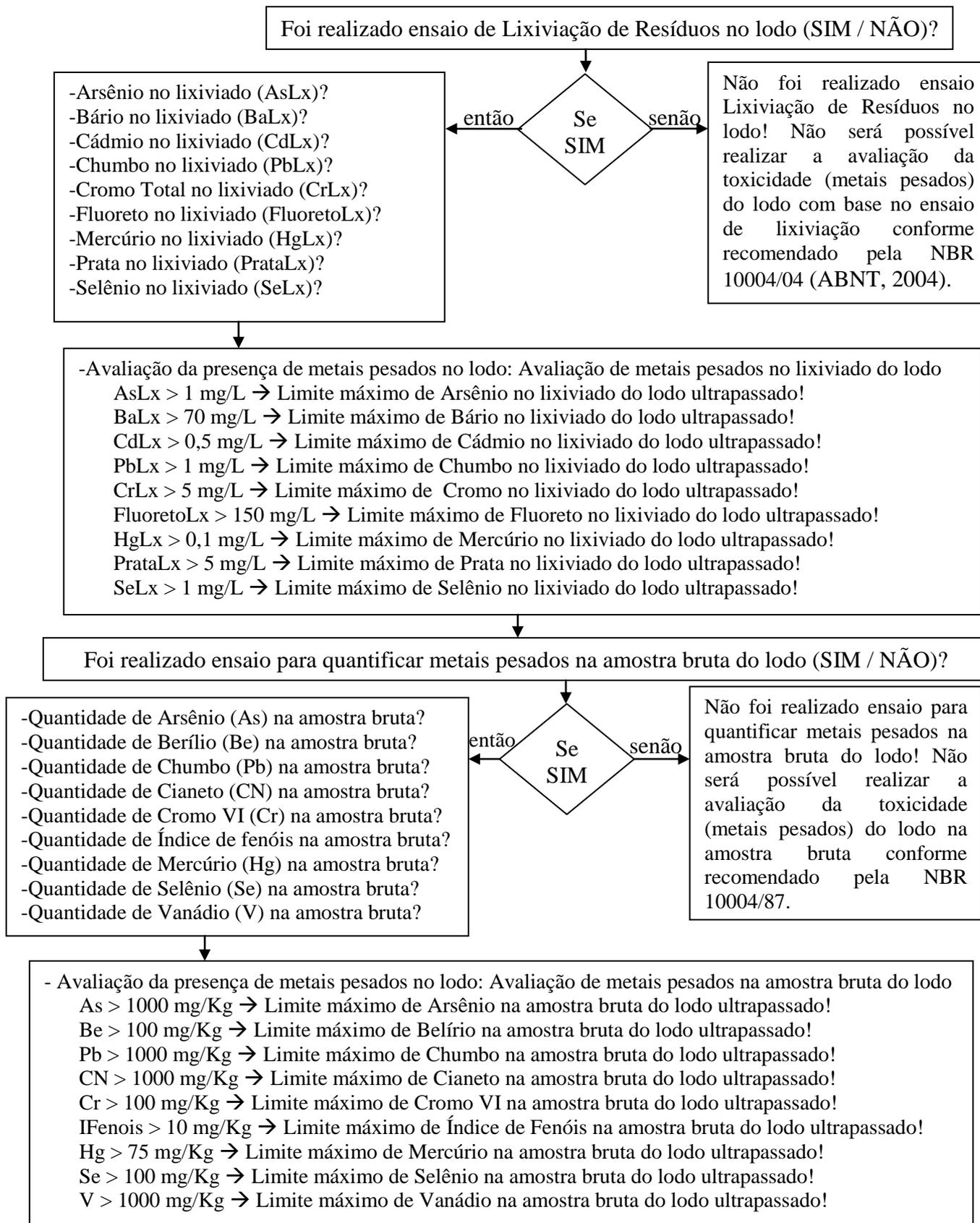
Figura 7- Fluxograma da etapa 3 do método para avaliar lodo de esgoto sanitário como biomassa para gerar energia em processos de combustão.



Fonte: Produção da autora

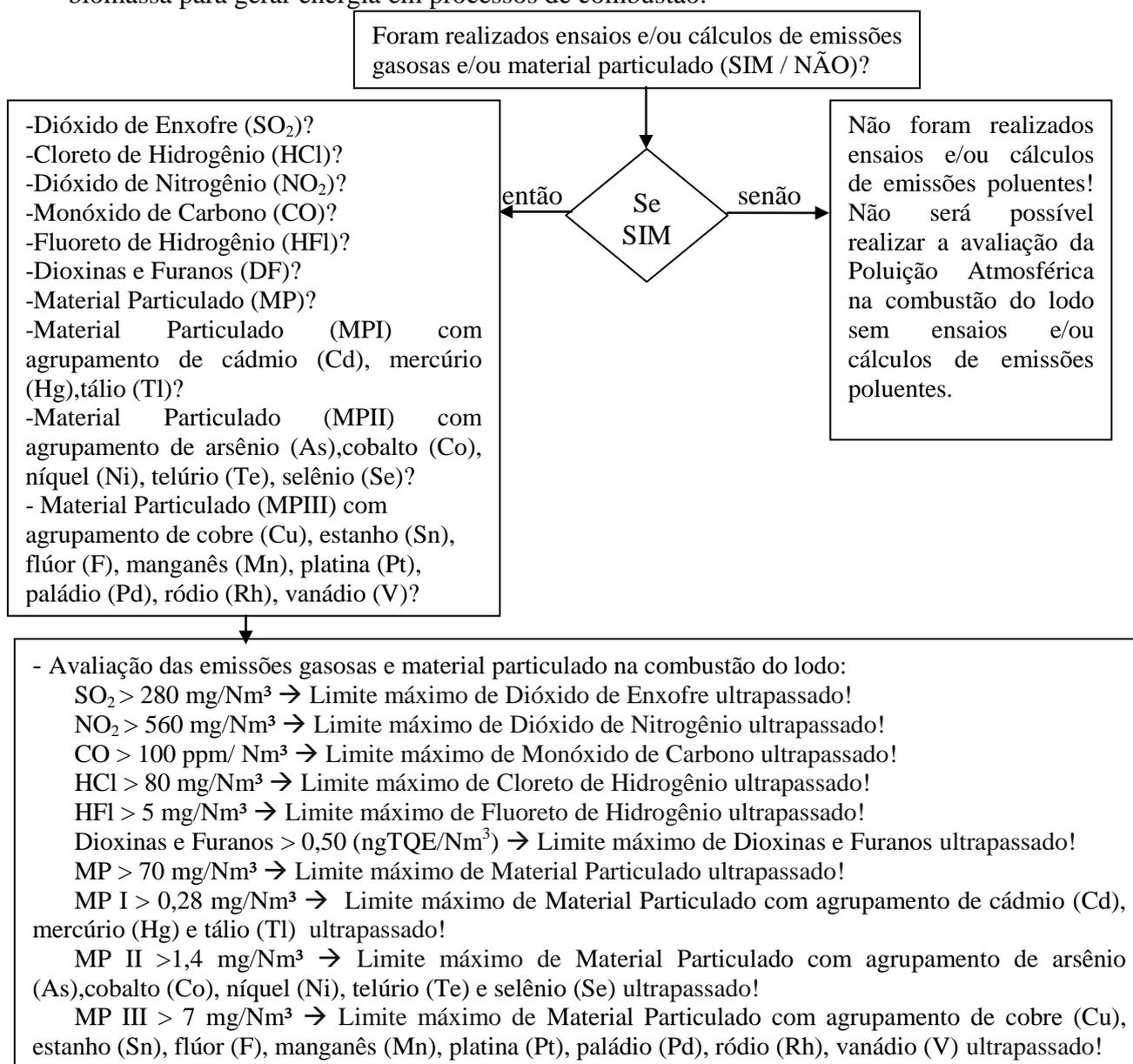
Etapa 4: Enquadramento dos valores resultantes do ensaio de toxicidade no lixiviado do lodo de acordo com limites estabelecidos pela NBR 10004/04 (ABNT, 2004) e na sua amostra bruta, de acordo com limites estabelecidos pela NBR 10004/87 (ABNT, 1987), apresentados respectivamente nas Tabelas 18 e 19, para avaliação da toxicidade do lodo (metais pesados). Caso não se tenha disponível tais valores então não será possível realizar a avaliação da toxicidade (metais pesados) do lodo de acordo com as normas citadas. O fluxograma da Figura 8 representa esta etapa.

Figura 8- Fluxograma da etapa 4 do método para avaliar lodo de esgoto sanitário como biomassa para gerar energia em processos de combustão.



Etapa 5: Enquadramento dos valores resultantes de ensaios de emissões atmosféricas do lodo nos intervalos definidos pela Resolução nº 316/2002 (CONAMA, 2002), apresentados na Tabela 14, para avaliação da poluição atmosférica (emissões gasosas e material particulado) na combustão do lodo. Caso não se tenham disponíveis tais valores não será possível realizar a avaliação da poluição atmosférica citada. O fluxograma da Figura 9 representa esta etapa.

Figura 9- Fluxograma das etapas 5 do método para avaliar lodo de esgoto sanitário como biomassa para gerar energia em processos de combustão.

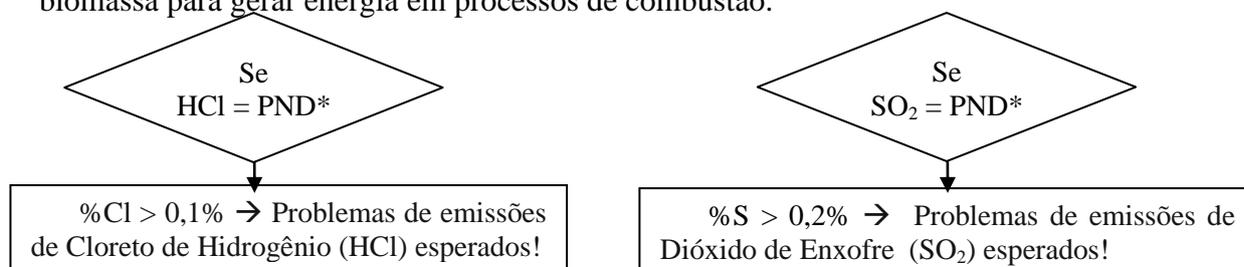


Fonte: Produção da autora

Etapa 6: Se não tiverem disponíveis os dados de testes de emissões atmosféricas para HCl e SO₂, devem ser verificados intervalos pré-definidos para teor de cloro em b.s. e teor de enxofre em b.s., considerando que, segundo Obernberger *et al.* (2006), problemas de emissão

de SO_x podem ser esperados para concentrações de S no combustível acima de 0,2% (em base seca) e problemas de emissão de HCl podem ser esperados para concentrações de Cl no combustível acima de 0,1% (em base seca). O fluxograma da Figura 10 representa esta etapa.

Figura 10- Fluxograma da etapa 6 do método para avaliar lodo de esgoto sanitário como biomassa para gerar energia em processos de combustão.

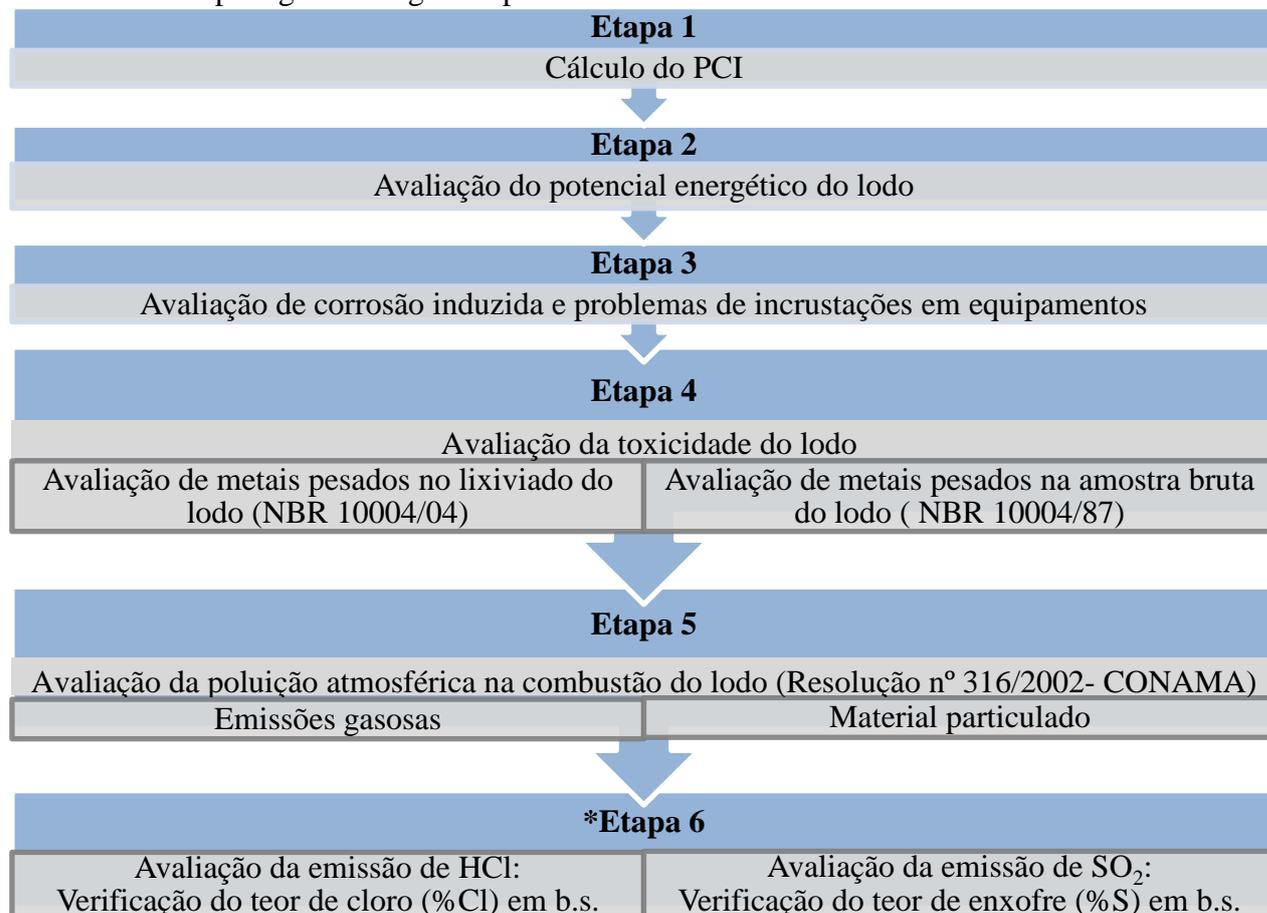


Fonte: Produção da autora

* A sigla PND significa parâmetro não determinado e representa situação em que não se tem disponível a informação solicitada.

A Figura 11 apresenta fluxograma geral das seis etapas do método desenvolvido.

Figura 11- Fluxograma geral do método desenvolvido para avaliar lodo de esgoto sanitário como biomassa para gerar energia em processos de combustão.



Fonte: Produção da autora

*Etapa realizada somente se não tiverem disponíveis os dados de testes de emissões atmosféricas para HCl e SO_2 .

4.4. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA COMPUTACIONAL

No presente trabalho, optou-se por desenvolver um sistema computacional que qualquer usuário pudesse acessar e usar facilmente os conhecimentos especializados necessários para avaliar lodo de esgoto como biomassa para gerar energia de forma tecnicamente viável e ambientalmente adequada, a partir de resultados laboratoriais de amostras de lodo, bem como permitir fácil atualização das informações nele contidas, considerando que:

- O sistema automatiza o método apresentado no item 4.3, o qual foi desenvolvido a partir da aquisição de conhecimentos específicos (denominados neste trabalho de “conhecimento especialista”) que exigiram tempo de pesquisa, estudo e análise para embasar sua criação;
- As pesquisas, estudos e análises foram feitas em trabalhos científicos e normas técnicas sujeitos à atualização.

Para permitir essa acessibilidade aos conhecimentos gerados e facilitar suas atualizações, o sistema computacional foi desenvolvido para *WEB*, com sua codificação em linguagem JAVA 1.6., utilizando o padrão de arquitetura de *software Model-View-Controller* (MVC).

4.4.1. Padrão de arquitetura *Model-View-Controller* (MVC)

O *Model-view-controller* (MVC) é um modelo de desenvolvimento de Software, atualmente considerado uma "arquitetura padrão" utilizada na Engenharia de Software. O modelo isola a "lógica" (a lógica da aplicação) da interface do usuário (inserir e exibir dados), permitindo desenvolver, editar e testar separadamente cada parte. Desta forma, alterações feitas no *layout* não afetam a manipulação de dados, e estes poderão ser reorganizados sem alterar o *layout*. Isso só é possível porque existe um componente entre os dois chamado controlador.

Este modelo, portanto é dividido em três camadas: o modelo (*model*), a visão (*view*) e o controlador (*controller*).

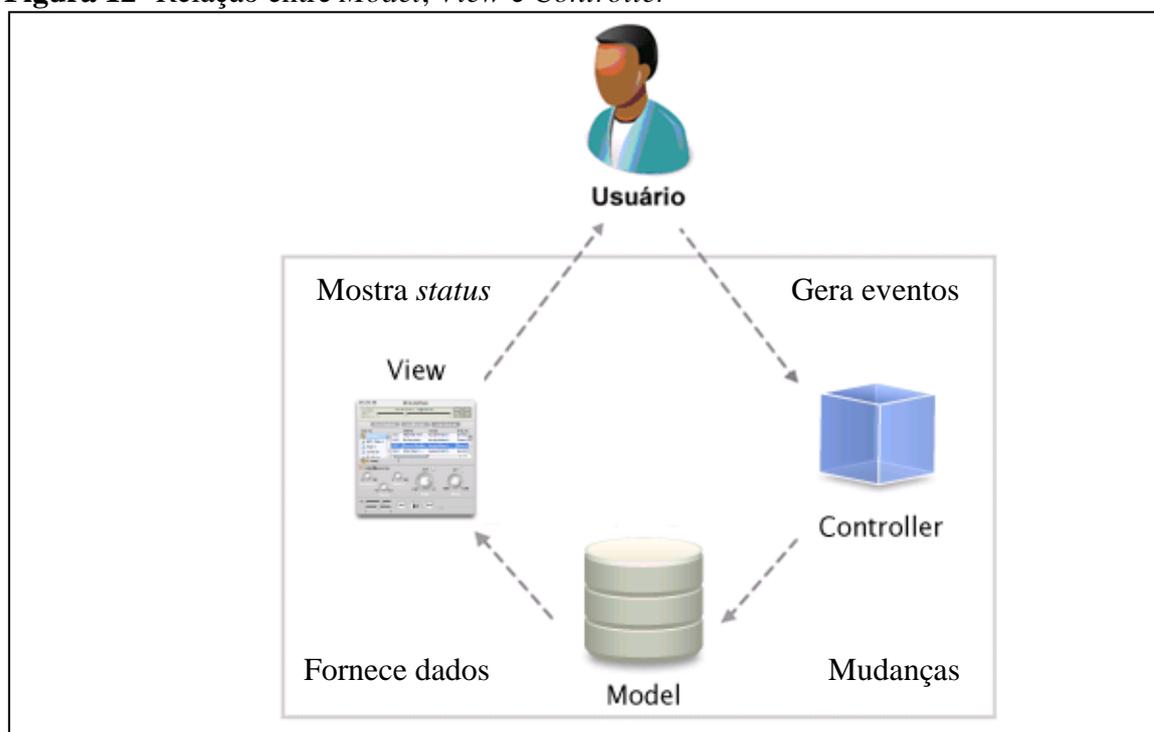
O modelo (*model*) é a camada que contém toda a programação da aplicação, como acesso ao banco de dados, validação, fórmulas, implementação das regras, alocação de recursos, rotinas que realizam entradas de dados, geração de relatórios, e todo o processamento que se realiza por trás da aplicação visível para o usuário.

A visão (*view*) apresenta a interface do sistema com o usuário. Podem existir diferentes visões para um mesmo modelo, para diferentes propósitos. Esta camada mostra os resultados gerados na camada de modelo.

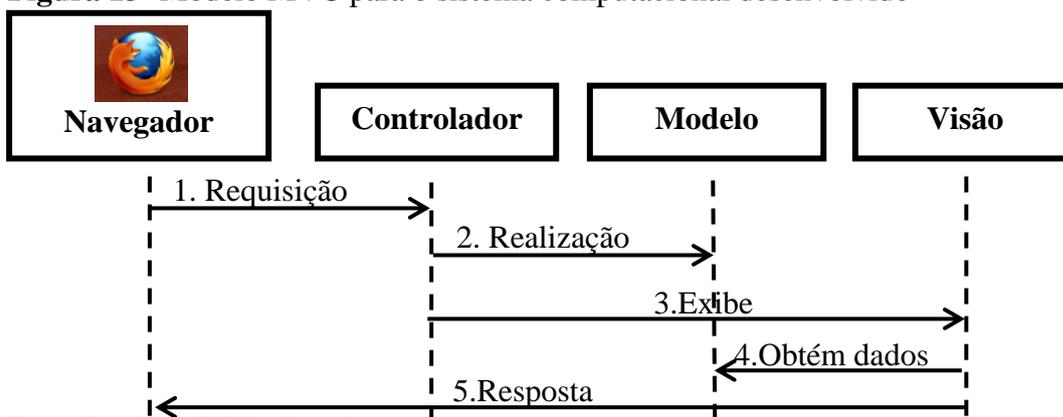
O controlador (*controller*) recebe a entrada de dados, realiza a validação e filtragem destes e inicia a resposta ao usuário ao invocar objetos do modelo. Esta camada é responsável pelo fluxo, qualidade e segurança das informações no sistema. É a ligação entre as camadas de modelo e visão.

Na Figura 12, apresenta-se um diagrama para exemplificar a relação entre *Model*, *View* e *Controller*.

Figura 12- Relação entre *Model*, *View* e *Controller*



O sistema computacional desenvolvido neste trabalho é uma aplicação *WEB* em que a visão é um documento HTML gerado pela aplicação. A Figura 13 mostra o diagrama de seqüência para o padrão MVC no caso do sistema desenvolvido. O Controlador recebe a requisição do Navegador e realiza a ação correspondente no Modelo. Em seguida, ele escolhe a Visão a ser exibida. A Visão obtém os dados necessários do modelo e a resposta gerada é exibida no navegador podendo ser uma página HTML ou um documento pdf (no caso da resposta ser relatórios de resultados do sistema).

Figura 13- Modelo MVC para o sistema computacional desenvolvido

4.4.2. Ferramentas computacionais utilizadas para desenvolvimento do sistema

Neste trabalho, foi utilizado para desenvolvimento do sistema computacional o servidor de aplicação Jboss 4.2 e, para o banco de dados, o Postgres 8.4. Na camada de visão e controle foi utilizado o ZK Framework, para se obter uma interface de usuário amigável, e na camada de modelo foi utilizado o framework JEP, para evoluir expressões matemáticas, e o Enterprise Java Bean - EJB 3.0, para permitir o desenvolvimento de aplicações distribuídas, organizando a lógica de negócio. Foi ainda usada a ferramenta para desenvolvimento de aplicativos em Java Eclipse IDE (Ambiente Integrado de Desenvolvimento) e a ferramenta Database Manager PGAdmin 3 que é um gerenciador de banco de dados.

Todos as ferramentas e softwares utilizados são gratuitos e fácil de serem adquiridos através de *downloads*.

4.4.3. Componentes do sistema computacional desenvolvido

O sistema computacional foi dividido em quatro componentes para implementação: interface de aquisição, base de conhecimento, interface de usuário e motor lógico.

4.4.3.1. Interface de aquisição e base de conhecimento

Denomina-se “interface de aquisição” a tela de interação do sistema com a pessoa que possui o conhecimento especialista, o “usuário especialista”. Essa tela de interação vai permitir ao usuário especialista inserir regras de lógica para representar o conhecimento que deve ser utilizado a fim de solucionar um problema real.

A codificação foi feita para aceitar que as regras de lógicas inseridas pelo usuário especialista utilizem operadores lógicos e matemáticos conforme descrito no Quadro 5, além da opção para executar uma regra somente no caso de outra regra ser verdadeira ou somente no caso dela ser falsa.

Quadro 5- Operadores lógicos e matemáticos aceitos pelo sistema para criação de regras de lógica

Operadores lógicos	Descrição	Operadores matemáticos	Descrição
>	maior que	+	soma
<	menor que	-	subtração
>=	maior ou igual a	*	multiplicação
<=	menor ou igual a	/	divisão
==	igual		
!=	diferente		
&&	e		
	ou		
!	negação		

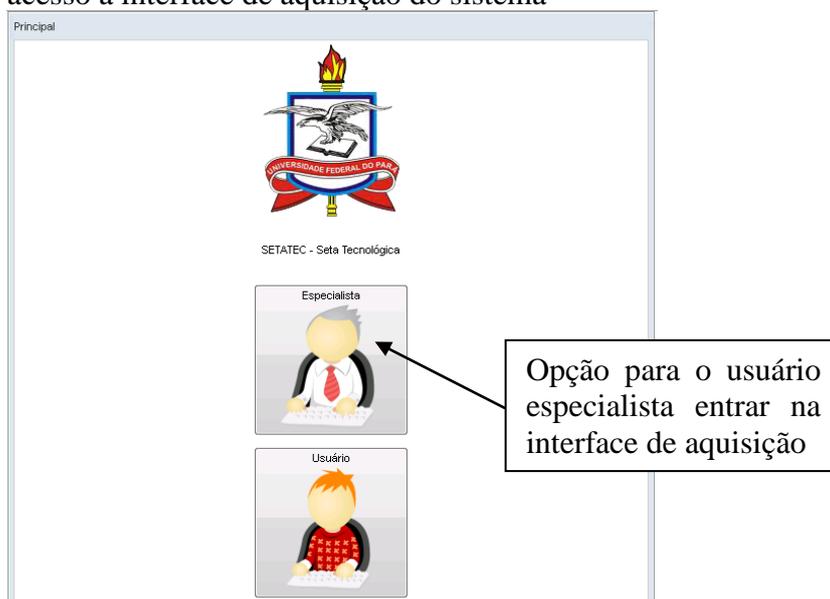
Fonte: Produção da autora

Foram criadas ainda as seguintes constantes com valores previamente definidos que podem ser consideradas na formulação das regras: “PND” (parâmetro não determinado), para considerar a possibilidade do usuário não preencher algum valor de variável solicitada pelo sistema; “SIM”, para indicar uma resposta positiva a uma pergunta; e “NAO”, para indicar uma resposta negativa a uma pergunta. É permitido também associar mensagens às regras inseridas, que são impressas no relatório de resultados, caso a regra em questão seja executada.

A interface de aquisição permite ao usuário especialista não só inserir regras de lógica para representar conhecimentos, mas também listar, imprimir, editar e excluir regras inseridas sempre que houver necessidade, facilitando atualizações do conhecimento. Todas as regras de lógica inseridas são armazenadas automaticamente em banco de dados. Esse banco de dados, que guarda o conhecimento representado através de regras de lógica, é denominado de “base de conhecimento”. Uma vez construída a base de conhecimento, esse conhecimento torna-se permanentemente acessível, facilmente recuperável e pode ser amplamente utilizados por todos.

Para o usuário especialista acessar a interface de aquisição do sistema computacional, o mesmo deve entrar na interface de usuário especialista (Figura 14).

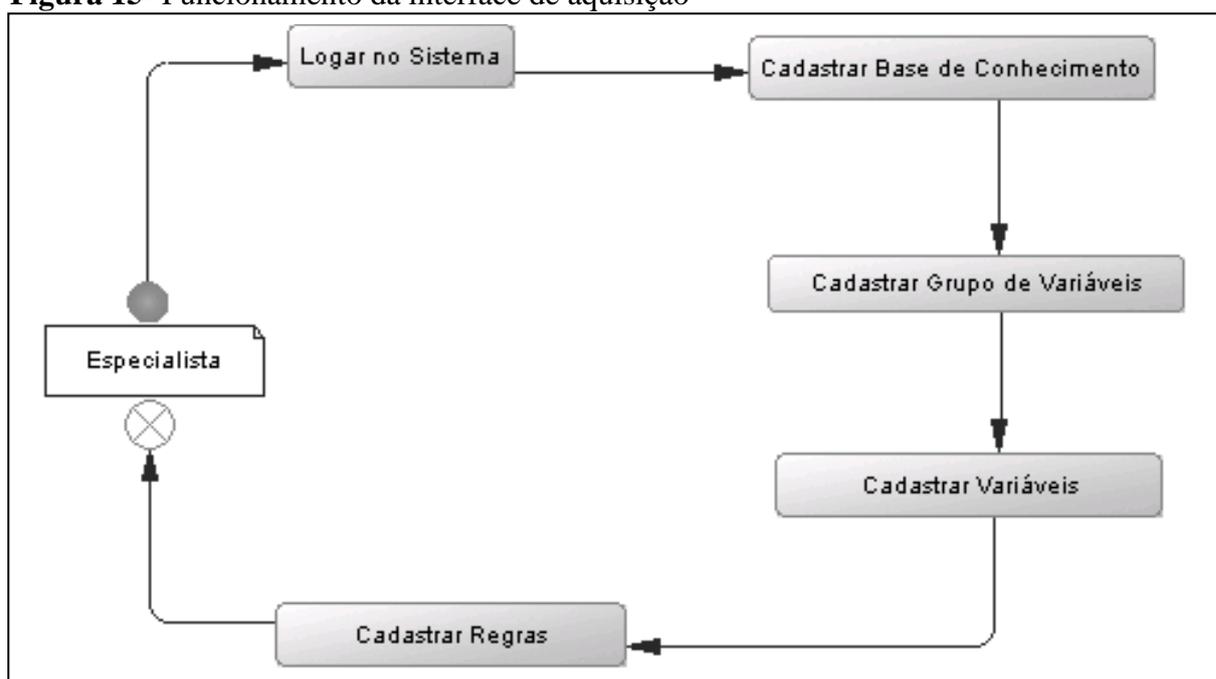
Figura 14- Tela inicial do sistema computacional: acesso a interface de aquisição do sistema



Fonte: Produção da autora- sistema computacional desenvolvido

Para iniciar a inserção das regras de lógica na interface de aquisição, é necessário primeiramente cadastrar um nome para a base de conhecimento que será criada, em seguida cadastrar grupos de variáveis que serão utilizadas nas regras, posteriormente, cadastrar as variáveis correspondentes a cada grupo, e finalmente cadastrar as regras de lógica da base de conhecimento, conforme representado na Figura 15.

Figura 15- Funcionamento da interface de aquisição



Fonte: Produção da autora

Os procedimentos representados na Figura 15 foram seguidos para automatizar o método apresentado no item 4.3, que avalia lodo de esgoto sanitário como biomassa para gerar energia em processos de combustão. Assim foram cadastradas as seguintes informações:

1. Base de conhecimento:

“Avaliação de Lodos de Esgoto como Biomassa para Gerar Energia em Processos de Combustão”.

2. Grupos de variáveis:

- Composição Elementar
- Composição Imediata
- Contaminantes
- Gases e MPs
- Poder Calorífico
- Receita Bruta

3. Variáveis correspondentes a cada grupo:

Grupo: Composição Elementar

Variáveis:

- C → Teor de Carbono em base seca
- H → Teor de Hidrogênio em base seca
- S → Teor de Enxofre em base seca
- O → Teor de Oxigênio em base seca
- Cl → Teor de Cloro em base seca
- W → Teor de Umidade em kg de água por kg do material em base seca
- A → Teor de Cinzas em base seca
- N → Teor de Nitrogênio em base seca

Grupo: Composição Imediata

Variáveis:

- F → Teor de Carbono fixo em base seca
- V → Teor de Voláteis em base seca

Grupo: Contaminantes

Variáveis:

- EnsaioLixiviado → Realização de ensaios de lixiviação de resíduos no lodo (sim/não)
- AsLX → Quantidade de Arsênio no lixiviado em mg/L
- BaLX → Quantidade de Bário no lixiviado em mg/L
- CdLX → Quantidade de Cádmiio no lixiviado em mg/L

PbLX → Quantidade de Chumbo no lixiviado em mg/L
 CrLX → Quantidade de Cromo no lixiviado em mg/L
 FluoretoLX → Quantidade de Fluoreto no lixiviado em mg/L
 HgLX → Quantidade de Mercúrio no lixiviado em mg/L
 PrataLX → Quantidade de Prata no lixiviado em mg/L
 SeLX → Quantidade de Selênio no lixiviado em mg/L
 As → Quantidade de Arsênio na amostra bruta em mg/Kg
 Be → Quantidade de Bário na amostra bruta em mg/Kg
 Pb → Quantidade de Chumbo na amostra bruta em mg/Kg
 CN → Quantidade de Cianeto na amostra bruta em mg/Kg
 Cr → Quantidade de Cromo VI na amostra bruta em mg/Kg
 IFenóis → Quantidade de Índice de Fenóis na amostra bruta em mg/Kg
 Hg → Quantidade de Mercúrio na amostra bruta em mg/Kg
 Se → Quantidade de Selênio na amostra bruta em mg/Kg
 Vanádio → Quantidade de Vanádio na amostra bruta em mg/Kg
 MetaisPesados → Realização de ensaios para quantificação de metais pesados na amostra bruta do lodo em mg/Kg (sim / não)

Grupo: Gases e MPs

Variáveis:

SO₂ → Dióxido de Enxofre em mg/Nm³
 HCl → Cloreto de Hidrogênio em mg/Nm³
 NO₂ → Dióxido de Nitrogênio em mg/Nm³
 CO → Monóxido de Carbono em ppm/Nm³
 HF1 → Fluoreto de Hidrogênio em mg/Nm³
 DF → Dioxinas e Furanos: dibenzo-p-dioxinas e dibenzo-p-furanos, expressos em TEC (total de toxicidade equivalente) da 2,3,7,8 TCDD (tetraclorodibenzo- para-dioxina) em ng/Nm³
 MP → Material Particulado em mg/Nm³
 MPI → Material Particulado comagrupamento de cádmio, mercúrio e tálio em mg/Nm³
 MPII → Material particulado com agrupamento de arsênio, cobalto, níquel, telúrio e selênio em mg/Nm³
 MPIII → Material particulado comagrupamento de cobre, estanho, flúor, manganês, platina, paládio, ródio e vanádio em mg/Nm³

EnsaioEGMP→ Realização de ensaios e/ou cálculos de Emissões Gasosas e/ou Material Particulado (Sim/Não)

Grupo: Poder Calorífico

Variáveis:

PCI→ Poder Calorífico Inferior em MJ/kg (base seca)

PCS→ Poder Calorífico Superior em MJ/kg (base seca)

Energia→ Energia bruta prevista em kWh/kg do lodo avaliado

Grupo: Receita Bruta

Variáveis:

QuantLodo→ Quantidade disponível de lodo de esgoto (tonelada)

Rendimento→ Rendimento percentual na transformação para energia elétrica (%)

Receita→ Receita bruta prevista com a venda da energia gerada a partir do lodo para distribuidoras de energia elétrica

A listagem das variáveis cadastradas para avaliação de lodo sanitário como biomassa na geração de energia pode ser emitida pelo sistema, caso o usuário necessite, conforme apresentado no Apêndice A.

Cada variável acima apresentada corresponde a um dado de entrada do sistema computacional, com exceção das variáveis denominadas “Energia” e “Receita”, que sempre são calculadas pelo próprio sistema não necessitando que seus valores sejam fornecidos.

Os dados de entrada correspondentes aos grupos composição elementar, composição imediata e poder calorífico são utilizados para avaliação do potencial energético do lodo podendo ocorrer opcionalmente de acordo com o Quadro 6.

Quadro 6- Opções para entrada de dados da composição elementar, composição imediata e poder calorífico

Opções	Dados de entrada para avaliação do potencial energético
Opção 1	Análise química imediata: – Carbono Fixo (%F em b.s.) – Volátil (%V em b.s.) – Umidade (%W em b. s.) Análise química elementar: – Hidrogênio (%H em b.s.) – Cinzas (%A em b.s.)
Opção 2	Análise química elementar: – Hidrogênio (%H em b.s.) – Umidade (%W em b. s.) – Enxofre (%S em b.s.) – Nitrogênio (%N em b.s.)

	<ul style="list-style-type: none"> - Carbono (%C em b.s.) - Oxigênio (%O em b.s.) - Cinzas (%A em b.s.)
Opção 3	PCS obtido em laboratório Análise química elementar: <ul style="list-style-type: none"> - Hidrogênio (%H em b.s.) - Umidade (%W em b. s.)
Opção 4	PCI, caso este já seja conhecido pelo usuário tomador da decisão

Fonte: Produção da autora

As variáveis Cl (teor de Cloro em base seca) e A (teor de Cinzas em base seca) são obrigatórias para a avaliação de corrosão e incrustações em equipamentos, se alguma delas não for fornecida, não será feita a avaliação correspondente e isso será avisado no relatório de resultados.

Quanto as variáveis do grupo Contaminantes e Gases e MPs são obrigatórias para a avaliação da toxicidade e poluição atmosférica respectivamente, de forma que, se alguma delas não for fornecida, não será feita a avaliação correspondente e isso será avisado no relatório de resultados.

As variáveis do grupo Receita Bruta, por sua vez, são obrigatórias apenas se o usuário quiser saber a receita bruta total prevista com a venda da energia gerada a partir do lodo para distribuidoras de energia elétrica. Caso as variáveis desse grupo não sejam fornecidas, o relatório final do sistema não apresentará tal informação.

4. Regras de lógicas:

Foram criadas e cadastradas 123 regras de lógica no sistema computacional a fim de automatizar o método apresentado no item 4.3 para avaliar lodo de esgoto sanitário como biomassa para gerar energia em processos de combustão e gerar os relatórios resultantes. A listagem completa dessas regras, emitida pelo sistema computacional, consta no Apêndice B e, a seguir, consideram-se as 19 primeiras regras de lógica cadastradas para mostrar como elas foram criadas a partir das variáveis cadastradas e dos símbolos lógicos e matemáticos estabelecidos, bem como demonstrar como são executadas pelo sistema computacional.

Regra1: Poder calorífico inferior do lodo em MJ/kg

Expressão: $PCI == PND$

Execução da regra: Esta é a primeira regra que o sistema vai testar. Esta regra testa se o PCI é um parâmetro fornecido pelo usuário (verifica se foi preenchido o campo de entrada de dados

desta variável). Se não foi fornecido, significa que a Regra 1 é verdadeira, senão é falsa. Em seguida o sistema vai para a Regra 2.

Regra 2: É uma sub-regra da Regra 1

Expressão: $PCS == PND$

Operação: Verdadeira (quer dizer que esta regra só será testada se a Regra 1 for verdadeira);

Execução da regra: Se a Regra 1 for verdadeira, a Regra 2 testa se o PCS é um parâmetro fornecido pelo usuário (verifica se foi preenchido o campo de entrada de dados desta variável). Se não foi fornecido, significa que a Regra 2 é verdadeira, senão é falsa. Em seguida o sistema vai para a Regra 3.

Regra 3: É uma sub-regra da Regra 2

Expressão: $V == PND \parallel F == PND$

Operação: Verdadeira (quer dizer que esta regra só será testada se a Regra 2 for verdadeira);

Execução da regra: Se a Regra 2 for verdadeira, a Regra 3 testa se o teor de voláteis (V) ou o teor de carbono fixo (F) é um parâmetro fornecido pelo usuário. Se um dos dois não for fornecido, significa que a Regra 3 é verdadeira e o sistema executará esta regra emitindo no relatório de resultados a mensagem “O poder calorífico inferior do lodo é calculado analiticamente utilizando dados da análise química elementar”, senão a Regra 3 é falsa e não será executada (a mensagem não será emitida no relatório de resultados). Em seguida o sistema passa para a Regra 4.

Regra 4: É uma sub-regra da Regra 3

Expressão: $PCS = 0.3491 * C + 1.1783 * H + 0.1005 * S - 0.1034 * O - 0.0151 * N - 0.0211 * A$

Operação: Fórmula (quer dizer que esta regra é uma fórmula e será executada sempre que a Regra 3 for verdadeira);

Execução da regra: Esta regra calcula o PCS em MJ/kg do lodo utilizando dados da análise química elementar e sempre será executada quando a Regra 3 for verdadeira. Se a Regra 3 for falsa, a Regra 4 não é executada (a fórmula não é calculada). Em seguida o sistema passa para a Regra 5.

Regra 5: É uma sub-regra da Regra 4

Expressão: $PCI = (PCS * 1000 - 219.60 * H - 24.40 * W) / 1000$

Operação: Fórmula (quer dizer que esta regra é uma fórmula e será executada sempre que a Regra 4 tiver sido executada);

Execução da regra: Esta regra calcula o PCI em MJ/kg do lodo e sempre será executada quando a Regra 4 tiver sido. Se a Regra 4 não tiver sido executada, a Regra 5 também não será (a fórmula não é calculada). Em seguida o sistema passa para a Regra 6.

Regra 6: É uma sub-regra da Regra 2

Expressão: $V \neq \text{PND} \ \&\& \ F \neq \text{PND}$

Operação: Verdadeira (quer dizer que esta regra só será testada se a Regra 2 for verdadeira);

Execução da regra: Se a Regra 2 for verdadeira, a Regra 6 testa se o teor de voláteis (V) e o teor de carbono fixo (F) é um parâmetro fornecido pelo usuário. Se ambos forem fornecidos, significa que a Regra 6 é verdadeira e o sistema emitirá no relatório de resultados a mensagem “O poder calorífico inferior do lodo é calculado analiticamente utilizando dados da análise química imediata e o teor de hidrogênio”, senão a Regra 6 é falsa e não será executada (a mensagem não será emitida no relatório de resultados). Em seguida passa para a Regra 7.

Regra 7: É uma sub-regra da Regra 6

Expressão: $\text{PCS} = 0.3536 * F + 0.1559 * V - 0.0078 * A$

Operação: Fórmula (quer dizer que esta regra é uma fórmula e será executada sempre que a Regra 6 for verdadeira);

Execução da regra: Esta regra calcula o PCS em MJ/kg do lodo utilizando dados da análise química imediata e sempre será executada quando a Regra 6 for verdadeira. Se a Regra 6 for falsa, a Regra 7 não é executada (a fórmula não é calculada). Em seguida o sistema passa para a Regra 8.

Regra 8: É uma sub-regra da Regra 7

Expressão: $\text{PCI} = (\text{PCS} * 1000 - 219.60 * H - 24.40 * W) / 1000$

Operação: Fórmula (quer dizer que esta regra é uma fórmula e será executada sempre que a Regra 7 tiver sido executada);

Execução da regra: Esta regra calcula o PCI em MJ/kg do lodo e sempre será executada quando a Regra 7 tiver sido. Se a Regra 7 não tiver sido executada, a Regra 8 também não será (a fórmula não é calculada). Em seguida o sistema passa para a Regra 9.

Regra 9: É uma sub-regra da Regra 1

Expressão: $\text{PCS} \neq \text{PND}$

Operação: Verdadeira (quer dizer que esta regra só será testada se a Regra 1 for verdadeira);

Execução da regra: Se a Regra 1 for verdadeira, a Regra 9 testa se o PCS é um parâmetro fornecido pelo usuário (verifica se foi preenchido o campo de entrada de dados desta variável). Se foi fornecido, significa que a Regra 9 é verdadeira, senão é falsa. Em seguida o sistema vai para a Regra 10.

Regra 10: É uma sub-regra da Regra 9

Expressão: $PCI = (PCS * 1000 - 219.60 * H - 24.40 * W) / 1000$

Operação: Fórmula (quer dizer que esta regra é uma fórmula e será executada sempre que a Regra 9 tiver sido executada);

Execução da regra: Esta regra calcula o PCI em MJ/kg do lodo e sempre será executada quando a Regra 9 tiver sido. Se a Regra 9 não tiver sido executada, a Regra 10 também não será (a fórmula não é calculada). Em seguida o sistema passa para a Regra 11.

A Figura 16 apresenta um resumo dessas 10 primeiras regras de lógica.

Figura 16- Resumo das dez primeiras regras de lógica cadastradas no sistema

	REGRA	EXPRESSÃO	MENSAGEM	OPERAÇÃO
Regra 1	Poder Calorífico Inferior do Lodo em MJ/kg	$PCI == PND$		
Regra 2	Se PCS = PND	$PCS == PND$		Verdadeiro
Regra 3	Se %V = PND ou %F=PND	$V == PND \parallel F == PND$	O poder calorífico inferior do lodo é calculado analiticamente utilizando dados da análise química elementar.	Verdadeiro
Regra 4	Cálculo PCS com análise elementar	$PCS = 0.3491 * C + 1.1783 * H + 0.1005 * S - 0.1034 * O - 0.0151 * N - 0.0211 * A$		Fórmula
Regra 5	Cálculo do PCI em MJ/kg	$PCI = (PCS * 1000 - 219.60 * H - 24.40 * W) / 1000$		Fórmula
Regra 6	Se %V != PND e %F != PND	$V != PND \ \&\& \ F != PND$	O Poder Calorífico Inferior do lodo é calculado analiticamente utilizando dados da análise química imediata e o teor de hidrogênio.	Verdadeiro
Regra 7	Cálculo PCS com análise imediata	$PCS = 0.3536 * F + 0.1559 * V - 0.0078 * A$		Fórmula
Regra 8	Cálculo do PCI em MJ/kg	$PCI = (PCS * 1000 - 219.60 * H - 24.40 * W) / 1000$		Fórmula
Regra 9	Se PCS != PND	$PCS != PND$		Verdadeiro
Regra 10	Cálculo do PCI em MJ/kg	$PCI = (PCS * 1000 - 219.60 * H - 24.40 * W) / 1000$		Fórmula

Fonte: Produção da autora

Regra 11: Poder calorífico inferior do lodo em MJ/kg

Expressão: $PCI != PND$

Execução da regra: Esta regra não é sub-regra de nenhuma outra regra. Ela vai testar se o PCI é um parâmetro conhecido. Se for conhecido, significa que a Regra 11 é verdadeira, senão é falsa. Em seguida o sistema vai para a Regra 12.

Regra 12: É uma sub-regra da Regra 11

Expressão: $Cl == PND$

Operação: Verdadeira (quer dizer que esta regra só será testada se a Regra 11 for verdadeira);

Execução da regra: Se a Regra 11 for verdadeira, a Regra 12 testa se o teor de cloro (Cl) é um parâmetro fornecido pelo usuário. Se não for fornecido, significa que a Regra 12 é verdadeira e o sistema emitirá no relatório de resultados a mensagem “Teor de Cloro não será avaliado! Para Teor de Cloro acima de 0,1% corrosão induzida e problemas de emissão de HCl podem ser esperados.”, senão a Regra 12 é falsa e não será executada (a mensagem não será emitida no relatório de resultados). Em seguida o sistema passa para a Regra 13.

Regra 13: É uma sub-regra da Regra 12

Expressão: $Cl > 0.1$

Operação: Falsa (quer dizer que esta regra só será testada se a Regra 12 for falsa);

Execução da regra: Se a Regra 12 for falsa, a Regra 13 testa se o teor de cloro (Cl) é maior que 0,1. Se for, significa que a Regra 12 é verdadeira e o sistema emitirá no relatório de resultados a mensagem “Teor de Cloro acima de 0,1%! Problemas de corrosão induzida podem ser esperados.”, senão a Regra 12 é falsa e não será executada (a mensagem não será emitida no relatório de resultados). Em seguida o sistema passa para a Regra 14.

Regra 14: É uma sub-regra da Regra 11

Expressão: $A == PND$

Operação: Verdadeira (quer dizer que esta regra só será testada se a Regra 11 for verdadeira);

Execução da regra: Se a Regra 11 for verdadeira, a Regra 14 testa se o teor de cinzas (A) é um parâmetro fornecido pelo usuário. Se não for fornecido, significa que a Regra 14 é verdadeira e o sistema emitirá no relatório de resultados a mensagem “Teor de cinzas não é avaliado! Para Teor de Cinzas acima de 30% problemas de incrustações em equipamentos podem ser esperados.”, senão a Regra 14 é falsa e não será executada (a mensagem não será emitida no relatório de resultados). Em seguida o sistema passa para a Regra 15.

Regra 15: É uma sub-regra da Regra 14

Expressão: $A > 30$

Operação: Falsa (quer dizer que esta regra só será testada se a Regra 14 for falsa);

Execução da regra: Se a Regra 14 for falsa, a Regra 15 testa se o teor de cinzas (A) é maior que 30. Se for, significa que a Regra 15 é verdadeira e o sistema emitirá no relatório de resultados a mensagem “Teor de Cinzas acima de 30%! Problemas de incrustações em

equipamentos podem ser esperados.”, senão a Regra 14 é falsa e não será executada (a mensagem não será emitida no relatório de resultados). Em seguida passa para a Regra 16.

Regra 16: Poder calorífico inferior do lodo em MJ/kg

Expressão: $PCI \neq PND$

Execução da regra: Esta regra não é sub-regra de nenhuma outra regra. Ela vai testar se o PCI é um parâmetro conhecido. Se for conhecido, significa que a Regra 16 é verdadeira, senão é falsa. Em seguida o sistema vai para a Regra 17.

Regra 17: É uma sub-regra da Regra 16

Expressão: $PCI < 4$

Operação: Verdadeira (quer dizer que esta regra só será testada se a Regra 16 for verdadeira);

Execução da regra: Se a Regra 16 for verdadeira, a Regra 17 testa se o poder calorífico inferior do lodo é menor que 4 MJ/kg de lodo. Se for, significa que a Regra 17 é verdadeira e o sistema emitirá no relatório de resultados as mensagens:

- Valor do Poder Calorífico Inferior do lodo avaliado = %PCI% MJ/kg (o símbolo “%PCI%” será substituído pelo valor do PCI calculado pelo sistema);
- Lodo com poder calorífico muito baixo!
- Lodo Classe IV: Não apresenta potencial para gerar energia em processos de combustão.

Caso a Regra 17 seja falsa, ela não será executada (as mensagens acima não serão emitidas no relatório de resultados). Em seguida o sistema passa para a Regra 18.

Regra 18: É uma sub-regra da Regra 16

Expressão: $4 \leq PCI \ \&\& \ PCI < 10.467$

Operação: Verdadeira (quer dizer que esta regra só será testada se a Regra 16 for verdadeira);

Execução da regra: Se a Regra 16 for verdadeira, a Regra 18 testa se o poder calorífico inferior do lodo é maior que 4 MJ/kg e menor que 10,467 MJ/kg. Se for, significa que a Regra 17 é verdadeira e o sistema emitirá no relatório de resultados as mensagens:

- Valor do poder calorífico do lodo avaliado = %PCI% MJ/kg (o símbolo “%PCI%” será substituído pelo valor do PCI calculado pelo sistema)
- Lodo Classe III: Apresenta baixo potencial para gerar energia em processos de combustão.
- Aplicações:

Aplicações Recomendadas: Co-processamento em geral, exceto em fornos de clínquer para fabricação de cimento, respeitadas as condições abaixo:

1. Teor de cinzas do lodo abaixo de 50%. Caso o teor de cinzas seja maior que 50%, só é recomendável a queima do lodo quando a empresa for obrigada pelo legislador/controlador ambiental, ou quando quiser eliminar o lodo para evitar aterrá-lo. Caso contrário,   tecnicamente desaconselhado em fun o dos problemas de incrusta es em equipamentos.

2. Baixo conteúdo de óxidos básicos de fósforo e óxidos de ferro na composi o das cinzas do lodo. Caso o lodo apresente elevado conteúdo de óxidos básicos de fósforo e óxidos de ferro na composi o de suas cinzas, s    recomendável sua utiliza o para co-processamentos e em propor es não superiores a 15%. Caso contrário,   tecnicamente desaconselhado em fun o da forte tendência   forma o de depósitos e incrusta o nos equipamentos.

Aplica es Não-Recomedadas: Co-processamento em fornos de clínquer para fabrica o de cimento e como combustível principal em, centrais   biomassa para gera o de energia elétrica, uso doméstico, caldeiras, geradores de vapor, fornos, fornalhas, estufas e secadores para gera o e uso de energia térmica, gaseificadores e fornos de cimento.

Caso a Regra 18 seja falsa, ela não será executada (as mensagens acima não serão emitidas no relatório de resultados). Em seguida o sistema passa para a Regra 19.

Regra 19:   uma sub-regra da Regra 18

Expressão: $Energia = PCI * 0.28$

Opera o: Fórmula (quer dizer que esta regra   uma fórmula e será executada sempre que a Regra 18 tiver sido executada)

Execu o da regra: Esta regra calcula a energia bruta prevista em kWh/kg do lodo e sempre será executada quando a Regra 18 tiver sido. Ao ser executada, a Regra 19 emitirá no relatório de resultados a mensagem “Energia Bruta Prevista = %Energia% kWh/kg de lodo” (o símbolo “%Energia%” será substituído pelo valor da energia bruta calculada pelo sistema). Se a Regra 18 não tiver sido executada, a Regra 19 também não será (a fórmula não   calculada e a mensagem não   emitida no relatório de resultados). Em seguida o sistema passa para a Regra 20.

Após o teste da Regra 20, o sistema testa a Regra 21, em seguida a Regra 22, e assim por diante até não haver mais nenhuma regra para ser testada.

A Figura 17 mostra a interface de aquisi o do sistema computacional. Esta interface   restrita ao usuário especialista e permite que diversas bases de conhecimento diferentes possam ser cadastradas por usuários especialista

Figura 17- Interface de aquisição do sistema computacional

The screenshot shows a Mozilla Firefox browser window displaying a web application. The address bar shows the URL `http://localhost:8080/lodo/restrict/regra/listar.zul`. The page title is "Base de Conhecimento > Regra > Listar".

On the left side, there is a "Menu" sidebar with the following categories:

- Grupos de Variáveis
 - Cadastrar
 - Listar
- Variável
 - Cadastrar
 - Listar
- Base de Conhecimento
 - Cadastrar
 - Listar
 - Regra
 - Cadastrar
 - Listar
- Especialista
 - Cadastrar
 - Listar
- Relatório Informações
 - Cadastrar
 - Listar

The main content area shows the "Base de Conhecimento" dropdown set to "Processos de Combustão". Below this is a table with the following columns: "Nome", "Expressão", and "Operação".

Nome	Expressão	Operação
<input type="checkbox"/> Poder Calorífico Inferior do Lodo em MJ/kg	PCI == PND	
<input type="checkbox"/> - Se PCS = PND	PCS==PND	Verdadeiro
<input type="checkbox"/> - Se PCS != PND	PCS != PND	Verdadeiro
<input type="checkbox"/> Avaliação de problemas de incrustações e corrosão	PCI != PND	
<input type="checkbox"/> Avaliação do Potencial Energético do lodo em processos de combustão	PCI != PND	
<input type="checkbox"/> - Se PCI >= 18,08 MJ/kg Lodo Classe I	PCI >= 18.08	Verdadeiro
<input type="checkbox"/> - Se 4 <= PCI < 10,467 MJ/kg Lodo Classe III	4 <= PCI && PCI < 10.467	Verdadeiro
<input type="checkbox"/> - Se 10,467 <= PCI < 10,88 MJ/kg Lodo Classe II	10.467 <= PCI && PCI < 10.88	Verdadeiro
<input type="checkbox"/> - Se 11,618 <= PCI < 18,08 MJ/kg Lodo Classe II	11.618 <= PCI && PCI < 18.08	Verdadeiro
<input type="checkbox"/> - Se PCI < 4 MJ/kg Lodo Classe IV	PCI < 4	Verdadeiro
<input type="checkbox"/> - Se 10,88 <= PCI < 11,618 MJ/kg Lodo Classe II	10.88 <= PCI && PCI < 11.618	Verdadeiro
<input type="checkbox"/> Foram realizados ensaios e/ou cálculos de EG e/ou MP?	EnsaioEGMP == NAO	
<input type="checkbox"/> Foi realizado ensaio de Lixiviação de Resíduo no lodo?	EnsaioLixiviado == NAO	
<input type="checkbox"/> Foram quantificados os metais pesados na amostra bruta do lodo em mg/kg?	MetaisPesados == NAO	

At the bottom of the table, there are four buttons: "Editar", "Excluir", "Adicionar Sub-Regra", and "Imprimir".

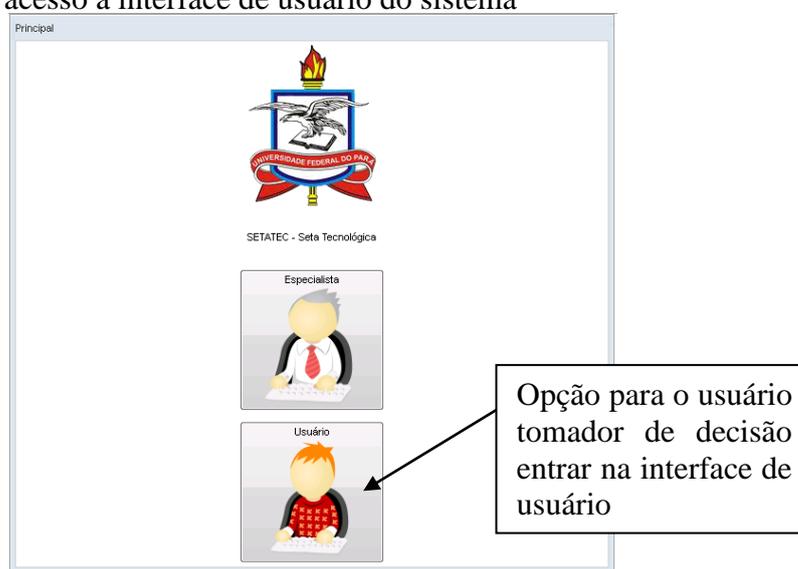
Fonte: Produção da autora- sistema computacional desenvolvido

4.4.3.2. Interface de usuário e motor lógico

Denomina-se “interface de usuário” a tela de interação do sistema com a pessoa que precisa do conhecimento especialista para tomar decisão, o “usuário tomador de decisão”. Essa tela de interação vai permitir que um usuário tomador de decisão escolha uma base de conhecimento cadastrada para usar como ferramenta para tomar decisão.

Para o usuário tomador de decisão acessar esta tela de interação é necessário que o mesmo entre na interface de usuário (Figura 18).

Figura 18- Tela inicial do sistema computacional: acesso a interface de usuário do sistema



Fonte: Produção da autora- sistema computacional desenvolvido

Quando o usuário entrar na tela de interação (Figura 19), ele terá que selecionar o nome da base de conhecimento desejada, o sistema faz automaticamente a associação com as regras que compõem essa base e mostra os campos para preenchimento dos dados de entrada. O sistema aceita que alguns campos de entrada de dados não sejam preenchidos. Caso o preenchimento do campo seja obrigatório, o sistema emitirá um alerta no momento da entrada do dado para que o usuário não deixe de preencher.

Após os dados de entrada ser fornecidos pelo usuário tomador de decisão, este seleciona a opção “relatório de resultados” e, em seguida, clica no botão “próximo” (Figura 19), para acionar a codificação do sistema que processa os dados de entrada, realiza o teste e encadeamento lógico das regras e gera o relatório de saída que irá auxiliar a tomada de decisão.

Figura 19- Interface de usuário do sistema computacional

Escolha da base de conhecimento

Botão “próximo”

Opção “relatório de resultados”

Mais visitados Primeiros passos

Área do Usuário Seja bem-vindo(a). Sair

Base de Conhecimento: Processos de Combustão Imprimir

Nome	Expressão	Operação
⊕ Poder Calorífico Inferior do Lodo em MJ/kg	PCI == PND	
⊕ Avaliação de problemas de incrustações e corrosão	PCI != PND	
⊕ Avaliação do Potencial Energético do lodo em processos de combustão	PCI != PND	
⊕ Foram realizados ensaios e/ou cálculos de EG e/ou MP?	EnsaioEGMP == NAO	
⊕ Foi realizado ensaio de Lixiviação de Resíduo no lodo?	EnsaioLixiviado == NAO	
⊕ Foram quantificados os metais pesados na amostra bruta do lodo em mg/kg?	MetaisPesados == NAO	

Relatório de Resultados Relatório de Lógica

Composição Elementar

Cl:	<input type="text"/>	Teor de Cloro em base seca
A:	<input type="text"/>	Teor de Cinzas em base seca
S:	<input type="text"/>	Teor de Enxofre em base seca
O:	<input type="text"/>	Teor de Oxigênio em base seca
C:	<input type="text"/>	Teor de Carbono em Base Seca
N:	<input type="text"/>	Teor de Nitrogênio em base seca
H:	<input type="text"/>	Teor de Hidrogênio em base seca
w:	<input type="text"/>	Teor de Umidade em kg de água por kg do material em base seca

Composição Imediata

Contaminantes

Gases e MPs

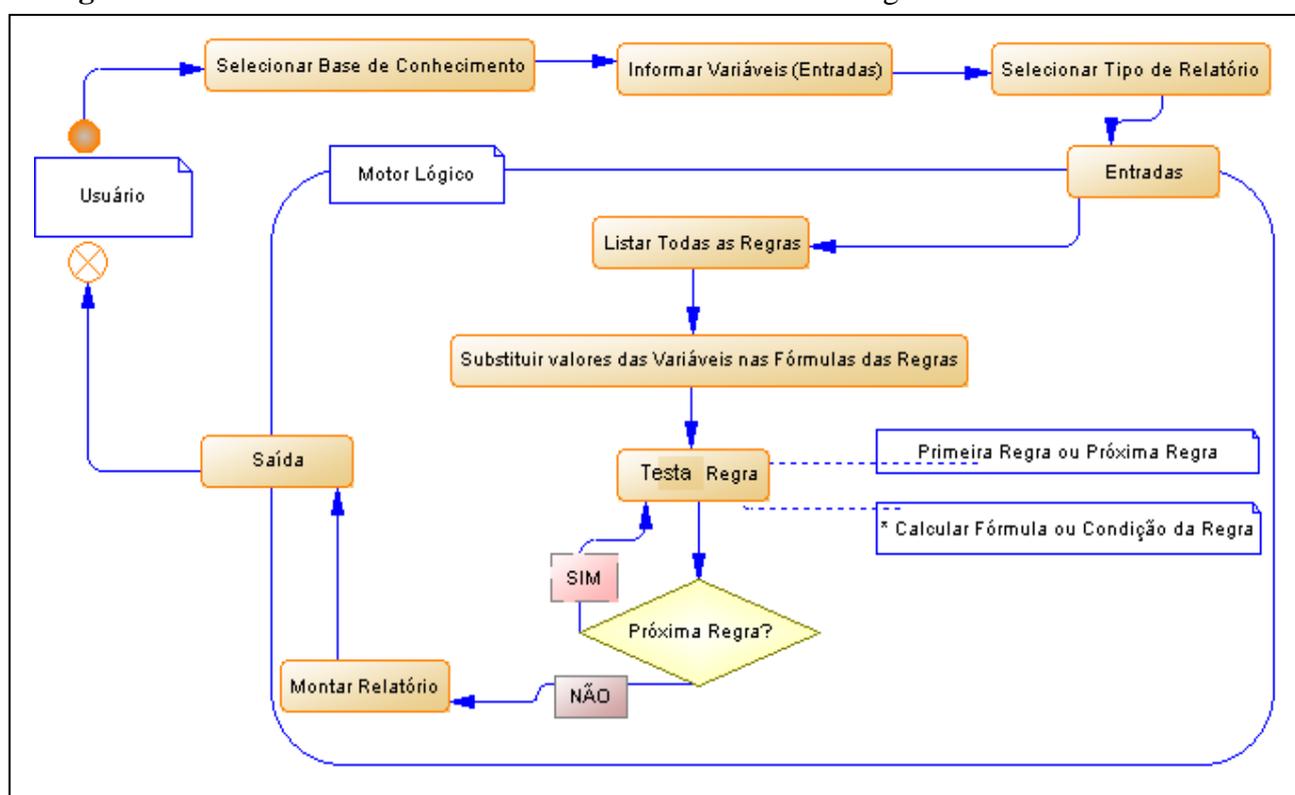
Poder Calorífico

Receita Bruta

Fonte: Produção da autora- sistema computacional desenvolvido

A codificação responsável pela realização deste teste e encadeamento lógico é denominada de “motor lógico”. O motor lógico é codificado para, quando for acionado, seguir a seguinte sequência de procedimentos: listar todas as regras, substituir valores das variáveis nas fórmulas das regras, testar a primeira regra, verificar se tem próxima regra e, caso tenha, passar para a próxima regra, até que não tenha mais nenhuma regra para ser analisada (apenas serão executadas as regras cujas condições estabelecidas por elas forem verdadeiras). Quando ocorrer esta última situação, o encadeamento lógico das regras é finalizado, e o relatório é montado com as informações provenientes das regras executadas. A Figura 20 representa o funcionamento da interface de usuário e do motor lógico.

Figura 20- Funcionamento da interface de usuário e do motor lógico

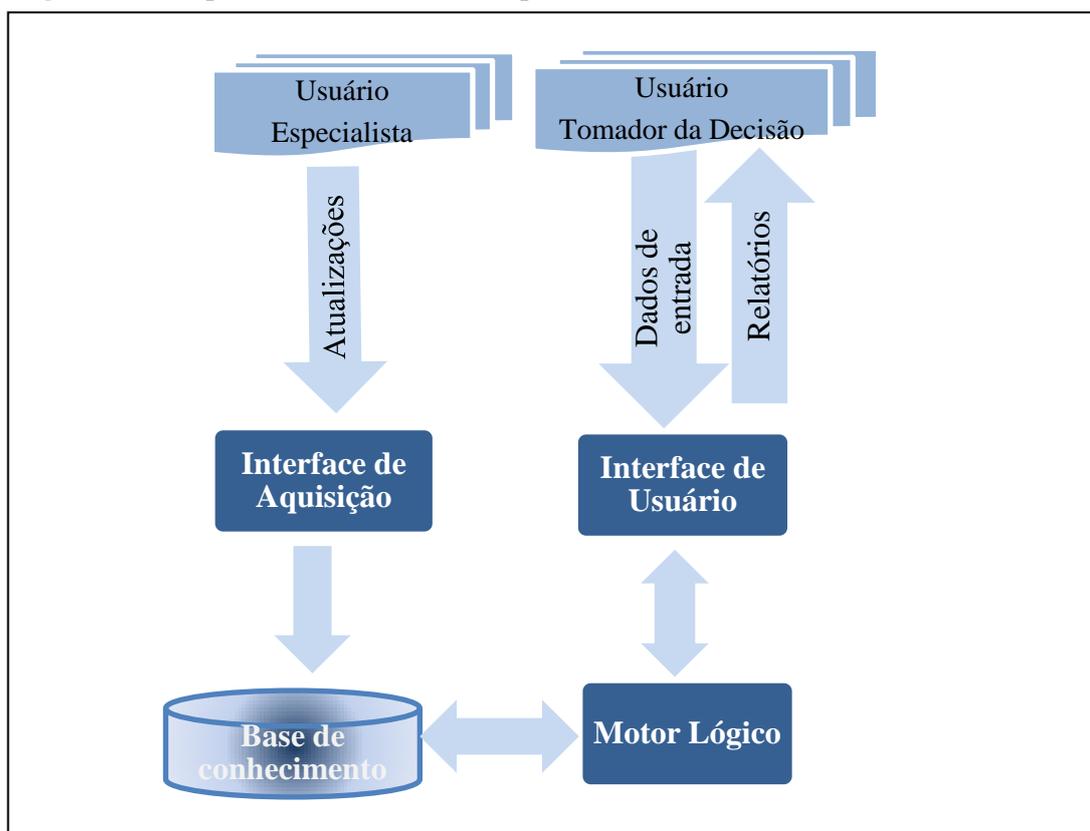


Fonte: Produção da autora

No item 4.4.3.3, sub item **regras de lógica**, é demonstrado como ocorre a execução das regras que é realizada pelo motor lógico.

Existem dois relatórios possíveis de serem gerados como dados de saída do sistema computacional desenvolvido: o relatório de resultados e o de lógica.

A Figura 21 apresenta a arquitetura do sistema computacional desenvolvido.

Figura 21- Arquitetura do sistema computacional

Fonte: Produção da autora

No relatório de resultados, é apresentado o valor do PCI em MJ/kg do lodo amostrado, a avaliação do seu potencial energético (potencial alto, médio, baixo ou sem potencial), as aplicações recomendadas e não-recomendadas para o lodo avaliado, a energia bruta prevista em kWh/kg do lodo, mensagens de alerta e explicativas quanto às emissões de poluentes atmosféricos, à toxicidade do lodo, aos problemas de corrosão e incrustações em equipamentos, bem como as normas e limites utilizados como parâmetro pelo sistema, visando agilizar a tomada de decisão em relação à utilização ou não do lodo amostrado como biomassa na geração de energia em processos de combustão. O relatório de lógica apresenta o encadeamento lógico progressivo das regras que foram usadas para se obter as conclusões, explicações e mensagens apresentadas no relatório de resultados.

A interface de usuário permite não somente a entrada de dados e escolha de relatórios a serem gerados para a tomada de decisão, mas também a visualização e impressão das regras de lógica cadastradas pelo usuário especialista.

5. TESTE E VALIDAÇÃO DO SISTEMA COMPUTACIONAL

Para testar o sistema computacional e validar seus resultados, permitindo seu uso como ferramenta para agilizar a tomada de decisão no gerenciamento do lodo de esgoto, foram utilizados quatro trabalhos de aplicação do lodo de esgoto como biomassa na geração de energia em escala experimental, disponíveis em bibliografias, tendo em vista a dificuldade de encontrar tais exemplos em escala real. Os dados de entrada do sistema computacional serão aqueles apresentados nos trabalhos utilizados e os resultados finais comparados entre si.

O primeiro trabalho utilizado para teste e validação do sistema foi o de Macedo (2006), que realizou análise térmica e ambiental da queima do lodo primário da fabricação de papel e celulose em caldeira de biomassa à grelha, o segundo foi de Borges (2008), que fez a caracterização e estudo da potencialidade de lodos de efluentes doméstico e industrial como combustível na geração de energia, o terceiro foi de Moraes (2006) que fez a caracterização do produto proveniente da calcinação do lodo de esgoto resultante do tratamento de águas residuárias, e o quarto de Virmond (2007), que fez estudo do aproveitamento do lodo de tratamento primário de efluentes de um frigorífico como fonte de energia.

Os dados de entrada do sistema correspondem aos resultados laboratoriais de amostras de lodo de esgoto sendo estes: composição química elementar (teor percentual em base seca dos elementos Carbono, Hidrogênio, Enxofre, Oxigênio, Nitrogênio, Cloro, Cinzas e Umidade), composição química imediata (teor percentual em base seca do Carbono Fixo e Voláteis), toxicidade no lixiviado do lodo (em mg/L), toxicidade na amostra bruta do lodo (em mg/kg), emissões gasosas e material particulado (em mg/Nm³) e poder calorífico (PCS e PCI) em MJ/kg.

A entrada de dados correspondente à composição química elementar, composição química imediata e poder calorífico podem ser feitas de maneira opcional, dependendo dos dados que o usuário tomador de decisão tenha disponível, conforme já apresentado no Quadro 6, e os parâmetros de emissões gasosas e material particulados devem ser medidos a partir de testes realizados em conformidade com o exigido pela Resolução 316/2002 (CONAMA) e ser corrigidos pelo teor de oxigênio, na mistura de gases de combustão, do ponto de descarga, para sete por cento em base seca.

Para o usuário tomador de decisão utilizar o sistema computacional desenvolvido para avaliar lodo de esgoto como biomassa na geração de energia em processos de combustão, o mesmo deve entrar na interface de usuário (Figura 18) e inserir os dados de entrada no sistema.

5.1. TESTE E VALIDAÇÃO UTILIZANDO O TRABALHO DE MACEDO (2006)

Neste teste e validação foram inseridos no sistema como dados de entrada, os mesmos valores encontrados e utilizados por Macedo (2006), constantes nas Tabelas 23 a 27, e comparados os resultados obtidos. Macedo (2006) utilizou amostra de lodo da estação de tratamento de efluentes originário da empresa Suzano Papel e Celulose, localizada em São Paulo, que é uma das maiores fabricantes integradas de celulose de eucalipto e papel do País.

Segundo Foelkel (2010), os lodos das fábricas de celulose e papel são basicamente constituídos em sua fase sólida de: fibras e fibrilas de material celulósico; cargas minerais da fabricação do papel; terra e areia que existem como contaminantes nas fábricas junto às toras de madeira, lavagens de pisos, etc.; floculantes utilizados no tratamento de águas e efluentes; teores de elementos minerais processuais e iônicos adsorvidos na matéria orgânica dos lodos ou presentes dissolvidos nos próprios efluentes que acompanham os lodos (cloretos, sílica, sódio, cálcio, sulfatos, carbonatos, etc.); organismos biologicamente ativos ou já mortos e presentes como materiais orgânicos residuais; micro-poluente orgânicos e minerais (metais pesados, dioxinas e furanos, etc.); frações oligoméricas de polímeros da madeira (lignina, carboidratos, extrativos, etc).

Tabela 23- Dados de entrada do trabalho de Macedo (2006): composição elementar

Dados de entrada: composição química elementar	
Teor de Carbono em base seca (%C)	13,39
Teor de Hidrogênio em base seca (%H)	2,14
Teor de Enxofre em base seca (%S)	0,05
Teor de Oxigênio em base seca (%O)	17,5
Teor de Cloro em base seca (%Cl)	0,005
Teor de Umidade em base seca (%W)	47,0
Teor de Cinzas em base seca (%A)	8,14
Teor de Nitrogênio em base seca (%N)	0,21

Fonte: Produção da autora

Tabela 24- Dados de entrada do trabalho de Macedo (2006): poder calorífico

Dados de entrada: composição química imediata	
Poder Calorífico Superior em MJ/kg (base seca) (PCS)	*PND
Poder Calorífico Inferior em MJ/kg (base seca) (PCI)	3,8

Fonte: Produção da autora

*PND=Parâmetro não determinado (este campo não vai ser preenchido no sistema pelo usuário)

Tabela 25- Dados de entrada do trabalho de Macedo (2006): toxicidade no lixiviado

Dados de entrada: toxicidade no lixiviado do lodo	
Quantidade de Arsênio no lixiviado (AsLx em mg/L)	0,499
Quantidade de Bário no lixiviado (BaLx em mg/L)	3,7
Quantidade de Cádmio no lixiviado (CdLx em mg/L)	0,019
Quantidade de Chumbo no lixiviado (PbLx em mg/L)	0,049
Quantidade de Cromo Total no lixiviado (CrLx em mg/L)	0,019
Quantidade de Fluoreto no lixiviado (FluoretoLx em mg/L)	0,5
Quantidade de Mercúrio no lixiviado (HgLx em mg/L)	0,01
Quantidade de Prata no lixiviado (PrataLx em mg/L)	0,01
Quantidade de Selênio no lixiviado (SeLx em mg/L)	0,499

Fonte: Produção da autora

Tabela 26- Dados de entrada do trabalho de Macedo (2006): toxicidade na amostra bruta

Dados de entrada: toxicidade na amostra bruta do lodo	
Quantidade de Arsênio na amostra bruta (As em mg/kg)	4,99
Quantidade de Berílio na amostra bruta (Be em mg/kg)	1,99
Quantidade de Chumbo na amostra bruta (Pb em mg/kg)	4,0
Quantidade de Cianeto na amostra bruta (CN em mg/kg)	0,099
Quantidade de Cromo VI na amostra bruta (Cr em mg/kg)	3,0
Quantidade de Índice de fenóis na amostra bruta (IFenóis em mg/kg)	0,999
Quantidade de Mercúrio na amostra bruta (Hg em mg/kg)	0,099
Quantidade de Selênio na amostra bruta (Se em mg/kg)	0,999
Quantidade de Vanádio na amostra bruta (Vanadio em mg/kg)	6,0

Fonte: Produção da autora

Tabela 27- Dados de entrada do trabalho de Macedo (2006): poluição atmosférica

Dados de entrada: poluição atmosférica (emissões gasosas e materiais particulados)	
Dióxido de Enxofre (SO ₂ em mg/Nm ³)	314,61
Cloreto de Hidrogênio (HCl em mg/Nm ³)	16,174
Dióxido de Nitrogênio (NO ₂ em mg/Nm ³)	1415,77
Monóxido de Carbono (CO em ppm/Nm ³)	PND*
Fluoreto de Hidrogênio (HF _l em mg/Nm ³)	0,149
Dioxinas e Furanos: dibenzo-p-dioxinas e dibenzo-p-furanos, expressos em TEQ (total de toxicidade equivalente) da 2,3,7,8 TCDD (tetracloro-dibenzo-para-dioxina) (DF em ng/Nm ³)	PND*
Material Particulado (MP em mg/Nm ³)	PND*
Material Particulado com agrupamento de cádmio (Cd), mercúrio (Hg),tálio (Tl) -	

(MPI em mg/Nm ³)	1,604
Material Particulado com agrupamento de arsênio (As),cobalto (Co), níquel (Ni), telúrio (Te), selênio (Se) – (MPII em mg/Nm ³)	3,775
Material Particulado com agrupamento de cobre (Cu), estanho (Sn), flúor (F), manganês (Mn), platina (Pt), paládio (Pd), ródio (Rh), vanádio (V) – (MPIII em mg/Nm ³)	6,733

Fonte: Produção da autora

*PND=Parâmetro não determinado (este campo não vai ser preenchido no sistema pelo usuário)

Para entrada de dados da análise elementar, imediata e poder calorífico foi escolhida a Opção 2 do Quadro 6 (análise química elementar em base seca: %H, %W, %S, %C, %O, %A) em função das disponibilidades de dados deste trabalho. Observa-se ainda que, apesar de disponível o valor do PCI, este não será fornecido como dado de entrada para que seja possível validar as fórmulas utilizadas no sistema para cálculo destes parâmetros.

Macedo (2006) concluiu em seu trabalho que, o lodo amostrado possui poder calorífico muito baixo (3,8 MJ/kg) em função do alto teor de umidade, mas que sua utilização na caldeira de biomassa da empresa, se justificaria pela grande contribuição econômica com a introdução deste material no lugar dos combustíveis fósseis e evitando encaminhá-los para aterros sanitários, considerando que este lodo é um subproduto do próprio parque fabril e sua logística é simples, necessitando apenas de transporte da estação de tratamento de efluentes até o pátio de estocagem de biomassa da caldeira, isto tudo ocorrendo na própria fábrica.

Para viabilizar sua utilização na caldeira de biomassa, sob o ponto de vista técnico, Macedo (2006) concluiu, após vários testes, que a melhor opção seria a queima de 50% deste lodo, juntamente com uma queima suplementar de 1.500 kg/h de óleo combustível, e mantendo como combustível principal, cavacos de eucaliptos. Concluiu ainda que as emissões de SO₂ e NO₂ estavam acima dos padrões estipulados pelas normas brasileiras, sendo necessária, para a operação da caldeira, a instalação de equipamentos que reduzissem a quantidade de SO₂ emitido nos de gases de exaustão, ou como no processo de obtenção de celulose se utiliza carbonato de cálcio, poderia ser misturado este produto com o resíduo, sendo alimentado diretamente na grelha da caldeira. Quanto à toxicidade na amostra bruta e no lixiviado, este autor afirmou que estão dentro dos padrões normativos.

O sistema computacional, por sua vez, gerou relatório de resultados com as seguintes conclusões e explicações resultantes (Apêndice C):

- Valor do Poder Calorífico Inferior do lodo avaliado = 3,6 MJ/kg

Lodo com poder calorífico muito baixo!

- Lodo Classe IV: Não apresenta potencial para gerar energia em processos de combustão.
- Energia bruta prevista = 1,008 kWh/kg de lodo
- Receita bruta prevista com a venda da energia gerada a partir do lodo para distribuidoras de energia elétrica = R\$ 144,20 / MWh ou R\$ 0,14 / kWh
- Limite máximo de Dióxido de Enxofre (SO₂) ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Dióxido de Enxofre forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.
- Limite máximo de Dióxido de Nitrogênio (NO₂) ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Dióxido de Nitrogênio (NO₂) forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.
- Quantidade de Monóxido de Carbono (CO) não informada! Limite de CO não avaliado!
- Quantidade de Dioxinas e Furanos não informada! Limite de Dioxinas e Furanos não avaliado!
- Quantidade de Material Particulado não informada! Limite de MP não avaliado!
- Limite máximo de Material Particulado com agrupamento de cádmio (Cd), mercúrio (Hg), tálio (Tl) ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Material Particulado forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.
- Limite máximo de Material Particulado com agrupamento de arsênio (As), cobalto (Co), níquel (Ni), telúrio (Te), selênio (Se) ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Material Particulado forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.
- Emissões de Fluoreto de Hidrogênio (HF), Cloreto de Hidrogênio (HCl) e Materiais Particulados com agrupamento de cobre (Cu), estanho (Sn), flúor (F), manganês (Mn),

platina (Pt), paládio (Pd), ródio (Rh), vanádio (V) estão de acordo com os limites estabelecidos na Resolução nº 316/2002 do CONAMA.

– Quantidades de Arsênio (As), Bário (Ba), Cádmió (Cd), Chumbo (Pb), Fluoreto, Mercúrio (Hg), Prata, Selênio (Se) e Cromo (Cr), no lixiviado do lodo, estão de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/04 da ABNT.

– Quantidades de Arsênio (As), Chumbo (Pb), Berílio (Be), Cianeto (CN), Índice de Fenóis, Mercúrio (Hg), Selênio (Se), Vanádio (V) e Cromo VI (Cr), na amostra bruta do lodo, estão de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/87 da ABNT.

Comparando os resultados do sistema computacional com os de Macedo (2006), observa-se que os poderes caloríficos inferiores apresentaram diferença de aproximadamente 5% em função de que um foi obtido a partir do PCS calculado analiticamente pelo sistema computacional e o outro ser calculado experimentalmente.

Verifica-se ainda que as conclusões do sistema computacional e de Macedo (2006) são compatíveis, tendo em vista as análises sob o ponto de vista técnico, ambiental e normativo. Ambos concluíram que o lodo possui potencial energético muito baixo, que a toxicidade na amostra bruta e no lixiviado do lodo estão dentro dos padrões normativos e que as emissões de SO₂ e NO₂ estão acima dos padrões estipulados pelas normas brasileiras sendo necessárias medidas para diminuição desses valores. O sistema computacional coloca ainda no relatório de resultados que, as quantidades de materiais particulados MP I e MP II emitidos na queima estão acima dos limites estipulados pela norma brasileira e que precisam ser tomadas medidas para atenuar esses valores.

Considerando a importância econômica da empresa de papel e celulose utilizar esse lodo, conforme citado pelo autor do trabalho, foram feitas várias simulações no sistema diminuindo o valor da umidade do lodo e verificou-se que, se a empresa conseguisse reduzir o teor de umidade do lodo para 30% o potencial energético do lodo aumentaria para 4,015 MJ/kg, passando da Classe IV (não apresenta potencial) para a Classe III (apresenta baixo potencial para gerar energia em processos de combustão). Abaixo apresenta-se parte do relatório emitido pelo sistema para esta nova situação.

- Valor do poder calorífico inferior do lodo avaliado é de 4,015 MJ/kg.
- Lodo Classe III: Apresenta baixo potencial para gerar energia em processos de combustão.
- Aplicações:
 - Aplicações Recomendadas: Co-processamento em geral, exceto em fornos de clínquer para fabricação de cimento, respeitadas as condições abaixo:

1. Teor de cinzas do lodo abaixo de 50%.

Caso o teor de cinzas seja maior que 50%, só é recomendável a queima do lodo quando a empresa for obrigada pelo legislador/controlador ambiental, ou quando quiser eliminar o lodo para evitar aterrá-lo. Caso contrário,   tecnicamente desaconselhado em fun o dos problemas de incrusta es em equipamentos.

2. Baixo conteúdo de óxidos básicos de fósforo e óxidos de ferro na composi o das cinzas do lodo.

Caso o lodo apresente elevado conteúdo de óxidos básicos de fósforo e óxidos de ferro na composi o de suas cinzas, s    recomendável sua utiliza o para co-processamentos e em propor es não superiores a 15%. Caso contrário,   tecnicamente desaconselhado em fun o da forte tendência   forma o de depósitos e incrusta o nos equipamentos.

- Aplica es Não-Recomendadas: Co-processamento em fornos de clínquer para fabrica o de cimento e como combustível principal, em centrais   biomassa para gera o de energia elétrica, caldeiras, geradores de vapor, fornos, fornalhas, estufas, secadores para gera o e uso de energia térmica, gaseificadores, e para uso doméstico.

- Energia bruta prevista = 1,124 kWh/kg de lodo
- Receita bruta prevista com a venda da energia gerada a partir do lodo para distribuidoras de energia elétrica = R\$ 144,20 / MWh ou R\$ 0,14 / kWh

Em seguida, continuou-se a simular a redu o da umidade até chegar em 5% e observou-se que, o correspondente potencial energético do lodo foi de 4,625 MJ/kg, o que demonstra que, o lodo com esta composi o elementar apresentada não passará para a Classe III mesmo com um menor teor de umidade possível.

Nas Tabelas 28 a 31 apresentam-se os resumos comparativos dos resultados das avalia es obtidos por Macedo (2006) e pelo sistema computacional desenvolvido.

Tabela 28- Resumo comparativo dos resultados da avalia o do potencial energético obtidos por Macedo (2006) e pelo sistema computacional.

TRABALHO	OP�O DA ENTRADA DE DADOS	PCI MACEDO (2006)	PCI SISTEMA COMPUTACIONAL	DIFERENÇA PERCENTUAL
Macedo (2006) Lodo da indústria de papel e celulose	%C, %H, %S, %O, %N, %W, %A em b.s. (Op�o 2)	3,80 MJ/kg (% W=47%)	3,6 MJ/kg (% W=47%) LODO CLASSE IV 4,015 MJ/kg (% W=30%) 4,625 MJ/kg (% W= 5%)	5%

Fonte: Produ o da autora

Tabela 29- Resumo comparativo dos resultados da avaliação de corrosão e incrustações em equipamentos obtidos por Macedo (2006) e pelo sistema computacional.

TRABALHO	ENTRADA DE DADOS	CONCLUSÕES DE MACEDO (2006)	CONCLUSÕES DO SISTEMA COMPUTACIONAL
Macedo (2006) Lodo da indústria de papel e celulose	%Cl em b.s.= 0,005 % %A em b.s = 8,14 %	-Problema de corrosão não comentado. -Problema de incrustações não comentado.	-O sistema não emitiu nenhuma mensagem de alerta, pois não são esperados problemas de corrosão. -O sistema não emitiu nenhuma mensagem de alerta, pois não são esperados problemas de incrustações.

Fonte: Produção da autora

Tabela 30- Resumo comparativo dos resultados da avaliação de toxicidade obtidos por Macedo (2006) e pelo sistema computacional.

TRABALHO	ENTRADA DE DADOS	CONCLUSÕES DE MACEDO (2006)	CONCLUSÕES DO SISTEMA COMPUTACIONAL
Macedo (2006) Lodo da indústria de papel e celulose	AsLx= 0,499 mg/L BaLx= 3,7 mg/L CdLx= 0,019 mg/L PbLx= 0,049 mg/L CrLx= 0,019 mg/L FluoretoLx=0,5 mg/L HgLx= 0,01 mg/L PrataLx= 0,01 mg/L SeLx= 0,499 mg/L As= 4,99 mg/kg Be= 1,99 mg/kg Pb= 4,0 mg/kg CN= 0,099 mg/kg Cr= 3,0 mg/kg IFenois= 0,999 mg/kg Hg= 0,099 mg/kg Se= 0,999 mg/kg V= 6,0 mg/kg	-Valores de metais pesados no lixiviado do lodo de acordo com os padrões normativos. -Valores de metais pesados na amostra bruta do lodo de acordo com os padrões normativos.	-Valores de metais pesados no lixiviado do lodo estão de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/04 da ABNT. -Valores de metais pesados na amostra bruta do lodo estão de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/87 da ABNT.

Fonte: Produção da autora

Tabela 31- Resumo comparativo dos resultados da avaliação da poluição atmosférica obtidos por Macedo (2006) e pelo sistema computacional.

TRABALHO	ENTRADA DE DADOS	CONCLUSÕES DE MACEDO (2006)	CONCLUSÕES DO SISTEMA COMPUTACIONAL
Macedo (2006) Lodo da indústria de papel e celulose	SO ₂ = 314,61mg/Nm ³ HCl=16,174 mg/Nm ³ NO ₂ =1415,77 mg/Nm ³ CO=PND HFI=0,149 mg/Nm ³ DF=PND MP=PND MPI=1,604 mg/Nm ³ MPII=3,775 mg/Nm ³ MPIII=6,733 mg/Nm ³	- SO ₂ e NO ₂ acima dos padrões estipulados pela norma brasileira.	- SO ₂ , NO ₂ , MPI e MPII acima dos padrões estipulados pela Resolução nº 316/2002 do CONAMA. - HFI, HCl, MPIII estão de acordo com os limites estabelecidos pela Resolução nº 316/2002 do CONAMA. - CO, DF e MP não informados. Limites não avaliados.

Constatou-se ainda que, os limites adotados no sistema foram adequados como parâmetros para avaliar o potencial energético do lodo amostrado, a toxicidade e a poluição atmosférica; que as mensagens de alerta e explicativas foram claramente emitidas; os resultados das fórmulas foram calculados com exatidão; e o encadeamento lógico das regras foi executado progressivamente de forma correta, demonstrando o funcionamento do motor lógico do sistema, o que é ratificado pelo relatório de lógica emitido (Apêndice C).

5.2. TESTE E VALIDAÇÃO UTILIZANDO O TRABALHO DE BORGES (2008)

Neste teste e validação foram inseridos no sistema como dados de entrada, os mesmos valores encontrados e utilizados por Borges (2008), constantes nas Tabelas 32 a 35, e comparados os resultados obtidos. Neste estudo, Borges (2008) utilizou amostra de lodo doméstico das estações de tratamento de efluentes originário da SAMAE – Agência Municipal de Água e Esgoto de São Bento do Sul- SBS, Santa Catarina.

Tabela 32- Dados de entrada do trabalho de Borges (2008): composição elementar.

Dados de entrada: composição química elementar	
Teor de Carbono em base seca (%C)	27,5
Teor de Hidrogênio em base seca (%H)	4,32
Teor de Enxofre em base seca (%S)	0,86
Teor de Oxigênio em base seca (%O)	*PND
Teor de Cloro em base seca (%Cl)	*PND
Teor de Umidade em base seca (%W)	9,05
Teor de Cinzas em base seca (%A)	47,6
Teor de Nitrogênio em base seca (%N)	4,4

Fonte: Produção da autora

*PND=Parâmetro não determinado (este campo não vai ser preenchido no sistema pelo usuário)

Tabela 33- Dados de entrada do trabalho de Borges (2008): composição imediata.

Dados de entrada: composição química imediata	
Teor de Carbono fixo em base seca (%F)	36,8
Teor de Voláteis em base seca (%V)	43,3

Fonte: Produção da autora

Tabela 34- Dados de entrada do trabalho de Borges (2008): poder calorífico.

Dados de entrada: poder calorífico	
Poder Calorífico Superior em MJ/kg (base seca) (PCS)	20,1
Poder Calorífico Inferior em MJ/kg (base seca) (PCI)	18,6

Fonte: Produção da autora

Tabela 35- Dados de entrada do trabalho de Borges (2008): poluição atmosférica.

Dados de entrada: poluição atmosférica (emissões gasosas e materiais particulados)	
Dióxido de Enxofre (SO ₂ em mg/Nm ³)	*PND
Cloreto de Hidrogênio (HCl em mg/Nm ³)	*PND
Dióxido de Nitrogênio (NO ₂ em mg/Nm ³)	*PND
Monóxido de Carbono (CO em ppm/Nm ³)	216,67
Fluoreto de Hidrogênio (HF em mg/Nm ³)	*PND
Dioxinas e Furanos: dibenzo-p-dioxinas e dibenzo-p-furanos, expressos em TEQ (total de toxicidade equivalente) da 2,3,7,8 TCDD (tetracloro-dibenzo-para-dioxina) (DF em ng/Nm ³)	*PND
Material Particulado (MP em mg/Nm ³)	*PND
Material Particulado com agrupamento de cádmio (Cd), mercúrio (Hg),tálio (Tl) - (MPI em mg/Nm ³)	*PND
Material Particulado com agrupamento de arsênio (As),cobalto (Co), níquel (Ni), telúrio (Te), selênio (Se) – (MPII em mg/Nm ³)	*PND
Material Particulado com agrupamento de cobre (Cu), estanho (Sn), flúor (F), manganês (Mn), platina (Pt), paládio (Pd), ródio (Rh), vanádio (V) – (MPIII em mg/Nm ³)	*PND

Fonte: Produção da autora

*PND=Parâmetro não determinado (este campo não vai ser preenchido no sistema pelo usuário)

Para entrada de dados da análise elementar, imediata e poder calorífico foi escolhida a Opção 1, do Quadro 6 (Análise química imediata em base seca: %F, %V, %W e Análise química elementar em base seca: %H e %A) em função das disponibilidades de dados deste trabalho. Observa-se ainda que, apesar de disponíveis os valores do PCS e PCI, estes não serão fornecidos como dados de entrada para que seja possível validar as fórmulas utilizadas no sistema para cálculo destes parâmetros. Quanto aos dados de toxicidade não foram apresentados por Borges (2008) e, portanto, não avaliados pelo sistema computacional.

Borges (2008) concluiu em seu trabalho que o lodo amostrado, com poder calorífico inferior de $18,6 \pm 0,6$ MJ/kg, apresentou um desempenho muito bom em liberação de energia ao se comparar com outras biomassas utilizadas na geração de energia, tal como madeira de descarte (PCS = 13 MJ/kg) e bagaço de cana em briquete (PCS = 14,5 MJ/kg) (ARAUTERM, 2008 *apud* BORGES, 2008). O resultado encontrado está também, em média, dentro da faixa obtida para resíduos industriais genéricos (16,0 MJ/kg), resíduos hospitalares (14,0 MJ/kg) e refugos variados (18,5 MJ/kg), e acima dos valores previstos para lodo seco de efluentes (12,5 – 15,0 MJ/kg), conforme citado por Almeida (2007). Portanto, os resultados do poder calorífico apresentados pelo lodo estudado são um indicativo de viabilidade de uso como biomassa combustível.

O autor do trabalho colocou ainda que, considerando a baixa concentração dos elementos nitrogênio e enxofre, apresentada pelo material analisado, previa-se que as emissões gasosas geradas apresentariam baixo teor dos poluentes NO₂ e SO₂, fato confirmado pelos resultados alcançados com a queima desse lodo (o autor não citou os valores encontrados). Já em relação ao CO, este apresentou tendência de extrapolar os limites máximos estabelecidos pela Resolução CONAMA N° 382/2006, que regulamenta esse assunto. No entanto, Borges (2008) coloca que, devido à necessidade de maior controle das condições operacionais da combustão conduzida no estudo, estes resultados servem apenas como um indicativo qualitativo preliminar das emissões geradas.

Finalmente, o autor sugere que, devido à dificuldade de controle das condições operacionais, o trabalho seja continuado com maior ênfase à infra-estrutura necessária para condução da combustão com controle das principais condições operacionais, além da inclusão da medição de material particulado e vapor d'água nos gases gerados.

O sistema computacional, por sua vez, gerou relatório com as seguintes conclusões e explicações resultantes (Apêndice C):

- Valor do poder calorífico do lodo avaliado = 18,222 MJ/Kg de lodo
- Lodo Classe I: Apresenta alto potencial para gerar energia em processos de combustão.
- Aplicações Recomendadas: Fornos de cimento, caldeiras, geradores de vapor, fornos, fornalhas, estufas e secadores para a geração e uso de energia térmica, gaseificadores e centrais à biomassa para a geração de energia elétrica, respeitadas as condições abaixo:

1. Teor de cinzas do lodo abaixo de 50%.

Caso o teor de cinzas seja maior que 50%, só é recomendável a queima do lodo quando a empresa for obrigada pelo legislador/controlador ambiental, ou quando quiser eliminar o lodo para evitar aterrá-lo. Caso contrário,   tecnicamente desaconselhado em fun o dos problemas de incrusta es em equipamentos.

2. Baixo cont duo de óxidos básicos de fósforo e óxidos de ferro na composi o das cinzas do lodo.

Caso o lodo apresente elevado cont duo de óxidos básicos de fósforo e óxidos de ferro na composi o de suas cinzas, s    recomendável sua utiliza o para co-processamentos e em propor es não superiores a 15%. Caso contrário,   tecnicamente desaconselhado em fun o da forte tendência   forma o de depósitos e incrusta o nos equipamentos.

- Energia Bruta Prevista = 5,102 kWh/kg de lodo
- Receita bruta prevista com a venda da energia gerada a partir do lodo para distribuidoras de energia elétrica = R\$ 144,20 / MWh ou R\$ 0,14 / kWh
- Teor de Cloro não será avaliado! Para teor de cloro acima de 0,1% corrosão induzida e problemas de emissão de HCl podem ser esperados.
- Teor de Cinzas acima de 30%! Problemas de incrusta es em equipamentos podem ser esperados.
- Teor de Enxofre acima de 0,2%! Problemas de emissão de Dióxido de Enxofre (SO₂) podem ser esperados!
- Limite máximo de Monóxido de Carbono (CO) ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redu o de Monóxido de Carbono forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos   popula o e/ou ao meio ambiente.
- Quantidade de Dióxido de Nitrogênio (NO₂) não informada! Limite de Dióxido de Nitrogênio não avaliado!
- Quantidade de Fluoreto de Hidrogênio (HF) não informada! Limite de Fluoreto de Hidrogênio (HF) não avaliado!
- Quantidade de Dioxinas e Furanos não informada! Limite de Dioxinas e Furanos não avaliado!
- Quantidade de Material Particulado não informada! Limite de Material Particulado não avaliado!

- Quantidade de Material Particulado com agrupamento de cádmio (Cd), mercúrio (Hg), tálio (Tl) não informada! Limite de Material Particulado com agrupamento de cádmio (Cd), mercúrio (Hg), tálio (Tl) não avaliado!
- Teor de Cloro (%Cl) e/ou quantidade de Cloreto de Hidrogênio (HCl) não informado(s)! Limite de Cloreto de Hidrogênio não avaliado!
- Quantidade de Material Particulado com agrupamento de arsênio (As), cobalto (Co), níquel (Ni), telúrio (Te), selênio (Se) (MPII) não informada! Limite de Material Particulado com agrupamento de arsênio (As), cobalto (Co), níquel (Ni), telúrio (Te), selênio (Se) não avaliado!
- Quantidade de Material Particulado com agrupamento de cobre (Cu), estanho (Sn), flúor (F), manganês (Mn), platina (Pt), paládio (Pd), ródio (Rh), vanádio (V) não informada! Limite não avaliado!
- Não foi realizado ensaio Lixiviação de Resíduos no lodo! Não é possível realizar a avaliação da toxicidade (metais pesados) do lodo com base no ensaio de lixiviação conforme recomendado pela NBR 10004/04 (ABNT, 2004).
- Não foram quantificados metais pesados na amostra bruta do lodo! Não será possível realizar a avaliação da toxicidade (metais pesados) do lodo na amostra bruta conforme recomendado pela NBR 10004/87 (ABNT, 1987).

Comparando os resultados do sistema computacional com os de Borges (2008), observa-se que as conclusões de ambos são compatíveis, com exceção do teor de SO₂.

No sistema computacional é considerado, em função das pesquisas desenvolvidas, que para lodo com teor de enxofre acima de 0,2% é esperado problemas de emissão de Dióxido de Enxofre (SO₂), enquanto que Borges (2008) considera que o teor de enxofre de 0,86%, encontrado no lodo amostrado em seu trabalho, é baixo e prevê que isso não trará problemas de emissões de SO₂. O recomendável seria repetir o ensaio de queima do lodo que não constatou emissões de SO₂ acima do estabelecido por norma, a partir de um melhor controle das condições operacionais, como o próprio autor coloca, a fim de ter-se um parecer final mais seguro.

Quanto aos poderes caloríficos inferiores, estes apresentaram diferença de aproximadamente 2%, e tanto o sistema quanto Borges (2008) concluíram que o lodo possui alto potencial para gerar energia em processos de combustão, atentando para a necessidade de diminuir as emissões de CO.

O sistema também emitiu uma mensagem de alerta em relação ao alto teor de cinzas que podem vir a causar problemas de incrustações nos equipamentos.

Nas Tabelas 36 a 38 apresentam-se os resumos comparativos dos resultados das avaliações obtidos por Borges (2008) e pelo sistema computacional desenvolvido.

Tabela 36- Resumo comparativo dos resultados da avaliação do potencial energético obtidos por Borges (2008) e pelo sistema computacional.

TRABALHO	OPÇÃO DA ENTRADA DE DADOS	PCI BORGES (2008)	PCI SISTEMA COMPUTACIONAL	DIFERENÇA PERCENTUAL
Borges (2008) Lodo doméstico	%F, %V, %A, %H, %W em b.s. (Opção 1)	18,60 MJ/kg	18,222 MJ/kg LODO CLASSE I	2%

Fonte: Produção da autora

Tabela 37- Resumo comparativo dos resultados da avaliação de corrosão e incrustações em equipamentos obtidos por Borges (2008) e pelo sistema computacional.

TRABALHO	ENTRADA DE DADOS	CONCLUSÕES DE BORGES (2008)	CONCLUSÕES DO SISTEMA COMPUTACIONAL
Borges (2008) Lodo doméstico	%Cl em b.s.= PND %A em b.s = 47,6 %	-Problemas de corrosão e incrustações não comentados.	-Teor de Cloro não avaliado! Para Teor de Cloro acima de 0,1% corrosão induzida e problemas de emissão de HCl podem ser esperados. -Teor de Cinzas acima de 30%! Problemas de incrustações em equipamentos podem ser esperados.

Fonte: Produção da autora

Tabela 38- Resumo comparativo dos resultados da avaliação da poluição atmosférica obtidos por Borges (2008) e pelo sistema computacional.

TRABALHO	ENTRADA DE DADOS	CONCLUSÕES DE BORGES (2008)	CONCLUSÕES DO SISTEMA COMPUTACIONAL
Borges (2008) Lodo doméstico	SO ₂ = PND HCl= PND NO ₂ = PND CO=216,67ppm/Nm ³ HfI= PND DF= PND MP= PND MPI= PND MPII= PND MPIII= PND	-Baixo teor de poluentes SO ₂ e NO ₂ . -CO acima dos padrões estipulados pela Resolução n° 316/2002 do CONAMA.	- Teor de Enxofre acima de 0,2%! Problemas de emissão de Dióxido de Enxofre (SO ₂) podem ser esperados! -Limite máximo de Monóxido de Carbono (CO) acima dos padrões estipulados pela Resolução n° 316/2002 do CONAMA. - HCl, NO ₂ , HfI, DF, MP, MPI, MPII e MPIII não informados. Limites não avaliados.

Fonte: Produção da autora

Constatou-se ainda que, os limites adotados no sistema foram adequados como parâmetros para avaliar o potencial energético do lodo amostrado e a poluição atmosférica; que as mensagens de alerta e explicativas foram claramente emitidas; os resultados das fórmulas foram calculados com exatidão; e o encadeamento lógico das regras foi executado progressivamente de forma correta, demonstrando o funcionamento do motor lógico do sistema, o que é ratificado pelo relatório de lógica emitido pelo sistema (Apêndice C).

5.3. TESTE E VALIDAÇÃO UTILIZANDO O TRABALHO DE MORAES (2006)

Neste teste e validação foram inseridos no sistema como dados de entrada, os mesmos valores encontrados e utilizados por Moraes (2006) constantes nas Tabelas 39 a 42, e comparados os resultados obtidos. Neste estudo, Moraes (2006) utilizou amostra de lodo coletada na Estação de Tratamento de Esgoto da cidade de Barueri (ETE Barueri), região metropolitana de São Paulo.

Tabela 39- Dados de entrada do trabalho de Moraes (2006): composição elementar.

Dados de entrada: composição química elementar	
Teor de Carbono em base seca (%C)	30,2
Teor de Hidrogênio em base seca (%H)	3,65
Teor de Enxofre em base seca (%S)	0,041
Teor de Oxigênio em base seca (%O)	*PND
Teor de Cloro em base seca (%Cl)	*PND
Teor de Umidade em base seca (%W)	16,5
Teor de Cinzas em base seca (%A)	*PND
Teor de Nitrogênio em base seca (%N)	4,57

Fonte: Produção da autora

*PND=Parâmetro não determinado (este campo não vai ser preenchido no sistema pelo usuário)

Tabela 40- Dados de entrada do trabalho de Moraes (2006): poder calorífico.

Dados de entrada: poder calorífico	
Poder Calorífico Superior em MJ/kg (base seca) (PCS)	17,70
Poder Calorífico Inferior em MJ/kg (base seca) (PCI)	16,99

Fonte: Produção da autora

Tabela 41- Dados de entrada do trabalho de Moraes (2006): toxicidade no lixiviado.

Dados de entrada: toxicidade no lixiviado do lodo	
Quantidade de Arsênio no lixiviado (AsLx em mg/L)	*PND
Quantidade de Bário no lixiviado (BaLx em mg/L)	1,43**
Quantidade de Cádmio no lixiviado (CdLx em mg/L)	*PND
Quantidade de Chumbo no lixiviado (PbLx em mg/L)	0,08**
Quantidade de Cromo Total no lixiviado (CrLx em mg/L)	0,09
Quantidade de Fluoreto no lixiviado (FluoretoLx em mg/L)	0,09**
Quantidade de Mercúrio no lixiviado (HgLx em mg/L)	*PND
Quantidade de Prata no lixiviado (PrataLx em mg/L)	*PND
Quantidade de Selênio no lixiviado (SeLx em mg/L)	*PND

Fonte: Produção da autora

*PND=Parâmetro não determinado (este campo não vai ser preenchido no sistema pelo usuário)

**Parâmetros obtidos do trabalho de Santos (2003) que também utilizou amostras de lodo da ETE Barueri.

Tabela 42- Dados de entrada do trabalho de Moraes (2006): toxicidade na amostra bruta.

Dados de entrada: toxicidade na amostra bruta do lodo	
Quantidade de Arsênio na amostra bruta (As em mg/kg)	*PND
Quantidade de Berílio na amostra bruta (Be em mg/kg)	*PND
Quantidade de Chumbo na amostra bruta (Pb em mg/kg)	109
Quantidade de Cianeto na amostra bruta (CN em mg/kg)	*PND
Quantidade de Cromo VI na amostra bruta (Cr em mg/kg)	927
Quantidade de Índice de fenóis na amostra bruta (IFenóis em mg/kg)	4,7**
Quantidade de Mercúrio na amostra bruta (Hg em mg/kg)	*PND
Quantidade de Selênio na amostra bruta (Se em mg/kg)	*PND
Quantidade de Vanádio na amostra bruta (Vanadio em mg/kg)	44,3**

Fonte: Produção da autora

*PND=Parâmetro não determinado (este campo não vai ser preenchido no sistema pelo usuário)

**Parâmetros obtidos do trabalho de Santos (2003) que também utilizou amostras de lodo da ETE Barueri.

Para entrada de dados da análise elementar, imediata e poder calorífico foi escolhida a Opção 3, do Quadro 6 (PCS obtido em laboratório e análise química elementar: %H, %W) em função das disponibilidades de dados deste trabalho. Observa-se ainda que, apesar de disponível o valor do PCI, este não será fornecido como dado de entrada para que seja possível validar a fórmula utilizada no sistema para cálculo deste parâmetro. Quanto aos dados de poluição atmosférica não foram apresentados por Borges (2008) e, portanto, não avaliados pelo sistema computacional, que apenas enviou mensagem de alerta levando em consideração o teor de enxofre fornecido.

Moraes (2006) concluiu em seu trabalho que o lodo amostrado possuía um poder calorífico inferior de valor expressivo (16,99 MJ/kg) se mostrando viável para ser utilizado

como fonte renovável de energia. Ele considerou ainda que o teor de cromo no material fica incorporado às cinzas, mas para sua reutilização como carga em material cerâmico, por exemplo, o tratamento térmico aplicado visando à sinterização mostra-se efetivo para estabilização desse metal pesado contido no lodo.

O sistema computacional, por sua vez, gerou relatório com as seguintes conclusões e explicações resultantes (Apêndice C):

- Valor do poder calorífico do lodo avaliado = 16,496 MJ/kg
- Lodo Classe II: Apresenta médio potencial para gerar energia em processos de combustão.
- Aplicações:
- Aplicações Recomendadas: Caldeiras, geradores de vapor, fornos, fornalhas, estufas e secadores para a geração e uso de energia térmica, gaseificadores, centrais à biomassa para a geração de energia elétrica, uso doméstico e co-processamento em geral, inclusive co-processamento em fornos rotativos de clínquer para a fabricação de cimento, respeitadas as condições abaixo:

1. Teor de cinzas do lodo abaixo de 50%.

Caso o teor de cinzas seja maior que 50%, só é recomendável a queima do lodo quando a empresa for obrigada pelo legislador/controlador ambiental, ou quando quiser eliminar o lodo para evitar aterrá-lo. Caso contrário, é tecnicamente desaconselhado em função dos problemas de incrustações em equipamentos.

2. Baixo conteúdo de óxidos básicos de fósforo e óxidos de ferro na composição das cinzas do lodo.

Caso o lodo apresente elevado conteúdo de óxidos básicos de fósforo e óxidos de ferro na composição de suas cinzas, só é recomendável sua utilização para co-processamentos e em proporções não superiores a 15%. Caso contrário, é tecnicamente desaconselhado em função da forte tendência à formação de depósitos e incrustação nos equipamentos.

Aplicações Não-Recomendadas: Fornos de cimento como combustível principal.

- Energia Bruta Prevista = 4,619 kWh/kg de lodo
- Receita bruta prevista com a venda da energia gerada a partir do lodo para distribuidoras de energia elétrica = R\$ 144,20 / MWh ou R\$ 0,14 / kWh
- Teor de Cloro não será avaliado! Para Teor de Cloro acima de 0,1% corrosão induzida e problemas de emissão de HCl podem ser esperados.

- Teor de cinzas não é avaliado! Para Teor de Cinzas acima de 30% baixa energia térmica e problemas de incrustações em equipamentos podem ser esperados.
- Teor de enxofre abaixo de 0,2%! Não são esperados problemas de emissões de SO₂.
- Quantidade de Arsênio, Cádmio, Mercúrio, Prata e Selênio no lixiviado do lodo não informada! Limite desses metais no lixiviado do lodo não avaliado.
- Quantidade de Bário (Ba), Chumbo (Pb), Fluoreto e Cromo (Cr) no lixiviado do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/04 (ABNT, 2004).
- Quantidade de Arsênio, Belírio, Cianeto, Mercúrio e Selênio na amostra bruta do lodo não informada! Limite desses metais na amostra bruta do lodo não avaliado.
- Quantidade de Chumbo (Pb) , Índice de Fenóis e Vanádio (V) na amostra bruta do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/87 (ABNT, 1987).
- Limite máximo de Cromo VI na amostra bruta do lodo ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Cromo VI forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.
- Não foram realizados ensaios e/ou cálculos de emissões gasosas e materiais particulados! Não é possível realizar a avaliação da Poluição Atmosférica conforme recomendado pela Resolução 316/2002 (CONAMA).

Comparando os resultados do sistema computacional com os de Moraes (2006), observa-se que as conclusões de ambos são compatíveis. Os poderes caloríficos inferiores apresentaram diferença de aproximadamente 3%, e tanto o sistema quanto Moraes (2006) concluíram que é viável a utilização do lodo amostrado para gerar energia em processos de combustão, atentando para o fato que o limite máximo de cromo na amostra bruta do lodo está acima do estabelecido pela norma brasileira.

Nas Tabelas 43 a 46 apresentam-se os resumos comparativos dos resultados das avaliações obtidos por Moraes (2006) e pelo sistema computacional desenvolvido.

Tabela 43- Resumo comparativo dos resultados da avaliação do potencial energético obtidos por Moraes (2006) e pelo sistema computacional.

TRABALHO	Opção da entrada de dados	PCI MORAES (2006)	PCI SISTEMA COMPUTACIONAL	DIFERENÇA PERCENTUAL
Moraes (2006) Lodo doméstico	PCS, %H, %W em b.s. (Opção 3)	16,99 MJ/kg	16,496 MJ/kg LODO CLASSE II	3%

Fonte: Produção da autora

Tabela 44- Resumo comparativo dos resultados da avaliação de corrosão e incrustações em equipamentos obtidos por Moraes (2006) e pelo sistema computacional.

TRABALHO	ENTRADA DE DADOS	CONCLUSÕES DE MORAES (2006)	CONCLUSÕES DO SISTEMA COMPUTACIONAL
Moraes (2006) Lodo doméstico	%Cl em b.s.= PND %A em b.s.= PND	-Problemas de corrosão de incrustações não comentados.	-Teor de Cloro não avaliado! Para Teor de Cloro acima de 0,1% corrosão induzida e problemas de emissão de HCl podem ser esperados. -Teor de cinzas não avaliado! Para Teor de Cinzas acima de 30% problemas de incrustações em equipamentos podem ser esperados.

Fonte: Produção da autora

Tabela 45- Resumo comparativo dos resultados da avaliação de toxicidade obtidos por Moraes (2006) e pelo sistema computacional.

TRABALHO	ENTRADA DE DADOS	CONCLUSÕES DE MORAES (2006)	CONCLUSÕES DO SISTEMA COMPUTACIONAL
Moraes (2006) Lodo doméstico	AsLx= PND BaLx= 1,43 mg/L CdLx= PND PbLx= 0,08 mg/L CrLx= 0,09 mg/L FluoretoLx= 0,09 mg/L HgLx= PND PrataLx= PND SeLx= PND As= PND Be= PND Pb= 109 mg/kg CN= PND Cr= 927 mg/kg IFenois= 4,7 mg/kg Hg= PND Se= PND V= 44,3 mg/kg	-Avaliação não realizada. - Cr acima dos padrões estipulados pela norma brasileira.	- Quantidade Ba, Pb, Fluoreto e Cr no lixiviado do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/04. -Quantidade de As, Cd, Hg, Prata e Se no lixiviado do lodo não informada. Limite desses metais no lixiviado do lodo não avaliado. - Cr na amostra bruta acima dos padrões estabelecidos pela NBR 10004/87. - Quantidade de Pb, IFenois e V na amostra bruta do lodo de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/87. - Quantidade de As, Be, CN, Hg e Se na amostra bruta do lodo não informada. Limite desses metais na amostra bruta do lodo não avaliado.

Fonte: Produção da autora

Tabela 46- Resumo comparativo dos resultados da avaliação da poluição atmosférica obtidos por Moraes (2006) e pelo sistema computacional.

TRABALHO	ENTRADA DE DADOS	CONCLUSÕES DE MORAES (2006)	CONCLUSÕES DO SISTEMA COMPUTACIONAL
Moraes (2006) Lodo doméstico	-Não foram realizados ensaios e/ou cálculos de emissões gasosas e materiais particulados.	-Avaliação não realizada.	-Não foram realizados ensaios e/ou cálculos de emissões gasosas e materiais particulados. Avaliação não realizada. - Teor de enxofre abaixo de 0,2%! Não são esperados problemas de emissões de SO ₂ .

Fonte: Produção da autora

Constatou-se ainda que, os limites adotados no sistema foram adequados como parâmetros para avaliar o potencial energético do lodo amostrado e a toxicidade; que as mensagens de alerta e explicativas foram claramente emitidas; os resultados das fórmulas foram calculados com exatidão; e o encadeamento lógico das regras foi executado progressivamente de forma correta, demonstrando o funcionamento do motor lógico do sistema, o que é ratificado pelo relatório de lógica (Apêndice C).

5.4. TESTE E VALIDAÇÃO UTILIZANDO O TRABALHO DE VIRMOND (2007)

Neste teste e validação foram inseridos no sistema como dados de entrada os mesmos valores encontrados e utilizados por Virmond (2007) constantes nas Tabelas 47 a 50, e comparados os resultados obtidos. Neste estudo, Virmond (2007) utilizou amostra de lodo frigorífico obtida da estação de tratamento de efluente de uma indústria frigorífica do Meio-Oeste Catarinense. Este mesmo autor cita que o lodo frigorífico apresenta teor de umidade médio de 70% após a etapa de centrifugação, sendo esse valor reduzido para, aproximadamente, 15 a 20% no processo de secagem, favorecendo seu aproveitamento energético por combustão direta.

Tabela 47- Dados de entrada do trabalho de Virmond (2007): composição elementar.

Dados de entrada: composição química elementar	
Teor de Carbono em base seca (%C)	50,90
Teor de Hidrogênio em base seca (%H)	7,90
Teor de Enxofre em base seca (%S)	0,29
Teor de Oxigênio em base seca (%O)	20,24
Teor de Cloro em base seca (%Cl)	0,16
Teor de Umidade em base seca (%W)	15,0
Teor de Cinzas em base seca (%A)	12,30
Teor de Nitrogênio em base seca (%N)	8,10

Fonte: Produção da autora

*PND=Parâmetro não determinado (este campo não vai ser preenchido no sistema pelo usuário)

Tabela 48- Dados de entrada do trabalho de Virmond (2007): poder calorífico.

Dados de entrada: poder calorífico	
Poder Calorífico Superior em MJ/kg (base seca) (PCS)	24,34
Poder Calorífico Inferior em MJ/kg (base seca) (PCI)	22,61

Fonte: Produção da autora

Tabela 49-Dados de entrada do trabalho de Virmond(2007):toxicidade na amostra bruta

Dados de entrada: toxicidade na amostra bruta do lodo	
Quantidade de Arsênio na amostra bruta (As em mg/kg)	0,99
Quantidade de Berílio na amostra bruta (Be em mg/kg)	*PND
Quantidade de Chumbo na amostra bruta (Pb em mg/kg)	2,0
Quantidade de Cianeto na amostra bruta (CN em mg/kg)	*PND
Quantidade de Cromo VI na amostra bruta (Cr em mg/kg)	120
Quantidade de Índice de fenóis na amostra bruta (IFenóis em mg/kg)	*PND
Quantidade de Mercúrio na amostra bruta (Hg em mg/kg)	0,0099
Quantidade de Selênio na amostra bruta (Se em mg/kg)	*PND
Quantidade de Vanádio na amostra bruta (Vanadio em mg/kg)	*PND

Fonte: Produção da autora

*PND=Parâmetro não determinado (este campo não vai ser preenchido no sistema pelo usuário)

Tabela 50- Dados de entrada do trabalho de Virmond (2007): poluição atmosférica.

Dados de entrada: poluição atmosférica (emissões gasosas e materiais particulados)	
Dióxido de Enxofre (SO ₂ em mg/Nm ³)	112,48
Cloreto de Hidrogênio (HCl em mg/Nm ³)	17,45
Dióxido de Nitrogênio (NO ₂ em mg/Nm ³)	222,11
Monóxido de Carbono (CO em ppm/Nm ³)	642,24
Fluoreto de Hidrogênio (HF em mg/Nm ³)	*PND
Dioxinas e Furanos: dibenzo-p-dioxinas e dibenzo-p-furanos, expressos em TEQ (total de toxicidade equivalente) da 2,3,7,8 TCDD (tetracloro-dibenzo-paradioxina) (DF em ng/Nm ³)	*PND
Material Particulado (MP em mg/Nm ³)	3,15
Material Particulado com agrupamento de cádmio (Cd), mercúrio (Hg),tálio (Tl) - (MPI em mg/Nm ³)	*PND
Material Particulado com agrupamento de arsênio (As),cobalto (Co), níquel (Ni), telúrio (Te), selênio (Se) – (MPII em mg/Nm ³)	*PND
Material Particulado com agrupamento de cobre (Cu), estanho (Sn), flúor (F), manganês (Mn), platina (Pt), paládio (Pd), ródio (Rh), vanádio (V) – (MPIII em mg/Nm ³)	*PND

Fonte: Produção da autora

*PND=Parâmetro não determinado (este campo não vai ser preenchido no sistema pelo usuário)

Para entrada de dados da análise elementar, imediata e poder calorífico foi escolhida a Opção 2, do Quadro 6 (Análise química elementar em base seca e teor de cinzas: %H, %W, %S, %C, %O, %A) em função das disponibilidades de dados deste trabalho. Observa-se ainda que, apesar de disponíveis os valores do PCS e PCI, estes não serão fornecidos como dados de entrada para que seja possível validar as fórmulas utilizadas no sistema para cálculo destes parâmetros. Quanto aos dados de toxicidade no lixiviado não foram apresentados por Virmond (2007) e, portanto, não avaliados pelo sistema computacional.

Virmond (2007) concluiu em seu trabalho que, apesar do lodo amostrado possuir um alto potencial energético para ser utilizado em processos de combustão, em função do expressivo valor de seu poder calorífico inferior (22,61 MJ/kg), este não devia ser utilizado como combustível primário na caldeira devido as suas cinzas apresentarem como constituintes majoritários óxido de fósforo (P₂O₅) (36,30 %) e ferro na forma de óxido férrico (Fe₂O₃) (32,40 %) ocasionando a diminuição da temperatura de fusão das cinzas e forte tendência à

formação de depósitos e incrustação, bem como devido ao alto teor cloro e enxofre ocasionando problemas de corrosão nos equipamentos.

Os óxidos de fósforo e férrico presentes no lodo frigorífico amostrado são originados dos coagulantes utilizados no tratamento primário do efluente, sulfato férrico ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) e cálcio, na forma de óxido de cálcio (CaO); e a presença de íons cloreto neste resíduo ocorre devido à utilização de produtos à base de cloro na higienização das instalações do frigorífico que, conseqüentemente, são incorporados ao efluente e ao lodo.

Segundo Virmond (2007), a escolha do coagulante utilizado no tratamento primário do efluente frigorífico é determinante na composição do lodo, tanto pela presença de elementos como o cloro que pode resultar na formação de compostos poluentes tóxicos como dioxinas e furanos; compostos de enxofre, que são relacionados à ocorrência de problemas de corrosão de equipamentos; como de elementos que diminuem a temperatura de fusão das cinzas, implicando na formação de depósitos e incrustação no sistema de combustão. O tipo de fornalha também é importante, dado que esses problemas são amenizados queimando-se o lodo em grelha rotativa comparado à queima em grelha fixa vibratória, onde a tendência ao acúmulo e fusão dos resíduos é favorecida. Virmond (2007) observa ainda que quanto menor a proporção de lodo na mistura a ser queimada, menor a ocorrência desses problemas e melhor a homogeneidade da alimentação.

Dessa forma, Virmond (2007) verificou potencial de utilização do lodo amostrado como fonte de energia para processo de co-combustão incorporando 10% em massa de lodo à alimentação, que utiliza como combustível principal o cavaco. Este mesmo autor afirmou que, quando a alimentação foi composta apenas por cavaco, a energia total fornecida no processo de combustão foi de 14,06MW, considerando-se PCI de 19,44MJ/kg. Substituindo-se 10% do cavaco por lodo, a energia total aumentou para 14,29MW em função do maior PCI do lodo (22,61MJ/kg) em relação ao do cavaco, com um ganho energético de aproximadamente 2%, além da economia de cavaco que contabilizaria ao final de um ano cerca de 1.900 toneladas, equivalentes, aproximadamente, ao abastecimento de cavaco para um mês de operação do sistema, 10% do consumo anual desse combustível, e economia de cerca de R\$ 73.000,00 ao ano. O custo de secagem do lodo de 70% para 15% de umidade não foi considerado.

No entanto, como a composição das cinzas do lodo determina a ocorrência de formação de depósitos e incrustação, quanto menor a proporção de lodo na queima em grelha rotativa, menor a ocorrência desses problemas e melhor a homogeneidade da alimentação. Para que o processo de combustão alcance a máxima eficiência possível e produza pequenas quantidades de poluentes, Virmond (2007) concluiu que cada etapa do processo devia ser

otimizada levando-se em consideração a tecnologia de combustão aplicada, o tipo de biomassa e o seu comportamento térmico.

Quanto as emissões gasosas e materiais particulados, Virmond (2007) concluiu que, as concentrações de NO₂, SO₂, HCl e MP nos gases de exaustão da queima não ultrapassaram os limites determinados pelo CONAMA 316/02. No entanto, a concentração de CO ultrapassou os limites desta norma. Grandes concentrações de CO implicam em combustível não queimado, combustão incompleta, isto é, queima ineficiente na fornalha e, conseqüentemente, perdas energéticas. Virmond (2007) atribuiu esse fato às condições de operação e as oscilações de temperatura no processo.

O sistema computacional, por sua vez, gerou relatório com as seguintes conclusões e explicações resultantes (Apêndice C):

- Valor do poder calorífico do lodo avaliado = 22,531 MJ/Kg de lodo
- Lodo Classe I: Apresenta alto potencial para gerar energia em processos de combustão.
- Aplicações Recomendadas: Fornos de cimento, caldeiras, geradores de vapor, fornos, fornalhas, estufas e secadores para a geração e uso de energia térmica, gaseificadores e centrais à biomassa para a geração de energia elétrica, respeitadas as condições abaixo:

1. Teor de cinzas do lodo abaixo de 50%.

Caso o teor de cinzas seja maior que 50%, só é recomendável a queima do lodo quando a empresa for obrigada pelo legislador/controlador ambiental, ou quando quiser eliminar o lodo para evitar aterrjá-lo. Caso contrário, é tecnicamente desaconselhado em função dos problemas de incrustações em equipamentos.

2. Baixo conteúdo de óxidos básicos de fósforo e óxidos de ferro na composição das cinzas do lodo.

Caso o lodo apresente elevado conteúdo de óxidos básicos de fósforo e óxidos de ferro na composição de suas cinzas, só é recomendável sua utilização para co-processamentos e em proporções não superiores a 15%. Caso contrário, é tecnicamente desaconselhado em função da forte tendência à formação de depósitos e incrustação nos equipamentos.

- Energia Bruta Prevista = 6,309 kWh/kg de lodo
- Receita bruta prevista com a venda da energia gerada a partir do lodo para distribuidoras de energia elétrica = R\$ 144,20 / MWh ou R\$ 0,14 / kWh
- Teor de Cloro acima de 0,1%! Problemas de corrosão induzida podem ser esperados.

- Limite máximo de Monóxido de Carbono (CO) ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Monóxido de Carbono forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.
- Emissões de Dióxido de Enxofre (SO₂), Dióxido de Nitrogênio (NO₂), Cloreto de Hidrogênio (HCl) e Materiais Particulados estão de acordo com os limites estabelecidos na Resolução nº 316/2002 (CONAMA, 2002).
- Quantidade de Fluoreto de Hidrogênio (HF) não informada! Limite de Fluoreto de Hidrogênio (HF) não avaliado!
- Quantidade de Dioxinas e Furanos não informada! Limite de Dioxinas e Furanos não avaliado!
- Quantidade de Material Particulado com agrupamento de cádmio (Cd), mercúrio (Hg), tálio (Tl) não informada! Limite de Material Particulado com agrupamento de cádmio (Cd), mercúrio (Hg), tálio (Tl) não avaliado!
- Quantidade de Material Particulado com agrupamento de arsênio (As), cobalto (Co), níquel (Ni), telúrio (Te), selênio (Se) (MPIO) não informada! Limite de Material Particulado com agrupamento de arsênio (As), cobalto (Co), níquel (Ni), telúrio (Te), selênio (Se) não avaliado!
- Quantidade de Material Particulado com agrupamento de cobre (Cu), estanho (Sn), flúor (F), manganês (Mn), platina (Pt), paládio (Pd), ródio (Rh), vanádio (V) não informada! Limite de Material Particulado com agrupamento de cobre (Cu), estanho (Sn), flúor (F), manganês (Mn), platina (Pt), paládio (Pd), ródio (Rh), vanádio (V) não avaliado!
- Quantidade de Chumbo (Pb), Arsênio (As) e Mercúrio (Hg) na amostra bruta do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/87 (ABNT, 1987).
- Quantidade de Bário, Cianeto, Índice de Fenóis, Selênio e Vanádio na amostra bruta do lodo não informada! Limite desses metais na amostra bruta do lodo não avaliado.
- Limite máximo de Cromo VI na amostra bruta do lodo ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Cromo VI forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.

- Não foi realizado ensaio Lixiviação de Resíduos no lodo! Não é possível realizar a avaliação da toxicidade (metais pesados) do lodo com base no ensaio de lixiviação conforme recomendado pela NBR 10004/04 (ABNT, 2004).

Comparando os resultados do sistema computacional com os de Virmond (2007), observa-se que as conclusões de ambos são compatíveis.

Virmond (2007) concluiu que o lodo amostrado deve ser aplicado conforme orientado pelo sistema (caso o lodo apresente elevado conteúdo de óxidos básicos de fósforo e óxidos de ferro na composição de suas cinzas, só é recomendável sua utilização para co-processamentos e em proporções não superiores a 15%), e os poderes caloríficos inferiores apresentaram diferença de aproximadamente 0,3%. Quanto às emissões gasosas e materiais particulados, ambos apresentaram as mesmas conclusões.

Em relação aos metais pesados o sistema acusou que o limite máximo de Cromo VI na amostra bruta do lodo amostrado foi ultrapassado e que este apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Cromo VI forem tomadas. Virmond (2007) não apresentou em seu trabalho conclusões relacionadas à presença dos metais pesados na amostra bruta e no lixiviado do lodo amostrado.

Nas Tabelas 51 a 54 apresentam-se os resumos comparativos dos resultados das avaliações obtidos por Moraes (2006) e pelo sistema computacional desenvolvido.

Tabela 51- Resumo comparativo dos resultados da avaliação do potencial energético obtidos por Virmond (2007) e pelo sistema computacional.

TRABALHO	Opção da entrada de dados	PCI VIRMOND (2007)	PCI SISTEMA COMPUTACIONAL	DIFERENÇA PERCENTUAL
Virmond (2007) Lodo da indústria frigorífica	%C, %H, %S, %O, %N, %W, %A em b.s. (Opção 2)	22,6 MJ/kg Alto teor de óxidos de ferro e fósforo nas cinzas sendo recomendado apenas para co-processamento em proporções não superiores a 15%.	22,531 MJ/kg LODO CLASSE I , porém com alto teor de óxidos de ferro e fósforo nas cinzas sendo recomendado apenas para co-processamento em proporções não superiores a 15%.	0,3%

Fonte: Produção da autora

Tabela 52- Resumo comparativo dos resultados da avaliação de corrosão e incrustações em equipamentos obtidos por Virmond (2007) e pelo sistema computacional.

TRABALHO	ENTRADA DE DADOS	CONCLUSÕES DE VIRMOND (2007)	CONCLUSÕES DO SISTEMA COMPUTACIONAL
Virmond (2007) Lodo da indústria frigorífica	%Cl em b.s. = 0,16 % %A em b.s = 12,30 %	-São esperados problemas de corrosão. -São esperados problemas de incrustações devido ao alto teor de óxidos de ferro e fósforo nas cinzas. Recomenda-se utilizar o lodo apenas para co-processamento em proporções não superiores a 10%.	-Teor de Cloro acima de 0,1%! Problemas de corrosão induzida podem ser esperados. -Caso o lodo apresente elevado conteúdo de óxidos básicos de fósforo e óxidos de ferro na composição de suas cinzas, só é recomendável sua utilização para co-processamentos e em proporções não superiores a 15%. Caso contrário, é tecnicamente desaconselhado em função da forte tendência à formação de depósitos e incrustação nos equipamentos.

Fonte: Produção da autora

Tabela 53- Resumo comparativo dos resultados da avaliação de toxicidade obtidos por Virmond (2007) e pelo sistema computacional.

TRABALHO	ENTRADA DE DADOS	CONCLUSÕES DE VIRMOND (2007)	CONCLUSÕES DO SISTEMA COMPUTACIONAL
Virmond (2007) Lodo da indústria frigorífica	As= 0,99 mg/kg Be= PND Pb= 2,0 mg/kg CN= PND Cr= 120 mg/kg IFenois= PND Hg= 0,0099mg/kg Se= PND V= PND	-Avaliação não realizada.	- Cr na amostra bruta acima dos padrões estabelecidos pela NBR 10004/87. - Quantidade de As, Pb e Hg na amostra bruta do lodo de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/87. - Quantidade de Be, CN, IFenois, Se e V na amostra bruta do lodo não informada. Limite desses metais na amostra bruta do lodo não avaliado.

Fonte: Produção da autora

Tabela 54- Resumo comparativo dos resultados da avaliação da poluição atmosférica obtidos por Virmond (2007) e pelo sistema computacional.

TRABALHO	ENTRADA DE DADOS	CONCLUSÕES DE VIRMOND (2007)	CONCLUSÕES DO SISTEMA COMPUTACIONAL
Virmond (2007) Lodo da indústria frigorífica	SO ₂ = 112,48 mg/Nm ³ HCl= 17,45 mg/Nm ³ NO ₂ = 222,11 mg/Nm ³ CO= 642,24 ppm/Nm ³ HFI= PND DF= PND MP= 3,15 mg/Nm ³ MPI= PND MPII= PND MPIII= PND	- NO ₂ , SO ₂ , HCl e MP estão de acordo com os limites estabelecidos pela Resolução nº 316/2002 do CONAMA. - CO acima dos padrões estipulados pela Resolução nº 316/2002 do CONAMA.	- NO ₂ , SO ₂ , HCl e MP estão de acordo com os limites estabelecidos pela Resolução nº 316/2002 do CONAMA. - CO acima dos padrões estipulados pela Resolução nº 316/2002 do CONAMA. - Quantidade de HFI, DF, MPI, MPII e MPIII não informada! Limites não avaliados.

Fonte: Produção da autora

Constatou-se ainda que, os limites adotados no sistema foram adequados como parâmetros para avaliar o potencial energético do lodo amostrado e a poluição atmosférica; que as mensagens de alerta e explicativas foram claramente emitidas; os resultados das fórmulas foram calculados com exatidão; e o encadeamento lógico das regras foi executado progressivamente de forma correta, demonstrando o funcionamento do motor lógico do sistema, o que é ratificado pelo relatório de lógica emitido pelo sistema (Apêndice C).

5.5. RESUMO DOS RESULTADOS DOS TESTES E VALIDAÇÃO DO SISTEMA COMPUTACIONAL

A seguir apresentam-se, nas Tabelas 55 a 58, o resumo dos resultados dos testes e validações do sistema computacional.

Tabela 55- Resumo dos resultados da avaliação do potencial energético.

TRABALHO	Opção da entrada de dados	PCI TRABALHOS	PCI SISTEMA COMPUTACIONAL	DIFERENÇA PERCENTUAL
Macedo (2006) Lodo da indústria de papel e celulose	%C, %H, %S, %O, %N, %W, %A em b.s. (Opção 2)	3,80 MJ/kg (%W=47%)	3,6 MJ/kg (%W=47%) LODO CLASSE IV 4,015 MJ/kg (%W=30%) 4,722 MJ/kg (%W= 1%)	5%
Borges (2008) Lodo doméstico	%F, %V, %A, %H, %W em b.s. (Opção 1)	18,60 MJ/kg	18,222 MJ/kg LODO CLASSE I	2%
Moraes (2006) Lodo doméstico	PCS, %H, %W em b.s. (Opção 3)	16,99 MJ/kg	16,496 MJ/kg LODO CLASSE II	3%
Virmond (2007) Lodo da indústria frigorífica	%C, %H, %S, %O, %N, %W, %A em b.s. (Opção 2)	22,6 MJ/kg Alto teor de óxidos de ferro e fósforo nas cinzas sendo recomendado apenas para co-processamento em proporções não superiores a 15%.	22,531 MJ/kg LODO CLASSE I , porém com alto teor de óxidos de ferro e fósforo nas cinzas sendo recomendado apenas para co-processamento em proporções não superiores a 15%.	0,3%

Fonte: Produção da autora

Analisando os resultados da Tabela 55, observa-se que, a diferença entre os poderes caloríficos inferiores dos trabalhos e dos apresentados pelo sistema computacional variam de 0,3% a 5%. Esta variação se justifica pelo fato de que, o PCI de cada trabalho foi calculado a partir do PCS obtido experimentalmente em bomba calorimétrica, enquanto que o PCI do sistema computacional foi calculado a partir do PCS obtido analiticamente por correlações empíricas.

Considerando que existe uma margem de erro tanto para o cálculo teórico do PCS quanto para sua determinação experimental, conclui-se que as correlações empírica de Parikh *et al.* (2005) (Equação 2) e de Channiwala e Parikh (2002) (Equação 3), utilizadas pelo sistema para calcular o valor do PCS, demonstraram-se válidas para lodos de esgoto.

Tabela 56- Resumo dos resultados da avaliação de corrosão e incrustações em equipamentos.

TRABALHO	ENTRADA DE DADOS	CONCLUSÕES DOS TRABALHOS	CONCLUSÕES DO SISTEMA COMPUTACIONAL
Macedo (2006) Lodo da indústria de papel e celulose	%Cl em b.s.= 0,005 % %A em b.s = 8,14 %	-Problema de corrosão não comentado. -Problema de incrustações não comentado.	-O sistema não emitiu nenhuma mensagem de alerta, pois não são esperados problemas de corrosão. -O sistema não emitiu nenhuma mensagem de alerta, pois não são esperados problemas de incrustações.
Borges (2008) Lodo doméstico	%Cl em b.s.= PND %A em b.s = 47,6 %	-Problema de corrosão não comentado. -Problema de incrustações não comentado.	-Teor de Cloro não avaliado! Para Teor de Cloro acima de 0,1% corrosão induzida e problemas de emissão de HCl podem ser esperados. -Teor de Cinzas acima de 30%! Problemas de incrustações em equipamentos podem ser esperados.
Moraes (2006) Lodo doméstico	%Cl em b.s.= PND %A em b.s.= PND	-Problema de corrosão não comentado. -Problema de incrustações não comentado.	-Teor de Cloro não avaliado! Para Teor de Cloro acima de 0,1% corrosão induzida e problemas de emissão de HCl podem ser esperados. -Teor de cinzas não avaliado! Para Teor de Cinzas acima de 30% problemas de incrustações em equipamentos podem ser esperados.
Virmond (2007) Lodo da indústria frigorífica	%Cl em b.s. = 0,16 % %A em b.s = 12,30 %	-São esperados problemas de corrosão. -São esperados problemas de incrustações. Recomenda-se utilizar o lodo apenas para co-processamento em proporções não superiores a 10%.	-Teor de Cloro acima de 0,1%! Problemas de corrosão induzida podem ser esperados. -Caso o lodo apresente elevado conteúdo de óxidos básicos de fósforo e óxidos de ferro na composição de suas cinzas, só é recomendável sua utilização para co-processamentos e em proporções não superiores a 15%.

Fonte: Produção da autora

Na Tabela 56 observa-se que apenas Virmond (2007) realizou a avaliação de corrosão e incrustações em equipamentos, cujos resultados demonstram a importância desta avaliação, pois mesmo que o material tenha um poder calorífico alto, o resultado desta avaliação pode restringir ou até impedir seu uso como biomassa para gerar energia em processos de combustão.

Tabela 57- Resumo dos resultados da avaliação da toxicidade.

TRABALHO	ENTRADA DE DADOS	CONCLUSÕES DO TRABALHO	CONCLUSÕES DO SISTEMA COMPUTACIONAL
Macedo (2006) Lodo da indústria de papel e celulose	AsLx= 0,499 mg/L BaLx= 3,7 mg/L CdLx= 0,019 mg/L PbLx= 0,049 mg/L CrLx= 0,019 mg/L FluoretoLx=0,5 mg/L HgLx= 0,01 mg/L PrataLx= 0,01 mg/L SeLx= 0,499 mg/L As= 4,99 mg/kg Be= 1,99 mg/kg Pb= 4,0 mg/kg CN= 0,099 mg/kg Cr= 3,0 mg/kg IFenois= 0,999 mg/kg Hg= 0,099 mg/kg Se= 0,999 mg/kg V= 6,0 mg/kg	-Valores de metais pesados no lixiviado do lodo de acordo com os padrões normativos. -Valores de metais pesados na amostra bruta do lodo de acordo com os padrões normativos.	-Valores de metais pesados no lixiviado do lodo estão de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/04 da ABNT. -Valores de metais pesados na amostra bruta do lodo estão de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/87 da ABNT.
Borges (2008) Lodo doméstico	-Não foram realizados testes de toxicidade no lixiviado do lodo. -Não foram realizados testes de toxicidade na amostra bruta do lodo.	-Avaliação não realizada. -Avaliação não realizada.	-Não foi realizado ensaio Lixiviação de Resíduos no lodo! Avaliação não realizada. -Não foram quantificados metais pesados na amostra bruta do lodo! Avaliação não realizada.
Moraes (2006) Lodo doméstico	AsLx= PND BaLx= 1,43 mg/L CdLx= PND PbLx= 0,08 mg/L CrLx= 0,09 mg/L FluoretoLx= 0,09 mg/L HgLx= PND PrataLx= PND SeLx= PND As= PND Be= PND Pb= 109 mg/kg CN= PND Cr= 927 mg/kg IFenois= 4,7 mg/kg Hg= PND Se= PND V= 44,3 mg/kg	-Avaliação não realizada. - Cr acima dos padrões estipulados pela norma brasileira.	- Quantidade Ba, Pb, Fluoreto e Cr no lixiviado do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/04. -Quantidade de As, Cd, Hg, Prata e Se no lixiviado do lodo não informada. Limite desses metais no lixiviado do lodo não avaliado. - Cr na amostra bruta acima dos padrões estabelecidos pela NBR 10004/87. - Quantidade de Pb, IFenois e V na amostra bruta do lodo de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/87. - Quantidade de As, Be, CN, Hg e Se na amostra bruta do lodo não informada. Limite desses metais na amostra bruta do lodo não avaliado.
Virmond (2007) Lodo da indústria frigorífica	-Não foram realizados testes de toxicidade no lixiviado do lodo. As= 0,99 mg/kg Be= PND	-Avaliação não realizada.	-Não foi realizado ensaio lixiviação de resíduos no lodo! Avaliação não realizada. - Cr na amostra bruta acima dos padrões estabelecidos pela NBR

	Pb= 2,0 mg/kg CN= PND Cr= 120 mg/kg IFenois= PND Hg= 0,0099mg/kg Se= PND V= PND		10004/87. - Quantidade de As, Pb e Hg na amostra bruta do lodo de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/87. - Quantidade de Be, CN, IFenois, Se e V na amostra bruta do lodo não informada. Limite desses metais na amostra bruta do lodo não avaliado.
--	---	--	--

Fonte: Produção da autora

Na Tabela 57 observa-se que nem todos os autores realizaram as avaliações de toxicidade do lodo, apesar de sua importância em função dos danos ambientais e à saúde pública que podem causar. Ressalta-se ainda que os limites adotados no sistema computacional foram adequados como parâmetros para avaliar a toxicidade do lodo tendo em vista suas conclusões compatíveis com as dos autores dos trabalhos utilizados.

Tabela 58- Resumo dos resultados da avaliação da poluição atmosférica.

TRABALHO	ENTRADA DE DADOS	CONCLUSÕES DOS TRABALHOS	CONCLUSÕES DO SISTEMA COMPUTACIONAL
Macedo (2006) Lodo da indústria de papel e celulose	SO ₂ = 314,61mg/Nm ³ HCl=16,174 mg/Nm ³ NO ₂ =1415,77 mg/Nm ³ CO=PND HFI=0,149 mg/Nm ³ DF=PND MP=PND MPI=1,604 mg/Nm ³ MPII=3,775 mg/Nm ³ MPIII=6,733 mg/Nm ³	- SO ₂ e NO ₂ acima dos padrões estipulados pela norma brasileira.	-SO ₂ , NO ₂ , MPI e MPII acima dos padrões estipulados pela Resolução n° 316/2002 do CONAMA. -HFI, HCl, MPIII estão de acordo com os limites estabelecidos pela Resolução n° 316/2002 do CONAMA. -CO, DF e MP não informados. Limites não avaliados.
Borges (2008) Lodo doméstico	SO ₂ = PND HCl= PND NO ₂ = PND CO=216,67ppm/Nm ³ HFI= PND DF= PND MP= PND MPI= PND MPII= PND MPIII= PND	-Baixo teor de poluentes SO ₂ e NO ₂ . -CO acima dos padrões estipulados pela Resolução n° 316/2002 do CONAMA.	- Teor de Enxofre acima de 0,2%! Problemas de emissão de Dióxido de Enxofre (SO ₂) podem ser esperados! -Limite máximo de Monóxido de Carbono (CO) acima dos padrões estipulados pela Resolução n° 316/2002 do CONAMA. - HCl, NO ₂ , HFI, DF, MP, MPI, MPII e MPIII não informados. Limites não avaliados.
Moraes (2006) Lodo doméstico	-Não foram realizados ensaios e/ou cálculos de emissões gasosas e materiais particulados.	-Avaliação não realizada.	- Avaliação não realizada. - Teor de enxofre abaixo de 0,2%! Não são esperados problemas de emissões de SO ₂ .

Virmond (2007) Lodo da indústria frigorífica	SO ₂ = 112,48 mg/Nm ³ HCl= 17,45 mg/Nm ³ NO ₂ = 222,11 mg/Nm ³ CO= 642,24 ppm/Nm ³ HFI= PND DF= PND MP= 3,15 mg/Nm ³ MPI= PND MPII= PND MPIII= PND	- NO ₂ , SO ₂ , HCl e MP estão de acordo com os limites estabelecidos pela Resolução nº 316/2002 do CONAMA. - CO acima dos padrões estipulados pela Resolução nº 316/2002 do CONAMA.	- NO ₂ , SO ₂ , HCl e MP estão de acordo com os limites estabelecidos pela Resolução nº 316/2002 do CONAMA. - CO acima dos padrões estipulados pela Resolução nº 316/2002 do CONAMA. - Quantidade de HFI, DF, MPI, MPII e MPIII não informada! Limites não avaliados.
--	--	---	---

Fonte: Produção da autora

Na Tabela 58 observa-se que nem todos os autores realizaram as avaliações da poluição atmosférica, apesar de sua importância em função dos danos ambientais e à saúde pública que podem causar. Ressalta-se ainda que os limites adotados no sistema computacional foram adequados como parâmetros para avaliar a poluição atmosférica tendo em vista suas conclusões compatíveis com as dos autores dos trabalhos utilizados.

Considerando que o objetivo do sistema computacional é agilizar o processo de tomada de decisão no setor de saneamento básico, e que a geração de energia a partir do lodo de esgoto sanitário pode gerar receitas, as regras de lógica foram feitas para, no relatório de resultados, gerar informações do valor da receita bruta diária prevista com a venda da energia gerada a partir do lodo, para distribuidoras de energia elétrica, com base no valor que as distribuidoras de energia elétrica pagam na contratação de geração distribuída, sendo no presente trabalho utilizados os valores de biomassa do 2º Leilão de Fontes Alternativas da ANEEL realizado em 25 e 26 de agosto de 2010 (ANEEL, 2010).

Para que isso ocorra, é necessário que o usuário informe, na tela de entrada de dados do sistema, a quantidade disponível de lodo de esgoto seco em toneladas por dia e o rendimento percentual na transformação para energia elétrica. Caso esta última informação não seja fornecida, o sistema considerará um rendimento de 50%.

Como nenhum dos quatro autores considerados nos testes do sistema apresentaram informações de valores, neste trabalho foi utilizada essa opção do sistema supondo para Moraes (2006) a quantidade disponível de lodo de esgoto seco de 150 toneladas/dia e o rendimento percentual na transformação para energia elétrica de 40%, conforme apresenta a Figura 22.

Figura 22- Tela de entrada de dados do sistema computacional

Fonte: Produção da autora

Assim, o sistema gerou relatório de resultados com as seguintes informações relacionadas ao poder calorífico e receita bruta prevista, entre outras já apresentadas no item 5.3.:

- Poder calorífico inferior previsto do lodo avaliado = 16,496 MJ/kg
- Lodo Classe II: Apresenta médio potencial para gerar energia em processos de combustão.
- Aplicações Recomendadas: Caldeiras, geradores de vapor, fornos, fornalhas, estufas e secadores para a geração e uso de energia térmica, gaseificadores, centrais à biomassa para a geração de energia elétrica, uso doméstico e co-processamento em geral, inclusive co-processamento em fornos rotativos de clínquer para a fabricação de cimento.
- Aplicações Não-Recomendadas: Fornos de cimento como combustível principal.
- Energia bruta prevista = 4,619 kWh/kg de lodo
- Receita bruta prevista com a venda da energia gerada a partir do lodo para distribuidoras de energia elétrica = R\$ 144,20 / MWh ou R\$ 0,14 / kWh
- Rendimento considerado na transformação do lodo em energia elétrica = 40 %
- Receita bruta diária prevista com a venda da energia gerada a partir 150 toneladas/dia de lodo para distribuidoras de energia elétrica = R\$ 39.962,21 / dia.

Dessa forma, o sistema desenvolvido pode também auxiliar na decisão econômica de projetos que visem o uso de lodo de esgoto como biomassa na geração de energia.

6. CONCLUSÕES

O sistema computacional desenvolvido agiliza o processo de tomada de decisão no setor de saneamento básico nas questões relacionadas à destinação final ambientalmente correta do lodo de esgoto, para fins de aproveitamento energético deste resíduo em processos de combustão. Para isso, são considerados aspectos técnicos, econômicos, ambientais e normativos, tendo como entrada de dados resultados laboratoriais de amostra de lodo de esgoto e como resultados do sistema dois relatórios: o de resultados e o de lógica.

No relatório de resultados são apresentados os resultados finais da avaliação quanto ao potencial energético do lodo (potencial alto, médio, baixo ou sem potencial), valor previsto do poder calorífico inferior do lodo, aplicações recomendadas e não-recomendadas para o lodo avaliado, energia bruta prevista em kWh/kg do lodo, receita bruta diária prevista com a venda da energia elétrica gerada no processo de combustão para as distribuidoras de energia elétrica, mensagens de alerta e explicativas quanto às emissões de poluentes atmosféricos, à toxicidade do lodo, à problemas de corrosão e incrustação em equipamento, bem como as normas e limites utilizados como parâmetro pelo sistema; e no relatório de lógica, é apresentada a sequência lógica de conhecimentos utilizados pelo sistema para chegar as conclusões finais da avaliação do lodo.

O sistema computacional foi testado e validado utilizando-se quatro trabalhos disponíveis de aplicação do lodo de esgoto como biomassa na geração de energia em escala experimental, sendo esses: Macedo (2006), que realizou análise térmica e ambiental da queima do lodo primário da fabricação de papel e celulose em caldeira de biomassa à grelha; Borges (2008), que fez a caracterização e estudo da potencialidade de lodos de efluentes doméstico e industrial como combustível na geração de energia; Moraes (2006) que fez a caracterização do produto proveniente da calcinação do lodo de esgoto resultante do tratamento de águas residuárias; e Virmond (2007), que fez estudo do aproveitamento do lodo de tratamento primário de efluentes de um frigorífico como fonte de energia.

Analisando os resultados dos quatro testes realizados, observou-se que a diferença entre os poderes caloríficos inferiores dos trabalhos e dos apresentados pelo sistema computacional variaram de 0,3% a 5%. Essa variação pode ser considerada pequena e ainda justificada pelo fato de que o PCI de cada trabalho foi calculado a partir do PCS obtido experimentalmente em bomba calorimétrica, enquanto que o PCI do sistema computacional foi calculado a partir do PCS obtido analiticamente por correlações empíricas.

Considerando que existe uma margem de erro tanto para o cálculo teórico do PCS quanto para sua determinação experimental, conclui-se que as correlações empírica de Parikh *et al.* (2005) (Equação 2) e de Channiwala e Parikh (2002) (Equação 3), utilizadas pelo sistema para calcular o valor do PCS, demonstraram-se válidas para lodos de esgoto.

Constatou-se ainda, após todos os testes, que: o sistema reproduziu corretamente os resultados e conclusões obtidos pelos quatro autores estudados demonstrando que os limites adotados no sistema foram adequados como parâmetros para avaliar o potencial energético do lodo amostrado, os problemas de corrosão e incrustações nos equipamentos, a toxicidade e a poluição atmosférica; as mensagens de alerta e explicativas, bem como os informativos econômicos, foram claramente emitidos; os resultados das fórmulas foram calculados com exatidão; e o encadeamento lógico das regras foi executado progressivamente de forma correta, demonstrando o funcionamento do motor lógico do sistema, o que é ratificado pelos relatórios de lógica emitidos pelo sistema.

Não obstante, ressalta-se que todo sistema computacional possui um processo de teste contínuo, pois é necessário assegurar que o sistema sempre funcione corretamente e satisfaça seus usuários, sendo natural haver refinamentos no sistema decorrentes de eventuais necessidades de melhorias em termos de interação e atualização de conhecimentos utilizados.

Finalmente, foi concluído que o sistema desenvolvido pode ser aplicado para agilizar a tomada de decisão e tornar conhecimentos especializados facilmente acessíveis, constituindo uma ferramenta tecnológica para o gerenciamento do lodo de esgoto, especialmente em estações de tratamento de esgoto com grande volume de lodo precisando de destinação final tecnicamente viável, segura em termos de saúde pública e ambientalmente adequada e de informativo econômico.

Os resultados apresentados pelo sistema computacional podem também contribuir indiretamente para: padronizar ações tomadas por diferentes gestores; criar políticas públicas; gerar receitas através da possível comercialização do bio sólido, uma vez que os lodos de esgoto são bio sólidos municipais que são gerados em grandes quantidades nas grandes metrópoles e, para os quais, podem-se buscar clientes que tenham interesse em usar os mesmos em processos de geração de energia ou agregar mais poder calorífico ao produto; e para decidir sobre o desenvolvimento ou não de um estudo de viabilidade econômica de implantação de projetos que visem obter energia a partir do lodo de esgoto em escala real.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Uma análise integrada de todos os resultados alcançados no presente trabalho permite visualizar a importância de se continuar com esse estudo ao se verificar a redução do volume de resíduos a serem descartados em aterros sanitários, diminuição da exploração dos recursos naturais, a minimização de impactos ambientais negativos, o aumento da geração de receitas no saneamento e da matriz energética, e principalmente, considerando o contexto mundial atual, à urgência na obtenção de fontes renováveis e menos poluentes de energia.

Dessa forma, sugere-se disponibilizar o sistema desenvolvido a gestores da área de saneamento e meio ambiente para ser utilizado de forma experimental com devido acompanhamento técnico.

Sugere-se também a realização de uma pesquisa mais avançada em relação à composição das cinzas e sua influência sobre os equipamentos e o poder calorífico do lodo, com a finalidade de estabelecer limites máximos de alguns óxidos que causam a formação de depósitos e incrustações em equipamentos impedindo que lodos mesmo com alto potencial para gerar energia sejam utilizados como combustível principal.

O desenvolvimento de um trabalho de pesquisa avançada para criar uma correlação empírica especificamente para calcular o poder calorífico do lodo, proporcionaria valiosa contribuição para os estudos de geração de energia a partir deste resíduo. Neste sentido, é interessante também a utilização de redes neurais para cálculo do poder calorífico, mas a grande dificuldade desse trabalho é criar um banco de dados com resultados laboratoriais da análise química elementar e poder calorífico para pelo menos trezentas amostras de diferentes lodos.

Por fim, sugere-se a pesquisa para formação de conhecimentos especializados nas questões do aproveitamento dos gases do tratamento de esgoto em processos de biodigestão, do uso do lodo na agricultura, na construção civil e para avaliar a viabilidade econômica em cada uma dessas atividades. Estas pesquisas demandam muito tempo constituindo um processo contínuo a ser trabalhado por diversos pesquisadores e técnicos. Contudo, com estas pesquisas sendo encaminhadas, seria possível pensar, para o futuro, em um sistema computacional integrado para tomada de decisão no gerenciamento do lodo.

REFERÊNCIAS

- ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Amostragem de Resíduos – Procedimento – **NBR 10007**. Rio de Janeiro, 1997.
- ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Critérios para Lançamento de Efluentes Líquidos Industriais no Sistema Coletor Público de Esgoto Sanitário – **NBR 9800**. Rio de Janeiro, 1987.
- ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário – **NBR 9648**. Rio de Janeiro, 1986.
- ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Lixiviação de Resíduos – Procedimento – **NBR 10005**. Rio de Janeiro, 1997.
- ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Resíduos sólidos- Classificação – **NBR 10004**. Rio de Janeiro, 2004.
- ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Resíduos sólidos- Classificação – **NBR 10004**. Rio de Janeiro, 1987.
- ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solubilização de Resíduos – Procedimento – **NBR 10006**. Rio de Janeiro, 1997.
- AGENDA 21 GLOBAL. Disponível em: <http://www.ambiente.sp.gov.br/agenda21.php>. Acesso em: 30 de jan. de 2009.
- ALMEIDA, L. A. A questão dos lodos e odores no tratamento da água e do esgoto- Abordagem holística com visão de futuro. In: OLIVEIRA, C.; GIL, G.; BATISTA, D.M.A. (org.). **Inovações Tecnológicas no saneamento: lodos e odores**. Porto Alegre: ABES/RS, 2008. p.8
- AMBIENTE Energia. Disponível em: <http://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia>. Acesso em: 03 fev 2011.
- ANDREOLI, C.V.; BONNET, B.R.P.; LARA, A.I.; WOLTER, F.R. **Proposição de plano de monitoramento da reciclagem agrícola do lodo de esgoto no estado do Paraná**. In.: 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, pp. 232- 244, Foz do Iguaçu, 1997.
- ANDREOLI, C.V.; PINTO, M.A.T. Introdução. In: ANDREOLI, C.V. (coord.). **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro : RiMa, ABES, 2001.
- ANDREOLI, C.V.; GARBOSSA, L.H.P.; LUPATINI, G; PEGORINI, E.S.; BILOTTA, P. **Gerenciamento do lodo de estação de tratamento de esgoto no Brasil**. Belo Horizonte: UFMG, 2001.
- ANDREOLI, C; PEGORINI, E.S. Introdução. In: ANDREOLI, C. (org.). **Alternativas de Uso de Resíduos do Saneamento**. Curitiba: ABES/RJ, 2006. p.01 a 06.

ANDREOLI, C. O uso agrícola de lodo no Brasil- situação e perspectivas. In: OLIVEIRA, C.; GIL, G.; BATISTA, D.M.A. (org.). **Inovações Tecnológicas no saneamento: lodos e odores**. Porto Alegre: ABES/RS, 2008. p.36.

ANDREOLI, C. V.; SPERLING, M. V.; FERNANDES, F.. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Volume 6. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental- UFMG; Companhia de Saneamento do Paraná, 2001.

ANDREOLI, C. V.; FERREIRA, A. C.; CHERNICHARO, C. A.; BORGES, E. S. M. Secagem e Higienização de Lodos com aproveitamento do Biogás. In: CASSINI, S. T (coord.). **Digestão de Resíduos Sólidos Orgânicos e Aproveitamento do Biogás**. Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2003. p. 130 - 174

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 2ª Ed. Brasília: Aneel, 2005. Disponível em: www.aneel.gov.br/aplicacoes/Atlas/download.htm

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3ª Ed. Brasília: Aneel, 2008. Disponível em: www.aneel.gov.br/aplicacoes/Atlas/download.htm

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). Nota Técnica nº 0043/2010-SDR/ANEEL. Brasília: Aneel, 2010. Disponível em: [www.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos/Nota Técnica_0043_GD_SRD.pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos/Nota_Tecnica_0043_GD_SRD.pdf)

BEHAINNE, J. J. R; SÁNCHEZ, C. G. Gaseificadores. In: SÁNCHEZ, C. G. (org.). **Tecnologia da Gaseificação de Biomassa**. Campinas: Editora Átomo, 2010. p. 27- 45

BERNI, M. D.; BAJAY, S. V. Sustentabilidade ambiental e geração de energia na indústria de papel com o uso de reator anaeróbio no tratamento de efluentes. In: CARVALHO JR., J. A. de; LACAVA, P. T. **Emissões em processos de combustão**. São Paulo: Editora UNESP, 2003.

BERTON, R.S.; CAMARGO, O.A.; VALADARES, J.M.A.S. Absorção de nutrientes pelo milho em resposta à adição de lodo de esgoto a cinco solos paulistas. In: **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v.13, n.2, p.187-192, mar, 1989.

BORGES, F. **Caracterização e estudo da potencialidade de lodos de efluentes doméstico e industrial como combustível na geração de energia**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) - Universidade da Região de Joinville, Joinville, 2008.

BRAGA, B. *et al.* **Introdução à Engenharia Ambiental**. 2ª Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a **Lei nº 9.605**, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras. Relator: Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília, 2 de agosto de 2010.

BRASIL. Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Relator: Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 12 de fevereiro de 1998.

CAIXETA, G. **Estudo de cenário de produção de biodiesel**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Escola de Química, Rio de Janeiro, 2009.

CARVALHO, J. A.; MCQUAY, M. Q. **Princípios de Combustão Aplicada**. Florianópolis: Ed. Da UFSC, 2007.

CASSINI, S. T (coord.). **Digestão de Resíduos Sólidos Orgânicos e Aproveitamento do Biogás**. Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2003.

CHANNIWALA, S.A.; PARIKH P, P. *A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels*. **Fuel**. 2002;81:1051–63.

CHAO, I.R.S; IESS, J.J. O potencial de utilização de lodo de tratamento de esgoto como redutor de poluentes atmosféricos na indústria cimenteira. **Revista SANEAS**. AESABESP- Associação dos Engenheiros da Sabesp Artigos Técnicos. São Paulo, ABR 2004. Disponível em: <www.aesabesp.org.br/arquivos/saneas/saneas17.pdf>. Acesso em: 11 jun 2011.

CMMAD - Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. **Nosso futuro Comum**. 2 ed., Rio de Janeiro: Editora da Fundação Getúlio Vargas, 1991.

COELHO, S. T.; VELAZQUEZ, S. M. S. G.; SILVA, O. C. da *et al.* **Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto**. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 6, 2006, Campinas. Anais eletrônicos... Disponível em: <<http://www.proceedings.scielo.br/>>. Acesso em: 30 Mar. 2011.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA (1989). **Resolução nº 5**, de 15 de junho de 1989. Dispõe sobre o Programa Nacional de Controle da Poluição. Relator: Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 25 de agosto de 1989.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA (1990). **Resolução nº 3**, de 28 de junho de 1990. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR. Relator: Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, de 22 de agosto de 1990.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA (1990). **Resolução nº 008**, de 06 de dezembro de 1990. Estabelecer, em nível nacional, limites máximos de emissão de poluentes do ar (padrões de emissão) para processos de combustão externa em fontes novas fixas de poluição com potências nominais totais até 70 MW (setenta megawatts) e superiores. Relator: Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, de 28 de dezembro de 1990.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA (1999). **Resolução nº 264**, de 26 de agosto de 1999. Define procedimentos, critérios e aspectos técnicos específicos de licenciamento ambiental para o co-processamento de resíduos em fornos rotativos de clínquer

para a fabricação de cimento. Relator: Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 1999.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA (2002). **Resolução nº 316**, de 29 de outubro de 2002. Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos. Relator: Diário Oficial da República Federativa do Brasil nº 224, Brasília, de 20 de novembro de 2002.

CONSELHO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE DO ESTADO DO PARANÁ – CEMA (2009). **Resolução nº 71**, 06 de outubro de 2009. Estabelece a exigência e os critérios na solicitação e emissão de autorizações ambientais para coprocessamento de resíduos em fornos de cimento, com fins de substituição de matéria prima ou aproveitamento energético. Relator: Diário Oficial nº:8077, Curitiba, 15 de outubro de 2009.

Congresso Anual de Celulose e Papel, 34, 2001, Campinas. Anais eletrônicos... Disponível em: <www.celuloseonline.com.br/dr_celulose_files>. Acesso em: 14 out. 2009.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2008.

CORTEZ, L. A. B.; SILVA, A.; LUCAS JÚNIOR, J.; JORDAN, R. A.; CASTRO, L. R. Biodigestão de Efluentes. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O (org.). **Biomassa para energia**. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2008. p. 493-530

CUNHA, D. S. A. C. **Análise da Produção de Lodo de Esgoto e da Capacidade de Disposição do Aterro Sanitário do Aurá na Região Metropolitana de Belém para os Próximos 20 anos**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Pará. Belém, 2009.

ENCICLOPÉDIA AGRÍCOLA BRASILEIRA/ ESALQ. Apresentação Humberto de Campos – São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1995.

ENERGIA a partir do metano de ETEs. Licenciamento Ambiental em Mato Grosso do Sul. Informações sobre Meio Ambiente, Licenciamento Ambiental, Tecnologias, Gestão e Controle Ambiental. Disponível em: <<http://www.licenciamentoambiental.eng.br/energia-a-partir-do-metano-de-etes/>>. Acesso em: 26 mai. 2010.

ENERGIA renovável. Disponível em: <www.biodieselbr.com/energia/alternativa/energia-renovavel.htm>. Acesso em: 20 jan 2011.

FAVA, M. **Uso de biomassa para produção de energia e desenvolvimento sustentável**. Monografia de conclusão de curso. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais - Campus Inconfidentes. Inconfidentes, 2009.

FERNANDES, J. O. **Estudos de melhorias do processo de aproveitamento de resíduos do tratamento de esgotos sanitários para geração de biocombustíveis**. Monografia. Universidade Federal do Ceará. Departamento de Engenharia Química. Fortaleza, 2010.

FERNANDES, F. *et al.* Avaliação de alternativas e gerenciamento do lodo na ETE. In: ANDREOLI, C. V.; SPERLING, M.V.; FERNANDES, F. **Lodo de Esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: FCO, 2001. p. 299- 483

FERREIRA, A. C.; ANDREOLI, C. V.; JÜRGENSEN, D. Produção e Características dos Biossólidos. In: ANDREOLI, C. V. **Uso e Manejo do Lodo de Esgoto na Agricultura**. Rio de Janeiro: Programa de Pesquisa em Saneamento Básico, 1999.

FOELKEL, C. Resíduos Sólidos Industriais do Processo de Fabricação de Celulose e Papel de Eucalipto. Parte 03: Lodos & Lodos. **Eucalyptus Online Book & Newsletter**. Associação Brasileira de Celulose e Papel, 2010. Disponível em: www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT20_LODOS.pdf. Acesso em: 10 jun 2011.

GARCIA, R. **Combustíveis e Combustão Industrial**. Rio de Janeiro: Interciência, 2002.

GASPAR, R. M. B. L. **Utilização de Biodigestores em Pequenas e Médias Propriedades Rurais com Ênfase na Agregação de valor: Um Estudo de Caso na Região de Toledo-Pr**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas)- Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

GRAUER, A.;KAWANO, M. Boletim Informativo da Bolsa de Reciclagem, Ano I, No 5 - NOV/DEZ-2001. Disponível em < www.bolsafiep.com.br>. Acesso em: 04 de fev de 2011.

GOLDENBERG, J. *The Case for Energy Renewable*. In: International Conference for Renewable Energies, 2004, Bonn. Thematic Background Paper, Alemanha, 2004.

GOLDEMBERG, J. Biomassa e energia. **Química Nova**, Vol. 32, nº 03. São Paulo - SP, 2009. Disponível em: < www.scielo.br/>. Acesso em: 30 de jan de 2011.

GÓMEZ, E.O.; ROCHA, J. D.; PÉREZ, J.M.M; PÉREZ, L.E.B. Pirólise Rápida de Materiais Lignocelulósicos para a Obtenção de Bioóleo. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O (org.). **Biomassa para energia**. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2008. p. 353-418

GUARDABASSI, P. M. **Sustentabilidade da biomassa como fonte de energia: perspectivas para países em desenvolvimento**. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

GUTIERREZ, L.A.C.L.; MACHADO, L.C.G.T. Produção e Gerenciamento de lodo na Região Metropolitana de Belém. In: PEREIRA, J. A. R. (org.). **Saneamento ambiental em áreas urbanas: esgotamento sanitário na Região Metropolitana de Belém**. Belém: UFPA/NUMA, EDUFPA, 2003. p. 181- 197.

JENKINS, B.M. *Fuel properties for biomass materials*. International Symposium on Application and Management of Energy in Agriculture: The Role of Biomass Fuels. Delhi, 21-23 maio, 1990.

JENKINS, B.M.; BAXTER, L.L.; MILES Jr, T.R.; MILES, T.R. *Combustion properties of biomass*. **Fuel Processing Technology**, 54, p.17-46, 1998.

JORDAN, R.A. **Desenvolvimento de Uma Bomba de Calor Água – Água Acionada a Biogás para Utilização em Processos de Aquecimento e Resfriamento em Sistemas de**

Produção de Leite. Tese de doutorado, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2005.

KHAN, A.A.; JONGA, W.D.; JANSSENS, P.J.; SPLIETHOFF, H. *Biomass Combustion in fluidized bed boilers: potential problems and remedies.* **Fuel Process Technol.** 2009, 90, 21–50.

LAFABE- Laboratório de Fontes Alternativas de Energias. Disponível em: <www.dee.ufrj.br/lafae/txt_correntes.html>. Acesso em: 24 jan 2011.

LARA, A.I.; ANDREOLI, C.V.; PEGORINI, E. S. Avaliação dos Impactos Ambientais e Monitoramento da Disposição Final do Lodo. In: ANDREOLI, C. V.; SPERLING, M.V.; FERNANDES, F. **Lodo de Esgotos: tratamento e disposição final.** Belo Horizonte: FCO, 2001. p. 465- 483

LORA, E.E.S.; ANDRADE, R.V.; SANCHEZ, C.G; GÓMEZ, E.O.; SALES, C.A.V.B. Gaseificação. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O (org.). **Biomassa para energia.** Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2008. p. 241-332

LUDUVICE, M.; FERNANDES, F. Principais Tipos de Transformação e Descarte do Lodo. In: ANDREOLI, C. V.; SPERLING, M.V.; FERNANDES, F. **Lodo de Esgotos: tratamento e disposição final.** Belo Horizonte: FCO, 2001. p. 399- 423

LUENGO, C. A.; FELFLI, F.E.F.; BEZZON, G. Pirólise e Torrefação de Biomassa. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O (org.). **Biomassa para energia.** Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2008. p. 333-352

LUE-HING, C.; MATTHEWS, P.; NÀMER, J.; OKUNO, N.; SPINOSA, L. *Sludge management in highly urbanized areas.* **Water Science and Technology.** 1996, 34, 24–517

MACEDO, G. A. F. Experiência da Cedae com tratamento de lodo de ETA e ETE. In: OLIVEIRA, C.; GIL, G.; BATISTA, D.M.A. (org.). **Inovações Tecnológicas no saneamento: lodos e odores.** Porto Alegre: ABES/RS, 2008. p.42

MACEDO, J. C. F. **Análise Térmica e Ambiental da Queima do Lodo Primário da Fabricação de Papel e Celulose em Caldeira de Biomassa à Grelha.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006.

MCKENDRY, P. *Energy production from biomass (part 1): overview of biomass.* **Bioresource Technology,** 83, p.37-46, 2002.

MELO, W.J.; MARQUES, M.O. Potencial do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para plantas In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. **Impacto Ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto.** EMBRAPA – Meio Ambiente, 2000. p.109-112.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Nacional de Energia 2030 (PNE 2030).** Brasília, 2007. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro : EPE, 2007.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balço Energético Nacional (BEN)- 2009.** Brasília, 2009. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro : EPE, 2009.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balço Energético Nacional (BEN)- 2010**. Brasília, 2010. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro : EPE, 2010.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Resenha Energética Brasileira- 2009**. Brasília, 2009. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro : EPE, 2009.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) - 2019**. Brasília, 2010. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro : EPE, 2010.

MORAES, L.C. **Caracterização, em escala de laboratório, do produto proveniente da calcinação do lodo de esgoto resultante do tratamento de águas residuárias**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

NOGUEIRA, L.A.H.; LORA, E.E.S. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. Rio de Janeiro: Interciência, 2. Ed. 2003. 200 p.

NUVOLARI, A.; TELLES, D.A; RIBEIRO, J.T.; MIYASHITA, N.J.; Rodrigues, R.B.; ARAUJO, R. **Esgoto sanitário: coleta, transporte, tratamento e reuso agrícola**. São Paulo. São Paulo, 2003.

OBERNBERGER, I.; BRUNNER, T.; BÄRNTHALER, G. *Chemical properties of solid biofuels – significance and impact*. **Biomass & Bioenergy**, 30, p.973-982, 2006.

OTERO, M.; C. DÍEZ,C.; CALVO, L.F.; GARCÍA, A.I.; MORÁN, A. *Analysis of the co-combustion of sewage sludge and coal by TG-MS*. **Biomass and Bioenergy**, 2002, 22, 319 – 329.

PAIVA, G. B. **Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, Tratamento de Esgoto e Desenvolvimento Sustentável: Um Estudo Econômico**. Dissertação de Mestrado. Centro de Ciências Jurídicas e Econômicas da Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2008.

PANESI, A. R. Q. **Fundamentos de Eficiência Energética**. São Paulo: Ensino Profissional, 2006.

PARÁ. Lei nº 5.887, 09 de maio de 1995. Dispõe sobre a Política Estadual do Meio Ambiente e dá outras providências. Relator: Diário Oficial do Estado do Pará. Belém, 9 de maio de 1995.

PARIKH, J.; CHANNIWALA, S.A.; GHOSAL, G.K. *A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels*. **Fuel**. 2005, 84, 487-494.

PARODI, F.A.; SANCHEZ, C. G. **Aspectos da co-gaseificação de resíduos agroindustriais e municipais**. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas. Disponível em: <<http://www.proceedings.scielo.br/>>. Acesso em: 07 jul 2011.

PEREIRA, M. J. **Energia: Eficiência e Alternativas**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna Ltda., 2009.

PEREIRA, J. A. R. Geração de resíduos industriais e controle ambiental. **Saber**. Ciências exatas e tecnologia, Belém, v. 3, Edição Especial, p. 121-139, 2001.

PEREIRA, J. A. R.; NAKAZATO, C. D.; MUNIZ, S.T.G. Gestão do lodo de fossa/tanque séptico. In: ANDREOLI, C. V. (coordenador). **Lodo de fossa e tanque séptico: caracterização, tecnologias de tratamento, gerenciamento e destino final**. Rio de Janeiro: ABES, 2009. p. 283-326.

PEREIRA, J. A. R.; SILVA, J. M. S. **Rede coletora de esgoto sanitário: projeto, construção e operação**. 2ª Ed. revista e ampliada. Belém, 2010.

PINHEIRO, R. M. **Reciclagem de Lodo Primário da Estação de Tratamento de Efluentes da Indústria de Papel Em Cerâmica Vermelha**. Dissertação de Mestrado. Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense. Campos dos Goytacazes – Rj, 2008.

PORTAL Brasileiro de Energias Renováveis. Disponível em: <www.energiarenovavel.org>. Acesso em: 24 jan 2011.

PORTAL Energia. Disponível em: <www.portal-energia.com>. Acesso em: 24 jan 2011.

PORTAL São Francisco. Disponível em: <www.portalsaofrancisco.com.br/alfa/meio-ambiente-fontes-alternativas-de-energia/index.php>. Acesso em: 24 jan 2011.

RANTHUM, R. **Modelagem e Implementação de Um Sistema de Informação para Otimização de Exames de Diagnósticos por Imagens**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção- PPGEP). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2005.

RENDEIRO, G. *et al.* **Combustão e gasificação de biomassa sólida- Soluções energéticas para a Amazônia**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. 192p.

REZENDE, S. O. **Sistemas Inteligentes: fundamentos e aplicações**. Barueri, SP: Manole, 2005.

RICUPERO, R. Haverá vida na Terra depois do petróleo? **Revista Eco 21**, Ano XIV, Edição 96, Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: < <http://www.eco21.com.br/edicoes/edicoes.asp?edição=96> >. Acesso em: 30 jan. 2009.

RITE Tokyo Central Laboratory. *Development of mix combustion technology of coal and biomass for power plant. Report for Global Environment Protection Technology Project*, 2005, FY2001-2004.

SAIDUR, R.; ABDELAZIZ, E.A.; DEMIRBAS, A.; HOSSAIN, M.S.; MEKHILEF, S. A *Review on biomass as a fuel for boilers*. **Renew. Sustain. Energy Rev.** 2011, 15, 2262–2289.

SAMPAIO, A. Estratégias para o tratamento da questão dos lodos. In: OLIVEIRA, C.; GIL, G.; BATISTA, D.M.A. (org.). **Inovações Tecnológicas no saneamento: lodos e odores**. Porto Alegre: ABES/RS, 2008. p.26

SAMURA, K. A. Lodos de ETAs e ETEs da Sabesp- RMSP. In: OLIVEIRA, C.; GIL, G.; BATISTA, D.M.A. (org.). **Inovações Tecnológicas no saneamento: lodos e odores**. Porto Alegre: ABES/RS, 2008. p.24.

SÁNCHEZ, C. G. **Tecnologia da Gaseificação de Biomassa**. Campinas: Editora Átomo, 2010.

SANEPAR. **Manual técnico para utilização agrícola do lodo de esgoto no Paraná**. Curitiba, 1997.

SANTOS, A. D. **Estudo das Possibilidades de Reciclagem dos Resíduos de Tratamento de Esgoto da Região Metropolitana de São Paulo**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DO PARANÁ - SEMA (2006). **Resolução nº 054**, de 22 de dezembro de 2006. Definir critérios para o Controle da Qualidade do Ar como um dos instrumentos básicos da gestão ambiental para proteção da saúde e bem estar da população e melhoria da qualidade de vida. Relator: Diário Oficial, Curitiba, 2006.

SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DO PARANÁ - SEMA (2008). **Resolução nº 042**, de 22 de julho de 2008. Estabelece critérios para a queima de resíduos em caldeiras e dá outras providências. Relator: Diário Oficial, Curitiba, 2008.

SELVIG, W.A.; GIBSON, I.H.. *Calorific Value of Coal*. In: LOWRY, H.H. *Chemistry of Coal Utilization*. Wiley, New York, 1945. Vol. 1, P. 139.

SILVA, S.M.C.P. *et al.* Principais contaminantes do lodo. In: ANDREOLI, C. V.; SPERLING, M.V.; FERNANDES, F. **Lodo de Esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: FCO, 2001. P. 69- 121.

SKOULU, V.; ZABANIOTOU, A. *Investigation of agricultural and animal wastes in Greece and their allocation to potential application for energy production*. **Renew. Sustain. Energy Rev.** 2007, 11, 1698–1719.

SMA/CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Normas Técnicas. Procedimento para utilização de resíduos em fornos de produção de clínquer. Dez/2003. Disponível em: < <http://www.cetesb.sp.gov.br> >. Acesso em: 12 mai. 2011.

SOPRO verde na indústria de energia. Mundo Corporativo, Informações e análise para decisores, nº 27, janeiro-março 2010. São Paulo: Deloitte Touche Tohmatsu, 2010.

SPERLING, C.C. Esgotos Sanitários. In: BARROS, R. T. V. *et al.* **Manual de Saneamento e Proteção Ambiental para os Municípios**. Volume II. Belo Horizonte: escola de Engenharia da UFMG, 1995. P. 113-160.

SPERLING, M. Von; GONÇALVES, R.F. Lodo de esgoto: características e produção. In: ANDREOLI, C. V.; SPERLING, M.V.; FERNANDES, F. **Lodo de Esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: FCO, 2001. p. 17- 67.

UEMURA, Y.; OMAR, W.; TSUTSUI, T.; SUBBARAO, D.; YUSUP, S. *Relationship between calorific value and elementary composition of torrefied lignocellulosic biomass*. **Journal of Applied Sciences**, 10, 2010, in press.

VAMVOUKA, D; ZOGRAFOS, D. *Predicting the behavior of ash from agricultural wastes using combustion*. **Fuel**. 2004, 83, 295–304.

VAN HAANDEL, A. Lodos de ETAs e ETEs- visão geral, importância do tratamento, minimização e disposição adequada. In: OLIVEIRA, C.; GIL, G.; BATISTA, D.M.A. (org.). **Inovações Tecnológicas no saneamento: lodos e odores**. Porto Alegre: ABES/RS, 2008. p.18

VIRMOND, E. **Aproveitamento do Lodo de Tratamento Primário de Efluentes de um Frigorífico como Fonte de Energia**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2007

VIEIRA, G. E. G. **Fontes alternativas de Energia – Processo aperfeiçoado de Conversão Térmica**. Tese de Doutorado. Universidade Federal Fluminense, Instituto de Química. Rio de Janeiro, 2004.

WERTHER, J.; OGADA, T. *Sewage sludge combustion*. **Progress in Energy and Combustion Science**. 1999, 25, 55–116.

**APÊNDICE A- LISTAGEM EMITIDA PELO SISTEMA DAS
VARIÁVEIS PARA AVALIAÇÃO DE LODO DE ESGOTO
SANITÁRIO COMO BIOMASSA NA GERAÇÃO DE ENERGIA**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
Sistema para avaliar lodos de esgoto como biomassa na geração de energia em processos de combustão

Composição Elementar

<i>Variável</i>	<i>Descrição</i>
C	Teor de Carbono em Base Seca
H	Teor de Hidrogênio em base seca
S	Teor de Enxofre em base seca
O	Teor de Oxigênio em base seca
Cl	Teor de Cloro em base seca
W	Teor de Umidade em kg de água por kg do material em base seca
A	Teor de Cinzas em base seca
N	Teor de Nitrogênio em base seca

Composição Imediata

<i>Variável</i>	<i>Descrição</i>
F	Teor de carbono fixo em base seca
V	Teor de voláteis em base seca

Contaminantes

<i>Variável</i>	<i>Descrição</i>
EnsaioLixiviado	Realização de ensaios de Lixiviação de Resíduos no lodo (sim/não)
AsLX	Quantidade de Arsênio no lixiviado em mg/L
BaLX	Quantidade de Bário no lixiviado em mg/L
CdLX	Quantidade de Cádmio no lixiviado em mg/L
PbLX	Quantidade de Chumbo no lixiviado em mg/L
CrLX	Quantidade de Cromo no lixiviado em mg/L
FluoretoLX	Quantidade de Fluoreto no lixiviado em mg/L
HgLX	Quantidade de Mercúrio no lixiviado em mg/L
PrataLX	Quantidade de Prata no lixiviado em mg/L
SeLX	Quantidade de Selênio no lixiviado em mg/L
As	Quantidade de Arsênio na amostra bruta em mg/Kg
Be	Quantidade de Berílio na amostra bruta em mg/Kg
Pb	Quantidade de Chumbo na amostra bruta em mg/Kg
CN	Quantidade de Cianeto na amostra bruta em mg/Kg
Cr	Quantidade de Cromo VI na amostra bruta em mg/Kg
IFenóis	Quantidade de Índice de Fenóis na amostra bruta em mg/Kg
Hg	Quantidade de Mercúrio na amostra bruta em mg/Kg
Se	Quantidade de Selênio na amostra bruta em mg/Kg
Vanádio	Quantidade de Vanádio na amostra bruta em mg/Kg
MetalsPesados	Realização de ensaios para quantificação de metais pesados na amostra bruta do lodo em mg/Kg (sim / não)

Gases e MPs

<i>Variável</i>	<i>Descrição</i>
SO2	Dióxido de Enxofre em mg/Nm ³
HCl	Cloro de Hidrogênio em mg/Nm ³
NO2	Dióxido de Nitrogênio em mg/Nm ³
CO	Monóxido de Carbono em ppm/Nm ³
HFl	Fluoreto de Hidrogênio em mg/Nm ³
DF	Dioxinas e Furanos: dibenzo-p-dioxinas e dibenzo-p-furanos, expressos em TEC (total de toxicidade equivalente) da 2,3,7,8 TCDD (tetracloro-dibenzo-para-dioxina) em ng/Nm ³
MP	Material Particulado em mg/Nm ³
MPI	Material Particulado comagrupamento de cádmio, mercúrio e talco em

	mg/Nm ³
MPII	Material particulado com agrupamento de arsênio, cobalto, níquel, telúrio e selênio em mg/Nm ³
MPIII	Material particulado com agrupamento de cobre, estanho, flúor, manganês, platina, paládio, ródio e vanádio em mg/Nm ³
EnsaioEGMP	Realização de ensaios e/ou cálculos de Emissões Gasosas e/ou Material Particulado (Sim/Não)

Poder Calorífico

<i>Variável</i>	<i>Descrição</i>
PCI	Poder Calorífico Inferior em MJ/kg (base seca)
Energia	Energia bruta prevista em kWh/kg do lodo avallado
PCS	Poder Calorífico Superior em MJ/kg (base seca)

Receita Bruta

<i>Variável</i>	<i>Descrição</i>
QuantLodo	Quantidade disponível de lodo de esgoto seco em toneladas/ dia
Rendimento	Rendimento percentual na transformação para energia elétrica (%)
Receita	Receita bruta diária prevista com a venda da energia gerada a partir do lodo para distribuidoras de energia elétrica

**APÊNDICE B- LISTAGEM EMITIDA PELO SISTEMA DAS
REGRAS DE LÓGICA CADASTRADAS NA BASE DE
CONHECIMENTO PARA AVALIAÇÃO DE LODO DE
ESGOTO SANITÁRIO COMO BIOMASSA NA GERAÇÃO DE
ENERGIA**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
Sistema para avaliar lodos de esgoto como biomassa na geração de energia em processos de combustão

Base de Conhecimento: Avaliação de Lodos de Esgoto como Biomassa para Gerar Energia em Processos de Combustão

REGRA	EXPRESSÃO	MENSAGEM	OPERAÇÃO
Poder Calorífico Inferior do Lodo em MJ/kg	PCI ↔ PND		
Se PCS = PND	PCS ↔ PND		Verdadeiro
Se %V = PND ou %F = PND	V ↔ PND F ↔ PND	O poder calorífico inferior do lodo é calculado analiticamente utilizando dados da análise química elementar.	Verdadeiro
Cálculo PCS com análise elementar	$PCS = 0.3491 * C + 1.1783 * H + 0.1005 * S - 0.1034 * O - 0.0151 * N - 0.0211 * A$		Fórmula
Cálculo do PCI em MJ/kg	$PCI = (PCS * 1000 - 219.60 * H - 24.40 * W) / 1000$		Fórmula
Se %V != PND e %F != PND	V != PND && F != PND	O Poder Calorífico Inferior do lodo é calculado analiticamente utilizando dados da análise química imediata e o teor de hidrogênio.	Verdadeiro
Cálculo PCS com análise Imediata	$PCS = 0.3536 * F + 0.1559 * V - 0.0078 * A$		Fórmula
Cálculo do PCI em MJ/kg	$PCI = (PCS * 1000 - 219.60 * H - 24.40 * W) / 1000$		Fórmula
Se PCS != PND	PCS != PND		Verdadeiro
Cálculo do PCI em MJ/kg	$PCI = (PCS * 1000 - 219.60 * H - 24.40 * W) / 1000$		Fórmula
Avaliação de problemas de Incrustações e corrosão	PCI != PND		
Se %Cl = PND	Cl ↔ PND	Teor de Cloro não será avaliado! Para Teor de Cloro acima de 0,1% corrosão induzida e problemas de emissão de HCl podem ser esperados.	Verdadeiro
Se %Cl > 0,1%	Cl > 0.1	Teor de Cloro acima de 0,1%! Problemas de corrosão induzida podem ser esperados.	Falso
Se %A = PND	A ↔ PND	Teor de cinzas não é avaliado! Para Teor de Cinzas acima de 30% problemas de incrustações em equipamentos podem ser esperados.	Verdadeiro
Se %A > 30%	A > 30	Teor de Cinzas acima de 30%! Problemas de incrustações em equipamentos podem ser esperados.	Falso
Avaliação do Potencial Energético do lodo em processos de combustão	PCI != PND		
Se PCI < 4 MJ/kg Lodo Classe IV	PCI < 4	* Poder Calorífico Inferior previsto do lodo avaliado = %PCI% MJ/kg * Lodo com poder calorífico muito baixo! * Lodo Classe IV: Não apresenta potencial para gerar energia em processos de combustão.	Verdadeiro
Cálculo da energia bruta prevista em kWh/kg do lodo avaliado	Energia = PCI * 0.26	Energia bruta prevista = %Energia% kWh/kg de lodo Receita bruta prevista com a venda da energia gerada a partir do lodo para distribuidoras de energia elétrica = R\$ 144,20 / MWh ou R\$ 0,14 / kWh	Fórmula
Se 4 <= PCI < 10,467 MJ/kg Lodo Classe III	4 <= PCI && PCI < 10.467	* Poder calorífico inferior previsto do lodo avaliado = %PCI% MJ/kg * Lodo Classe III: Apresenta baixo potencial para gerar energia em processos de combustão. * Aplicações: - Aplicações Recomendadas: Co-processamento em geral, exceto em fornos de clínquer para fabricação de cimento, respeitadas as condições abaixo: 1. Teor de cinzas do lodo abaixo de 50%. Caso o teor de cinzas seja maior que	Verdadeiro

REGRA	EXPRESSÃO	MENSAGEM	OPERAÇÃO
		<p>50%, só é recomendável a queima do lodo quando a empresa for obrigada pelo legislador/controlador ambiental, ou quando quiser eliminar o lodo para evitar aterrá-lo. Caso contrário, é tecnicamente desaconselhado em função dos problemas de incrustações em equipamentos.</p> <p>2. Baixo conteúdo de óxidos básicos de fósforo e óxidos de ferro na composição das cinzas do lodo.</p> <p>Caso o lodo apresente elevado conteúdo de óxidos básicos de fósforo e óxidos de ferro na composição de suas cinzas, só é recomendável sua utilização para co-processamentos e em proporções não superiores a 15%. Caso contrário, é tecnicamente desaconselhado em função da forte tendência à formação de depósitos e incrustação nos equipamentos.</p> <p>- Aplicações Não-Recomendadas: Co-processamento em fornos de clínquer para fabricação de cimento e como combustível principal em, centrais à biomassa para geração de energia elétrica, uso doméstico, caldeiras, geradores de vapor, fornos, formilhas, estufas e secadores para geração e uso de energia térmica, gaseificadores e fornos de cimento.</p>	
Cálculo da energia bruta prevista em kWh/kg do lodo	Energia = PCI * 0.28	<p>Energia bruta prevista = %Energia% kWh/kg</p> <p>Receita bruta prevista com a venda da energia gerada a partir do lodo para distribuidoras de energia elétrica = R\$ 144,20 / MWh ou R\$ 0,14 / kWh</p>	Fórmula de lodo
Se 10,467 <= PCI < 10,88 MJ/Kg Lodo Classe II	10.467 <= PCI && PCI < 10.88	<p>* Poder Calorífico Inferior previsto do lodo avaliado = %PCI% MJ/kg</p> <p>* Lodo Classe II: Apresenta médio potencial para gerar energia em processos de combustão</p> <p>* Aplicações:</p> <p>- Recomendadas: Centrais à biomassa para geração de energia elétrica, uso doméstico, co-processamento em geral, exceto em fornos de clínquer para a fabricação de cimento, respeitadas as condições abaixo:</p> <p>1. Teor de cinzas do lodo abaixo de 50%. Caso o teor de cinzas seja maior que 50%, só é recomendável a queima do lodo quando a empresa for obrigada pelo legislador/controlador ambiental, ou quando quiser eliminar o lodo para evitar aterrá-lo. Caso contrário, é tecnicamente desaconselhado em função dos problemas de incrustações em equipamentos.</p> <p>2. Baixo conteúdo de óxidos básicos de fósforo e óxidos de ferro na composição das cinzas do lodo.</p> <p>Caso o lodo apresente elevado conteúdo de óxidos básicos de fósforo e óxidos de ferro na composição de suas cinzas, só é recomendável sua utilização para co-processamentos e em proporções não superiores a 15%. Caso contrário, é tecnicamente desaconselhado em função da forte tendência à formação de depósitos e incrustação nos equipamentos.</p> <p>- Não-Recomendadas: Co-processamento em fornos rotativos de clínquer para a fabricação de cimento e como combustível principal em, caldeiras, geradores de vapor, fornos, formilhas, estufas e secadores para a geração e uso de energia térmica, gaseificadores e fornos de cimento.</p>	Verdadeiro

REGRA	EXPRESSÃO	MENSAGEM	OPERAÇÃO
Cálculo da energia bruta prevista em kWh/kg do lodo avaliado	Energia = PCI * 0.28	Energia bruta prevista = %Energia% kWh/kg de lodo Receita bruta prevista com a venda da energia gerada a partir do lodo para distribuidoras de energia elétrica = R\$ 144,20 / MWh ou R\$ 0,14 / kWh	Fórmula
Se 10,88 <= PCI < 11,618 MJ/kg Lodo Classe II	10.88 <= PCI && PCI < 11.618	* Poder calorífico inferior previsto do lodo avaliado = %PCI% MJ/kg de lodo * Lodo Classe II: Apresenta médio potencial para gerar energia em processos de combustão. * Aplicações: - Aplicações Recomendadas: Caldeiras, geradores de vapor, fornos, formilhas, estufas e secadores para a geração e uso de energia térmica, gaseificadores, centrais à biomassa para a geração de energia elétrica, uso doméstico e co-processamento em geral exceto em fornos de clínquer para a fabricação de cimento, respeitadas as condições abaixo: 1. Teor de cinzas do lodo abaixo de 50%. Caso o teor de cinzas seja maior que 50%, só é recomendável a queima do lodo quando a empresa for obrigada pelo legislador/controlador ambiental, ou quando quiser eliminar o lodo para evitar aterrá-lo. Caso contrário, é tecnicamente desaconselhado em função dos problemas de incrustações em equipamentos. 2. Baixo conteúdo de óxidos básicos de fósforo e óxidos de ferro na composição das cinzas do lodo. Caso o lodo apresente elevado conteúdo de óxidos básicos de fósforo e óxidos de ferro na composição de suas cinzas, só é recomendável sua utilização para co-processamentos e em proporções não superiores a 15%. Caso contrário, é tecnicamente desaconselhado em função da forte tendência à formação de depósitos e incrustação nos equipamentos. - Aplicações Não-Recomendadas: Co-processamento em fornos de clínquer para a fabricação de cimento e fornos de cimento como combustível principal.	Verdadeiro
Cálculo da energia bruta prevista em kWh/kg do lodo avaliado	Energia = PCI * 0.28	Energia bruta prevista = %Energia% kWh/kg de lodo Receita bruta prevista com a venda da energia gerada a partir do lodo para distribuidoras de energia elétrica = R\$ 144,20 / MWh ou R\$ 0,14 / kWh	Fórmula
Se 11,618 <= PCI < 18,08 MJ/kg Lodo Classe II	11.618 <= PCI && PCI < 18.08	* Poder calorífico inferior previsto do lodo avaliado = %PCI% MJ/kg * Lodo Classe II: Apresenta médio potencial para gerar energia em processos de combustão. * Aplicações: - Aplicações Recomendadas: Caldeiras, geradores de vapor, fornos, formilhas, estufas e secadores para a geração e uso de energia térmica, gaseificadores, centrais à biomassa para a geração de energia elétrica, uso doméstico e co-processamento em geral, inclusive co-processamento em fornos rotativos de clínquer para a fabricação de cimento, respeitadas as condições abaixo: 1. Teor de cinzas do lodo abaixo de 50%. Caso o teor de cinzas seja maior que 50%, só é recomendável a queima do lodo quando a empresa for obrigada pelo legislador/controlador ambiental, ou quando quiser eliminar o lodo para evitar aterrá-lo. Caso contrário, é tecnicamente	Verdadeiro

REGRA	EXPRESSÃO	MENSAGEM	OPERAÇÃO
		<p>desaconselhado em função dos problemas de incrustações em equipamentos.</p> <p>2. Baixo conteúdo de óxidos básicos de fósforo e óxidos de ferro na composição das cinzas do lodo.</p> <p>Caso o lodo apresente elevado conteúdo de óxidos básicos de fósforo e óxidos de ferro na composição de suas cinzas, só é recomendável sua utilização para co-processamentos e em proporções não superiores a 15%. Caso contrário, é tecnicamente desaconselhado em função da forte tendência à formação de depósitos e incrustação nos equipamentos.</p> <p>- Aplicações Não-Recomendadas: Fornos de cimento como combustível principal.</p>	
Cálculo da energia bruta prevista em kWh/kg do lodo avaliado	Energia = PCI * 0.28	Energia bruta prevista = %Energia% kWh/kg de lodo Receita bruta prevista com a venda da energia gerada a partir do lodo para distribuidoras de energia elétrica = R\$ 144,20 / MWh ou R\$ 0,14 / kWh	Fórmula
Se PCI >= 18,08 MJ/Kg Lodo Classe I	PCI >= 18.08	<p>* Poder calorífico inferior previsto do lodo avaliado = %PCI% MJ/kg de lodo</p> <p>* Lodo Classe I: Apresenta alto potencial para gerar energia em processos de combustão.</p> <p>* Aplicações Recomendadas: Fornos de cimento, caldeiras, geradores de vapor, fornos, formilhas, estufas e secadores para a geração e uso de energia térmica, gaseificadores e centrais à biomassa para a geração de energia elétrica, respeitadas as condições abaixo:</p> <p>1. Teor de cinzas do lodo abaixo de 50%. Caso o teor de cinzas seja maior que 50%, só é recomendável a queima do lodo quando a empresa for obrigada pelo legislador/controlador ambiental, ou quando quiser eliminar o lodo para evitar aterrá-lo. Caso contrário, é tecnicamente desaconselhado em função dos problemas de incrustações em equipamentos.</p> <p>2. Baixo conteúdo de óxidos básicos de fósforo e óxidos de ferro na composição das cinzas do lodo.</p> <p>Caso o lodo apresente elevado conteúdo de óxidos básicos de fósforo e óxidos de ferro na composição de suas cinzas, só é recomendável sua utilização para co-processamentos e em proporções não superiores a 15%. Caso contrário, é tecnicamente desaconselhado em função da forte tendência à formação de depósitos e incrustação nos equipamentos.</p>	Verdadeiro
Energia bruta prevista em kWh/kg do lodo avaliado	Energia = PCI * 0.28	Energia bruta prevista = %Energia% kWh/kg de lodo Receita bruta prevista com a venda da energia gerada a partir do lodo para distribuidoras de energia elétrica = R\$ 144,20 / MWh ou R\$ 0,14 / kWh	Fórmula
Se QuantLodo != PND e PCI >= 4 calcula a receita bruta prevista	QuantLodo != PND && PCI >= 4		Verdadeiro
Se Rendimento != PND	Rendimento != PND		Verdadeiro
Cálculo da receita bruta prevista	Receita = QuantLodo * Energia * (Rendimento / 100) * 144.20	Rendimento considerado na transformação do lodo em energia elétrica = %Rendimento% Receita bruta diária prevista com a venda da energia gerada a partir %QuantLodo% toneladas/dia de lodo para distribuidoras de energia elétrica = R\$ %Receita% / dia	Fórmula
Se Rendimento == PND	Rendimento == PND		Verdadeiro
Cálculo da receita bruta prevista	Receita = QuantLodo * Energia * 0.5 * 144.20	Rendimento considerado na transformação do lodo em energia elétrica = 50%	Fórmula

REGRA	EXPRESSÃO	MENSAGEM	OPERAÇÃO
		Receita bruta diária prevista com a venda da energia gerada a partir %QuantLodo% toneladas/dia de lodo para distribuidoras de energia elétrica = R\$ %Receita% / dia	
Foram realizados ensaios e/ou cálculos de EG e/ou MP?	EnsaloEGMP == NAO	Não foram realizados ensaios e/ou cálculos de emissões gasosas e materiais particulados! Não é possível realizar a avaliação da Poluição Atmosférica conforme recomendado pela Resolução 316/2002 (CONAMA).	
Se SO2 > 280 mg/Nm³ limite ultrapassado	SO2 > 280	Limite máximo de Dióxido de Enxofre ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Dióxido de Enxofre forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.	Falso
Se SO2 - PND e %S>0,2% limite de S ultrapassado	SO2 == PND && S > 0.2	Teor de Enxofre acima de 0,2%! Problemas de emissão de Dióxido de Enxofre (SO2) podem ser esperados!	Falso
Se SO2-PND e %S-PND limite de SO2 não avaliado	SO2 == PND && S == PND	Teor de Enxofre (%S) e/ou quantidade Dióxido de Enxofre (SO2) não informado(s)! Limite de Dióxido de Enxofre não avaliado!	Falso
Se SO2 <= 280 mg/Nm³ limites de SO2 dentro da Norma	SO2 <= 280 && SO2 >= 0	Emissões de Dióxido de Enxofre (SO2) estão de acordo com os limites estabelecidos na Resolução nº 316/2002 (CONAMA, 2002).	Falso
Se HCl > 80 mg/Nm³ limite HCl ultrapassado	HCl > 80	Limite máximo de Cloreto de Hidrogênio (HCl) ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Cloreto de Hidrogênio forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.	Falso
Se HCl - PND e %Cl > 0,1% limite de Cl ultrapassado	HCl == PND && Cl > 0.1	Teor de Cloro acima de 0,1%! Problemas de emissão de Cloreto de Hidrogênio (HCl) podem ser esperados! O lodo poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Cloreto de Hidrogênio forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado poderá oferecer riscos à população e/ou ao meio ambiente.	Falso
Se HCl-PND e %Cl- PND limite de HCl não avaliado	HCl == PND && Cl == PND	Teor de Cloro (%Cl) e/ou quantidade de Cloreto de Hidrogênio (HCl) não informado(s)! Limite de Cloreto de Hidrogênio não avaliado!	Falso
Se HCl <= 80 mg/Nm³ Limite de HCl dentro da Norma	HCl <= 80 && HCl >= 0	Emissões de Cloreto de Hidrogênio (HCl) estão de acordo com os limites estabelecidos na Resolução nº 316/2002 (CONAMA, 2002).	Falso
Se NO2 > 560 mg/Nm³ Limite de NO2 ultrapassado	NO2 > 560	Limite máximo de Dióxido de Nitrogênio (NO2) ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Dióxido de Nitrogênio (NO2) forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.	Falso
Se NO2-PND limite de NO2 não avaliado	NO2 == PND	Quantidade de Dióxido de Nitrogênio (NO2) não informada! Limite de Dióxido de Nitrogênio não avaliado!	Falso
Se NO2 <= 560 mg/Nm³ limite de NO2	NO2 <= 560 && NO2 >= 0	Emissões de Dióxido de Nitrogênio (NO2)	Falso

REGRA	EXPRESSÃO	MENSAGEM	OPERAÇÃO
dentro da norma		estão de acordo com os limites estabelecidos na Resolução nº 316/2002 (CONAMA, 2002).	
Se CO > 100 ppm/ Nm³ limite de CO ultrapassado	CO > 100	Limite máximo de Monóxido de Carbono (CO) ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Monóxido de Carbono forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.	Falso
Se CO=PND limite de CO não avaliado	CO == PND	Quantidade de Monóxido de Carbono (CO) não informada! Limite de Monóxido de Carbono não avaliado!	Falso
Se CO <= 100 ppm/ Nm³ limite de CO dentro da Norma	CO <= 100 && CO >= 0	Emissões de Monóxido de Carbono (CO) estão de acordo com os limites estabelecidos na Resolução nº 316/2002 (CONAMA, 2002).	Falso
Se HFI > 5 mg/Nm³ limite de HFI ultrapassado	HFI > 5	Limite máximo de Fluoreto de Hidrogênio ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Fluoreto de Hidrogênio (HFI) forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.	Falso
Se HFI=PND Limite de HFI não avaliado	HFI == PND	Quantidade de Fluoreto de Hidrogênio (HFI) não informada! Limite de Fluoreto de Hidrogênio (HFI) não avaliado!	Falso
Se HFI <= 5 mg/Nm³ limite de HFI dentro da norma	HFI <= 5 && HFI >= 0	Emissões de Fluoreto de Hidrogênio (HFI) estão de acordo com os limites estabelecidos na Resolução nº 316/2002 (CONAMA, 2002).	Falso
Se DF > 0,50 ng/Nm³ limite de DF ultrapassado	DF > 0.5	Limite máximo de Dioxinas e Furanos ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Dioxinas e Furanos forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.	Falso
Se DF=PND limite de DF não avaliado	DF == PND	Quantidade de Dioxinas e Furanos não informada! Limite de Dioxinas e Furanos não avaliado!	Falso
Se DF <= 0,50 ng/Nm³ limite de DF dentro da Norma	DF <= 0.5 && DF >= 0	Emissões de Dioxinas e Furanos estão de acordo com os limites estabelecidos na Resolução nº 316/2002 (CONAMA, 2002).	Falso
Se MP > 70 mg/Nm³ Limite de MP ultrapassado	MP > 70	Limite máximo de Material Particulado ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Material Particulado forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.	Falso
Se MP=PND limite de MP não avaliado	MP == PND	Quantidade de Material Particulado não informada! Limite de Material Particulado não avaliado!	Falso
Se MP <= 70 mg/Nm³ limites de MP dentro da Norma	MP <= 70 && MP >= 0	Emissões de Materiais Particulados estão de acordo com os limites estabelecidos na Resolução nº 316/2002 (CONAMA, 2002).	Falso
Se MPI > 0,28 mg/Nm³ limite de MPI ultrapassado	MPI > 0.28	Limite máximo de Material Particulado com agrupamento de cádmio (Cd), mercúrio (Hg), tálio (Tl) ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Material Particulado forem	Falso

REGRA	EXPRESSÃO	MENSAGEM	OPERAÇÃO
		tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.	
Se MPI=PND limite de MPI não avaliado	MPI == PND	Quantidade de Material Particulado com agrupamento de cádmio (Cd), mercúrio (Hg), tálio (Tl) não informada! Limite de Material Particulado com agrupamento de cádmio (Cd), mercúrio (Hg), tálio (Tl) não avaliado!	Falso
Se MPI <= 0,28 mg/Nm³ limite de MPI dentro da Norma	MPI <= 0.28 && MPI >= 0	Emissões de Materiais Particulados com agrupamento de cádmio (Cd), mercúrio (Hg), tálio (Tl) estão de acordo com os limites estabelecidos na Resolução nº 316/2002 (CONAMA, 2002).	Falso
Se MPII > 1,4 mg/Nm³ limite de MPII ultrapassado	MPII > 1.4	Limite máximo de Material Particulado com agrupamento de arsênio (As), cobalto (Co), níquel (Ni), telúrio (Te), selênio (Se) ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Material Particulado forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.	Falso
Se MPII=PND limite de MPII não avaliado	MPII == PND	Quantidade de Material Particulado com agrupamento de arsênio (As),cobalto (Co), níquel (Ni), telúrio (Te), selênio (Se) (MPII) não informada! Limite de Material Particulado com agrupamento de arsênio (As),cobalto (Co), níquel (Ni), telúrio (Te), selênio (Se) não avaliado!	Falso
Se MPII <= 1,4 mg/Nm³ limite de MPII dentro da Norma	MPII <= 1.4 && MPII >= 0	Emissões de Materiais Particulados com agrupamento de arsênio (As),cobalto (Co), níquel (Ni), telúrio (Te), selênio (Se) estão de acordo com os limites estabelecidos na Resolução nº 316/2002 (CONAMA, 2002).	Falso
Se MPIII > 7 mg/Nm³ limite de MPIII ultrapassado	MPIII > 7	Limite máximo de Material Particulado com agrupamento de cobre (Cu), estanho (Sn), flúor (F), manganês (Mn), platina (Pt), paládio (Pd), ródio (Rh), vanádio (V) ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Material Particulado forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.	Falso
Se MPIII=PND limite de MPIII não avaliado	MPIII == PND	Quantidade de Material Particulado com agrupamento de cobre (Cu), estanho (Sn), flúor (F), manganês (Mn), platina (Pt), paládio (Pd), ródio (Rh), vanádio (V) não informada! Limite de Material Particulado com agrupamento de cobre (Cu), estanho (Sn), flúor (F), manganês (Mn), platina (Pt), paládio (Pd), ródio (Rh), vanádio (V) não avaliado!	Falso
Se MPIII <= 7 mg/Nm³ limite de MPIII dentro da Norma	MPIII <= 7 && MPIII >= 0	Emissões de Materiais Particulados com agrupamento de cobre (Cu), estanho (Sn), flúor (F), manganês (Mn), platina (Pt), paládio (Pd), ródio (Rh), vanádio (V) estão de acordo com os limites estabelecidos na Resolução nº 316/2002 (CONAMA, 2002).	Falso
Se SO2 = PND e %S<=0,2% e %S>=0 não são esperados problemas com emissão de SO2	SO2 == PND && S <=0.2 && S >= 0	Teor de enxofre abaixo de 0,2%! Não são esperados problemas de emissões de SO2.	Falso
Foi realizado ensaio de Lixiviação de Resíduo no lodo?	EnsaioLixiviado == NAO	Não foi realizado ensaio Lixiviação de Resíduos no lodo! Não é possível realizar a avaliação da toxicidade (metais pesados) do lodo com base no ensaio de lixiviação conforme recomendado pela NBR 10004/04 (ABNT, 2004).	

REGRA	EXPRESSÃO	MENSAGEM	OPERAÇÃO
Se AsLX > 1 mg/L. Limite de AsLX ultrapassado	AsLX > 1	Limite máximo de Arsênio no lixiviado do lodo ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Arsênio forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.	Falso
Se AsLX-PND Limite de As no lixiviado não avaliado	AsLX == PND	Quantidade de Arsênio no lixiviado do lodo não informado! Limite de Arsênio no lixiviado do lodo não avaliado.	Falso
Se AsLX <= 1 mg/L. Limite de As no lixiviado dentro da norma	AsLX <= 1 && AsLX >= 0	Quantidade de Arsênio (As) no lixiviado do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/04 (ABNT, 2004).	Falso
Se BaLX > 70 mg/L. Limite de Ba no lixiviado ultrapassado	BaLX > 70	Limite máximo de Bário no lixiviado do lodo ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Bário forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.	Falso
Se BaLX-PND Limite de Ba no lixiviado não avaliado	BaLX == PND	Quantidade de Bário no lixiviado do lodo não informado! Limite de Bário no lixiviado do lodo não avaliado.	Falso
Se BaLX <= 70 mg/L. Limite de Ba no lixiviado dentro da norma	BaLX <= 70 && BaLX >= 0	Quantidade de Bário (Ba) no lixiviado do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/04 (ABNT, 2004).	Falso
Se CdLX > 0,5 mg/L. Limite máximo de Ca no lixiviado ultrapassado	CdLX > 0.5	Limite máximo de Cádmio no lixiviado do lodo ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Cádmio forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.	Falso
Se CdLX-PND Limite de Ca no lixiviado não avaliado	CdLX == PND	Quantidade de Cádmio no lixiviado do lodo não informado! Limite de Cádmio no lixiviado do lodo não avaliado.	Falso
Se CdLX <= 0,5 mg/L. Limite de Cd no lixiviado dentro da norma	CdLX <= 0.5 && CdLX >= 0	Quantidade de Cádmio (Cd) no lixiviado do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/04 (ABNT, 2004).	Falso
Se PbLX > 1 mg/L. Limite de Pb no lixiviado ultrapassado	PbLX > 1	Limite máximo de Chumbo no lixiviado do lodo ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Chumbo forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.	Falso
Se PbLX-PND Limite de Pb no lixiviado não avaliado	PbLX == PND	Quantidade de Chumbo no lixiviado do lodo não informado! Limite de Chumbo no lixiviado do lodo não avaliado.	Falso
Se PbLX <= 1 mg/L. Limite de Pb no lixiviado dentro da norma	PbLX <= 1 && PbLX >= 0	Quantidade de Chumbo (Pb) no lixiviado do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/04 (ABNT, 2004).	Falso
Se CrLX > 5 mg/L. Limite máximo de Cr no lixiviado ultrapassado	CrLX > 5	Limite máximo de Cromo no lixiviado do lodo ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Cromo forem tomadas. Caso	Falso

REGRA	EXPRESSÃO	MENSAGEM	OPERAÇÃO
		estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.	
Se CrLX=PND limite de Cr no lixiviado não avaliado	CrLX == PND	Quantidade de Cromo no lixiviado do lodo não informado! Limite de Cromo no lixiviado do lodo não avaliado.	Falso
Se CrLX <= 5 mg/L limite de Cr no lixiviado dentro da norma	CrLX <= 5 && CrLX >= 0	Quantidade de Cromo (Cr) no lixiviado do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/04 (ABNT, 2004).	Falso
Se FluoretoLX > 150 mg/L limite de Fluoreto no lixiviado ultrapassado	FluoretoLX > 150	Limite máximo de Fluoreto no lixiviado do lodo ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Fluoreto forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.	Falso
FluoretoLX=PND limite de Fluoreto no lixiviado não avaliado	FluoretoLX == PND	Quantidade de Fluoreto no lixiviado do lodo não informado! Limite de Fluoreto no lixiviado do lodo não avaliado.	Falso
Se FluoretoLX <= 150 mg/L limite de Fluoreto no lixiviado dentro da norma	FluoretoLX <= 150 && FluoretoLX >= 0	Quantidade de Fluoreto no lixiviado do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/04 (ABNT, 2004).	Falso
Se HgLX > 0,1 mg/L limite de Hg no lixiviado ultrapassado	HgLX > 0.1	Limite máximo de Mercúrio no lixiviado do lodo ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Mercúrio forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.	Falso
Se HgLX=PND limite de Hg no lixiviado não avaliado	HgLX == PND	Quantidade de Mercúrio no lixiviado do lodo não informado! Limite de Mercúrio no lixiviado do lodo não avaliado!	Falso
Se HgLX <= 0,1 mg/L limite de Hg dentro da norma	HgLX <= 0.1 && HgLX >= 0	Quantidade de Mercúrio (Hg) no lixiviado do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/04 (ABNT, 2004).	Falso
Se PrataLX > 5 mg/L limite Prata no lixiviado ultrapassado	PrataLX > 5	Limite máximo de Prata no lixiviado do lodo ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Prata forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.	Falso
Se PrataLX=PND limite de Prata no lixiviado não avaliado	PrataLX == PND	Quantidade de Prata no lixiviado do lodo não informada! Limite de Prata no lixiviado do lodo não avaliado.	Falso
Se PrataLX <= 5 mg/L limite de Prata no lixiviado dentro da norma	PrataLX <= 5 && PrataLX >= 0	Quantidade de Prata no lixiviado do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/04 (ABNT, 2004).	Falso
Se SeLX > 1 mg/L limite Se no lixiviado ultrapassado	SeLX > 1	Limite máximo de Selênio no lixiviado do lodo ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Selênio forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.	Falso

REGRA	EXPRESSÃO	MENSAGEM	OPERAÇÃO
Se SeLX=PND limite de Se no lixiviado não avaliado	SeLX == PND	Quantidade de Selênio no lixiviado do lodo não informada! Limite de Selênio no lixiviado do lodo não avaliado.	Falso
Se SeLX <= 1 mg/L limite de Se no lixiviado dentro da norma	SeLX <= 1 && SeLX >= 0	Quantidade de Selênio (Se) no lixiviado do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/04 (ABNT, 2004).	Falso
Foram quantificados os metais pesados na amostra bruta do lodo em mg/kg?	MetalsPesados == NAO	Não foram quantificados metais pesados na amostra bruta do lodo! Não será possível realizar a avaliação da toxicidade (metais pesados) do lodo na amostra bruta conforme recomendado pela NBR 10004/87 (ABNT, 1987).	
Se As > 1000 mg/Kg limite de As na amostra bruta do lodo ultrapassado	As > 1000	Limite máximo de Arsênio na amostra bruta do lodo ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Arsênio forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.	Falso
Se As=PND limite de As amostra bruta do lodo não avaliado	As == PND	Quantidade de Arsênio na amostra bruta do lodo não informada! Limite de Arsênio na amostra bruta do lodo não avaliado.	Falso
Se As <= 1000 mg/Kg limite de As na amostra bruta dentro da norma	As <= 1000 && As >= 0	Quantidade de Arsênio (As) na amostra bruta do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/87 (ABNT, 1987).	Falso
Se Be > 100 mg/Kg limite de Be na amostra bruta do lodo ultrapassado	Be > 100	Limite máximo de Berílio na amostra bruta do lodo ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Berílio forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.	Falso
Se Be=PND limite de Be na amostra bruta do lodo não avaliado	Be == PND	Quantidade de Berílio na amostra bruta do lodo não informada! Limite de Berílio na amostra bruta do lodo não avaliado.	Falso
Se Be <= 100 mg/Kg limite de Be na amostra bruta do lodo dentro da norma	Be <= 100 && Be >= 0	Quantidade de Berílio (Be) na amostra bruta do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/87 (ABNT, 1987).	Falso
Se Pb > 1000 mg/Kg limite Pb na amostra bruta do lodo ultrapassado	Pb > 1000	Limite máximo de Chumbo na amostra bruta do lodo ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Chumbo forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.	Falso
Se Pb=PND limite de Pb na amostra bruta do lodo não avaliado	Pb == PND	Quantidade de Chumbo na amostra bruta do lodo não informada! Limite de Chumbo na amostra bruta do lodo não avaliado.	Falso
Se Pb <= 1000 mg/Kg limite de Pb na amostra bruta do lodo dentro da norma	Pb <= 1000 && Pb >= 0	Quantidade de Chumbo (Pb) na amostra bruta do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/87 (ABNT, 1987).	Falso
Se CN >1000 mg/Kg limite CN na amostra bruta do lodo ultrapassado	CN > 1000	Limite máximo de Cianeto na amostra bruta do lodo ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Cianeto forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.	Falso

REGRA	EXPRESSÃO	MENSAGEM	OPERAÇÃO
Se CN=PND limite de CN na amostra bruta do lodo não avaliado	CN == PND	Quantidade de Cianeto na amostra bruta do lodo não informada! Limite de Cianeto na amostra bruta do lodo não avaliado.	Falso
Se CN<= 1000 mg/Kg limite de CN na amostra bruta do lodo dentro da norma	CN <= 1000 && CN >= 0	Quantidade de Cianeto (CN) na amostra bruta do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/87 (ABNT, 1987).	Falso
Se Cr > 100 mg/Kg limite de Cr VI na amostra bruta do lodo ultrapassado	Cr > 100	Limite máximo de Cromo VI na amostra bruta do lodo ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Cromo VI forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.	Falso
Se Cr=PND limite de Cr VI na amostra bruta do lodo não avaliado	Cr == PND	Quantidade de Cromo VI na amostra bruta do lodo não informada! Limite de Cromo VI na amostra bruta do lodo não avaliado.	Falso
Se Cr<=100mg/Kg limite de CrVI na amostra bruta do lodo dentro da norma	Cr <= 100 && Cr >= 0	Quantidade de Cromo VI (Cr) na amostra bruta do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/87 (ABNT, 1987).	Falso
IFenols > 10 mg/Kg limite de Índice de Fenóis na amostra bruta do lodo ultrapassado	IFenols > 10	Limite máximo de Índice de Fenóis na amostra bruta do lodo ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Índice de Fenóis forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.	Falso
Se IFenols =PND limite de Índice de Fenóis na amostra bruta do lodo não avaliado	IFenols == PND	Índice de Fenóis na amostra bruta do lodo não informado! Limite de Índice de Fenóis na amostra bruta do lodo não avaliado.	Falso
IFenols <= 10 mg/Kg Limite de Índice de Fenóis na amostra bruta do lodo dentro da norma	IFenols <= 10 && IFenols >= 0	Quantidade de Índice de Fenóis na amostra bruta do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/87 (ABNT, 1987).	Falso
Se Hg > 100 mg/Kg limite de Hg na amostra bruta do lodo ultrapassado	Hg > 100	Limite máximo de Mercúrio na amostra bruta do lodo ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Mercúrio forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.	Falso
Se Hg=PND limite de Hg na amostra bruta do lodo não avaliado	Hg == PND	Quantidade de Mercúrio na amostra bruta do lodo não informada! Limite de Mercúrio na amostra bruta do lodo não avaliado.	Falso
Se Hg <= 100 mg/Kg limite de Hg na amostra bruta do lodo dentro da norma	Hg <= 100 && Hg >= 0	Quantidade de Mercúrio (Hg) na amostra bruta do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/87 (ABNT, 1987).	Falso
Se Se > 100 mg/Kg limite de Se na amostra bruta do lodo ultrapassado	Se > 100	Limite máximo de Selênio na amostra bruta do lodo ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Selênio forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.	Falso

REGRA	EXPRESSÃO	MENSAGEM	OPERAÇÃO
Se Se=PND limite de Se na amostra bruta do lodo não avaliado	Se == PND	Quantidade de selênio na amostra bruta do lodo não informada! Limite de Selênio na amostra bruta do lodo não avaliado.	Falso
Se Se <= 100 mg/Kg Limite de Se na amostra bruta do lodo dentro da norma	Se <= 100 && Se >= 0	Quantidade de Selênio (Se) na amostra bruta do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/87 (ABNT, 1987).	Falso
Se Vanádio > 1000 mg/Kg limite de V na amostra bruta do lodo ultrapassado	Vanadio > 1000	Limite máximo de Vanádio na amostra bruta do lodo ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Vanádio forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.	Falso
Se Vanádio=PND limite de V na amostra bruta do lodo não avaliado	Vanadio == PND	Quantidade de Vanádio na amostra bruta do lodo não informada! Limite de Vanádio na amostra bruta do lodo não avaliado.	Falso
Se Vanádio <= 1000 mg/Kg limite de V na amostra bruta do lodo dentro da norma	Vanadio <= 1000 && Vanadio >= 0	Quantidade de Vanádio (V) na amostra bruta do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/87 (ABNT, 1987).	Falso

**APÊNDICE C- RELATÓRIOS DE RESULTADOS E DE
LÓGICA EMITIDOS PELO SISTEMA NOS TESTES
REALIZADOS**

**C.1- RELATÓRIO DE RESULTADOS E DE LÓGICA DO
TRABALHO DE MACEDO (2006)**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**Sistema para avaliar lodos de esgoto como biomassa na geração de energia em processos de combustão****Base de conhecimento: Avaliação de Lodos de Esgoto como Biomassa para Gerar Energia em Processos de Combustão**

O poder calorífico inferior do lodo é calculado analiticamente utilizando dados da análise química elementar.

- * Poder Calorífico Inferior previsto do lodo avaliado = 3,600 MJ/kg
- * Lodo com poder calorífico muito baixo!
- * Lodo Classe IV: Não apresenta potencial para gerar energia em processos de combustão.

Energia bruta prevista = 1,008 kWh/kg de lodo

Receita bruta prevista com a venda da energia gerada a partir do lodo para distribuidoras de energia elétrica = R\$ 144,20 / MWh ou R\$ 0,14 / kWh

Limite máximo de Dióxido de Enxofre ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Dióxido de Enxofre forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.

Limite máximo de Dióxido de Nitrogênio (NO₂) ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Dióxido de Nitrogênio (NO₂) forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.

Emissões de Fluoreto de Hidrogênio (HF) estão de acordo com os limites estabelecidos na Resolução nº 316/2002 (CONAMA, 2002).

Quantidade de Monóxido de Carbono (CO) não informada! Limite de Monóxido de Carbono não avaliado!

Quantidade de Dioxinas e Furanos não informada! Limite de Dioxinas e Furanos não avaliado!

Quantidade de Material Particulado não informada! Limite de Material Particulado não avaliado!

Limite máximo de Material Particulado com agrupamento de cádmio (Cd), mercúrio (Hg), tálio (Tl) ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Material Particulado forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.

Emissões de Cloreto de Hidrogênio (HCl) estão de acordo com os limites estabelecidos na Resolução

nº 316/2002 (CONAMA, 2002).

Limite máximo de Material Particulado com agrupamento de arsênio (As), cobalto (Co), níquel (Ni), telúrio (Te), selênio (Se) ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Material Particulado forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.

Emissões de Materiais Particulados com agrupamento de cobre (Cu), estanho (Sn), flúor (F), manganês (Mn), platina (Pt), paládio (Pd), ródio (Rh), vanádio (V) estão de acordo com os limites estabelecidos na Resolução nº 316/2002 (CONAMA, 2002).

Quantidade de Arsênio (As) no lixiviado do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/04 (ABNT, 2004).

Quantidade de Bário (Ba) no lixiviado do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/04 (ABNT, 2004).

Quantidade de Chumbo (Pb) no lixiviado do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/04 (ABNT, 2004).

Quantidade de Cádmio (Cd) no lixiviado do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/04 (ABNT, 2004).

Quantidade de Prata no lixiviado do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/04 (ABNT, 2004).

Quantidade de Fluoreto no lixiviado do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/04 (ABNT, 2004).

Quantidade de Selênio (Se) no lixiviado do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/04 (ABNT, 2004).

Quantidade de Cromo (Cr) no lixiviado do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/04 (ABNT, 2004).

Quantidade de Mercúrio (Hg) no lixiviado do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/04 (ABNT, 2004).

Quantidade de Cianeto (CN) na amostra bruta do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/87 (ABNT, 1987).

Quantidade de Arsênio (As) na amostra bruta do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/87 (ABNT, 1987).

Quantidade de Chumbo (Pb) na amostra bruta do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/87 (ABNT, 1987).

Quantidade de Berílio (Be) na amostra bruta do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/87 (ABNT, 1987).

Quantidade de Mercúrio (Hg) na amostra bruta do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/87 (ABNT, 1987).

Quantidade de Cromo VI (Cr) na amostra bruta do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/87 (ABNT, 1987).

Quantidade de Índice de Fenóis na amostra bruta do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/87 (ABNT, 1987).

Quantidade de Selênio (Se) na amostra bruta do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/87 (ABNT, 1987).

Quantidade de Vanádio (V) na amostra bruta do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/87 (ABNT, 1987).

Para entrada de dados da Análise Elementar, Análise Imediata e Potencial Energético pode ser escolhida uma das quatro opções abaixo em função da disponibilidade de dados:

Opção 1:

Análise química imediata: Carbono Fixo (%F em b.s.), Volátil (%V em b.s.), Umidade (%W em b. s.)

Análise química elementar: Hidrogênio (%H em b.s.)

Opção 2:

Análise química elementar: Hidrogênio (%H em b.s.), Umidade (%W em b. s.), Cinzas (%A em b.s.), Enxofre (%S em b.s.), Carbono (%C em b.s.), Oxigênio (%O em b.s.)

Opção 3:

PCS obtido em laboratório

Análise química elementar: Hidrogênio (%H em b.s.), Umidade (%W em b. s.)

Opção 4:

PCI, caso este já seja conhecido pelo usuário.

A avaliação dos limites de emissões de poluentes atmosféricos é válida apenas para processos de combustão cuja operação seja realizada acima da temperatura de oitocentos graus celsius conforme estabelecido pela Resolução 316/2002 (CONAMA).

Os parâmetros de emissões gasosas e material particulados devem ser medidos a partir de testes realizados em conformidade com o exigido pela Resolução 316/2002 (CONAMA) e ser corrigidos pelo

teor de oxigênio, na mistura de gases de combustão, do ponto de descarga, para sete por cento em base seca.

Parâmetros e Limites Utilizados para a Avaliação do Lodo de Esgoto como Biomassa para Gerar Energia em Processos de Combustão:

1) Avaliação do Potencial Energético do Lodo:

Poder Calorífico Inferior (PCI) em MJ/kg

PCI < 4 MJ/kg Lodo Classe IV: não apresenta potencial para gerar energia em processos de combustão;

4 ≤ PCI < 10,467 MJ/kg Lodo Classe III: apresenta baixo potencial para gerar energia em processos de combustão;

10,467 ≤ PCI < 18,08 MJ/kg Lodo Classe II: apresenta médio potencial para gerar energia em processos de combustão;

PCI ≥ 18,08 MJ/kg Lodo Classe I: apresenta alto potencial para gerar energia em processos de combustão.

2) Avaliação de Corrosão e Incrustações em Equipamentos:

Cloro (%Cl) %Cl ≤ 0,1%

Cinzas (%A) %A ≤ 30%

3) Avaliação dos Contaminantes (Metais Pesados):

* Metais pesados no Lixiviado do Lodo (ABNT, 2004):

Ar (mg/L) ArLx ≤ 1 mg/L

Ba (mg/L) BaLx ≤ 70 mg/L

Cd (mg/L) CdLx ≤ 0,5 mg/L

Pb (mg/L) PbLx ≤ 1 mg/L

Cr (mg/L) CrLx ≤ 5 mg/L

Fluoreto (mg/L) FluoretoLx ≤ 150 mg/L

Hg (mg/L) HgLx ≤ 0,1 mg/L

Prata (mg/L) PrataLx ≤ 5 mg/L

Se (mg/L) SeLx ≤ 1 mg/L

* Metais Pesados na Amostra Bruta do Lodo (ABNT, 1987):

As (mg/Kg) As ≤ 1000 mg/Kg

Be (mg/Kg) Be ≤ 100 mg/Kg

Pb (mg/Kg) Pb ≤ 1000 mg/Kg

CN (mg/Kg) CN ≤ 1000 mg/Kg

Cr (mg/Kg) Cr ≤ 100 mg/Kg

Índice de Fenóis (mg/Kg) IFenóis ≤ 10 mg/Kg

Hg (mg/Kg) Hg ≤ 75 mg/Kg

Se (mg/Kg) Se ≤ 100 mg/Kg

V (mg/Kg) V ≤ 1000 mg/Kg

4) Avaliação das Emissões de Poluentes Atmosféricos (Emissões Gasosas e Materiais Particulados):

* Emissões Gasosas (CONAMA - Resolução nº 316/2002):

SO₂ SO₂ ≤ 280 mg/Nm³

NO₂ NO₂ ≤ 560 mg/Nm³

CO CO ≤ 100 ppm/ Nm³

HCl HCl ≤ 80 mg/Nm³

HFI HFI ≤ 5 mg/Nm³

Dioxinas e Furanos DF $\leq 0,50$ (ngTQE/Nm³)

* Emissão de SOX em Função da Quantidade de Enxofre:

Enxofre (%S) %S $\leq 0,2\%$

* Emissão de HCl em Função da Quantidade de Cloro:

Cloro (%Cl) %Cl $\leq 0,1\%$

* Materiais Particulados (CONAMA - Resolução nº 316/2002):

MP ≤ 70 mg/Nm³

MP I $\leq 0,28$ mg/Nm³ (Material Particulado com agrupamento de cádmio (Cd), mercúrio (Hg), tálio (Tl));

MP II $\leq 1,4$ mg/Nm³ (Material Particulado com agrupamento de arsênio (As), cobalto (Co), níquel (Ni), telúrio (Te), selênio (Se));

MP III ≤ 7 mg/Nm³ (Material Particulado com agrupamento de cobre (Cu), estanho (Sn), flúor (F), manganês (Mn), platina (Pt), paládio (Pd), ródio (Rh), vanádio (V))

OBS: Os parâmetros medidos devem ser corrigidos pelo teor de oxigênio, na mistura de gases de combustão, do ponto de descarga, para sete por cento em base seca (CONAMA - Resolução nº 316/2002).

Considera-se o valor de R\$ 144,20 / MWh como receita bruta prevista com a venda da energia gerada a partir do lodo para distribuidoras de energia elétrica. Este valor é o mesmo pago pelas distribuidoras de energia elétrica na contratação de geração distribuída a partir de biomassa no 2º Leilão de Fontes Alternativas da ANEEL realizado em 25 e 26 de agosto de 2010.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

Sistema para avaliar lodos de esgoto como biomassa na geração de energia em processos de combustão

Base de conhecimento: Avaliação de Lodos de Esgoto como Biomassa para Gerar Energia em Processos de Combustão

Poder Calorífico Inferior do Lodo em MJ/kg (PCI == PND)

Se PCS = PND (PCS==PND)

Se %V = PND ou %F=PND (V==PND || F==PND)

Cálculo PCS com análise elementar (PCS = 0.3491 * C + 1.1783 * H + 0.1005 * S - 0.1034 * O - 0.0151 * N - 0.0211 * A)

Cálculo do PCI em MJ/kg (PCI =(PCS * 1000 - 219.60 * H - 24.40 * W) / 1000)

Se PCS != PND (PCS != PND)

Cálculo do PCI em MJ/kg (PCI =(PCS * 1000 - 219.60 * H - 24.40 * W) / 1000)

Avaliação de problemas de incrustações e corrosão (PCI != PND)

Avaliação do Potencial Energético do lodo em processos de combustão (PCI != PND)

Se PCI < 4 MJ/kg Lodo Classe IV (PCI < 4)

Cálculo da energia bruta prevista em kWh/kg do lodo avaliado (Energia = PCI * 0.28)

Se SO₂ > 280 mg/Nm³ limite ultrapassado (SO₂ > 280)

Se NO₂ > 560 mg/Nm³ Limite de NO₂ ultrapassado (NO₂ > 560)

Se HFI <= 5 mg/Nm³ limite de HFI dentro da norma (HFI <= 5 && HFI >= 0)

Se CO=PND limite de CO não avaliado (CO == PND)

Se DF=PND limite de DF não avaliado (DF == PND)

Se MP=PND limite de MP não avaliado (MP == PND)

Se MPI > 0,28 mg/Nm³ limite de MPI ultrapassado (MPI > 0.28)

Se HCl <= 80 mg/Nm³ Limite de HCl dentro da Norma (HCl <= 80 && HCl >= 0)

Se MP_{II} > 1,4 mg/Nm³ limite de MP_{II} ultrapassado (MP_{II} > 1.4)

Se MP_{III} <= 7 mg/Nm³ limite de MP_{III} dentro da Norma (MP_{III} <= 7 && MP_{III} >= 0)

Se AsLX <= 1 mg/L limite de As no lixiviado dentro da norma (AsLX <= 1 && AsLX >= 0)

Se BaLX <= 70 mg/L limite de Ba no lixiviado dentro da norma (BaLX <= 70 && BaLX >= 0)

Se PbLX <= 1 mg/L limite de Pb no lixiviado dentro da norma (PbLX <= 1 && PbLX >= 0)

Se CdLX <= 0,5 mg/L limite de Cd no lixiviado dentro da norma (CdLX <= 0.5 && CdLX >= 0)

Se PrataLX <= 5 mg/L limite de Prata no lixiviado dentro da norma (PrataLX <= 5 && PrataLX >= 0)

Se FluoretoLX <= 150 mg/L limite de Fluoreto no lixiviado dentro da norma (FluoretoLX <= 150 && FluoretoLX >= 0)

Se SeLX <= 1 mg/L limite de Se no lixiviado dentro da norma (SeLX <= 1 && SeLX >= 0)

Se CrLX <= 5 mg/L limite de Cr no lixiviado dentro da norma (CrLX <= 5 && CrLX >= 0)

Se HgLX <= 0,1 mg/L limite de Hg dentro da norma (HgLX <= 0.1 && HgLX >= 0)

Se CN <= 1000 mg/Kg limite de CN na amostra bruta do lodo dentro da norma (CN <= 1000 && CN >= 0)

Se As <= 1000 mg/Kg limite de As na amostra bruta dentro da norma (As <= 1000 && As >= 0)

Se Pb <= 1000 mg/Kg limite de Pb na amostra bruta do lodo dentro da norma (Pb <= 1000 && Pb >= 0)

Se Be <= 100 mg/Kg limite de Be na amostra bruta do lodo dentro da norma (Be <= 100 && Be >= 0)

Se Hg <= 100 mg/Kg limite de Hg na amostra bruta do lodo dentro da norma (Hg <= 100 && Hg >= 0)

Se Cr <= 100mg/Kg limite de CrVI na amostra bruta do lodo dentro da norma (Cr <= 100 && Cr >= 0)

IFenóis <= 10 mg/Kg Limite de Índice de Fenóis na amostra bruta do lodo dentro da norma (IFenóis <= 10 && IFenóis >= 0)

Se Se <= 100 mg/Kg Limite de Se na amostra bruta do lodo dentro da norma (Se <= 100 && Se >= 0)

Se Vanádio <= 1000 mg/Kg limite de V na amostra bruta do lodo dentro da norma (Vanadio <= 1000 && Vanadio >= 0)

**C.2- RELATÓRIO DE RESULTADOS E DE LÓGICA DO
TRABALHO DE BORGES (2008)**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

Sistema para avaliar lodos de esgoto como biomassa na geração de energia em processos de combustão

Base de conhecimento: Avaliação de Lodos de Esgoto como Biomassa para Gerar Energia em Processos de Combustão

O Poder Calorífico Inferior do lodo é calculado analiticamente utilizando dados da análise química imediata e o teor de hidrogênio.

Teor de Cloro não será avaliado! Para Teor de Cloro acima de 0,1% corrosão induzida e problemas de emissão de HCl podem ser esperados.

Teor de Cinzas acima de 30%! Problemas de incrustações em equipamentos podem ser esperados.

* Poder calorífico inferior previsto do lodo avaliado = 18,222 MJ/kg de lodo

* Lodo Classe I: Apresenta alto potencial para gerar energia em processos de combustão.

* Aplicações Recomendadas: Fornos de cimento, caldeiras, geradores de vapor, fornos, fornalhas, estufas e secadores para a geração e uso de energia térmica, gaseificadores e centrais à biomassa para a geração de energia elétrica, respeitadas as condições abaixo:

1. Teor de cinzas do lodo abaixo de 50%.

Caso o teor de cinzas seja maior que 50%, só é recomendável a queima do lodo quando a empresa for obrigada pelo legislador/controlador ambiental, ou quando quiser eliminar o lodo para evitar aterrá-lo. Caso contrário, é tecnicamente desaconselhado em função dos problemas de incrustações em equipamentos.

2. Baixo conteúdo de óxidos básicos de fósforo e óxidos de ferro na composição das cinzas do lodo.

Caso o lodo apresente elevado conteúdo de óxidos básicos de fósforo e óxidos de ferro na composição de suas cinzas, só é recomendável sua utilização para co-processamentos e em proporções não superiores a 15%. Caso contrário, é tecnicamente desaconselhado em função da forte tendência à formação de depósitos e incrustação nos equipamentos.

Energia bruta prevista = 5,102 kWh/kg de lodo

Receita bruta prevista com a venda da energia gerada a partir do lodo para distribuidoras de energia elétrica = R\$ 144,20 / MWh ou R\$ 0,14 / kWh

Limite máximo de Monóxido de Carbono (CO) ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Monóxido de Carbono forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.

Quantidade de Dióxido de Nitrogênio (NO₂) não informada! Limite de Dióxido de Nitrogênio não avaliado!

Quantidade de Fluoreto de Hidrogênio (HF) não informada! Limite de Fluoreto de Hidrogênio (HF) não avaliado!

Quantidade de Dioxinas e Furanos não informada! Limite de Dioxinas e Furanos não avaliado!

Quantidade de Material Particulado não informada! Limite de Material Particulado não avaliado!

Teor de Cloro (%Cl) e/ou quantidade de Cloreto de Hidrogênio (HCl) não informado(s)! Limite de Cloreto de Hidrogênio não avaliado!

Quantidade de Material Particulado com agrupamento de cádmio (Cd), mercúrio (Hg), tálio (Tl) não informada! Limite de Material Particulado com agrupamento de cádmio (Cd), mercúrio (Hg), tálio (Tl) não avaliado!

Quantidade de Material Particulado com agrupamento de arsênio (As), cobalto (Co), níquel (Ni), telúrio (Te), selênio (Se) (MP11) não informada! Limite de Material Particulado com agrupamento de arsênio (As), cobalto (Co), níquel (Ni), telúrio (Te), selênio (Se) não avaliado!

Quantidade de Material Particulado com agrupamento de cobre (Cu), estanho (Sn), flúor (F), manganês (Mn), platina (Pt), paládio (Pd), ródio (Rh), vanádio (V) não informada! Limite de Material Particulado com agrupamento de cobre (Cu), estanho (Sn), flúor (F), manganês (Mn), platina (Pt), paládio (Pd), ródio (Rh), vanádio (V) não avaliado!

Teor de Enxofre acima de 0,2%! Problemas de emissão de Dióxido de Enxofre (SO₂) podem ser esperados!

Não foi realizado ensaio Lixiviação de Resíduos no lodo! Não é possível realizar a avaliação da toxicidade (metais pesados) do lodo com base no ensaio de lixiviação conforme recomendado pela NBR 10004/04 (ABNT, 2004).

Não foram quantificados metais pesados na amostra bruta do lodo! Não será possível realizar a avaliação da toxicidade (metais pesados) do lodo na amostra bruta conforme recomendado pela NBR 10004/87 (ABNT, 1987).

Para entrada de dados da Análise Elementar, Análise Imediata e Potencial Energético pode ser escolhida uma das quatro opções abaixo em função da disponibilidade de dados:

Opção 1:

Análise química imediata: Carbono Fixo (%F em b.s.), Volátil (%V em b.s.), Umidade (%W em b. s.)

Análise química elementar: Hidrogênio (%H em b.s.)

Opção 2:

Análise química elementar: Hidrogênio (%H em b.s.), Umidade (%W em b. s.), Cinzas (%A em b.s.), Enxofre (%S em b.s.), Carbono (%C em b.s.), Oxigênio (%O em b.s.)

Opção 3:

PCS obtido em laboratório

Análise química elementar: Hidrogênio (%H em b.s.), Umidade (%W em b. s.)

Opção 4:

PCI, caso este já seja conhecido pelo usuário.

A avaliação dos limites de emissões de poluentes atmosféricos é válida apenas para processos de combustão cuja operação seja realizada acima da temperatura de oitocentos graus celsius conforme

estabelecido pela Resolução 316/2002 (CONAMA).

Os parâmetros de emissões gasosas e material particulados devem ser medidos a partir de testes realizados em conformidade com o exigido pela Resolução 316/2002 (CONAMA) e ser corrigidos pelo teor de oxigênio, na mistura de gases de combustão, do ponto de descarga, para sete por cento em base seca.

Parâmetros e Limites Utilizados para a Avaliação do Lodo de Esgoto como Biomassa para Gerar Energia em Processos de Combustão:

1) Avaliação do Potencial Energético do Lodo:

Poder Calorífico Inferior (PCI) em MJ/kg

PCI < 4 MJ/kg Lodo Classe IV: não apresenta potencial para gerar energia em processos de combustão;

4 ≤ PCI < 10,467 MJ/kg Lodo Classe III: apresenta baixo potencial para gerar energia em processos de combustão;

10,467 ≤ PCI < 18,08 MJ/kg Lodo Classe II: apresenta médio potencial para gerar energia em processos de combustão;

PCI ≥ 18,08 MJ/kg Lodo Classe I: apresenta alto potencial para gerar energia em processos de combustão.

2) Avaliação de Corrosão e Incrustações em Equipamentos:

Cloro (%Cl) %Cl ≤ 0,1%

Cinzas (%A) %A ≤ 30%

3) Avaliação dos Contaminantes (Metais Pesados):

* Metais pesados no Lixiviado do Lodo (ABNT, 2004):

Ar (mg/L) ArLx ≤ 1 mg/L

Ba (mg/L) BaLx ≤ 70 mg/L

Cd (mg/L) CdLx ≤ 0,5 mg/L

Pb (mg/L) PbLx ≤ 1 mg/L

Cr (mg/L) CrLx ≤ 5 mg/L

Fluoreto (mg/L) FluoretoLx ≤ 150 mg/L

Hg (mg/L) HgLx ≤ 0,1 mg/L

Prata (mg/L) PrataLx ≤ 5 mg/L

Se (mg/L) SeLx ≤ 1 mg/L

* Metais Pesados na Amostra Bruta do Lodo (ABNT, 1987):

As (mg/Kg) As ≤ 1000 mg/Kg

Be (mg/Kg) Be ≤ 100 mg/Kg

Pb (mg/Kg) Pb ≤ 1000 mg/Kg

CN (mg/Kg) CN ≤ 1000 mg/Kg

Cr (mg/Kg) Cr ≤ 100 mg/Kg

Índice de Fenóis (mg/Kg) IFenóis ≤ 10 mg/Kg

Hg (mg/Kg) Hg ≤ 75 mg/Kg

Se (mg/Kg) Se ≤ 100 mg/Kg

V (mg/Kg) V ≤ 1000 mg/Kg

4) Avaliação das Emissões de Poluentes Atmosféricos (Emissões Gasosas e Materiais Particulados):

* Emissões Gasosas (CONAMA - Resolução nº 316/2002):

SO₂ SO₂ ≤ 280 mg/Nm³

NO2	NO2 <= 560 mg/Nm ³
CO	CO <= 100 ppm/ Nm ³
HCl	HCl <= 80 mg/Nm ³
HFI	HFI <= 5 mg/Nm ³
Dioxinas e Furanos	DF <= 0,50 (ngTQE/Nm ³)

* Emissão de SOX em Função da Quantidade de Enxofre:
Enxofre (%S) %S <= 0,2%

* Emissão de HCl em Função da Quantidade de Cloro:
Cloro (%Cl) %Cl <= 0,1%

* Materiais Particulados (CONAMA - Resolução nº 316/2002):

MP <= 70 mg/Nm³

MP I <= 0,28 mg/Nm³ (Material Particulado com agrupamento de cádmio (Cd), mercúrio (Hg), tálio (Tl));

MP II <= 1,4 mg/Nm³ (Material Particulado com agrupamento de arsênio (As), cobalto (Co), níquel (Ni), telúrio (Te), selênio (Se));

MP III <= 7 mg/Nm³ (Material Particulado com agrupamento de cobre (Cu), estanho (Sn), flúor (F), manganês (Mn), platina (Pt), paládio (Pd), ródio (Rh), vanádio (V))

OBS: Os parâmetros medidos devem ser corrigidos pelo teor de oxigênio, na mistura de gases de combustão, do ponto de descarga, para sete por cento em base seca (CONAMA - Resolução nº 316/2002).

Considera-se o valor de R\$ 144,20 / MWh como receita bruta prevista com a venda da energia gerada a partir do lodo para distribuidoras de energia elétrica. Este valor é o mesmo pago pelas distribuidoras de energia elétrica na contratação de geração distribuída a partir de biomassa no 2º Leilão de Fontes Alternativas da ANEEL realizado em 25 e 26 de agosto de 2010.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

Sistema para avaliar lodos de esgoto como biomassa na geração de energia em processos de combustão

Base de conhecimento: Avaliação de Lodos de Esgoto como Biomassa para Gerar Energia em Processos de Combustão

Poder Calorífico Inferior do Lodo em MJ/kg (PCI == PND)

Se PCS = PND (PCS==PND)

Se %V != PND e %F != PND (V != PND && F != PND)

Cálculo PCS com análise imediata (PCS = 0.3536 * F + 0.1559 * V - 0.0078 * A)

Cálculo do PCI em MJ/kg (PCI = (PCS * 1000 - 219.60 * H - 24.40 * W) / 1000)

Se PCS != PND (PCS != PND)

Cálculo do PCI em MJ/kg (PCI = (PCS * 1000 - 219.60 * H - 24.40 * W) / 1000)

Avaliação de problemas de incrustações e corrosão (PCI != PND)

Se %Cl = PND (Cl == PND)

Se %A > 30% (A > 30)

Avaliação do Potencial Energético do lodo em processos de combustão (PCI != PND)

Se PCI >= 18,08 MJ/Kg Lodo Classe I (PCI >= 18.08)

Energia bruta prevista em kWh/kg do lodo avaliado (Energia = PCI * 0.28)

Se CO > 100 ppm/ Nm³ limite CO ultrapassado (CO > 100)

Se NO₂=PND limite de NO₂ não avaliado (NO₂ == PND)

Se HFI=PND Limite de HFI não avaliado (HFI == PND)

Se DF=PND limite de DF não avaliado (DF == PND)

Se MP=PND limite de MP não avaliado (MP == PND)

Se HCl=PND e %Cl= PND limite de HCl não avaliado (HCl == PND && Cl == PND)

Se MPI=PND limite de MPI não avaliado (MPI == PND)

Se MPII=PND limite de MPII não avaliado (MPII == PND)

Se MPIII=PND limite de MPIII não avaliado (MPIII == PND)

Se SO₂ = PND e %S>0,2% limite de S ultrapassado (SO₂ == PND && S > 0.2)

Foi realizado ensaio de Lixiviação de Resíduo no lodo? (EnsaioLixiviado == NAO)

Foram quantificados os metais pesados na amostra bruta do lodo em mg/kg? (MetaisPesados == NAO)

**C.3- RELATÓRIO DE RESULTADOS E DE LÓGICA DO
TRABALHO DE MORAES (2006)**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

Sistema para avaliar lodos de esgoto como biomassa na geração de energia em processos de combustão

Base de conhecimento: Avaliação de Lodos de Esgoto como Biomassa para Gerar Energia em Processos de Combustão

Teor de Cloro não será avaliado! Para Teor de Cloro acima de 0,1% corrosão induzida e problemas de emissão de HCl podem ser esperados.

Teor de cinzas não é avaliado! Para Teor de Cinzas acima de 30% problemas de incrustações em equipamentos podem ser esperados.

* Poder calorífico inferior previsto do lodo avaliado = 16,496 MJ/kg

* Lodo Classe II: Apresenta médio potencial para gerar energia em processos de combustão.

* Aplicações:

- Aplicações Recomendadas: Caldeiras, geradores de vapor, fornos, fomalhas, estufas e secadores para a geração e uso de energia térmica, gaseificadores, centrais à biomassa para a geração de energia elétrica, uso doméstico e co-processamento em geral, inclusive co-processamento em fornos rotativos de clínquer para a fabricação de cimento, respeitadas as condições abaixo:

1. Teor de cinzas do lodo abaixo de 50%.

Caso o teor de cinzas seja maior que 50%, só é recomendável a queima do lodo quando a empresa for obrigada pelo legislador/controlador ambiental, ou quando quiser eliminar o lodo para evitar aterrá-lo. Caso contrário, é tecnicamente desaconselhado em função dos problemas de incrustações em equipamentos.

2. Baixo conteúdo de óxidos básicos de fósforo e óxidos de ferro na composição das cinzas do lodo.

Caso o lodo apresente elevado conteúdo de óxidos básicos de fósforo e óxidos de ferro na composição de suas cinzas, só é recomendável sua utilização para co-processamentos e em proporções não superiores a 15%. Caso contrário, é tecnicamente desaconselhado em função da forte tendência à formação de depósitos e incrustação nos equipamentos.

- Aplicações Não-Recomendadas: Fornos de cimento como combustível principal.

Energia bruta prevista = 4,619 kWh/kg de lodo

Receita bruta prevista com a venda da energia gerada a partir do lodo para distribuidoras de energia elétrica = R\$ 144,20 / MWh ou R\$ 0,14 / kWh

Não foram realizados ensaios e/ou cálculos de emissões gasosas e materiais particulados! Não é possível realizar a avaliação da Poluição Atmosférica conforme recomendado pela Resolução 316/2002 (CONAMA).

Quantidade de Arsênio no lixiviado do lodo não informado! Limite de Arsênio no lixiviado do lodo não avaliado.

Quantidade de Cádmiio no lixiviado do lodo não informado! Limite de Cádmiio no lixiviado do lodo não avaliado.

Quantidade de Bário (Ba) no lixiviado do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/04 (ABNT, 2004).

Quantidade de Chumbo (Pb) no lixiviado do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/04 (ABNT, 2004).

Quantidade de Mercúrio no lixiviado do lodo não informado! Limite de Mercúrio no lixiviado do lodo não avaliado!

Quantidade de Prata no lixiviado do lodo não informada! Limite de Prata no lixiviado do lodo não avaliado.

Quantidade de Selênio no lixiviado do lodo não informada! Limite de Selênio no lixiviado do lodo não avaliado.

Quantidade de Fluoreto no lixiviado do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/04 (ABNT, 2004).

Quantidade de Cromo (Cr) no lixiviado do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/04 (ABNT, 2004).

Quantidade de Arsênio na amostra bruta do lodo não informada! Limite de Arsênio na amostra bruta do lodo não avaliado.

Quantidade de Berílio na amostra bruta do lodo não informada! Limite de Berílio na amostra bruta do lodo não avaliado.

Quantidade de Chumbo (Pb) na amostra bruta do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/87 (ABNT, 1987).

Quantidade de Cianeto na amostra bruta do lodo não informada! Limite de Cianeto na amostra bruta do lodo não avaliado.

Limite máximo de Cromo VI na amostra bruta do lodo ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Cromo VI forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.

Quantidade de Mercúrio na amostra bruta do lodo não informada! Limite de Mercúrio na amostra bruta do lodo não avaliado.

Quantidade de selênio na amostra bruta do lodo não informada! Limite de Selênio na amostra bruta do lodo não avaliado.

Quantidade de Índice de Fenóis na amostra bruta do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/87 (ABNT, 1987).

Quantidade de Vanádio (V) na amostra bruta do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/87 (ABNT, 1987).

Para entrada de dados da Análise Elementar, Análise Imediata e Potencial Energético pode ser escolhida uma das quatro opções abaixo em função da disponibilidade de dados:

Opção 1:

Análise química imediata: Carbono Fixo (%F em b.s.), Volátil (%V em b.s.), Umidade (%W em b. s.)

Análise química elementar: Hidrogênio (%H em b.s.)

Opção 2:

Análise química elementar: Hidrogênio (%H em b.s.), Umidade (%W em b. s.), Cinzas (%A em b.s.),

Enxofre (%S em b.s.), Carbono (%C em b.s.), Oxigênio (%O em b.s.)

Opção 3:

PCS obtido em laboratório

Análise química elementar: Hidrogênio (%H em b.s.), Umidade (%W em b. s.)

Opção 4:

PCI, caso este já seja conhecido pelo usuário.

A avaliação dos limites de emissões de poluentes atmosféricos é válida apenas para processos de combustão cuja operação seja realizada acima da temperatura de oitocentos graus celsius conforme estabelecido pela Resolução 316/2002 (CONAMA).

Os parâmetros de emissões gasosas e material particulados devem ser medidos a partir de testes realizados em conformidade com o exigido pela Resolução 316/2002 (CONAMA) e ser corrigidos pelo teor de oxigênio, na mistura de gases de combustão, do ponto de descarga, para sete por cento em base seca.

Parâmetros e Limites Utilizados para a Avaliação do Lodo de Esgoto como Biomassa para Gerar Energia em Processos de Combustão:

1) Avaliação do Potencial Energético do Lodo:

Poder Calorífico Inferior (PCI) em MJ/kg

PCI < 4 MJ/kg Lodo Classe IV: não apresenta potencial para gerar energia em processos de combustão;

4 <= PCI < 10,467 MJ/kg Lodo Classe III: apresenta baixo potencial para gerar energia em processos de combustão;

10,467 <= PCI < 18,08 MJ/kg Lodo Classe II: apresenta médio potencial para gerar energia em processos de combustão;

PCI >= 18,08 MJ/kg Lodo Classe I: apresenta alto potencial para gerar energia em processos de combustão.

2) Avaliação de Corrosão e Incrustações em Equipamentos:

Cloro (%Cl) %Cl <= 0,1%

Cinzas (%A) %A <= 30%

3) Avaliação dos Contaminantes (Metais Pesados):

* Metais pesados no Lixiviado do Lodo (ABNT, 2004):

Ar (mg/L) ArLx <= 1 mg/L

Ba (mg/L) BaLx <= 70 mg/L

Cd (mg/L)	CdLx \leq 0,5 mg/L
Pb (mg/L)	PbLx \leq 1 mg/L
Cr (mg/L)	CrLx \leq 5 mg/L
Fluoreto (mg/L)	FluoretoLx \leq 150 mg/L
Hg (mg/L)	HgLx \leq 0,1 mg/L
Prata (mg/L)	PrataLx \leq 5 mg/L
Se (mg/L)	SeLx \leq 1 mg/L

* Metais Pesados na Amostra Bruta do Lodo (ABNT, 1987):

As (mg/Kg)	As \leq 1000 mg/Kg
Be (mg/Kg)	Be \leq 100 mg/Kg
Pb (mg/Kg)	Pb \leq 1000 mg/Kg
CN (mg/Kg)	CN \leq 1000 mg/Kg
Cr (mg/Kg)	Cr \leq 100 mg/Kg
Índice de Fenóis (mg/Kg)	IFenóis \leq 10 mg/Kg
Hg (mg/Kg)	Hg \leq 75 mg/Kg
Se (mg/Kg)	Se \leq 100 mg/Kg
V (mg/Kg)	V \leq 1000 mg/Kg

4) Avaliação das Emissões de Poluentes Atmosféricos (Emissões Gasosas e Materiais Particulados):

* Emissões Gasosas (CONAMA - Resolução nº 316/2002):

SO ₂	SO ₂ \leq 280 mg/Nm ³
NO ₂	NO ₂ \leq 560 mg/Nm ³
CO	CO \leq 100 ppm/ Nm ³
HCl	HCl \leq 80 mg/Nm ³
HFI	HFI \leq 5 mg/Nm ³
Dioxinas e Furanos	DF \leq 0,50 (ngTQE/Nm ³)

* Emissão de SOX em Função da Quantidade de Enxofre:

Enxofre (%S) %S \leq 0,2%

* Emissão de HCl em Função da Quantidade de Cloro:

Cloro (%Cl) %Cl \leq 0,1%

* Materiais Particulados (CONAMA - Resolução nº 316/2002):

MP \leq 70 mg/Nm³

MP I \leq 0,28 mg/Nm³ (Material Particulado com agrupamento de cádmio (Cd), mercúrio (Hg), tálio (Tl));

MP II \leq 1,4 mg/Nm³ (Material Particulado com agrupamento de arsênio (As), cobalto (Co), níquel (Ni), telúrio (Te), selênio (Se));

MP III \leq 7 mg/Nm³ (Material Particulado com agrupamento de cobre (Cu), estanho (Sn), flúor (F), manganês (Mn), platina (Pt), paládio (Pd), ródio (Rh), vanádio (V))

OBS: Os parâmetros medidos devem ser corrigidos pelo teor de oxigênio, na mistura de gases de combustão, do ponto de descarga, para sete por cento em base seca (CONAMA - Resolução nº 316/2002).

Considera-se o valor de R\$ 144,20 / MWh como receita bruta prevista com a venda da energia gerada a partir do lodo para distribuidoras de energia elétrica. Este valor é o mesmo pago pelas distribuidoras de energia elétrica na contratação de geração distribuída a partir de biomassa no 2º Leilão de Fontes Alternativas da ANEEL realizado em 25 e 26 de agosto de 2010.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

Sistema para avaliar lodos de esgoto como biomassa na geração de energia em processos de combustão

Base de conhecimento: Avaliação de Lodos de Esgoto como Biomassa para Gerar Energia em Processos de Combustão

Poder Calorífico Inferior do Lodo em MJ/kg (PCI == PND)

Se PCS != PND (PCS != PND)

Cálculo do PCI em MJ/kg (PCI = (PCS * 1000 - 219.60 * H - 24.40 * W) / 1000)

Avaliação de problemas de incrustações e corrosão (PCI != PND)

Se %CI = PND (CI == PND)

Se %A = PND (A == PND)

Avaliação do Potencial Energético do lodo em processos de combustão (PCI != PND)

Se 11,618 <= PCI < 18,08 MJ/kg Lodo Classe II (11.618 <= PCI && PCI < 18.08)

Cálculo da energia bruta prevista em kWh/kg do lodo avaliado (Energia = PCI * 0.28)

Foram realizados ensaios e/ou cálculos de EG e/ou MP? (EnsaioEGMP == NAO)

Se AsLX=PND Limite de As no lixiviado não avaliado (AsLX == PND)

Se CdLX=PND limite de Ca no lixiviado não avaliado (CdLX == PND)

Se BaLX <= 70 mg/L limite de Ba no lixiviado dentro da norma (BaLX <= 70 && BaLX >= 0)

Se PbLX <= 1 mg/L limite de Pb no lixiviado dentro da norma (PbLX <= 1 && PbLX >= 0)

Se HgLX=PND limite de Hg no lixiviado não avaliado (HgLX == PND)

Se PrataLX=PND limite de Prata no lixiviado não avaliado (PrataLX == PND)

Se SeLX=PND limite de Se no lixiviado não avaliado (SeLX == PND)

Se FluoretoLX <= 150 mg/L limite de Fluoreto no lixiviado dentro da norma (FluoretoLX <= 150 && FluoretoLX >= 0)

Se CrLX <= 5 mg/L limite de Cr no lixiviado dentro da norma (CrLX <= 5 && CrLX >= 0)

Se As=PND limite de As amostra bruta do lodo não avaliado (As == PND)

Se Be=PND limite de Be na amostra bruta do lodo não avaliado (Be == PND)

Se Pb <= 1000 mg/Kg limite de Pb na amostra bruta do lodo dentro da norma (Pb <= 1000 && Pb >= 0)

Se CN=PND limite de CN na amostra bruta do lodo não avaliado (CN == PND)

Se Cr > 100 mg/Kg limite de Cr VI na amostra bruta do lodo ultrapassado (Cr > 100)

Se Hg=PND limite de Hg na amostra bruta do lodo não avaliado (Hg == PND)

Se Se=PND limite de Se na amostra bruta do lodo não avaliado (Se == PND)

IFenóis <= 10 mg/Kg Limite de Índice de Fenóis na amostra bruta do lodo dentro da norma (IFenóis <= 10 && IFenóis >= 0)

Se Vanádio <= 1000 mg/Kg limite de V na amostra bruta do lodo dentro da norma (Vanadio <= 1000 && Vanadio >= 0)

C.4- RELATÓRIO DE RESULTADOS E DE LÓGICA DO TRABALHO DE VIRMOND (2007)

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

Sistema para avaliar lodos de esgoto como biomassa na geração de energia em processos de combustão

Base de conhecimento: Avaliação de Lodos de Esgoto como Biomassa para Gerar Energia em Processos de Combustão

O poder calorífico inferior do lodo é calculado analiticamente utilizando dados da análise química elementar.

Teor de Cloro acima de 0,1%! Problemas de corrosão induzida podem ser esperados.

* Poder calorífico inferior previsto do lodo avaliado = 22,531 MJ/kg de lodo

* Lodo Classe I: Apresenta alto potencial para gerar energia em processos de combustão.

* Aplicações Recomendadas: Fornos de cimento, caldeiras, geradores de vapor, fornos, fomalhas, estufas e secadores para a geração e uso de energia térmica, gaseificadores e centrais à biomassa para a geração de energia elétrica, respeitadas as condições abaixo:

1. Teor de cinzas do lodo abaixo de 50%.

Caso o teor de cinzas seja maior que 50%, só é recomendável a queima do lodo quando a empresa for obrigada pelo legislador/controlador ambiental, ou quando quiser eliminar o lodo para evitar aterrá-lo. Caso contrário, é tecnicamente desaconselhado em função dos problemas de incrustações em equipamentos.

2. Baixo conteúdo de óxidos básicos de fósforo e óxidos de ferro na composição das cinzas do lodo.

Caso o lodo apresente elevado conteúdo de óxidos básicos de fósforo e óxidos de ferro na composição de suas cinzas, só é recomendável sua utilização para co-processamentos e em proporções não superiores a 15%. Caso contrário, é tecnicamente desaconselhado em função da forte tendência à formação de depósitos e incrustação nos equipamentos.

Energia bruta prevista = 6,309 kWh/kg de lodo

Receita bruta prevista com a venda da energia gerada a partir do lodo para distribuidoras de energia elétrica = R\$ 144,20 / MWh ou R\$ 0,14 / kWh

Emissões de Dióxido de Enxofre (SO₂) estão de acordo com os limites estabelecidos na Resolução nº 316/2002 (CONAMA, 2002).

Limite máximo de Monóxido de Carbono (CO) ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Monóxido de Carbono forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.

Quantidade de Fluoreto de Hidrogênio (HFI) não informada! Limite de Fluoreto de Hidrogênio (HFI) não avaliado!

Quantidade de Dioxinas e Furanos não informada! Limite de Dioxinas e Furanos não avaliado!

Emissões de Dióxido de Nitrogênio (NO₂) estão de acordo com os limites estabelecidos na Resolução nº 316/2002 (CONAMA, 2002).

Emissões de Materiais Particulados estão de acordo com os limites estabelecidos na Resolução nº

316/2002 (CONAMA, 2002).

Quantidade de Material Particulado com agrupamento de cádmio (Cd), mercúrio (Hg), tálio (Tl) não informada! Limite de Material Particulado com agrupamento de cádmio (Cd), mercúrio (Hg), tálio (Tl) não avaliado!

Emissões de Cloreto de Hidrogênio (HCl) estão de acordo com os limites estabelecidos na Resolução nº 316/2002 (CONAMA, 2002).

Quantidade de Material Particulado com agrupamento de arsênio (As), cobalto (Co), níquel (Ni), telúrio (Te), selênio (Se) (MPIO) não informada! Limite de Material Particulado com agrupamento de arsênio (As), cobalto (Co), níquel (Ni), telúrio (Te), selênio (Se) não avaliado!

Quantidade de Material Particulado com agrupamento de cobre (Cu), estanho (Sn), flúor (F), manganês (Mn), platina (Pt), paládio (Pd), ródio (Rh), vanádio (V) não informada! Limite de Material Particulado com agrupamento de cobre (Cu), estanho (Sn), flúor (F), manganês (Mn), platina (Pt), paládio (Pd), ródio (Rh), vanádio (V) não avaliado!

Não foi realizado ensaio Lixiviação de Resíduos no lodo! Não é possível realizar a avaliação da toxicidade (metais pesados) do lodo com base no ensaio de lixiviação conforme recomendado pela NBR 10004/04 (ABNT, 2004).

Quantidade de Arsênio (As) na amostra bruta do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/87 (ABNT, 1987).

Quantidade de Berílio na amostra bruta do lodo não informada! Limite de Berílio na amostra bruta do lodo não avaliado.

Quantidade de Chumbo (Pb) na amostra bruta do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/87 (ABNT, 1987).

Quantidade de Cianeto na amostra bruta do lodo não informada! Limite de Cianeto na amostra bruta do lodo não avaliado.

Limite máximo de Cromo VI na amostra bruta do lodo ultrapassado! O lodo apenas poderá ser utilizado para gerar energia em processos de combustão se medidas atenuantes para redução de Cromo VI forem tomadas. Caso estas medidas não sejam efetivamente tomadas, a combustão do lodo analisado oferecerá riscos à população e/ou ao meio ambiente.

Índice de Fenóis na amostra bruta do lodo não informado! Limite de Índice de Fenóis na amostra bruta do lodo não avaliado.

Quantidade de selênio na amostra bruta do lodo não informada! Limite de Selênio na amostra bruta do lodo não avaliado.

Quantidade de Mercúrio (Hg) na amostra bruta do lodo está de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 10004/87 (ABNT, 1987).

Quantidade de Vanádio na amostra bruta do lodo não informada! Limite de Vanádio na amostra bruta do lodo não avaliado.

Para entrada de dados da Análise Elementar, Análise Imediata e Potencial Energético pode ser escolhida uma das quatro opções abaixo em função da disponibilidade de dados:

Opção 1:

Análise química imediata: Carbono Fixo (%F em b.s.), Volátil (%V em b.s.), Umidade (%W em b. s.)

Análise química elementar: Hidrogênio (%H em b.s.)

Opção 2:

Análise química elementar: Hidrogênio (%H em b.s.), Umidade (%W em b. s.), Cinzas (%A em b.s.), Enxofre (%S em b.s.), Carbono (%C em b.s.), Oxigênio (%O em b.s.)

Opção 3:

PCS obtido em laboratório

Análise química elementar: Hidrogênio (%H em b.s.), Umidade (%W em b. s.)

Opção 4:

PCI, caso este já seja conhecido pelo usuário.

A avaliação dos limites de emissões de poluentes atmosféricos é válida apenas para processos de combustão cuja operação seja realizada acima da temperatura de oitocentos graus celsius conforme estabelecido pela Resolução 316/2002 (CONAMA).

Os parâmetros de emissões gasosas e material particulados devem ser medidos a partir de testes realizados em conformidade com o exigido pela Resolução 316/2002 (CONAMA) e ser corrigidos pelo teor de oxigênio, na mistura de gases de combustão, do ponto de descarga, para sete por cento em base seca.

Parâmetros e Limites Utilizados para a Avaliação do Lodo de Esgoto como Biomassa para Gerar Energia em Processos de Combustão:

1) Avaliação do Potencial Energético do Lodo:

Poder Calorífico Inferior (PCI) em MJ/kg

PCI < 4 MJ/kg Lodo Classe IV: não apresenta potencial para gerar energia em processos de combustão;

4 <= PCI < 10,467 MJ/kg Lodo Classe III: apresenta baixo potencial para gerar energia em processos de combustão;

10,467 <= PCI < 18,08 MJ/kg Lodo Classe II: apresenta médio potencial para gerar energia em processos de combustão;

PCI >= 18,08 MJ/kg Lodo Classe I: apresenta alto potencial para gerar energia em processos de combustão.

2) Avaliação de Corrosão e Incrustações em Equipamentos:

Cloro (%Cl) %Cl <= 0,1%

Cinzas (%A) %A <= 30%

3) Avaliação dos Contaminantes (Metais Pesados):

* Metais pesados no Lixiviado do Lodo (ABNT, 2004):

Ar (mg/L)	ArLx <= 1 mg/L
Ba (mg/L)	BaLx <= 70 mg/L
Cd (mg/L)	CdLx <= 0,5 mg/L
Pb (mg/L)	PbLx <= 1 mg/L
Cr (mg/L)	CrLx <= 5 mg/L
Fluoreto (mg/L)	FluoretoLx <= 150 mg/L
Hg (mg/L)	HgLx <= 0,1 mg/L
Prata (mg/L)	PrataLx <= 5 mg/L
Se (mg/L)	SeLx <= 1 mg/L

* Metais Pesados na Amostra Bruta do Lodo (ABNT, 1987):

As (mg/Kg)	As <= 1000 mg/Kg
Be (mg/Kg)	Be <= 100 mg/Kg
Pb (mg/Kg)	Pb <= 1000 mg/Kg
CN (mg/Kg)	CN <= 1000 mg/Kg
Cr (mg/Kg)	Cr <= 100 mg/Kg
Índice de Fenóis (mg/Kg)	IFenóis <= 10 mg/Kg
Hg (mg/Kg)	Hg <= 75 mg/Kg
Se (mg/Kg)	Se <= 100 mg/Kg
V (mg/Kg)	V <= 1000 mg/Kg

4) Avaliação das Emissões de Poluentes Atmosféricos (Emissões Gasosas e Materiais Particulados):

* Emissões Gasosas (CONAMA - Resolução nº 316/2002):

SO ₂	SO ₂ <= 280 mg/Nm ³
NO ₂	NO ₂ <= 560 mg/Nm ³
CO	CO <= 100 ppm/ Nm ³
HCl	HCl <= 80 mg/Nm ³
HFI	HFI <= 5 mg/Nm ³
Dioxinas e Furanos	DF <= 0,50 (ngTQE/Nm ³)

* Emissão de SOX em Função da Quantidade de Enxofre:

Enxofre (%S) %S <= 0,2%

* Emissão de HCl em Função da Quantidade de Cloro:

Cloro (%Cl) %Cl <= 0,1%

* Materiais Particulados (CONAMA - Resolução nº 316/2002):

MP <= 70 mg/Nm³

MP I <= 0,28 mg/Nm³ (Material Particulado com agrupamento de cádmio (Cd), mercúrio (Hg), tálio (Tl));

MP II <= 1,4 mg/Nm³ (Material Particulado com agrupamento de arsênio (As), cobalto (Co), níquel (Ni), telúrio (Te), selênio (Se));

MP III <= 7 mg/Nm³ (Material Particulado com agrupamento de cobre (Cu), estanho (Sn), flúor (F), manganês (Mn), platina (Pt), paládio (Pd), ródio (Rh), vanádio (V))

OBS: Os parâmetros medidos devem ser corrigidos pelo teor de oxigênio, na mistura de gases de combustão, do ponto de descarga, para sete por cento em base seca (CONAMA - Resolução nº 316/2002).

Considera-se o valor de R\$ 144,20 / MWh como receita bruta prevista com a venda da energia gerada a partir do lodo para distribuidoras de energia elétrica. Este valor é o mesmo pago pelas distribuidoras de energia elétrica na contratação de geração distribuída a partir de biomassa no 2º Leilão de Fontes Alternativas da ANEEL realizado em 25 e 26 de agosto de 20

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

Sistema para avaliar lodos de esgoto como biomassa na geração de energia em processos de combustão

Base de conhecimento: Avaliação de Lodos de Esgoto como Biomassa para Gerar Energia em Processos de Combustão

Poder Calorífico Inferior do Lodo em MJ/kg (PCI == PND)

Se PCS = PND (PCS==PND)

Se %V = PND ou %F=PND (V==PND || F==PND)

Cálculo PCS com análise elementar ($PCS = 0.3491 * C + 1.1783 * H + 0.1005 * S - 0.1034 * O - 0.0151 * N - 0.0211 * A$)

Cálculo do PCI em MJ/kg ($PCI = (PCS * 1000 - 219.60 * H - 24.40 * W) / 1000$)

Se PCS != PND (PCS != PND)

Cálculo do PCI em MJ/kg ($PCI = (PCS * 1000 - 219.60 * H - 24.40 * W) / 1000$)

Avaliação de problemas de incrustações e corrosão (PCI != PND)

Se %Cl > 0,1% (Cl > 0.1)

Avaliação do Potencial Energético do lodo em processos de combustão (PCI != PND)

Se PCI >= 18,08 MJ/Kg Lodo Classe I (PCI >= 18.08)

Energia bruta prevista em kWh/kg do lodo avaliado (Energia = PCI * 0.28)

Se SO2 <= 280 mg/Nm³ limites de SO2 dentro da Norma (SO2 <= 280 && SO2 >= 0)

Se CO > 100 ppm/ Nm³ limite CO ultrapassado (CO > 100)

Se HFI=PND Limite de HFI não avaliado (HFI == PND)

Se DF=PND limite de DF não avaliado (DF == PND)

Se NO2 <= 560 mg/Nm³ limite de NO2 dentro da norma (NO2 <= 560 && NO2 >= 0)

Se MP <= 70 mg/Nm³ limites de MP dentro da Norma (MP <= 70 && MP >= 0)

Se MPI=PND limite de MPI não avaliado (MPI == PND)

Se HCl <= 80 mg/Nm³ Limite de HCl dentro da Norma (HCl <= 80 && HCl >= 0)

Se MP1I=PND limite de MP1I não avaliado (MP1I == PND)

Se MP1II=PND limite de MP1II não avaliado (MP1II == PND)

Foi realizado ensaio de Lixiviação de Resíduo no lodo? (EnsaioLixiviado == NAO)

Se As <= 1000 mg/Kg limite de As na amostra bruta dentro da norma (As <= 1000 && As >= 0)

Se Be=PND limite de Be na amostra bruta do lodo não avaliado (Be == PND)

Se Pb <= 1000 mg/Kg limite de Pb na amostra bruta do lodo dentro da norma (Pb <= 1000 && Pb >= 0)

Se CN=PND limite de CN na amostra bruta do lodo não avaliado (CN == PND)

Se Cr > 100 mg/Kg limite de Cr VI na amostra bruta do lodo ultrapassado (Cr > 100)

Se IFenóis =PND limite de Índice de Fenóis na amostra bruta do lodo não avaliado (IFenóis == PND)

Se Se=PND limite de Se na amostra bruta do lodo não avaliado (Se == PND)

Se Hg <= 100 mg/Kg limite de Hg na amostra bruta do lodo dentro da norma (Hg <= 100 && Hg >= 0)

0)

Se Vanádio=PND limite de V na amostra bruta do lodo não avaliado (Vanadio == PND)

**ANEXO A - ANEXO F DA NBR 10004/2004 -
CONCENTRAÇÃO – LIMITE MÁXIMO NO EXTRATO
OBTIDO NO ENSAIO DE LIXIVIAÇÃO**

Anexo F (normativo)

Concentração – Limite máximo no extrato obtido no ensaio de lixiviação

Parâmetro	Código de identificação	Limite máximo no lixiviado mg/L	CAS - Chemical Abstrat Substance
Inorgânicos			
Arsênio	D005	1,0	7440-38-2
Bário	D006	70,0	7440-39-3
Cádmio	D007	0,5	7440-43-9
Chumbo	D008	1,0	7439-92-1
Cromo total	D009	5,0	7440-47-3
Fluoreto	D010	150,0 **)	
Mercúrio	D011	0,1	7439-97-6
Prata	D012	5,0 ¹⁾	7440-22-4
Selênio	D013	1,0	7782-49-2
Pesticidas			
Aldrin + dieldrin	D014	0,003 **)	309-00-2; 60-57-1
Clordano (todos os isômeros)	D015	0,02	57-74-9
DDT (p, p' DDT+ p, p' DDD + p, p' DDE)	D016	0,2	50-29-3
2,4-D	D026	3,0	94-75-7
Endrin	D018	0,06	72-20-8
Heptacloro e seus epoxidos	D019	0,003	76-44-8
Lindano	D022	0,2	58-89-9
Metoxicloro	D023	2,0	72-43-5
Pentaclorofenol	D024	0,9	87-86-5
Toxafeno	D025	0,5 ¹⁾	8001-35-2
2,4,5-T	D027	0,2 **)	93-76-5
2,4,5-TP	D028	1,0 ¹⁾	93-72-1
Outros orgânicos			
Benzeno	D030	0,5 ¹⁾	71-43-2
Benzo(a) pireno	D031	0,07	50-32-8

ABNT NBR 10004:2004

Parâmetro	Código de identificação	Limite máximo no lixiviado mg/L	CAS - <i>Chemical Abstrat Substance</i>
Outros orgânicos			
Cloreto de vinila	D032	0,5	75-01-4
Clorobenzeno	D033	100 ^{*)}	108-90-70
Clorofórmio	D034	6,0 ^{*)}	67-86-3
Cresol total ^{***)}	D035	200,0 ^{*)}	
o-Cresol	D036	200,0 ^{*)}	95-48-7
m-Cresol	D037	200,0 ^{*)}	108-39-4
p-Cresol	D038	200,0 ^{*)}	106-44-5
1,4-Diclorobenzeno	D039	7,5 ^{*)}	106-46-7
1,2-Dicloroetano	D040	1,0	107-06-2
1,1-Dicloroetileno	D041	3,0	75-35-4
2,4-Dinitrotolueno	D042	0,13 ^{*)}	121-14-2
Hexaclorobenzeno	D021	0,1	118-74-1
Hexaclorobutadieno	D043	0,5 ^{*)}	87-88-3
Hexacloroetano	D044	3,0 ^{*)}	67-72-1
Metiletilcetona	D045	200,0 ^{*)}	78-93-3
Nitrobenzeno	D046	2,0 ^{*)}	98-95-3
Piridina	D047	5,0 ^{*)}	110-86-1
Tetracloroeto de carbono	D048	0,2	56-23-5
Tetracloroetileno	D049	4,0	127-18-4
Tricloroetileno	D050	7,0	79-01-6
2,4,5-Triclorofenol	D051	400,0 ^{*)}	95-95-4
2,4,6-Triclorofenol	D052	20,0	88-06-2
<p>*) Parâmetros e limites máximos no lixiviado extraídos da USEPA - <i>Environmental Protection Agency 40 CFR - Part 261 - 24 - Toxicity Characteristics</i>.</p> <p>**) Parâmetro e limite máximo no lixiviado mantido, extraído da versão anterior da ABNT NBR 10004:1987.</p> <p>***) O parâmetro Cresol total somente deve ser utilizado nos casos em que não for possível identificar separadamente cada um dos isômeros</p> <p>NOTA Os demais poluentes e limites máximos no lixiviado deste anexo foram baseados na Portaria nº 1469/2000 do MS, multiplicados pelo fator 100.</p>			